

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hadj Lakhdar Batna

Faculté de Technologie

Département d'Electronique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT en SCIENCES en Électronique

OPTION

Micro-ondes pour Télécommunications

Par

ACHACHI Abdelali

Thème

Modélisation d'un système de contrôle aérien par satellites

Soutenue le 11 Mai 2015 devant le jury composé de :

Dr. Tarek FORTAKI	Prof.	Université de Batna	Président
Dr. Djamel BENATIA	Prof.	Université de Batna	Rapporteur
Dr. Djemai ARAR	Prof.	Université de Batna	Examineur
Dr. Malek BENSLAMA	Prof.	Université de Constantine	Examineur
Dr. Abdelhafid CHAABI	Prof.	Université de Constantine	Examineur
Dr. Djamel KHEDROUCHE	M.C.A.	Université de M'Sila	Examineur

Remerciements

Tout d'abord, je dois remercier Dieu qui m'a donné la santé et la volonté jusqu'à l'accomplissement de ce travail.

*Je voudrais remercier mon directeur de thèse Mr. **Benatia Djamel** ; professeur à l'université de Batna pour son aide, pour la qualité de son encadrement, sa rigueur, sa disponibilité, ses remarques fructueuses et ses directives précieuses.*

*Je remercie doublement Mr. **FORTAKI Tarek** professeur à l'université de Batna de m'avoir également fait l'honneur de présider le jury.*

Je tiens à remercier les membres du jury : Pr. Djemai ARAR, Pr. Malek BENSLAMA, Pr. Abdelhafid CHAABI et Dr. Djamel KHEDROUCHE d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens aussi à remercier mes collègues qui ont contribué à l'avancement de mes travaux de thèse. Je n'oublie pas de remercier vivement mes amis pour leurs aides, leurs conseils et leurs patiences.

Dédicaces

A :

Mes filles : Amena, Fatima Zohra et Rahma

Toute ma famille

Tous mes collègues et amis.

Résumé

Le contrôle aérien doit faire face à une forte augmentation du trafic aérien, la nécessité d'accroître la capacité des secteurs a motivé la restructuration de l'espace aérien. Dans cette thèse, nous examinons l'utilisation des satellites basses orbites (LEO) dans la gestion du trafic aérien. Une première étape de ce travail consiste en une analyse critique des systèmes actuels. Cette étude souligne les faiblesses des solutions actuelles qui souffrent de limites des zones couvertes. Dans cette thèse, on propose alors de suivre cette démarche et de concevoir une constellation satellitaire pour intégrer ces différentes solutions dans un seul système et de pouvoir visualiser efficacement tout le trafic aérien à travers tout le globe terrestre. L'analyse de ce système nous conduit à étudier le phénomène du Handover et de choisir un modèle qui offre un meilleur niveau de communication en assurant une flexibilité importante dans la transmission d'information. Les résultats obtenus concernent la probabilité de blocage de nouveaux contacts et la probabilité d'échec du Handover en vue d'une diminution significative de cette dernière, ce qui permet d'avoir de meilleures performances. Enfin, nous proposons d'utiliser cette technique à l'intérieur des cockpits pour visualiser le trafic évoluant aux alentours en évitant ainsi les collisions entre aéronefs. Ces solutions ont été élaborées afin de réduire la charge de travail chez les contrôleurs aériens et augmenter la sécurité aéronautique.

Mots clés :

Contrôle aérien, Satellites LEO, communication, Handover, TCAS.

Abstract

Air traffic control is facing an important increase in air traffic; the need to increase the capacity of sectors prompted the restructuring of the airspace. In This thesis, we discuss of the use of low earth orbit satellites (LEO) in air traffic management. A first step in this work is a critical analysis of existing systems. This study highlights the weaknesses of current solutions suffering from limitations of the covered areas. The thesis then proposes to follow this approach, and develop a satellite constellation to integrate these different solutions in a single system and to effectively visualize all air traffic across the entire globe. The analysis of this system leads us to study the phenomenon of Handover, and choose a model that offers a better level of communication and provides significant flexibility in the information transmission. The simulation results of the blocking probability of new contacts and the probability of failure of the handover in order to decrease it and obtained a best performance. Finally, we propose to use this technique inside the cockpit to see the traffic moving around to avoid collisions between aircraft. These solutions have been developed to reduce the workload for air traffic controllers and increase air safety.

Keywords:

Air traffic control, LEO satellites, communication, Handover, TCAS.

TABLE DE MATIERES

Chapitre I *Introduction Générale*

I.1 Introduction	1
I.2 Objectif de ce travail	3
I.3 Plan de la Thèse	4

Chapitre II *Généralités sur le contrôle aérien*

II.1. Introduction	6
II.2 Présentation du système existant	6
II.2.1 La conception actuelle	7
II.2.2 Un système semble saturé.....	8
II.3 Les évolutions possibles	8
II.3.1 Les changements conceptuel	8
II.3.2 L'automatisation dans l'avion	9
II.3.3 L'automatisation des systèmes de contrôle aérien	9
II.3.4 Le système de détection de conflit centralisé (STCA)	10
II.3.5 Conclusion sur les évolutions du trafic aérien	10
II.4 Système de gestion du vol (FMS)	11
II.5 Planification	11
II.6 Limite du système actuel	12
II.7 Classification des systèmes radars	12
II.7.1 Radars primaires	12
II.7.2 Radars à diversité de fréquence	13
II.7.3 Radars secondaires	13
II.8 Volume de protection pour un avion	14
II.9 Système de contrôle aérien actuel	15
II.10 Conclusion	16

Chapitre III

Les satellites dans la navigation aérienne

III.1 Introduction	17
III.1.1 L'évolution des satellites	17
III.1.2 Définition d'un satellite	17
III.1.3 Les orbites	18
III.2 Les contraintes des solutions satellites	18
III.2.1 La couverture	19
III.2.2 L'effet Doppler (Satellite / Station terrestre).....	19
III.2.3 Le délai de propagation	19
III.3 Présentation de la technologie VSAT	19
III.3.1 Les stations VSAT	20
III.3.2 Les applications	20
III.4 Utilité de la technologie VSAT	20
III.5 Le GPS et GNSS.....	20
III.6 Conception de la constellation de satellites	21
III.6.1 La géométrie du système de base	22
III.6.2 Liaisons Inter Satellite (ISL)	25
III.6.3 Exigences de satellite	26
III.7 Conclusion	26

Chapitre IV

Le HANDOVER dans les communications pilotes/contrôleurs

IV.1 Introduction	28
IV.1.1 Coordination assistée par le satellite.....	29
IV.2. Modèle de données et préliminaire	30
IV.2.1 Objectif Principal	30
IV.2.2 Transfert de Communication	30
IV.2.3. Processus de Handover.....	30
IV.2.4 Fonction du Handover	32
IV.2.4.1. Handover dans un cas satellite/ avion	32

IV.2.4.2. Handover tour de contrôle avec satellite et vis versa	32
IV.2.4.3. Handover satellite avec satellite	33
IV.2.4.4. Handover automatisée entre secteurs ATC	34
IV.2.4.5. Handover entre les cellules satellitaires desservant le même secteur ATC	35
IV.2.4.6. Handover entre les secteurs ATC dans la même cellule satellitaire.....	35
IV.2.5. Gestion des phases Handover	36
IV.2.6. Contrôle du Handover.....	36
IV.3 Modèle de Trafic	38
IV.3.1 Hong et le trafic Modèle de Rappaport (en deux dimensions)	38
IV.3.2 Zeng et al Modèle Approché Traffic (Toute Dimensional)	39
IV.4 Les stratégies de priorité pour les requêtes de Handover	39
IV.4.1 Stratégie de non priorité (NPS)	40
IV.4.2 Stratégie de priorité	41
IV.4.2.1 Technique de mise en queue des requêtes de Handover (Queuing Priority Schemes) (QPS)	41
IV.4.2.2 Stratégie de réservation de canaux de garde (RCS)	43
IV.4.2.3 Technique de mise en queue avec l'utilisation des Canaux de garde (QPS+RCS)	45
IV.4.2.4 Technique de mise en queue pour les nouveaux contacts et Handover avec l'utilisation des Canaux de garde [QPS (H + N) + RCS (H)]	46
IV.5 Résultats de simulation	47
IV.6 Temps de simulation	54
IV.7 Appréciation des résultats.....	57
IV.8 Conclusion	57

Chapitre V

Le système de communication anticollision TCAS

V.1 Introduction	59
V.1.1 Le système anticollision actuel	59
V.2 Modèle de données et préliminaire	61
V.2.1 Description technique du TCAS II	62
V.2.2 Répondre Structure	62

V.3 Fonctionnement du nouveau système	63
V.3.1 Description technique du système proposé	64
V.3.2 La logique d'évitement de collision	66
V.3.3 Résolution Algorithme et priorité	68
V.3.4 Détection des conflits	69
V.4 Simulations	70
V.5 Conclusion	76

<i>Conclusion générale</i>	77
---	----

<i>Références bibliographiques</i>	80
---	----

Liste des figures

Figure II.1. Sectorisation de l'espace aérien Algérien	7
Figure II.2. Radar primaire et secondaire d'Alger	12
Figure II.3. Couverture radar de l'espace aérien Algérien	14
Figure II.4. Espace de protection d'un avion à un instant t	14
Figure II.5. Schéma synoptique de système de contrôle actuel	15
Figure III.1. Utilisation des satellites dans la navigation aérienne	21
Figure III.2. La constellation proposée de satellites LEO	22
Figure III.3. La géométrie de base de système	23
Figure III.4. Calotte sphérique de rayon R et de hauteur h	24
Figure IV.1. Hard Handover entre l'avion et les satellites	31
Figure IV.2. Schéma synoptique de communication terrestre satellite avion	33
Figure IV.3. Processus d'arrivée des Requêtes pour NPS	40
Figure IV.4. Organigramme de NPS	40
Figure IV.5. Système avec la priorité de la mise en file d'attente pour le Handover ...	41
Figure IV.6. Organigramme de QPS	42
Figure IV.7. Processus d'arrivée des requêtes pour RCS	43
Figure IV.8. Organigramme de RSC	44
Figure IV.9. Modèle de système avec le canal de réservation et la file d'attente pour le Handover	45
Figure IV.10. Diagramme d'état pour QPS+RCS	45
Figure IV.11. Modèle du système avec la priorité et la file d'attente pour le Handover et nouveau contact	47
Figure IV.12. La probabilité d'échec de nouveaux contacts en fonction de l'intensité du trafic aérien pour deux modèles	48
Figure IV.13. La probabilité d'échec de Handover en fonction de l'intensité du trafic aérien pour deux modèles	49
Figure IV.14. La probabilité d'échec de Handover en fonction de l'intensité du trafic pour les différents modèles	50
Figure IV.15. La probabilité d'échec de Handover en fonction de l'intensité du trafic aérien pour les différents modèles	50
Figure IV.16. La probabilité de blocage des requêtes de Handover pour RCS.....	51
Figure IV.17. La probabilité de blocage des nouveaux contacts pour RCS.....	52
Figure IV.18. La probabilité de blocage des requêtes de Handover pour RCS+QPS...	53
Figure IV.19. La probabilité de blocage des nouveaux contacts pour RCS+QPS.....	53

Figure IV.20. Le temps moyen d'attente (FCA Queuing with FIFO discipline) 150 S.	54
Figure IV.21. Le temps moyen d'attente (OPS+RCS) 150 S.....	55
Figure IV.22. Le temps moyen d'attente (FCA Queuing with FIFO discipline) 250 S.	56
Figure IV.23. Le temps moyen d'attente (OPS+RCS) 950 S.....	56
Figure V.1. Nombreuses positions et orientations possibles pour un appareil montré par TCAS actuelle	60
Figure V.2. Présentation du TCAS actuelle	61
Figure V.3. Schéma synoptique du TCAS	62
Figure V.4: Comparaison entre l'actuel système et notre modèle	64
Figure V.5. Distance et la géométrie de la Terre	65
Figure V.6. Fonctions logiques CAS	67
Figure V.7. Réduire l'espace vertical et horizontal	70
Figure V.8. Résolution horizontale	71
Figure V.9. La résolution verticale et horizontale.....	71
Figure V.10. Avions en face à face	72
Figure V.11. Illustration de dépassement d'un Avion derrière un autre	73
Figure V.12. Résolution verticale puis horizontale	73
Figure V.13. Situation horizontale et verticale de trois avions	74
Figure V.14. La réduction de nombre d'alarme avec la nouvelle technique	75

Liste des tableaux

Tableau III.1. Désignation des orbites de la constellation	22
Tableau III.2. Paramètres de la constellation proposée	25
Tableau V.1. Mode de réponse de la structure S	63

Glossaire

ACAS: Alert Collision Avoidance System.

ACM: ATC Communication Management.

ADS-B: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast.

AOCS: Attitude and Orbit Control Subsystem).

ATC: Air Traffic Control (Contrôle de la circulation aérienne).

ATM: Air Traffic Management (Gestion de la circulation aérienne).

ATN: Aeronautical Telecommunication Network (Réseau de télécommunication aéronautique).

CAF: Channel Allocation Fixe.

CAS: Collision Avoidance System.

CBP: Contact Blocage Probability.

CCR: Centres de Contrôle Régional.

CPA: Closest Point of Approach.

Cr: Convergence rate.

CTR: Control Terminal Region (zone de contrôle terminal).

DPSK: Différentiel Phase Shift Keying.

ELEO: Equatorial Low Earth Orbit.

ENNA : Etablissement National de la Navigation Aérienne.

FDPS: Flight Data Processing Systems (Systèmes de Traitement de Plans de Vol).

FIFO: First Input First Output.

FL: Flight Level (Niveau de vol).

FMS: Flight Management System (Système de gestion de vol).

GLONASS: Global Navigation Satellite System.

GNSS: Global Navigation Satellite System.

GPS: Global Positioning System.

ISL: Inter Satellite Link (les liens inter-satellites).

LEO: Low Earth Orbit.

MAHO: Mobile Assisted Handover.

MCHO: Mobile Controlled Handover.

MEO: Medium Earth Orbit.

NAHO: Network Assisted Handover.

NCHO: Network Controlled Handover.

NM: Nautical Mile (1 NM = 1852m).

NMAC: (Near Mid Air Collision).

NPS: Non Priority Strategy.

OACI: Organisation de l'Aviation Civile Internationale.

OLDI: On-Line Data Interchange.

PSR: Primary Surveillance Radar (Radar primaire).

QPS: Queuing Priority Scheme (Technique de mise en queue).

RCS: Reservation Channel Scheme (Stratégie de réservation de canaux de garde).

RVSM: Reduced Vertical Separation Minimum.

SSR: Secondary Surveillance Radar (radar secondaire).

STCA: System Traffic Collision Avoidance.

TA: Traffic Advisory (avis de trafic).

TCAS: Traffic Collision Avoidance System.

TR: Resolution Advisory (avis de résolution).

VSAT : Very Small Aperture Terminal (terminal à très petite ouverture).

Introduction Générale

Introduction Générale

Contenu du Chapitre

I.1 Introduction	1
I.2 Objectif de ce travail	3
I.3 Plan de la Thèse	4

I.1 Introduction

Le contrôle de la circulation aérienne est actuellement assuré par les systèmes radars secondaires [1-5] (SSR) et primaires (PSR) [6] dans les zones à forte densité de trafic aérien comme le nord Algérien et l'espace européen. Dans les zones à faibles densité de trafic, comme le sud algérien, les zones désertiques et océaniques, les avions sont contrôlés à la méthode classique (déclaration des pilotes et imagination des contrôleurs). La méthode classique présente plusieurs inconvénients tels que : multiplication de nombre d'accidents et d'incidents, la faible capacité des secteurs et la charge excessive de travail des contrôleurs. Les systèmes radars sont efficaces mais leurs implantations et maintenances sont trop coûteuses et ils sont très sensibles aux phénomènes météorologiques. L'Etablissement National de la Navigation Aérienne (ENNA) a installé cinq radars qui couvrent la partie nord de l'Algérie (environ un tiers de l'espace global) et prévoit l'installation de plusieurs autres stations dans le futur proche pour assurer la couverture totale de l'espace aérien Algérien.

L'utilisation des satellites dans l'aviation [7-10] commence à être de plus en plus intéressante vu la couverture importante d'un satellite (plusieurs dizaines de fois) par rapport à celle du radar secondaire.

Néanmoins, les satellites basse orbite ne sont pas stationnaires; un contact entre l'avion et le satellite peut être soumis à des transferts intercellulaires. De nombreuses techniques ont été proposées dans la littérature pour faire face au problème de changement de cellule. Dans cette thèse, la procédure de blocage de (Handover) [11-14] des communications est estimée par simulation. Pour réduire le nombre élevé de transferts, certaines stratégies sont utilisées pour en faire face. Les modèles de simulation ont été utilisés pour améliorer toutes les caractéristiques évaluées dans les communications entre contrôleurs et pilotes ainsi que les échanges des données techniques et de navigation.

Parmi les techniques les plus utilisées [15-17], la réservation de canaux exclusivement pour les requêtes des Handovers, un certain nombre de canaux est réservé dans les cellules. Dans le cas contraire, les requêtes de Handover et des nouveaux contacts sont traités par le même ordre de priorité. Dans cette thèse, nous nous intéressons aux méthodes qui donnent la priorité aux requêtes de Handover, en particulier leur mise en file d'attente.

Selon la littérature [18], les services de contrôle de la circulation aérienne ont introduit de nouveaux systèmes pour permettre une meilleure visualisation du trafic aérien afin d'assurer la sécurité aérienne et éviter des conflits entre aéronefs [19, 20] (collisions potentielles). Parmi les systèmes actuels utilisés, on trouve les nouvelles stations radars secondaires implantées aux sommets des reliefs ainsi que les aides radioélectriques de différents types et portées. Les contrôleurs aériens sont chargés de suivre l'évolution des aéronefs dans un secteur déterminé en leur assurant des espacements réglementaires requis qui varient en fonction des moyens utilisés [21].

On prévoit que l'augmentation actuelle du trafic aérien continue à accroître d'une année à une autre vu l'augmentation du nombre de passagers. Cette hausse du trafic nous oblige à penser à des solutions efficaces tout en améliorant et en maintenant le niveau actuel de sécurité. Notre contribution, dans ce sens, consiste à l'utilisation des techniques récentes [18-

21] qui se basent sur la division des secteurs en petits secteurs en utilisant des équipements sophistiqués qui aident à augmenter la capacité actuelle de ces secteurs.

I.2 L'objectif de ce travail

Les moyens de communications de contrôle aérien actuels sont basés sur l'utilisation des fréquences VHF (118 MHz-136 MHz) qui présente l'inconvénient d'être saturée par un seul avion, cette gamme de fréquences est devenue insuffisante pour répondre aux besoins des utilisateurs de l'espace aérien. La solution de ce problème consiste au développement de l'utilisation des satellites basses orbites où le phénomène de Handover est inévitable. Notre premier objectif est d'étudier le processus de Handover dans les communications pilotes/contrôleurs ou échanges des données avions/stations sol via satellites, dans cette thèse on effectue une comparaison entre différents modèles pour choisir celui offrant les meilleures performances en proposant une constellation avec un taux de Handover faible.

Notre second objectif est l'utilisation de cette technique à bord des aéronefs pour développer les systèmes anticollision. Les systèmes d'alerte et d'évitement de collision TCAS (Traffic Collision Avoidance System) [22-24] ont été développés pour réduire le risque de collision en vol et est actuellement installé sur tous les avions de transport. Ce système est basé sur les interrogations entre aéronefs pour déterminer l'altitude et la position relative des avions à proximité. Malgré les progrès techniques dans les systèmes de control aérien [25], il y a des cas où la séparation réglementaire entre aéronefs n'est pas assurée en raison d'une erreur humaine ou défaillance technique. Toute défaillance de cette séparation peut entraîner un risque accru de collision en vol. Ces systèmes génèrent un taux élevé d'alarmes inutiles en particulier dans les zones terminales denses et les pilotes deviennent stressés et des mauvaises manœuvres peuvent être entreprises. Une nouvelle technique du TCAS est étudiée dans cette thèse pour compenser les défaillances humaines et techniques qui peuvent avoir lieu à tout moment afin de diminuer le risque de collision et le taux d'alertes inutiles. Elle est basée sur la

transmission des altitudes et les coordonnées géographiques entre les transpondeurs embarqués via satellites pour déterminer les positions exactes et les orientations du mouvement des avions à proximité.

Les constellations de satellites basse orbite LEO (Low Earth Orbit) [26,27] sont importantes dans le futur des réseaux de communication du contrôle de la circulation aérienne (ATC) en raison de leurs avantages, telles que la couverture globale, coût de réalisation et de lancement réduit et le temps faible de propagation. Beaucoup de constellations LEO ont été proposées dans la littérature (Iridium, Globalstar, etc.), tandis que le fonctionnement du système Iridium a donné une expérience très importante pour l'étude des problèmes sérieux de ces systèmes.

Cette thèse propose également l'étude d'un système de circulation aérienne en accord avec les systèmes qui existent déjà, basés sur les communications satellitaires, à savoir la réduction de la quantité de conflits et de la consommation. Dans le système proposé, les avions transmettent les données et les conversations entre pilotes et contrôleurs durant la totalité de leur trajet. Les routes doivent être organisées de telle sorte qu'il n'y ait pas de conflits entre les avions et que les avions consomment moins de carburant qu'actuellement sur la globalité de leur trajet, notamment grâce à un raccourcissement de la distance parcourue et à la possibilité de suivre des routes à consommation optimale.

I.3 Plan de la thèse

Cette thèse est organisée comme suit :

Dans *le premier chapitre*, nous avons présenté une introduction générale avec l'état de l'art ainsi que le but de ce travail.

Le second chapitre décrit dans un premier temps les généralités sur les systèmes de contrôle aérien actuels et ses limites ; les évolutions envisagées du système sont ensuite présentées, ainsi que la position de cette thèse par rapport à ces évolutions.

Dans *le troisième chapitre*, nous exposons de manière plus approfondie l'utilisation des différentes constellations de satellites dans la navigation aérienne en décrivant d'une façon détaillée les constellations de satellites basses orbites.

Nous présentons dans *l'avant dernier chapitre* le problème du Handover dans les communications satellitaires entre pilotes et contrôleurs via une constellation de satellites basse orbite. Nous montrons par simulation que ces conditions sont, d'un point de vue opérationnel, complètement réalisables.

Enfin, dans *le cinquième chapitre*, nous présentons une technique visant à réduire le nombre de conflits entre les avions dans des zones congestionnées, c'est-à-dire des zones parcourues par un trafic non organisé, avec un nombre suffisamment important d'aéronefs et à augmenter la capacité des secteurs, elle est basée sur l'échange des données (coordonnées géographiques GNSS et altitudes) entre les avions. Nous exprimons de nombreux résultats obtenus à l'aide de la modélisation par le graphe des conflits.

La conclusion générale regroupe les différentes conclusions sur les études menées et indique quelques perspectives pour poursuivre les travaux et parfaire les résultats.

Chapitre II

Généralités sur le contrôle aérien

Contenu du chapitre

II.1. Introduction	6
II.2. Présentation du système existant	6
II.2.1 La conception actuelle	7
II.2.2 Un système semble saturé	8
II.3 Les évolutions possibles	8
II.3.1 Les changements conceptuel	8
II.3.2 L'automatisation dans l'avion	9
II.3.3 L'automatisation des systèmes de contrôle aérien	9
II.3.4. Le système de détection de conflit centralisé (STCA)	10
II.3.5. Conclusion sur les évolutions du trafic aérien	10
II.4. Système de gestion du vol (FMS)	11
II.5. Planification	11
II.6. Limite du système actuel	12
II.7. Classification des systèmes radars	12
II.7.1. Radars primaires	12
II.7.2. Radar à diversité de fréquence	13
II.7.3. Radar secondaires	13
II.8. Volume de protection pour un avion	14
II.9. Système de contrôle aérien actuel	15
II.10. Conclusion	16

II.1. Introduction

La circulation aérienne est un domaine en évolution continue. Face à cette situation, les experts de l'aéronautique chargés d'élaborer les textes réglementaires régissant la circulation aérienne ont trouvé des mécanismes pour faire face à cette importante croissance. L'élaboration des routes aériennes directes, développement des équipements de travail, adoption de nouvelles méthodes et techniques de travail, amélioration des programmes de sélection et formation des contrôleurs aériens. Ces solutions ont contribué au développement de la navigation aérienne et l'augmentation des capacités des secteurs en assurant un niveau de sécurité acceptable. Les régions qui connaissent une densité importante du trafic aérien telles que l'espace aérien européen et le nord américain ont utilisé des techniques modernes et des équipements sophistiqués tels que les systèmes radars secondaires et les moyens de télécommunications, pour arriver à gérer un flux aérien important dans un temps record : un atterrissage et un décollage pendant une minute.

II.2 Présentation du système existant

Avant d'entamer l'essentiel de ce travail, on évoque quelques notions de base de l'aéronautique pour faciliter la compréhension rapide des chapitres suivants. On commence par le contrôle d'aérodrome qui est assuré par la tour de contrôle dans un espace généralement circulaire de rayon de 10 NM, ça concerne les départs et les arrivées en approche finale.

Le contrôle d'approche qui s'effectue dans un espace plus large circulaire de rayon de 25 NM où la densité du trafic est considérable et les avions entament les procédures d'approche initiale et intermédiaire. Le contrôle En- route qui représente le reste de l'espace aérien qui englobe les zones d'approche et les aéroports ainsi que toutes les routes aériennes, généralement les avions en croisière évoluant dans cet espace.

La restructuration de l'espace aérien consiste à diviser l'espace globale en plusieurs secteurs [21], l'espace aérien Algérien est découpé en sept secteurs mis sous la responsabilité de sept équipes de contrôleurs. Actuellement cette sectorisation est devenue surchargée à cause de l'augmentation du trafic aérien, une étude est en train de se faire pour diviser l'espace aérien en dix secteurs afin de minimiser la tâche des contrôleurs aériens et améliorer la sécurité des avions.

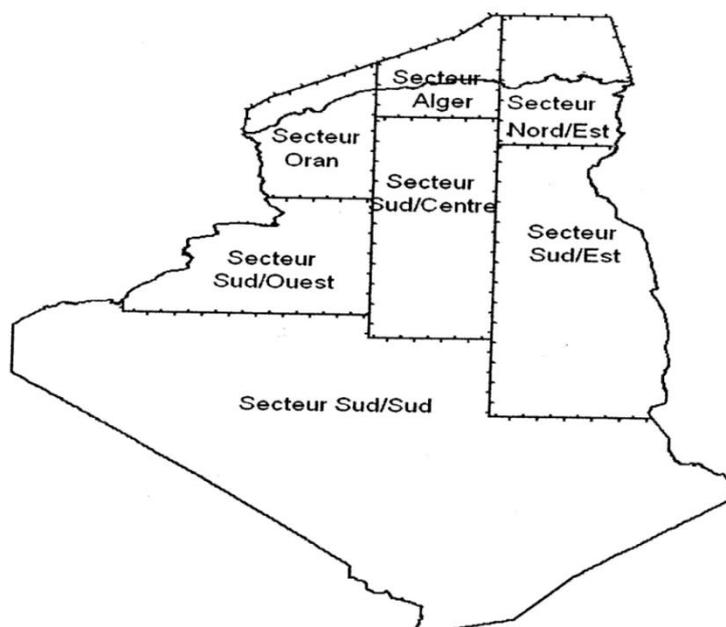


Figure II.1 : Sectorisation de l'espace aérien Algérien

II.2.1 La conception actuelle

La gestion du trafic aérien est assurée par les radars secondaires dans le nord Algérien et par le système classique dans le grand sud, c'est-à-dire, la notification des pilotes et la vision mentale des contrôleurs. La méthode classique présente beaucoup d'anomalies : la saturation de l'espace aérien par un nombre faible d'avions, multiplication de nombre d'incidents et les espacements importants qu'on doit assurer entre les aéronefs.

Les avions de transport commercial sont équipés d'un système anticollision pour détecter la présence des aéronefs avoisinants et d'en informer le pilote, et de lui fournir des avis de

résolution pour éviter un éventuel accident. L'intervalle temporel de l'anticollision est d'environ 45 secondes avant la collision estimée, cette problématique sera étudiée en détail dans le dernier chapitre.

II.2.2 Un système devenu saturé

Depuis plusieurs années, le secteur du transport aérien est un domaine globalement en forte croissance. Le trafic aérien ne cesse d'augmenter, provoquant des saturations dans l'espace aérien et au sol de plus en plus fréquentes. Pour remédier à ces saturations, de nombreuses solutions ont été envisagées, tels que : l'augmentation de la capacité des secteurs en adoptant des techniques comme la RVSM, ou adapter le trafic à la capacité actuelle.

Augmenter la capacité, c'est mettre en pratique des moyens permettant de prendre en charge plus d'avions dans l'espace contrôlé. Réguler le trafic en fonction de la capacité disponible, c'est imposer des contraintes aux opérateurs aériens, sur l'heure de départ, et éventuellement sur l'itinéraire [25] et l'altitude de croisière des vols.

II.3 Les évolutions possibles

II.3.1 Les changements conceptuels

Quelques experts de l'aviation civile proposent des changements radicaux dans la façon de gérer le trafic aérien [18]. Ces propositions peuvent être envisagées de différentes manières :

- Proposition des possibilités de navigation par FMS (Flight Management System) et des liaisons de données techniques où un système de contrôle au sol donnerait des instructions de navigation au FMS de l'avion.
- Proposition d'un équipement embarqué d'anticollision (TCAS) sophistiqué [23] et des liaisons de données entre aéronefs où les avions assureraient eux-mêmes leur anticollision en négociant entre eux les trajectoires et les altitudes vers lesquelles les

avions conflictuels doivent se diriger de façon automatique, pour que ce système soit efficace il faut que tous les avions soient équipés par un tel système.

II.3.2 L'automatisation dans l'avion

L'utilisation des systèmes asservis joue un rôle très important dans plusieurs domaines vu la précision des valeurs physiques et la fidélité de ces systèmes. En parallèle du débat sur le choix entre un système centralisé, au sol, et un système réparti entre tous les avions. Il est à signaler que le rôle du pilote se réduit à la surveillance des paramètres des instruments de bord et de surveiller que tout se passe bien. Outre les impératifs de productivité qui poussent à l'automatisation, les statistiques montrent que l'homme est une des principales causes directes des accidents d'avions d'environ 70%.

Les progrès dans la conception technologique en matière de circulation de l'information permettent d'envisager dans un avenir proche des liaisons de données permanentes entre le sol et l'avion. De plus les automatismes de l'avion permettent maintenant de faire atterrir l'avion sans que le pilote touche les commandes, dans des conditions météorologiques très dégradées. Il reste encore quelques progrès à faire dans le domaine pour arriver au tout automatique jusqu'au parking.

Cependant, les équipements embarqués offrent de plus en plus de facilités dans la navigation et le positionnement de l'avion, d'informations sur la météo et sur le trafic environnant, et vont jusqu'à proposer au pilote des manœuvres d'évitement des collisions.

II.3.3 L'automatisation des systèmes de contrôle aérien

En ce qui concerne les systèmes au sol de gestion du trafic aérien, la problématique est sensiblement la même. L'augmentation du trafic aérien pousse les spécialistes à croire qu'il ne sera plus possible d'y faire face par la seule augmentation du nombre de contrôleurs et un

découpage de l'espace en plus petits secteurs. Une telle méthode améliore sensiblement les coordinations inter-secteurs et les tâches associées à ses systèmes.

Quelle que soit l'évolution à venir, la manière la plus sûre pour automatiser les tâches du contrôle aérien est d'offrir d'abord au contrôleur humain la possibilité de se décharger de certaines d'entre elles sur le système. La démarche actuelle est donc de proposer des aides automatiques intelligentes, pour la détection et la résolution de conflits, pour la surveillance et la coordination du trafic.

II.3.4. Le système de détection de conflit centralisé (STCA)

Le système de détection de conflit centralisé STCA est un système implanté au sol destiné à la détection et signalisation des conflits. Plus précisément, il est utilisé sur les stations ATC dans les zones congestionnées, afin de donner des alertes et des informations aux contrôleurs sur des conflits éventuels.

Afin de minimiser le nombre de fausses alertes, les probabilités de perte d'espacement vertical et latéral sont combinées de telle sorte que la probabilité de conflit soit estimée et utilisée pour déclencher une alarme. L'horizon d'action du STCA a été fixé à deux minutes ce qui est un bon compromis entre une prédiction fiable et la minimisation de fausses alarmes.

II.3.5. Conclusion sur les évolutions du trafic aérien

Malgré ces nombreuses évolutions possibles, tant sur le plan des méthodes de travail que des technologies, il est bien difficile de prévoir à quoi ressemblera la gestion du trafic aérien dans le future.

La mise en place d'un système secondaire introduisant de nouvelles méthodes de contrôle et/ou une automatisation de certaines tâches devra d'une part savoir gérer la transition à partir du système actuel, et d'autre part démontrer un gain effectif dans la capacité à traiter plus de trafic dans un temps réduit et en toute sécurité.

II.4. Système de gestion du vol (FMS)

Le FMS [28] est un système embarqué généralement sur les avions de transport commercial pour la gestion du vol et qui intègre des informations sur la performance de l'avion et sur sa position, provenant de capteurs de navigation, du plan de vol enregistré et des saisies manuelles ou automatiques ainsi que des mises à jour mensuelles. Son but est d'assister les pilotes, en fournissant des instructions de pilotage, ou de permettre un guidage automatique de l'avion sur sa trajectoire lorsqu'il est couplé avec un pilote automatique. Il assure ainsi un niveau de sécurité, de confort des passagers et de régularité des vols satisfaisant.

Afin de guider l'aéronef le long de son plan de vol, le FMS utilise différents capteurs pour déterminer la position de l'avion et la précision de cette position. Cette précision est définie comme le degré de conformité entre la position estimée, mesurée ou souhaitée et la position réelle de l'aéronef à un instant donné.

II.5. Planification

Les avions utilisent le plus souvent des routes préétablies sur les cartes aéronautiques : les couloirs aériens [29-30]. Ces couloirs sont des tubes de sections rectangulaires, entourant des segments de droites, aux intersections desquels sont situées des balises radioélectriques. C'est souvent autour de ces balises qu'apparaissent des risques de collisions appelés conflits. Un conflit est un événement dans lequel deux ou plusieurs avions perdent leurs séparations minimales.

Les contrôleurs aériens sont responsables de l'écoulement du trafic dans l'espace dont ils ont la charge. Le service rendu aux usagers doit offrir une sécurité parfaite mais également le meilleur débit possible. À l'intérieur de chaque secteur, les contrôleurs maintiennent chaque avion séparé du reste du trafic en donnant aux pilotes des instructions que ces derniers sont tenus de suivre.

II.6. Limite du système actuel

On remarque que le système de gestion du trafic aérien actuel est dans la plupart des zones terminales et d'approche souvent en limite de capacité, dû à l'augmentation constante de la demande depuis de nombreuses années. Au fur et à mesure de l'augmentation du trafic, l'espace aérien a été divisé en secteurs de plus en plus petits, afin d'éviter la saturation de ces derniers. Malheureusement, ce principe de resectorisation présente une limite dans la mesure où l'on doit ménager un temps suffisant au contrôleur pour élaborer des stratégies de résolution des conflits entre aéronefs et l'espace nécessaire pour la mise en œuvre de ces stratégies. On doit donc générer des secteurs dont la taille permet de satisfaire cette contrainte.

II.7. Classification des systèmes radars

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les équipements radars [6] utilisent des qualités et des technologies différentes.

II.7.1. Radars primaires

Les radars primaires émettent des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Ces signaux réfléchis sont reçus et étudiés par le radar. La cible illuminée par le radar secondaire est toujours passive. Le modulateur élabore l'impulsion qui excitera l'émetteur pendant une durée prédéterminée de l'ordre de quelques microsecondes. L'émetteur du radar génère le signal hyperfréquence sous la forme d'une impulsion courte et de forte puissance, rayonnée dans l'air par le réflecteur. Le duplexeur joue le rôle d'un commutateur électronique qui connecte l'antenne alternativement à l'émetteur et au récepteur, ce qui permet l'utilisation d'une antenne unique. Cette commutation est nécessaire afin d'éviter que les impulsions de forte puissance transmises par l'émetteur endommagent ou détruisent les circuits du récepteur (calibrés pour le traitement de signaux de très faible puissance). Le processus est identique à la réception, l'antenne captant alors l'énergie diffusée dans un volume d'espace donné et selon son efficacité.



Figure II.2 : Radar primaire et secondaire d'Alger

II.7.2. Radar à diversité de fréquence

Afin de solutionner en partie le problème de la fluctuation de la taille des cibles, de nombreux radars primaires utilisent deux (ou plus) fréquences d'illumination. La diversité de fréquence est couramment réalisée grâce à l'emploi de deux émetteurs fonctionnant en tandem permettant d'éclairer la cible avec deux signaux de fréquences distinctes, les signaux réfléchis peuvent être traités séparément à la réception de façon à en assurer la cohérence.

II.7.3. Radar secondaire

Le radar secondaire [2] fonctionne selon un principe différent: la cible qu'il éclaire génère (de façon active) les signaux de réponse. Le radar secondaire transmet des impulsions hyperfréquences (appelées interrogations). Celles-ci n'ont pas pour but d'être réfléchies, la cible étant équipée d'un transpondeur qui les reçoit et les traite. Ensuite, sur une fréquence différente, le transpondeur met en forme et émet un message de réponse qui peut être reçu et décodé par notre radar secondaire.

En ce qui concerne les radars secondaires, la coopération de la cible est nécessaire. Leur principe est basé sur l'envoi de l'interrogation sur une fréquence et la réception de la réponse sur une autre fréquence (utilisation d'un transpondeur). Cette technique permet une très forte

réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique).

En effet, la puissance émise est un paramètre de l'équation du radar qui doit tenir compte du trajet de l'onde aller et retour dans le cas du radar primaire, mais uniquement d'un aller simple, dans le cas du radar secondaire. On peut considérer que la puissance nécessaire pour un radar secondaire sera en moyenne plus de 1 000 fois inférieure à celle que devra rayonner un radar primaire ayant la même portée.

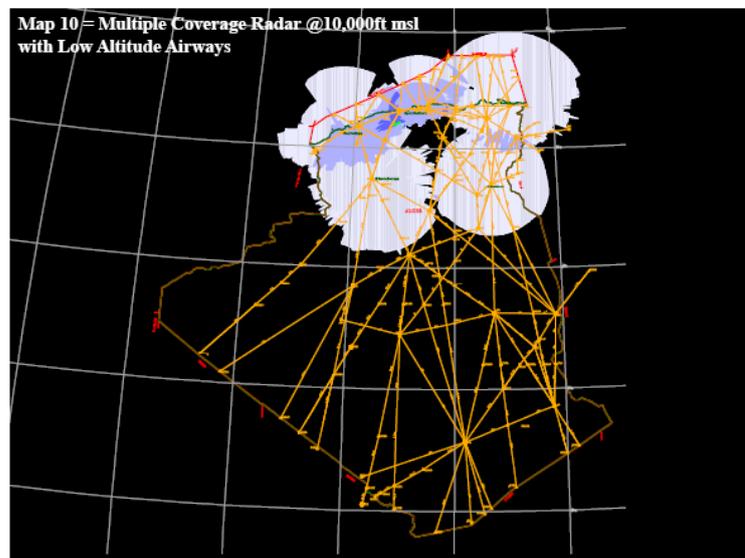


Figure II.3 : Couverture radar de l'espace aérien Algérien

II.8. Volume de protection pour un avion

Selon le type de l'espace aérien et les moyens utilisés pour le contrôle aérien, pour cela, à chaque instant t , l'avion 1 ne doit pas se trouver, à l'intérieur du volume de protection d'un autre avion. Le volume de protection d'un avion k est un cylindre qui entoure la position de l'avion, de hauteur deux fois la norme verticale de séparation et dont la base est horizontale et a un rayon égale à la norme horizontale de séparation, comme le montre la figure II.4. De plus, les avions, sont dynamiques, ce volume dépend aussi du temps à chaque point (espace \times temps).

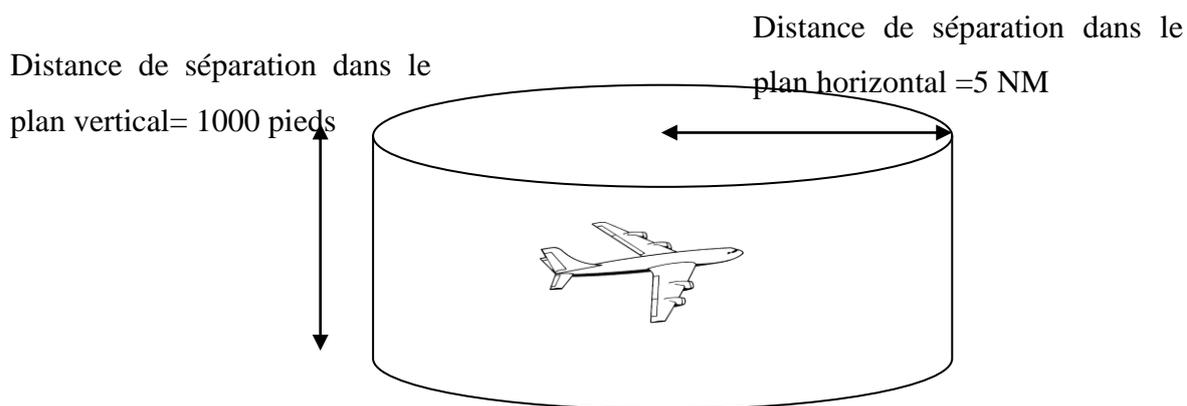


Figure II.4 : Espace de protection d'un avion à un instant t

II.9. Système de contrôle aérien actuel

Le système de contrôle actuel se compose de plusieurs stations radars secondaires implantées dans des endroits bien étudiés. Ces stations terrestres peuvent être divisées en deux classes: les émetteurs qui envoient la demande d'informations, et des récepteurs qui reçoivent les réponses des transpondeurs. Chaque station est constituée d'un émetteur et au moins trois récepteurs, qui fonctionnent en cohérence. L'émetteur envoie les demandes et les autres stations terrestres reçoivent les réponses sur une antenne réseau. Chaque Antenne-réseau consiste en un réseau d'éléments attachés à une unité de traitement qui s'occupe du traitement et d'analyse puis l'affichage des images sur les écrans radar, ce système est représenté sur la figure II.5.

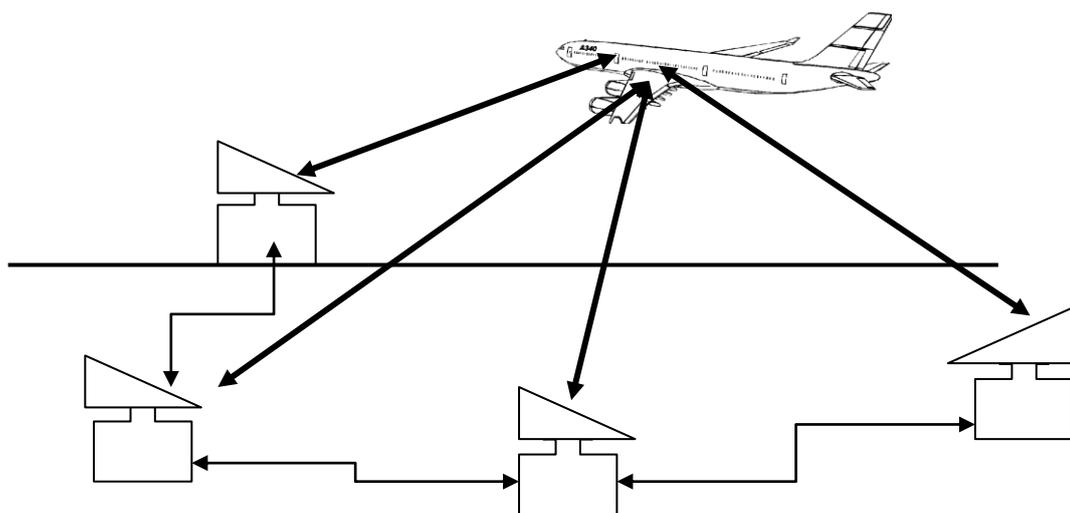


Figure II.5. Schéma synoptique de système de contrôle actuel

II.10. Conclusion

Le domaine du contrôle aérien a enregistré beaucoup de progrès, en matière d'équipement, de technologie, de ressources humaines et de la réglementation aéronautique mais on constate toujours que le nombre d'accidents ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre. Il est important de signaler qu'il est nécessaire de procéder au changement de la gestion actuelle et de rénover les systèmes actuels de travail sans oublier le facteur humain qui représente un pourcentage important des causes d'accidents.

Ce chapitre a donné une vision d'ensemble sur le contrôle aérien actuel et les moyens utilisés. Il s'agissait ici de familiariser le lecteur avec les principes de ce domaine pour pouvoir aborder ensuite pleinement le reste de cette thèse.

Chapitre III

Les Satellites dans la navigation aérienne

Contenu du chapitre

III.1. Introduction.....	17
III.1.1. L'évolution des satellites.....	17
III.1.2. Définition d'un satellite.....	17
III.1.3. Les orbites	18
III.2. Les contraintes des solutions satellites	18
III.2.1. La couverture	19
III.2.2. L'effet Doppler (Satellite / Station terrestre).....	19
III.2.3. Le délai de propagation	19
III.3. Présentation de la technologie VSAT	19
III.3.1. les stations VSAT	20
III.3.2. Les applications	20
III.4. Utilité de la technologie VSAT	20
III.5. Le GPS et GNSS.....	20
III.6. Conception de la constellation de satellites	21
III.6.1. La géométrie du système de base	22
III.6.2 Liaisons Inter Satellite (ISL)	25
III.6.3 Exigences de satellite	26
III.7. Conclusion	26

III.1. Introduction

L'exploration de l'espace est un domaine passionnant qui a depuis toujours fasciné l'esprit des savants. Cependant l'idée de placer un objet en orbite autour de la terre a commencé à voir la lumière il y a un siècle. A la fin de la deuxième guerre mondiale, le concept de satellite a vu le jour. C'est le britannique Arthur C. Clarke qui introduit, le concept de communication par satellite. L'Union Soviétique a lancé le premier satellite artificiel : Spoutnik 1 en 1957. Ce satellite était une simple sphère métallique d'un diamètre de 58 cm équipée d'un simple émetteur radio.

III.1.1. L'évolution des satellites

Les premiers satellites lancés étaient passifs (un réflecteur), ils avaient simplement le rôle de réfléchir les signaux émis par les stations terrestres. L'inconvénient majeur était que ces signaux étaient diffusés dans toutes les directions et pouvaient donc être reçus par n'importe quel pays du monde. Et puis, pour que ces satellites fonctionnent normalement, il fallait se disposer de grandes antennes au sol pour pouvoir avoir une grande puissance d'émission et de réception. En 1960, les Américains ont réussi à mettre en orbite leur premier satellite en mode passif. Les deuxièmes types de satellite qui été lancés étaient actifs. C'est-à-dire qu'ils possédaient leur propre ensemble de réception et d'émission. L'utilisation des satellites à des fins commerciales à commencé en 1965.

III.1.2. Définition d'un satellite

Un satellite de télécommunication peut être considéré comme une sorte de relais hertzien. En effet, il ne s'occupe pas de la compréhension des données : ce n'est qu'un simple miroir. Son rôle est de régénérer le signal qu'il a reçu et de le retransmettre amplifié en fréquence à la station réceptrice. De plus, il est également possible d'établir des liaisons directes entre satellites. Ce principe a d'ailleurs été utilisé dans le projet Iridium [26].

III.1.3. Les orbites

En application, il existe un nombre important d'orbites, elles se distinguent en fonction de leurs utilisations et caractéristiques, on peut citer :

- **L'orbite géostationnaire** : L'orbite géostationnaire est l'orbite la plus intéressante, puisque le satellite tourne avec une vitesse équivalente à celle de la terre; il fait donc le tour de la terre en 24h et paraît donc stationnaire dans le ciel. Dans cette orbite, le satellite est placé à 35 786 Km d'altitude et peut couvrir une large calotte d'une superficie importante. L'avantage de ces satellites est que l'on peut utiliser des antennes paraboliques fixes au sol, le système GNSS fonctionne dans cette orbite.
- **Orbite circulaire polaire** : Ces satellites passent au-dessus des deux pôles [31], et peuvent au cours d'un certain temps effectuer le tour autour de la terre. Leur domaine d'application est généralement situé surtout dans l'observation ou la communication mobile. Il y a d'autres orbites qui sont inclinées, ce type de satellite ne permet pas de couvrir la totalité de la surface du globe, puisque la plus haute latitude desservie correspond à l'inclinaison du plan orbital [32], on peut distinguer deux types de satellites dans ces orbites : Orbites basses [33] LEO (Low Earth Orbit) et orbites moyennes [34] MEO (Medium Earth Orbit).

III.2. Les contraintes des solutions satellites

Le scénario le plus important dans la navigation par satellite [35] est l'approche finale d'un avion juste avant l'atterrissage, cette situation exige une exactitude extrême de la position GNSS (Global Navigation Satellite System) des avions. Comme nous l'avons précédemment vu les satellites sont largement définis par leur orbite qui fixe des contraintes particulières (types de matériels, gestion de la position du satellite) pour la gestion des transmissions.

III.2.1. La couverture

La couverture d'un satellite dépend de son altitude et de son orbite, l'orbite d'un satellite de par sa forme et son rayon définit la zone de couverture et la portée du satellite. Plus le satellite est éloigné de la terre et plus sa couverture est étendue. Ce critère reste un élément majeur dans le choix et la conception d'une constellation des satellites [36].

III.2.2. L'effet Doppler (Satellite / Station terrestre)

C'est le décalage engendré entre la fréquence de l'onde émise et de l'onde reçue lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre ; il apparaît aussi lorsque l'onde se réfléchit sur un objet en mouvement par rapport à l'émetteur ou au récepteur.

III.2.3. Le délai de propagation

Le temps de propagation des ondes électromagnétiques d'un système satellitaire géostationnaire est d'environ 270 millisecondes. Ce délai représente le temps aller-retour que prend un signal pour parcourir une distance de 35 800 Km dans l'espace et revenir. En ajoutant le temps de traitement des signaux le satellite, on obtient un délai total approximatif de 320 millisecondes. Le délai de propagation ne cause pas de problèmes insurmontables dans la conception et l'exploitation d'un réseau informatique par satellite, sauf dans les cas où l'on se contente de substituer un support de transmission à un autre.

III.3. Présentation de la technologie VSAT

Pour définir ce système, tout d'abord il faut savoir que le VSAT [10] est une technologie instaurée pour répondre aux besoins des usagers de l'aérospatiale. En effet, chaque constructeur a sa propre méthode de concevoir ce système, même si tous les systèmes fonctionnent sur le même principe, la majorité des données techniques et des définitions de protocoles utilisés sont conservées par chaque constructeur.

III.3.1. Les stations VSAT

Le VSAT est un système satellitaire qui repose sur le principe d'un site principal (le hub) et d'une multitude de points distants (les stations VSAT). Le hub est le point le plus important du réseau, c'est par lui que transite toutes les données qui circulent sur le réseau. De part son importance, sa structure est conséquente : une antenne entre 5 et 7 mètres de diamètre et plusieurs baies remplies d'appareils. Les stations VSAT permettent de connecter un ensemble de ressources au réseau.

III.3.2. Les applications

VSAT est un système conçu pour mettre en application des réseaux de données, et depuis son apparition dans les années 80, des développements ont été apportées à ce système dans le but d'augmenter considérablement le nombre d'applications possibles avec un réseau de ce type.

III.4. Utilité de la technologie VSAT

La technologie VSAT permet de mettre en opération des réseaux de multi technologies à très grande échelle pour assurer la transmission des données, elle possède des systèmes de sécurité [37] comme tout système de communication par satellite pour protéger les communications contre les actes criminels. Mais dans la mesure où cette technologie a un prix relativement élevé, elle est réservée aux grandes entreprises. En plus du réseau de données, le VSAT permet de mettre en place un réseau téléphonique.

III.5. Le GPS et GNSS

Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement et de navigation mondial par satellites [38], de très grande précision, et développé à l'origine par les U.S.A pour de besoins militaires.

Le GNSS : Les satellites du système GPS et GLONASS sont les supports du GNASS, soit Système global de navigation par satellite. Le GPS est donc un élément du concept GNSS et

c'est celui que nous utilisons. Toute installation d'un équipement GPS de bord doit donc être approuvée par les autorités compétentes.

Le GNSS est utilisé dans les trois phases de vol : en-route, en approche et en région terminale, ce système permet d'effectuer des vols sur toutes les trajectoires désirées en utilisant la position instantanée de l'aéronef indépendamment des aides radioélectriques installées au sol. Il est possible de réaliser des procédures d'approches de non précision GNSS en utilisant la constellation GPS renforcée par un système d'intégrité interne au système de navigation de bord. Ce sont des procédures autonomes (stand-alone).

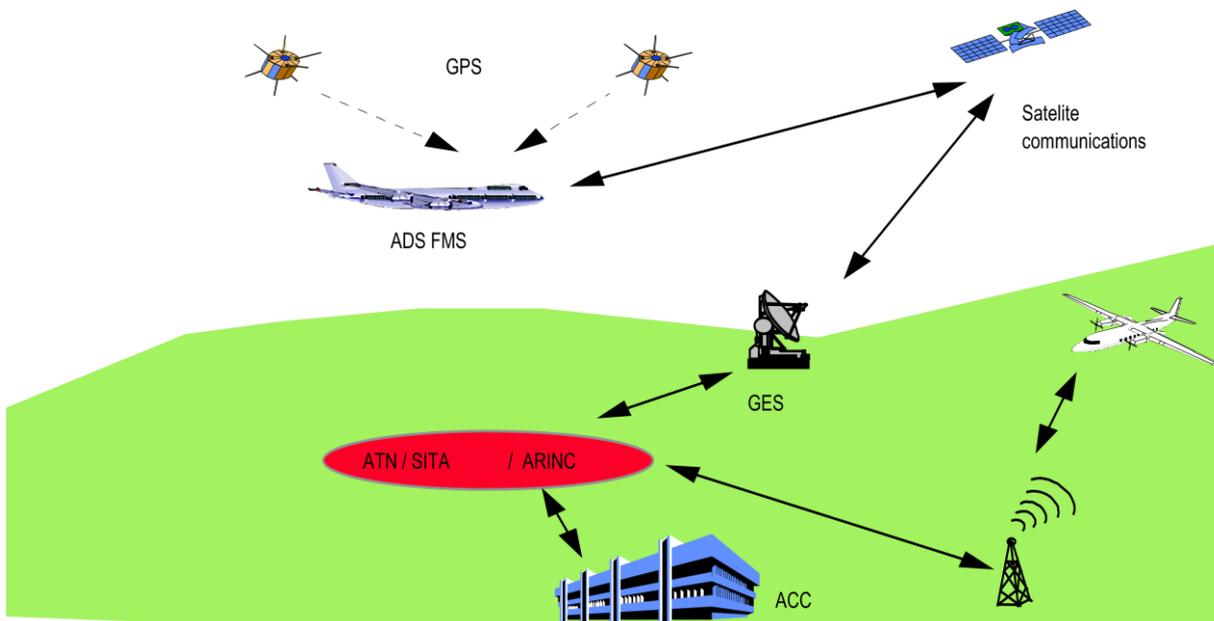


Figure III.1. Utilisation des satellites dans la navigation aérienne

III.6. Conception de la constellation de satellites

La constellation de satellites est conçue pour fournir des liens pour les données importantes. L'architecture générale est présentée à la figure 2 et étudiée, en tenant compte de la nécessité d'utiliser le mode standard des transpondeurs SSR S avec l'utilisation de l'orbite basse terrestre (LEO) [27] mis à une hauteur de 1500 km. Nous utilisons quatre orbites polaires basses, l'angle entre deux orbites successives est de 45° et chaque orbite contient dix satellites équidistants. Nous utilisons également cinq satellites répartis sur l'orbite basse

équatoriale ELEO (Equatorial Low Earth Orbit), la longueur de chaque orbite est d'environ 49455 km, donc 45 satellites sont utilisés dans notre constellation.

Les orbites des satellites sont définis tels que dans le tableau suivant :

Tableau III.1 Désignation des orbites de la constellation

	Orbite				
	Polaire				Equatoriale
	1	2	3	4	5
Longitude	000°/180°	045°E/135°W	090°E/090°W	135°E/045°W	
Latitude					00°
Nombre de Satellites	10	10	10	10	5

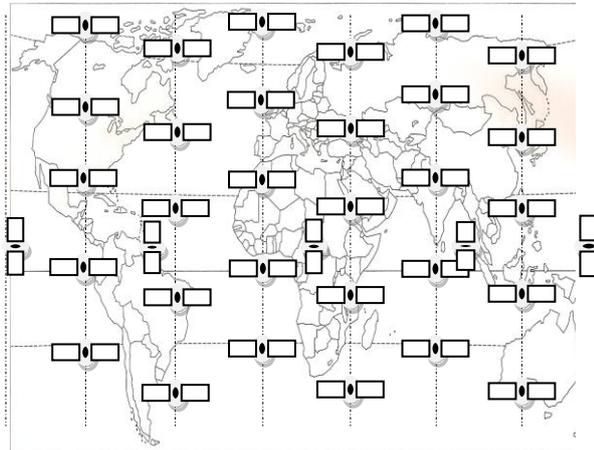


Figure III.2. La constellation proposée de satellites LEO

III.6.1. La géométrie du système de base

La géométrie du système est représentée sur la figure III.3 chaque satellite peut couvrir une zone circulaire de diamètre 'D' en fonction de l'angle d'incidence minimum Ψ_{min} qui ne doit pas être inférieur à 3° [9], afin d'éviter l'apparition d'effets néfastes de propagation.

D'après la figure III.3, nous pouvons avoir les relations suivantes:

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{R}{R+H} \cos \psi \right] \quad (\text{III.1})$$

$$D = 2R \sin \beta \quad (\text{III.2})$$

Où R est le rayon moyen de la Terre: $R = 6378$ km et la portée du satellite R_{max} est donnée par :

$$R_{max} = (R + H) \frac{\sin \beta_{max}}{\cos \psi_{min}} \quad (III.3)$$

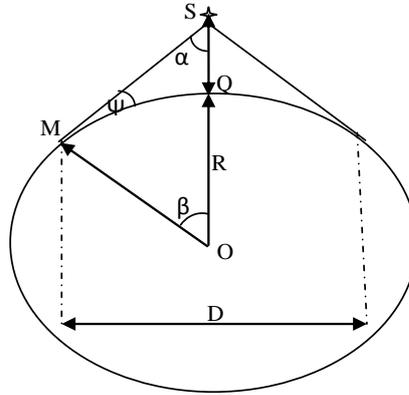


Figure III.3. La géométrie de base de système

Les avantages importants associés avec des satellites en orbites basses à une puissance d'émission requise inférieure, un retard de propagation plus faible, et une couverture polaire. La vitesse d'un LEO satellite par rapport à la terre [26] est donnée par l'équation (III.4), où ω est la vitesse de rotation angulaire de la terre, R_g est le rayon de l'orbite des satellites géostationnaires, et $R_l = R + H$ est le rayon LEO orbite du satellite.

$$V_1 = \frac{\omega R_g^{3/2}}{\sqrt{R + H}} \quad (III.4)$$

La rotation angulaire de la terre est calculée en tant que $0,2618$ radian/h en utilisant la formule (III.5).

$$\omega = \frac{2\pi(rad)}{24(hour)} = 0.2618 \text{ rad / h} \quad (III.5)$$

Le rayon de l'orbite des satellites est calculé en additionnant le rayon équatorial de la terre, 6378 km, à l'altitude du satellite. Cela se traduit par des valeurs de $R_g = 42178$ km et $R_l = 7878$ km. La vitesse d'un satellite LEO par rapport à la terre est calculée en tant que

$V_1=25550 \text{ Km/h}$ en utilisant la formule (III.6). Les paramètres de la constellation de satellites se traduisent par une période orbitale de 116,2 minutes.

Le terminal calcule le temps écoulé entre l'émission et la réception de la requête émise à l'antenne, il peut alors calculer sa distance à un point donné.

Nous supposons que l'altitude du satellite est $H = 1500 \text{ km}$, donc:

$$\cos \beta_{\max} = \frac{R}{R+H} \quad (\text{III.6})$$

De (III.6), nous avons d'après les calculs du grand cercle :

$$\beta_{\max} = 60 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R}{R+H} \right) = R_z (\text{NM}) = R_z \cdot 1,852 (\text{km}) \quad (\text{III.7})$$

Où R_z est le rayon de la zone couverte par un satellite, c'est un arc de grand cercle. Sachant que β est exprimé en minutes et R_z en mile nautique ($1 \text{ NM} = 1,852 \text{ km}$).

En utilisant l'expression (III.7), on obtient la surface de la zone S_z :

$$S_z = \pi \cdot 3,43 \left[60 \cdot \cos^{-1} \left(\frac{R}{R+H} \right) \right]^2 \quad (\text{III.8})$$

Mais la surface réelle est une partie d'une sphère (calotte sphérique de rayon R , qui représente 36° sur la surface de la terre, et la hauteur h) telle que présentée dans la figure III.4 et donnée par:

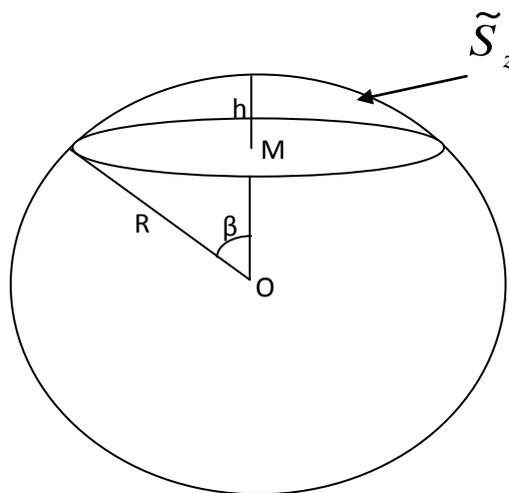


Figure III.4. Calotte sphérique de rayon R et de hauteur h

$$\tilde{S}_z = 2\pi.R.h \quad (\text{III.9})$$

En utilisant des relations trigonométriques, nous trouvons:

$$\tilde{S}_z = 2\pi.R^2(1 - \cos\beta_{\max}) \quad (\text{III.10})$$

Tableau III.2 Paramètres de la constellation proposée

Elévation du Satellite (H)	1500 km
L'angle minimum rasant (Ψ_{\min})	3°
Diamètre de la zone couverte (D)	7502 km
La distance maximale satellite/Terre (R_{\max})	4640 km
La distance minimale satellite/Terre (R_{\min})	1500 km
La puissance Maximale (P)	3 kwatts
Nombre de satellites	45

III.6.2 Liaisons Inter Satellite (ISL)

Le fonctionnement des satellites dans une constellation permet la connectivité entre les satellites avec la technologie de commutation à bord est en mesure d'utiliser les liens inter-satellites (ISL) [26-27] pour acheminer des signaux. Le signal transmis d'un utilisateur mobile (avion) est acheminé à travers plusieurs satellites et en liaison descendante à un centre régionale ou un autre utilisateur. Cela crée un réseau dans le ciel et permet l'utilisation de grandes entrées. Jusqu'à récemment, la complexité technologique de l'utilisation de liaisons inter-satellites pour effectuer le routage de réseau a été limitée à des applications militaires (GPS).

Chaque satellite maintient jusqu'à quatre liaisons ISL. Les ISLs sont des liens établis entre les satellites dans le même plan (intra-plan) et entre satellites dans des plans adjacents (inter-plan). Liaisons intra-plan sont maintenues en permanence, chaque satellite présentant avant et après une connexion avec les satellites directement devant et derrière. Liens inter-plans sont établis de façon dynamique.

Les liaisons ISL fonctionnent dans la gamme de fréquence de 21,50 à 22,50 GHz à 25Mb/s. L'angle de pointage horizontal entre deux satellites en plans orbitaux adjacents, en utilisant une référence de zéro degré parallèlement à l'équateur. Cet angle varie plus lentement au dessus de l'équateur où les satellites en orbites voisines sont les plus séparées, et il varie le plus rapidement au niveau des pôles où les orbites se croisent. La variation en azimut horizontal entre satellites nécessite des antennes orientables pour le maintien des liens inter-orbitales. Même avec des antennes orientables, il serait très difficile de maintenir des liens inter-orbitaux entre les plans orbitaux.

III.6.3 Exigences d'un satellite

Les principales caractéristiques du satellite sont données en ce qui concerne l'altitude et la couverture et ils sont quasi semblables aux satellites de Global star et Iridium:

- Le satellite doit être équipé d'une large L-band.
- L'utilisation de l'antenne tournante n'est pas nécessaire, car l'azimut est déterminé par les coordonnées géographiques des deux points.
- La position de satellite ne doit pas être basée sur le GPS visant à fournir une surveillance indépendante.
- Le satellite doit être équipé des outils de communication UHF pour des liens avec les centres ATC.
- Le sous-système attitude et contrôle de l'orbite (attitude and orbit control subsystem AOCS), il doit être équipé d'un système asservi qui assure toutes ces fonctions.

III.7. Conclusion

Les constellations de satellites vont jouer un rôle important dans la navigation aérienne en offrant de l'assistance aux utilisateurs aéronautiques pendant les différentes phases de vol pour améliorer les procédures de départ et d'approches.

Les satellites utilisent l'énergie solaire et ils ne peuvent pas être opérationnels indéfiniment et encombre de plus en plus les orbites. De même, les fréquences utilisées par les satellites pour émettre et recevoir les signaux sont de plus en plus encombrées. C'est pourquoi les scientifiques cherchent actuellement des solutions afin de couvrir la majorité, voir la totalité de la surface terrestre en un minimum de temps, et en utilisant le minimum de satellites. Ils recherchent également un moyen de communication entre la terre et le satellite qui sera plus performant que les gammes de fréquences qui existent de nos jours, tant au niveau des pertes, que de la qualité des signaux.

Chapitre IV

Le Handover dans les communications pilotes/contrôleurs

Contenu du chapitre

IV.1 Introduction	28
IV.1.1 Coordination assistée par le satellite	29
IV.2. Modèle de données et préliminaire	30
IV.2.1 Objectif Principal	30
IV.2.2 Transfert de Communication	30
IV.2.3. Processus de Handover	30
IV.2.4 Fonction du Handover	32
IV.2.4.1. Handover dans un cas satellite/ avion	32
IV.2.4.2. Handover tour de contrôle avec satellite et vis versa	32
IV.2.4.3. Handover satellite avec satellite	33
IV.2.4.4. Handover automatisée entre secteurs ATC	34
IV.2.4.5. Handover entre les cellules satellitaires desservant le même secteur ATC	35
IV.2.4.6. Handover entre les secteurs ATC dans la même cellule satellite	35
IV.2.5. Gestion des phases Handover	36
IV.2.6. Contrôle du Handover	36
IV.3 Modèle de Trafic	38
IV.3.1 Hong et le trafic Modèle de Rappaport (en deux dimensions)	38
IV.3.2 Zeng et al Modèle Approché Traffic (Toute Dimensional)	39
IV.4 Les stratégies de priorité pour les requêtes de Handover	39
IV.4.1 Stratégie de non priorité (NPS)	40
IV.4.2 Stratégie de priorité	41
IV.4.2.1 Technique de mise en queue des requêtes de Handover (Queuing Priority Schemes) (QPS)	41
IV.4.2.2 Stratégie de réservation de canaux de garde (RCS)	43
IV.4.2.3 Technique de mise en queue avec l'utilisation des Canaux de garde (QPS+RCS)	45
IV.4.2.4 Technique de mise en queue pour les nouveaux contacts et le Handover avec l'utilisation des Canaux de garde [QPS (H + N) + RCS (H)]	46
IV.5 Résultats de simulation	47
IV.6 Temps de simulation	54
IV.7 Appréciation des résultats	57
IV.8 Conclusion	57

IV.1. Introduction

Les communications aéronautiques vont devoir faire face à un grand défi. Avec la croissance du trafic aérien et les nouveaux besoins de services pour les pilotes et les contrôleurs, la part des communications de données numériques entre l'avion et le sol va augmenter. Actuellement chaque secteur utilise une fréquence VHF pour assurer l'échange des communications entre le contrôleur et tous les pilotes, cette dernière est saturée par un seul avion à la fois d'où la nécessité de faire appel à un système satellitaire qui offre plusieurs canaux à la fois. Ces nouvelles applications, comme la diffusion de données météorologiques, vont nécessiter des ressources de communication reposant sur des systèmes innovant et garantissant une capacité suffisante. Pour répondre à ces besoins, des systèmes ont été proposés récemment et sont déjà, pour certains, partiellement déployés. Par exemple, le système Iridium doit pouvoir fournir plusieurs canaux à 64 kbit/s par avions et offrir une couverture y compris en zone océanique. Toutefois, compte tenu du coût élevé, ce système n'est pas utilisé sur les avions de ligne, et reste plutôt réservé à l'aviation d'affaires et militaire. C'est dans ce contexte que le Leopt (Laboratoire d'Etude et d'Optimisation des Architectures de Réseaux de Télécommunications) travaille actuellement sur la définition et l'étude des performances d'un système de communication innovant basé à la fois sur les communications entre avions et des stations terriennes via les satellites.

L'utilisation des systèmes satellitaires fournit des relais permanents entre les tours de contrôle et les aéronefs à travers le monde entier. Un système de liaison de données: Aeronautical Telecommunication Network (ATN) pour les futurs systèmes de navigation aérienne [39]. La gestion du trafic aérien (ATM) est assurée par les procédures actuelles [40] qui sont toujours basées sur les communications VHF. Pour une amélioration des concepts ATM, ça nécessite le développement de système de communication par satellite, visant à fournir une fiabilité et de disponibilité élevée du système.

IV.1.1. Coordination assistée par le satellite

Les vols qui bénéficient d'un service ATC sont transférés d'une unité ATC à une autre d'une manière qui leur assure le niveau maximum de sécurité. Pour atteindre cet objectif, il existe une procédure standard qui consiste à effectuer une coordination entre les unités concernées et les avions avant le passage de chaque vol au travers des limites de leurs zones de responsabilité et à transférer le contrôle du vol lorsqu'il atteint ou approche ces limites.

L'une des plus importantes tâches secondaires des unités ATC et particulièrement des Centres de Contrôle Régionaux (CCR), qui fait partie du processus de coordination, est la communication, de données concernant chaque vol. L'utilisation opérationnelle des échanges entre les Systèmes de Traitement de Plans de Vol (Flight Data Processing Systems : FDPS) des CCR, dans le but de remplacer ce type d'"estimations" transmises verbalement, désignée sous le nom d'On-Line Data Interchange (OLDI).

Pour en faciliter l'implémentation, les organismes concernés ont élaboré et approuvé des règles et des formats de messages communs. Ceux-ci ont été intégrés dans le système "Standard for On-Line Data Interchange". Ce système a été ensuite développé, en tant que spécification des fonctionnalités et des messages devant être mis en place entre les FDPS des unités ATC, dans le but de réaliser les objectifs suivants:

- La coordination qui doit avoir lieu avant le transfert des vols d'une unité à l'unité suivante.
- La transmission sûre des données aéronautiques.
- Le transfert de communication de ces vols.
- La séparation des aéronefs.
- La régularisation des vols.
- La prise en charge des problèmes des pilotes

IV.2. Modèle de données et préliminaire

IV.2.1 Objectif Principal

L'objectif principal était d'évaluer l'avantage de disposer de fonctions de coordination assistées par le système satellitaire, avec l'harmonisation intra et inter-centres des mécanismes de coordination et de transfert de communication. Les contrôleurs n'identifient aucun manque d'information nécessaire (par le besoin de seconder les procédures de transfert ou de coordination par des appels téléphoniques via satellites). On devrait réduire la charge de travail de coordination perçue et observée et devrait améliorer la qualité de service rendu aux utilisateurs de l'espace aérien. La présence des fonctions de transfert de communication par satellite devrait réduire la charge de travail des contrôleurs.

IV.2.2 Transfert de Communication

Les fonctions de transfert de communications ont été appréciées par les contrôleurs qui les ont jugées préférables aux procédures habituelles. La possibilité d'interagir directement avec l'étiquette radar a été fortement appréciée. Les contrôleurs ont considéré que l'accès à toutes les informations dont ils avaient besoin doit être immédiat, pour les avions entrants les informations leur doivent être fournies à temps.

Pour la cohérence avec les littératures précédentes [33] et sa disponibilité opérationnelle, le système Iridium est adopté comme modèle de base du système. La vitesse rez-de-piste satellite est d'environ 26600 kilomètres par heure, le réseau satellite Iridium est modélisé comme un milieu unidimensionnel dans lequel les avions se déplacent en ligne droite et à vitesse constante.

IV.2.3. Processus de handover

Le handover est l'ensemble des opérations mises en application permettant qu'une station mobile (Aéronef) puisse changer de cellule sans interruption de la communication. Ce processus consiste à ce qu'un terminal mobile maintienne la communication en cours, lors

d'un déplacement qui amène l'avion à changer de cellule. En effet lorsque le signal de transmission entre un utilisateur (avion) et une station de base (satellite) s'affaiblit, le système de l'utilisateur cherche une autre station de base (satellite) disponible dans une autre cellule, qui est capable d'assurer la continuité de la communication dans les meilleures conditions. Le handover permet de maintenir une qualité de communication suffisante entre le mobile (avion) et le réseau à travers un changement de fréquence ou de cellule.

Nous supposons que l'arrivée de nouveaux contacts forme un processus de Poisson avec une moyenne λ et son service d'intensité est μ . Les arrivées de demandes de transfert, présentées à la figure IV.1, forment un processus de Poisson de moyenne λh . Si l'aéronef se trouve dans la cellule de satellite, la durée de contact (avec une moyenne de $1 / \mu$) est égal au temps pendant lequel le contact est en cours.

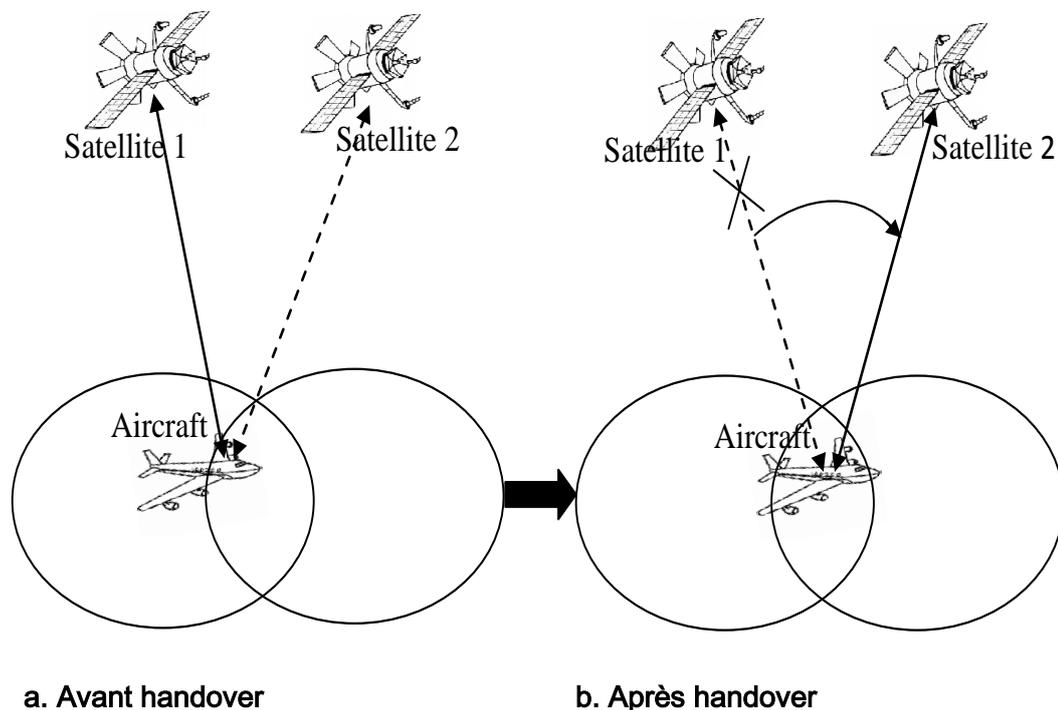


Figure IV.1. Hard handover entre l'avion et les satellites [41]

IV.2.4. Fonction du Handover

La durée de visibilité d'un satellite en orbite basse est environ 5 min en raison de la vitesse élevée de satellite. Cela conduit à une probabilité d'interruption remarquable de communication et le mécanisme de Handover devient important pour la performance globale du système. Il existe deux types d'événements de transfert, comme c'est le cas dans les systèmes mobiles terrestres, le changement de cellule [13] et le transfert de satellite. Celui qui nous intéresse décrit le transfert d'un contact continu à partir d'un satellite à l'autre. Quelques études ont été menées sur la question de transfert de satellite, d'étudier les techniques d'attribution de canal pour des nouvelles communications et ceux de Handover en utilisant principalement la technique d'allocation de canal fixe (CAF). Dans ce chapitre, les différentes politiques de file d'attente pour les demandes de transfert de Handover ont été étudiées en vue de les renforcer dans les communications par satellite pour la navigation aérienne.

- Améliorer la distribution des fréquences et des canaux de communication ;
- Permettre aux aéronefs de se déplacer en cours de contact et éviter la rupture du lien ;
- Minimiser les interférences (global et par rapport à un lien).

IV.2.4.1. Handover dans un cas satellite/ avion

On va citer quelques scénarios afin de bien définir un handover entre satellite et avion. Le processus de handover se produit lorsque l'avion s'apprête à quitter la zone du satellite donc la connexion commence à s'affaiblir et une nouvelle connexion s'établit avec un autre satellite.

IV.2.4.2. Handover tour de contrôle avec satellite et vis versa

Ce handover se produit lorsque le satellite survole la tour de contrôle, c'est-à-dire le passage d'une station de base (tour de contrôle) a été effectué. Le handover a eu lieu afin de transférer la tour de contrôle d'un satellite vers un autre. En outre, ce type de handover peut avoir lieu fréquemment à cause de la vitesse importante de satellites LEO.

IV.2.4.3. Handover satellite avec satellite

Ce type de handover [14] est particulier et n'est applicable que dans un cas multispot. Ce type de scénario n'implique pas de vrai handover, parce que la gateway à laquelle est rattaché le nœud mobile reste la même. Uniquement le spot satellite est changé puisque le terminal s'est déplacé vers un autre spot ou le satellite est remplacé par un autre de même type. Ces différents types mentionnés précédemment de Handover peuvent être constatés dans la figure suivante.

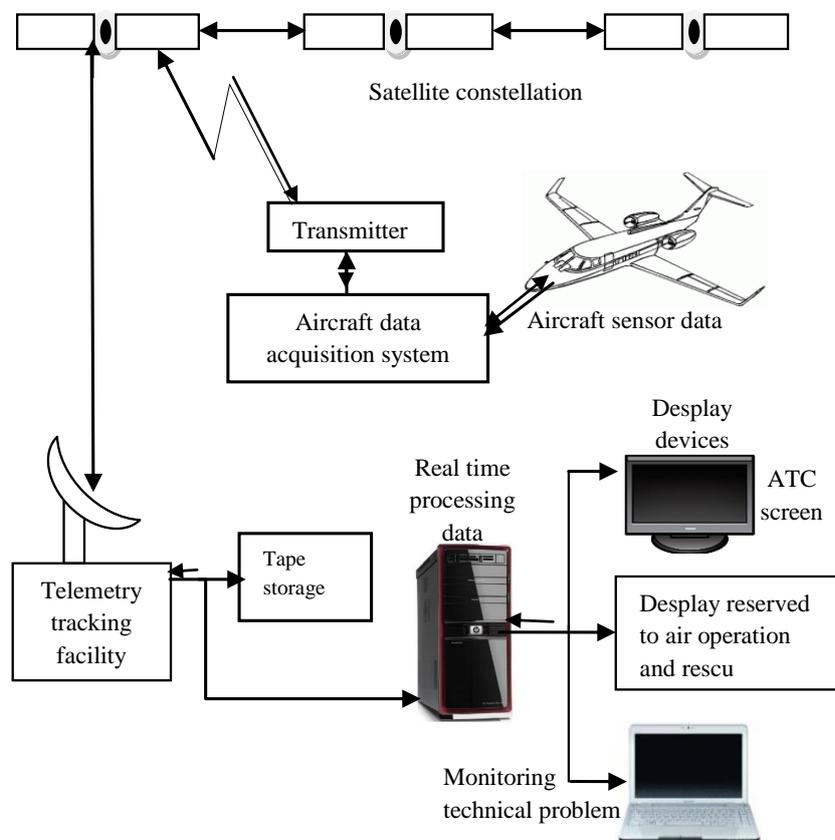


Figure IV.2. Schéma synoptique de communication terrestre satellite avion

IV.2.4.4. Handover automatisée entre secteurs ATC

Aujourd'hui, Il n'y a pas de support technique interne au sein d'un système de communications vocales pour la mobilité de l'avion. Le Handover entre les canaux vocaux de secteurs ATC se fait dans une coopération entre le contrôleur et le pilote. Le contrôleur émet une commande de transfert, les pilotes répondent par la voix de relecture et de commutateurs à la radio de la nouvelle fréquence. Cette situation peut être améliorée dans une certaine mesure en utilisant le ACM de liaison de données de service (ATC Communication Management), mais même avec cette approche, la procédure de Handover reste encore à moitié automatisée, le pilote doit encore entrer manuellement le nouveau canal dans la radio. Cela peut conduire à des erreurs et augmenter les risques de l'insécurité. Un lien de système de communication numérique intégré pourrait fournir un soutien interne pour les Handovers entièrement automatisés. Pour des raisons de continuité, l'utilisation de Handover automatisé n'est pas obligatoire; il est laissé ouvert pour les contrôleurs et les pilotes de l'utiliser ou non, basé sur des règles réglementaires.

Dans un exemple de scénario d'utilisation de cette fonction interne, le contrôleur émet une instruction de Handover vocale et déclenche un message spécial du système interne contenant l'identifiant de canal du nouveau secteur obtenu de son Flight Data Processing System FDPS (Système de traitement des données de vol). Le pilote vérifie et accepte les paramètres indiqués. Ce système embarqué pourrait simplement informer le pilote que le canal vocal d'un nouveau secteur ATC est active (le handover est produit) et d'indiquer l'action nécessaire (moniteur/contact) du pilote. A tout moment, le pilote serait en mesure de remplacer une proposition de système en entrant manuellement les nouveaux paramètres d'un nouveau canal.

IV.2.4.5. Handover entre les cellules satellitaires desservant le même secteur ATC

Il peut arriver qu'une cellule satellitaire puisse couvrir plusieurs secteurs ATC ou des parties du secteur, de même un secteur ATC unique pourrait aussi appartenir à plusieurs cellules satellitaires. Dans le cas suivant, le contrôleur (ATC secteur) reste inchangé, mais l'aéronef est appelé à changer les canaux de communication à chaque fois qu'il quitte la zone de service d'une certaine cellule de contrôle. Du point de vue des aspects opérationnels ce devrait être une procédure automatisée, qui ne devrait pas causer des changements dans les habitudes humaines existantes. Ni le contrôleur ni le pilote ne devraient pas remarquer que la cellule satellitaire a changé (transfert de Handover). Dans un tel cas, un secteur desservi par plusieurs cellules, toutes les cellules concernées sont configurées pour fournir exactement la même portée de tous les services vocaux et de liaison de données.

IV.2.4.6. Handover entre les secteurs ATC dans la même cellule satellitaire

Dans certains cas, le pilote sélectionne manuellement un service qui n'est pas disponible au sein de la cellule courante, mais qui est nécessaire pour des raisons opérationnelles. Cela se produit régulièrement, par exemple à la limite entre En-route et la zone de contrôle terminale ou lorsque l'espace aérien limitant un autre secteur En-route qui est desservi par une autre cellule satellitaire. Dans ce cas, la sélection manuelle de pilote d'un service opérationnel déclenchera automatiquement un changement de cellule (y compris la variation de la fréquence).

Le système de communication doit de préférence être configuré et déployé de telle sorte que la continuité de liaisons de données est garantie dans toutes les cellules satellitaires dans une région. Cependant, il peut encore arriver que la cellule suivante (reliée à l'avion après Handover) ne soit pas en mesure de soutenir toutes les données de services disponibles dans l'actuelle cellule. Dès le moment où le pilote a sélectionné la nouvelle fréquence de communication vocal (et donc effectivement une nouvelle cellule), le système devrait veiller à

ce que la fréquence affichée auparavant devra finir l'opération de transmission des données en cours et établir une nouvelle connexion sur la nouvelle fréquence dans la limite de temps d'établissement de connexion applicable au service vocal nouvellement sélectionné. Le système embarqué devra également indiquer au pilote la disponibilité de services de données supplémentaires au sein de la nouvelle cellule qui n'étaient pas disponibles dans l'ancienne.

IV.2.5. Gestion des phases de Handover

La gestion de processus du Handover se base sur les fonctions de réseau qui permettent aux avions de changer leurs points d'accès à la station de base courant pendant une communication en assurant la continuité de la communication en cours. La gestion de processus de Handover assure un raccordement actif de contact. Il est maintenu quand l'avion se déplace et change son point d'attachement en réseau satellitaire.

Le processus de Handover se réalise en trois phases principales: déclenchement du Handover, décision du Handover et exécution du Handover. L'opération fondamentale effectuée dans la phase de déclenchement du Handover est le rassemblement d'informations telles que : la prise des caractéristiques de signaux de lien; si la qualité du lien de communication se dégradé, un Handover va être entamé. La deuxième phase est basée sur les mesures effectuées, la phase de décision du Handover va choisir les meilleurs signaux des cibles. Dans l'exécution du Handover, des nouveaux raccordements sont établis et les anciens raccordements sont éliminés en effectuant des échanges de contact entre les avions et le réseau satellitaire.

IV.2.6. Contrôle du Handover

Le contrôle de Handover s'effectue selon des stratégies et méthodes adoptées dans chacune des trois phases du Handover. On distingue quatre méthodes de contrôle du Handover pour la phase de déclenchement et de décision du Handover :

- Mobile Controlled Handover (MCHO),

- Network Controlled Handover (NCHO),
- Mobile Assisted Handover (MAHO),
- Network Assisted Handover (NAHO).

Ces méthodes se distinguent dans l'emplacement des mécanismes qui s'occupent des mesures des qualités de contact radio et qui effectuent la décision du Handover. Les avions ou le réseau peuvent exécuter les fonctions de mesure du contact radio. Néanmoins, uniquement l'un parmi les deux va prendre la décision du Handover. L'avantage du MAHO figure dans le contrôle du Handover réalisé à l'intérieur du réseau satellitaire, une flexibilité sera constatée vis-à-vis des changements futurs du système concernant les algorithmes de transfert, exécutés en fonction de la croissance du trafic aérien et du réseau. Concernant le cas du MCHO utilisé dans les systèmes à spot-beam où le transfert de communication est commandé par le mobile (avion), la modification très rapide de l'environnement radio nécessite une réaction tout aussi rapide de la procédure du Handover. Dans ce cas, c'est l'avion qui désigne le satellite cible directement par annonce à celui-ci.

Pour la dernière phase de l'exécution du Handover, deux méthodes peuvent être employées : l'établissement du lien et le transfert du lien.

• Réalisation du lien

La réalisation de nouveau lien est effectuée par échange de messages entre l'avion, la tour de contrôle et le satellite cible. Si l'échange a eu lieu via l'ancien lien, le Handover est appelé (*backward Handover*), dans ce cas, les nouveaux liens sont établis à partir du satellite courant. Cette solution peut être utilisée dans le cas du Handover entre cellules du même type.

Dans le cas où les informations sont émises directement de l'avion ou de la tour de contrôle vers le satellite cible, on parle alors de (*forward Handover*), dans ce cas, c'est le nouveau satellite qui doit établir le lien avec le réseau.

- **Transfert du lien**

On peut distinguer trois cas selon que l'ancien lien est libéré avant le transfert du lien avec le satellite cible (hard Handover), pendant ce dernier (seamless Handover) ou juste après (soft Handover)

IV.3. Modèle de Trafic

De nombreux modèles de trafic ont été établis [42] sur la base de différentes hypothèses concernant la mobilité des utilisateurs. Dans le paragraphe qui vient, nous présentons brièvement quelques-uns de ces modèles de trafic.

IV.3.1. Le modèle de trafic Hong et Rappaport (en deux dimensions)

Hong et Rappaport [15-16] ont proposé un modèle de trafic. Ils supposent que les avions sont répartis uniformément sur la zone de service; ainsi, la localisation d'un aéronef lorsqu'un contact est initié par l'utilisateur est uniformément réparti dans la cellule.

Ils supposent également que l'aéronef initie un contact, se déplace à partir de la position actuelle dans une direction avec une probabilité égale et que cette orientation ne change pas tant que l'avion reste dans la cellule.

A partir de ces hypothèses, le taux d'arrivée de transfert de communications intercellulaires (Handover) est donné par:

$$\lambda_H = \frac{P_h(1-B_o)}{1-P_{hh}(1-P_{f'})} \lambda_o \quad (IV.1)$$

où:

- P_h = la probabilité qu'un nouveau contact non bloqué, nécessite au moins un transfert.
- P_{hh} = la probabilité d'un contact qui a déjà été transféré avec succès, mais nécessite un autre transfert.
- B_o = la probabilité de blocage de contact original.
- $P_{f'}$ = la probabilité de défaillance de transfert.

- λ_O = le taux d'arrivée des contacts originaux dans une cellule.

IV.3.2. Le modèle de trafic Zeng et al approché (Toute Dimension)

Le modèle Zeng et al [16] utilise une formule simple, quand la probabilité de blocage des contacts originaux et la probabilité de cessation forcée des contacts de transfert intercellulaire sont de petite valeur, le nombre moyen de canaux occupés $E[C]$ est estimé par:

$$E(C) \approx \frac{\lambda_O + \lambda_H}{\mu} \quad (IV.2)$$

$E[C]$ est le nombre moyen de contacts dans une cellule

Si un canal a été attribué à un aéronef, il sera libéré à la fin de la communication. Ainsi, le temps d'occupation du canal est la durée minimale du contact.

On note:

- P_b : probabilité qu'un nouvel utilisateur trouve tous les canaux occupés dans une cellule.
- P_h : probabilité de défaillance de la rétrocession. C'est la probabilité qu'un contact de transfert trouve tous les canaux occupés à son arrivée dans la cellule voisine.
- P_f : la probabilité de cessation forcée du contact. C'est la probabilité qu'un contact est accepté par le système est interrompu en raison de l'échec de transfert.

IV.4. Les stratégies de priorité pour les requêtes de handover

Dans la section qui vient, nous présentons les méthodes : non prioritaires, prioritaires et les files d'attente des systèmes de transfert intercellulaires pour un système de circulation unique comme une voix ou un ensemble de données. Nous supposons que le système comprend beaucoup de cellules, et chacune a des canaux S . Le temps de maintien de canal présentant une distribution exponentielle avec un taux moyen μ . Les deux contacts original et de Handover sont générés dans une cellule, respectivement avec des taux moyens λ_O et λ_H . Nous supposons que le système est une cellule homogène. Nous concentrons notre intérêt sur une seule cellule (appelée cellule marquée).

IV.4.1. Stratégie de non priorité (NPS)

Dans ce cas, tous les canaux de S sont utilisés par les deux types de contacts : demande originale et de transfert intercellulaire [14], les demandes de transfert des contacts sont manipulées exactement de la même manière comme un contact d'origine. Ainsi, la probabilité de transfert de blocage est égale à la probabilité de blocage de nouveaux contacts. Le modèle NPS est présenté sur la figure IV.3, où S est le nombre de canaux présents dans la cellule de satellite.

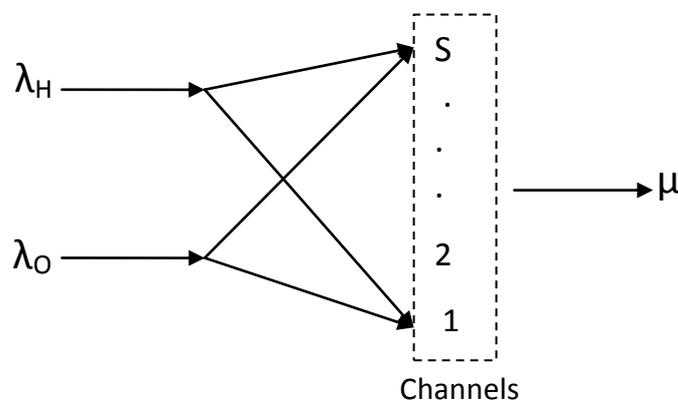


Figure IV.3. Processus d'arrivée des Requêtes pour NPS

Organigramme

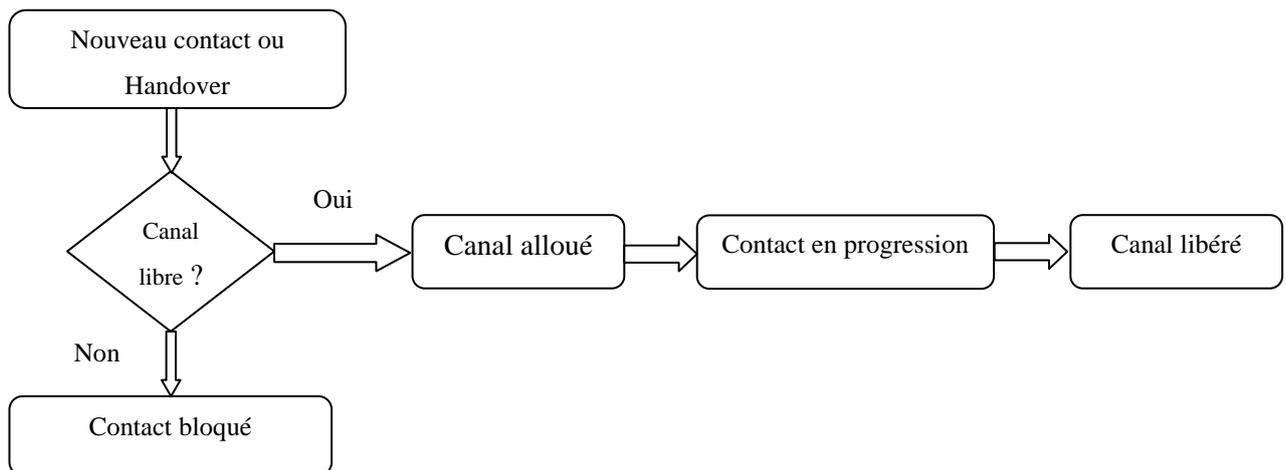


Figure IV.4. Organigramme de NPS

Lorsque les canaux S sont libres, ils seront utilisés par un nouveau contact de l'aéronef ou Handover. Si tous les canaux sont occupés le nouveau contact sera bloqué.

$$Pb = Ph = Ps = \frac{\left(\frac{\lambda + \lambda hi}{\mu}\right)^s}{\sum_{k=0}^s \frac{\left(\frac{\lambda + \lambda hi}{\mu}\right)^k}{k!}} \quad (IV.3)$$

IV.4.2. Stratégie de priorité

IV.4.2.1. Technique de mise en queue des requêtes de Handover (Queuing Priority Schemes) (QPS)

Si aucun canal n'est libre dans la cellule voisine, la demande de transfert est insérée dans une file d'attente. L'aéronef continue à utiliser le canal dans la cellule actuelle. Si un canal dans la cellule voisine est disponible avant la fin de l'intervalle de dégradation, le transfert aura lieu.

Si l'aéronef traverse la zone de transfert et ne trouve pas de canal disponible, il est forcé à couper le contact et libère le canal.

Si la file d'attente est vide, le canal libéré est inactif. Sinon, il est affecté au contact d'un transfert dans la file d'attente (figure IV.5). Le contact du Handover est servi selon la méthode de la file d'attente.

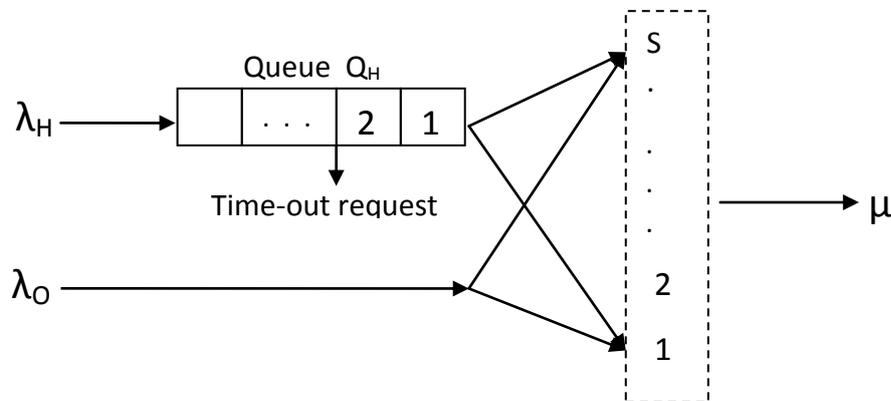


Figure IV.5 Système avec la priorité de la mise en file d'attente pour le contact de transfert

Organigramme

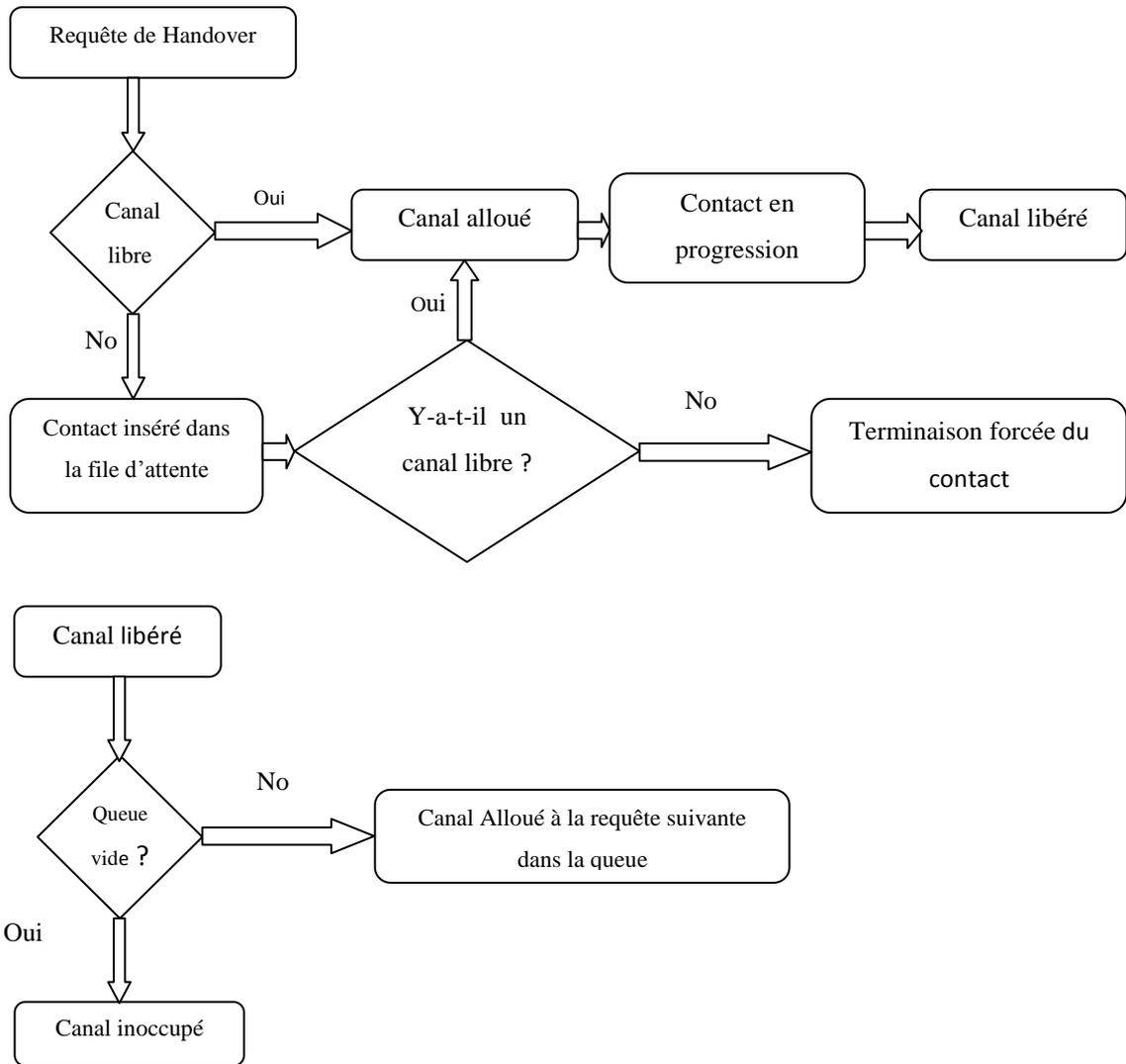


Figure IV.6 : Organigramme de QPS

$$P_n \begin{cases} \frac{(\lambda + \lambda h)^n}{n! \mu^n} P_0 & 1 \leq n \leq s - 1 \\ \frac{(\lambda + \lambda h)^s \lambda h^{n-s}}{s! \mu^s \prod_{j=1}^{n-s} (s\mu + j\mu_w)} P_0 & n \geq s \end{cases} \quad (IV.4)$$

De nouveaux contacts sont bloqués si tous les canaux disponibles dans la cellule par satellite sont occupés. Nous obtenons:

$$Pb = \sum_{n=s}^{\infty} P_n \quad (IV.5)$$

Dans l'état n , la probabilité de défaillance de transfert est donnée par:

$$P_{b2|n} = 1 - \prod_{j=0}^{n-s} \left[1 - \frac{\mu_w}{(s\mu + \mu_w)^{2j}} \right] \quad (IV.6)$$

Par conséquent, P_h est donnée par:

$$Ph = \sum_{n=s}^{\infty} P_{b2|n} P_n \quad (IV.7)$$

IV.4.2.2. Stratégie de réservation de canaux de garde (RCS)

Les canaux de garde améliorent la probabilité de succès de Handover en réservant un nombre fixe de canaux de protection réservés exclusivement aux Handover (Figure IV.7). Le reste des canaux sont utilisés pour le Handover et les nouveaux contacts.

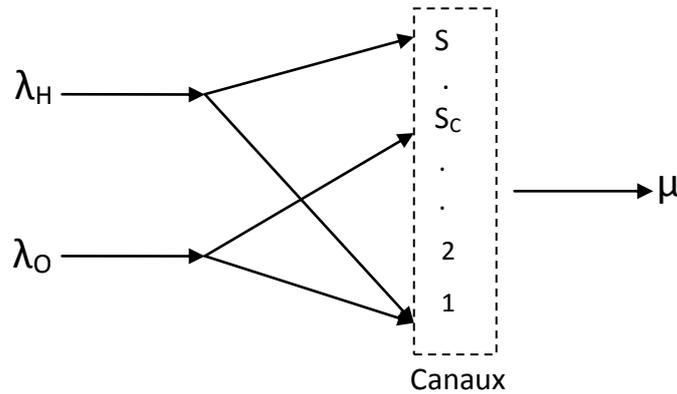


Figure IV.7 Processus d'arrivée des requêtes pour RCS

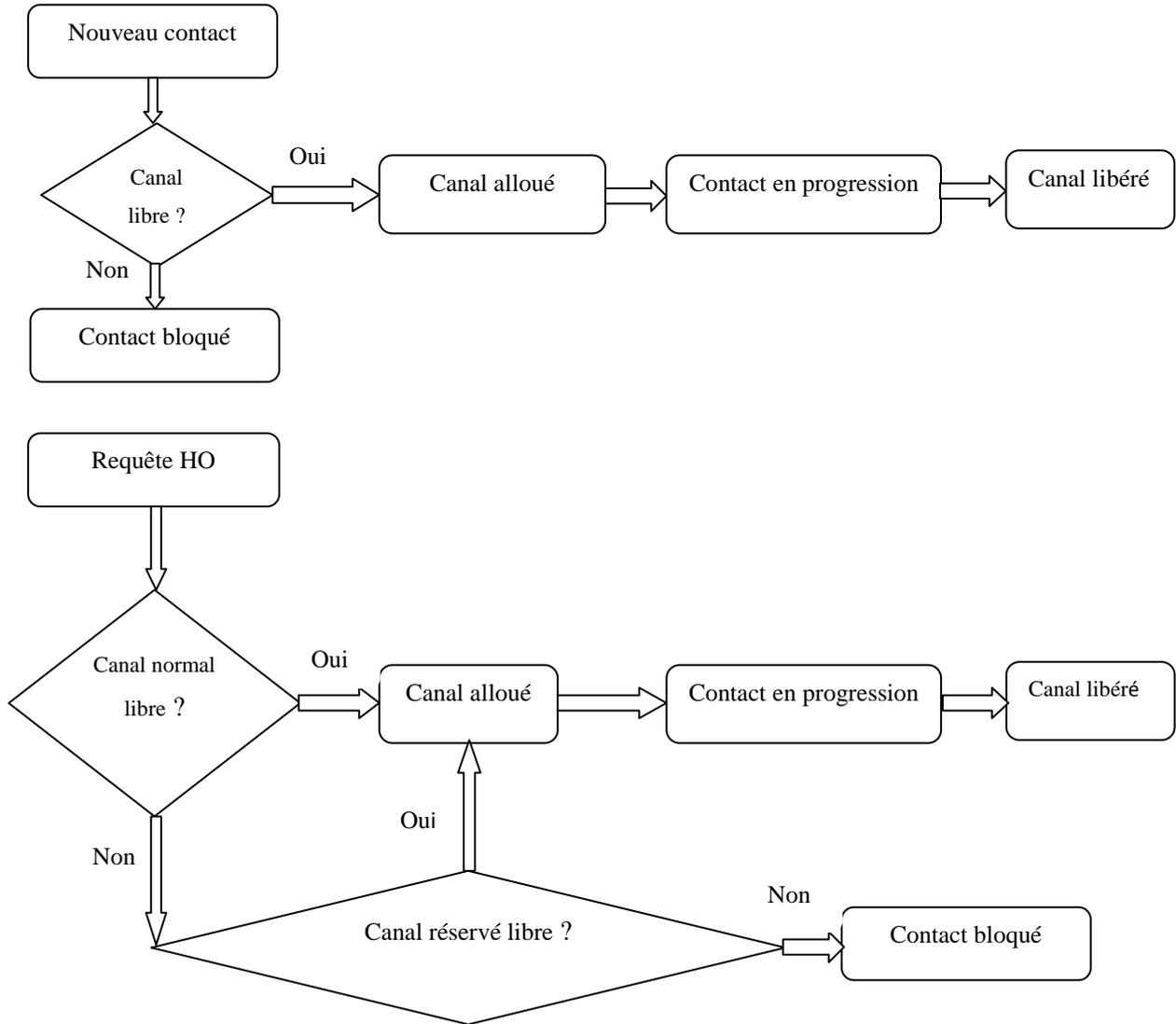


Figure IV.8. Organigramme de RCS

$$P_0 = \left[\sum_{j=0}^n \frac{\left(\frac{\lambda + \lambda h}{\mu} \right)^j}{j!} + \sum_{j=n+1}^s \frac{(\lambda h)^{j-n} (\lambda + \lambda h)^n}{j! \mu^j} \right]^{-1} \quad (IV.8)$$

$$\text{Ou : } a = \left(\frac{\lambda + \lambda h}{\mu} \right), \quad r = \frac{\lambda}{a\mu}$$

La probabilité de blocage de nouveaux contacts est égale à :

$$P = 1 - \sum_j \frac{(a)^j}{j!} P_0 \tag{IV.9}$$

La probabilité de blocage de transfert est égale à:

$$Ph = P_0 \frac{a^s}{s!} (1-r)^n \tag{IV.10}$$

IV.4.2.3. Technique de mise en queue avec l'utilisation des Canaux de garde (QPS+RCS)

C'est une combinaison des deux précédentes techniques : la mise en file d'attente et l'utilisation des Canaux de garde réservés exclusivement aux contacts Handover [15]. Le diagramme d'état de transition est représenté sur la figure IV.9.

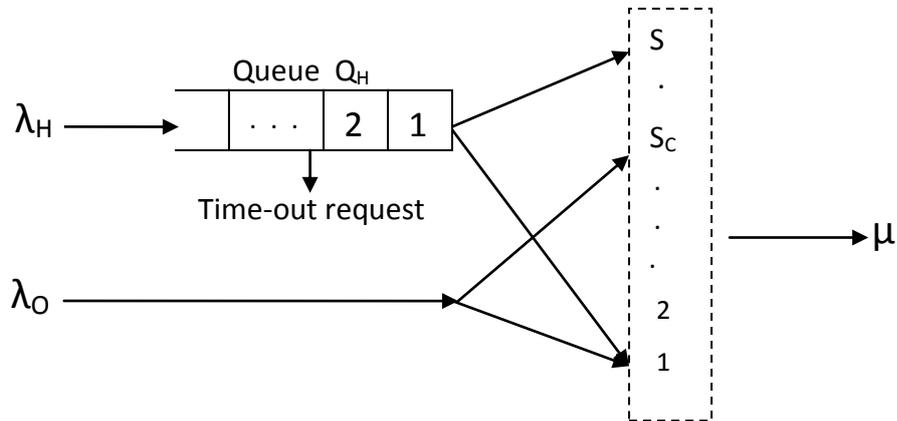


Figure IV.9 Modèle de système avec le canal de réservation et la file d'attente pour le contact transfert

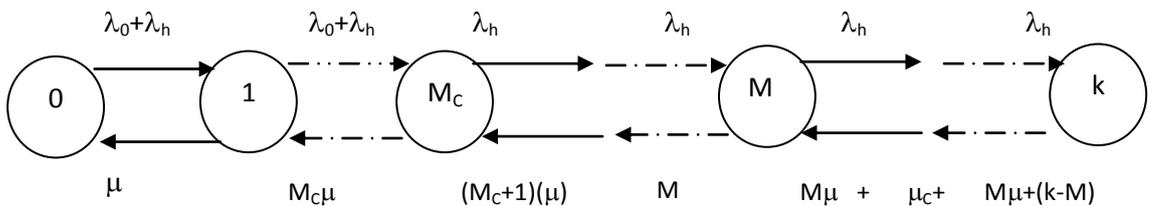


Figure IV.10 : Diagramme d'état pour QPS+RCS

$$P(i) = \begin{cases} \frac{(\lambda + \lambda h)^i}{i! \mu^i} P(0) & 0 \leq i \leq s_c \\ \frac{(\lambda + \lambda h)^{s_c} \lambda h^{i-s_c}}{i! \mu^i} P(0) & s_c < i \leq s \\ \frac{(\lambda + \lambda h)^{s_c} \lambda h^{i-s_c}}{s! \mu^s \prod_{j=1}^{i-s} [s\mu + j(\mu_w)]} P(0) & s < i < \infty \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

où:

$$P(0) = \left\{ \sum_{i=0}^{s_c} \frac{(\lambda + \lambda h)^i}{i! \mu^i} + \sum_{i=s_c+1}^s \frac{(\lambda + \lambda h)^{s_c} \lambda h^{i-s_c}}{i! \mu^i} + \sum_{i=s+1}^{\infty} \frac{(\lambda + \lambda h)^{s_c}}{s! \mu^s} \frac{\lambda h^{i-s_c}}{\prod_{j=1}^{i-s} [s\mu + j(\mu_w)]} \right\}^{-1} \quad (\text{IV.12})$$

Donc, nous obtenons:

$$Pb = \sum_{i=s_c}^s P(i) \quad (\text{IV.13})$$

$$Ph = \sum_{k=0}^{\infty} P(S+k) P_{fh|k} \quad (\text{IV.14})$$

$$P_{fh|k} = 1 - \left(\frac{\mu_w}{\mu S + \mu_w} \right) \prod_{i=1}^k \left\{ 1 - \left(\frac{\mu_w}{\mu S + \mu_w} \right) \frac{1}{(2)^i} \right\} \quad (\text{IV.15})$$

Où $P_{fh|k}$ est la probabilité qu'une demande de transfert échoue après avoir rejoint la file d'attente dans la position $k + 1$.

IV.4.2.4. Technique de mise en queue pour les nouveaux contacts et le Handover avec l'utilisation des Canaux de garde [QPS (H + N) + RCS (H)]

Nous considérons un système avec de nombreuses cellules [15], chacun possède S canaux. Il y a deux files d'attente, Q_H et Q_O pour le Handover et les nouveaux contacts, respectivement. Capacités pour Q_H et Q_O sont M_H et M_O , respectivement. Le Handover est inséré dans Q_H s'il ne trouve pas de canal libre. D'autre part, un contact est mis en Q_O si le nombre des chaînes disponibles est inférieur ou égal à $(S-SC)$, sinon le contact est bloqué. Le Handover intercellulaire placé dans la file d'attente est bloqué lors de son déplacement hors de la cellule avant l'obtention d'un canal (Interruption forcée).

Ainsi, cette technique est modélisée par un processus de Markov bidimensionnel. Le diagramme de transition d'état est représenté sur la Figure IV.11.

$$Pb = \sum_{i=S_c}^{S+MH} P(i, MO) \tag{IV.16}$$

$$Ph = \sum_{j=0}^{MO} P(S + MH, j) \tag{IV.17}$$

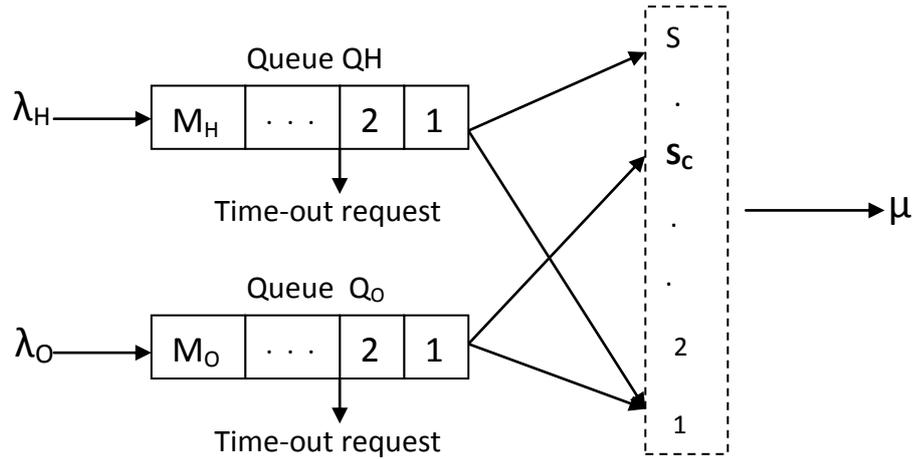


Figure IV.11. Modèle du système avec la priorité et la file d'attente pour un Handover et nouveau contact

IV.5. Résultats de simulation

La stratégie de répartition fixe de canaux FCA (fixed channel allocation) est employée. Les résultats de simulation obtenus concernent : la probabilité de blocage de nouveaux contacts, la probabilité d'échec du Handover, ainsi que les résultats de simulation qui sont comparés à ceux obtenus par d'autres modèles à savoir : non prioritized scheme (FCA) et FCA queuing avec la discipline FIFO (First Input First Output). Les résultats obtenus montrent une diminution significative de la probabilité d'échec du handover.

L'arrivée de nouveaux contacts et les requêtes de Handover (le trafic dans les cellules) forment un processus de poisson avec les moyennes λ_o et λ_h respectivement, nous supposons que:

- La durée de contact est distribuée exponentiellement avec une moyenne de 1 min.
- Le temps moyen d'attente dans la file d'attente est distribué exponentiellement avec une moyenne de 2 min.
- Les contacts bloqués sont perdus et effacés.
- Le système dispose d'un total de 10 canaux disponibles par cellule.
- La longueur de la file d'attente est infinie.
- Les résultats de simulation obtenus sont pris après 10 000 s.

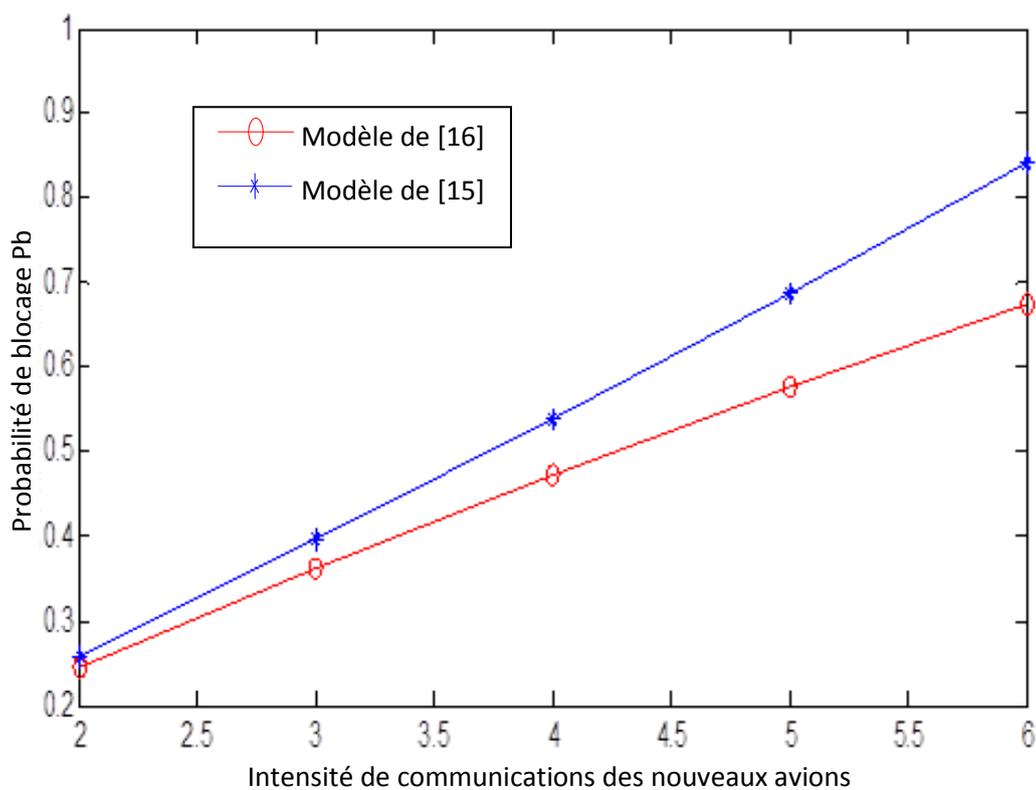


Figure IV.12. La probabilité d'échec de nouveaux contacts en fonction du trafic aérien pour deux modèles

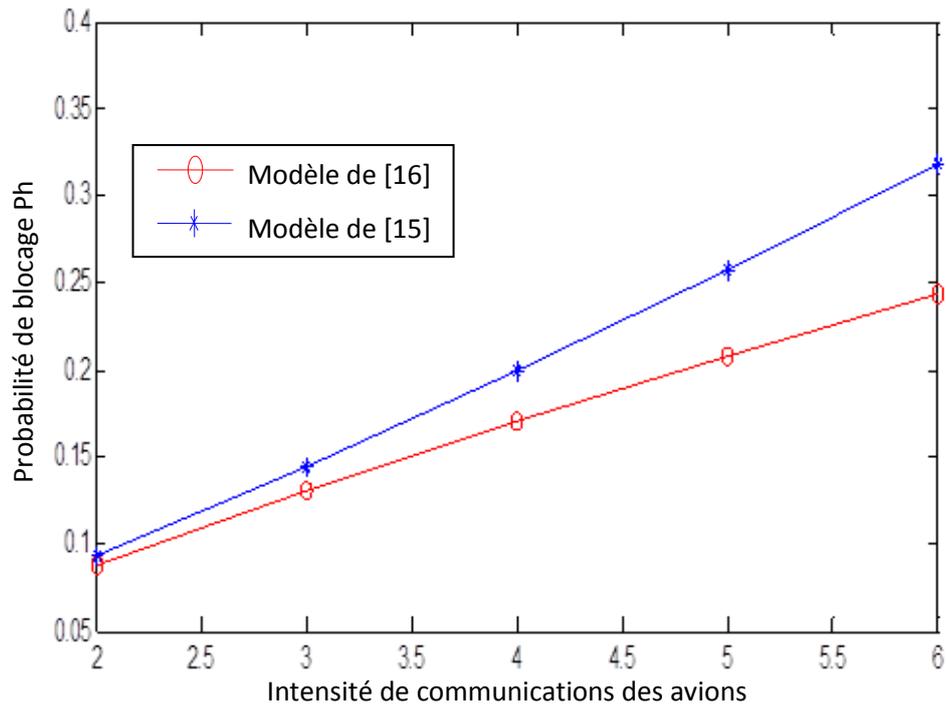


Figure IV.13. La probabilité d'échec de Handover en fonction de l'intensité du trafic aérien pour deux modèles

Nous avons fait une comparaison entre deux modèles afin de choisir celui qui donne le meilleur résultat. Figure IV.12 et Figure IV.13 montrent la probabilité de blocage P_b et l'échec de Handover P_h en fonction de nombre de communications du trafic aérien offert respectivement, nous observons que le modèle de Zeng donne une probabilité d'échec inférieure à celle du modèle de Hong et Rappaport, donc le modèle de Zeng donne un résultat meilleur en le comparant avec le modèle de Hong et Rappaport.

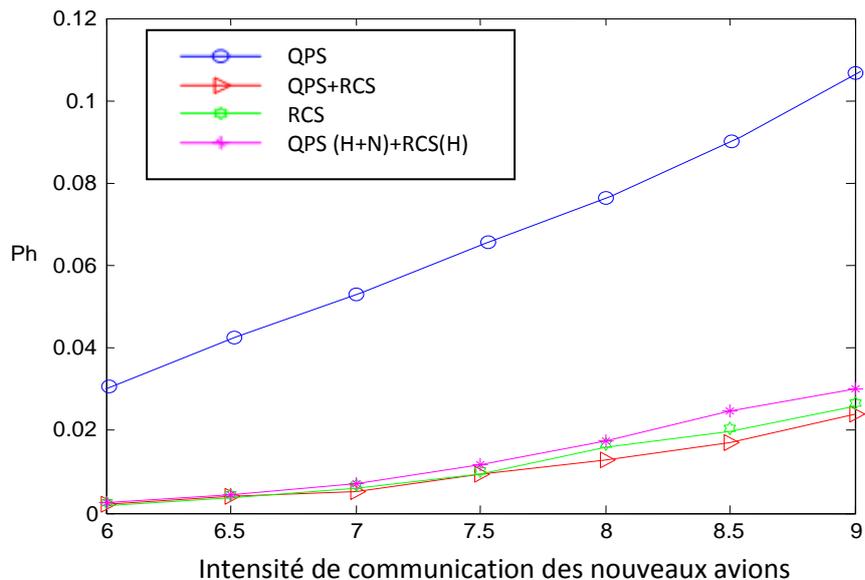


Figure IV.14. La probabilité d'échec de Handover en fonction de l'intensité du trafic aérien pour les différents modèles

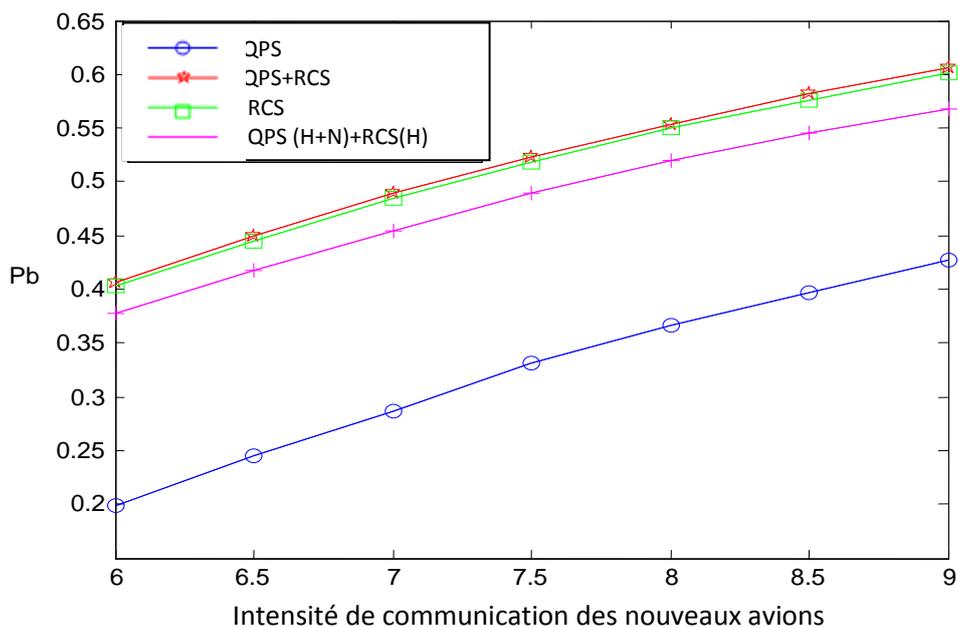


Figure IV.15. La probabilité d'échec des nouveaux contacts en fonction de l'intensité du trafic aérien pour les différents modèles

La figure IV.14 et la figure IV.15 montrent la probabilité de blocage de Handover et des nouveaux contacts respectivement pour différents modèles en fonction de la densité des communications du trafic aérien. Nous notons que la probabilité de blocage de nouveaux contacts est importante pour les techniques RCS et RCS+QPS. La probabilité de blocage de

nouveaux contacts est sensiblement réduite pour le RCS(H)+QPS(N+H) technique, cette réduction devient importante pour le modèle QPS.

En ce qui concerne la probabilité de blocage de Handover, la figure IV.14 montre que l'utilisation des techniques RCS et RCS+QPS donnent la meilleure réduction de cette probabilité qui justifie l'augmentation de la CBP et elle augmente de façon significative en utilisant la technique QPS.

Une comparaison a été faite entre les techniques non prioritaires et prioritaires. La réduction de la probabilité de blocage de transfert est réalisée en fonction de tous les canaux réservés exclusivement à servir les demandes de Handover.

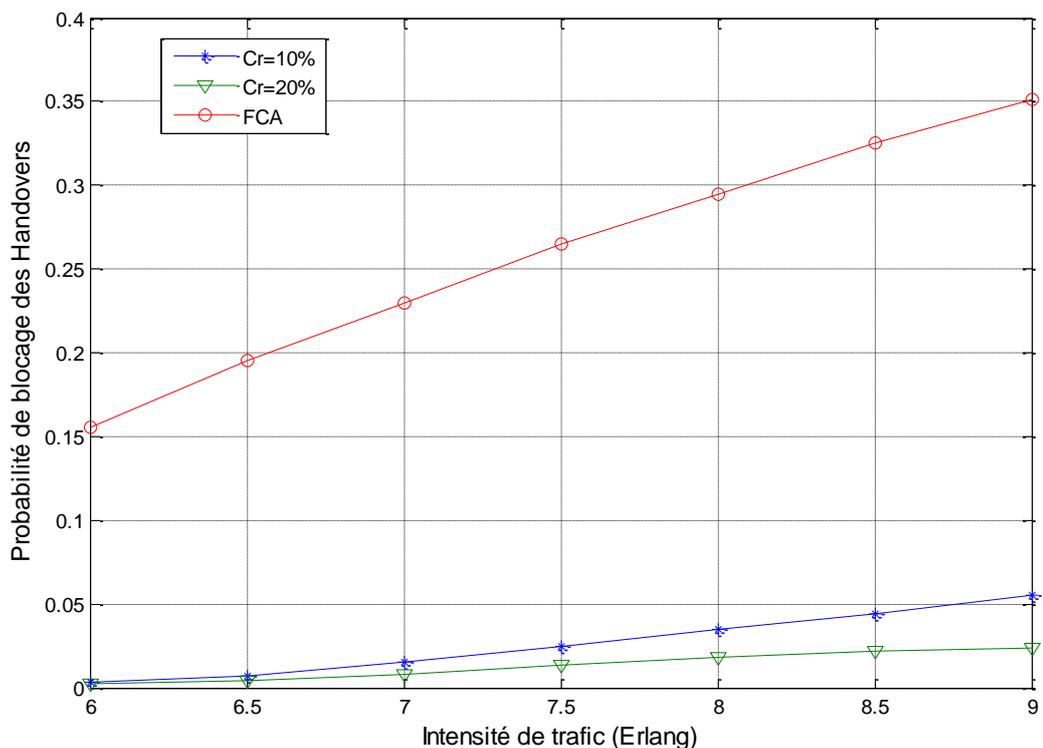


Figure IV.16. La probabilité de blocage des requêtes de Handover pour RCS

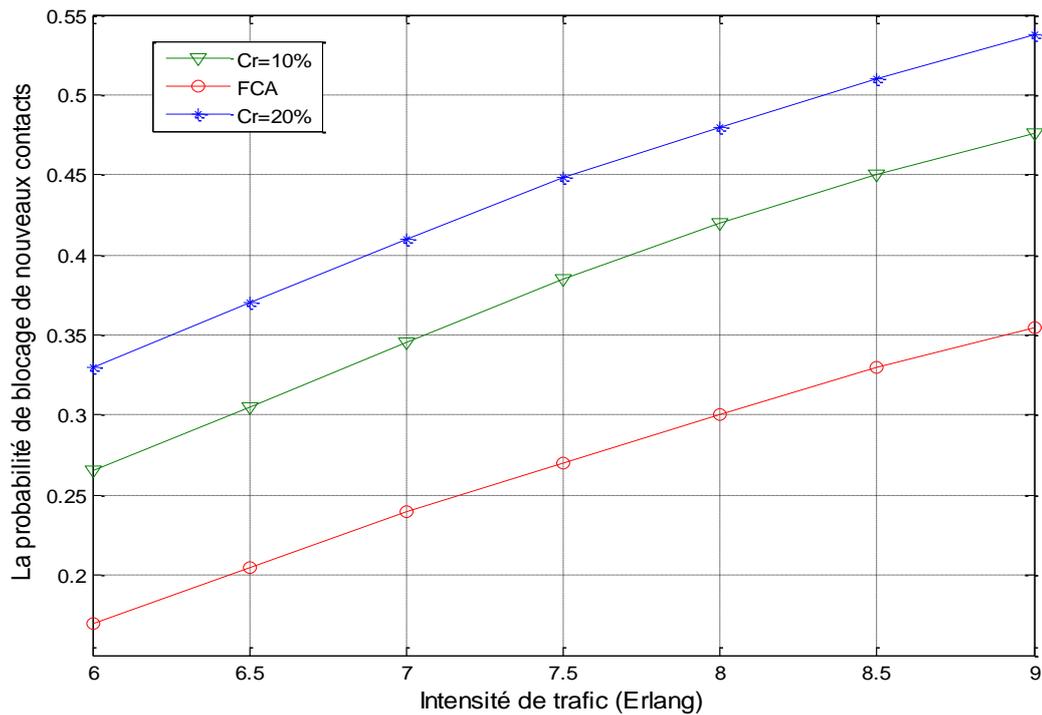


Figure IV.17. La probabilité de blocage des nouveaux contacts pour RCS

Pour le modèle RCS, on a étudié deux cas selon le taux de canaux de garde réservés pour le Handover ou pour les communications d'urgence et de détresse par rapport à l'ensemble des canaux alloués pour chaque cellule.

1- Cr=10%

2- Cr=20%

Les figures (IV.16) et (IV.17) montrent la probabilité de blocage des requêtes de Handover et de nouveaux contacts respectivement pour le modèle RCS en fonction de la densité du trafic. D'après les deux figures, on constate que lorsque le nombre de canaux réservés exclusivement aux requêtes de Handover augmente, la probabilité d'échec du Handover diminue, cette probabilité est minimisée en les comparant avec celles des références [14,42]. Cependant la probabilité de blocage des nouveaux contacts augmente avec l'augmentation des canaux réservés.

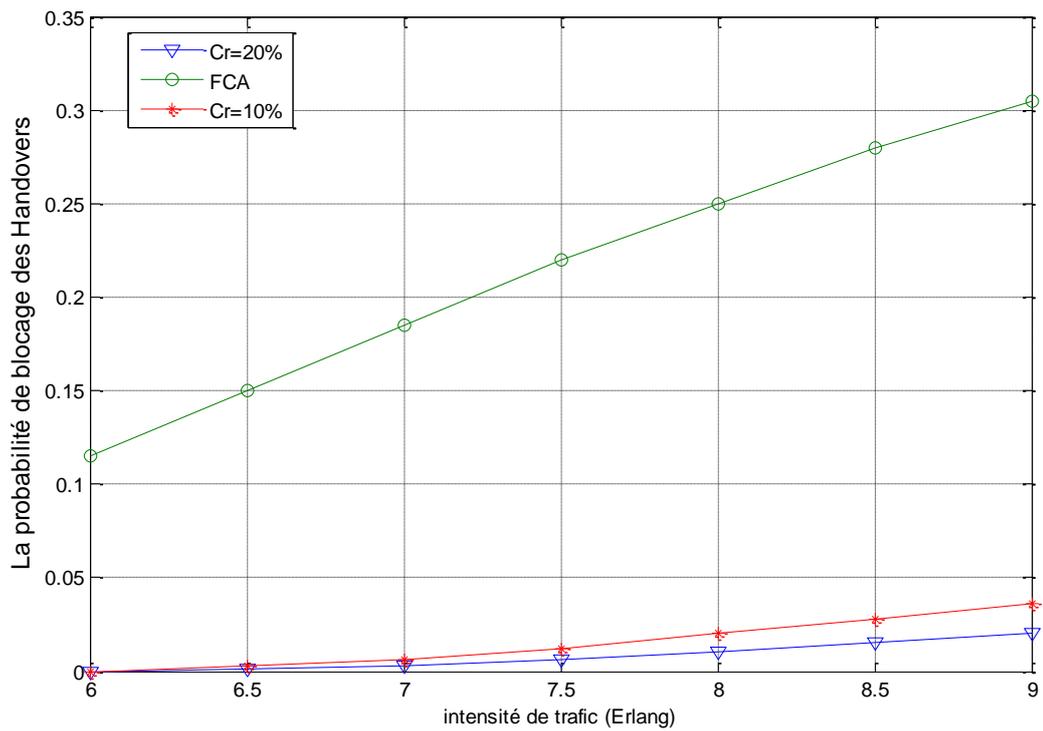


Figure IV.18. La probabilité de blocage des requêtes de Handover pour RCS+QPS

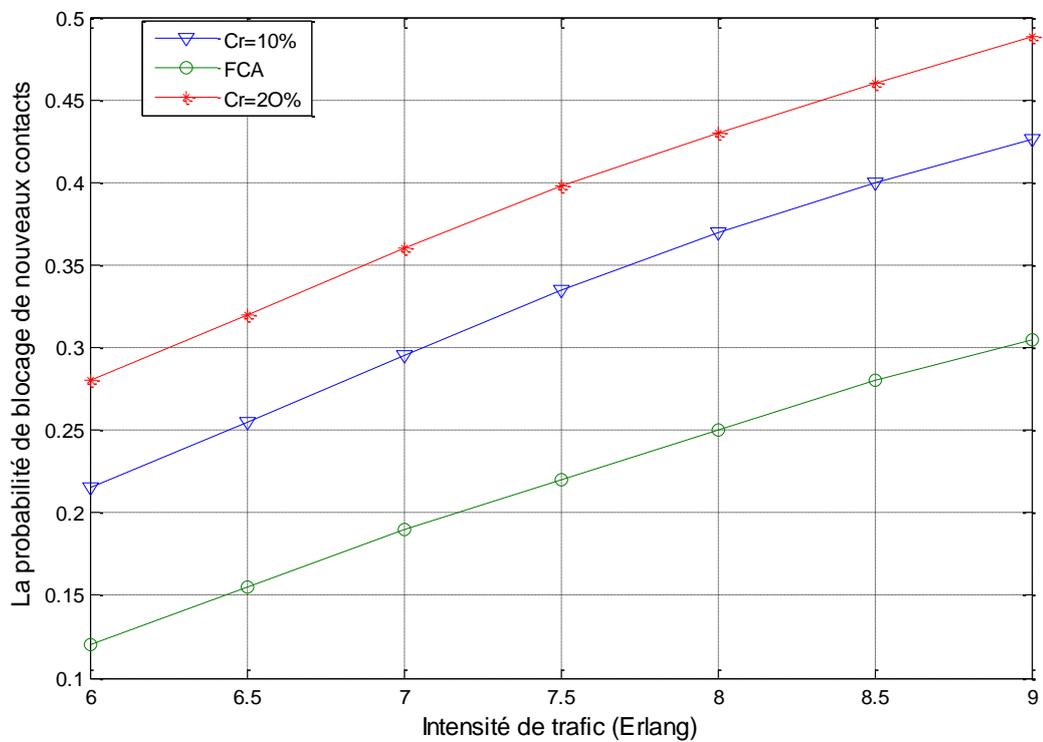


Figure IV.19. La probabilité de blocage des nouveaux contacts pour RCS+QPS

Les figures (IV.18) et (IV.19) montrent la probabilité de blocage de nouveaux contacts et les requêtes de Handover respectivement pour le modèle RCS (H) +QPS (H+N) en fonction de la densité du trafic aérien, dans ce cas la diminution de la probabilité d'échec du Handover est améliorée selon la variation du nombre de canaux de garde. La probabilité de blocage de nouveaux contacts diminue par rapport aux deux techniques précédentes car une deuxième file d'attente est réservée aux nouveaux contacts.

IV.6. Temps de simulation

Les figures suivantes (IV.20) et (IV.21) illustrent le délai d'attente moyen dans la file d'attente, pour FCA queuing et QPS+RCS respectivement en fonction du temps de simulation, cette valeur dans le modèle QPS+RCS est importante supérieure à celle du FCA, parce que les communications ayant un temps résiduel plus long dans le modèle QPS restent dans la file d'attente le maximum du temps, alors que ceux du FCA queuing le temps d'attente est moins parce qu'ils quittent la file d'attente suivant l'ordre FIFO.

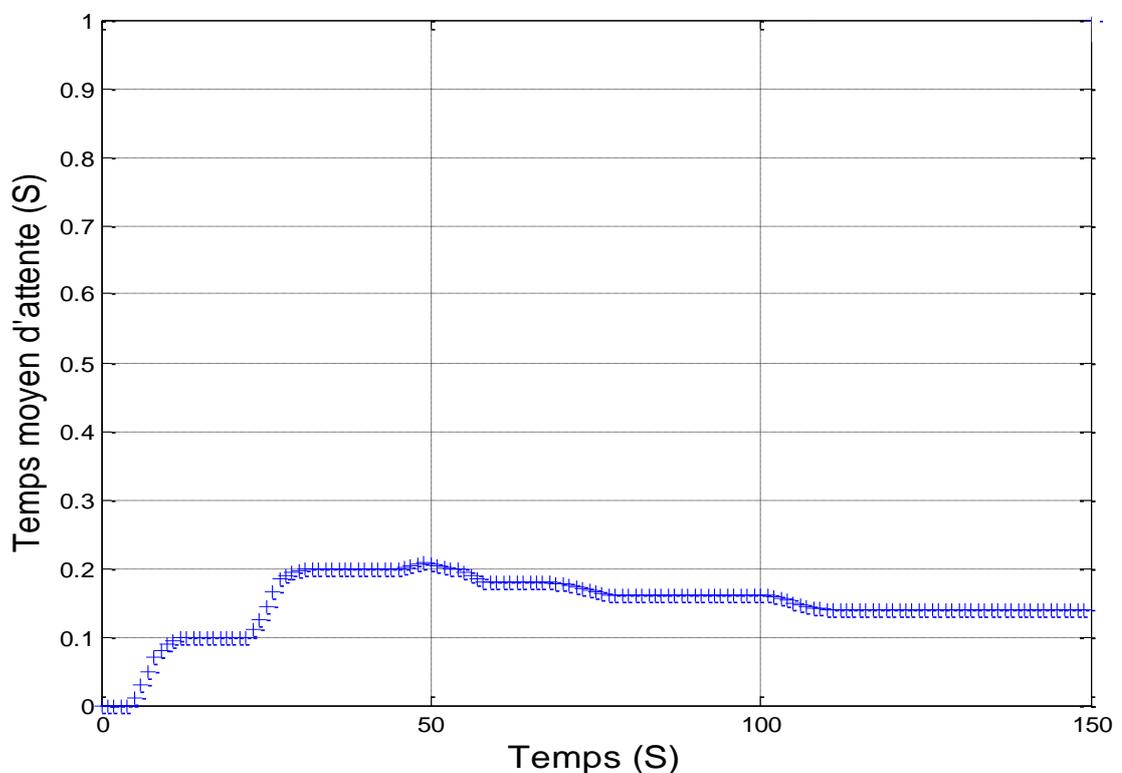


Figure IV.20. Le temps moyen d'attente (FCA Queuing with FIFO discipline) 150 S

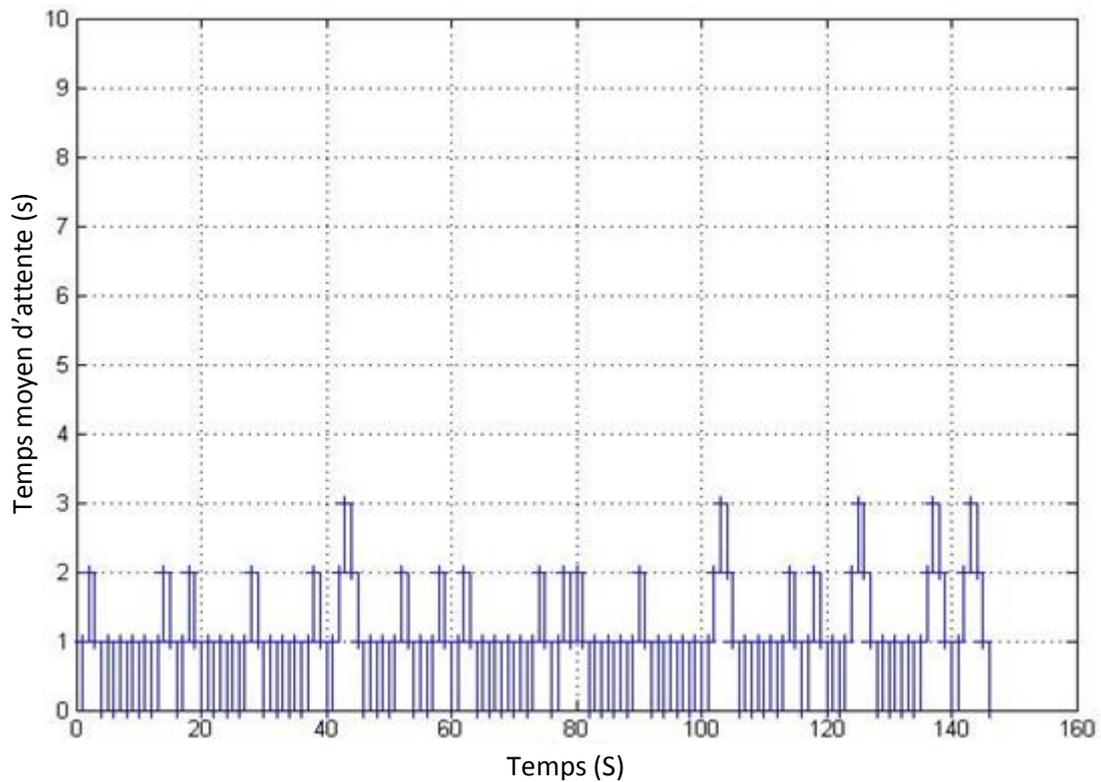


Figure IV.21. Le temps moyen d'attente (QPS+RCS) 150 S

Lorsqu'on augmente le temps de simulation on constate que le délai d'attente moyen dans la file d'attente devient important dans les deux modèles, pour FCA queuing et QPS+RCS respectivement, cette valeur dans le modèle OPS+RCS est supérieure à celle du FCA, parce que les communications ayant un temps résiduel plus long dans le modèle QPS+RCS restent dans la file d'attente le maximum du temps, alors que ceux du FCA queuing le temps d'attente est moins parce qu'ils quittent la file d'attente suivant l'ordre FIFO, (voir figures IV.22 et IV.23).

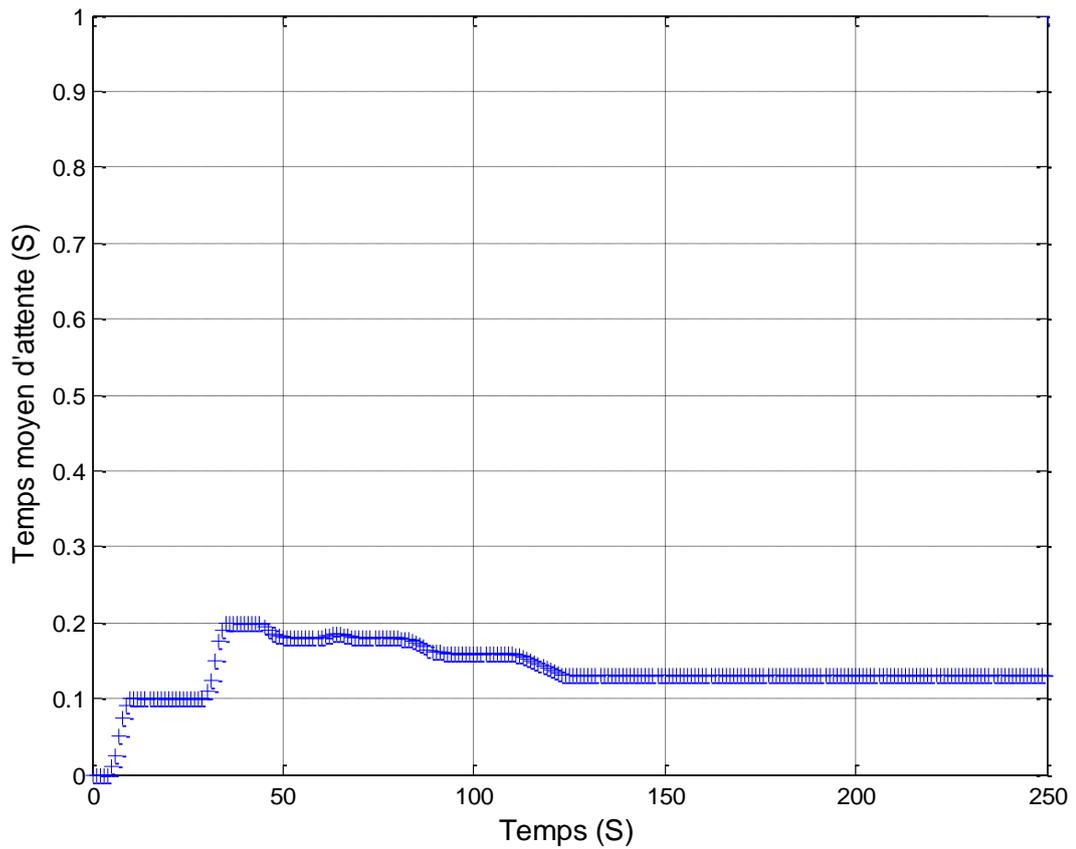


Figure IV.22. Le temps moyen d'attente (FCA Queuing with FIFO) 250 S

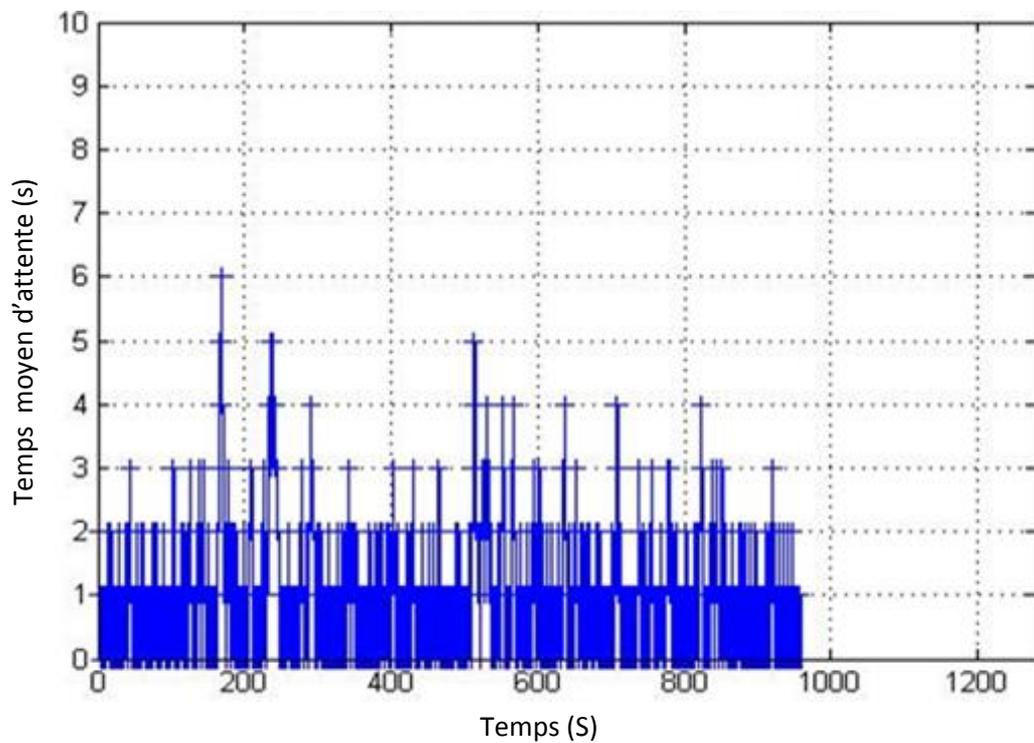


Figure IV.23. Le temps moyen d'attente (QPS +RCS) 950 S

IV.7. Appréciation des résultats

Sur la base de ces résultats, il est suggéré que le support système au transfert de communication fournit une base viable pour une amélioration du système et devrait être bien accueilli par les contrôleurs s'il est accompagné d'un entraînement et d'une formation adéquats.

A propos de CBP (contact blocage probability), les résultats montrent que la valeur de ce paramètre varie d'une technique à une autre. Par conséquent, il devient important pour les techniques utilisant des canaux de garde et la file d'attente exclusivement pour le Handover (technique RCS et RCS+QPS) et il diminue de manière significative pour la technique QPS.

IV.8. Conclusion

Le Handover est l'une des procédures de communication essentielle dans les réseaux de satellites LEO, la gestion de ce mécanisme doit être réglée de manière appropriée afin de maintenir la communication entre les pilotes et les contrôleurs, et d'assurer ainsi un niveau acceptable de qualité de communication.

Les systèmes actuels de coordination basés sur l'utilisation des lignes téléphoniques ont été jugé bénéfiques essentiellement pour le contrôleur. L'hypothèse de réduction des coordinations téléphoniques et de la charge de travail grâce au support système n'a pas été vérifiée. En fait, on observe même une tendance (non significative) à l'augmentation de la charge de travail contrôleur due aux fonctions de coordination. Ceci est en accord avec les remarques des contrôleurs concernant la grande concentration visuelle que nécessitaient les conditions avec coordination.

La charge visuelle est rendue très forte par des problèmes de recouvrement d'étiquettes et par une charge de trafic très forte. Néanmoins, les contrôleurs considèrent que par rapport aux méthodes de travail habituelles, le support système permettra de réduire la charge de travail. Ils font également l'hypothèse que le support à la coordination pourrait permettre de

faire des coordinations qu'il n'aurait pas été possible de faire dans les conditions actuelles, pour des raisons de charge de travail. Bien que les contrôleurs et les pilotes vont apprécier la coordination à travers la constellation de satellites.

Chapitre V

Le système de communication anticollision TCAS

Contenu du chapitre

V.1. Introduction	59
V.1.1. Le système anticollision actuel	59
V.2. Modèle de données et préliminaire	61
V.2.1. Description technique du TCAS II	62
V.2.2. Répondre Structure	62
V.3. Fonctionnement du nouveau système	63
V.3.1. Description technique du système proposé	64
V.3.2. La logique d'évitement de collision	66
V.3.3. Résolution Algorithme et priorité	68
V.3.4. Détection des conflits	69
V.4. simulations	70
V.5. Conclusion	76

V.1. Introduction

Il existe plusieurs techniques [43] et moyens qui sont utilisés pour diminuer le nombre de conflits entre les aéronefs, parmi ces moyens le TCAS dans sa forme actuelle, il est utilisé comme un système supplémentaire qui informe l'équipage des collisions éventuelles et instruit des manœuvres d'évitement. Lorsque les deux avions sont équipés de TCAS, la coordination entre eux est faite de telle sorte qu'ils réagissent de la meilleure façon possible.

Dans ce chapitre on propose un nouveau modèle TCAS destiné à réduire certaines faiblesses de TCAS actuels tels que le taux élevé d'alertes inutiles qui perturbent les pilotes et les conduisent à effectuer des manœuvres inutiles ou dangereuses.

V.1.1. Le système anticollision actuel

Le TCAS II [22] est le système commercialisé qui correspond aux exigences de l'ACAS II. La version actuelle du TCAS II est la version 7, cette nouvelle version inclut la sécurité significative, des améliorations opérationnelles et techniques comparativement à la version précédente. TCAS II interroge et reçoit des messages via le transpondeur mode S et C. Le taux d'interrogation est 1 Hz et les tests logiques pour déterminer une menace potentielle sont basés sur la différence d'altitudes et de position relative. Lorsqu'un aéronef est détecté par le TCAS et déterminé à être une menace potentielle, le TCAS présente au pilote comme un avis de trafic (Traffic Advisory). Si la menace est imminente alors TCAS II propose une manœuvre d'évitement au pilote dans le sens vertical, c'est ce qu'on appelle un avis de résolution (Resolution Advisory).

Les positions des avions à proximité présentées par le TCAS sont relatives et non exactes, elles sont fournies par une antenne directionnelle (quatre directions), et donc un avion peut se retrouver dans un angle de 90 degrés, cela est indiqué dans la figure IV.1 Un avis de résolution dans le plan horizontal et le sens de circulation des autres aéronefs ne sont pas fournis par le TCAS actuel.

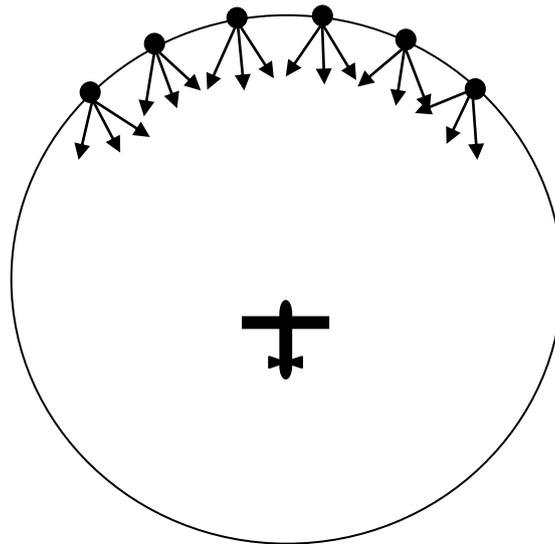


Figure V.1 *Nombreuses positions et orientations possibles pour un appareil montré par TCAS actuel.*

Le système proposé utilise le ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) [24,44] ; il peut être utilisé pour améliorer la surveillance du trafic dans l'espace aérien intérieur. Il convient de noter ici que ce procédé est indisponible et doit être adopté dans le monde entier pour la liaison de données ADS-B.

Un système de navigation mondial aidera à normaliser les procédures et les affichages dans le cockpit [45-46]. L'objectif est d'améliorer les systèmes anticollisions actuels et d'éliminer les alarmes intempestives. On va se baser sur les principes de radar SSR, pour que certaines données de base soient transmises telles que l'altitude (niveau de vol) fournies par les systèmes barométriques à bord des aéronefs, la position de chaque avion fourni par trois satellites, la trajectoire (direction) fournie par deux positions successives et la vitesse sol calculée en utilisant la distance parcourue pendant un temps déterminé. Les transpondeurs mode S envoient l'identification de l'aéronef; son altitude et coordonnées géographiques.



Figure V.2 Présentation du TCAS actuelle.

V.2. Modèle de données et préliminaire

Trois niveaux de l'ACAS [19] ont été décrits par l'Organisation internationale de l'aviation civile (OACI): ACAS I, II et ACAS ACAS III.

- ACAS I est un ACAS qui fournit des informations des avions menaçant mais ne comprend pas la capacité de générer des avis de résolution (RA).
- ACAS II fournit des avis de résolution verticale (AR), en plus des informations des avions menaçant (TA).
- ACAS III est un ACAS qui fournit des avis de résolution verticale et horizontale (AR), en plus des avis de circulation (TA). Actuellement aucun TCAS III n'est installé sur les avions.
- ACAS X [23] représente une révolution dans les techniques de produire des manœuvres d'évitements.

V.2.1. Description technique du TCAS II

TCAS II se compose du transpondeur mode S avec un panneau de configuration, l'ordinateur TCAS qui assure la détection des menaces, la génération et la détermination de la manœuvre d'évitement.

Les antennes utilisées par le TCAS II est une antenne directionnelle qui est montée sur la partie supérieure de l'appareil et une autre antenne omnidirectionnelle montée sur la partie inférieure de l'avion. Ces antennes émettent des interrogations sur 1030 MHz à différents niveaux de puissance dans chacun des quatre segments d'azimut (90 degrés). Ces antennes reçoivent également les réponses du transpondeur, à 1090 MHz, et les envoient à l'ordinateur du TCAS.

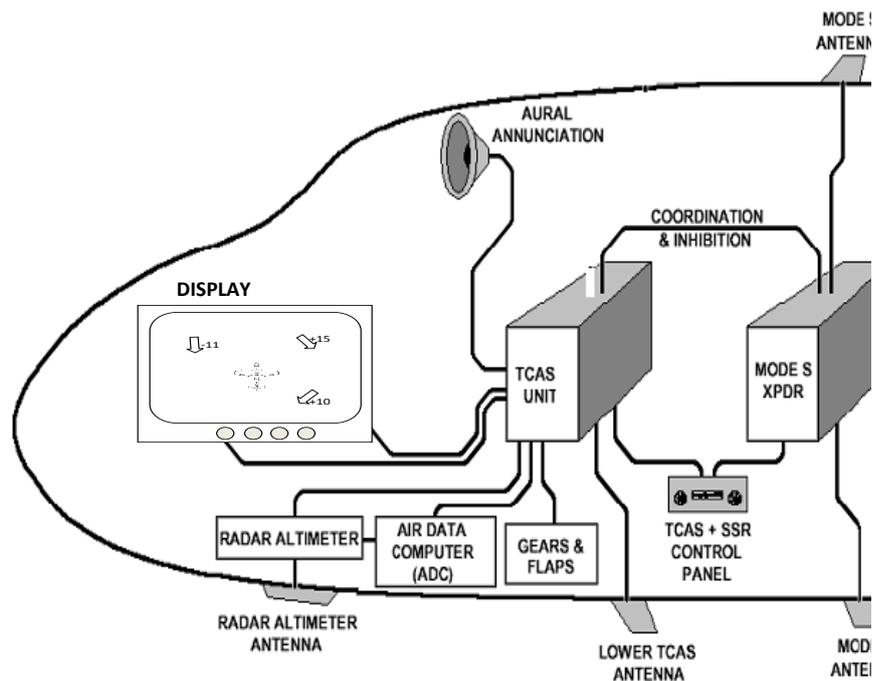
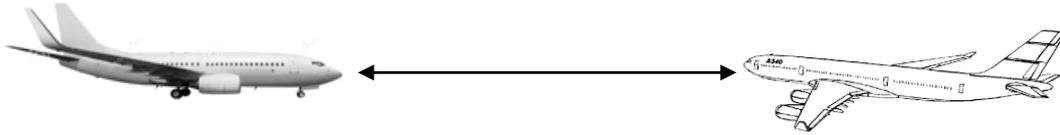


Figure V.3 schéma synoptique du TCAS.

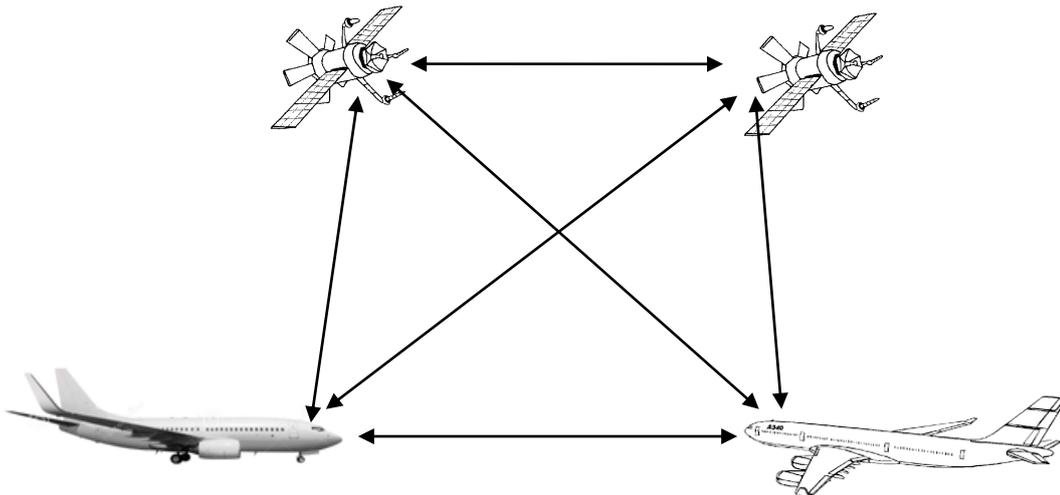
V.2.2. La structure de réponse

La structure de réponse en mode S est $P_S(t)$ qui a la forme d'une série d'impulsions [4] du mode S. Selon les exigences de l'OACI, il doit répondre aux contraintes suivantes présentées dans le tableau 1:

d'identifier d'autres avions équipés de transpondeurs et de connaître avec précision leurs positions et leurs trajectoires. Cela permet aux pilotes de maintenir une distance de sécurité suffisante. Le pilote peut également voir les informations sur le trafic évoluant aux alentours dans les zones terminales. L'objectif est de donner aux pilotes la meilleure information possible pour prendre les bonnes décisions, rapides et précises.



a) *Principe de fonctionnement du TCAS actuel*



b) *Fonctionnement du système proposé*

Figure V.4: Comparaison entre l'actuel système et notre modèle

V.3.1. Description technique du système proposé

L'antenne utilisée par ce système est la même que celle de transpondeur. Il s'agit d'une antenne omnidirectionnelle qui est montée sur le fuselage de l'aéronef. Les coordonnées géographiques des avions à proximité sont mises à jour chaque seconde; les deux positions

successives sont utilisées pour indiquer la direction de mouvement de chaque appareil sur l'écran TCAS.

La géométrie du système est représentée sur la figure V.5 (b) et la distance entre deux points est donnée par la formule suivante [47] résultante de la trigonométrie sphérique:

$$P = 60 \cos^{-1}(\sin L_A \sin L_B + \cos L_A \cos L_B \cos g) \tag{V.3}$$

Où P est la distance orthodromique entre deux points sur la terre, elle est la plus courte distance entre ces deux points et elle est exprimée en mils nautiques (1NM = 1852 m).

La vitesse de déplacement est donnée pour chaque aéronef par la formule suivante:

$$GS = \frac{60 \cos^{-1}(\sin L_A \sin L_B + \cos L_A \cos L_B \cos g)}{\tau} \tag{V.4}$$

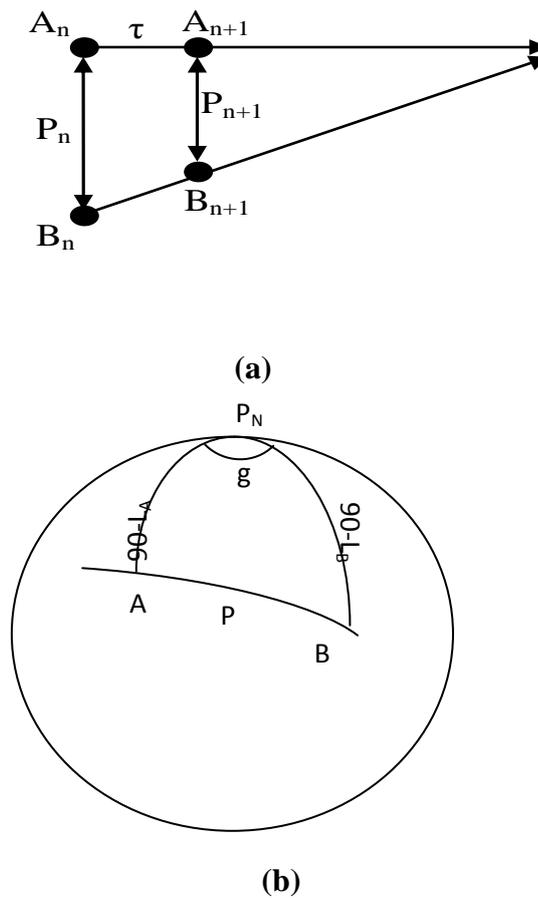


Figure V.5: Distance et la géométrie de la Terre

Le taux de convergence (Cr) est donné par l'équation suivante:

$$Cr = \frac{P_n - P_{n+1}}{\tau} \quad (\text{V.5})$$

$$Cr = 60 \frac{\cos^{-1}(\sin L_{An} \sin L_{Bn} + \cos L_{An} \cos L_{Bn} \cos g_n) - \cos^{-1}(\sin L_{An+1} \sin L_{Bn+1} + \cos L_{An+1} \cos L_{Bn+1} \cos g_{n+1})}{\tau} \quad (\text{V.6})$$

Cr doit être prise en considération, car elle représente la vitesse d'approche d'un avion vers les autres, cela signifie que les avions sont face à face quand il est élevé.

Où τ représente le temps entre deux points successifs

V.3.2. La logique d'évitement de collision

La logique d'évitement de collision [48-49] ou CAS (Collision Avoidance System) est basée sur deux concepts de base: le niveau de sensibilité et de la distance d'avertissement. Malgré que les paramètres CAS sont strictement définis, la complexité de la logique d'évitement de collision rend la prédiction des décisions à entamer en temps réel difficile (voir figure V.6).

Le niveau de sensibilité est une fonction de l'altitude et définit le niveau de protection. La distance d'avertissement est principalement basée, dans notre système, sur la durée de la distance à parcourir (et non pas de temps à parcourir) pour le point de rapprochement (Closest Point of Approach CPA).

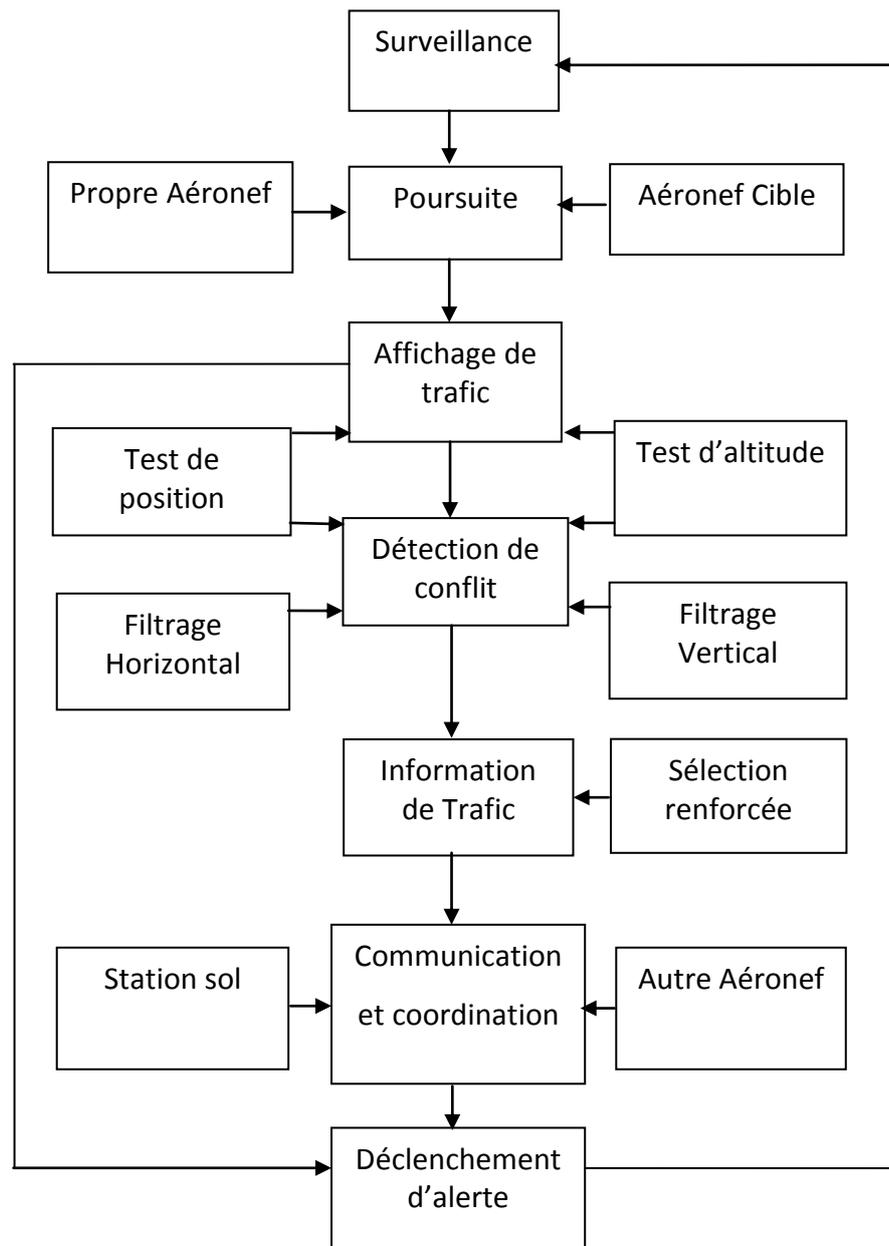


Figure V.6 : Fonctions logiques CAS

Chaque point (latitude et longitude) contient 19 chiffres codés sur 76 bits transmis en code binaire qui a une impulsion d'une durée de 23.75 ms 76 bits, elle est modulée par phase différentielle DPSK (Phase Shift Keying différentiel). L'unité de TCAS calcule la distance entre elle et l'autre aéronef, si tous les avions en conflit sont affichés sur un écran (seul avions à ± 2000 pieds sont affichées).

Ce système représente un moyen valable pour transmettre des données sur la fréquence 1030 MHz et 1090 MHz à très court laps de temps, il va donc falloir plusieurs interrogations et réponses en une seconde. Elle représente également les fondements algorithmiques du processus d'immédiate et précise reconstruction de la trajectoire [25] utilisés pour trouver la position de référence de données transmises. Ces positions serviront de référence pour l'évaluation de l'exactitude des fonctions logiques CAS.

Pour assurer un bon fonctionnement de ces systèmes, il est important que chaque système n'empêche pas la transmission des données des autres. Ainsi, il est nécessaire pour chaque système de réduire ses transmissions [50] pour le canal de communication partagé.

V.3.3. Résolution Algorithmique et priorité

Les règles suivantes [48] tiennent compte de la maniabilité et de la phase de vol d'aéronef concerné et lorsque la séparation verticale requise n'est pas respectée. Nous pouvons établir trois règles basées sur la géométrie horizontale.

- Règle 1: «face à face» deux avions n'ont pas de priorité, chaque avion doit virer à droite pour éviter les conflits. Celle-ci doit être appliquée lorsque la différence de trajet est comprise entre 135 et 180 degrés.
- Règle 2: Si deux avions ont des routes qui se croisent, l'avion qui a, à sa droite un aéronef qui s'approche de lui, doit tourner à gauche et l'autre doit tourner à droite pour éviter les conflits de la traversée. Ceci doit être appliqué lorsque la différence de trajet se situe entre 15 et 135 degrés.
- Règle 3: "Dépassement" l'avion qui est derrière doit virer 15 degrés vers la droite pour passer. Ce sera appliqué lorsque la différence angulaire entre les deux routes se situe entre 0 et 15 degrés.

V.3.4. Détection des conflits

Supposons que l'espace aérien est représenté comme un système de coordonnées cartésiennes en trois dimensions, la position et la vitesse de l'avion sont: (L, G, Alt) et (Vox, Voy, Voz) et pour l'intrus sont (Li, Gi, Alti) et (Vix, Viy, Viz) respectivement. Ces termes sont tous variables dans le temps; l'espace à protéger est un cylindre de rayon 'R' et de hauteur 'H' comme le montre la figure V.7. Lorsque l'intrus pénètre dans la zone protégée, cela signifie une menace d'accident. Pour éviter les collisions en vol, après la détection de conflit, une résolution est nécessaire avant que cela arrive.

Tant que le pilote peut voir les avions avoisinant, nous supposons que le signe visuel commence lorsque la séparation du trafic est de ± 1200 pieds et l'alarme sonore commence à ± 950 pieds au lieu de ± 1200 pieds, cela va réduire les alarmes de manière significative et surtout dans les circuits d'attente.

Dans l'actuel TCAS, l'alarme sonore commence à environ 3 NM. Nous supposons que la menace horizontale est détectée comme visuel alarme à $R = 3$ NM et l'alarme sonore commence à $r = 2$ NM comme le montre la figure V.7. L'espace réduit est donné par l'équation suivante:

$$\frac{S_r}{S_R} = 1 - \left(\frac{2Rx + R\Delta h + Hx - x^2 - x\Delta h}{R(R + H)} \right) \quad (V.7)$$

où:

S_R : représente l'espace aérien actuel avec alerte sonore.

S_r : représente l'espace aérien réduit avec alerte sonore.

Ce modèle va diminuer le nombre d'accidents et d'incidents en diminuant le rapport de risque donné par la relation suivante :

$$\text{Rapport de risque} = \frac{\text{prob}(NMAC / TCAS)}{\text{prob}(NMAC / noTCAS)} \quad (V.8)$$

Où : *NMAC* (Near Mid Air Collision) /*TCAS* : représente les incidents qui peuvent avoir lieu dans la présence du *TCAS* et *NMAC* (Near Mid Air Collision) /no *TCAS* : représente les incidents qui peuvent avoir lieu sans ou *TCAS* hors service.

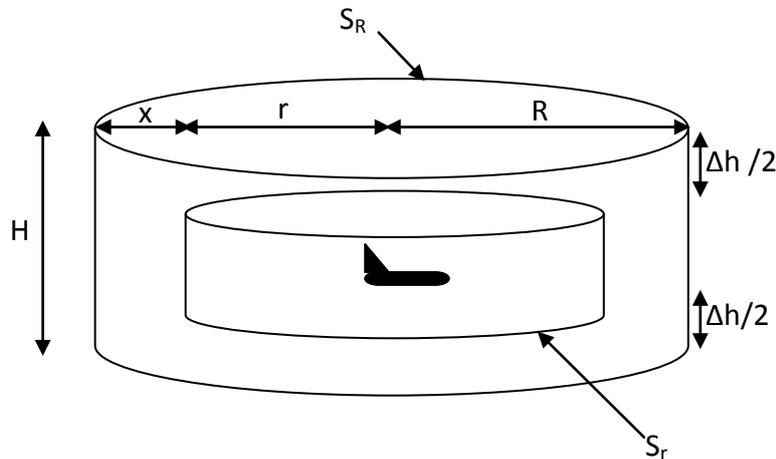


Figure V.7 : Réduire l'espace vertical et horizontal

V.4. Simulations

Dans les simulations de la technique proposée pour le *TCAS*, nous avons utilisé des données de vol au hasard, mais elles peuvent être rencontrées en situation réelle. Considérons plusieurs vols conflictuels, la séparation verticale est appliquée en priorité, puis séparation horizontale est appliquée en deuxième priorité. Toutes les simulations sont applicables pour tout type d'aéronef; à basse et haute altitude.

Une fois une menace est détectée, la première solution est à prendre la résolution verticale afin de maintenir un espacement vertical entre les aéronefs. Si ce n'est pas possible, la résolution horizontale [51] doit être adoptée comme illustré dans la figure V.8. Les avions 1 et 2 convergent vers le point de conflit et la manœuvre d'évitement doit être effectuée suivant la règle 2.

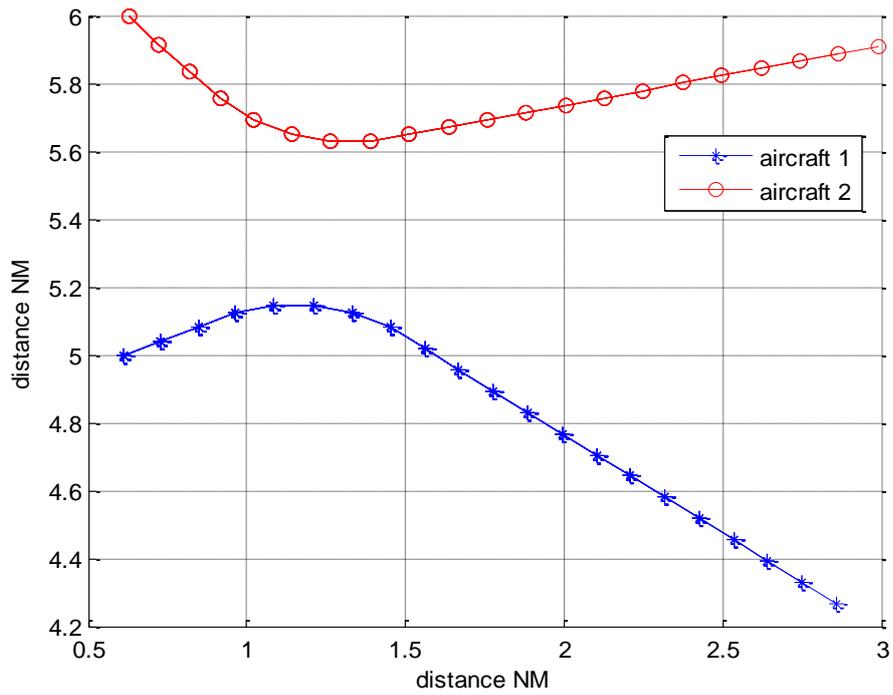
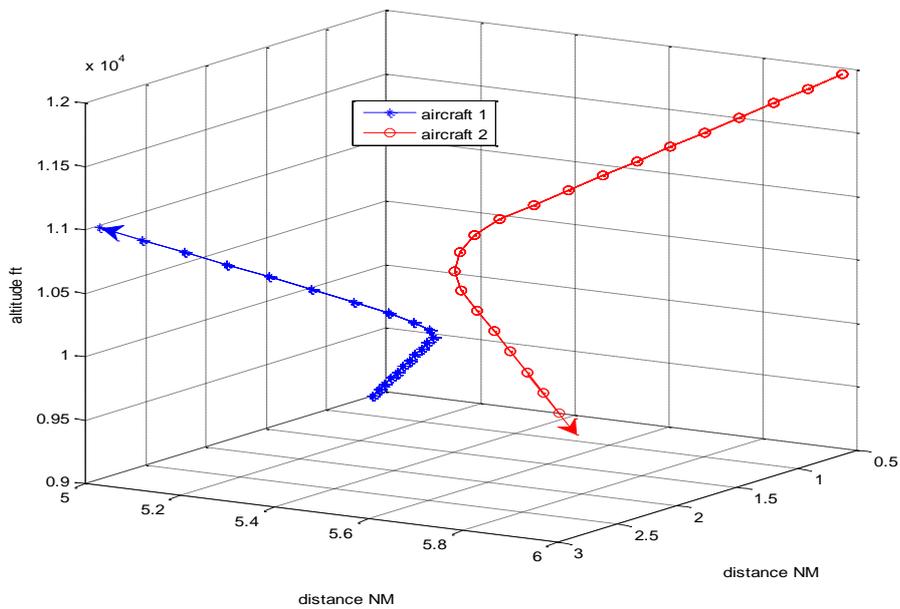


Figure V.8 : Résolution horizontale

Certains conflits ont besoin des deux types de résolutions [52] pour résoudre le problème, on utilise la simulation en 3D comme indiqué dans les prochaines figures où on a obtenu des résultats satisfaisants en les comparant avec ceux des articles [48] et [53].



L'avion 1 a reçu l'autorisation de monter vers FL120 et l'avion 2 a reçu l'autorisation de descendre vers FL090. Lorsque les deux avions 1 et 2 s'approchent du niveau FL105 rapidement (la séparation requise est menacée) TCAS émet un RA pour diminuer la vitesse verticale et l'avion 1 doit virer à droite et continuer sa montée, l'avion 2 doit virer à gauche et continuer sa descente (Figure V.9).

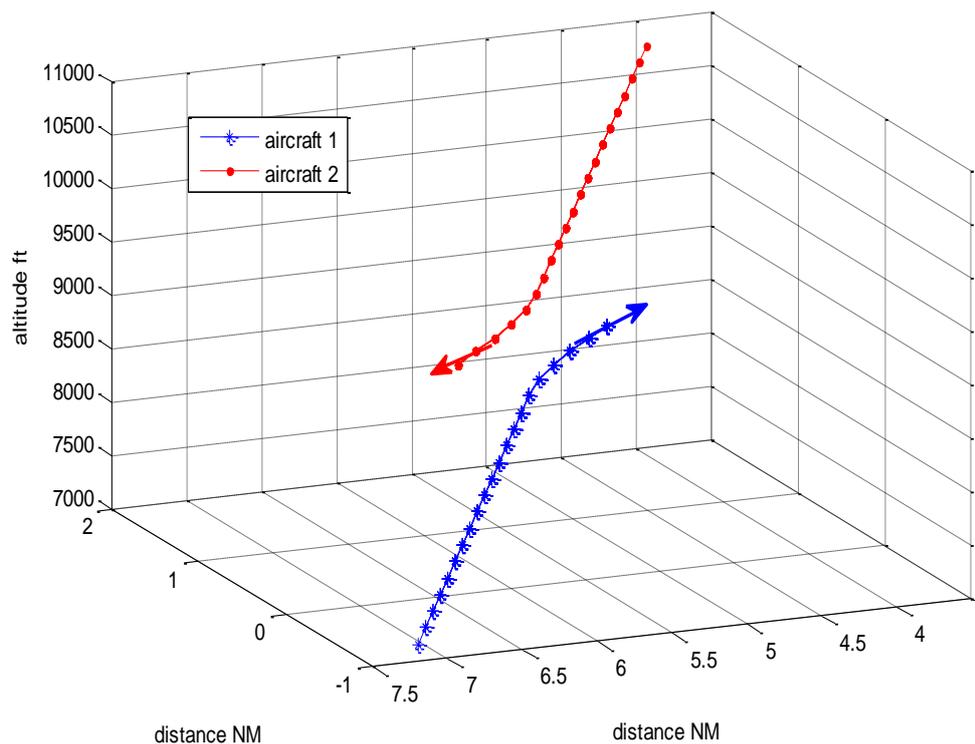


Figure V.10: Avions en face à face

Avion 1 a été autorisé à monter au FL110 et avion 2 a été autorisé à descendre au FL070, les deux avions volent face à face. Lorsque les avions 1 et 2 s'approchent du de niveau autorisé FL090 à un taux vertical de rapprochement important TCAS émet un RA pour diminuer la vitesse verticale et les deux avions doivent virer à droite en suivant la règle 1, l'avion 2 continue à descendre au FL070 et l'avion 2 continue à monter au FL110. Le risque de collision a été réduit en raison de l'ACAS qui a fourni une alerte pour maintenir une séparation horizontale et verticale requise pour éviter la collision (Figure V.10).

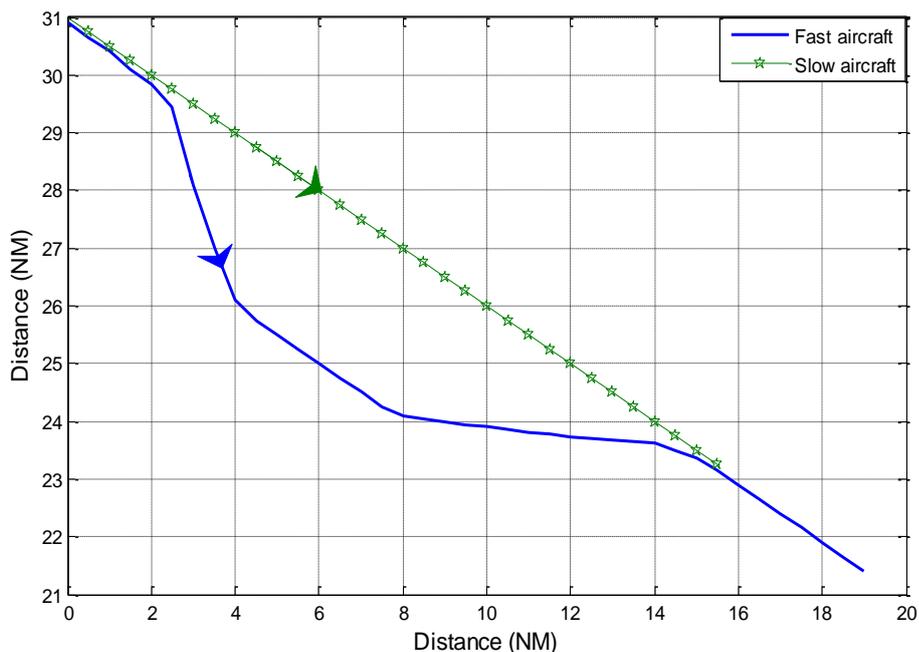


Figure V.11 : Illustration de dépassement d'un Avion derrière un autre

La figure V.11 montre deux avions volent au même niveau et même route l'un derrière l'autre, celui qui est derrière est plus rapide et doit effectuer le dépassement selon la règle 3. Dans ce cas le TCAS fournit un avis de résolution pour maintenir une séparation horizontale requise pendant le dépassement, ce cas est très rare en réalité.

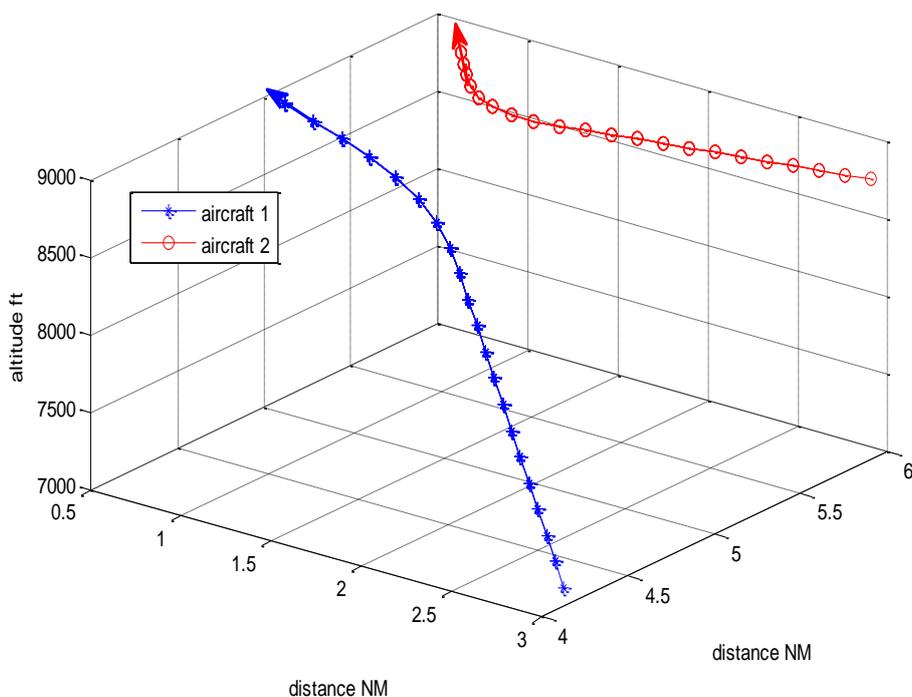


Figure V.12: Résolution verticale puis horizontale

Un incident peut impliquer [51-54] trois avions ou plus. Avion 1 monte au FL090 tandis que l'avion 2 maintient l'altitude 8800 pieds. Si nous avons un avion au FL100, la seule façon d'éviter une collision est la résolution horizontale, de sorte que le TCAS guide le pilote de l'avion 1 vers la gauche avec un ajustement de la vitesse verticale et l'avion 2 vers la droite.

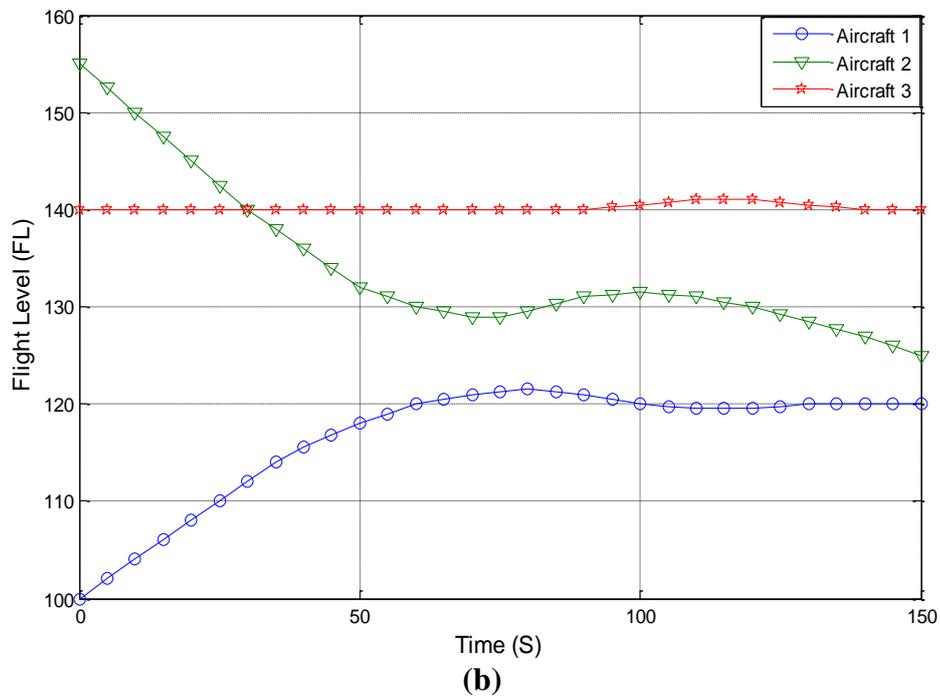
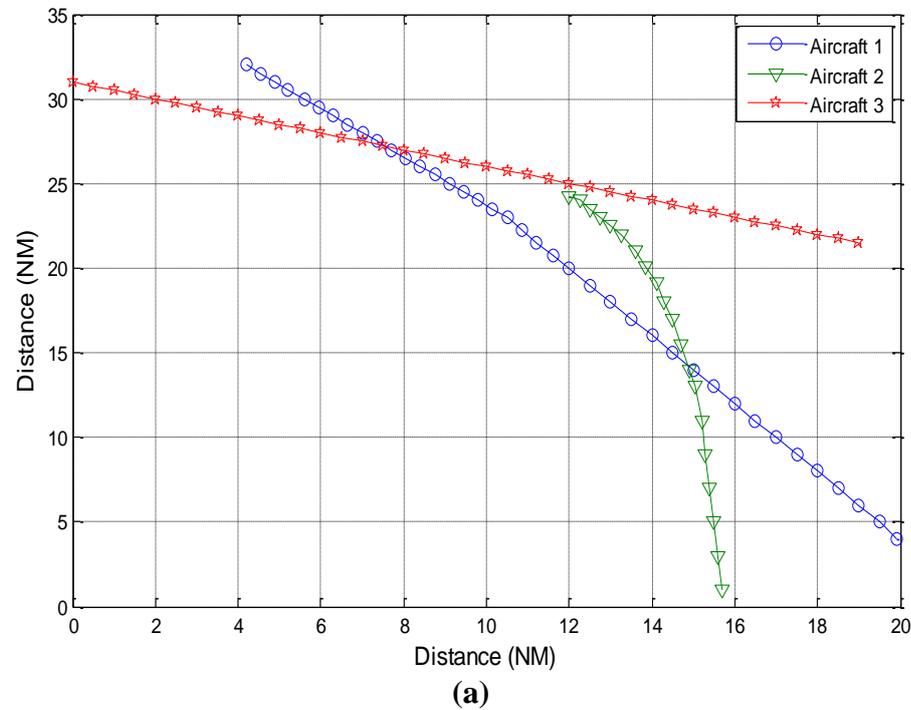


Figure V.13: Situation horizontale et verticale de trois avions

Ce conflit implique trois avions, il ressemble à celui de [55]. Avion 2 en descente vers FL120 entre deux avions qui se croisent. L'avion 1 est en montée au FL130 et l'avion 3 est en croisière au niveau FL140. L'avion 1 et l'avion 2 reçoivent tous les deux un avis de résolution pour ajustement de vitesse verticale à cause du premier conflit pour maintenir la séparation requise. Les deux vont continuer à leurs niveaux autorisés. L'avion 2 a reçu un avis de résolution pour monter qui a été suivi. L'avion 2 a grimpé et a ensuite reçu un avertissement de trafic contre l'avion 3 suivie d'un ajustement de la vitesse verticale. TCAS guide le pilote de l'avion 2 entre les deux autres avions avec une série d'ajustement de vitesse verticale jusqu'à la résolution du conflit. Cette simulation montre comment TCAS peut fournir un guidage entre deux ou plusieurs avions simultanément.

Lorsque nous réduisons la distance d'alarme audio par $x = 1$ NM et l'altitude jusqu'à ± 950 pieds, l'espace sera réduit de plus de 54,5%; cela signifie que les alarmes audio inutiles seront réduites par: $P = 0,545$.

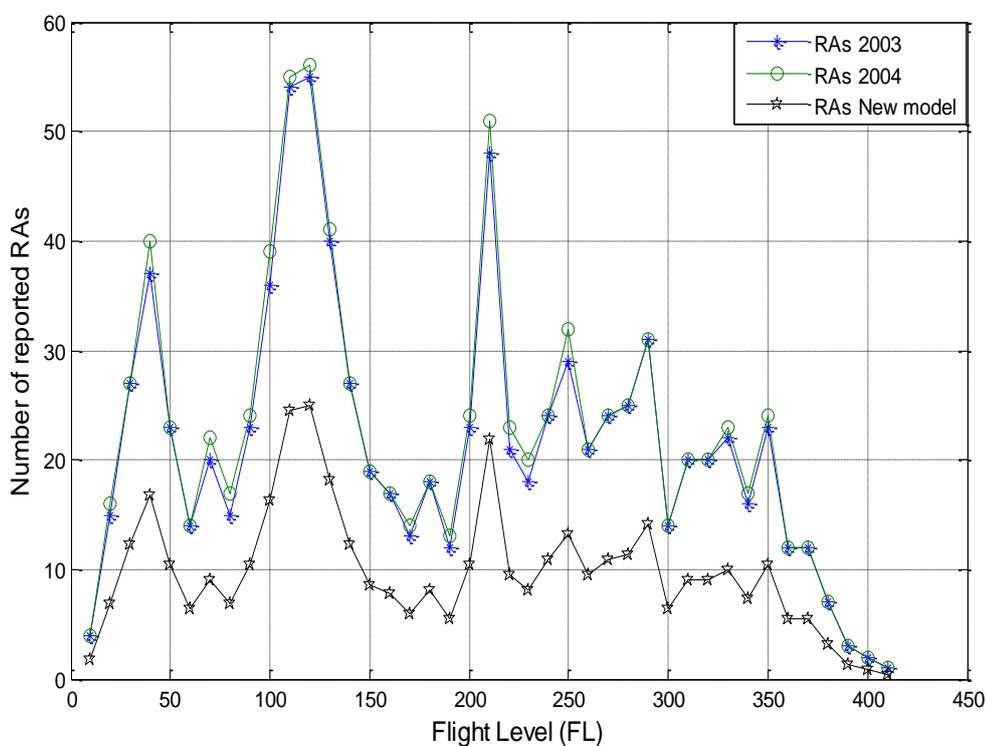


Figure V.14: La réduction de nombre d'alarme avec la nouvelle technique

V.5. Conclusion

Le TCAS ne contrôle pas directement l'appareil, c'est au pilote de mettre en œuvre les instructions du TCAS. La détection de conflits par le TCAS est réalisée en faisant des requêtes aux avions proches en utilisant les transpondeurs. Cette vision du TCAS a des capacités de performance et s'appuie sur les systèmes de l'avion TCAS traditionnelle de surveillance différents. L'objectif principal est d'assurer les manœuvres d'auto-séparation qui nécessitent des changements de cap et de vitesse.

Dans le futur, on peut adopter des espacements réduits pour augmenter l'efficacité et la capacité de l'espace aérien. Ce service ne nécessite pas d'infrastructure implantée au sol, juste une constellation satellitaire et des transpondeurs, Le but de cette conception est de fournir des informations visuelles à l'aide d'une liaison de données par satellite dans le cockpit. Cela permet aux pilotes d'effectuer des manœuvres en toute sécurité avec moins de stress en particulier dans les CTR (zone de contrôle terminal).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans cette thèse nous avons traité un sujet qui entre dans le cadre de développement des techniques de la gestion du trafic aérien. De ce fait, plusieurs approches ont été adoptées. Premièrement, nous avons divisé l'espace aérien en plusieurs petits secteurs et l'élaboration d'un réseau de routes directes afin de diminuer le stress et les charges de travail aux contrôleurs aériens. Plusieurs articles publiés encouragent l'adoption de cette technique. Deuxièmement, nous avons proposé un autre moyen permettant de visualiser parfaitement tout le trafic aérien à travers le monde entier. Ce moyen consiste à l'introduction d'une constellation de satellites basse orbite afin que les informations d'altitude et coordonnées géographiques GNSS soient transmises à travers les moyens embarqués actuellement sur les avions de transport commercial et même les avions de tourisme et d'entraînement.

Dans ce travail, notre objectif consiste à optimiser la transmission des éléments essentiels dans un temps réduit. Tout d'abord, on a étudié le problème du Handover qui touche les communications mobiles et touche encore la fiabilité des contacts entre les pilotes et les contrôleurs via les satellites LEO. On a pu choisir, après traitement de plusieurs modèles utilisés dans les communications mobiles, celui qui nous donne plus de fiabilité, vu l'importance des données transmises qui interviennent directement dans la sécurité aéronautique : en premier lieu en jouant sur le choix du réseau satellitaire altitude et orbites, ensuite en exploitant la possibilité de planifier des routes aériennes directes, puis en tenant compte de l'intégralité des données transmises qui peuvent être utiles pendant les différentes phases de vol, et enfin en introduisant les algorithmes spécifiques pour améliorer les systèmes anticollision, afin d'accélérer dynamiquement l'écoulement du trafic aérien.

Nous avons utilisé plusieurs techniques pour étudier le phénomène de Handover qui se produit au niveau des communications aéronautiques où nous avons adopté les stratégies choisies (RCS et RCS+QPS). Nous avons montré qu'en utilisant une méthode de RCS, puis

celle de RCS+QPS, il serait possible de diminuer la probabilité de blocage de contact. Ce critère permet de s'assurer que les communications soient maintenues ainsi que les avions soient suffisamment espacés pour permettre aux contrôleurs aériens de résoudre les conflits en déviant les trajectoires des avions un peu avant qu'il soit trop tard. Nous avons ensuite considéré le système existant tel quel, et cherché à améliorer l'exploitation des informations transmises de telle sorte qu'on peut bien visualiser le trafic aérien sur les écrans des contrôleurs aériens et sur les systèmes anticollisions dans les cockpits des aéronefs.

Nous avons également simulé plusieurs scénarios de situations conflictuelles pour mettre en application notre approche en se basant sur la transmission continue des données (Altitudes et coordonnées géographiques GNSS). Les résultats obtenus en trois dimensions ont été comparés avec ceux de la littérature notamment les références [48] [53] et il s'est avéré que notre technique permet d'avoir des séparations réduites avec une visualisation meilleure de trafic qui évolue aux voisinages.

Cette technique peut être intégrée au niveau des écrans radars des centres de contrôles régionaux pour pouvoir visualiser tout le trafic et également au niveau des cockpits (TCAS) pour éviter les collisions et diminuer le nombre d'alarmes inutiles de conflits détectés. Cette diminution représente environ cinquante quatre pour cent (54%) en utilisant des séparations réduites.

Perspectives

- ✓ Afin de mieux choisir une conception d'une constellation satellitaire, il reste à vérifier si la constellation obtenue selon le critère d'espacement des satellites apporte un gain par rapport aux constellations existantes. Il faudrait donc augmenter le nombre de satellites en diminuant l'altitude, ce qui risque l'augmentation la probabilité d'échec du Handover, ou bien de diminuer le nombre

de satellites d'une façon équilibrée, tout en tenant compte de critère d'altitude.

Pour cela, on peut envisager d'adapter la constellation proposée au chapitre 3, ou d'utiliser la constellation existante comme l'Iridium.

- ✓ Afin de s'assurer de la robustesse et l'efficacité de notre algorithme sur les évolutions verticales et horizontales des avions, on essayera de le développer pour pouvoir traiter un nombre assez important qu'on pourrait rencontrer dans des zones à forte circulation aérienne.
- ✓ Pour renforcer les systèmes d'alarmes, on va suggérer de mettre en pratique les alarmes de conflits entre aéronefs qui clignotent sur les écrans des contrôleurs aériens en synchronisation avec celles qui existent en cockpits des aéronefs. Actuellement ces deux systèmes fonctionnent séparément (il n'y aucune relation). Nous proposons d'établir un lien satellitaire entre les deux systèmes, comme ça nous allons avoir deux équipes qui sont averties, l'équipe terrestre et l'équipage des aéronefs. Cette technique pourrait contribuer à la diminution des risques de collisions.

Références bibliographiques

- [1] E.G. Piracci, N. Petrochilos, G. Galati, “Super-imposed Mode S signals: Single-antenna”, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, Rome Italy 2007, pp. 166-170.
- [2] M. C. Stevens, “Secondary Surveillance Radar”, Aviation System division, Cossor Electronics Ltd, Artech House Boston and London 1988, pp.10-50.
- [3] A. Achachi, “Modelisation de radar secondaire pour un trafic aérien,” Thèse de Magister, Université de Batna, 2010.
- [4] N. Petrochilos and A.J. vanderVeen, “Algebraic Algorithms to Separate Overlapping Secondary Surveillance Radar Replies”, IEEE Transactions on Signal Processing, July 2007, Vol. 55, No. 7, pp. 3746 – 3759.
- [5] A. M. G. Ivan, L. Mauro, G. Gaspare, V. B. T. Juan and L. R. D. Elías, “Efficient location strategy for airport surveillance using Mode-S multilateration systems”, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Vol. 4, no. 2, 2012, pp. 209-216.
- [6] P. Vaillant et C. Paumier, “Types de radar et fréquences”, Radartutorial Chapitre 2, Éditeur: Christian Wolff, Version 3, Août 2011, pp. 1-20.
- [7] G. Galati, R. Dellago and F. Lanari, “Global navigation satellite system in an integrated air traffic management constellation”, IEE Proc Radar, Sonar Navig, Vol. 144, No 3, June 1997, pp. 156-162..
- [8] M. Berioli, J. M. Chaves, N. Courville, P. Boutry, J. L. Fondere, H. Skinnemoen, H. Tork, M. Werner and M. Weinlich, “A rapidly deployable satellite backhauling system for emergency situations”, Int. J. Satell. Commun. Network, vol. 29, 2011, pp. 419–440.

- [9] I. Suberviola, I. Mayordomo and J. Mendizabal, “Experimental Results of Air Target Detection With a GPS Forward-Scattering Radar”, *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, Vol. 9, no. 1, January 2012, pp. 47-51.
- [10] S. Fleury, J. M. Girod and R. Watanabe, “Les satellites et la technologie VSAT”, Université de Mame-la-valée, 2000, pp. 1-20.
- [11] E. Papapetrou, S. Karapantazisny, G. Dimitriadis and F.N. Pavlidou, “Satellite handover techniques for LEO networks”, *Int. J. Satell. Commun. Network*. Vol. 22, 2004, pp. 231–245.
- [12] E. D. Re, R. Fantacci, and G. Giambene, “Handover queuing strategies with dynamic and fixed channel allocation techniques in low earth orbit mobile satellite systems”, *IEEE Trans. Commun*, Vol. 47, issue 1, Jan 1999, pp. 89–102.
- [13] M. Garah and D. Benatia, “Handover prioritizing scheme for reducing call failure probability in cellular wireless network”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 9, 2009, pp. 1660-1667.
- [14] N. H. Hedjazi, M. Ouacifi, R. Bouchouareb, M. Ourghi, M. Gareh and D. Benatia, “The Handover in the Constellations of Satellites in Low Orbit”, *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 41, April 2012, pp. 39-47.
- [15] Q. Zeng and D. P. Agrawal, “Handoff in Wireless Mobile Networks”, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Cincinnati, Edited by Ivan Stojmenovic John Wiley & Sons, Inc 2002, pp. 1-26.
- [16] Q-A. Zeng and D. P. Agrawal, “Performance analysis of a handoff scheme in integrated voice/data wireless networks”, *Proc. IEEE VTC 2000 Fall*, Vol. 4, September 2000, pp. 1986–1992.

- [17] Y. Kwon, J. Yun and D. Sung, “Satellite selection scheme for reducing Handover attempts in LEO satellite”, communication systems. *International Journal Satellite Communication* 1998, Vol. 16, pp. 197–208.
- [18] R. W. Poole, “Organization and Innovation in Air Traffic Control”, HUDSON Institute, January 2014, pp. 1-47.
- [19] Annex 10 to the convention on international civil aviation, “Surveillance and Collision Avoidance systems”, *Aeronautical telecommunications*, fourth edition, Ch 4, 2007, pp. 1–23.
- [20] D. Prot, “Un nouveau système de trafic aérien à taux de conflits potentiels et consommation énergétique réduits”, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [21] D. Gianazza, “Optimisation des Flux de Trafic Aérien”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [22] Eurocontrol, “ACAS II Guide Airborne Collision Avoidance System II”, (Incorporating version 7.1), 2012, pp. 3 – 65.
- [23] M. J. Kochenderfer, J. E. Holland and J. P. Chryssanthacopoulos, “Next-Generation Airborne Collision Avoidance System”, *LINCOLN Laboratory Journal*, Vol. 19, no. 1, 2012, pp. 17-33.
- [24] X. Yajun, “TCAS/ ADS-B Integrated Surveillance and Collision Avoidance System”, 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), China 2013, pp. 0666-0669.
- [25] G. Jesus, A. B. Juan, S. Andres and M. Gonzalo, “Opportunity trajectory reconstruction techniques for evaluation of ATC systems”, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 1, no. 3, 2009, pp. 231-238.

- [26] R. P. Stephen, A. R. Richard, E. F. JR. Carl and A.T. Micheal, “An operational and performance overview of the IRIDIUM low earth orbit satellite system”, IEEE Communications Surveys, Second Quarter 1999, pp.2-10.
- [27] Z. Yi, L. Jun, S. Qian, J. Yong and H. Yanlang, “Topology Control Strategy of LEO Satellite Constellation Based on Optimal Polar Boundary”, 978-1-4577-0321-8/11/ IEEE 2011, pp.4605-4608.
- [28] A. Herndon, M. Cramer, T. Nicholson, S. Miller and L. Rodriguez, “Analysis of Advanced Flight Management Systems (FMSS), Flight Management Computer (FMC) Field Observations Trials: Standard Instrument Departure with RADIUS-TO-FIX (RF) Path Terminators”, Center for Advanced Aviation System Development, The MITRE Corporation, 2012 IEEE, McLean, Virginia 22102, pp. 1-20.
- [29] N. E. Dougui, “Aircraft trajectories planning”, light propagation Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) model, These doctorat, 2013.
- [30] M. Gariel, A. N. Srivastava and E. Feron, Trajectory Clustering and an Application to Airspace Monitoring, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 12, NO. 4, Dec 2011, pp. 1511-1524.
- [31] E. Papapetrou and F.N. Pavlidou, “Distributed Load-Aware Routing in LEO Satellite Networks”, IEEE "GLOBECOM" 2008 proceedings, University of Ioannina, 978-1-4244-2324-8/08.
- [32] G. Galati, G. Perrotta, S. D. Girolamo, R. Mura, Space-Based SSR Constellation for global air traffic control. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, July 1996, Vol. 32, No. 3, pp. 1088 – 1106.
- [33] L. Chen, Q. Guo, Z. Na, K. Jiang, “A Reservation Pooling Resource Management Scheme for LEO-MSSs with Multi-class Traffic”, Journal of Computational Information Systems, Vol. 24, issue 8, 2012, pp. 10493–10500.

- [34] Y. Zhou, F. Sun and B. Zhang, “A novel QoS routing protocol for LEO and MEO satellite networks”, *Int. J. Satell. Commun. Network.* 2007, Vol. 25, pp.603–617.
- [35] A. Steingass, A. Lehner, F. Perez-Fontan, E. Kubista and B. Arbesser-Rastburg, “Characterization of the aeronautical satellite navigation channel through high-resolution measurement and physical optics simulation”, *Int. J. Satell. Commun. Network.* 2008, Vol. 26, pp. 1–30.
- [36] F. Long, “Satellite Network Robust QoS-aware Routing”, Ch 2, National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, pp. 21-40.
- [37] L. Cheng-Chi, L. Chun-Ta and C. Rui-Xiang, “A simple and efficient authentication scheme for mobile satellite communication systems”, *Int. J. Satell. Commun. Network.* 2012, Vol. 30, pp. 29–38.
- [38] <http://www.sia.aviation-civile.gouv.fr>
- [39] E. Theunissen and R.M. Rademaker, “Navigation System Autonomy and Integration in Nexgen: Challenges and Solutions”, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands A.A. Lambregts, Federal Aviation Administration, Renton, WA, 2011 IEEE, pp. 1-12.
- [40] G. Satapathy, J. Chen, and D. Tolani, “A traffic information service-broadcast model for mixed equipage aircraft simulation”, *Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference*, Fairview Park, Ohio, May 2010, pp. 1-15.
- [41] A. Achachi, D. Benatia and M. Garah, “Satellite Handover Techniques for LEO Networks Serving Air Traffic Control Communication”, *International Journal of Future Generation Communication and Networking* Vol.7, No.5, 2014, pp. 49-62.
- [42] M. Garah, “Mnimisation de la Probabilité D'echec du Handover dans les reseaux Cellulaires Mobiles,” *Thèse de Doctorat, Université de Batna*, 2009.

- [43] J. Yoo and S. Devasia, “Provably Safe Conflict Resolution With Bounded Turn Rate for Air Traffic Control”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21, No. 6, Nov 2013, pp. 2280-2289.
- [44] L. Ian and J. William, “Modeling ADS-B out System Latency”, *31st Digital Avionics Systems Conference*, Atlantic City, 2012, pp. 1-7.
- [45] G. Satapathy, J. Chen, and D. Tolani, “A traffic information service-broadcast model for mixed equipage aircraft simulation”, *Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference*, Fairview Park, Ohio, May 2010, pp. 1-15.
- [46] E. Theunissen and R.M. Rademaker, “Navigation System Autonomy and Integration in NEXTGEN: Challenges and Solutions”, *Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, A.A. Lambregts, Federal Aviation Administration, 2011 IEEE*, pp. 1-12.
- [47] C. Denis, “Navigation Générale JAR-FCL ATPL”, *Institut d’aéronautique Jean Mermoz*, Version 3, 2003, pp. 73 – 92.
- [48] E .L. Chin and W. Yi –Yu, “TCAS Solution for Low Altitude Flights”, *International Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference*, Tainan, (2010).
- [49] R. Chamlou, “Future Airborne Collision Avoidance - Design Principles, Analysis Plan and Algorithm Development”, *Center for Advanced Aviation System Development, The MITRE Corporation, McLean, Virginia, IEEE 2009*, pp. 6.E.2-1-6.E.2-17.
- [50] E. R. Charles and R. E. Tomas, “TCAS Surveillance Algorithm Modification for Reduced Channel Utilization”, *30th Digital Avionics Systems Conference*, Massachusetts, USA, 2011, pp. 4E1-1-4E1-7.
- [51] L. Peng and Y. Lin, “Study on the Model for Horizontal Escape Maneuvers in TCAS” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, no. 2, June 2010, pp. 392-398.

- [52] A. Achachi, and D. Benatia, “TCAS Solution to Reduce Alarm Rate in Cockpit and Increase Air Safety”, *International Journal of Control and Automation*, Vol.8, No.4, 2015, pp. 157-168.
- [53] G. Roussos and K. J. Kyriakopoulos, “Decentralized Navigation and Conflict Avoidance for Aircraft in 3-D Space”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 20, NO. 6, Nov 2012, pp. 1622-1629.
- [54] European Organization for the Safety of Air Navigation, Eurocontrol Experimental Center, European ACAS Operational Monitoring, 2004 Report, 2006.
- [55] European Organization for the Safety of Air Navigation, Eurocontrol Experimental Center, European ACAS Operational Monitoring, 2003 Report n 401, 2005.