



HAL
open science

Conception et Optimisation d'Architectures Réseaux pour les Systèmes de Communication Aéronautiques

Alain Pirovano

► **To cite this version:**

Alain Pirovano. Conception et Optimisation d'Architectures Réseaux pour les Systèmes de Communication Aéronautiques. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. ENAC, 2015. tel-01170699

HAL Id: tel-01170699

<https://theses.hal.science/tel-01170699>

Submitted on 19 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

**Conception et Optimisation d'Architectures Réseaux
pour les Systèmes de Communication Aéronautiques**

Présentée par

Alain PIROVANO

Enseignant Chercheur à l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile

Laboratoire Telecom - Groupe de recherche ResCo

présentée et soutenue publiquement le 10 avril 2015

Composition du jury :

M. Olivier FESTOR	Professeur	TELECOM Nancy	<i>(Rapporteur)</i>
M. Pascal LORENZ	Professeur	Université de Haute-Alsace	<i>(Rapporteur)</i>
M. Thomas NOEL	Professeur	Université de Strasbourg	<i>(Rapporteur)</i>
M. André-Luc BEYLOT	Professeur	ENSEEIH	<i>(Examineur)</i>
M. Congduc PHAM	Professeur	Université de Pau	<i>(Examineur)</i>
M. Thierry GAYRAUD	Professeur	Université Paul Sabatier	<i>(Correspondant)</i>

*A Nelly,
Antoine,
Mathilde,
Celine,
et Adèle
... bref, ma tribu.*

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier les membres du jury : André-Luc Beylot, Olivier Festor, Pascal Lorenz, Thomas Noël, et Congduc Pham. Je remercie aussi Thierry Gayraud pour m'avoir suivi, conseillé et encouragé pendant la rédaction de ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches.

Le travail de chercheur est le plus souvent un travail d'équipe (d'où l'utilisation récurrente du "nous" dans ce mémoire...) et je dirais que c'est même un des points qui en fait l'intérêt. Je voudrais remercier ici toutes les personnes avec qui j'ai pu travailler, les membres de l'équipe ResCo de l'Enac bien sûr et ceux qui y sont passés en qualité de doctorants et stagiaires, mais aussi les chercheurs, ingénieurs, et autres personnes de l'Enac ou d'ailleurs avec qui j'ai pu être amené à travailler ces dernières années.

Enfin, dans ces remerciements je voudrais ajouter une mention particulière pour José Radzik de l'ISAE pour ses conseils et ses encouragements.

Résumé

Conception et Optimisation d'Architectures Réseaux pour les Systèmes de Communication Aéronautiques

Résumé :

Ce mémoire présente les travaux de recherche dans lesquels j'ai pu m'investir et contribuer notamment depuis mon arrivée à l'Enac en 2003. L'ensemble de ces contributions s'inscrit dans le domaine de la conception et l'optimisation des architectures des systèmes de communications de données sol bord aéronautiques. Ce domaine d'application présente beaucoup de spécificités particulières compte-tenu des règles drastiques visant à assurer la sécurité des vols, des distances entre les noeuds communicants, et de leur vitesse. Et bien sûr, les systèmes et solutions proposés doivent prendre en compte l'ensemble de ces contraintes.

Dans le contexte de ce domaine d'application, j'ai pu contribuer principalement à trois axes :

- les réseaux satellitaires,
- la qualité de service et la sécurité,
- les réseaux ad hoc.

Comme illustré dans ce mémoire, au titre de ces contributions nous pouvons citer par exemple une architecture pour un système de communication aéronautique par satellite à qualité de service pour des flux hétérogènes, une architecture de sécurité adaptative, ou encore un nouveau moyen de communication sol bord multisaut basé sur un réseau ad hoc aéronautique. Ces contributions se sont le plus souvent inscrites dans le contexte de projets de recherche nationaux qui ont permis de financer des thèses.

Mots clés : qualité de service ; satellite ; réseaux ad hoc ; communications aéronautiques

Discipline : Réseaux de Communication de données

Table des matières

1	Notice individuelle	1
1.1	Curriculum Vitae	3
1.2	Liste des travaux	5
1.3	Activités de recherche	8
1.4	Activités d'enseignements	14
1.5	Implications Collectives et Responsabilités Administratives	16
2	Introduction : Les Communications sol bord dans le domaine aéronautique	17
2.1	Les origines	18
2.2	Les limites de capacité des communications vocales	18
2.3	Les communications de données numériques et le concept CNS/ATM	21
2.4	Les services pour le contrôle aérien, les compagnies, et les passagers	23
2.5	Les systèmes de communications de données pour le contrôle aérien	26
2.5.1	Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol	27
2.5.2	Les solutions basées sur des liaisons par satellite	28
2.6	Les systèmes de communication de données pour les passagers	30
2.6.1	Les solutions basées sur des liaisons par satellite	31
2.6.2	Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol	32
2.7	Les limites des systèmes existants et les perspectives	33
2.8	Organisation du mémoire	36
3	Les architectures de communications par satellite et leur application au domaine aéronautique	39
3.1	Les réseaux de communications par satellites	40
3.1.1	Principes généraux	40
3.1.2	La famille DVB	43
3.1.3	Amélioration des performances de TCP dans un réseau satellitaire	45
3.1.3.1	Les versions de TCP	46
3.1.3.2	Le "mandataire améliorant les performances" ou PEP (Performance Enhancing Proxy)	48
3.1.3.3	Le modèle de simulation	50
3.1.3.4	La plateforme d'émulation	51
3.1.3.5	Evaluation des performances de TCP sur un lien par satellite	51
3.2	Les communications par satellite dans le contexte aéronautique	54
3.2.1	Généralités	54

3.2.2	Optimisation d'un réseau d'accès par satellite pour les communications aéronautiques	57
3.2.2.1	Définition du système et gestion de la ressource	57
3.2.2.2	Architecture de l'équipement bord	59
3.2.2.3	Résultats des simulations et analyse	64
3.2.3	Dimensionnement des ressources pour les communications aéronautiques par satellite en espace océanique	68
3.2.3.1	Système et simulations	68
3.2.3.2	Dimensionnement des ressources en espace océanique	71
3.2.4	Sécurisation des communications aéronautiques	77
3.2.4.1	Contexte et principe général	77
3.2.4.2	La gestion adaptative de la sécurité	79
3.2.4.3	Méthode d'évaluation de la gestion adaptative de la sécurité	83
3.2.4.4	Résultats de l'évaluation du gestionnaire SecMan	86
4	Les communications aéronautiques sol bord multisaut	89
4.1	Des MANET aux VANET et des VANET aux AANET	90
4.2	Contexte et objectifs	91
4.3	Hypothèses et faisabilité	92
4.4	Système proposé	100
4.5	Etude des performances	101
4.5.1	Evaluation de la capacité disponible	101
4.5.2	Routage hiérarchique basé sur un clustering	103
4.5.3	Evaluation des performances avec une application réaliste	105
5	Bilan et perspectives	107
5.1	Bilan	108
5.2	Autour des AANets	109
5.2.1	Routage à base de contenu	109
5.2.2	Le partage de la ressource et le routage	112
5.3	Des moyens de communication pour l'aviation générale	115
5.4	Optimisation de l'utilisation des ressources en environnement multilien	116
5.5	Les réseaux de capteurs pour la surveillance aéroportuaire	117
5.6	Les communications aéronautiques globales du futur	119
	Liste de figures	126
	Liste des tables	129

Notice individuelle

Sommaire

1.1 Curriculum Vitae	3
1.2 Liste des travaux	5
1.3 Activités de recherche	8
1.4 Activités d'enseignements	14
1.5 Implications Collectives et Responsabilités Administratives	16

Cette partie a pour objectif de présenter de manière synthétique mon activité d'enseignant chercheur durant ces dix années notamment depuis mon arrivée à l'ENAC où j'ai été à l'origine de la création du groupe de recherche dédié aux réseaux de communication de données (ResCo). Après mon curriculum vitae et la liste de mes travaux et productions scientifiques, je débute la description de mes activités de recherche par un aperçu de mon parcours pour arriver jusqu'à l'ENAC. Je poursuis avec mes activités d'encadrement notamment de thèses de doctorat. Cette partie est complétée par la présentation des collaborations académiques et industrielles dans lesquelles j'ai pu m'impliquer et enfin les travaux de relecture et autres responsabilités qui m'ont été confiés.

La partie suivante, dédiée à mes activités d'enseignement, présente les thèmes sur lesquels j'ai pu m'investir en tant qu'enseignant permanent ou vacataire. Les responsabilités pédagogiques sont aussi soulignées.

Enfin, les activités reposant sur l'implication collective et les responsabilités administratives à l'ENAC sont données.

1.1 Curriculum Vitae

Enseignant-Chercheur Réseaux et Télécommunications

Formations et Titres Universitaires

Juin 2002

Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications
Spécialité Electronique et Communication - Mention très honorable
Sujet : "Contrôle d'Admission et Allocation de Ressources dans un Réseau ATM par Satellite"

Juin 1994

Diplôme d'Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers
Filière Informatique - Mention bien
Mémoire : "Interconnexion des réseaux locaux par liaisons satellite et microstations
- Adaptation des protocoles TCP/IP" – CNAM Toulouse

Juin 1991

D.E.S.T (Diplôme d'Etudes Supérieures Techniques)
Filière Informatique – CNAM Toulouse

Juin 1987

D.U.T. (Diplôme Universitaire de Technologie)
Département Informatique
Institut Universitaire de Technologie - Toulouse Rangueil

Expériences Professionnelles

Depuis le 01/02/2003

Enseignant-chercheur spécialité Réseaux de Communications à l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile - Toulouse

- **Enseignement** - cours de formation initiale, TP, encadrement projets et mémoires de fin d'études
– Co-fondateur et Responsable de l'option Télécom/Réseau en 3ème année (cursus IENAC)

- **Recherche et études** dans le domaine des réseaux de communications. Responsable du Laboratoire d'OPTimisation des Architectures des Réseaux de Télécommunication (LEOPART) devenu le groupe de recherche ResCo (Réseaux de Communication de données) (3 enseignants-chercheurs, 2 ingénieurs de recherche, 3 ou 4 doctorants).

Du 01/07/94 au 31/01/2003

Responsable réseaux - Chargé d'enseignement et de recherche à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (Télécom Paris) - Site de Toulouse

- Recherche et études dans le domaine des réseaux de télécommunications satellitaires, enseignement (cours de formation initiale, TP, encadrement projets et mémoires de fin d'études), Responsable du module d'enseignement "Réseaux et techniques de l'ingénieur".
- Administration systèmes et réseaux, formation et assistance des utilisateurs (chercheurs, élèves, administration).

Du 01/05/90 au 30/06/94

Responsable système et réseaux sur le site de Toulouse de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications

- Administration des systèmes et des réseaux, gestion du service (études, achats, contacts divers,...), développements, formation et assistance des utilisateurs (chercheurs, élèves, administration).

Du 01/12/87 au 31/04/90

Technicien informatique au Groupe Ecole Supérieure de Commerce de Toulouse

- Développement d'application dans le cadre de la gestion de l'école, assistance des utilisateurs, cours bureautique.

1.2 Liste des travaux

Mémoire Thèse de doctorat

- « Contrôle d'accès et Allocation de Ressources dans les réseaux ATM par satellite », Juillet 2002, Ecole Nationale Supérieure des télécommunications (Télécom Paris)

Revue Internationale avec Comité de Lecture

- José Radzik, Alain Pirovano, Na Tao, "Satellite system performance assessment for In-Flight Entertainment and Air Traffic Control", Journal Space Communications, Volume 21, Number 1-2 / 2007
- Alain Pirovano, Fabien Garcia "A New Survey on Improving TCP Performances over Geostationary Satellite Link", Network and Communication Technologies, Volume 2, no 1 (2013), Canadian Center of Science and Education
- Mickaël Royer, Alain Pirovano, Fabien Garcia, "Survey on Context-Aware Publish/Subscribe systems for VANET", LCNS Journal, Springer (2013)
- M.S.Ben Mahmoud, A.Pirovano, N.Larrieu, "Aeronautical Communication Transition From Analog to Digital Data : A Network Security Survey", Elsevier Computer Science Review Journal (2014)
- A.Pirovano, J.Radzik, F.Garcia, "Aeronautical Ad Hoc Networks For Air Ground Communications", Elsevier Ad Hoc Journal (2014), soumis

Conférences avec Comité de Lecture

- A.Pirovano, G.Maral, "Congestion Avoidance mechanisms in TCP/IP applied to LAN interconnection over a star shaped VSAT network", COST 226 symposium, pp 79-87, Budapest, May 11-12, 1995.
- A. Pirovano, G. Maral, "Contrôle d'Admission dans les réseaux ATM multimédia par satellites", Colloque Francophone pour l'Ingénierie des Protocoles, CFIP 2000, Toulouse, 17-20 Oct 2000, pp 49-62.
- A. Pirovano, J. Radzik, G. Maral, 'Designing a New Call Admission Control Technique for ATM Satellite Networks', 20th AIAA International Satellite Communications Systems Conference, Montréal, 13-16 May 2002
- J. Radzik, SUPAERO, Toulouse, France ; A. Pirovano and N. Tao, Ecole Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse, France, " Satellite Access Performances Assessment and Optimization for In-Cabin Internet and ATC Traffic", 24th AIAA International Satellite Communications Systems Conference, San Diego, 11-13 June 2006

- J. Radzik, SUPAERO, Toulouse, France ; A. Pirovano and N. Tao, Ecole Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse, France, "DVB-S2/DVB-RCS Satellite System Design for In-cabin Internet and ATC traffic", Advanced Satellite Mobile Systems (ASMS) Conference 2006, 29th May to 31st May 2006, Germany
- Na Tao (ENAC), Michel Bousquet (SUPAERO), Alain Pirovano (ENAC), Jose Radzik (SUPAERO) , "DVB-S2/DVB-RCS satellite system performance assessment for IFE and ATN aeronautical communications", International Workshop on Satellite and Space Communications 2006 (IWSSC2006), 14th-15th September 2006, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Spain
- José Radzik, Alain Pirovano, Na Tao, "Convergence of Aeronautical Communications on a single DVB-S2/RCS link", 27th AIAA International Satellite Communications Systems Conference, Edinburgh U.K., 1-5 June 2009
- Mohammed Slim Ben Mahmoud, Alain Pirovano, Nicolas Larrieu, "An Aeronautical Datalink Security Architecture Overview", 28th Digital Avionics Systems Conference, Orlando, 25-29 October 2009
- M.Slim BEN MAHMOUD, Nicolas LARRIEU, Alain PIROVANO, "Security architecture design for satellite aeronautical data link communications", AIAA 28th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2010), 30 August-02 September 2010, Anaheim, California, USA.
- Oriol Vidal, José Radzik, Alain PIROVANO, "Fiber-Like Aircraft Satellite Communications : FAST, an Aerospace Valley project – System Architecture and Protocol Stack Design", AIAA 28th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2010), 30 August-02 September 2010, Anaheim, California, USA.
- Fabien Garcia, Alain PIROVANO, Mathieu Magnaudet, "Satellite Link Emulation Platform for Aeronautical Application Validation", AIAA 28th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2010), 30 August-02 September 2010, Anaheim, California, USA.
- Frédéric Besse, Fabien Garcia, Alain PIROVANO, José Radzik, "Wireless Ad Hoc Networks Access For Aeronautical Communications", AIAA 28th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2010), 30 August-02 September 2010, Anaheim, California, USA.
- M.Slim BEN MAHMOUD, Nicolas LARRIEU, Alain PIROVANO, "A Performance-aware Public Key Infrastructure for Next Generation Connected Aircrafts", IEEE 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC'2010), 3-7 October 2010, Salt Lake City, Utah, USA.
- M.Slim BEN MAHMOUD, Nicolas LARRIEU, Alain PIROVANO, "An adaptive security architecture for future aircraft communications", IEEE 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC'2010), 3-7 October 2010, Salt Lake City, Utah, USA.
- Frédéric Besse, Alain Pirovano, Fabien Garcia, José Radzik, "Aeronautical Ad Hoc Networks : a new Datalink for ATM", INO 2010, 9th Innovative Research Workshop and Exhibition, 7-9 Dec. 2010, EUROCONTROL Experimental Center, Brétigny-sur-Orge, France

- Mohamed Slim Ben Mahmoud, Nicolas Larrieu and Alain Pirovano, "A Risk Propagation Based Quantitative Assessment Methodology for Network Security - Aeronautical Network Case Study", SAR-SSI 2011, The 6th International Conference on Network Architectures and Information Systems Security, 18-21 May 2011, La Rochelle, France
- Frédéric Besse, Alain Pirovano, José Radzik, Fabien Garcia, "Interference Estimation in an Aeronautical Ad Hoc Network", DASC2011, the 30th Digital Avionics Systems Conference, October 16-20 2011, Seattle, US
- Mohamed Slim Ben Mahmoud, Nicolas Larrieu and Alain Pirovano, "A Quantitative Risk Analysis for AeroMACS Network Security in SESAR", SAE 2011, SAE AeroTech Congress and Exhibition, October 18-21 2011, Toulouse, France
- M. S. BEN MAHMOUD, N. LARRIEU, A. PIROVANO, "Quantitative Risk Assessment to Enhance AeroMACS Security in SESAR", 12 pages, ICNS 2012, November 2011,
- Alain Pirovano, José Radzik, "TCP Performances Assessment over DVB-S2/RCS2 Link for Single User Internet Access", 18th Ka and 30th ICSSC 2012, 24-27 september 2012, Ottawa, Canada
- Mickaël Royer, Alain Pirovano, Fabien Garcia, "Survey on Context-Aware Publish/Subscribe systems for VANET", 5th Intl Workshop on Communication Technologies for Vehicles, may 14-15, 2013, Lille (France)
- Alain Pirovano, Fabien Garcia, José Radzik, "Capacity Dimensioning for Aeronautical Communications in North Atlantic Corridor", 19th KaConf, 14-17 october 2013, Florence, Italy
- Quentin Vey, Alain Pirovano, José Radzik, Fabien Garcia, "Aeronautical Ad Hoc Networks", 6th Intl Workshop on Communication Technologies for Vehicles, may 2014, Offenburg (Allemagne)

Livres

- "Risk Propagation Assessment for Network Security : Application to Airport Communication Network Design", Co-écrit par Slim Ben Mahmoud, Nicolas Larrieu, et Alain Pirovano, Edition Wiley, publié en 2013
- "Aeronautical Air-Ground Data Link Communications : now and beyond", Dirigé par A.Pirovano et Co-écrit par S.Ben Mahmoud, C.Guerber, N.Larrieu, Alain Pirovano, et J.Radzik. Edition Wiley, accepté pour publication, rédigé et à paraître début 2015

1.3 Activités de recherche

Chronologie

1990 à 1998 - A Télécom Paris/Site de Toulouse (Télécommunications spatiales)

Recruté en 1990 pour assurer les fonctions d'Administrateur Système et Réseaux sur le site de Toulouse de l'ENST (Ecole Nationale Supérieure des Télécommunication), devenue depuis Télécom ParisTech, j'ai été assez rapidement impliqué (vers 1994), pour les besoins du site et en réponse à mes aspirations, dans l'enseignement et les travaux de recherche du site. Même si ces participations étaient tout d'abord épisodiques, elles m'ont révélé puis confirmé mon attrait pour le métier d'Enseignant Chercheur. J'ai notamment pu m'impliquer dans le programme européen COST (226) et produire une première publication sur le thème des algorithmes d'évitement de congestion de TCP dans le contexte des réseaux VSAT (Very Small Aperture Terminal) par satellite. Pour l'enseignement, j'ai pu m'investir au travers de cours et travaux pratiques orientés réseaux, systèmes, ou encore programmation. Ma contribution devenant de plus en plus conséquente, et étant titulaire du diplôme d'Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers, nous avons convenu avec M.Gérard Maral (Directeur du Site de Toulouse de l'ENST) et M.Robinet (Directeur de la Recherche de l'ENST) que je devais m'inscrire en thèse si je voulais que ma carrière soit officiellement orientée vers le métier d'enseignant chercheur.

1998 à 2002 - A Télécom Paris/Site de Toulouse (Télécommunications spatiales)

J'ai donc été inscrit en première année de thèse en 1998 sur le sujet de l'optimisation de l'utilisation des ressources dans un réseau satellitaire opérant en mode de transfert asynchrone (ATM). Cette thèse a été co-encadrée par Gérard Maral (Responsable du site de Toulouse de l'ENST) et José Radzik (Enseignant Chercheur à SupAéro). L'ATM est une technique de multiplexage et de commutation créée plus spécifiquement pour les réseaux large bande à intégration de services (B-ISDN). Dans le contexte de ces réseaux, les satellites géostationnaires ont un rôle important à jouer en raison de la couverture importante et rapide qu'ils offrent. Cependant ces liens présentent des spécificités en termes de débit, de délai de propagation, et de profil des erreurs. Et il est important de vérifier l'adéquation des techniques et protocoles réseaux à ces caractéristiques. Les techniques utilisées doivent permettre de garantir la qualité de service (QoS) requise par chaque source tout en optimisant l'utilisation de la capacité sur le lien satellite. La thèse traite des procédures de contrôle d'admission (CAC, Call Admission Control) et d'allocation de ressources dans les réseaux ATM intégrant des liens satellite. Dans ce contexte, j'ai proposé une technique nouvelle et originale de contrôle d'admission pour les réseaux ATM par satellite appelée SCAC. Cette méthode appartient à la classe des CAC dynamiques à réallocation. Elle est basée sur la détermination implicite de la bande équivalente des appels ouverts lorsque la charge globale tend vers la capacité du lien satellite. Dans la thèse, les performances du SCAC ont été comparées à celles d'un CAC orienté bande équivalente. Les similarités en terme de performance ont été soulignées. Cependant comparé au CAC orienté bande équivalente, le SCAC présente le net avantage d'accepter ou refuser les nouveaux appels sur le trafic effectif des appels existants plutôt que sur le trafic supposé

ou annoncé par le contrat de trafic. Ce travail m'a notamment permis d'aborder des problématiques et d'approfondir mes connaissances dans les domaines de la qualité de service, la modélisation des sources de trafic de données, les spécificités des réseaux satellitaires. Il est à noter que comme cette thèse a été menée en parallèle des activités d'administrateur système et réseaux pour lesquelles j'avais été initialement recruté, elle s'est déroulée sur 4 années.

2002 à 2003 - A Télécom Paris/Site de Toulouse (Télécommunications spatiales)

Dans les mois qui ont suivi ma soutenance de thèse, la question de la pérennité du site de Toulouse de l'ENST étant discutée et son avenir étant incertain, j'ai débuté une recherche de poste qui a abouti à mon recrutement à l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) pour un poste d'Enseignant.

Depuis 2003 - A l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile)

de 2003 à 2006,

L'Enac souhaitait que la personne recrutée se consacre dans un premier temps exclusivement à l'enseignement. L'objectif affiché était de mener une refonte des enseignements réseaux de 2^{ème} année du cursus ingénieur (IENAC), mais aussi et surtout de créer une option de 3^{ème} année pour ce même cursus sur le domaine des Réseaux de Télécommunication.

J'ai activement contribué à la création de cette option d'enseignement (définition des contenus pédagogiques, recherche des intervenants, ...) dont je suis depuis le responsable pédagogique.

Cette option a été ouverte aux étudiants pour la rentrée de l'année universitaire 2003/2004. Elle a été créée pour deux raisons principales. D'une part à la demande d'élèves qui souhaitaient que l'Enac propose ce type de spécialité courante dans les autres écoles d'ingénieurs, et d'autre part pour répondre à un réel besoin des industriels. Effectivement, comme le montrent de nombreux projets dont le plus important en Europe est certainement Sesar (Single European Sky ATM Research), le monde des communications aéronautiques est en pleine mutation et certainement pour de nombreuses années, et ce afin de répondre à de nouveaux besoins en communication (pour le contrôle aérien, les compagnies, et les passagers) dans un contexte de croissance du trafic aérien.

Ainsi cette option est proposée depuis 10 ans. Elle vise principalement à fournir les bases générales nécessaires à tout ingénieur souhaitant s'investir dans ce domaine mais aussi en s'appuyant sur le domaine de compétence de l'Enac : le domaine aéronautique. Pour répondre au premier objectif des enseignements tels que « qualité de services et nouvelles architectures », « la sécurité réseaux », ou encore « Réseaux satellitaires » sont proposés. Et afin de compléter cette première partie et de répondre au second objectif, des enseignements sur les systèmes de communication aéronautiques sont aussi dispensés. Dans ces derniers, deux grands axes sont traités : les systèmes de communication sol bord et les réseaux embarqués.

de 2006 à 2014,

Lors de mon recrutement initial à l'ENAC, j'avais exprimé mon souhait de revenir à moyen terme sur un poste d'enseignant chercheur dès que les objectifs d'enseignements (refonte en 2A et option Télécommunication et réseaux en 3A) seraient atteints. L'Enac avait déjà des équipes de recherche dans les domaines du traitement du signal, des antennes, ou encore des mathématiques appliquées. Je me suis donc investi dans la création du laboratoire Réseaux de Télécommunication LEOPART (Laboratoire d'Etudes et d'Optimisation des Architectures des Réseaux de Télécommunication) devenu entre temps le groupe de recherche en Réseaux de Communications (ResCo) et dont je suis le responsable. Cette création a été largement encouragée par l'Enac avec les recrutements de deux enseignants chercheurs supplémentaires mais aussi avec le soutien pour une première thèse de doctorat en 2006 sur l'étude des performances et l'optimisation d'un réseau d'accès par satellite pour les communications aéronautiques. J'ai co-encadré cette thèse avec M. José Radzik, enseignant chercheur à l'ISAE. Les activités du laboratoire ont ensuite rapidement augmenté avec deux nouvelles thèses qui ont démarré en 2008 puis 2009 (voir 'Activités d'encadrement'), et la participation à divers projets (voir 'Collaborations académiques et industrielles').

A cette étape de ma carrière d'enseignant chercheur en réseaux de télécommunication, je définis mon domaine de recherche comme : **Conception et optimisation d'architectures réseaux pour les systèmes de communication aéronautiques.**

Activités d'encadrement

Thèses de doctorat encadrées ou co-encadrées

- Na Tao, « Etude des Performances et Optimisation d'un Réseau d'Accès par Satellite pour les Communications », EDAA. Thèse soutenue en Juillet 2009

Cette thèse, co-encadrée (50%) avec M.Radzik enseignant chercheur à l'ISAE, a été l'occasion de mettre en œuvre une coopération avec le laboratoire SCAN du campus Supaero de l'ISAE. Dans le contexte des communications aéronautiques sol bord, l'objectif principal était de démontrer la faisabilité du multiplexage de sources hétérogènes (services ATC, compagnies, et passagers) sur un lien unique par satellite en garantissant les qualités de service requises.

- Slim Ben Mahmoud, « Sécurisation d'applications Aéronautiques pour les liaisons sol bord », EDSYS, Thèse soutenue en Février 2012

Avec une dérogation de l'EDSYS, j'ai co-encadré (50%) cette thèse avec M. Nicolas Larrieu enseignant chercheur à l'Enac. Elle s'inscrit dans le contexte du projet collaboratif FAST (voir « Collaborations académiques et industrielles ») labellisé Aerospace Valley. L'objectif est de proposer une sécurisation adaptative des communications aéronautiques par satellite géostationnaire dans le contexte d'une liaison satellite haut débit.

- Frédéric Besse, « Réseaux Ad hoc Aéronautiques », EDSYS, Thèse soutenue en Février 2013

Avec une dérogation de l'EDSYS, j'ai co-encadré (50%) cette thèse avec M.José Radzik enseignant chercheur à l'ISAE. Elle s'inscrit dans le contexte d'une coopération avec Thales Avionics

(voir « Collaborations académiques et industrielles »). L'objectif est de proposer un système de communication aéronautique sol bord innovant. Ce système est basé sur des communications d'avions à avions pour la mise en œuvre des communications des avions vers le sol.

- Mickaël Royer, « Routage basé sur le contenu dans les réseaux véhiculaires », Thèse EDSYS
Cette thèse, co-encadrée avec M. Fabien Garcia enseignant chercheur à l'Enac, a débuté en septembre 2011. L'objectif est de proposer une approche de routage basé sur les contenus afin d'optimiser l'utilisation des ressources dans les réseaux véhiculaires.
- Quentin Vey, « Signalisation et routage dans un réseau ad-hoc aéronautique », Thèse EDSYS
Cette thèse, co-encadrée (50%) avec M. Stéphane Puechmorel professeur et chef du laboratoire MAIAA à l'Enac, a débuté en novembre 2013. Elle fait suite à la thèse de Frédéric Besse et l'objectif est de définir la signalisation et les techniques de routages pour les réseaux ad hoc aéronautiques en tant que moyens de communication sol bord. Cette thèse est aussi l'occasion de poursuivre notre collaboration avec ISAE/SCAN avec la participation de José Radzik.

Collaborations académiques et industrielles

L'activité de recherche passe aussi par la collaboration avec d'autres laboratoires de recherches académiques ou industriels. J'ai pu m'investir dans différents projets à différents niveaux de responsabilités et qui ont été autant d'occasions de générer ce type de collaborations.

- Coopération avec le laboratoire SCAN (ISAE) pour la thèse de Mlle Na Tao
La première thèse de doctorat menée au sein du Leopart (de 2006 à 2009) a été l'occasion de collaborer avec le laboratoire SCAN (Signal Communication Antennes Navigation) de l'ISAE campus Supaero afin de profiter de la complémentarité des compétences de nos équipes.
- Projet FAST (Fiber-like Aeronautical Satellite Telecommunication) – Projet labellisé Aerospace Valley
Ce projet débuté en 2008 et terminé début 2011 a été labellisé par le pôle de compétitivité Aerospace Valley et a obtenu un financement FUI (Financement Unique Interministériel). Il avait pour objectif principal de proposer grâce à un nouveau type d'antenne un nouveau système de communication pour les liaisons aéronautiques sol bord ainsi que de nouveaux services pour les compagnies aériennes. Nous avons pu collaborer à travers ce projet avec plusieurs partenaires industriels (Astrium, MEDES, Vodea, Axess) et académiques (ISAE, LAAS, Télécom Bretagne)
- Projet Capitole (Communications Aéronautiques Pour la sécurité Informations Trafic et météo par satellite) – Projet labellisé Aerospace Valley
Ce projet débuté en 2009 et terminé début 2011 a été labellisé par le pôle de compétitivité Aerospace Valley et a obtenu un financement FUI (Financement Unique Interministériel). Il a pour objectif principal de proposer de nouveaux services de diffusion de données par satellite pour les compagnies et leurs pilotes afin d'accroître la sécurité. Ces services étaient principalement orientés météo. Le projet s'inscrit dans le contexte du futur standard de satellite de télécommunication

aéronautique IRIS de l'ESA (Agence Spatiale Européenne). L'ENAC était investi dans ce projet au titre de trois contributions distinctes par trois de ses équipes (Météo, Systèmes, et Réseaux). A cette occasion, j'ai été nommé chef de projet Capitole pour l'ENAC. Et la tâche incombant à notre équipe consistait en la définition et le développement d'une plate-forme d'émulation du lien satellitaire afin de tester les nouvelles applications qui allaient être développées dans le contexte du projet. Nous avons pu collaborer à travers ce projet avec plusieurs partenaires industriels (Thales Alenia Space, Thales Avionics), académiques (Météo France, Tésa) et PME (Atmosphere, Alticode).

- Collaboration Thales Avionics

Afin de trouver un soutien industriel pour la recherche autour de l'idée originale des réseaux ad hoc aéronautiques, nous avons démarché puis décidé de collaborer avec Thales Avionics. Ce premier projet a d'ailleurs été l'occasion de définir et signer une convention cadre entre les deux partenaires afin de faciliter le démarrage de futurs travaux de recherche en partenariat entre Thales Avionics et l'ENAC. Cette convention cadre a déjà permis le soutien financier de Thales Avionics sur deux thèses, celle sur les réseaux ad hoc aéronautiques puis une deuxième sur la conception d'un routeur embarqué pour l'avionique de nouvelle génération.

- Sesar (WP 15.2.4)

Le programme SESAR (ou Single European Sky ATM Research) est le programme dirigé par Eurocontrol et visant à fournir à l'Europe des systèmes performants de gestion du trafic aérien. Il est l'équivalent européen du projet NextGen aux Etats-Unis. Dans le contexte de ce projet, la DSNA (Direction des Services de la Navigation aérienne) et en soutien quelques équipes de l'Enac sont impliquées dans plusieurs des différents lots (WP). A ce titre, j'ai été pour ma part impliqué dans le WP 15.2.4 (Future Mobile data Link system definition) en partenariat avec des experts de la DTI (Direction de la Technique et de l'Innovation) de la DSNA.

Plus récemment, nous avons été retenus dans deux nouveaux projets dans lesquels je m'investis directement :

- un nouveau projet labellisé par les pôles de compétitivité Aerospace Valley et Imaginove (APP FUI) nommé STAMP (SaTcom Aircraft coMmunication Platform)
- un projet nommé AGATHA (Assessment of General Aviation and Small Airport Technology Innovation and Adaptions for Harmonization of the ATM System) dans le contexte du programme SESAR.

Activités de reviewing

L'activité de relecture fait partie des tâches qui incombent à un enseignant chercheur. Ces dernières années, j'ai pu y contribuer au travers de différents workshops et congrès. Je suis notamment membre officiel de l'équipe éditoriale du journal "Network and Communication Technologies" depuis 2012 et ATE

(Associate Technical Editor) pour la revue IEEE Communications Magazine depuis cette année. J'ai par ailleurs été aussi sollicité par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) pour la relecture et l'avis concernant un projet soumis dans le contexte du programme "blanc".

Relecture d'articles

- Mai 2006, for Second International Workshop on Satellite and Space Communications 2006
- Mai 2007, for Third International Workshop on Satellite and Space Communications 2007
- Mai 2007, for Third International Workshop on Satellite and Space Communications 2007
- Avril 2010, pour le Congrès EDSYS (Ecole Doctorale Systèmes) 2010
- Avril 2011, pour le Congrès EDSYS (Ecole Doctorale Systèmes) 2011
- Depuis septembre 2012, membre de l'équipe éditoriale pour la revue "Network and Communication Technologies" (Canadian Center of Science and Education)
- Septembre 2012, for IEEE – IFIP Wireless Days 2012
- Septembre 2013, for IEEE – membre du TPC de Wireless Days 2013
- Février 2014, pour la revue "Transactions on Emerging Telecommunications Technologies", Wiley
- Février 2014, pour le Workshop on Communication Technologies for Vehicles (TPC Chair pour la session Nets4Aircraft)
- Septembre 2013, for IEEE – membre du TPC de Wireless Days 2014

Autres

- Avril 2010 : Review Projet ANR pour le "programme Blanc"

1.4 Activités d'enseignements

Dans cette partie, je détaille les cours et travaux pratiques que j'ai dispensés ou, pour la plupart, dont j'ai encore la charge.

Télécom Paris/Site de Toulouse (jusqu'en 2003)

- Cours et TP : Architecture Générale des réseaux
- Cours et TP : Programmation
- Cours et TP : Unix
- Cours et TP : Les réseaux satellitaires
- Cours et TP : Modélisation et simulation des réseaux de télécommunication

ENAC (depuis 2003) - environ 120h de cours et 40h de TD par an

- Cours et TP Réseaux de 2^{ème} année
 - Architecture Générale des Réseaux
 - Architecture TCP/IP
 - Réseaux longues distances
- Cours et TP Réseaux de 3^{ème} année
 - Nouvelles architectures Réseaux et QoS (ATM, MPLS, ...)
 - Réseaux satellitaire
 - Réseaux Aéronautiques
 - Modélisation et simulation des réseaux de communication
- Cours Mastere AGCSE (Air-Ground Collaborative Systems Engineering) et DNM GNSS
 - Data communication networks
 - Datalink for air ground communications

Activités d'enseignement en tant que vacataire

- CNAM (40 heures par an, cours du soir) : Unité d'enseignement « Méthodes de programmation systèmes », de 1997 à 2002
- CNAM (40 heures par an, cours du soir) : Unité d'enseignement « Réseaux de Communication », depuis septembre 2003
- ISAE- Supaero (15 à 20 heures par an) : Cours et TP Réseaux et Réseaux satellitaires, depuis septembre 2001 - Cours Communications Aéronautiques, depuis septembre 2012.

Responsabilités pédagogiques

- A l'ENST (jusqu'en 2003)
 - Responsable du module d'enseignement « Techniques de l'ingénieur »
- A l'ENAC (depuis 2003)
 - Création et responsabilité de l'option de 3^{ème} année « Télécom Réseau », IENAC
 - Professeur référent pour les enseignements réseaux IENAC, enseignement « Mobiles », enseignement « Télécommunications spatiales»

1.5 Implications Collectives et Responsabilités Administratives

Dans cette dernière partie de ma notice individuelle, je recense les responsabilités administratives que j'assume ainsi que mes implications collectives dans l'ENAC mais aussi à l'extérieur pour l'ENAC.

- Membre du Conseil de la Recherche de l'ENAC
- Correspondant du M2R IT pour l'ENAC. L'Enac est cohabilitée comme d'autres établissements (ISAE, INSA, ENSEEIHT, ...) à délivrer le diplôme du Master Recherche Informatique et Télécommunication pour le parcours Réseaux et Télécommunication.
- Représentant de l'ENAC au Comité Directeur de l'EDSYS (Ecole Doctorale Système). Le groupe de recherche ResCO de l'Enac est rattaché à l'Ecole Doctorale Systèmes (EDSYS).
- Co-Représentant de l'ENAC au DAS (Domaine d'Activité Stratégique) NPT (Navigation, Positionnement, Télécommunications) Aerospace Valley. Afin d'être informé des activités, projets, recommandations du pôle de compétitivité Aerospace Valley, l'Enac a nommé plusieurs représentants qui peuvent suivre les réunions de certains DAS.

Introduction : Les Communications sol bord dans le domaine aéronautique

Sommaire

2.1	Les origines	18
2.2	Les limites de capacité des communications vocales	18
2.3	Les communications de données numériques et le concept CNS/ATM	21
2.4	Les services pour le contrôle aérien, les compagnies, et les passagers	23
2.5	Les systèmes de communications de données pour le contrôle aérien	26
2.5.1	Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol	27
2.5.2	Les solutions basées sur des liaisons par satellite	28
2.6	Les systèmes de communication de données pour les passagers	30
2.6.1	Les solutions basées sur des liaisons par satellite	31
2.6.2	Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol	32
2.7	Les limites des systèmes existants et les perspectives	33
2.8	Organisation du mémoire	36

Dans cette partie je présente un historique des communications sol bord dans le domaine aéronautique ainsi que certains concepts généraux. Il s'agit de situer le contexte, de faciliter la lecture de la suite du document, et de souligner la nécessité de répondre à de nouveaux besoins dans un contexte présentant des contraintes très spécifiques.

2.1 Les origines

Les premières liaisons radios aéronautiques remontent au début du XXe siècle. A cette époque les ballons dirigeables et les avions communiquaient en radiotélégraphie dans la bande aéronautique des 900 mètres grâce à un opérateur navigant d'aéronef. Durant le vol une antenne pendante, au bout de laquelle un plomb de lestage portait l'indicatif radio de l'aéronef, était déroulée pour établir les communications. Et depuis les systèmes utilisés n'ont cessé d'évoluer au gré des avancées technologiques et des nouveaux besoins émergents. Ces communications entre les aéronefs et le sol se sont rapidement avérées indispensables pour améliorer la sûreté et l'efficacité des vols. En 1917, le premier émetteur-récepteur radio pour avion a été inventé et la première communication radio entre un avion et le sol a été effectuée. Mais ce n'est seulement qu'au début des années 1930 qu'il est devenu techniquement et commercialement possible d'installer une radio à bord des avions. C'est d'ailleurs à cette même époque que la société ARINC (Aeronautical Radio INCorporated), un acteur important du domaine, a été fondée. Dans les années 1940, la radio devenue disponible sur la plupart des avions a permis de généraliser les communications vocales. Toutefois, il s'agissait souvent de systèmes propriétaires de qualité et de fiabilité médiocres opérant dans la bande HF comprise entre 3 MHz et 30 MHz.

2.2 Les limites de capacité des communications vocales

C'est après la seconde guerre mondiale que l'aéronautique a connu une évolution majeure avec le début de l'aviation commerciale et le transport de passagers. Les premières compagnies aériennes ont alors fait leur apparition. La nécessité de structurer, d'homogénéiser, et de réglementer les moyens de communications est vite apparue nécessaire. Et c'est dans ce contexte que l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a été créée en 1947 dans le but d'élaborer des normes pour standardiser le transport aéronautique international. C'est aussi en 1947, lors de la conférence mondiale des radiocommunications, organisée par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), que la bande VHF de 118 à 132 MHz est allouée aux services aéronautiques mobiles. Cette bande est alors divisée en 70 canaux de 200 kHz.

Le transport aérien de masse tel que nous le connaissons encore aujourd'hui a commencé à la fin des années 50, lorsque la compagnie PanAm a mis en service le Boeing 707. Et depuis le trafic aérien n'a cessé d'augmenter, saturant rapidement les ressources offertes par les systèmes de communication sol bord et les premiers 70 canaux disponibles. L'espacement entre les canaux a été rendu possible grâce à

Année	Bande de fréquence	Espacement des canaux	Nombre de canaux
1947	118 - 132 MHz	200 kHz	70
1958	118 - 132 MHz	100 kHz	140
1959	118 - 136 MHz	100 kHz	180
1964	118 - 136 MHz	50 kHz	360
1972	118 - 136 MHz	25 kHz	720
1979	118 - 137 MHz	25 kHz	760
1994	118 - 137 MHz	8,33 kHz	2280

TABLE 2.1: Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques

l'amélioration de la précision de détection de la fréquence des porteuses. On est ainsi passé de 200 kHz à 100 kHz en 1958, puis à 50 kHz en 1964 et à 25 kHz depuis 1972. Dans la même période, la bande allouée aux communications aéronautiques par l'UIT a augmenté. En 1959, elle a été étendue jusqu'à 136 MHz, puis jusqu'à 137 MHz en 1979. De plus, une sectorisation de l'espace aérien a été mise en place permettant notamment une réutilisation des fréquences sur différents secteurs suffisamment éloignés. En 1994, il a été décidé de réduire encore l'espacement des canaux de 25 kHz à 8,33 kHz. Cette séparation a été appliquée en Europe au-dessus du niveau de vol FL 245 (soit 24 500 pieds ou soit 7,5 km environ) à partir d'octobre 1999, puis au-dessus du niveau de vol FL 195 à partir de mars 2007. Le tableau 2.1 montre l'évolution du nombre de canaux VHF de 1947 à nos jours.

Aujourd'hui, les fréquences de radiocommunication sont très convoitées. Il est donc difficile d'étendre la bande aéronautique VHF. De plus, la séparation des canaux de 8,33 kHz correspond à l'espacement minimal qui permet de transmettre de la voix avec une qualité suffisante, avec la modulation actuelle DSB-AM (Double Side Band - Amplitude Modulation). Il est donc à présent très difficile d'augmenter la capacité des systèmes de communications vocales. Cette augmentation est pourtant nécessaire pour répondre notamment à la croissance du trafic aérien.

Après deux reculs successifs, un après les attentats de septembre 2001 aux Etats-unis puis lors de la crise économique de 2008, le transport aérien reste aujourd'hui le moyen de transport qui se développe le plus rapidement. La figure 2.1 illustre les prévisions d'augmentation du trafic aérien en Europe d'ici 2020 par Eurocontrol qui est une organisation intergouvernementale européenne, fondée en 1963 et dont la mission est d'harmoniser et d'unifier la gestion de la navigation aérienne en Europe. On peut voir dans cette figure des prévisions de croissance annuelle de plus de 5% jusqu'en 2020 dans certaines parties de l'Europe. La congestion des systèmes de communications devrait donc s'accroître dans les prochaines années et ce, dans un contexte de besoins croissants pour le contrôle aérien, les compagnies, et les passagers.

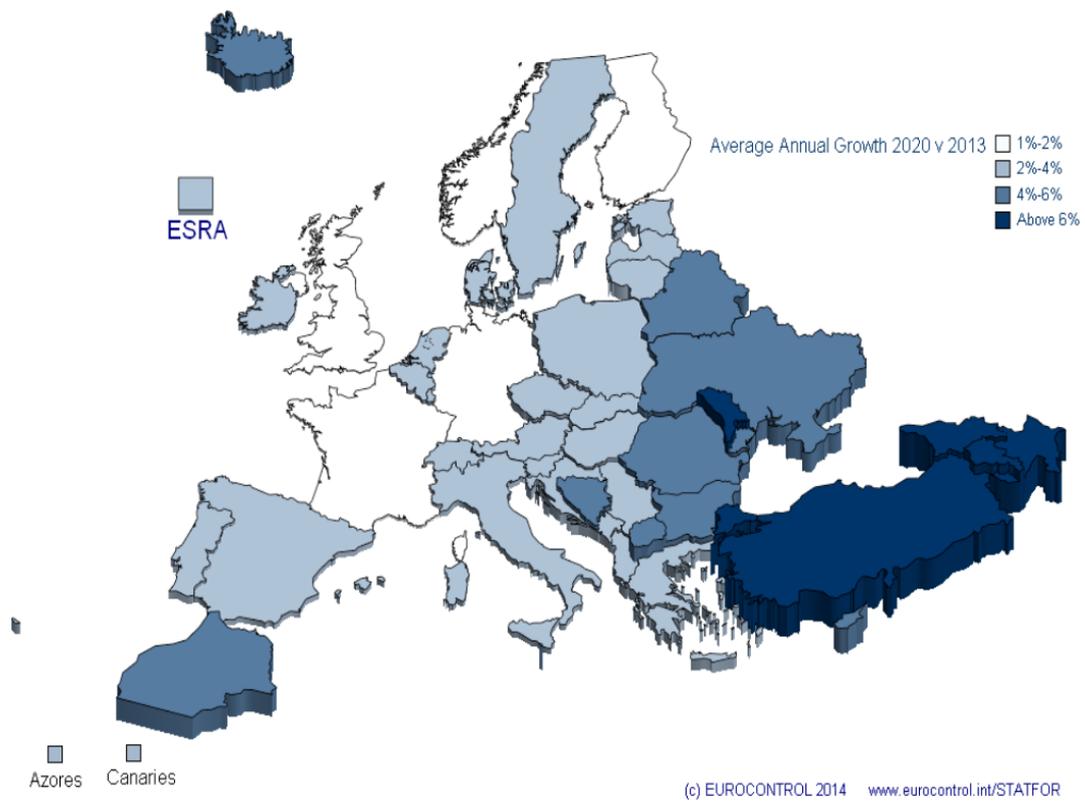


FIGURE 2.1: *Prévision d'augmentation du trafic aérien en Europe*

2.3 Les communications de données numériques et le concept CNS/ATM

A la fin des années 70, les compagnies aériennes ont pris conscience du potentiel et de l'intérêt de proposer des communications basées sur les liaisons de données numériques sol bord en introduisant l'ACARS : Aircraft Communications Addressing and Reporting System. Ce système, appelé aussi Plain Old ACARS (POA) pour sa première version, utilise les canaux VHF de 25 kHz réservés aux communications vocales. Il offre un débit de 2,4 kbps et a pour but d'échanger des messages textes entre l'avion et la compagnie aérienne. Le mot "ACARS" désigne aussi le format de ces messages. La première application était "OOO" pour "Out, Off, On, In". Elle a pour but de mieux gérer le temps de travail des pilotes, et donc leur rémunération. En effet, elle leur permet d'envoyer à la compagnie l'heure exacte à laquelle l'avion quitte la porte (Out), décolle (Off), atterrit (On) puis revient à la porte (In). D'abord basé sur un protocole orienté caractères puis orienté bits, l'ACARS a rapidement connu diverses améliorations et est ainsi devenu le moyen privilégié pour ce type de communication. Il a par la suite été enrichi d'autres applications dédiées aux plans de vol ou à des données météo par exemple.

En 1983, un comité dédié aux futurs systèmes de navigation aérienne a été créé à l'OACI. Il s'agit du comité FANS (Future Air Navigation System). Il était chargé d'étudier, d'identifier et de développer de nouveaux concepts opérationnels et de nouvelles technologies dans le domaine des communications, de la navigation et de la surveillance (CNS) aérienne, pour faire face aux nouveaux besoins et à la croissance du transport aérien mondial. Un fait marquant de ce comité a été l'introduction du concept CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance / Air traffic Management). Il a été approuvé lors de la dixième conférence de la navigation aérienne en 1991 et a pour but d'améliorer la capacité et l'efficacité du transport aérien, tout en garantissant la meilleure sûreté possible. Concernant les communications sol bord, le changement majeur proposé par le comité FANS porte sur la manière même dont les pilotes et les contrôleurs au sol vont communiquer entre eux. Le moyen de communication primaire doit ainsi passer progressivement des communications vocales aux communications de données numériques telles que précédemment décrites avec l'ACARS pour les compagnies aériennes. Les communications vocales en VHF et HF, ou plus récemment par satellite, devraient rester disponibles mais seront réservées aux situations d'urgence. Dans un premier temps, les communications numériques entre le pilote et le contrôleur, par exemple via l'application CPDLC (Controller Pilot Data Link Communications), sont prévues pour une utilisation dans les espaces aériens océaniques ou polaires, mais elles devraient aussi remplacer à terme les communications vocales en bande VHF dans les zones continentales denses. Le mode de communication basé sur l'échange de données numériques est généralement appelé **datalink** dans le domaine aéronautique. Il doit permettre d'automatiser autant que possible les tâches de communication, et donc de faciliter et fiabiliser les échanges entre l'avion et le sol, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité, la capacité et la sûreté du transport aérien. De plus, il doit aussi contribuer au désengorgement des fréquences dédiées aux communications aéronautiques. A bord de l'avion par exemple, les messages CPDLC sont affichés et envoyés à partir de terminaux dédiés, appelés DCDU (Data Communication Display Unit) sur les Airbus A320/A330/A340. La figure 2.2 montre le DCDU d'un Airbus A330. Dans des



FIGURE 2.2: DCDU Airbus A330

avions de génération plus récentes (Airbus A380 par exemple), l'utilisation se fait principalement via un terminal générique MFD (Multi Function Display), mais le principe général est identique.

Pour des raisons économiques et commerciales, les compagnies ont fait pression sur les industriels dès les années 90 pour pouvoir bénéficier le plus rapidement possible des améliorations proposées par le groupe FANS et ce, même si tous les services n'étaient pas encore implémentés. Ainsi, une première version de solutions d'équipements et services associés a été développée par Boeing sous le nom de FANS 1 sans normalisation de l'OACI. Dans le même temps Airbus a développé une version de produits semblables sous le nom de FANS/A. On parle finalement de FANS 1/A. Ce concept a été standardisé et approuvé pour les communications du contrôle aérien en 1995 alors que ces solutions ne fournissaient jusque-là que des services dédiés aux communications pour les compagnies aériennes. Il est aujourd'hui utilisé principalement dans les zones qui n'ont pas de couverture radar tels que les espaces océaniques. Le concept CNS/ATM prévoit une infrastructure de communication mondiale qui gère le transfert des données numériques entre les pilotes et personnels des avions civils et les contrôleurs aériens ou les compagnies au sol.

Le FANS 2/B est en cours de développement avec surtout de nouveaux services pour les compagnies et le contrôle aérien. Il sera utilisé en zone océanique et en zone continentale dans le contexte d'un réseau plus global appelé ATN (Aeronautical Telecommunication Network) [1]. Ce réseau, à l'origine basé sur l'architecture protocolaire OSI (Open Systems Interconnection) de l'ISO, permet l'interconnexion des différents réseaux de l'aviation civile, y compris les liens sol bord. Les spécifications de l'ATN ont été publiées par l'OACI dans un premier document en 2001 [2], précisées ensuite jusqu'à une ver-

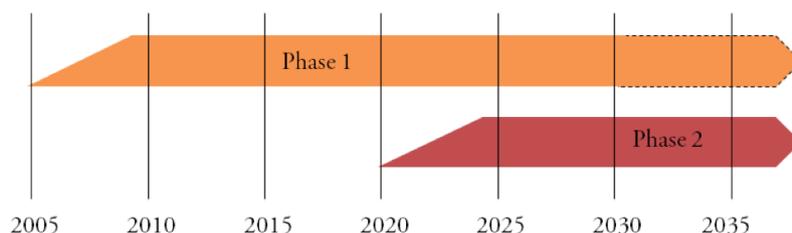


FIGURE 2.3: Les deux phases du COCR

sion plus récente fixant l'évolution de l'architecture vers le standard de facto TCP/IP [3]. Toutefois, face aux problèmes de congestion des fréquences dans les zones continentales denses, et en attendant le déploiement complet du réseau ATN, certains sous-réseaux sont déjà en cours de déploiement comme la VDL mode 2 en Europe, un nouveau système de communication de données sol bord basé sur la bande VHF. Pour permettre une transition plus facile, une solution intermédiaire facilitant la migration a été adoptée en 1999. Elle est basée sur l'AOA ou ACARS Over AVLC (Aviation VHF Link Control) qui est le protocole permettant de fiabiliser les échanges point à point. L'AOA permet ainsi de transporter des messages ACARS sur la VDL mode 2, ce qui améliore les performances du Plain Old ACARS. En 2001, Eurocontrol a lancé le programme LINK 2000+ qui a pour but de planifier et de coordonner la mise en oeuvre de services opérationnels de liaison de données pour la gestion du trafic aérien en Europe. Depuis 2004 des applications CPDLC ont ainsi été mises en oeuvre pour les avions en route grâce à la VDL (VHF DataLink) Mode 2 en zone continentale et au réseau ATN dans le centre de contrôle de Maastricht. Actuellement, le réseau ATN est toujours en cours de déploiement.

2.4 Les services pour le contrôle aérien, les compagnies, et les passagers

Le concept CNS/ATM prévoit que les liaisons de données deviennent le moyen primaire de communication entre l'avion et le sol. Afin d'identifier les technologies potentielles pour assurer ces liaisons de données numériques, Eurocontrol et la FAA ont travaillé conjointement et ont rédigé un document qui recense les futurs services opérationnels ainsi que leurs exigences : le COCR (Communications Operating Concepts and Requirements) [4]. Le COCR est ainsi indépendant de la technologie de communication mais il doit aider à définir ou identifier les systèmes répondant aux besoins. Conformément au concept CNS/ATM, le COCR considère deux phases distinctes pour les communications, illustrées dans la figure 2.3. Dans la première phase, les communications vocales sont toujours présentes et les communications de données sont basées sur des services existants ou émergents. Dans la seconde phase, à partir de 2020, les liaisons de données devraient devenir le moyen primaire de communication et de nouvelles applications verront le jour pour remplacer les communications vocales.

La première partie du COCR propose une classification en huit catégories des services pour le contrôle aérien prévus dans les phases 1 et 2 :

- les services de gestion des communications de données,
- les services pour les instructions du contrôle aérien,
- les services pour les informations de vol,
- les services d'aide et de conseil,
- les services concernant la position,
- les intentions et les préférences de l'avion,
- les services d'urgence,
- les services concernant la séparation autonome entre aéronefs.

Le COCR définit ensuite des services opérationnels pour les compagnies. On trouve par exemple des services pour l'envoi de données météo, de données de maintenance, de reports de position, ou encore de texte libre. Enfin, le COCR fournit des exigences pour chacune de ces catégories de services. Au-delà du COCR, on trouve régulièrement dans la littérature d'autres services envisageables dans le futur tels que la sauvegarde des enregistreurs de vols (ou boîtes noires) pendant le vol [5].

Les compagnies aériennes sont très intéressées pour fournir de nouveaux services à leurs passagers. Actuellement, le divertissement en vol, ou IFE (In-Flight Entertainment), est principalement limité à la diffusion de contenus audio et vidéo préalablement stockés à bord de l'avion avant les décollages. Mais dans le contexte des moyens de communications modernes dont nous disposons au sol au quotidien, les deux principales attentes des passagers concernent un service de téléphonie mobile et un service permettant l'accès à Internet à bord des avions commerciaux. En 2007, l'OACI a autorisé l'utilisation de systèmes de téléphonie mobile à bord des avions [6]. Plusieurs projets et entreprises ont alors vu le jour pour fournir ces services.

Dans un contexte de croissance du trafic aérien et d'une quête de toujours augmenter la sûreté des vols, l'émergence de nouveaux services pour les contrôleurs, les compagnies et les passagers, alimente le besoin de nouveaux moyens de communications sol-bord basés sur des architectures efficaces et optimisées. De nombreux travaux de recherches sont en cours pour trouver des moyens de communications permettant de déployer ces services. Parmi les pistes étudiées, on trouve principalement des solutions par satellites et des solutions par liaisons directes avec le sol.

Les communications aéronautiques font l'objet de recommandations émises par l'OACI. Elles sont regroupées dans un document de référence de l'OACI nommé l'annexe 10 [7]. Cette annexe a été régulièrement amendée et comporte aujourd'hui cinq volumes. Le volume III est consacré aux systèmes de communication et divisé en deux parties dédiées respectivement aux communications de données numériques, le datalink donc, et aux communications vocales. Dans la première partie, et comme le montre la figure 2.4, l'annexe 10 de l'OACI définit quatre catégories de communications aéronautiques sol bord :

- ATSC (Air Traffic Services Communication), les communications pour les services du contrôle aérien
- AOC (Aeronautical Operational Control), les communications opérationnelles pour les compar-

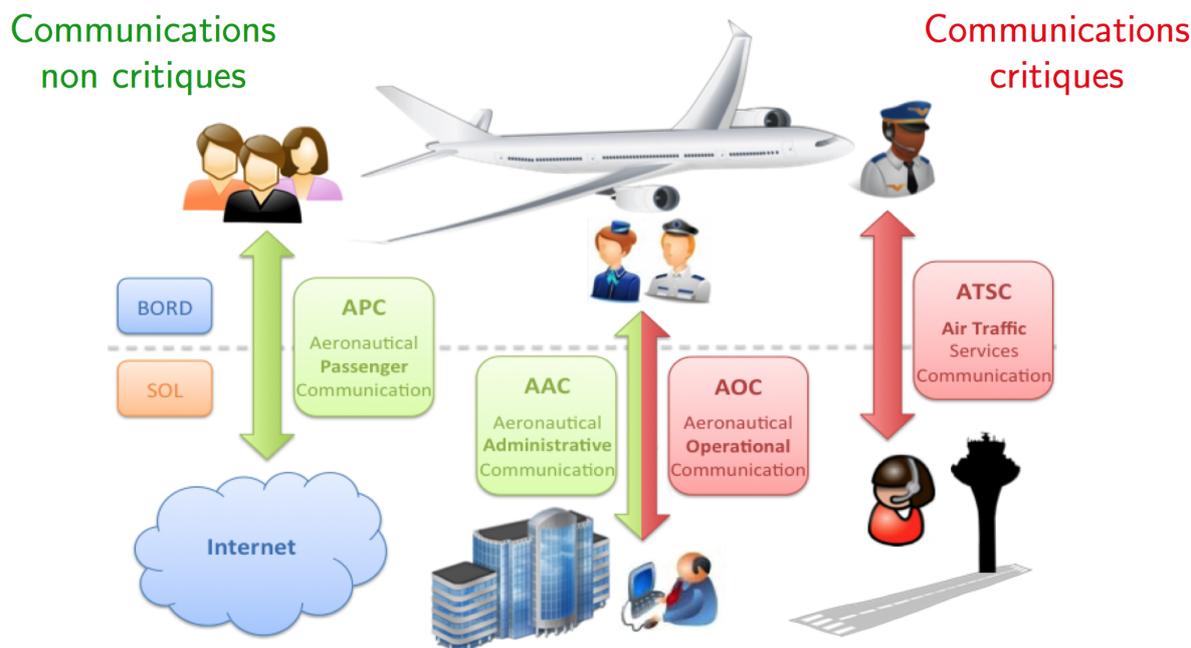


FIGURE 2.4: Les classes de communications sol bord

gnies

- AAC (Aeronautical Administrative Communication), les communications administratives pour les compagnies
- APC (Aeronautical Passenger Communication), les communications pour les passagers

Les communications ATSC et AOC sont classifiées comme opérationnelles ou critiques. L'ATSC désigne donc les communications entre les pilotes et les personnels du contrôle aérien au sol. Le contrôle aérien permet de garantir la sûreté, la rapidité et l'efficacité des vols. Les services ATSC ont pour but d'éviter les collisions entre les aéronefs, ou encore de fournir les informations utiles à l'exécution sûre et efficace du vol (informations météorologiques, informations sur l'état des moyens de navigation au sol, informations sur le trafic, ...). Il doivent aussi fournir un service d'alerte pour prévenir les organismes appropriés lorsque la situation d'un avion le nécessite. Comme nous l'avons expliqué, pour ces services, le contrôleurs utilise encore aujourd'hui les communications vocales comme moyen primaire. Mais il existe déjà des applications datalink ou de communication de données numériques. On peut citer le CPDLC que nous avons déjà évoqué, la surveillance automatique (ADS, Automatic Dependent Surveillance), ou les services d'information de vol par liaison de données (DFIS, Digital Flight Information Services).

Les compagnies aériennes ont aussi des besoins en communication pendant le vol. On distingue les communications opérationnelles (AOC) et les communications administratives. Les premières sont dites "safety" en anglais (comme ATSC) et regroupent l'ensemble des "communications nécessaires à l'exercice de l'autorité sur le commencement, la continuation, le déroutement ou l'achèvement du vol pour

des raisons de sécurité, de régularité ou d'efficacité" [7]. Ces communications permettent aux pilotes de bénéficier d'une liaison directe avec le personnel de la compagnie au sol. Les applications possibles sont la transmission des horaires de décollage et atterrissage, la transmission du niveau de carburant, d'information du vol, des plans de vols révisés,... et peuvent varier suivant les compagnies.

Les Communications administratives AAC désignent les communications entre les pilotes et les compagnies mais qui ne sont pas liées à la sécurité ou la sûreté des vols. On peut citer l'envoi d'informations concernant le personnel navigant, de liste de passagers en correspondance, de gestion de la cabine (nettoyage et repas),...

Enfin, les communications passagers (APC) regroupent l'ensemble des services proposés aux passagers et basés sur des communications sol bord. Cette dernière catégorie fait l'objet de beaucoup de travaux de recherches car trop peu de services APC sont encore proposés à ce jour pendant les vols. Effectivement les passagers, et donc les compagnies, sont de plus en plus intéressés et impatientes que des services d'accès à Internet ou à la téléphonie mobile terrestre soient proposés en cabine pendant les vols. Quelques, encore rares, compagnies proposent déjà ces services et cela passe par des moyens de communications très récents basés sur des liaisons directes dans certaines zones continentales ou par satellite dans les zones océaniques.

2.5 Les systèmes de communications de données pour le contrôle aérien

Comme illustré dans la figure 2.5, on distingue deux catégories de systèmes de communication de données numériques pour le contrôle aérien. Il s'agit des liaisons directes avec le sol et les liaisons par satellite.

Les performances requises pour les communications aéronautiques sont exprimées sous la forme de RCP (Required Communication Performance) qui sont définies par l'OACI. Les performances attendues sont exprimées par un ensemble de paramètres et leur valeur requise. On peut citer par exemple :

- la disponibilité (Availability), la probabilité qu'une transaction opérationnelle puisse être initiée,
- le temps de transaction (TT95), le temps maximum pour qu'une transaction opérationnelle soit terminée pour 95% des cas,
- l'intégrité (Integrity), le taux maximum acceptable d'erreurs non détectées pendant une transaction opérationnelle.

Mais ce qui caractérise surtout ces paramètres, c'est le niveau d'exigence qu'ils fixent par leur valeur. Effectivement, compte-tenu des enjeux et du niveau de sûreté légitimement attendu pendant les vols, il est normal d'exiger des systèmes de communications de très hautes performances. Il est à noter que compte-tenu des niveaux de disponibilité attendus pour l'ATSC par exemple, les avions sont équipés généralement au moins de 2 (ou plus) systèmes de communication sol bord.

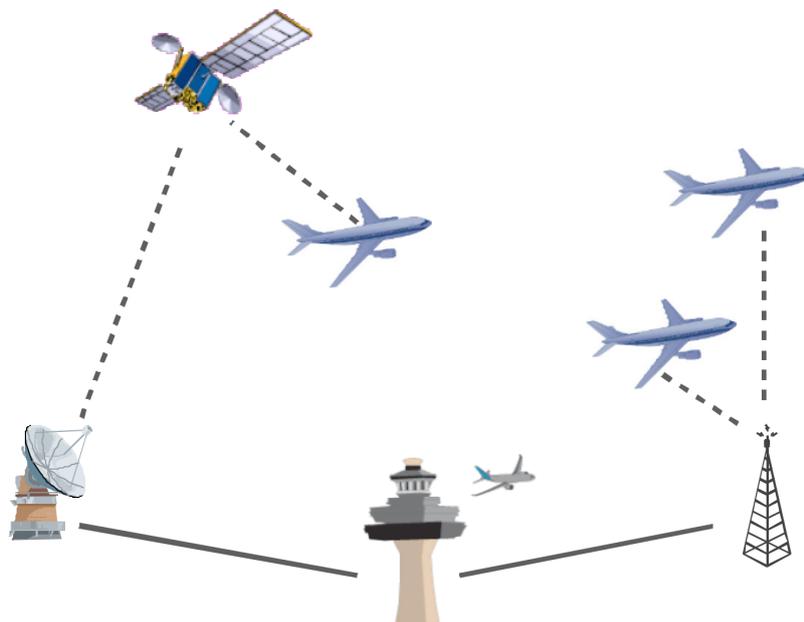


FIGURE 2.5: Les systèmes de communication pour le contrôle aérien

2.5.1 Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol

Une première solution pour fournir des communications sol bord pour les avions civils est d'établir une liaison directe avec une station au sol. On obtient alors un réseau cellulaire.

La première version d'ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System), ou POA (Plain Old ACARS) a été proposée dès 1978 par ARINC comme système de communication de données numériques. Il permet l'envoi de messages relativement courts et simples sous forme de chaînes de caractères. Tout d'abord proposé pour les compagnies, il a ensuite été adopté pour les communications du contrôle aérien. L'interface radio utilise des canaux de 25 KHz dans la bande VHF initialement dédiée aux seules communications vocales. Le codage repose sur une technique de modulation d'amplitude appelée AM-MSK (Minimum Shift Keying) et l'accès au canal par les différents utilisateurs est géré en CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Le débit offert est de 2,4 kbit/s. Les deux fournisseurs de services (ou DSP, Datalink Service Providers) principaux pour l'ACARS sont ARINC et SITA. Il existe une dizaine de canaux VHF réservés à l'ACARS dans le monde.

Avec les dernières générations de systèmes de communication sol bord et l'ATN, des systèmes dits VDL (VHF DataLink) sont proposés et en cours de déploiement avec plusieurs versions suivant les pays ou espace aérien. Pour l'Europe, exception faite de la Suède, la version retenue est la VDL mode 2. La VDL mode 2 a été spécifiée par l'OACI en 1997 puis incluse dans l'annexe 10 [7]. Le principe de la VDL mode 2 repose sur un ensemble de stations sol qui émettent dans un rayon théorique de 200 km et qui

peuvent prendre en charge jusqu'à 200 avions. Ces stations servent de relais entre le sol et le bord. La VDL mode 2 utilise une modulation de phase D8PSK (Differentially encoded 8-phase Shift Keying) et offre un débit binaire de 31,5 kbit/s pour une portée . Le partage de la ressource est assuré par une technique CSMA p-persistant au niveau de la sous-couche MAC (Medium Access Control). Un noeud (station sol ou avion) écoute le canal avant d'émettre. S'il est libre le noeud émet avec une probabilité p . S'il est occupé par un message émis par un autre noeud, il attend que le canal se libère. La fiabilité point à point fournie par la sous-couche LLC (Logical Link Control) de la couche 2 est assurée par le protocole AVLK (Aviation VHF Link Control). Ce protocole est une adaptation du "célèbre" protocole HDLC (High Level Datalink Control) utilisé depuis de nombreuses années dans des architectures de réseaux terrestres. Ses principales fonctions sont de détecter et de corriger les erreurs, de retransmettre éventuellement les trames perdues et d'identifier les noeuds source et destinataire des messages. La VDL mode 2, basée sur des liaisons directes entre les avions et une station au sol, est proposée par les deux DSP ARINC et SITA. Elle est opérationnelle en Europe mais pas uniquement, aussi en Australie ou encore au Japon par exemple. Afin de faciliter la transition depuis le POA, la transmission des messages ACARS est possible grâce à un protocole AOA (ACARS Over AVLK) qui doit être implémenté dans les équipements bord. Depuis 2004, la VDL mode2 est pleinement opérationnelle dans le centre de contrôle de Maastrich, sous l'impulsion d'Eurocontrol dans le cadre du projet de déploiement Link 2000+.

En complément des systèmes VHF dont la portée limite leur utilisation en espace aérien continental, un système HF a été développé pour couvrir des portées beaucoup plus importantes par exemple en espace océanique. La HF DL (High Frequency DataLink) a été standardisée par l'OACI puis ajoutée à l'annexe 10 en 1999. Elle utilise 3 modulations PSK (Phase Shift Keying) et offre un débit maximum de 1,8 kbit/s pour une couverture mondiale.

2.5.2 Les solutions basées sur des liaisons par satellite

Outre les liens directs en VHF ou HF, les communications de données pour le contrôle aérien peuvent reposer sur des liens par satellite. Ce type de solution permet d'assurer une très grande couverture, dans le cas de satellite géostationnaire ou de constellation de satellites en orbite basse.

Inmarsat, fondé en 1979, est certainement une des compagnies de télécommunication la mieux implantée dans le secteur aéronautique. Elle possède et opère trois constellations complètes de satellites géostationnaires : 4 satellites Inmarsat-2 lancés au début des années 90, 4 satellites Inmarsat-3 lancés à la fin des années 90 et 3 satellites Inmarsat-4 lancés en 2005 et 2008. Les satellites Inmarsat offrent ainsi une couverture globale entre +/-80° de latitude environ. Effectivement, compte-tenu de leur position au-dessus de l'équateur, les satellites géostationnaire ne peuvent pas couvrir les zones polaires. La figure 2.6 montre la couverture des services aéronautiques d'Inmarsat (Inmarsat Swift 64 et Classic Aeronautical). Inmarsat a été le premier opérateur civil à proposer, dès les années 90, des services de communication par satellite destinés à l'aéronautique. Il a ensuite été le premier à se conformer aux normes et pratiques recommandées par l'OACI. Il est à présent l'opérateur par satellite le plus largement utilisé dans le monde aéronautique avec plus de 10 000 avions équipés.

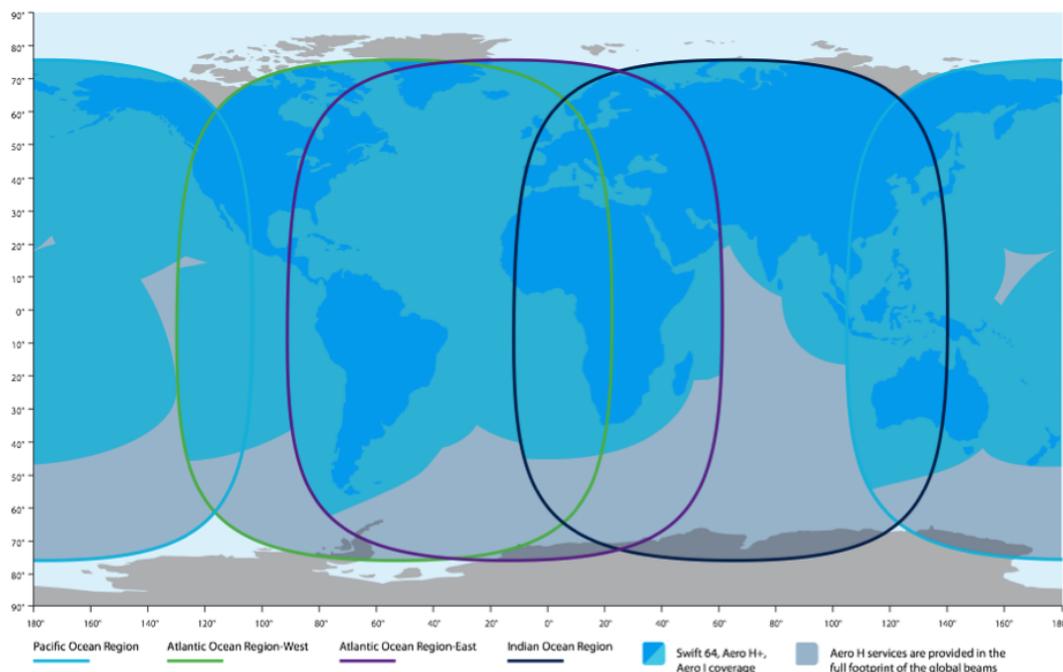


FIGURE 2.6: Couverture Inmarsat (source, www.inmarsat.com)

Le système Inmarsat utilise deux bandes de fréquence : 1525-1559 MHz pour la réception et 1626,5-1660,5 MHz pour l'émission, soit 68 MHz au total pour les liaisons avec les mobiles. Il utilise la bande C pour les services fixes. Il offre aujourd'hui trois services distincts en bande L pour le domaine aéronautique :

- Classic-Aero
- Swift64
- SwiftBroadband

L'OACI a approuvé le service Classic-Aero pour les communications critiques cockpit (services ATSC). Il est supporté par toutes les générations de satellites Inmarsat et se décline en six sous-services présentés dans le tableau 2.2.

Service	Aero H/H+	Aero I	Aero L	Mini M Aero	Aero C
Voix	multiples canaux	multiples canaux	-	Un canal	-
Données	10,5 kbit/s	4,8 kbit/s	1, 2 kbit/s	2,4 kbit/s	0,6 kbit/s
Gain Antenne	élevé	Intermédiaire	faible	faible	faible
Approbation OACI	oui	oui	oui	non	non

TABLE 2.2: Les services Classic-Aero d'Inmarsat

Iridium propose quant à lui un service de communication par satellite en bande L depuis novembre



FIGURE 2.7: Constellation Iridium (source, www.iridium.com)

1998. Comme le montre la figure 2.7, ce système est composé d'une constellation de 66 satellites en orbite basse (LEO, Low Earth Orbit) défilants à environ 800 km d'altitude. Cette constellation permet de garantir une couverture mondiale exhaustive à tout moment. Elle met en oeuvre des communications entre ses satellites. Deux stations de contrôle terrestres ont été prévues, une pour les communications civiles et une pour les communications militaires. La FAA a donné son autorisation en juillet 2011 pour l'utilisation du système Iridium par les avions commerciaux conformément aux recommandations du comité PARC (Performance-based operations Aviation Rulemaking Committee) [8], après que ce comité a effectué des essais en vol pendant plus d'un an. Iridium constitue à présent une alternative intéressante au système Inmarsat pour les communications aéronautiques par satellites dédiés aux services critiques cockpit. Cette solution assure une couverture mondiale, y compris en zone polaire, et moins chère. Cependant la capacité offerte est limitée à 2,4 kbit/s.

2.6 Les systèmes de communication de données pour les passagers

Les communications aéronautiques pour les passagers ne sont pas soumises aux mêmes exigences de disponibilité, d'intégrité et de continuité que pour les communications du contrôle aérien. En effet, elles n'impactent pas la sûreté des vols. Le développement de nouveaux moyens de communication est donc simplifié et la réglementation moins stricte. Il existe de nombreuses solutions pour les compagnies aériennes qui souhaitent répondre aux attentes de leurs passagers dont certaines sont décrites dans la suite.

Les recommandations concernant la qualité des services multimédia pour les passagers prévoient trois principaux paramètres :

- le délai : la durée entre l'émission et la réception des données,
- la gigue : la variation du délai,
- le taux de perte : le ratio de paquets perdus

Dans [9], l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) donne des recommandations pour de nombreuses applications vocales ou de données telles que la téléphonie, la visioconférence, la navigation sur le Web ou encore l'émission et la réception de courriers électronique. Le tableau 2.3 en donne quelques exemples.

Application	Délai	Gigue	Taux de pertes
Téléphonie	<150 ms (préférable) <400ms (limite)	<1ms	<3%
Navigation web	<2s/page (préférable) <4s/page (préférable)	-	-
Courrier électronique	plusieurs mn	-	-

TABLE 2.3: Performances des services multimédia

2.6.1 Les solutions basées sur des liaisons par satellite

Connexion-by-Boeing a été la première solution commercialisée pour les communications passagers [10]. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un système développé par Boeing. Les passagers pouvaient se connecter à un réseau Wifi ou Ethernet embarqué pour partager un lien vers l'Internet terrestre. Le système se composait d'une antenne embarquée à pointage électronique en bande Ku (12,5 à 18 GHz), de plusieurs répéteurs loués à des opérateurs de communications par satellite, et des stations sol. Connexion-by-Boeing a été mis en service pour la première fois en mai 2004 par la compagnie Lufthansa, puis d'autres compagnies se sont ensuite équipées comme par exemple Japan Airlines, Singapore Airlines, ou China Airlines. Cela représentait au total 150 avions équipés environ. Toutefois, pour des raisons principalement économiques, Boeing a annoncé l'arrêt du système en août 2006.

Inmarsat propose deux solutions principales. Le service Swift 64 fournit des communications vocales et communications de données aux avions avec un débit allant jusqu'à 64 kbit/s. Il nécessite des antennes à gain élevé donc plutôt chères et est principalement destiné à l'aviation d'affaire. Le service Swift broadband, qui est plus récent, est uniquement disponible sur les trois satellites de quatrième génération. Il a été conçu pour des services à l'attention des passagers ou de l'équipage. Il permet d'avoir simultanément des communications vocales et des communications de données et offre un débit allant jusqu'à 432 kbit/s. Les service proposé est en mode "best effort".

Depuis 2008, ARINC propose aussi une solution d'accès à Internet par satellite pour les compagnies. Ce système, baptisé OI (Onboard Internet), permet aux passagers de naviguer sur le web, d'utiliser le courrier électronique,... Il utilise les satellites géostationnaires d'Inmarsat (SwiftBroadband ou Swift 64).

Panasonic Avionics Corporation propose aussi depuis 2008 une solution pour fournir les accès aux

réseaux sols aux avions civils. Ce système, appelé eXconnect, utilise quant à lui les satellites géostationnaires d'Intelsat et leur système GlobalConnexSM. Il fournit un accès Internet haut débit aux passagers. La flotte d'Intelsat étant composée de 53 satellites en orbite géostationnaire, la capacité du système Panasonic devrait s'adapter assez facilement à une éventuelle hausse de la demande, contrairement au système d'ARINC basé sur les sept satellites d'Inmarsat de troisième et quatrième génération.

OnAir est une société créée en 2005 dont les deux principaux actionnaires sont Airbus et SITA. Comme la solution d'ARINC, ce système utilise le service de SwiftBroadband d'Inmarsat. OnAir a annoncé le 10 000^{ème} vol équipé de leur système en avril 2009.

Row 446 se lance pour fournir une solution concurrente par satellite. Il utilise les satellites de HughesNet pour fournir l'accès au réseau Internet. Le système utilise une antenne en bande Ku embarquée sur l'avion sur plusieurs compagnies, comme Southwest Airlines, Alaska Airline, depuis février 2009.

Enfin, Aeromobile fournit une solution pour la téléphonie mobile à bord des avions civils. Il utilise le service Aero H d'Inmarsat et équipe des compagnies comme Qantas et Emirates. Panasonic Avionics Corporation est actuellement l'actionnaire principal d'Aeromobile.

2.6.2 Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol

Aircell est seule entreprise aux Etats-Unis à être autorisée par la FCC (Federal Communications Commission) et la FAA (Federal Aviation Administration) à utiliser des fréquences pour des communications avec un avion en vol. Aircell a acheté pour 32 millions de dollars une bande de fréquence de 3 MHz. Le système se nomme Gogo Inflight. Dès 2007, les compagnies American Airlines et Virgin America ont passé des accords avec Aircell pour équiper quelques uns de leurs avions . En 2008, le premier avion d'American Airlines a été équipé et la même année Delta Airlines a annoncé qu'elle allait équiper tous ses avions du système Aircell. A titre d'exemple, l'utilisation du système Gogo Inflight est facturé 12,95 dollars sur les vols de plus de trois heures.

Wi-Sky propose aussi une solution d'accès Internet à haut débit à bord des avions dans l'espace aérien des Etats-Unis. La technologie utilisée pour les liaisons sol bord est basée sur le Wimax (IEEE 802.16) avec quelques adaptations comme l'utilisation de l'OFDM (Orthogonal Division Frequency Multiplexing), des antennes intelligentes à pointage électronique, ou encore la réutilisation de fréquence. Le débit théorique serait de 10 Mbit/s à une distance de 80 km. Wi-Sky a déjà démontré que le débit de 1 Mbits/s pouvait être garanti en montant et en descendant en utilisant un spectre de 80 MHz, ce qui correspond aux exigences de la FCC qui fixe le débit minimum pour être considéré comme "haut débit" à 768 kbit/s. Toutefois ce système n'est pas encore disponible pour les avions commerciaux. Il nécessite le déploiement préalable de stations sol sur tout le territoire américain en respectant une distance maximale de 150 km entre elles.

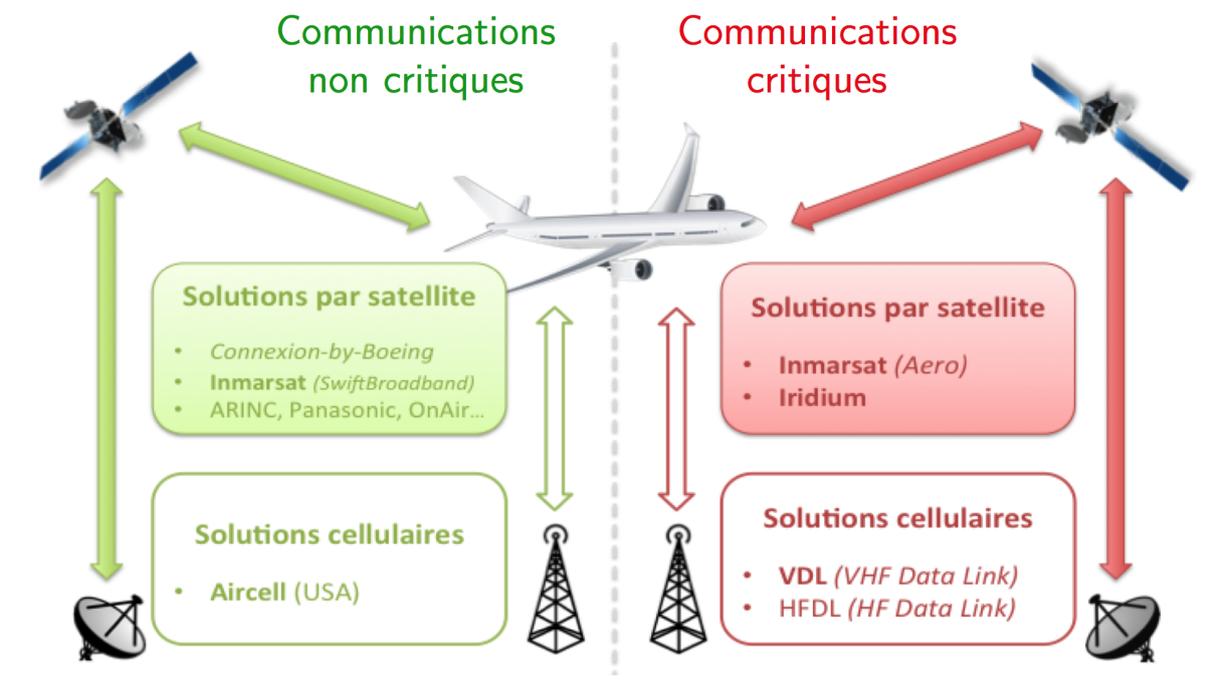


FIGURE 2.8: Les systèmes de communication sol bord aéronautiques

2.7 Les limites des systèmes existants et les perspectives

A ce jour les systèmes permettant les communications sol bord aéronautique sont nombreux et différenciés suivant qu'ils s'adressent aux communications critiques ou non critiques comme le montre la figure 2.8. Par ailleurs, ces solutions peuvent aussi classées suivant le mode utilisé : liaisons directes dédiées aux zones continentales et liaisons par satellites.

Les solutions par satellites présentent des limitations principalement en terme de capacité disponible. En effet, fournir un accès Internet et téléphonie mobile aux passagers des avions civils nécessite une capacité permettant d'acheminer un volume de trafic important, avec des concentrations très fortes dans certaines zones très denses des espaces aériens. Chaque avion peut être considéré comme un réseau local connectant plusieurs dizaines, voire centaines, de passagers et la présence d'une centaine d'avions dans une même zone de service représente une hypothèse réaliste au niveau de grands hubs européens ou dans certaines zones océaniques par exemple. La capacité maximale offerte par le service SwiftBroadband d'Inmarsat est de 432 kbit/s. Cette capacité est alors à partager entre tous les utilisateurs de l'avion. Pour les communications opérationnelles, cette capacité tombe à 10,5 kbit/s avec le service Aero d'Inmarsat. Une autre limite des solutions par satellite est la couverture dans le cas de systèmes basés sur des satellites géostationnaires. En effet ces derniers ne couvrent pas les zones polaires, or il n'est pas rare, par exemple dans le couloir nord atlantique nord entre l'Europe et les Etats-Unis, que les avions suivent des routes qui traversent ces zones. Enfin, le coût représente aussi une limite des

systèmes basés sur des liens satellitaires. Les coûts de conception, fabrication, et lancement d'un satellite sont élevés et il en résulte des coûts d'abonnement assez élevés. De plus, les problématiques de pointage d'un satellite depuis un avion en vol sont relativement complexes. Cela nécessite des antennes plutôt encombrantes qui sont coûteuses et difficiles à intégrer. Ainsi, le coût du segment spatial a été la principale raison qui a rendu la solution Connexion By Boeing économiquement non viable.

Les solutions basées sur des liaisons directes avec le sol présentent l'inconvénient principal de ne couvrir que les espaces continentaux. Cette couverture est assurée par des stations qui sont déployées au sol suivant une stratégie. Pour une couverture exhaustive, les stations doivent être réparties régulièrement en prenant en compte leur portée. Donc par principe ces systèmes ne sont pas utilisables en zones océaniques par exemple. Seule la HF (ou HF DL pour le Datalink) permet d'avoir une couverture mondiale grâce notamment à ses propriétés de propagation. Toutefois la faible capacité proposée et la qualité qui dépend fortement de l'état de la ionosphère, en font plus une solution de secours qu'un système à privilégier. Finalement, pour les autres systèmes continentaux le problème de couverture implique un problème de coût. Le nombre de stations à déployer pour couvrir un continent ou certains pays n'est pas négligeable et peut engendrer des coûts de déploiement et opérationnels très élevés. Pour les services ATSC et AOC, la solution actuellement en cours de déploiement en Europe est la VDL mode 2. Elle offre une capacité de 31,5 kbit/s qui est partagée par tous les avions couverts par une station sol.

On comprend donc que dans un contexte de croissance du trafic aérien et de l'apparition de nouveaux besoins notamment pour les passagers mais aussi pour le contrôle aérien et les compagnies, il est nécessaire d'envisager de nouvelles solutions qui pourront répondre aux différentes contraintes spécifiques du domaine aéronautique. Plusieurs industriels et opérateurs étudient de nouvelles solutions et plusieurs projets de recherches couvrent aussi les problématiques inhérentes à ces systèmes.

Inmarsat travaille avec Boeing sur la conception d'une nouvelle génération de satellite, Inmarsat 5. La principale nouveauté de ce système est qu'il utilisera la bande de fréquence Ka (26,5 à 40 GHz) qui devrait permettre de fournir des débits supérieurs à ceux proposés actuellement. Certes cette bande est réputée sensible aux atténuations provoqués par la pluie mais dans le contexte aéronautique les avions en croisière sont le plus souvent au dessus des couches nuageuses. Chaque satellite géostationnaire aura une couverture flexible organisée sous la forme de 89 faisceaux différents. Le premier de ces satellites (F1) a été lancé avec succès fin 2013 et deux autres lancements devraient suivre en 2014 et 2015.

Iridium travaille aussi sur une nouvelle génération, la deuxième, de sa constellation de satellites. En 2010, Iridium a obtenu le financement et a signé un contrat avec Thales Alenia Space pour la construction de 81 satellites pour un montant d'environ deux milliard d'euros. Le développement et le lancement de ces satellites se poursuivent actuellement avec un objectif de système opérationnel pour 2017.

En Europe, beaucoup de travaux sur les futures communications aéronautiques sont actuellement menés dans le cadre du projet SESAR (Single European Sky ATM Research) [11]. Ce projet se déroule en trois phases :

- une phase de définition de 2004 à 2008 financée en partie par la Commission Européenne et

dirigée par Eurocontrol,

- une phase de développement de 2008 à 2014 dont le budget est estimée à 2 milliards d'euros,
- une phase de déploiement de 2014 à 2020.

Le projet SESAR est donc un projet européen très ambitieux. Son objectif global est de définir et d'implémenter de nouvelles solutions techniques et opérationnelles pour satisfaire les besoins du contrôle aérien à l'horizon 2020. Il devrait permettre de multiplier par trois la capacité de l'espace aérien, et de multiplier par dix la sûreté des vols tout en réduisant de 10% les émissions de CO₂ et de 50% les coûts du contrôle aérien. Un projet similaire existe aux Etats-Unis sous la direction de la FAA. Il s'agit de NEXTGEN (Next Generation Air Transportation System) [12].

Dans le contexte du projet SESAR, l'infrastructure retenue sera basée sur plusieurs nouveaux systèmes de communication de données numériques qui seront déployés progressivement :

- un système de communication directe pour les zones continentales, le **LDACS** (L-band Digital Aeronautical) Communication System). Deux versions sont actuellement candidates pour ce système : le L-DACS 1 et le L-DACS 2 [13]. Les deux systèmes opèrent en bande L et offrent une capacité d'environ 200 kbit/s. Le L-DACS 1 utilise une méthode de partage du canal en fréquence (FDD : Frequency Division Multiplex) et une modulation de type OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Le L-DACS2 est basé sur une méthode de partage temporel du canal (TDD : TIME DIVISION MULTIPLEX) et utilise une modulation de type CPFSK (Continuous Phase Frequency Shift Keying). Des prototypes de chacune des deux versions sont actuellement en cours de développement pour des tests en situation réelle puis retenir la version adéquate.
- un système par satellite défini dans le programme **IRIS** de l'Agence Spatiale Européenne. Une solution par satellite reste nécessaire pour répondre aux exigences de disponibilité, de capacité et de qualité de service des futures communications aéronautiques, en particulier en espace océanique. Le débit offert par le satellite IRIS devrait être de quelques dizaines de kbit/s.
- un système pour les communications avec les avions dans les aéroports (Airport Surface Data-link) appelée l'**Aeromacs**. Il s'agit d'une adaptation du standard IEEE 802.16 (Wimax) qui fonctionnera en bande C (4 à 8 GHz). Ce système doit permettre un accès haut débit pour télécharger par exemple des cartes ou de mettre à jour des bases de données.

La figure 2.9 résume cette infrastructure. On peut noter que les différents sous-systèmes sont interconnectés par des liaisons terrestres. De plus, des communications directes entre avions sont envisagées. En généralisant cette dernière solution et en dotant les équipements embarqués de fonctionnalités de routage et réacheminement des données, on peut imaginer de finalement proposer des réseaux ad hoc aéronautiques. Il s'agit alors d'un réseau Ad Hoc mobile dont les noeuds seraient les avions en vol. Même si quelques projets ou études ont abordé ce sujet, cette dernière solution est certainement celle qui représente le champ d'investigation le plus ouvert d'un point de vue recherche comme nous le verrons dans la suite du mémoire.

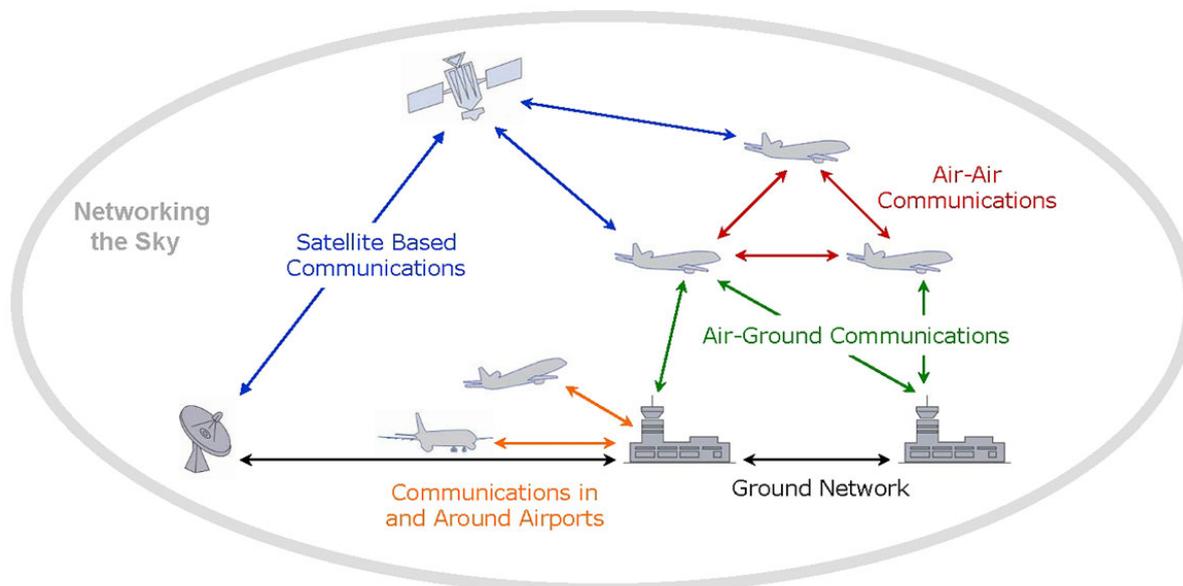


FIGURE 2.9: Future Infrastructure de Communication

2.8 Organisation du mémoire

Après ce chapitre ayant pour but de présenter le contexte d'application principal de mes travaux de recherche et de faciliter la lecture de ce mémoire, le document est structuré en 3 autres chapitres.

Un chapitre est spécifiquement dédié aux communications par satellite et leur application au domaine aéronautique. Effectivement, au sens large comme dans le cas particulier du contexte aéronautique, les systèmes de communication par satellite peuvent présenter des avantages très intéressants notamment en terme de couverture et de leur disponibilité. Cependant ces systèmes présentent aussi de nombreuses spécificités, relativement aux réseaux terrestres, qui nécessitent le plus souvent l'adaptation des protocoles utilisés et parfois la définition et la mise en oeuvre de nouvelles fonctionnalités. Ajouté à cela, les propriétés et contraintes particulières du contexte aéronautique font du domaine des liaisons par satellite pour les communications sol bord un champ d'investigation particulièrement riche pour la recherche dans lequel, comme nous le verrons, j'ai pu m'investir et proposer des contributions.

Le chapitre suivant est consacré aux réseaux ad hoc aéronautiques et plus particulièrement à leur utilisation comme système de communication sol bord. L'idée est de proposer un moyen complémentaire à ceux existants ou envisagés en vue de couvrir des avions qui ne seraient en visibilité d'aucun autre système "classique" mais qui pourraient être à portée d'autres avions qui agiraient alors comme des relayers ou routeurs. A l'instar de ce qui est proposé avec les réseaux VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), il s'agit depuis un noeud source d'utiliser un ou plusieurs noeuds mobiles, dans notre cas des avions, pour réacheminer des données jusqu'à une station sol rattachée à une infrastructure de réseau

terrestre. Nous pouvons finalement parler de communications sol bord multisaat par opposition aux systèmes précédemment évoqués. Là encore, après avoir fixé des hypothèses, les problématiques à étudier sont très nombreuses et peuvent couvrir des sujets aussi variés que, par exemple, la fiabilité, le routage, ou encore l'utilisation de technique DTN (Disruption Tolerant Network).

Enfin, je propose un chapitre dédié au bilan de mes travaux de recherche et des contributions que j'ai pu apporter. Ce chapitre me permet aussi de d'expliquer et souligner que le domaine de **la conception et de l'optimisation d'architectures réseaux pour les systèmes de communication aéronautique** offre actuellement, et certainement encore pour de nombreuses années, des perspectives intéressantes pour des travaux de recherche et des challenges passionnants.

Les architectures de communications par satellite et leur application au domaine aéronautique

Sommaire

3.1	Les réseaux de communications par satellites	40
3.1.1	Principes généraux	40
3.1.2	La famille DVB	43
3.1.3	Amélioration des performances de TCP dans un réseau satellitaire	45
3.1.3.1	Les versions de TCP	46
3.1.3.2	Le "mandataire améliorant les performances" ou PEP (Performance Enhancing Proxy)	48
3.1.3.3	Le modèle de simulation	50
3.1.3.4	La plateforme d'émulation	51
3.1.3.5	Evaluation des performances de TCP sur un lien par satellite	51
3.2	Les communications par satellite dans le contexte aéronautique	54
3.2.1	Généralités	54
3.2.2	Optimisation d'un réseau d'accès par satellite pour les communications aéronautiques	57
3.2.2.1	Définition du système et gestion de la ressource	57
3.2.2.2	Architecture de l'équipement bord	59
3.2.2.3	Résultats des simulations et analyse	64
3.2.3	Dimensionnement des ressources pour les communications aéronautiques par satellite en espace océanique	68
3.2.3.1	Système et simulations	68
3.2.3.2	Dimensionnement des ressources en espace océanique	71
3.2.4	Sécurisation des communications aéronautiques	77
3.2.4.1	Contexte et principe général	77
3.2.4.2	La gestion adaptative de la sécurité	79
3.2.4.3	Méthode d'évaluation de la gestion adaptative de la sécurité	83
3.2.4.4	Résultats de l'évaluation du gestionnaire SecMan	86

Cette partie est consacrée aux réseaux satellitaires au sens large puis à leur utilisation dans le domaine aéronautique. Il s'agit de présenter tout d'abord les spécificités de ces systèmes qui font que la définition des protocoles de communications et mécanismes adéquats représente à chaque fois de nouveaux challenges. Je souligne ainsi mes contributions dans ce contexte depuis ma thèse de doctorat jusqu'à mes travaux menés à l'ENAC dans l'utilisation des liens satellitaires pour les communications aéronautiques.

3.1 Les réseaux de communications par satellites

3.1.1 Principes généraux

Les satellites de télécommunication sont des satellites artificiels placés en orbite pour répondre à des besoins en communication. Ces systèmes reçoivent les signaux de stations terriennes qu'ils retransmettent ensuite vers la terre. Un système de communication par satellite est divisé en trois segments : les segments sol, spatial, et utilisateur. Le segment sol est responsable de l'interface entre le satellite de communication et l'infrastructure de réseau terrestre. Cette infrastructure est généralement organisée avec un réseau cœur auquel plusieurs réseaux d'accès sont reliés et autour desquels on trouve les utilisateurs finaux. Les données des flux arrivant de l'infrastructure du réseau sol sont adaptées pour être ensuite envoyées sur l'interface air de la station terrienne

La classification des systèmes de communication par satellite peut se faire suivant différents critères, par exemple :

- le service fourni : FSS (Fixed Service Satellite), BSS (Broadcast Service Satellite), MSS (Mobile Service Satellite).
- les zones géographiques couvertes : global, régional, national
- les classes d'application utilisateur : militaires, commercial, expérimental, ...

Contrairement aux systèmes de communication terrestres, les satellites permettent une couverture rapide de larges zones géographiques et sont naturellement adaptés à la diffusion de données partielle (multicast) ou totale (broadcast). On peut aussi souligner qu'ils offrent un coût d'utilisation indépendant des distances entre les noeuds communicants dans les zones couvertes.

Il existe différents types d'orbites pour les satellites de télécommunications. Ces orbites sont généralement caractérisées par une inclinaison (angle entre le plan orbital et le plan équatorial), une altitude, et une excentricité. L'orbite la plus communément utilisée est géostationnaire. Dans ce cas l'inclinaison est de zéro degré, le satellite est positionné au-dessus de l'équateur à une altitude de 35 786 km du sol terrestre. Ce type de satellite apparaît comme un point fixe depuis la terre. L'avantage est qu'il n'est alors pas nécessaire de prévoir des systèmes de suivi au niveau des stations terriennes. De plus, le satellite peut fournir des services continus dans les zones couvertes. Trois satellites suffisent pour une couverture (presque) mondiale. Toutefois, compte-tenu de leur altitude, ces systèmes induisent des délais de propagation d'environ 250 ms entre deux points terrestres. Ces délais peuvent être problématiques pour certains services et dans le contexte de l'utilisation de certains protocoles normalement dédiés à des

réseaux terrestres. Depuis les stations terriennes, l'angle d'élévation du satellite décroît lorsque la latitude ou la longitude augmente. A partir d'une certaine élévation la qualité des signaux reçus devient problématique voire insuffisante pour le décodage. Ainsi, les régions polaires ne sont pas couvertes par les satellites géostationnaires.

Certains satellites utilisent des orbites basses LEO (Low Earth Orbit, 400 à 2000 km d'altitude) ou moyennes MEO (Medium Earth Orbit, 10000 à 20000 km d'altitude) qui ne sont pas dans le plan équatorial. Ces satellites sont alors défilants vus depuis la terre. Il est important de noter que pour assurer une couverture permanente et donc des services continus, les systèmes satellitaires LEO et MEO sont généralement composés de plusieurs satellites constituant une constellation.

Les bandes de fréquence utilisables pour les systèmes de communication par satellites sont fixées par des organismes de réglementation comme l'ITU (International Telecommunication) par exemple. La table 3.1 présente les principales bandes de fréquences existantes avec leur domaine d'application.

Bande	Fréquences	Applications
L	1 à 2 GHz	Mobile Satellite Service (MSS)
S	2 à 4 GHz	MSS, NASA, Deep space research
C	4 à 8 GHz	Fixed Satellite Service (FSS)
X	8 à 12,5 GHz	FSS military, terrestrial earth exploration, meteorological satellites
Ku	12,5 à 18 GHz	FSS, BSS (Broadcast), MSS
K	18 à 26,5 GHz	BSS, FSS, MSS
Ka	26,5 à 40 GHz	FSS, MSS

TABLE 3.1: Bandes de fréquences des systèmes de communication par satellite

Dans le contexte des communications aéronautiques par satellite, 3 bandes uniquement sont considérées :

- Bande L : il s'agit des fréquences les plus basses. Ceci rend leur utilisation relativement simple et permet l'utilisation d'équipements radio-fréquence peu sophistiqués et donc de faible coût. De plus, les faisceaux relativement larges ne nécessitent pas d'avoir des précisions de pointages requises pour les systèmes opérant dans des bandes de fréquences plus élevées. Cette bande est notamment utilisée par l'opérateur Inmarsat.
- Bande Ku : Cette bande est surtout utilisée pour la diffusion des bouquets de télévision et aussi pour les systèmes basés sur des antennes de petite taille VSAT (Very Small Aperture Terminal). La largeur de bande disponible en fait une bande moins chère que la bande L. Son principal inconvénient est sa vulnérabilité aux atténuations dues à la pluie. Le pointage des antennes doit être plus précis que pour les systèmes en bande L, d'où des équipements plus chers. Les couvertures proposées reposent généralement sur des faisceaux régionaux qui couvrent des zones continentales pour des services de réception de canaux TV.
- Bande Ka : Il s'agit dans ce cas de très hautes fréquences nécessitant un pointage très précis

et donc des systèmes sophistiqués relativement chers. Ces systèmes aussi sont vulnérables à l'atténuation due à la pluie. Ils sont généralement dédiés à la diffusion de canaux TV haute définition ou des systèmes VSAT. Inmarsat, par exemple, propose un service global VSAT en bande Ka basé sur l'utilisation d'antenne de petites tailles de faible coût.

Les signaux transmis par satellite sont soumis à différents problèmes qui peuvent impacter leur qualité. Par exemple :

- Les pertes en espace libre représentent le problème principal pour les signaux transmis entre la terre et le satellite. Ces pertes sont inversement proportionnelles au carré de la distance parcourue par le signal et inversement proportionnelles au carré de la fréquence utilisée. Par exemple, dans le cas d'un satellite géostationnaire, ces pertes peuvent varier de 190 à 210 dB en fonction de la fréquence utilisée.
- L'absorption atmosphérique représente aussi une source d'altération du signal. Sa valeur dépend de la fréquence utilisée.
- Enfin, considérant une zone couverte au sol par un faisceau, la puissance reçue est plus importante au centre du faisceau et décroît lorsqu'on s'en éloigne.

Enfin, la méthode d'accès multiple représente un autre point particulièrement important dans le contexte des communications par satellite. Ces méthodes doivent permettre le partage entre plusieurs stations de la ressource que représente par la capacité offerte. Elles sont généralement basées sur une ou plusieurs des approches suivantes :

- Accès multiple à répartition en fréquence (FDMA, Frequency Division Multiple Access). Cette méthode consiste en un découpage de la capacité offerte, ou de la bande passante, en plusieurs sous-bande de fréquences. Elle est réputée simple mais le nombre de fréquences allouables est bien sûr limité et il faut prévoir des solutions permettant d'éviter les interférences entre canaux adjacents.
- Accès multiple à répartition dans le temps (TDMA, Time Division Multiple Access). Cette méthode est basée sur la synchronisation des sous-systèmes et un découpage temporel de la ressource. Ainsi des créneaux temporels sont définis et répartis entre les noeuds candidats. Par exemple, dans les réseaux satellitaires dits VSAT, une station principale (appelée Hub ou NCC pour Network Control Center), fournit le temps référence et assure l'allocation des créneaux temporels.
- Accès multiple à répartition de code (CDMA, Code Division Multiple Access). Cette méthode a été à l'origine proposée pour des applications militaires afin de garantir des communications sécurisées. Elle est couramment utilisée dans les systèmes de communication sans fils tels que le Wifi ou encore dans le contexte des communications par satellite. Le système CDMA est une technologie à étalement de spectre. Ce système envoie des séquences pseudo-aléatoires de nombres qui sont appliqués aux bits de données émis par l'utilisateur. Le récepteur doit connaître le code utilisé lors de la modulation. Ainsi après synchronisation, il est possible de décoder le signal utile émis. Le codage le rend très difficile à brouiller, ou à écouter en clair. De plus, il permet la mesure des distances et la localisation de l'émetteur. On distingue deux approches.

L'étalement de spectre à séquence directe (ou DSSS, "Direct Sequence Spread Spectrum") consiste à transmettre pour chaque bit une séquence binaire appelée bruit pseudo-aléatoire. Chaque bit utile valant 1 est remplacé par cette séquence binaire et chaque bit valant 0 par son complément. L'étalement de spectre par saut de fréquence (ou FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum) est une méthode de transmission de signaux qui utilise plusieurs canaux fréquentiels selon une séquence aléatoire connue de l'émetteur et du récepteur. Cette dernière technique offre plusieurs avantages par rapport à l'utilisation d'une fréquence unique. Elle permet notamment de rendre le signal transmis très résistant aux interférences et difficile à intercepter.

Une autre façon de classer les méthodes d'accès au canal est basée sur la façon dont les ressources sont allouées à chaque noeuds, dans notre cas, chaque station terrienne. Effectivement cette allocation peut être statique, dynamique à la demande, ou par contention (accès aléatoire).

Enfin, il faut souligner qu'une "bonne" méthode d'accès multiple sera surtout une méthode en adéquation avec plusieurs paramètres du système considéré. On peut citer : le nombre de station, la sporadicité et l'hétérogénéité des trafics de données générés, les qualités de service requises, ...

3.1.2 La famille DVB

Le projet DVB (Digital Video Broadcasting) a été introduit en 1993 par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). L'objectif est de créer une plateforme européenne commune pour toutes les spécifications et les normes pour la diffusion de télévision numérique. Le système DVB permet de transmettre des données en utilisant plusieurs supports de diffusions (C : Câble, S : Satellite, T : Terrestre) ou son adaptation pour les récepteurs portables (H). Les normes correspondantes définissent les spécifications des niveaux liaison de données et physique du système de diffusion. La norme DVB-S [14] est un standard ouvert dont la première version a été ratifiée en 1994. Elle est conçue pour les services unidirectionnels dans les bandes attribuées pour les services FSS ou BSS. Le système DVB-S utilise une modulation sur 4 phases (QPSK : Quadrature Phase Shift Keying) et une correction d'erreur directe qui permettent d'avoir une transmission efficace à faible rapport signal à bruit. La norme DVB-S a ensuite évolué vers une solution bidirectionnelle pour satisfaire la demande croissante en services interactifs. La norme DVB-RCS (Return Channel by Satellite) [15] a donc été approuvé en 2000. Le but est de fournir un canal retour pour interagir avec le système DVB-S. La modulation utilisée dans le DVB-RCS est la même que pour DVB-S (QPSK). De plus DVB-RCS combine plusieurs techniques permettant de compenser les dégradations rencontrées en bande Ka. Même si la norme DVB-RCS est d'abord destinée aux services fixes par satellite, son utilisation est étendue pour l'application mobile [16].

La deuxième génération de la norme DVB-S [17] a été développée en 2003. Elle représente une amélioration : meilleure performance de transmission, plus de souplesse et une complexité moindre du récepteur. Cette amélioration est obtenue grâce aux technologies plus récentes en modulation et codage canal qui permettent une gestion efficace de la correction d'erreur (FEC : Forward Error Correction). De plus le système DVB-S2 profite de l'utilisation de modulation et codage adaptatif (ACM) dans le cas interactif (ex : accès Internet). Cette technique permet d'optimiser les paramètres de transmission en

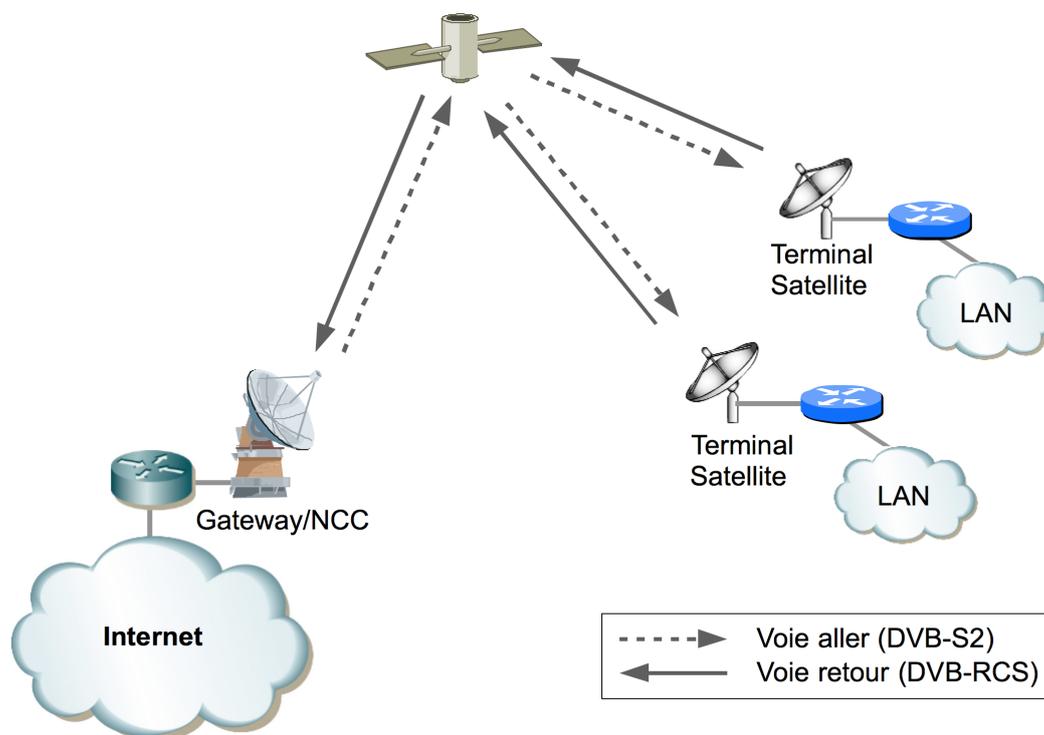


FIGURE 3.1: Réseaux d'accès satellitaire

fonction des conditions de propagation. DVB-S2 utilise une technique de multiplex temporel TDM (Time Division Multiplex). Par exemple, les datagrammes IP peuvent être segmentés puis encapsulés dans des trames GSE (Generic Stream Encapsulation). L'ordre de transmission peut être piloté par une politique de service de façon à différencier les flux prioritaires.

La figure 3.1 montre une topologie classique d'un réseau satellitaire basé sur des liens DVB-S2/DVB-RCS pour un accès à Internet d'utilisateurs distants.

Elle fait apparaître les éléments principaux d'un tel réseau :

- Les terminaux satellites (ST, Satellite Terminal)
- la Gateway, elle centralise les trafic de la voie aller (DVB-S2) et de la voie retour (DVB-RCS) et permet l'interfaçage du réseau d'accès avec les réseaux terrestres.
- le centre de contrôle (NCC, Network Control Center), il prend en charge la gestion des ressources satellitaires

Douze ans après avoir finalisé la première version de la norme DVB-RCS (Return Channel via Satellite), le comité DVB a adopté les spécifications DVB-RCS2 [18], label officiel donné à cette nouvelle génération. Nativement adapté au support de services IP interactifs, le standard DVB-RCS2 affiche une efficacité spectrale supérieure au DVB-RCS et intègre de nouveaux modes opérationnels. Selon le comité DVB, il est notamment stipulé l'usage de techniques de codage canal évoluées qui dopent la capacité

et la robustesse de la voie retour par satellite pour les services interactifs utilisant la technologie DVB-S2 dans la liaison descendante. Le standard définit notamment un schéma de modulation et de codage adaptatifs (ACM) ainsi qu'une modulation à phase continue (CPM, Continuous Phase Modulation) alternative qui devraient permettre l'usage de terminaux bas coût. Concernant le partage et l'allocation de la capacité, DVB-RCS2 utilise une technique dérivée du MF-TDMA (Multi Frequency Time Division Multiple Access) qui était déjà retenue pour le DVB-RCS. Cette technique permet aux terminaux d'envoyer leur données sur différentes porteuses dans des créneaux temporels spécifiques alloués par la station de contrôle (NCC) grâce à une technique DAMA (Demand Assignment Multiple Access).

3.1.3 Amélioration des performances de TCP dans un réseau satellitaire

Dans cette partie, je détaille des travaux que nous avons menés sur l'adaptation du protocole TCP dans le contexte de son utilisation sur des liens par satellites. Alors que ce protocole a été enrichi de plusieurs améliorations faisant l'objet de différentes versions, il convient de vérifier si une approche spécifique proposée il y a plusieurs années est toujours légitime à présent.

De part leur facilité de déploiement les accès à Internet par satellite représentent une solution intéressante notamment dans les zones dépourvues d'infrastructure de réseau terrestre. Néanmoins il a été souvent souligné la nécessité d'adapter les architectures protocolaires aux spécificités des liens satellitaires notamment dans le cas d'un satellite géostationnaire. C'est en particulier le cas du protocole TCP qui dans un contexte de lien à fort produit bande x délai (>64 Ko), sous-utilise la capacité disponible s'il n'est pas adapté. Une approche connue sous le nom de TCP PEP (Performance Enhancement Proxy) et souvent déployée consiste à découper la connexion TCP, opérant normalement de bout en bout, en plusieurs segments. Ceci permet l'utilisation sur le lien satellitaire d'une version adéquate du protocole de transport.

Cependant, les études démontrant les avantages de l'approche PEP par rapport à du TCP de bout en bout dans un contexte satellitaire par considèrent le plus souvent des versions relativement anciennes de TCP telles que New Reno ou Vegas. Or, dans le même temps, compte-tenu du nombre croissant de liens terrestres haut débit par fibre optique, ces anciennes versions du protocole TCP ont montré leurs limites et particulièrement leur difficulté à utiliser la capacité offerte. Certes plusieurs options de TCP permettent de limiter ces problèmes (utilisation d'acquittement cumulatifs, option d'échelle de fenêtre, ...) mais sans les résoudre pleinement. Aussi des versions bien plus récentes ont été proposées, notamment TCP Cubic dans tous les derniers noyaux Linux. Ces versions, et donc TCP Cubic, ont pour objectif principal d'éviter la sous-utilisation de la capacité offerte sur les liens à fort produit bande x délai observée avec les versions plus anciennes. Cet objectif doit être atteint en respectant deux autres propriétés requises l'équité (ou *fairness*, équilibre des capacités utilisées par chacun des flux TCP d'une même version et en concurrence) et l'"amicalité" (ou *friendliness*, équilibre des capacités utilisées par chacun des flux TCP de versions différentes et en concurrence).

Finalement, compte-tenu du large déploiement de ces nouvelles versions de TCP et de l'émergence des boucles d'accès par satellite DVB-S2/DVB-RCS2, il apparaît pleinement légitime de reconsidérer

la question sur la nécessité d'utiliser ou non l'approche PEP. On peut souligner que les standard ETSI DVB-S2/DVB-RCS2, qui servent de système référence dans cette étude, sont pourvus de fonctionnalités facilitant la solution PEP.

La méthodologie retenue dans notre étude repose sur deux phases. Tout d'abord, sur la base d'un modèle de simulation développé sous Opnet Modeler, nous étudions l'incidence sur les délais de bout en bout des couches d'accès DVB-S2/DVB-RCS2. En plus des fonctionnalités de couche physique et liaison, la norme DVB décrit aussi en détail des fonctionnalités de niveau réseau (IP) avec notamment la gestion de la qualité de service par DiffServ. Le modèle de simulation est enrichi de points de mesure (ou sondes) permettant d'observer les distributions des délais pour plusieurs niveaux de qualité de service (QoS). Les résultats obtenus sont ensuite utilisés pour configurer une plateforme d'émulation du lien satellitaire en terme de capacité, délai, et de gigue sur la base de descriptions statistiques. Puis, par des campagnes de mesure, nous évaluons ainsi le gain apporté par une approche PEP comparativement à des connections TCP de bout en bout en New Reno puis en TCP Cubic.

3.1.3.1 Les versions de TCP

Depuis sa première version en 1981 et la description donnée dans la RFC 793 de l'IETF (Internet Engineering Task Force), plusieurs améliorations ont été apportées au protocole de transport de la suite TCP/IP. Ces différentes modifications ont été motivées par la nécessité d'adapter le comportement de TCP aux propriétés des nouveaux liens réseaux successifs. En particulier, TCP utilise une technique de contrôle de congestion afin d'adapter son débit à la capacité disponible sur le réseau. Tahoe, Reno, et NewReno considèrent les pertes de segment comme des signes de congestion du réseau et réduisent leur débit lorsqu'ils les détectent. Cette approche trouve ses limites dans le contexte des liens à fort produit bande x délai (supérieur à 64 Ko) où les timers permettant de détecter ces pertes peuvent expirer alors que des segments ne sont que retardés. L.Peterson et L.Brakmo ont proposé TCP Vegas [19] et son algorithme basé sur l'observation des délais des segments pour déterminer leur taux d'émission. L'idée de TCP Westwood [20] est d'estimer la bande passante disponible en se basant sur la vitesse de réception des messages d'acquittement. TCP Bic (Binary Increase Congestion) [21] vise à assurer un partage équitable des ressources entre différents flux présentant des temps d'aller-retour (RTT, Round Trip Time) différents. Il a été implémenté comme protocole de transport par défaut dans les noyaux Linux 2.6.18. Mais aujourd'hui, les deux versions les plus répandues sont certainement Compound TCP [22] promu par Microsoft depuis Windows Vista et TCP Cubic [23] présent depuis les noyaux Linux 2.6.19. Ce dernier est considéré comme une amélioration de TCP Bic basé sur un algorithme de contrôle de congestion optimisé régulé par le temps qui est observé entre deux événements de congestion successifs (*congestion epoch*). Il considère ainsi la croissance de la fenêtre de congestion indépendante des temps d'aller retour et assure une équité entre les différents flux opérants en concurrence. Enfin, parce qu'il a été spécifiquement développé avec l'objectif de limiter l'incidence des spécificités des liens par satellite, TCP Hybla est aussi considéré dans ce contexte. Il est, en particulier, recommandé comme protocole de transport alternatif sur les segment satellitaires [24] dans le cas de la mise en oeuvre de

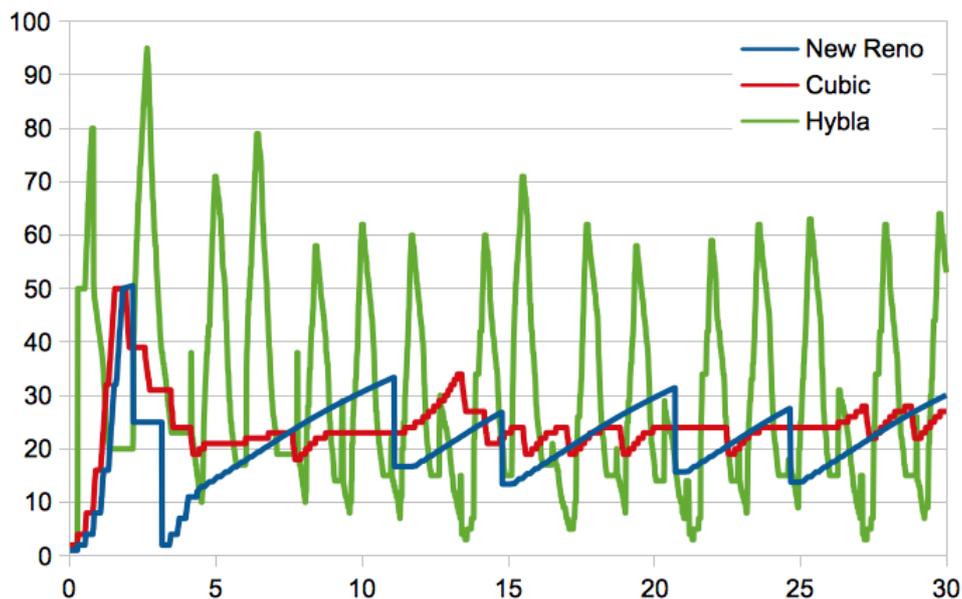


FIGURE 3.2: Fenêtres de congestion TCP sur lien satellite

l'approche PEP notamment à travers la solution PEPSal évaluée dans la suite. La version TCP Hybla propose une modification de l'algorithme de mise à jour de la fenêtre de congestion $cwnd$ à la réception d'un acquittement ACK afin d'accélérer l'augmentation de $cwnd$ dans les phases de démarrage lent et de prévention d'encombrement pour les connexions pour lesquelles la valeur RTT est élevée. Dans la version Hybla, il est prévu d'adopter des acquittements sélectifs SACK afin d'assurer un retour à la normale rapide en cas de pertes dues à la fois à des erreurs sur le canal et à l'injection de davantage de données dans le réseau. Afin d'avoir une première estimation des performances nous avons évalué par simulation à l'aide des logiciels NS/Nam les performances de TCP sur un lien satellite avec différentes versions (NewReno, Cubic, et Hybla). L'évolution de la taille de la fenêtre de congestion dans le temps pour ces 3 cas est représentée dans la figure 3.2, et les valeurs clés sont récapitulées dans la table 3.2. On peut voir qu'effectivement la vitesse d'ouverture de la fenêtre de congestion de TCP Hybla permet d'obtenir une taille moyenne, et donc un débit, plus élevé par rapport à New Reno et Cubic. Toutefois, cela a un coût puisque on peut voir aussi que le taux de perte de segment est 3 fois plus élevé que pour TCP Cubic. Par ailleurs, les courbes laissent présager un comportement relativement agressif de Hybla. Ce dernier point sera discuté dans un contexte où plusieurs flux sont en concurrence.

Sim. Results	New Reno	Cubic	Hybla
Mean cwnd size (Ko)	21	24	30
Packet Loss	6	10	32

TABLE 3.2: Fenêtres de congestion TCP sur lien satellitaire

3.1.3.2 Le "mandataire améliorant les performances" ou PEP (Performance Enhancing Proxy)

Les méthodes généralement adoptées dans le protocole TCP sont clairement orientées pour les réseaux terrestres. Les accès à l'Internet par satellite représentent un marché de niche et on ne peut pas attendre que les systèmes des utilisateurs terminaux soient modifiés dans ce cas. Cependant les liens satellitaires présentent des propriétés spécifiques. La plus évidente est certainement le délai de propagation induit par la distance qui dans le cas d'un satellite géostationnaire est de l'ordre de 250 ms pour une simple bond. Les techniques d'accès multiples ont aussi un impact. Les systèmes GEO pour l'accès à l'Internet sont généralement asymétriques avec, par exemple un débit élevé sur la voie aller dont les ressources sont partagées par un TDM (Time Division Multiplex) et un débit moindre sur la voie retour gérée par un MF-TDMA. De plus, les délais induits par ces techniques génèrent des délais supplémentaires présentant des propriétés différentes. Compte-tenu des techniques de codage utilisées les taux de pertes de paquets sur le lien satellite sont relativement faibles. Mais les goulets d'étranglement que représentent les points d'accès génèrent des pertes qui impactent considérablement les performances de TCP et limitent les débits obtenus au niveau des couches applicatives.

Afin de limiter ces effets des liens satellitaires sur les performances de TCP, les solutions basées sur les PEP ont été proposées. Comme montré dans la figure 3.3 cette approche consiste à couper la connexion TCP, qui opère normalement de bout en bout, en une succession de connexions. On peut utiliser alors une version enrichie ou alternative du protocole de transport sur le lien satellitaire. Les systèmes terminaux ignorent la présence d'un PEP. Ce dernier est installé sur un routeur. Quand les paquets lui arrivent, il les acquitte à la place du destinataire effectif et les transfère sur le lien satellitaire. Il stocke aussi temporairement les paquets pour d'éventuelles retransmissions.

[24] propose une solution PEP open source pour Linux appelée PEPSal. Cette solution, illustrée dans la figure 3.4 appartient à la classe des PEP intégrés. Elle utilise TCP Hybla comme protocole de transport alternatif sur le lien satellitaire. PEPSal est transparent pour les systèmes terminaux. Il a été adopté par plusieurs fournisseurs d'accès à Internet par satellite et est même recommandé par l'ETSI comme solution dans le contexte BSM (Broadband Satellite Multimedia) basé sur la dernière version DVB-RCS2 [25], [26], [27]. La figure 3.5 montre le détail de l'approche PEP d'un point de vue des architectures protocolaires. Les résultats présentés dans [24] indiquent que cette solution permet d'éviter la perte de performances généralement constatée avec le protocole TCP dans un contexte satellite. Cependant, il faut souligner que le principe même de l'approche PEP va à l'encontre de la philosophie de TCP qui opère normalement de bout en bout. L'utilisation d'un PEP rend notamment impossible l'utilisation du protocole IPSec au niveau de la couche réseau qui est pourtant de plus en plus utilisé dans l'Internet ces dernières années. IPSec implique le cryptage notamment des en-têtes des segments TCP le rendant ainsi incompatible avec un PEP sur un routeur intermédiaire qui doit nécessairement pouvoir accéder à l'en-tête TCP sans être pour autant le destinataire effectif. Ce problème est notamment souligné dans [28]. Une alternative consiste alors à implémenter IPSec uniquement sur le lien satellitaire mais il n'y a pas dans ce cas de réelles connexions TCP de bout en bout basées sur IPSec.

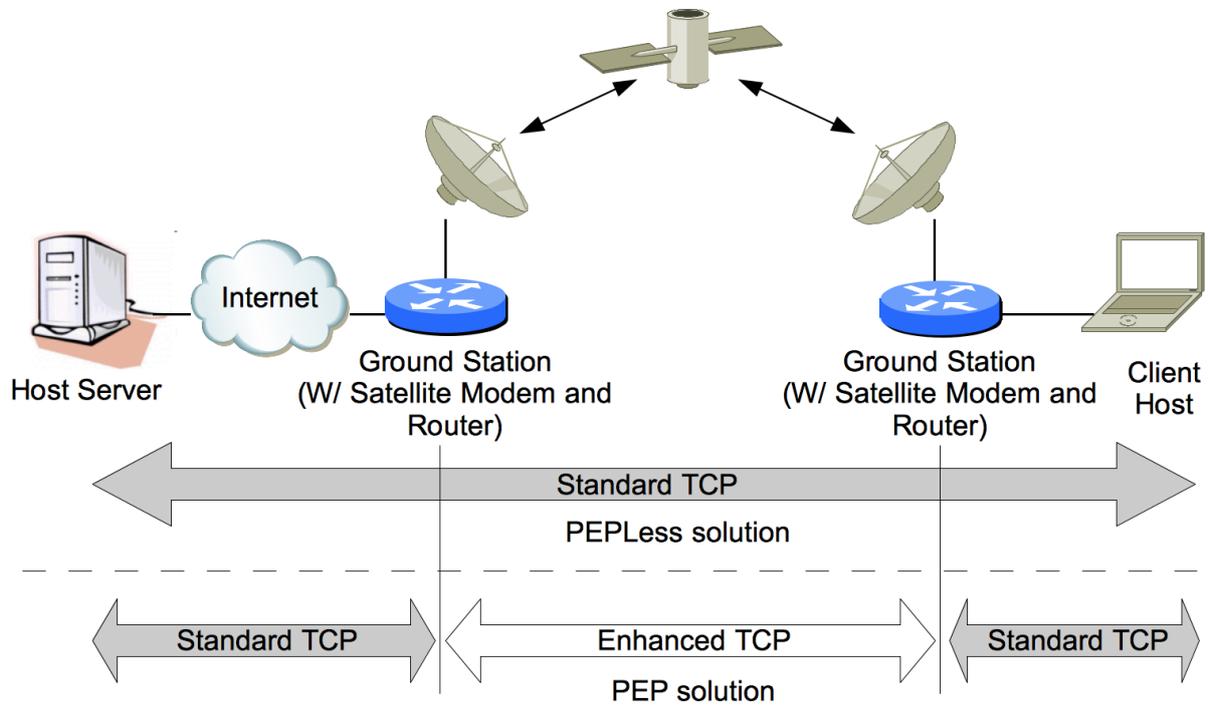


FIGURE 3.3: Performance Enhancement Proxy

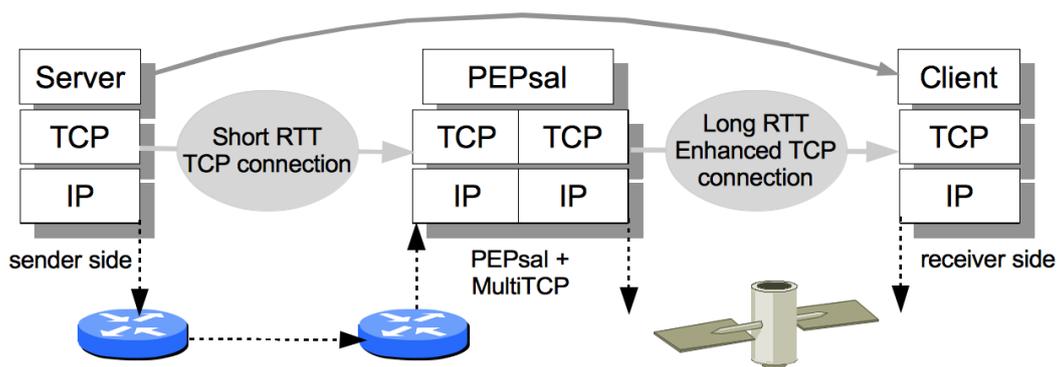


FIGURE 3.4: Architecture PEPsal

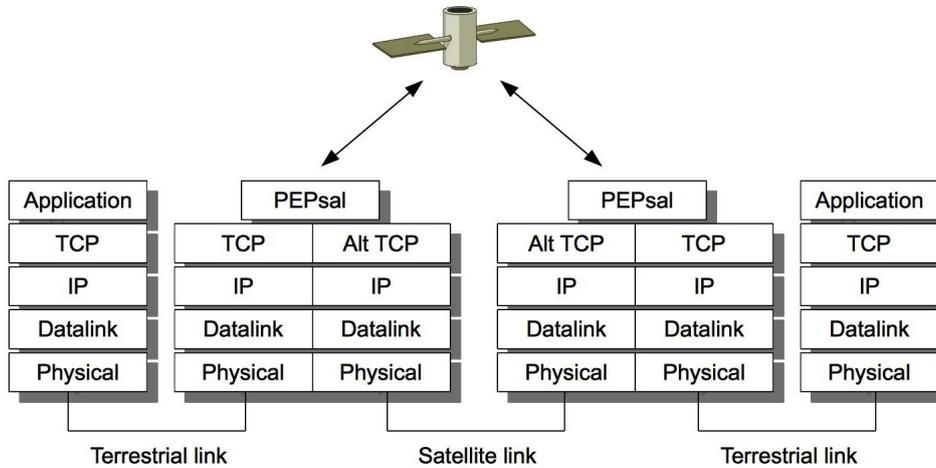


FIGURE 3.5: Performance Enhancement Proxy - Architecture protocolaire

3.1.3.3 Le modèle de simulation

Le modèle de réseau satellitaire DVB-S2/DVB-RCS2 considéré a été développé avec Opnet Modeler (Riverbed, www.riverbed.com) un logiciel de simulation de réseaux de communication à événements discrets. Le modèle étudié utilise des éléments de la librairie Opnet et des modules spécifiques développés conjointement avec l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace). La voie aller est basée sur un multiplex temporel (TDM). Les datagrammes IP sont segmentés et encapsulés dans des trames GSE (Generic Stream Encapsulation) [29]. L'ordre de transmission est piloté par une politique de service permettant de garantir des délais limités pour les flux à haute priorité (EF, Expedited Forwarding) par opposition aux flux basse priorité (BE, Best Effort). Dans les conditions ciel clair supposées, une trame est émise toute les $360 \mu s$ et transporte 58192 bits (180 Mbit/s). La voie retour est basée sur une technique plus complexe de multiplexage temporel et fréquentiel, le MF-TDMA. Chaque terminal peut émettre dans des créneaux temporels répartis sur différentes fréquences. Une des innovations du DVB-RCS2 est la définition des BTU (Bandwidth-Time Units). La structure de la supertrame a été ainsi simplifiée en structurant chaque trame d'une porteuse en une simple série de BTUs dimensionnées uniformément (en symboles). Par exemple, une BTU peut être utilisée pour la signalisation et deux ou six BTUs peuvent être assemblées pour des volumes de données. Le centre de contrôle du réseau (NCC, Network Control Center) diffuse des informations de signalisation précisant le format des BTUs. Il peut ainsi modifier la forme d'onde, la méthode d'accès (aléatoire ou déterministe) puis allouer les ressources aux terminaux. Dans l'étude, l'hypothèse retenue est l'utilisation de porteuses à 270 ksymboles/s avec un codage 8PSK-5/6. La durée d'une supertrame est de 45 ms. Comme pour la voie aller, la voie retour gère la qualité de service. Compte-tenu de la capacité allouée par le NCC, le terminal satellite détermine

l'ordre d'émission des datagrammes IP conformément à la politique DiffServ (EF > AF > BE) [30]. Quatre niveaux ont été pris en compte dans le modèle de simulation, de EF pour la voix sur IP (VoIP) à BE pour le transfert de fichier (ftp). Ainsi, pour chaque terminal quatre files d'attentes sont gérées et les requêtes de capacité correspondantes sont générées. Une politique de PQ (Priority Queueing) est ensuite utilisée pour dépiler chaque file et émettre les paquets. Le modèle de simulation comporte une centaine de terminaux, ce qu'un simple faisceau satellite peut amplement servir. Trois configurations correspondantes à trois niveaux de charge différents sont considérées Load1 (peu chargé), Load2 (moyennement chargé), et Load3 (chargé).

3.1.3.4 La plateforme d'émulation

La plateforme utilisée a été développée dans l'équipe ResCo de l'Enac dans le contexte du projet CAPITOLE et est décrite dans [31]. Comme le montre la figure 3.6, elle est composée de 4 serveurs Linux et de 2 commutateurs Ethernet. L'application d'émulation de lien est installée sur un poste et les applications de l'utilisateur final sur un autre. Un troisième poste est utilisé comme routeur avec l'application PEPSal qui peut être activée. Et enfin un quatrième ordinateur héberge les applications serveurs. Trois paramètres sont pilotés dans l'émulateur afin de décrire les propriétés du lien satellitaire. Le délai de propagation (décrit par un délai moyen, une gigue, et une loi de probabilité), le taux d'erreur paquet (PER, Packet Error Rate) et la capacité du lien en bits par seconde. Dans l'expérimentation proposée, nous réglons la capacité du lien telle qu'elle a été retenue dans les simulations. Le paramètre retenu pour étudier les performances des différentes configurations est le débit vu de la couche applicative appelée aussi *goodput*. Il est obtenu en divisant le volume de données reçu au niveau applicatif par le temps nécessaire à son transfert. Afin d'éviter les limitations imposées par les temps d'écriture sur le disque dur local dans le cas de plusieurs transferts simultanés, nous utilisons un outil que nous avons spécifiquement développé en C++, *TCPmeter*, qui génère un nombre de flux donné et permet de récupérer ensuite des résultats sur les performances.

3.1.3.5 Evaluation des performances de TCP sur un lien par satellite

Les délais observés avec les campagnes de simulations ont été étudiés. Par exemple, la figure 3.7 présente les résultats obtenus pour les flux Best Effort sur la voie aller. Lorsque la charge augmente les délais aussi ainsi que leur variation. L'analyse statistique de l'ensemble des résultats des simulations pour les différentes charges ont permis de définir les lois que suivent les données. La table 3.8 résume les conclusions de cette analyse.

Sur la base de ces observations, la plateforme d'émulation du lien satellite a été configurée afin de mesurer les performances de TCP. Trois scénarios sont considérés :

- TCP NewReno de bout en bout (e2e NReno)
- TCP Cubic de bout en bout (e2e Cubic)

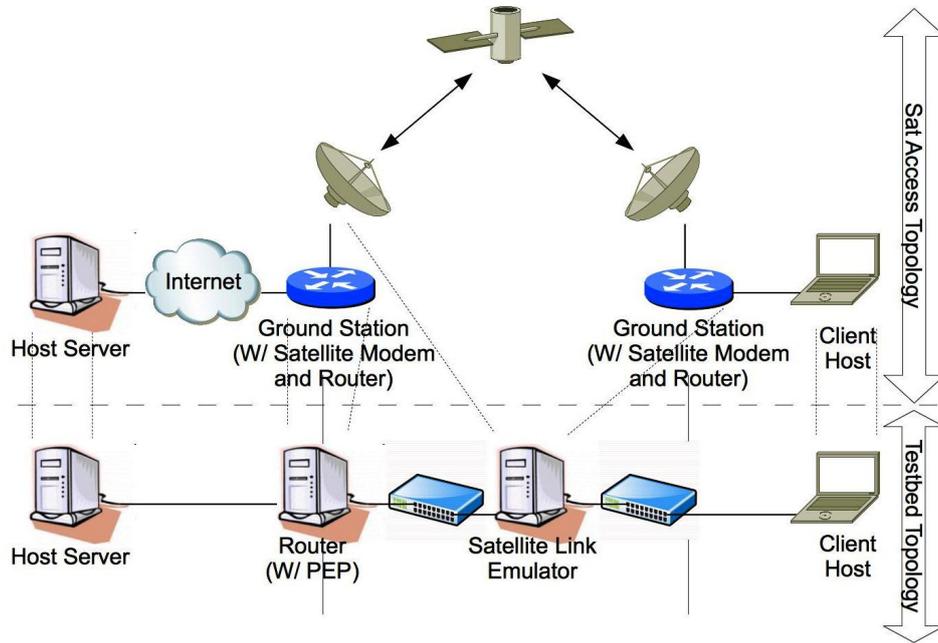


FIGURE 3.6: Plateforme d'émulation

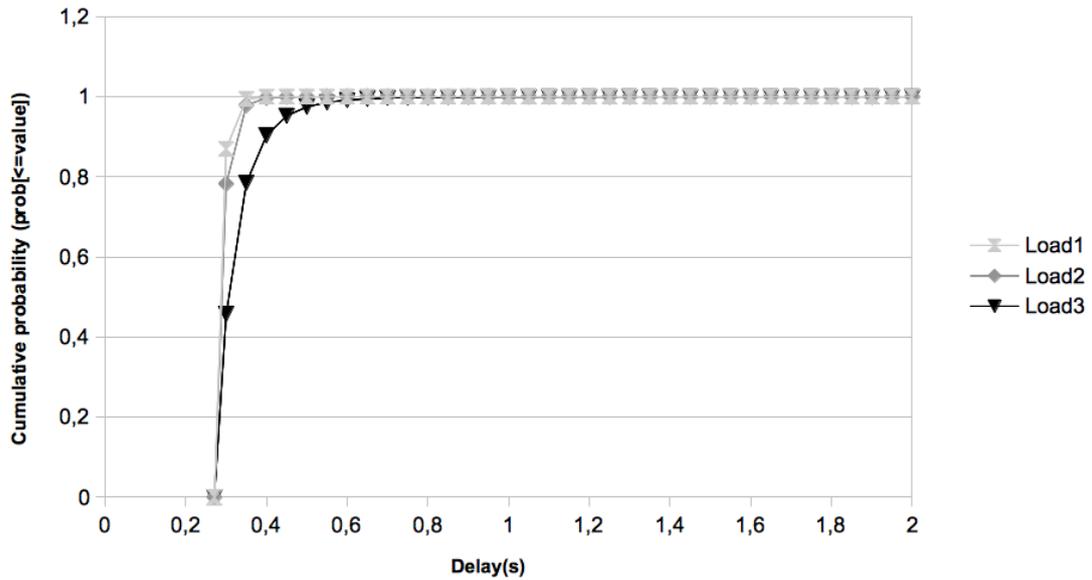


FIGURE 3.7: Voie aller - Distribution cumulative des délais

Load	Forward			Return		
	Law	Mean (s)	95% jitter (s)	Law	Mean (s)	95% jitter (s)
Load1	Pareto	0.281	0.044	normal	0.77	0.032
Load2	Pareto	0.284	0.060	normal	0.77	0.063
Load3	Pareto	0.304	0.175	normal	0.77	0.332

FIGURE 3.8: Distribution des délais/gigues

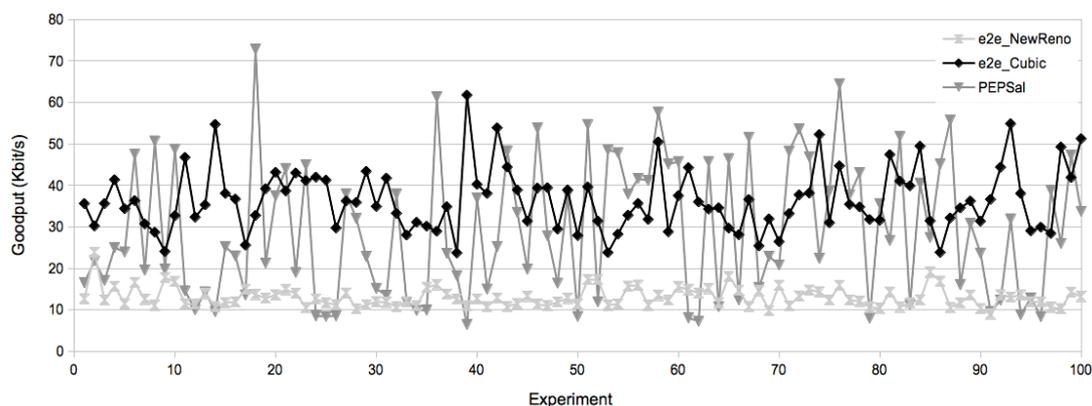


FIGURE 3.9: Campagne de simulations à charge moyenne

- TCP segmenté par PEPsal avec TCP Hybla sur le lien satellitaire et TCP Cubic sur les systèmes terminaux (Cubic/PEPsal)

L'émulateur de lien est configuré de façon à générer un taux de perte paquets de 1%. Le délai total induit par le temps de propagation, les couches d'accès, et la gigue considérant les 3 charges sont émulsés conformément à la table 3.8. Le volume de données à transférer est de 2 Mo et son transfert est effectué à l'aide de notre outil TCPmeter. Chaque expérience est jouée plusieurs fois, environ 100, afin de produire des résultats statistiquement fiables. Les métriques observées sont :

- le débit applicatif moyen (mean goodput) en Kbit/s
- l'écart-type (standard deviation)
- le débit applicatif maximum observé (max goodput) en Kbit/s

La figure 3.9 montre le détail des résultats pour une campagne de simulation à moyenne charge (Load2) et pour chacun des scénarios considérés les résultats sont synthétisés dans la table 3.10 (mean goodput/standard deviation/max goodput).

	Load1	Load 2	Load3
e2e TCP Nreno	13.13 / 2.35 / 24.52	13.06 / 2.36 / 23.83	10.33 / 1.31 / 12.81
e2e TCP Cubic	32.07 / 5.17 / 48.65	36.45 / 7.56 / 61.75	27.39 / 5.83 / 41.05
Cubic & PEPsal	30.51 / 16.68 / 82.54	29.16 / 16.39 / 72.78	17.30 / 9.80 / 40.83

FIGURE 3.10: Performances de TCP - Résultats des expérimentations

Pour les scénarios *Load 1* et *Load 2*, on observe la tendance attendue. L'approche TCP Cubic de bout en bout améliore significativement les performances par rapport à l'approche TCP NewReno de bout en bout. Mais les meilleures performances sont celles observées avec l'approche basée sur PEPsal. Ceci est permis par la relative agressivité de TCP Hybla qui permet d'augmenter plus rapidement la taille de la fenêtre de congestion après une perte. Mais cette approche a aussi ses limites comme le montre les résultats en terme de débit moyen et écart type. Dans le scénario *Load2* (moyenne charge) les écarts-types sont relativement faibles pour les approches de bout en bout. Pour l'approche PEP, même si le débit maximum est plus élevé, l'écart-type est important et finalement le débit moyen plus faible que pour l'approche *e2e Cubic*. Ces différences sont soulignées par la figure 3.9 et mettent en évidence le comportement de TCP Hybla relativement agressif et aussi plus imprévisible. En résumé, plus la charge sur le lien satellite est élevée, plus le gain apporté par l'approche PEPsal est faible. Les approches basées sur des TCP bout en bout montrent des résultats plus déterministes et dans ce cas TCP Cubic offre même de meilleurs résultats que PEPsal dans le scénario chargé *Load3*.

En conclusion, dans cette étude sur le comportement de TCP sur lien satellitaire où nous observons les performances pour des flux *best effort*, les résultats obtenus mettent en évidence le fait que des versions de TCP récentes, en l'occurrence Cubic, améliorent significativement les performances en terme de débit applicatif. Le plus souvent les performances observées avec TCP Cubic de bout en bout sont aussi bonnes, voire meilleures, qu'avec l'approche PEP. La décision d'utiliser une approche ou l'autre se fera en fonction d'un compromis performance/sécurité puisque l'approche PEP est incompatible avec une sécurisation de type IPsec de bout en bout.

3.2 Les communications par satellite dans le contexte aéronautique

3.2.1 Généralités

De part leurs propriétés soulignées en 3.1, les satellites représentent une solution intéressante pour les communications aéronautiques sols bord. Notamment, de part leurs couvertures ils permettent des communications dans les espaces aériens continentaux et océaniques en prenant en compte éventuellement le fait que certaines zones géographiques présentent des densités d'utilisateurs plus élevées. Ces systèmes peuvent améliorer la sécurité des vols et offrir des nouveaux services pour les pilotes, les équipages des compagnies aériennes, et passagers. Ceci est particulièrement important pour les routes océaniques où les avions sont hors de portée des systèmes VHF continentaux et où les liens HF n'offrent que de très faibles performances en terme de capacité. Dans le contexte des communications sol bord aéronautiques par satellite, les stations sols sont appelées GES (Ground Earth Station) et communiquent avec les systèmes embarqués les AES (Aeronautical Earth Station). La figure 3.11 montre la topologie pour ce type de communications.

Pour l'aviation commerciale (CAT, commercial air transport) les communications par satellite sont déjà proposées dans les espaces aériens ORP (Oceanique, Remote, Polar) principalement pour les compagnies et les pilotes, mais aussi pour les passagers. La figure 3.12, proposée par SatCom Direct

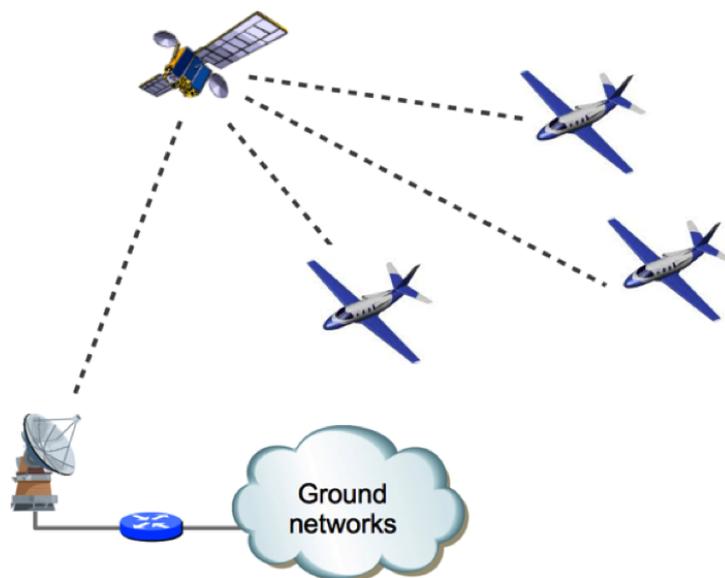


FIGURE 3.11: *Communications aéronautiques par satellite*

(www.satcomdirect.com), donne un panorama sous forme d'une liste non exhaustive des systèmes satellite dédiés aux communications aéronautiques et les applications qu'ils proposent. Comme illustré, certains de ces systèmes sont dédiés à des services passagers (APC) dans le contexte de l'IFE (In Flight Entertainment) :

- Viasat,
- Inmarsat SwiftBroadband et Swift64,
- Astra,
- Hotbird.

D'autres systèmes sont plus particulièrement dédiés aux services pour les compagnies (AOC) et le contrôle aérien (ATSC)

- Inmarsat avec "Classic services",
- Iridium.

Les standards pour les services satellite pour les mobiles aéronautiques ou AMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service) ont été développés par l'OACI et décrits dans les documents officiels sous formes de SARPS (Standards and Recommended Practices). L'AMSS décrit un service dans lequel les stations mobiles sont embarquées dans les aéronefs qui sont alors autant de noeuds du réseau ATN (Aeronautical Telecommunication Network) défini par l'OACI comme le réseau de communication numérique pour la communauté aéronautique. L'AMSS peut fournir des services données ou voix entre les avions et le sol pour les différentes classes d'utilisateurs.

Les systèmes satellite pour les communications critiques (safety) opèrent dans la bande de fréquences dédiée aux mobiles satellite et inclue dans la bande L, compte-tenu principalement de la cou-

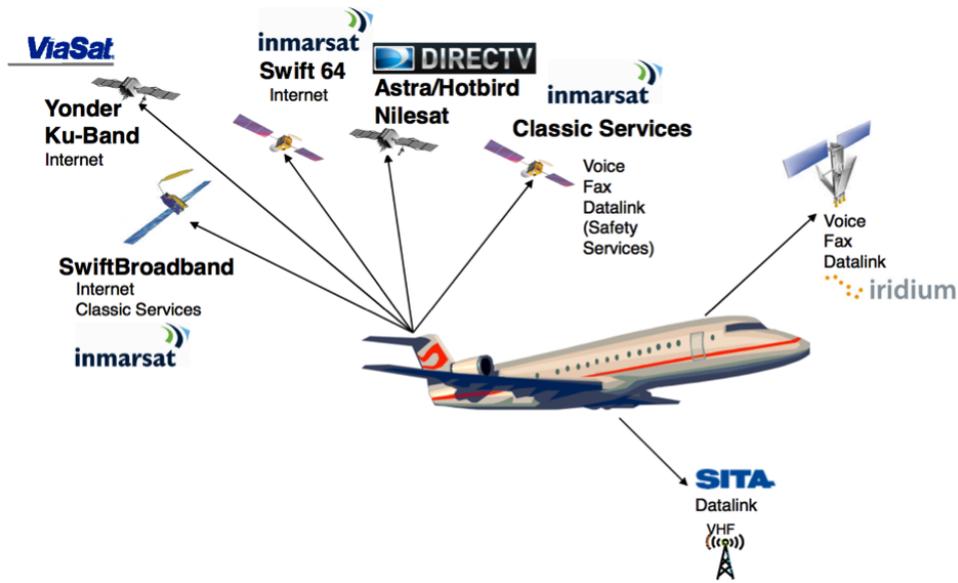


FIGURE 3.12: Communications aéronautiques par satellite

verture globale assurée. L'OACI a identifié cette bande de fréquence pour les services AMSS dédiés à l'ATSC. De plus, l'OACI n'autorise que certains systèmes validés et certifiés, comme Aero-H/H+/I/L d'Inmarsat ou Iridium. Les couvertures et constellations respectives de ces systèmes sont illustrées dans les figures 2.6 et 2.7 de la partie 2.5.2. Inmarsat repose sur quatre satellites géostationnaires couvrant 97% de la surface terrestre. Le système Iridium est basé sur une constellation de 66 satellites en orbite basse (plus 7 de "rechange") pour offrir une couverture terrestre globale.

La bande Ku est à ce jour la bande dominante pour la fourniture de services AMSS basés sur la location de capacités louées à des opérateurs FSS tels que Intelsat ou Eutelsat. Mais les systèmes en bande Ka, tels que Inmarsat 5, représentent des systèmes concurrents sérieux. Ces derniers sont conçus comme des systèmes multifaisceaux offrant de meilleures performances que les systèmes en bande Ku en terme de capacité. Ils peuvent répondre à des attentes relativement récentes des passagers du transport aérien et suscitent donc beaucoup d'intérêt de la part des compagnies aériennes. Ces dernières souhaitent répondre aux demandes des passagers voulant bénéficier par exemple d'un accès à l'Internet pendant les vols pour la navigation web ou le courrier électronique. Les premiers systèmes pour l'accès à l'Internet pendant les vols sont basés sur des liens satellitaires. Certains d'entre eux sont décrits en 2.6.1.

En résumé, dans le contexte des communications aéronautiques sol bord basées sur des liens par satellite deux sous-classes sont considérées. Les systèmes ou solutions opérant en bande L dédiés aux services critiques et réglementaires (ATSC), et les satellites ou solutions opérant en bande Ku ou Ka pour les services non critiques (AAC et APC).

3.2.2 Optimisation d'un réseau d'accès par satellite pour les communications aéronautiques

Dans cette partie, je présente des travaux que nous avons menés dans une thèse que j'ai co-encadrée sur la définition d'une architecture de communication pour un réseau d'accès aéronautique par satellite.

Depuis environ 10 ans les communications pour l'IFE (In-Flight Entertainment) représentent un domaine qui suscite beaucoup d'intérêt de la part des compagnies aériennes notamment pour répondre à la demande des passagers d'accéder aux ressources dont ils disposent généralement au sol (accès Internet mais aussi téléphone mobile).

Dans le même temps, des nouveaux besoins ont été clairement exprimés pour des nouvelles applications reposant sur des communications de données sol bord (data link) en particulier pour le contrôle aérien (ATSC) et certains nouveaux systèmes ont été déployés comme par exemple la VDL mode 2 en espace continental européen.

L'objectif de cette étude consiste en la définition et l'évaluation des performances de l'architecture d'un système de communication sol bord par satellite en bande Ka. L'idée est d'utiliser ce lien pour les différentes sources de trafic citées précédemment : Internet et mobiles des passagers mais aussi les applications communément utilisées pour le contrôle aérien et par les compagnies.

3.2.2.1 Définition du système et gestion de la ressource

Le système repose sur un lien sol bord par satellite géostationnaire en bande Ka basé sur l'architecture DVB-S2/DVB-RCS. La topologie de référence est présentée en figure 3.13. Comme décrit dans la partie 3.1.2, DVB-S2 désigne la deuxième génération d'un standard de transmission de contenu multimédia par satellite de l'ETSI. Il offre une capacité importante compte-tenu des fréquences utilisées et permet les liaisons point à point ainsi que la diffusion. Et DVB-RCS est défini pour proposer un lien retour et offrir ainsi des services interactifs par satellite.

Le système proposé est basé sur la bande Ka afin de pouvoir offrir une capacité plus importante que les systèmes existants qui opèrent en bande L. Un inconvénient est alors la vulnérabilité aux atténuations par exemple à des événements de pluies. Ces atténuations peuvent être compensées par des techniques particulières appelées FMT (Fade Mitigation Techniques). Les techniques FMT reposent sur une évaluation dynamique du bilan de liaison et permettent une modification de la forme d'onde. Le système utilise ainsi la forme d'onde la plus efficace spectralement pour chaque terminal et maximise la capacité globale du système. Par contre, chaque terminal observe une modification de la ressource allouée au fil du temps. Dans le cas des communications aéronautiques, l'atténuation constatée pendant les vols sera certainement très différente compte-tenu de la vitesse de déplacement mais aussi de l'altitude au-dessus des nuages le plus souvent. Par ailleurs, il est important de souligner que la disponibilité requise pour les services considérés est très différente. Les services ATSC/AOC doivent être assurés pendant toute la durée d'un vol, alors que les services passagers peuvent être limités à certaines phases ou conditions.

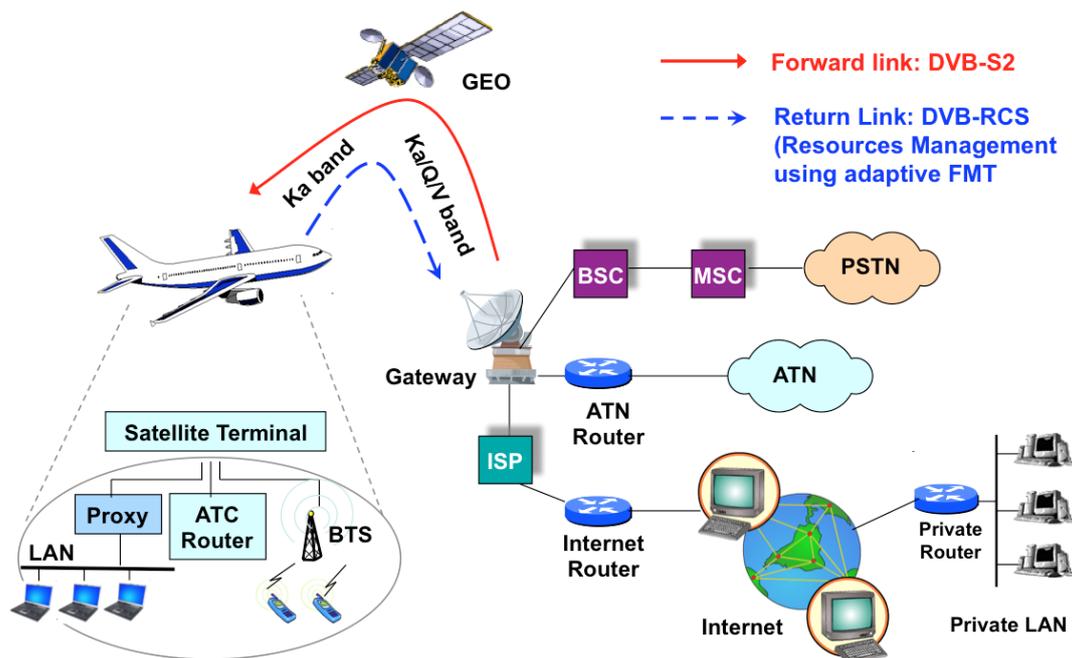


FIGURE 3.13: Topologie de référence

Pour tenir compte de ces propriétés, le système utilisera donc des techniques FMT assurant la meilleure utilisation des ressources.

Certains aspects, tels que la définition des paramètres FMT, ont fait l'objet de travaux menés à l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace) qui était aussi impliqué dans cette thèse. Notamment, le choix a été fait d'utiliser une approche ACM (Adaptive Coding and Modulation) sur la voie retour. Cette approche consiste à utiliser des techniques de codages différentes sur chaque porteuse afin de palier les atténuations dues aux conditions de propagation. La figure 3.14 montre la structure retenue pour les supertrames du MF-TDMA sur la voie retour. Dans la norme DVB-RCS, quatre types de bursts sont définis :

- **CSC** (Common Signalling Channel) : permet aux STs (terminaux satellite) de s'identifier auprès du centre de contrôle pendant la phase de Logon (premier accès au réseau).
- **ACQ** (ACQuisition) : permet la synchronisation de la couche physique (correction de la fréquence de l'émetteur) et la procédure de ranging (mesure fine de la distance mobile – satellite - station terrienne).
- **SYNC** (SYNChronization) : permet de maintenir la synchronisation de la couche d'accès et d'envoyer les informations de contrôle. Le burst SYNC peut être utilisé en mode « contention ».
- **TRF** (TRAFfic) : est utilisé pour transporter les données du ST au NCC (centre de contrôle). Les bursts de trafic sont basés soit sur des cellules ATM (Asynchronous transfer mode), soit sur des paquets MPEG2-TS (Moving Picture Experts Group 2 - Transport Stream). Nous avons retenu

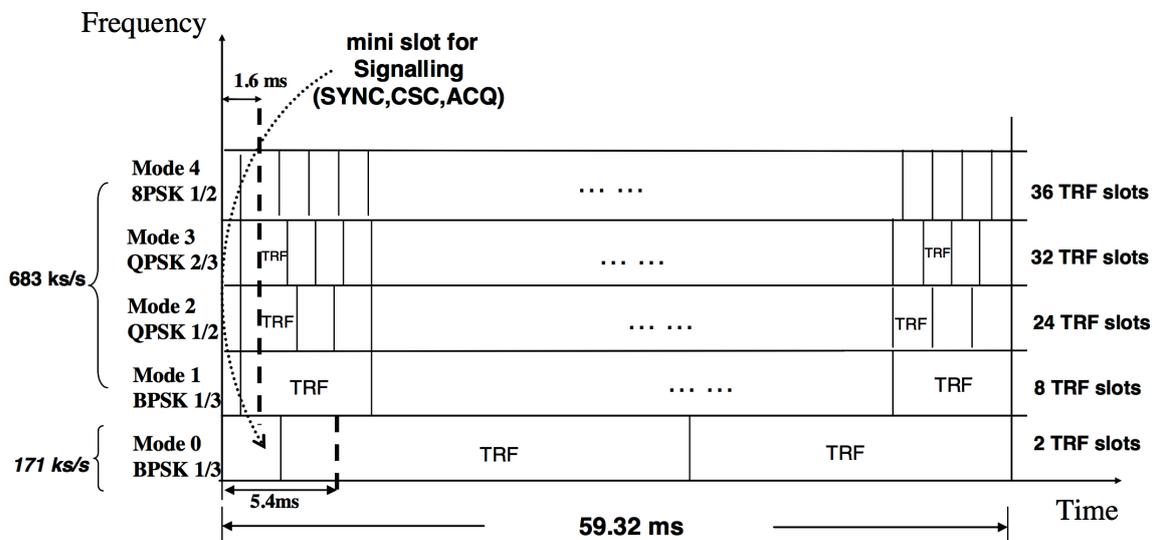


FIGURE 3.14: DVB-RCS - Structure de la supertrame

dans cette étude les trames MPEG2-TS.

Nous utilisons 5 modes FMT pour adapter le système aux différentes conditions de propagation : mode 1, 2, 3, 4 sont choisis avec un débit symbole constant, les différentes modulations et codages permettent une mise en œuvre de l'ACM. L'utilisation du débit symbole constant signifie que la bande passante d'une porteuse est constante. Dans ce cas, la gestion des modes est relativement simple : le mode d'une porteuse peut être modifié sans aucun changement du plan de fréquences (le DVB-RCS fournit la signalisation adéquate pour la reconfiguration du plan de fréquences). Mode 0 est le mode de secours qui utilise une forme d'onde plus robuste (BPSK 1/3) avec un débit symbole réduit. L'idée de ce mode est d'assurer une grande disponibilité pour les services ATSC en cas de conditions de très fortes atténuations. On peut noter que le débit offert en mode 0 est du même ordre de grandeur que celui d'un système continental tel que la VDL mode 2.

3.2.2.2 Architecture de l'équipement bord

Le terminal a été pensé de façon à gérer les différents types de flux considérés ainsi que l'accès au lien DVB-RCS et le partage de la ressource. Le challenge est de multiplexer sur un lien unique des flux très hétérogènes en termes de propriétés et de QoS (Quality of Service) requises. Considérant les segmentations des SNDUs (Subnetwork Data Unit) pour l'encapsulation dans les trames MPEG2, deux solutions existent : MPE (Multi Protocol Encapsulation) et plus récemment ULE (Unidirectional Lightweight Encapsulation) proposé par l'IETF [32]. Nous avons retenu ULE dont la supériorité à MPE a été démontrée en terme d'efficacité compte-tenu principalement de la proportion d'en-tête générée [33].

Le processus d'allocation des ressources du DVB-RCS est partagé entre les systèmes terminaux

des utilisateurs et le NCC. L'équipement bord émet des requêtes de capacité en fonction du trafic entrant et devant être envoyé sur le lien satellite. Les requêtes de capacité sont reçues par le NCC et traitées par le processus DAMA (Demand Assignment Multiple Access). Deux alternatives peuvent être considérées :

- **algorithme centralisée**, avec ce mécanisme, chaque classe de requête de capacité (il en existe 4 correspondants à 4 niveaux de priorité différents) est identifiée par un identifiant de canal *Channel_id*. Le DAMA contrôleur gère l'allocation de créneaux TRF pour chaque canal et envoie le résultat sous forme tabulée avec la TBTP (Time Burst Time Plan). En conséquence, chaque TRF alloué correspond à un terminal et un canal (classe d'allocation) spécifiés.
- **Algorithme distribué**, dans ce cas, sur la base des requêtes de capacité de chaque terminal, le contrôleur DAMA détermine une capacité globale allouée pour tous les canaux. La ressource allouée au ST est donc une capacité globale commune à tous les services. Cette capacité non différenciée peut être attribuée aux différents types de flux de manière souple en fonction de la politique de service prédéfinie et des objectifs de Qualité de Service.

Dans notre étude, l'approche retenue est la deuxième qui par sa flexibilité permet une meilleure prise en compte de qualité de services requise par chaque flux.

Concernant l'architecture du terminal embarqué, deux approches sont envisagées. La première est conforme au modèle OSI avec une séparation stricte entre chaque couche protocolaire. Ainsi les couches dites "satellite dependent" et "satellite independent" peuvent être définies comme dans [34]. La deuxième approche est basée sur la mise en oeuvre de flux de signalisation entre couches ou *cross-layer*.

Premièrement, nous pouvons considérer que chaque type de sources (ATC, GSM, ou IFE) nourrit une couche particulière pour le processus d'encapsulation. Comme le montre la figure 3.15, ceci implique que la gestion de la QoS et de la capacité soit assurée dans les couches d'accès DVB-RCS afin de multiplexer les différents flux de données sur un lien DVB unique.

Concernant la première architecture que nous pourrions qualifier de "classique" le terminal reçoit les données sur cinq points d'accès aux services (SAP, Service Access Point) différents. Le premier est utilisé par le trafic ATSC et le deuxième par le trafic GSM. Enfin, les trois autres sont dédiés au trafic de données IP. Nous faisons l'hypothèse que ce trafic est classifié au niveau du routeur IP suivant une politique de service Diffserv (3 QoS : EF, AF, et BE). Pour chaque datagramme, le SAP est déterminé suivant son label DSCP (DiffServ Code Point) conformément à [30]. Puis les paquets de données du trafic entrant sont segmentés en paquets MPEG avec MPE et insérés dans les files en fonction de leur niveau de priorité. Le terminal satellite détermine la capacité requise sur la base du taux de remplissage des files et enfin les requêtes de capacité sont générées conformément aux formats de la signalisation DVB-RCS, en volume ou en capacité. La gestion de la ressource dans la gateway sol est adaptée pour pouvoir prendre en compte les différents services. L'allocation des créneaux (slots) du MF-TDMA est faite sur la base des trois modes suivants : CRA (Constant Rate Allocation) avec une allocation fixe de créneaux disponibles en permanence pour terminal ; RBDC (Rate Based Dynamic Capacity) et VBDC (Volume Based Dynamic Capacity) qui sont alloués dynamiquement en fonction des requêtes reçues. Le processus d'allocation utilise un algorithme DAMA standard : allocation des créneaux CRA, puis traitement des requêtes RBDC,

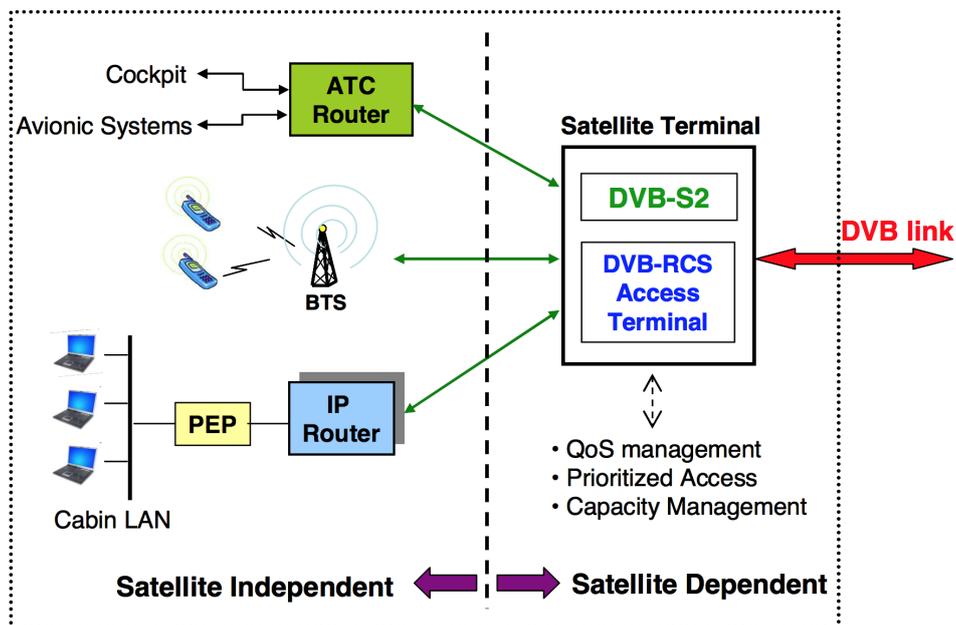


FIGURE 3.15: Architecture système - Approche classique

et enfin des requêtes VBDC. L'allocation résultante est envoyée aux terminaux avec la TBTP (Time burst Time Plan). Il est important de souligner la durée importante de la boucle de signalisation : 500 ms sont nécessaires entre l'émission de la requête de capacité et la TBTP correspondante. Aussi, un serveur permettant de stocker temporairement les données en attente d'émission est nécessaire à bord afin de pouvoir les émettre ensuite suivant une politique orientée priorité. Une "super-priorité" est affectée à la file ATSC et les autres files sont gérées conformément à une politique de service WRR (Weighted Round Robin). Ceci signifie que les flux ATSC peuvent "préempter" la capacité par rapport aux autres flux pour maximiser la disponibilité des ressources.

Dans une deuxième approche nous considérons que, comme pour les sources IP, pour les sources ATSC et GSM les flux entrants passent par un routeur en amont du terminal satellite embarqué. La figure 3.16 illustre cette approche que nous qualifions de *All-IP*. Bien sûr, cela repose sur les hypothèses que les flux ATSC et GSM sont utilisables sur de l'IP tel que cela est expliqué dans [35] et [36].

De plus, comme on peut le voir dans la figure 3.17 la gestion de la qualité de service peut alors être gérée au niveau IP. Elle est pilotée par un mécanisme "cross-layer" avec les couches d'accès DVB-RCS. Autrement dit, la gestion de la capacité au niveau du terminal satellite est basée sur les informations IP qui classifient les flux avec une politique *DiffServ*.

Enfin, concernant les sources de trafic, nous avons fait l'hypothèse que les objectifs de performance pour les services passagers et aéronautiques sont traités séparément. Des coupures courtes, de l'ordre d'une supertrame (100 ms), ne sont pas préjudiciables pour les flux passagers d'accès à Internet même si certains services nécessitent de bonnes performances en termes de délai et de gigue. Par contre, les

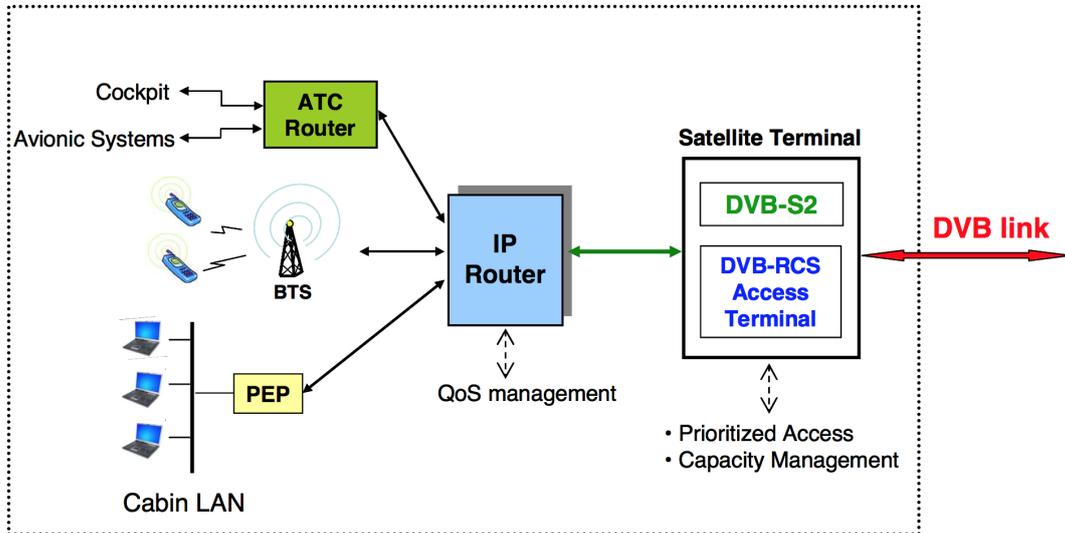


FIGURE 3.16: Architecture système - Approche All-IP

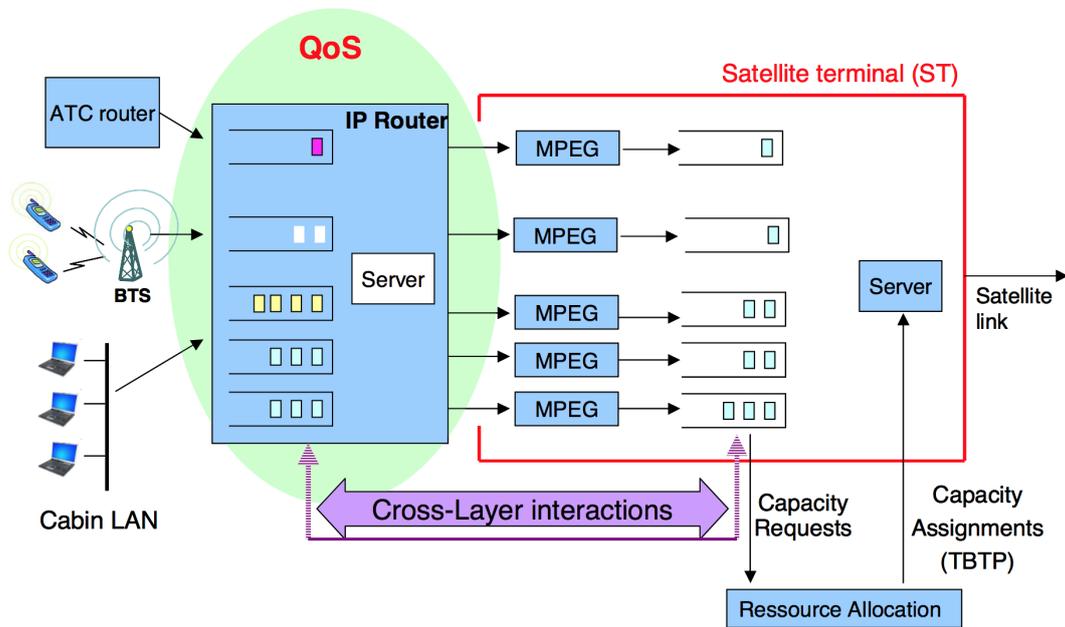


FIGURE 3.17: Architecture système - Approche All-IP, vue détaillée

services aéronautiques doivent être assurés avec les conditions précisées par les documents officiels tels que [4]. Ces performances sont explicitées en terme de délai comme le TD₉₅ ("Transaction Delay" observé pour 95% des paquets émis), de disponibilité, et d'intégrité. La priorité doit être mise sur la disponibilité puisque les délais requis sont eux relativement souples (de l'ordre de 10s). Ainsi le lien d'accès entre l'avion et le sol doit prendre en compte des flux hétérogènes non seulement en terme de propriétés mais aussi en terme qualités de service requises.

Concernant les flux de données dits critiques (ATSC/AOC), les deux principales applications sont CPDLC et ADS présentées en 3.2. Pour la caractérisation de ces flux, nous retenons les hypothèses proposées par Eurocontrol pour leur simulateur ACTS [37] :

- taille des paquets : 32 à 265 octets
- temps d'interarrivée : 35,46 secondes (1,56 messages/minutes)

Et pour la QoS requise, le document COCR [4] donne les valeurs suivantes :

- TD₉₅ : 3,8 secondes
- Intégrité : 5.0E-6
- Disponibilité : 0.9965

Rappelons que le TD₉₅ est défini comme le délai de bout en bout observé pour 95% des messages. L'intégrité représente le taux attendu de transactions effectuées sans erreur. Et enfin, la disponibilité représente la probabilité que le système de communication entre les deux parties soit en service lorsqu'il est sollicité.

Pour la téléphonie mobile des passagers, nous supposons qu'un point d'accès est proposé à bord. Le principal défi réside dans la définition des formats des données (encapsulation pour la transmission sur le lien DVB) et de la politique de service. Nous considérons que l'interface entre un avion et la station de contrôle correspond avec l'interface *Abis* dans la topologie des réseaux GSM. Cette interface est située entre les stations dites BTS (Base Transceiver Station) et BSC (Base Station Controller). La faisabilité de cette topologie par satellite a été démontrée à travers des solutions existantes et déployées (Gilat ou Cisco par exemple). L'avantage principal est que les flux de voix sont compressés entre ces deux interfaces et n'utilisent qu'une capacité de 16 kbit/s contre 64 kbit/s à l'interface A. L'interface *Abis* est définie avec un multiplex standard de type E1. Dans notre cas, les données doivent être encapsulées dans des trames MPEG. L'idée est de récupérer les trames TRAU (Transcoder/Rate Adapter Unit) à la sortie du lien. Une signalisation particulière est nécessaire pour la resynchronisation au niveau de la réception. Les hypothèses concernant les paramètres permettant de caractériser les flux voix sont les suivantes :

- Durée moyenne de la période active : 3 min
- Durée moyenne de la période inactive : 30 min
- Durée moyenne *On* pendant un appel [38] : 352 ms avec 1 trame TRAU chaque 20 ms (16 kbit/s)
- Durée moyenne *Off* pendant un appel [38] : 650 ms avec une trame TRAU chaque 480 ms

Et la QoS requise est celle définie par l'ITU-T [39]

- Temps limite pour la transmission : 150 à 400 ms

Service application	Application frequency	Mean holding time	Data rate return link (kbit/s)	Data rate forward link (kbit/s)	Burtiness
eMail	5/h	0.25 s	16	16	1.0
File transfer	5/h	4 s	144	144	20
WWW	2/h	30 min	16	144	20

FIGURE 3.18: Propriétés du trafic IFE

Application	E2E one way delay	Information loss
eMail	<4 s	0
File transfer	<10 s	0
WWW	<4 s/page	0

FIGURE 3.19: QoS requise pour le trafic IFE

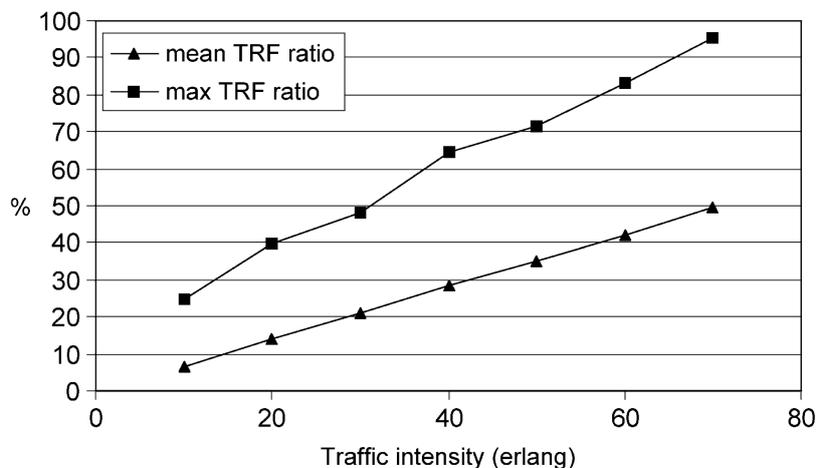
- Gigue temporelle : < 1 ms
- Taux de pertes de trames (FER, Frame Erasure Rate) : < 3%

Et enfin, concernant les flux passagers générés par les accès à l'Internet, les propriétés du trafic de données et la QoS requise sont celles proposées dans le projet "Wireless Cabin Project" du DLR (centre aérospatial allemand) et récapituler dans les figures 3.18 et 3.19.

3.2.2.3 Résultats des simulations et analyse

Un modèle de simulation spécifique a été développé pour le dimensionnement du système dédié à la téléphonie mobile. La procédure d'encapsulation à l'interface *Abis* précédemment décrite implique que le lien DVB-RCS puisse fournir une capacité variable relativement importante pour supporter les appels entrants. La figure 3.20 montre les résultats. Le format de trame considéré inclus 36 créneaux TRF (FMT mode 4). Une charge de trafic moyenne de 50 Erlang utilise une moyenne de 35% de la capacité (maximum 70%).

Un modèle de simulation a aussi été spécifiquement développé pour évaluer les performances globales du système et surtout vérifier que les solutions retenues permettent de garantir les QoS requises par les différents types de flux. Ce modèle, développé avec le logiciel Opnet de la société Riverbed, est illustré dans la figure 3.21. Il inclut 50 terminaux et une station sol de contrôle correspondants à la charge de trafic attendue dans un faisceau satellite. Quatre sources de trafic correspondantes à chaque niveau de priorité sont activées sur chaque terminal. Les flux ATSC sont composés de paquets dont la taille est uniformément distribuée de 32 à 265 octets avec un temps d'interarrivée moyen de 38,46 secondes. Le trafic global généré par les accès Internet des passagers est trié suivant une politique *DiffServ* pour 3 types de trafic (EF, AF, et BE). Le trafic EF représente celui généré par un codec pour la voix sur IP

FIGURE 3.20: *Traffic GSM - Occupation des trames*

(VoIP) de type G.729. Le trafic AF représente un service à débit variable avec contraintes temporelles (rt-VBR, real-time Variable Bit Rate). Et enfin, le trafic BE est modélisé par un trafic de masse avec des paquets dont la taille et les temps d'interarrivée suivent une loi exponentielle décroissante. Ainsi, chaque avion est vu comme un réseau local générant un ensemble de flux agrégés. On peut noter qu'à ce stade le trafic généré par la téléphonie mobile n'est pas présent.

Au cours des simulations, les files d'attente présentes au niveau du terminal satellite bord sont sondées pour vérifier le fonctionnement de la politique de service orienté priorité. Les fonctions de densité de probabilités cumulées relatives au temps passé par les paquets en file d'attente sont présentées dans le figure 3.22. On note que les délais mesurés sont conformes avec ceux attendus. Les paquets des flux de priorité 0 (trafic EF) sont ceux qui montrent les temps de services minimum et sont émis dans un maximum de 2 supertrames (soit environ 200 ms). Pour les paquets des flux de priorité 1 et 2 les délais sont plus étalés. Et les paquets des flux ATSC obtiennent le meilleur service.

Il est aussi intéressant d'observer le comportement des protocoles de plus haut niveau. En particulier, l'évolution d'une connexion TCP a été observée pour un terminal. Le résultat obtenu est présenté en figure 3.23 et montre (de bas en haut) le délai de transmission, l'évolution de la fenêtre de congestion en octets pendant la durée d'observation, les RTT (Round Trip Time) mesurés. Comme il s'agit d'un flux classifié en BE (Best Effort), le RTT peut varier rapidement d'une supertrame à une autre en fonction notamment de l'évolution de la charge globale et du processus DAMA. Plusieurs expirations du timer de retransmission (RTO, Retransmission Time-Out) sont enregistrées. L'utilisation d'une version plus évoluée de TCP devrait permettre d'améliorer ce dernier point.

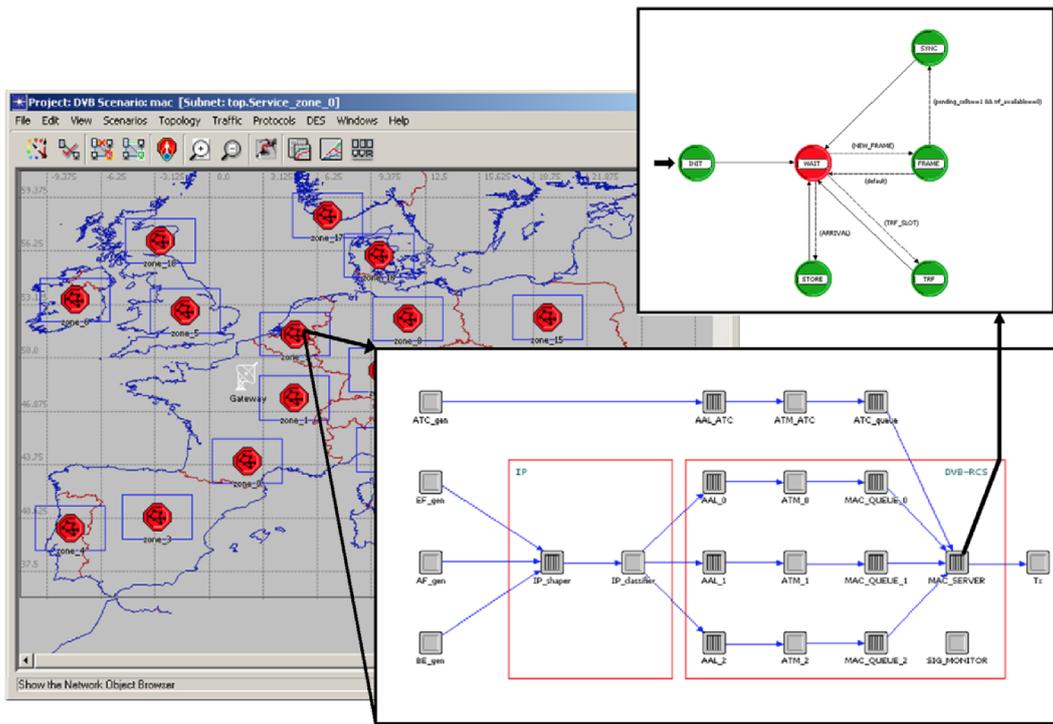


FIGURE 3.21: Modèle de simulation Opnet

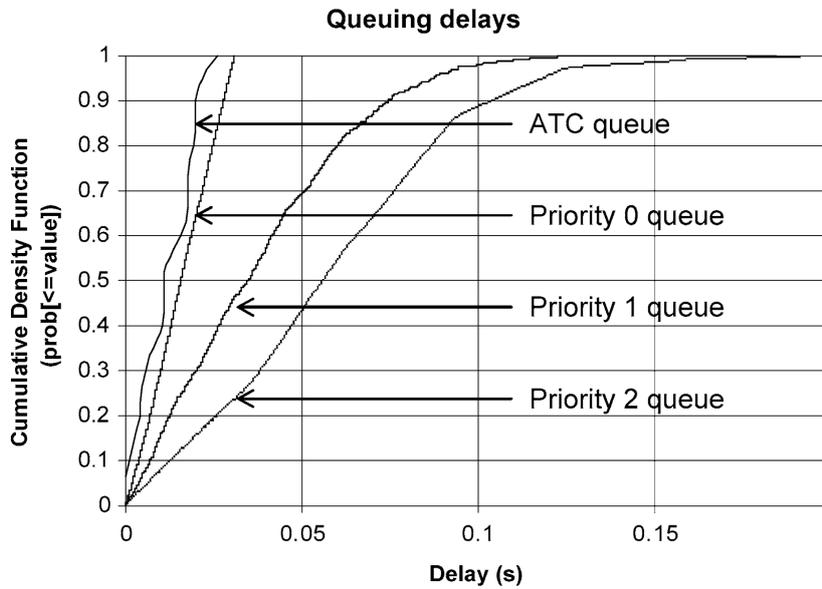


FIGURE 3.22: Terminal satellite - Délais files d'attente

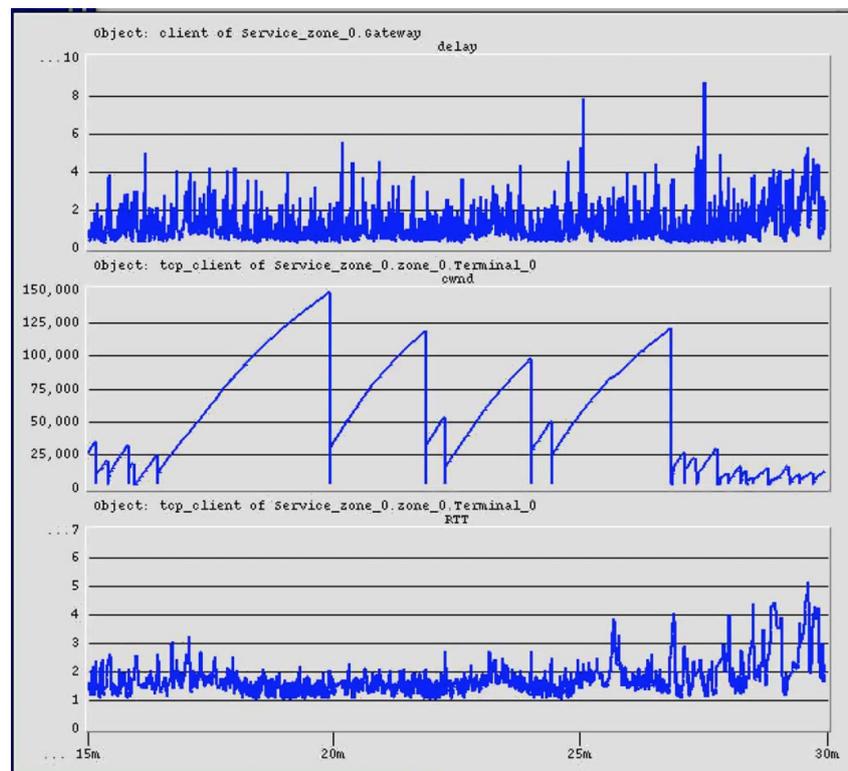


FIGURE 3.23: Connexion TCP Reno (RTT, fenêtre de congestion, délais)

3.2.3 Dimensionnement des ressources pour les communications aéronautiques par satellite en espace océanique

Comme expliqué précédemment dans le contexte aéronautique actuel de nouveaux services basés sur les communications sol bord sont attendus par les passagers des vols commerciaux. Par exemple, les compagnies souhaitent proposer des accès à l'Internet pour permettre à leurs passagers de naviguer sur le Web, d'envoyer et recevoir des courriers électroniques, ou encore d'accéder aux réseaux privés de leur entreprise ou société. Ces services nécessitent des liens relativement haut débit. L'étude que je présente dans cette partie propose une méthode originale pour les dimensionnements de capacités satellites multifaisceau en bande Ka en zone océanique. La zone étudiée est en l'occurrence le corridor atlantique nord entre l'Europe et le Etats-unis. Deux configurations multifaisceaux sont envisagées et comparées. La première correspond à celle du satellite Inmarsat-5 F2 et la seconde correspond à un satellite hypothétique et positionné de façon à mieux couvrir spécifiquement la zone géographique considérée. La connaissance précise de la distribution des utilisateurs dans la zone de service est un point particulièrement important dans le dimensionnement des ressources des satellites multifaisceaux, particulièrement pour des utilisateurs mobiles. Aussi les trajectoires des avions sont estimées relativement à des points de reports fournis pendant les vols océaniques plutôt qu'en les considérant comme les grands arcs de cercles entre les aéroports de départ et d'arrivée comme le font la plupart des études. Afin d'estimer les volumes de données générés par les passagers des avions dans chaque faisceau, principalement sur le lien retour, un modèle de simulation a spécifiquement été développé. Il repose sur des réseaux sans fils de type Wifi déployés en cabine pour les passagers et fonctionnant avec la pile protocolaire TCP/IP.

3.2.3.1 Système et simulations

Les deux configurations satellites considérées sont les suivantes. La première correspond au satellite Inmarsat-5 F2 qui fournit 89 faisceaux avec ces paramètres [40] :

- Position : 55° ouest
- Angle d'ouverture antenne : $1,7^\circ$

La deuxième configuration correspond à un satellite hypothétique que nous avons imaginé et plus spécifiquement dédié à la couverture de la zone océanique considérée :

- Position : 18° ouest
- Angle d'ouverture antenne : $0,6^\circ$

Les projections résultantes des faisceaux sur la surface terrestre sont présentées en figure 3.24.

L'espace aérien nord océanique s'étend dans une zone de 10° nord au pôle nord et de 60° à 10° ouest. Il est divisé en 5 zones régulées par les services du contrôle aérien : Reykjavik, Shanwick, Gander, New York, et Santa Maria. Comme souligné dans [41], cet espace aérien est la zone océanique la plus chargée en trafic aérien dans le monde avec environ 450 000 vols en 2011. Compte-tenu de cette densité d'avions et de l'absence de couverture radar dans cette zone, le contrôle aérien impose des règles de séparation strictes en assignant des routes prédéfinies pour les vols. De plus, chaque avion doit reporter

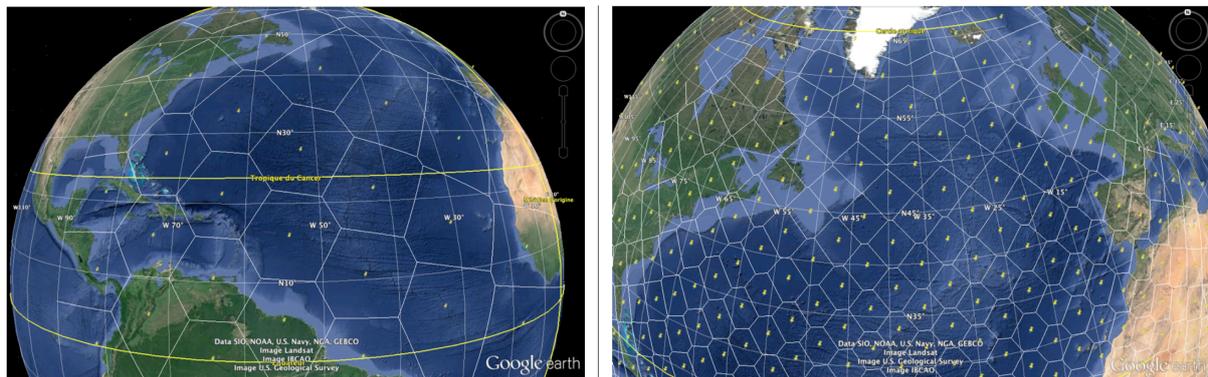


FIGURE 3.24: Couvertures satellites multifaisceaux

périodiquement sa position (environ chaque heure) au centre dont il dépend. La plupart de ce trafic aérien est organisé en deux flux majeurs : un flux ouest partant de l'Europe le matin et un flux est partant des Etats-Unis le soir (temps UTC). Le premier flux traverse la longitude 18° W entre 11h30 et 19h00 (UTC) et le second entre 01h00 et 08h00 (UTC). Ce système de routes organisées (OTS, Organised Track System) est le résultat d'une volonté de répondre aux attentes des passagers et de contribuer à la réduction du bruit autour des aéroports en prenant compte les horaires locaux. De plus, cela permet une séparation de deux flux majeurs à deux périodes différentes de la journée. L'ensemble des routes utilisables pour les vols océanique nord (NAT, North Atlantic Tracks) est publié quotidiennement par les centres de contrôle aériens (Shanwick et Gander). Il est en fonction des conditions météo et des vents de haute altitude (jetstream) ainsi que de certaines règles ATC. Par exemple, les séparations minimales entre les avions volant entre les niveaux de vol FL 285 (28500 pieds) et 420 (42000 pieds) sont :

- 50 NM en séparation latérale
- 5 à 10 minutes pour la séparation longitudinale
- 1000 pieds pour la séparation verticale

Les objectifs visent à maximiser le nombre de vols tout en réduisant leur durée et donc la consommation en carburant. La figure 3.25 présente un exemple des routes définies pour une journée avec leurs waypoints (points de passage).

Dans cette étude nous avons utilisé des données d'Eurocontrol disponibles sur le site web OneSky. Nous avons retenu les données pour certaines journées types puis elles ont été filtrées pour ne conserver que les vols de l'espace aérien considéré. Les données récupérées sur le site OneSky sont des positions radar ou issues de rapport périodiques fournis durant les vols environ une fois par heure. Afin d'obtenir une granularité plus fine nécessaire à notre étude de dimensionnement, nous avons choisi d'ajouter des points par une méthode d'interpolation simple entre les points connus basée sur les grands arcs de cercle. La vitesse des avions est supposée constante entre les positions connues, ce qui est conforme avec les règles du trafic aérien. Cette approche est différente de celle généralement retenue dans ce type d'étude qui consiste généralement à supposer que la trajectoire d'un avion suit le grand arc de



FIGURE 3.25: Routes aériennes transocéaniques



FIGURE 3.26: Estimation des trajectoires

cercle entre l'aéroport de départ et l'aéroport d'arrivée comme dans [42] ou [43]. La figure 3.26 montre, pour un vol entre Paris et New York, la trajectoire supposée avec notre méthode (en rouge) et celle basée uniquement sur le grand arc de cercle (en vert) entre les aéroports de départ et d'arrivée. Compte-tenu de la taille des faisceaux des satellites, nous pouvons voir l'avantage de la première approche qui permet de d'éviter des biais très importants dans l'étude statistique.

Afin de ne traiter que les vols qui intéressent cette étude, nous avons donc dû filtrer plusieurs fois les données récupérées. Un premier filtrage sur le type d'avion a permis de ne sélectionner que les avions pouvant embarquer une antenne et un terminal satellite (principalement avec une liste des gros porteurs types des principales compagnies aériennes). Puis un deuxième filtrage, basé sur les avions traversant

	Total Flight	Flight after filter	PIAC
June 29 2012	32680	1346	482
October 10 2012	30323	1224	444
January 1 2013	15324	900	325

FIGURE 3.27: Statistiques sur le nombres de vols

la longitude 10° W puisque les données pour une journée fournissent tous les vols mondiaux. Ensuite le calcul d'interpolation entre les points de report a pu être effectué.

La table présentée en figure 3.27 présente à titre indicatif les résultats pour les 3 journées de 2012 étudiées (la journée la plus chargée de 2012, la moins chargée, et enfin une moyennement chargée). Pour chacune des trois journées considérées, la première colonne donne le nombre de vols enregistrés par Eurocontrol, la deuxième colonne donne le nombre de vols après les filtrages précédemment décrits, et la troisième colonne donne le PIAC (Peak Instantaneous Aircraft Count) ou le nombre maximum d'avions simultanément en vols observé.

Concernant la deuxième étape de l'étude consacrée au dimensionnement, nous avons modélisé le système avec le logiciel Opnet (Riverbed). La topologie considérée est présentée en figure 3.28. Plusieurs avions traversant le couloir nord atlantique sont modélisés. Les avions d'une simulation donnée sont supposés être dans le même faisceau satellite. Et chaque avion est supposé transporter au moins 100 passagers utilisateurs d'un équipement (PC ou tablette par exemple) leur permettant d'accéder aux ressources d'Internet. Le modèle de simulation est composé de plusieurs éléments :

- plusieurs avions avec les utilisateurs, un routeur embarqué fournissant l'accès Wifi aux passagers, et un terminal satellite
- et un réseau sol avec un terminal satellite sol, et un routeur sol permettant de joindre les serveurs répondant aux requêtes des passagers.

La figure 3.29 montre le plan d'une partie de la cabine d'un avion de type Boeing 777 avec les utilisateurs mais aussi le routeur et le terminal satellite embarqués. Sur la base des applications proposées dans la librairie Opnet, deux ensembles profils d'utilisateurs ont été envisagés pour les passagers. "Classical users" définit un profil utilisant la navigation Web et le courrier électronique léger. "Advanced users" définit un profil générant plus de débit avec encore de la navigation Web, mais du courrier électronique avec des documents joints potentiellement volumineux, et de plus de la voix sur IP (VoIP encodage G.729 A).

3.2.3.2 Dimensionnement des ressources en espace océanique

Pour les deux configurations satellites considérées, nous avons évalué les nombres maximum, minimum, et moyen d'avions par faisceau durant chacune des journées retenues. Puis sur la base de ces premiers résultats le trafic cumulé généré par les passagers a été estimé par simulation à l'aide des modèles décrits dans la section précédente. Les débit cumulés sont observés en quatre points du système

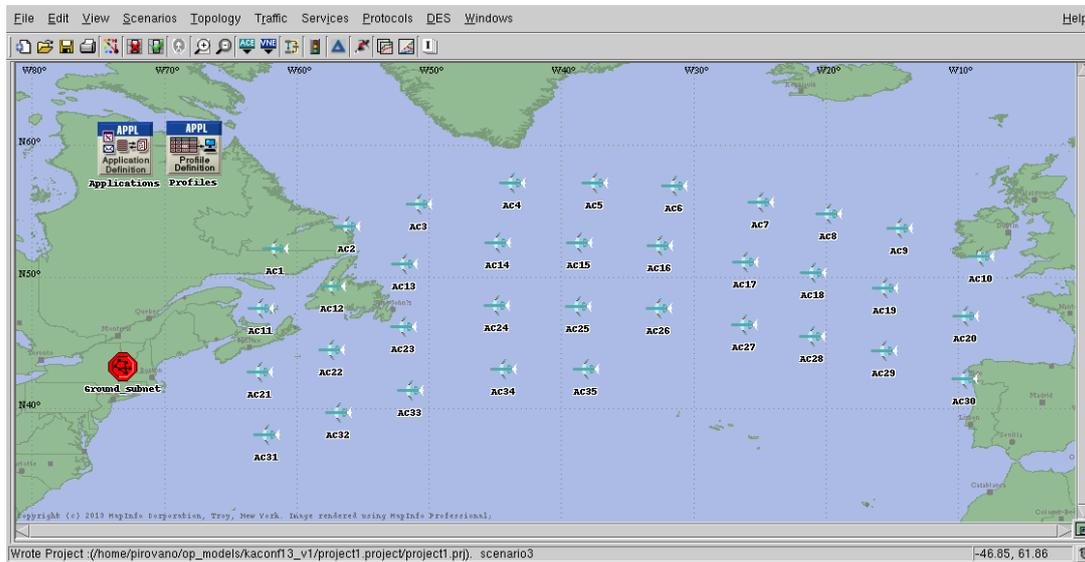


FIGURE 3.28: *Modèle topologie générale*

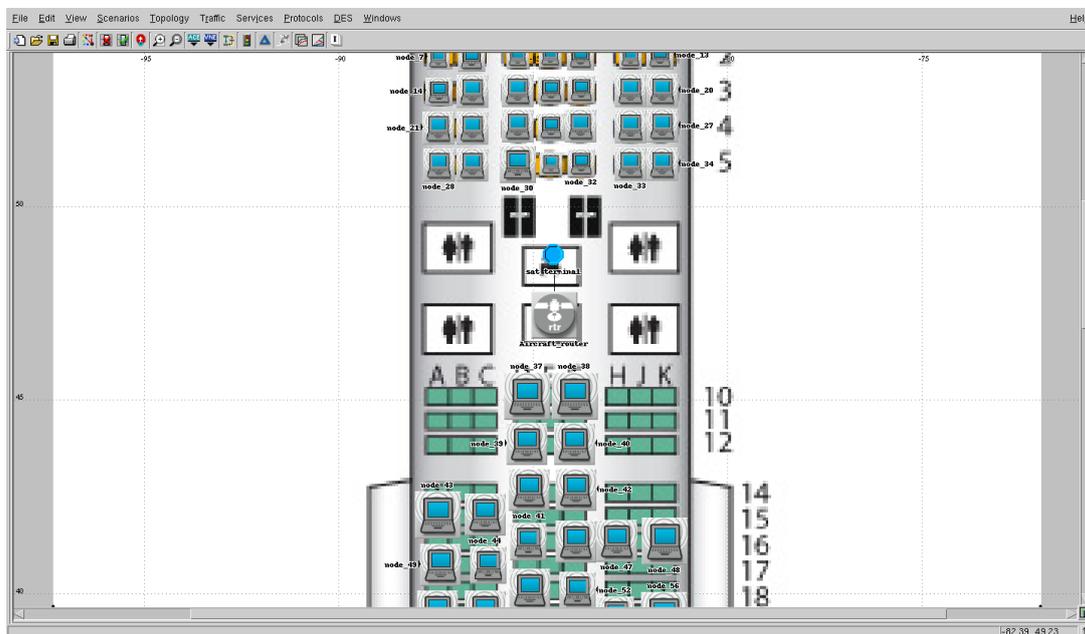


FIGURE 3.29: *Modèle réseau cabine*

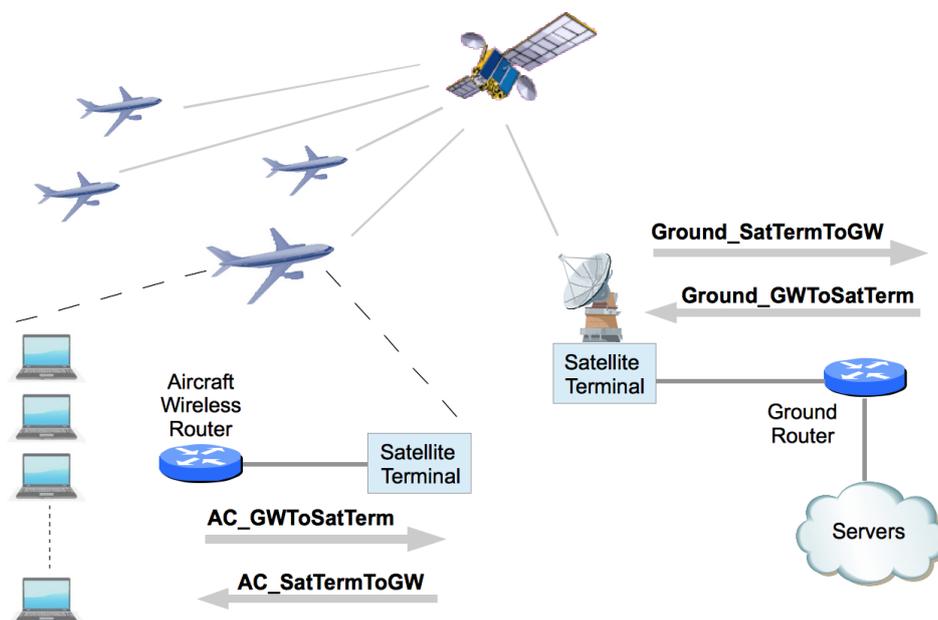


FIGURE 3.30: Topologie - points de mesure des débits cumulés

comme indiqué dans la figure 3.30 :

- *AC_GWToSatTerm* : le débit cumulé généré par l'ensemble des requêtes émises depuis un avion
- *AC_SatTermToGW* : le débit cumulé généré par l'ensemble des réponses émises depuis les serveurs sol vers un avion
- *Ground_SatTermToGW* : le débit cumulé généré par l'ensemble des avions d'un faisceau vers le sol
- *Ground_GWToSatTerm* : le débit cumulé généré par l'ensemble des réponses émises depuis les serveurs sol vers les avions d'un faisceau

Afin d'estimer les ressources satellite nécessaires, nous devons d'abord calculer le nombre d'avions présents dans chaque faisceau à chaque instant. Les résultats de ces mesures, basées sur le croisement entre les configurations multifaisceaux et les trajectoires des avions, sont illustrés dans la figure 3.31 à titre d'exemple pour la configuration Inmarsat-5 et la journée du 29 juin 2012 qui était la plus chargée de l'année. Pour plus de lisibilité, cette figure ne donne les résultats que pour les quatre faisceaux les plus chargés. On peut noter que ces traces mettent clairement en évidence les deux flux de trafic aérien de la journée précédemment décrits. De l'ouest vers l'est, les faisceaux successifs sont numérotés 3, 10, et 17, le numéro 7 se trouve au nord de 3 et 10.

La table présentée en figure 3.32 montre l'occupation des faisceaux les plus chargés pour les deux configurations satellites retenues durant la journée la plus chargée de 2012 (le 29 juin). On peut y lire que le maximum d'avions observés simultanément dans un faisceau est de 160 dans la configuration Inmarsat-5 F2 et 45 pour le satellite hypothétique. Compte-tenu de la différence de taille des faisceaux

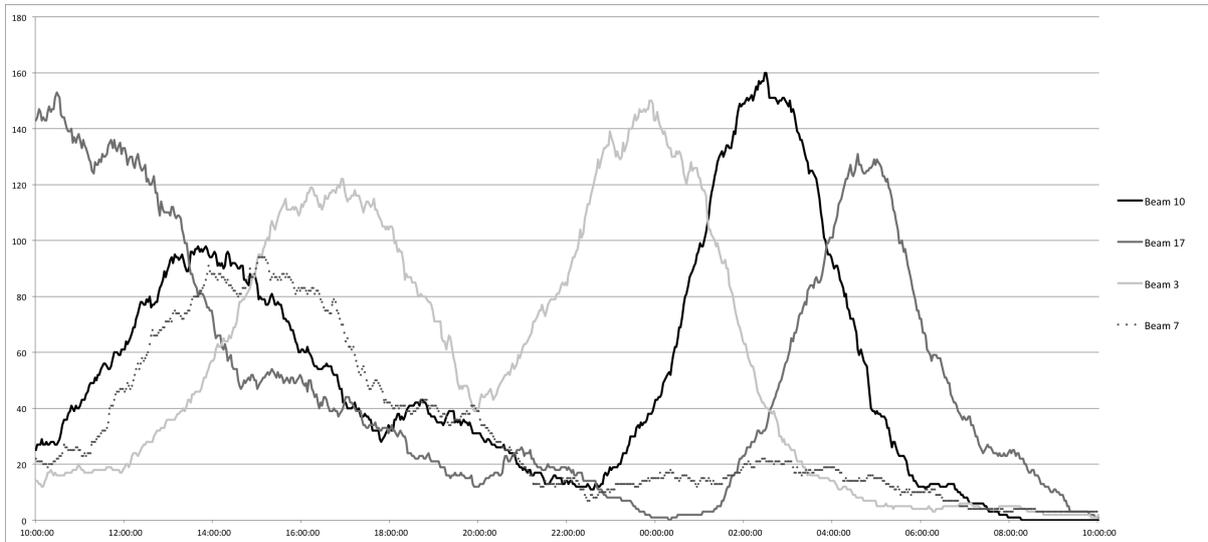


FIGURE 3.31: Inmarsat-5 F2 - Nombre d'avions par faisceaux

Beam	2012 June 29	
	Average	Max
3	46.44	150
7	23.48	94
10	43.75	160
17	42.81	153

Beam aircraft occupation,
INMARSAT-5

Beam	2012 June 29	
	Average	Max
152	8.30	36
28	8.05	45
35	7.86	39
22	7.72	40
43	7.17	29
134	6.79	37
69	6.66	31
116	5.97	28
29	5.72	24
143	5.44	29

Beam aircraft occupation,
hypothetical satellite

FIGURE 3.32: Occupation moyenne et maximum des faisceaux

entre les deux configurations, ces valeurs sont pertinentes. Ces valeurs sont utilisées dans la suite pour estimer le débit de données maximum attendu dans un faisceau satellite pour les services passagers envisagés.

Concernant le modèle de simulation afin de le valider et pour observer les premières tendances, nous avons simulé le trafic généré par cinq avions pour les deux profils d'utilisateur envisagés (Classic et Advanced). Les figures 3.33 et 3.34 montrent les résultats obtenus. Dans le cas du profil 'Classical users' les débits cumulés depuis et vers le groupe d'utilisateurs sont fortement asymétriques. Ce résultat est pertinent, compte-tenu des applications modélisées. Les débits cumulés pour l'ensemble des passagers d'un avion sont de l'ordre de 50 kbit/s en montant et 110 kbit/s en descendant. Et sur le lien sol, on observe des débits cumulés pour l'ensemble des passagers des cinq avions de l'ordre de 250 kbit/s

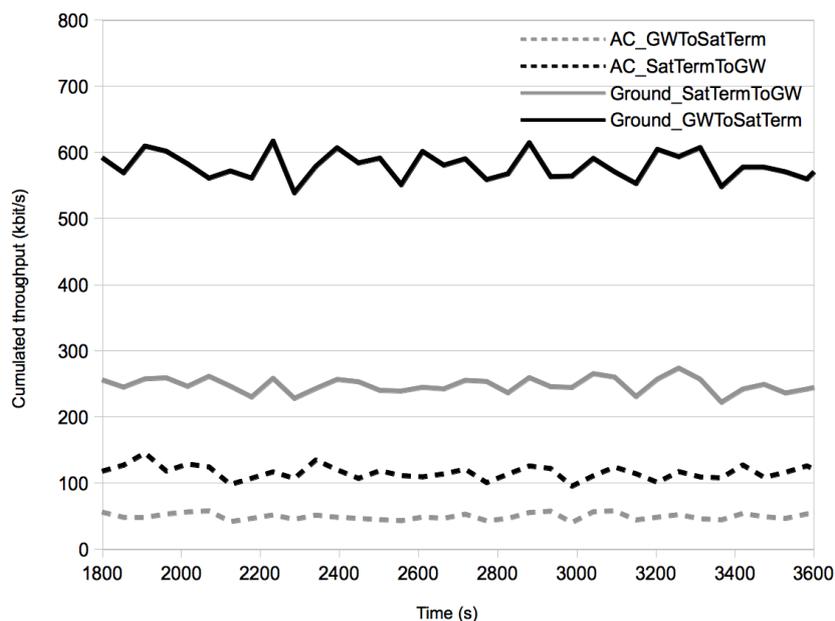


FIGURE 3.33: Débits générés cumulés pour 5 avions - profil "Classical users"

en descendant et 580 kbit/s en montant. Dans le cas du profil 'Advanced users', où l'ensemble des applications inclut la VoIP et les courriers électroniques sont enrichis de pièces jointes, on constate tout d'abord des résultats moins asymétriques. Pour un avion, les débits cumulés montants et descendants sont similaires et de l'ordre de 600 kbit/s. Et sur le lien sol, les débits cumulés montants et descendants pour l'ensemble des cinq avions sont d'environ 2,5 Mbit/s. Un point important pour la suite de l'étude est que compte-tenu des propriétés observées sur les trafic cumulés, notamment leur sporadicité, on ne peut pas s'attendre à bénéficier d'un gain de multiplexage statistique en augmentant les nombre d'avions. Ce dernier point a d'ailleurs été confirmé par des simulations complémentaires mettant en évidence la croissance linéaire des débits cumulés avec le nombre d'avions.

Les résultats finaux des simulations pour l'ensemble des flux agrégés, donc sur le lien sol, sont présentés dans la table de la figure 3.35 pour le satellite Inmarsat-5 F2 et dans la table de la figure 3.36 pour le satellite alternatif que nous avons imaginé. Pour un avion, puis pour le nombre moyen d'avions sur la journée dans le faisceau le plus chargé, et enfin le nombre maximum d'avions simultanés observé dans le même faisceau, nous pouvons lire les débits montant et descendant cumulés générés (en kbit/s) par l'ensemble des utilisateurs de l'ensemble de avions. Ces résultats sont fournis sur l'hypothèse d'utilisateurs "classiques" puis "avancés". Je ne présente ici que les résultats pour la journée la plus chargée sachant qu'elle représentera le pire cas en terme de ressources nécessaires. Pour la configuration de type Inmarsat-5 F2 la capacité nécessaire sur le faisceau le plus chargé est d'environ 7,9 Mbit/s en montant et 18,6 Mbit/s en descendant dans le cas d'utilisateurs du profil "Classical users". Là encore, nous observons l'asymétrie propres aux applications supposées. Et dans le cas d'utilisateurs du profil "Advan-

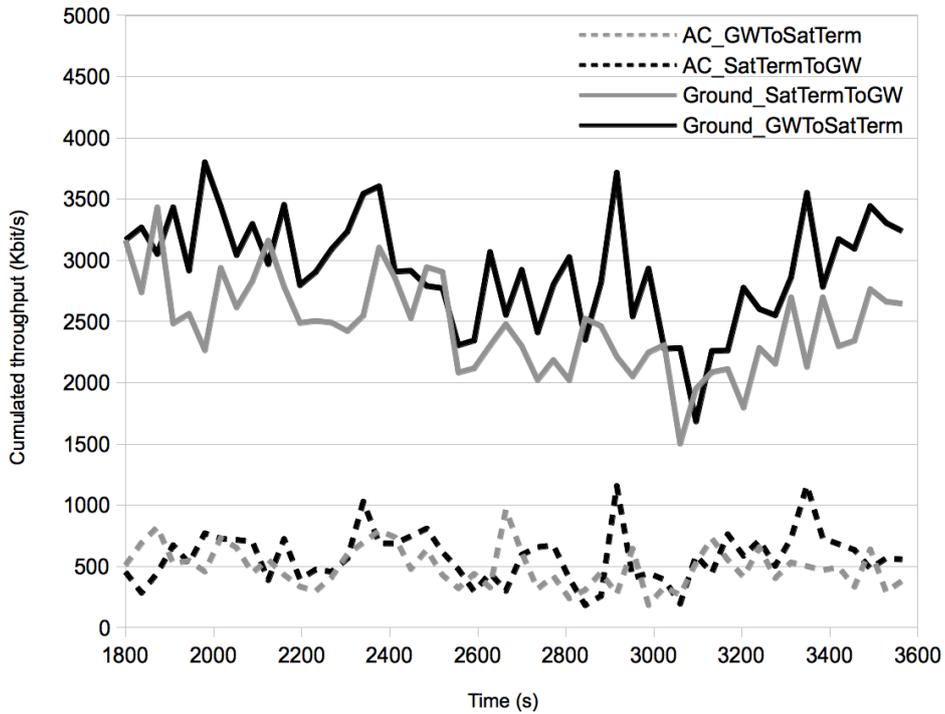


FIGURE 3.34: Débits générés cumulés pour 5 avions - profil "Advanced users"

ced users", la capacité nécessaire sur le faisceau le plus chargé est d'environ 76,5 Mbit/s en montant et 85,4 Mbit/s en descendant. Et pour la configuration qui correspond à notre satellite hypothétique, la capacité nécessaire sur le faisceau le plus chargé est d'environ 2,2 Mbit/s en montant et 5,2 Mbit/s en descendant dans le cas d'utilisateurs du profil "Classical users". Les capacités nécessaires sont bien sûr moindre puisque les faisceaux sont plus étroits. Et dans le cas d'utilisateurs du profil "Advanced users", la capacité nécessaire sur le faisceau le plus chargé est d'environ 21,5 Mbit/s en montant et 24 Mbit/s en descendant. On observe donc des besoins environ 3 fois plus élevés pour Inmarsat-5 F2, ce qui est conforme à la proportion d'avions supplémentaires compte-tenu de la taille des faisceaux.

Dans cette étude, deux satellites multifaisceaux ont été considérés et les débits offerts évalués pour fournir des accès Internet à des passagers de vols transocéaniques. La méthode originale proposée repose sur une estimation précise des positions 4D des avions, l'étude statistique du nombre d'avions par faisceau, puis sur un modèle de simulation spécifiquement développé. Les résultats finaux montrent que les capacités requises sont compatibles avec celles qui devraient être proposées dans les nouveaux systèmes satellites multifaisceaux, notamment en bande Ka.

			<i>Ground_SatTermToGW</i>	<i>Ground_GWToSatTerm</i>
Classic users	One	1	48	117
	Mean	44	2151	5081
	Max	160	7862	18570
Adv. users	One	1	618	688
	Mean	44	20934	23354
	Max	160	76506	85351

FIGURE 3.35: Débits générés cumulés (29 juin 2012) - Inmarsat-5 F2

			<i>Ground_SatTermToGW</i>	<i>Ground_GWToSatTerm</i>
Classic users	One	1	48	117
	Mean	8	396	934
	Max	45	2211	5223
Adv. users	One	1	618	688
	Mean	8	3849	4294
	Max	45	21517	24005

FIGURE 3.36: Débits générés cumulés (29 juin 2012) - Satellite hypothétique

3.2.4 Sécurisation des communications aéronautiques

3.2.4.1 Contexte et principe général

Les travaux, contributions et résultats présentés dans cette partie s'inscrivent dans le contexte d'un projet pour lequel j'étais chef de projet à l'ENAC et qui a permis le financement d'une thèse, celle de Mohammed Slim Ben Mahmoud, que j'ai co-encadrée avec Nicolas Larrieu, enseignant chercheur dans notre équipe. L'objectif principal du projet FAST était d'étudier et de définir l'architecture d'un système de communication par satellite en bande Ka pour des communications aéronautiques sol bord sur la base d'une antenne plane facilement intégrable. Un des challenges repose notamment sur l'idée que le lien satellitaire doit pouvoir multiplexer des flux applicatifs hétérogènes tant en terme de classes de trafic (ATSC, AOC, et APC), que de propriétés, et de qualité de service (QoS) requise. Le contexte et le système présentent des similitudes avec ceux décrits dans les travaux présentés dans la partie 3.2.2. Toutefois, la nature des sources de trafic est différente et surtout notre contribution est concentrée sur une problématique que nous n'avons pas abordée, la sécurité des communications. La contribution principale de l'ENAC était de participer à la définition de l'architecture système nominale puis de définir l'architecture sécurisée prenant en compte les spécificités et contraintes du système considéré. Un modèle de simulation spécifique du trafic ATS/AOC a été développé.

Concernant les services supposés, le lien satellitaire doit pouvoir servir pour chaque avion couvert :

- des applications ATSC "classiques",
- des applications AOC classiques,
- des nouvelles applications AOC (télésurveillance et télémédecine),

- des accès Internet pour les passagers pour l'APC.

L'architecture globale du système retenue est composée de plusieurs segments. Au niveau du sol, une Gateway (GW) est connectée à deux routeurs : un routeur ATN pour le réseau aéronautique, et un routeur Internet pour les services APC destinés aux passagers. Pour le réseau à bord, deux routeurs sont connectés au terminal satellite : un routeur ATN/IPS pour l'ATSC et un routeur NG (Next Generation) pour les services AOC et APC. Les normes DVB (DVB-S2 pour le lien aller et DVB-RCS pour le lien retour) ont été retenues comme méthodes d'accès pour le lien satellitaire par les partenaires du projet FAST. Pour le domaine APC, plusieurs points d'accès WIFI seront répartis dans l'avion pour assurer une disponibilité et une couverture satisfaisantes des services Internet cabine et télémédecine. Une connexion multi-SSID (Service Set Identifier) permet de séparer les deux types de trafics pour des raisons de sécurité (chaque application aura sa propre clé pour se connecter) et de disponibilité des ressources, surtout quand une application aussi critique que la télémédecine veut se connecter à un des points d'accès de l'avion. Au niveau du routeur NG, un premier niveau de QoS IP est mis en œuvre avec Diffserv (Differentiated services) en associant chaque domaine connecté au routeur NG à une file d'attente donnée (télémédecine, télésurveillance, services AOC "standards" et Internet cabine). Au niveau du terminal satellite, deux ports physiques sont considérés pour connecter le routeur ATN/IPS (flux ATS) et le routeur NG. Ainsi, la séparation entre les services cockpit ATS et le reste du trafic est assurée conformément aux normes et pratiques recommandées par l'OACI. L'architecture retenue est basée sur la norme DVB/RCS comme décrit dans l'architecture de référence BSM (Broadband System Multimedia) de l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

A l'entrée du terminal satellite, un classifieur IP est mis en place afin de différencier les flux IP provenant des deux routeurs. Une phase de "mapping" est ainsi réalisée afin de gérer les priorités entre les flux grâce à plusieurs niveaux de priorité PID (Priority ID), assignés à chaque classe de service et envoyés vers la file d'attente correspondante identifiée grâce à un QID (Queuing ID). De cette façon, la séparation entre les couches dites "satellite dépendant" (SD) et "satellite indépendant" (SI) est assurée conformément au modèle BSM de référence.

Le nombre de flux applicatifs considérés dans le projet FAST est important et montre un trafic de données sol-bord hétérogène. En effet, les services cockpit (ATSC), compagnie aérienne (AOC) et passager (APC) sont variés, de différentes tailles et leur fréquence d'utilisation dépend fortement de la phase de vol dans laquelle l'avion se trouve à un instant donné. De plus, à cette diversité des flux viennent s'ajouter plusieurs contraintes propres aux communications aéronautiques. En effet, dans un environnement aussi variable, l'état du réseau est constamment fluctuant et dépend de plusieurs autres paramètres :

- **Les conditions de réception** : la dégradation des conditions météorologiques (pluie essentiellement) ont un impact sur la qualité des signaux émis et reçus entre l'avion et le sol,
- **Les limites de certaines technologies utilisées** : comparés aux technologies terrestres (fibre optique par exemple), les technologies utilisées pour les communications aéronautiques offrent des capacités plus faibles et des performances différentes,
- **Priorité entre les services** : selon la phase de vol, certains services sont prioritaires sur d'autres

(essentiellement des messages ATSC entre contrôleurs et pilotes) pour des raisons de sûreté du vol.

Les ressources réseaux disponibles sont difficilement prévisibles à chaque instant. Mais afin de garantir dans tous les cas une sécurité optimale, nous avons défini une solution dite adaptative. Cette approche repose sur un gestionnaire actif de la sécurité embarqué que nous avons appelé SecMan (pour Security Manager). Cette solution devra garantir la sécurité des communications minimum requise en tenant compte de la priorité des flux dans les cas où les ressources peuvent être réduite par les conditions de réception par exemple. Mais elle devra aussi, dès que possible, maximiser le niveau de sécurité des communications lorsque la capacité disponible le permet. Dans les couches physique et liaison de l'architecture satellitaire de communication retenue, il n'existe pas de solution de sécurité efficace et adaptative (en termes de robustesse aux attaques). De plus, il est intéressant de prévoir des mécanismes et solutions implémentés dans les couches plus hautes, à partir de la couche réseau. Ainsi, nous pouvons envisager de porter la solution proposée sur des systèmes de communication basés sur des couches d'accès différentes (liens direct par exemple).

3.2.4.2 La gestion adaptative de la sécurité

L'architecture sécurisée embarquée à bord est présentée dans la figure 3.37. Deux relais sécurité (SMP- SecMan Proxy) sont considérés et connectés respectivement au routeur ATN et au routeur NG. Chaque proxy est isolé dans une zone démilitarisée DMZ (Demilitarized Zone) grâce à des fonctions de pare-feu (Firewalling) implantées au niveau des routeurs. Les pare-feux retenus sont de type Stateful Inspection, réputés assez robustes et efficaces contre les attaques de déni de services (DoS - Denial of Service), contrairement aux pare-feux Stateless, reposants sur des règles et des listes d'accès trop simples pour éviter des tentatives d'intrusions évoluées.

Les pare-feux applicatifs (niveau 7) peuvent être une alternative intéressante, mais le traitement et le calcul qu'ils engendrent ralentissent considérablement les échanges, ce qui va à l'encontre d'une politique de sécurité adaptative et visant justement à améliorer les performances réseaux.

D'autres parts, afin d'avoir une politique de sécurité flexible, SecMan peut fonctionner en deux modes :

- **Mode Intra-classe** : ce mode est utilisé pour des flux concurrents appartenant à la même classe. Par conséquent, la priorité entre les flux de domaines différents n'est pas prise en compte et la politique de sécurité s'adaptera en fonction des ressources réseaux disponibles.
- **Mode Inter-classe** : ce mode est utilisé pour des flux concurrents, y compris s'ils appartiennent à des classes de trafic différentes. La politique de sécurité s'adaptera donc en fonction des ressources réseaux et des priorités entre flux issus de domaines différents. SecMan fonctionnera en mode Inter-classe sur le proxy sécurité connecté au routeur NG.

De plus, plusieurs modes de sécurisation peuvent être appliqués en adaptant la politique de sécurité au besoin, quelque soit le mode de fonctionnement de SecMan (Inter-classe ou Intra-classe) :

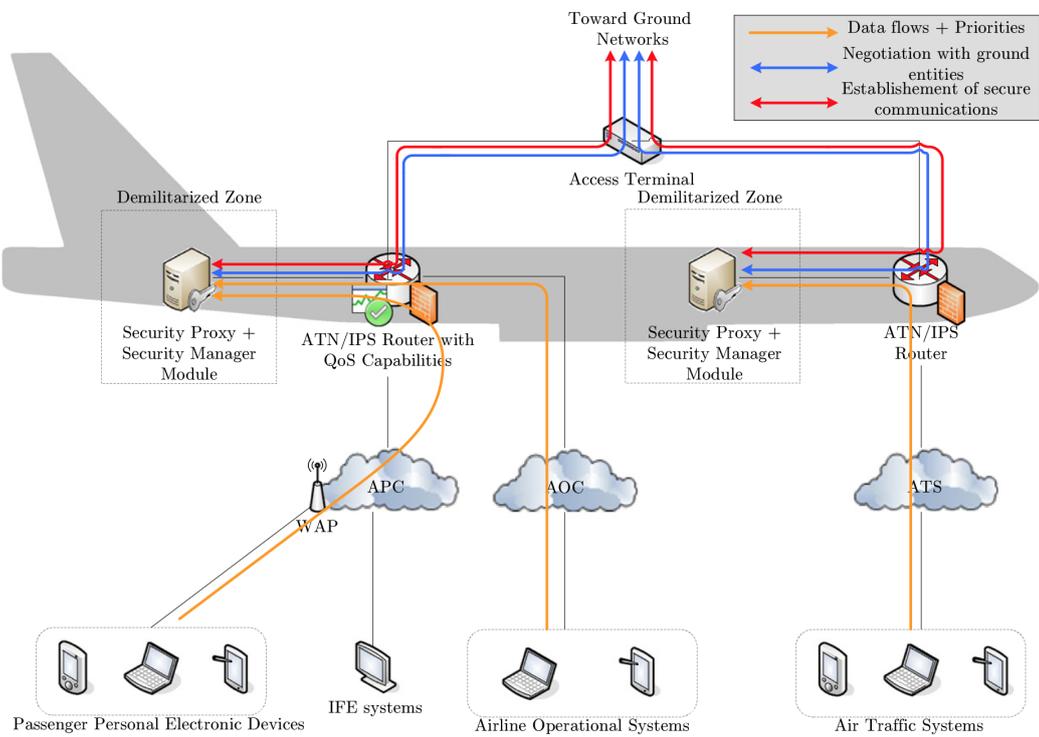


FIGURE 3.37: Architecture système sécurisé projet FAST

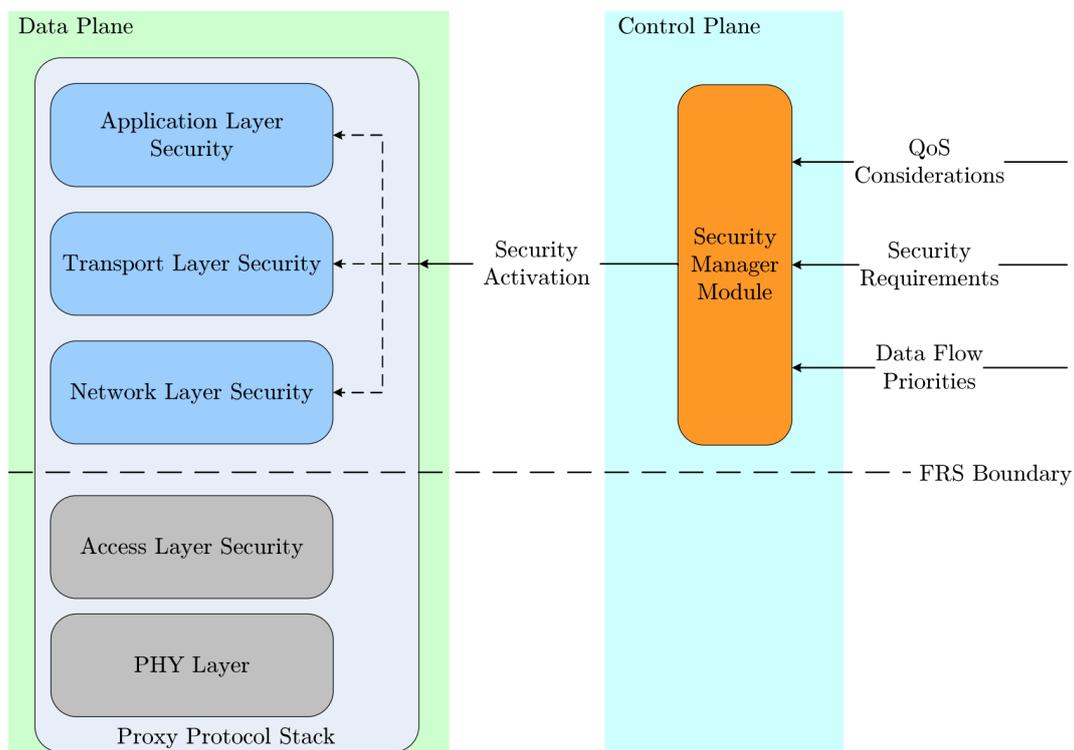


FIGURE 3.38: SecMan - Architecture protocolaire

- **Mode transparent non sécurisé** : les paquets qui transitent sur les routeurs sont simplement routés sans aucun mécanisme de sécurité (tout en respectant les contraintes de QoS),
- **Mode transparent sécurisé** : il sécurise les paquets échangés à l'aide d'un mécanisme tel que IPSec (IP Security) et est transparent pour l'utilisateur,
- **Relais au niveau transport** : SMP sécurise les connexions de bout en bout (HTTPS par exemple),
- **Relais applicatif** : SMP se comporte dans ce mode comme un proxy applicatif "classique" (proxy http ou ftp par exemple).

Les différentes entités mises en oeuvre dans la gestion de la sécurité sont illustrées dans la figure 3.38 ainsi que le fonctionnement global du gestionnaire de sécurité adaptative (SecMan, Security Manager).

Compte tenu des services à sécuriser et de l'intérêt de la convergence des flux vers un réseau aéronautique tout-IP, SecMan a été conçu pour fonctionner sur un réseau IP. Il est à noter que le module gère les mécanismes de sécurité des couches hautes de la pile TCP/IP, au-dessus de la limite FRS (Future Radio System) définie par le COCR. Le module est informé de l'évolution constante des ressources réseaux disponibles à travers un outil client-serveur spécifique. Il prend également en compte les besoins de sécurité exprimés en amont à travers une phase d'évaluation des risques pour les différents flux en

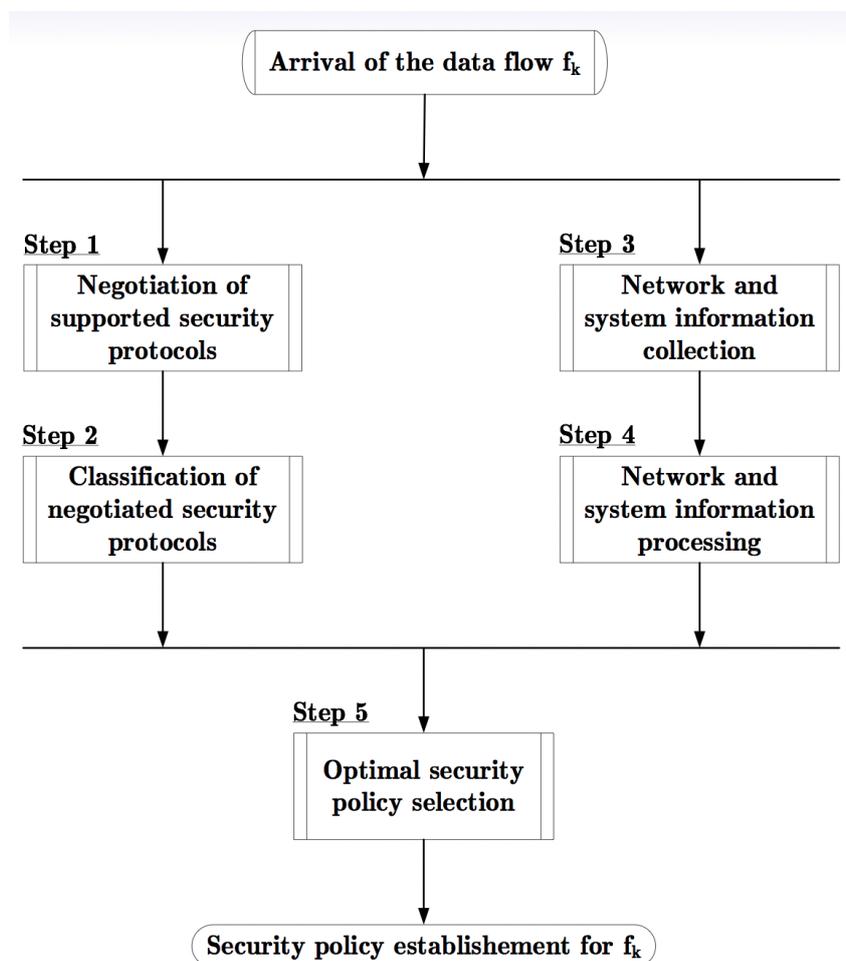


FIGURE 3.39: SecMan - Diagramme de flux

entrée du SecMan. Plusieurs routines d'activation des mécanismes de sécurité ont ainsi été créées au travers de primitives pour changer les politiques de sécurité ou laisser passer le flux sans sécurisation, par exemple. Si on regarde le module SecMan de plus près afin de comprendre les différentes étapes qui régissent son fonctionnement adaptatif, nous distinguons 5 grandes étapes dans le processus de sélection d'une politique de sécurité optimale comme le montre la figure 3.39.

En résumé, à l'arrivée d'un flux f_k , les 5 processus suivants sont lancés :

- *La négociation des mécanismes de sécurité supportés* : un protocole sécurisé se charge de négocier les mécanismes de sécurité supportés mutuellement par le SecMan et le serveur au sol. Cette négociation permet d'établir une base de données qui contiendra l'ensemble des politiques de sécurité qu'il est possible de fournir, par exemple, TLS-RSA-WITH-AES-256-CBC-SHA pour le mécanisme de sécurité TLS (Transport Layer Security) [44] :
- RSA (nommé par les initiales de ses trois inventeurs : Rivest, Shamir, et Adleman) pour l'au-

- thentification [45],
- AES comme algorithme de chiffrement [46],
- et SHA comme fonction de hachage pour l'intégrité des données [47].
- *La classification des mécanismes de sécurité supportés et négociés au préalable* : l'algorithme de prise de décision multicritères AHP (Analytic Hierarchical Process) [48] est appliqué afin de classer les mécanismes de sécurité supportés et négociés selon leur niveau de sécurité, leur coût système et leur coût réseau.
- *La récupération des informations sur l'état du lien satellite* : des informations structurées relatives à l'état du lien satellite (dégradation ou non du signal satellite) sont récupérées périodiquement.
- *Analyse des informations récupérées sur l'état du lien satellite* : quand les informations sont récupérées au niveau du SecMan, elles sont envoyées au décideur qui les analyse en vue de la prise de décision de la politique de sécurité à appliquer au flux f_k ,
- *Sélection d'une politique de sécurité optimale pour le flux f_k* : l'étape finale est de choisir, en fonction des besoins de sécurité, des priorités entre les différents flux, des mécanismes de sécurité négociés, de leurs scores AHP, et des informations sur l'état du lien, la politique de sécurité à appliquer pour le flux f_k .

3.2.4.3 Méthode d'évaluation de la gestion adaptative de la sécurité

Dans cette partie, la méthode d'évaluation de l'approche de sécurité adaptative est exposée. Elle est basée sur des expérimentations menées sur un banc de test reproduisant le contexte général du projet FAST à savoir, des communications par satellite entre des serveurs sol et des clients à bord d'avions. Ce banc, présenté dans la figure 3.40, est composé d'applications et équipements réels, d'outils d'émulation (notamment pour le lien satellitaire), et de logiciels spécifiques de mesures et de génération de trafic de données. La mise en œuvre de ce banc passe par la mise en place de plusieurs équipements (routeurs, serveurs, clients, etc...), chacun avec leur configuration logicielle et réseau spécifique. Le choix a été fait de virtualiser une partie de cet environnement et ainsi ainsi de rassembler les clients, serveurs, entités réseau et sécurité sur une seule machine physique que nous appelons le "démonstrateur". Un « switch » connecte la machine hébergeant les entités virtualisées aux équipements des partenaires (télémédecine et télésurveillance) pour effectuer les tests via un émulateur de lien satellite fourni par le partenaire Astrium (SATEM). Le démonstrateur joue ainsi un rôle d'interface entre les systèmes clients à bord de l'appareil et les systèmes serveurs au sol, accessibles via la liaison satellite. Afin de simplifier nous nommons réseau « intérieur » les systèmes « clients » à bord de l'appareil (classe APC pour les passagers de l'avion, AOC pour les applications spécifiques aux compagnies, AOC-NG pour la télésurveillance et la télémédecine). Les ordinateurs du réseau intérieur se connectent, à travers notre système, aux ordinateurs du « réseau extérieur », réseau désignant tous les systèmes « serveurs » au sol. Le démonstrateur ne laisse pas de connexion s'établir à l'initiative de requêtes provenant du réseau extérieur. Le système peut être décomposé en deux parties interdépendantes : l'une est chargée d'assurer la problématique de routage et de qualité de service tandis que l'autre adapte le niveau de sécurité associé à chaque flux.

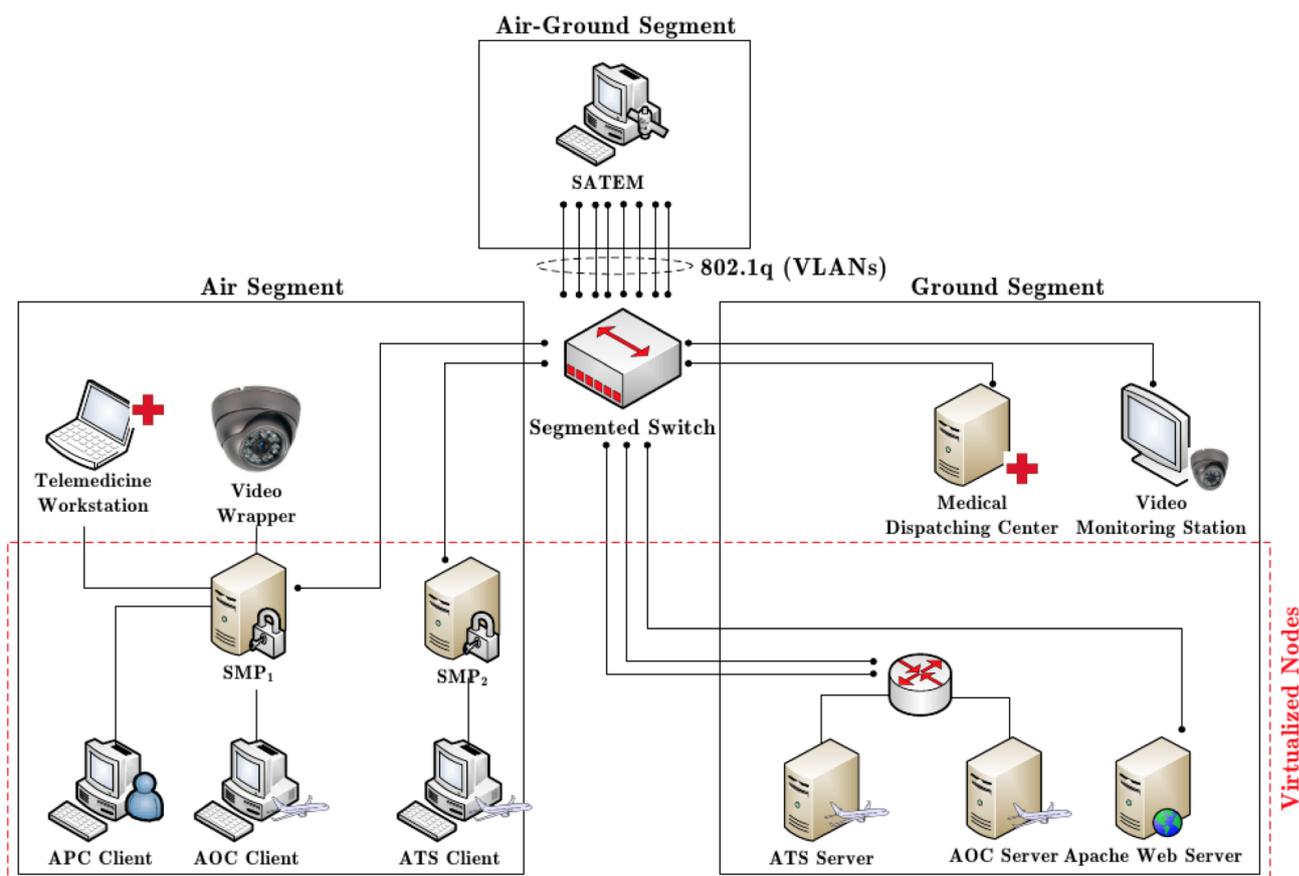


FIGURE 3.40: SecMan - Banc de test d'évaluation

Les sous-scénarios et les modes de sécurisation qui ont été définis et testés sur le banc pour valider le fonctionnement du module de gestion de la sécurité adaptative SecMan sont résumés dans le tableau 3.3.

Mode de sécurisation	Type trafic
Bypass	Tous
Mode TLS	ATSC, AOC, APC
Mode SSH	ATSC, AOC, APC
Mode IPSec	Tous
Décideur SecMan intra-classe	Tous
Décideur SecMan inter-classe	Tous

TABLE 3.3: *Projet FAST - Scénarios de test*

Ces différents sous-scénarios ont été choisis car ils permettent de valider le fonctionnement attendu de SecMan vis-à-vis de chaque type de flux à sécuriser et des différents modes opérationnels considérés dans le contexte du projet. L'objectif est de vérifier que le gestionnaire SecMan est capable de fonctionner en plusieurs modes de sécurisation afin d'avoir une politique de sécurité flexible :

- Le mode *Bypass* : correspond à un mode transparent non sécurisé, c'est-à-dire que les paquets qui transitent sur SecMan (qui est alors un simple routeur logiciel) sont simplement routés sans aucun mécanisme de sécurité. Les résultats obtenus dans ce mode servent de référence pour valider les autres modes de fonctionnement de SecMan.
- Le mode de *sécurisation unique* : une seule politique de sécurité statique est choisie et appliquée aux flux applicatifs. Dans ce mode, le gestionnaire SecMan ne fait aucune adaptation ni au niveau de sécurité de la politique appliquée, ni au niveau de son coût système et/ou réseau. La politique choisie sera celle définie par défaut au sein du mécanisme de sécurité adéquat (TLS, SSH, ou IPSec). Ce mode sert de deuxième point de référence pour la comparaison avec les modes de fonctionnement adaptatifs de SecMan (modes *décideur* ci-après).
- Le mode *décideur* : la gestion adaptative de la sécurité est déployée dans ce mode de fonctionnement. La politique adaptative de la sécurité est validée grâce aux résultats obtenus dans ce mode relativement aux résultats des sous-scénarios des modes Bypass et sécurisation unique. Compte-tenu de l'hétérogénéité importante des flux applicatifs dans l'architecture du système, il a été nécessaire de distinguer deux sous-modes décisionnels qui sont :
 - Le mode *décideur intra-classe* : ce mode est utilisé pour appliquer le mode décideur pour un seul type de flux applicatif (représentant une classe de trafic). Etant donné que les flux à sécuriser appartiennent à un seul type (ou classe) de trafic, la priorité entre les flux n'est pas prise en compte et la politique de sécurité s'adapte en fonction des dégradations du signal satellite et du niveau de sécurité exigé.
 - Le mode *décideur inter-classes* : ce mode est utilisé quand il est nécessaire de sécuriser un ensemble de flux répartis entre plusieurs classes de trafic. La politique de sécurité s'adapte

donc en fonction des ressources réseaux et des priorités entre flux issus de classes de trafic différentes. Il s'agit là du mode de fonctionnement le plus évolué qui doit permettre de s'adapter aux ressources réseau et système effectivement disponibles tout en maximisant le niveau de sécurité.

Comme le présent document n'est pas le lieu où détailler l'ensemble des résultats pour les différents scénarios et modes de fonctionnement, j'ai choisi de ne donner ici que les résultats du mode le plus avancé, à savoir le mode *décideur inter-classes*.

Les trafics ATSC et AOC ont été générés à partir des machines virtuelles clients avec l'outil de virtualisation VirtualBox (www.virtualbox.org). Au préalable, sur la base des informations fournies par le document COCR d'Eurocontrol, un modèle de trafic a été développé à l'aide d'un logiciel de simulation de réseau. Ce modèle nous a permis d'observer les propriétés d'ensemble d'applications ATSC puis AOC pertinentes dans le contexte de FAST. Il nous a permis de déduire les débits moyens à générer respectivement pour l'ATSC (14 kbps) et l'AOC (12 kbps) et avec quelles propriétés statistiques. La modélisation est focalisée sur les échanges de l'avion vers le sol et a été faite avec le simulateur Opnet Modeler (www.opnet.com), qui est un logiciel basé sur une approche de modélisation orientée objet et de simulation à événements discrets. Le programme qui est utilisé ensuite sur le banc de test pour la génération des trafics ATSC et AOC est l'outil de mesure de performances réseau iperf (www.iperf.fr), et la durée moyenne de génération du trafic lors des tests variait d'une minute à cinq minutes. En effet, la durée maximale de 5 minutes était suffisante pour générer les trafics ATSC et AOC et pouvoir analyser l'impact et les effets de la dégradation du signal satellite sur le profil du trafic. Les durées inférieures à cinq minutes ont surtout été utilisées dans le mode dit "Bypass" pour les tests effectués par un partenaire et qui concernaient les optimisations du protocole TCP. Concernant le trafic APC, afin de se rapprocher le plus possible de ce que pourrait être le trafic passager à bord, nous avons mis en place sur le serveur APC (équipé d'un serveur Apache) un site web contenant plusieurs ressources hétérogènes (pages .html, images .jpeg, flux .rss) auxquelles accèdent plusieurs passagers en même temps. Afin de générer plusieurs connexions TCP, nous avons utilisé le gestionnaire de téléchargement en ligne de commande *wget* (www.gnu.org/software/wget/) configuré en mode récursif sans l'option *keep-alive* sur la machine virtuelle 'client APC' (afin d'éviter les connexions persistantes, et ainsi, avoir le maximum de connexions TCP possibles pour ce genre de trafic). Enfin, pour les services AOC de nouvelle génération, les trafics télémédecine et télésurveillance ont été générés par les outils propres aux partenaires impliqués pour ces deux services, respectivement la valise de télémédecine et le wrappeur/encodeur vidéo de télésurveillance.

3.2.4.4 Résultats de l'évaluation du gestionnaire SecMan

Je présente ici quelques résultats soulignant le fonctionnement de la solution basée sur l'approche adaptative de sécurité et ses performances. Au préalable la figure 3.41 permet de montrer que la politique de priorité entre les classes de trafic est bien respectée. En effet, alors que tous les flux sont activés, après un fonctionnement du système dans des conditions de réception supposées en ciel clair, a un

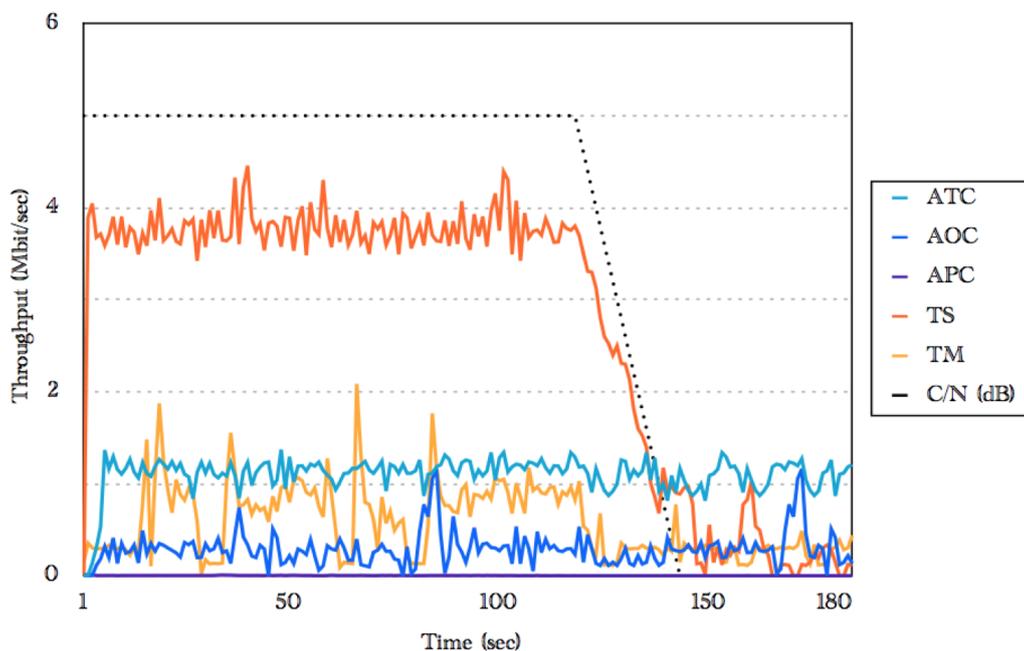


FIGURE 3.41: Banc de test FAST - Débits instantanés

peu plus de deux minutes le comportement du lien satellite émulé sur le banc de test est modifié de façon à reproduire des conditions plus mauvaises. D'une manière générale, on voit que la détérioration du rapport signal à bruit impacte plus ou moins les flux selon leur priorité. On voit notamment que si les conditions changent les débits moyens des flux prioritaires (ATSC et AOC) sont très peu impactés.

Dans le mode le plus avancé, dit *décideur inter-classes*, rappelons que SecMan joue le rôle d'un routeur logiciel (i.e. fonction « Forwarding IP » activée) qui laisse passer les flux en leur appliquant une politique de sécurité fonction des ressources disponibles ainsi que de leur priorité relative par rapport aux autres classes de flux présentes. Les résultats, présentés dans la table 3.4 donne les débits moyens observés pour les différentes classes de trafic dans le cas d'une approche de sécurité statique (mécanismes supposés préalablement définis et non modifiables) et dans le cas de la mise en oeuvre de la politique de sécurité adaptative que nous proposons (mécanismes fonction des conditions et des priorités). Là encore, les scénarios sont choisis de façon à reproduire des conditions favorables ainsi que des moments de fortes atténuations. On constate que pour toutes les classes de trafic dans le cas d'un algorithme décideur permettant de définir les mécanismes de sécurité en fonction des ressources disponibles, le débit moyen généré est moins élevé. Ces différences s'expliquent par le fait que le gestionnaire SecMan sélectionne des politiques de sécurité générant peu d'overhead dès que les conditions de réception commencent à se détériorer.

Enfin, le dernier résultat présenté dans la figure 3.42 nous renseigne directement sur le niveau du score sécurité global (*security level score*) pendant un scénario au cours duquel on observe une détério-

	Sécurité statique	Sécurité adaptative
ATSC	16,30	10,80
AOC	14,22	9,17
APC	131,00	92,78
Télémédecine	2260,00	669,30
Vidéo surveillance	4600,00	1200,20

TABLE 3.4: Sécurité statique/adaptative - Débits moyens (kbit/s)

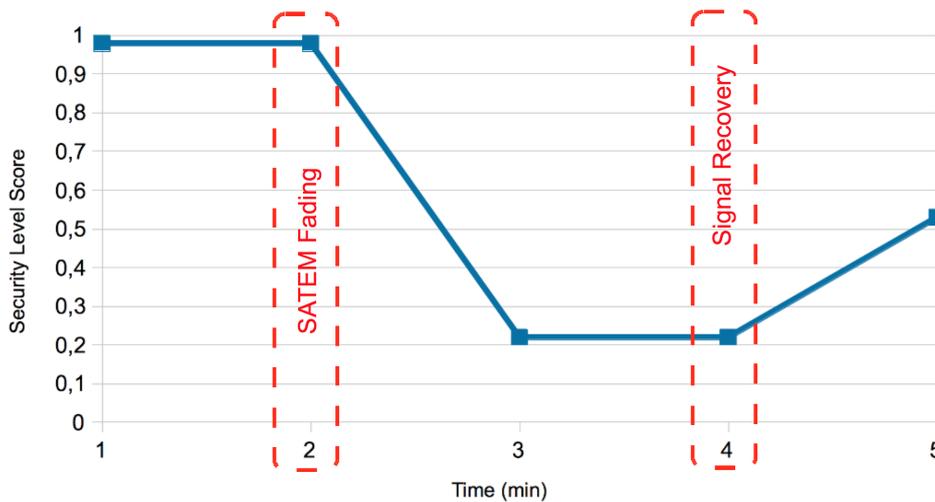


FIGURE 3.42: Banc de test FAST - Scores politique sécurité instantanés pour le mode Inter-classes

ration des conditions de réception (de la date d=2 min. à la date d=4 min.). Le paramètre *security level score* retenu représente un indice de robustesse des mécanismes de sécurité qui tient compte aussi des coûts réseaux et systèmes engendrés par ces mécanismes. Il est estimé grâce à l'algorithme multicritères AHP (Analytic Hierarchical Process) [48] évoqué précédemment. Ce que nous pouvons retenir ici, c'est la démonstration de la capacité d'adaptation aux ressources disponibles de notre approche. En effet, on voit clairement que lorsque les conditions le nécessitent des mécanismes proposant un score plus faible, certes moins robustes mais moins "coûteux", sont adoptés. On peut aussi souligner que lorsque les conditions s'améliorent (à partir de d=4), des mécanismes de sécurité offrant un meilleur score sont de nouveau choisis.

Ainsi, à travers une campagne de mesure sur la base d'expérimentations menées sur le banc de test, nous avons pu démontrer les avantages de l'approche originale de sécurité adaptative que nous avons proposée.

Les communications aéronautiques sol bord multisaut

Sommaire

4.1	Des MANET aux VANET et des VANET aux AANET	90
4.2	Contexte et objectifs	91
4.3	Hypothèses et faisabilité	92
4.4	Système proposé	100
4.5	Etude des performances	101
4.5.1	Evaluation de la capacité disponible	101
4.5.2	Routage hiérarchique basé sur un clustering	103
4.5.3	Evaluation des performances avec une application réaliste	105

Cette partie est consacrée à un axe de recherche que nous avons initié en 2009 sur les communications aéronautiques sol bord multisaut. En s'inspirant des réseaux dits VANET (Vehicular Ad hoc NETWORKS), nous avons imaginé que de la même manière des réseaux AANET (Aeronautical Ad hoc NETWORKS) pouvaient être envisagés et qu'ils pouvaient permettre la communications entre les avions et des infrastructures de réseaux sols y compris pour les avions non directement couverts. Après quelques détails sur le principe, puis la définition du contexte et des objectifs, une première sous-section précise les hypothèses et expose la démonstration de faisabilité de ce type de communication. La sous-section suivante donne des résultats sur les performances attendues. La dernière sous-section est dédiée aux travaux les plus récents que nous avons menés sur cette thématique et dans lesquels je suis directement impliqué, et donne quelques éléments sur ceux à venir.

4.1 Des MANET aux VANET et des VANET aux AANET

Depuis maintenant une vingtaine d'années, le monde de la recherche des réseaux de communications s'est beaucoup penché et a beaucoup publié sur les réseaux mobiles dit "Ad Hoc" plus connus sous le nom de MANET (Mobile Ad Hoc Networks). Ces réseaux ont pour principale caractéristique d'être composés de noeuds mobiles et dont les communications ne sont basées sur aucune infrastructure (donc Ad hoc). A ce titre, ils sont généralement opposés aux réseaux dits "cellulaires" qui sont organisés suivant une infrastructure de communication basée sur un noeud central permettant la communications entre les autres. Ces réseaux MANET ont donc fait l'objet de beaucoup de travaux car ils posent des problématiques très spécifiques, comme la recherche des chemins optimaux malgré la topologie dynamique, et nécessitent d'adapter ou remplacer les protocoles existants généralement définis dans des contextes de topologies statiques, souvent filaires et organisées. Les domaines d'applications sont très variés et laissent apparaître des sous-classes. A ce titre, les VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) peuvent être définis comme des MANET dont les noeuds de communications sont des véhicules telles que les voitures sur un réseau routier. Une des caractéristiques de cette sous-classe est la relative haute mobilité (ou vitesse relative) des noeuds qui peut notamment engendrer un partitionnement du réseau [49]. Dans le même temps, comme expliqué précédemment dans ce mémoire, les communications sol bord aéronautique doivent répondre à de nouveaux besoins pour des services opérationnels mais aussi pour des services passagers et ce dans un contexte de croissance du trafic aérien où les systèmes existants montrent des capacités relativement limitées.

Pour toutes ces raisons, l'idée de transposer les VANET au monde aéronautique civil ou du moins d'en étudier la faisabilité nous a paru pertinente. L'idée principale est alors d'utiliser ce que nous appelons un réseau AANET (Aeronautical Ad hoc Networks) pour fournir un nouveau moyen de communication sol bord. Cette solution attrayante introduit comme principale nouveauté, l'idée du lien multisaut entre les avions en vol et des stations sols dont le nombre peut être limité.

Cette nouvelle sous-catégorie de réseau peut à plus d'un titre être considérée comme une sous-classe de la catégorie VANET. Les points de similitude sont énoncés dans la table 4.1. On y trouve des

propriétés connues et importantes des VANET, les articles les énonçant, et leur adéquation aux AANET ou non. Certaines de ces caractéristiques sont évidentes comme la relative haute mobilité des noeuds ou encore la haute probabilité d'avoir un réseau partitionné. D'autres nécessitent un peu plus d'explications. Dans la même idée que les voitures ont des mouvements contraints par des routes et le trafic existant, les avions civils doivent le plus souvent suivre des routes définies par les services de contrôle aérien. Une autre similitude réside dans le fait que les VANET inclus, outre les noeuds mobiles, une infrastructure fixe et organisée permettant généralement l'interconnexion avec d'autres réseaux existants. Enfin, les AANETs peuvent être sujets à des problèmes de congestion de canaux et d'interférence de communication.

Vanet Characteristics	Ref	Relevant for AANET
High mobility of nodes	[49],[50], [51], [52], [53]	Yes
High probability of network partition	[49],[50], [51]	Yes
Predictability of the movements of nodes	[49],[51], [52], [53]	Yes
Very large scale	[49]	Yes
Velocity restricted by speed limits and road traffic	[51]	Yes
Channel congestion risk due to a high node density	[54]	Yes
No energy restriction	[51], [52]	Yes
Type of application : geographical, hard delay constraint	[52]	Yes
Interaction with on-board sensors	[52]	Yes

TABLE 4.1: *Comparaison des caractéristiques VANET/AANET*

L'intérêt de pouvoir identifier les AANET comme une sous-catégorie possible des VANET est double. D'une part, on peut s'inspirer des travaux et publications relatives aux VANET pour réutiliser ou adapter des méthodes pour notre thématique AANET. Et d'autre part, nous élargissons aussi le champ des contextes dans lesquels nous pouvons soumettre nos idées ou solutions originales.

4.2 Contexte et objectifs

Comme expliqué précédemment les systèmes de communication sol bord aéronautiques du futur devront répondre à des challenges importants. Dans le contexte d'une augmentation du trafic aérien et d'une migration progressive des communications vocales analogiques vers des communications numériques de données, ils devront savoir répondre à des besoins nouveaux tant pour les communications opérationnelles que pour les communications passagers. La migration vers les communications de données a déjà débuté et pour prévenir les risques de congestion des systèmes de nouveaux moyens ont été étudiés et même partiellement déployés notamment pour les services ATSC et AOC. Certains d'entre eux, comme la VDL (VHF Data Link) ou LDACS (L-Band Digital Aeronautical Communicatoin System), sont basés sur des communications directes entre les avions en vol et des stations sol. Leur déploiement

est de fait réduit sur des zones continentales. Les capacités proposées entre les avions et le sol sont respectivement 31,5 kbit/s et 275 kbit/s. En Europe le déploiement de la VDL mode 2 est avancé mais pas encore complètement terminé, et L-DACS est étudié dans le contexte du projet SESAR pour son remplacement. Pour les zones océaniques ou désertiques des systèmes basés sur des communications par satellites sont proposés. Comme expliqué dans la partie 2.5.2 de ce mémoire, ces systèmes opèrent généralement en bande L et offrent une capacité de quelques dizaines de kbit/s, y compris pour des systèmes non encore en service tel que IRIS à l'Agence Spatiale Européenne (ESA). D'autres systèmes, tels que la solution récente Swiftbroadband d'Inmarsat offrent des capacités plus confortables (jusqu'à 332 kbit/s) basée sur la suite IP mais ne sont pas encore autorisés par l'OACI pour les communications opérationnelles. Les solutions par liens directs en zones continentales ont l'inconvénient de nécessiter une infrastructure terrestre lourde (réseau cellulaire) pour des capacités relativement faibles qu'il faut de plus partager entre tous les avions couverts. Et les solutions par satellites, avec les mêmes limitations de capacités, pose de plus le problème de l'intégration des antennes sur les avions.

Nous avons eu alors l'idée de proposer et d'étudier une approche innovante basée sur un réseau Ad Hoc décentralisé. Grâce à de simples liens radios reposant sur des antennes omnidirectionnelles, les avions établissent des liaisons entre eux puis par des messages de signalisation échangés périodiquement déterminent le meilleur chemin vers une station sol. L'idée est de limiter le nombre de stations sol à déployer tout en garantissant un moyen de communication y compris pour les noeuds non directement couverts. Ainsi, pour atteindre une station sol, les données émises par un avion peuvent être ré-acheminées (ou "forwardées") plusieurs fois par d'autres avions sur le chemin. On peut donc aussi parler de communications sol bord multisaout.

Cette partie du mémoire a plusieurs objectifs. Tout d'abord, en considérant les positions réelles des avions dans différents espaces aériens pour des jours de l'année et en s'appuyant sur des hypothèses concernant les couches d'accès, je démontre et j'explique pourquoi les AANET constituent une solution intéressante et pertinente en tant que nouveau moyen de communication sol bord aéronautique. Ensuite, je présente la méthode retenue pour l'estimation de la capacité de communication qui serait offerte à chaque avion. Et finalement, je fournis quelques résultats obtenus par simulation avec comme hypothèse l'utilisation d'un service applicatif réaliste. La figure 4.1 montre un exemple de topologie pour le système proposé. Cette topologie en arbre peut avoir pour conséquence de générer la congestion des liens sur les derniers sauts. C'est pourquoi l'étude est concentrée sur le sens de communication le plus contraint, celui de l'envoi des données depuis les avions vers les stations sol.

4.3 Hypothèses et faisabilité

Dans cette partie la faisabilité des communications sol bord aéronautiques basées sur des réseaux ad hoc est discutée. Ces réseaux utilisent des liens radio entre les avions pour assurer l'envoi des données depuis les avions vers les stations sols, y compris celles non directement joignables. Chaque avion peut ainsi être vu comme un routeur réseau qui retransmet des paquets de données émis depuis d'autres

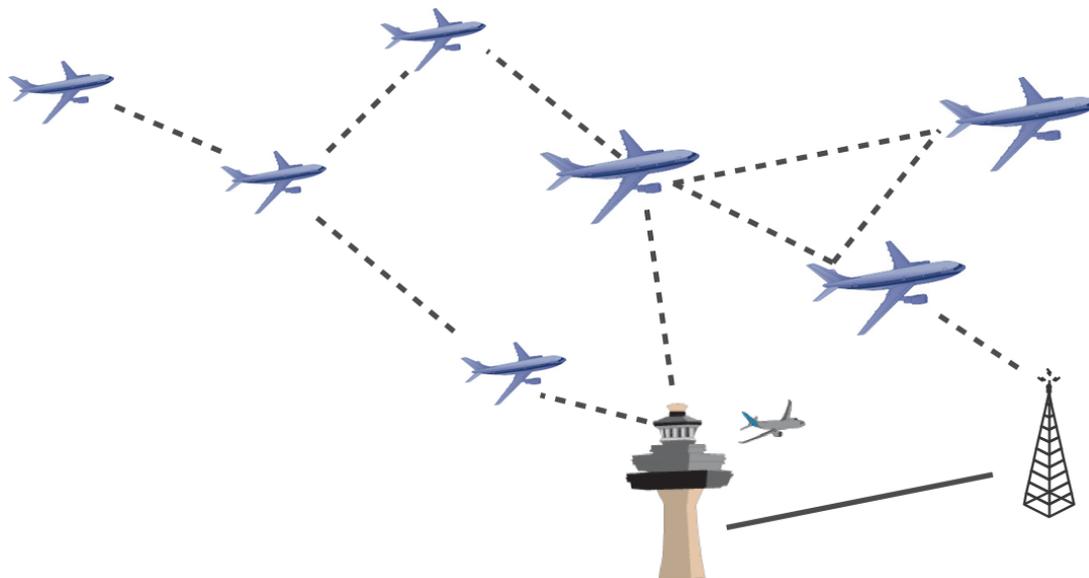


FIGURE 4.1: *Topologie d'un Réseau Ad hoc Aéronautique*

avons vers une station sol. Pour permettre d'étudier la faisabilité d'un tel système en terme de connectivité, les positions réelles des avions dans un espace aérien donné doivent être connues avec suffisamment de précision.

Deux espaces aériens ont été considérés. Un espace continental avec l'espace aérien français et un espace continental avec le couloir nord transocéanique entre l'Europe et les Etats-Unis. Ces deux espaces aériens présentent des trafics aériens différents. Pour la zone continentale française, la densité d'avion est élevée et les trajectoires se répartissent dans toutes les directions (à des niveaux de vol différents bien sûr). Dans la zone océanique considérée les avions suivent des routes prédéfinies appelées NAT (North Atlantic Tracks), expliquées dans la partie 3.2.3.1. Ces routes sont définies quotidiennement par les centres de contrôle aérien sur la base des conditions météorologiques. La figure 4.2 montre l'ensemble des trajectoires des avions pour une journée dans ces deux espaces aériens.

Pour cette étude nous avons utilisé deux sources de données. La première vient des services français de l'aviation civile et est constituée de positions radars toutes les 15 secondes pour des journées données. La seconde source est constituée de données mises à disposition par Eurocontrol pour l'espace océanique où il n'y a pas de couverture radar partout. Dans ce cas les positions sont celles qui sont reportées toutes les dix minutes par les avions conformément aux règles de la navigation aérienne. Nous avons alors utilisé la même méthode que celle décrite dans la partie 3.2.3.1. Compte-tenu de la dynamique de la topologie, il est nécessaire de travailler sur des positions avec une granularité assez fine. Les données Eurocontrol fournissant les positions toutes les dix minutes sont interpolées pour obtenir des positions toutes les 15 secondes comme avec les données dérivées des positions radar. Et cette interpolation est faite ainsi entre chaque couple de positions connues suivant un grand arc de cercle. Là encore, cette approche originale diffère de celle utilisée généralement dans ce type d'étude et qui

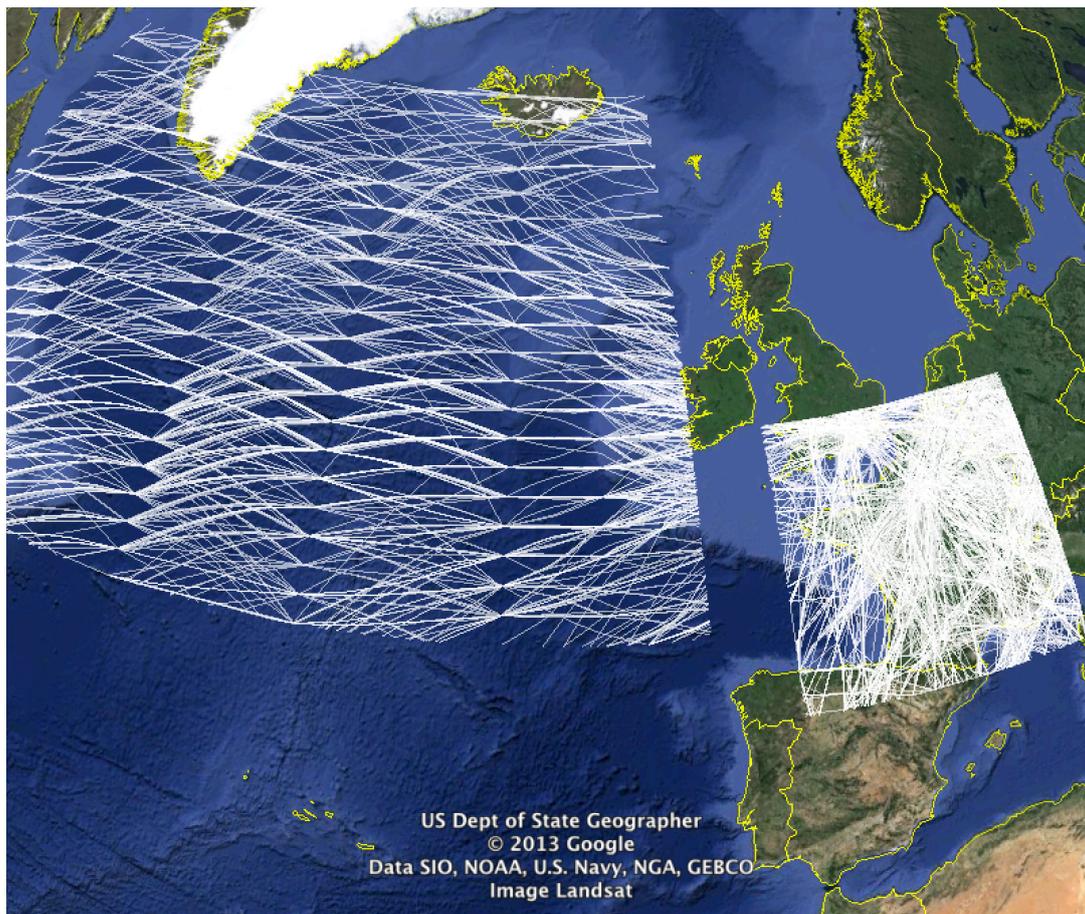


FIGURE 4.2: *Espaces aériens océanique et continental*

consiste à interpoler par la méthode du grand arc de cercle entre les aéroports de départ de d'arrivée comme dans [42] ou [43] par exemple. Dans cette étude, nous avons noté que cette dernière approche pouvait générer des erreurs de position allant jusqu'à 1000 km par rapport à la position réelle d'un avion.

Les réseaux Ad hoc aéronautiques ont déjà fait l'objet de plusieurs études, par exemple [55], [56], et [57]. Rappelons qu'il s'agit d'un réseau auto configurable reposant sur une infrastructure sol qui doit être légère afin que la solution soit compétitive avec un système exclusivement cellulaire. L'avantage principal est que même si certains avions sont en dehors des zones couvertes par les stations sols, ils peuvent néanmoins communiquer avec le sol en envoyant leurs données à d'autres avions qui les feront suivre. Ces systèmes ont aussi été étudié dans des projets comme ATENAA [58] ou encore NEWSKY [59]. Dans ces derniers projets, la faisabilité des réseaux AANET dans le corridor nord atlantique a été démontrée [60]. Mais comme expliqué précédemment, l'étude repose sur une hypothèse qui peut induire un biais important, à savoir des trajectoires aériennes basées sur un grand arc de cercle entre les aéroports de départ et d'arrivée. De plus, les mécanismes de couches physique et liaisons ne sont pas traités.

Bien sûr, le protocole de routage est très important dans les réseaux Ad hoc, et particulièrement dans le contexte aéronautique où la topologie peut évoluer très rapidement compte-tenu de la vitesse des avions. Dans [55] et [56], un protocole de routage est proposé pour les réseaux Ad hoc aéronautiques. En se basant sur la vitesse relative des avions et leur direction, il repose sur des groupes (clusters) de noeuds organisés dans le réseau. L'idée est de favoriser la pérennité des liens établis entre les avions afin de limiter les procédures de transfert de communication (handover) qui induisent des délais et le plus souvent du trafic de signalisation.

Dans le projet ATENAA, un autre protocole de routage appelé ARPAM (Ad hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile Ad hoc Network) a été proposé [57]. ARPAM est basé sur le protocole AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) lui-même un protocole de routage vecteur de distance à la demande pour les réseaux Ad hoc décrit par l'IETF [61]. Concernant les antennes les auteurs font l'hypothèse d'antennes directionnelles en bande Ka. Dans notre approche, compte-tenu des difficultés de pointage et traçage inhérents aux antennes directionnelles ainsi que pour des question de coût, des antennes omnidirectionnelles sont préférées.

Afin d'évaluer la connectivité d'un réseau Ad hoc aéronautique basé sur des positions réelles d'avions, nous avons développé à l'Enac au sein de l'équipe de recherche ResCo, un logiciel spécifique appelé AeRAN (pour AeRonautical Ad hoc Networks). Ce logiciel utilise en entrée :

- un fichier des positions successives des avions pour une journée et un espace aérien donnés,
- un fichier des positions des stations sol,
- la portée maximale supposée entre deux avions pour qu'une connexion de niveau 2 soit possible.

Et il donne en résultat plusieurs statistiques telles que par exemple la connectivité du réseau Ad hoc (le pourcentage d'avions connectés directement ou indirectement à une station sol). De plus AeRAN permet l'observation de l'évolution des positions des avions et des connexions de niveau 2 possibles qui en résultent. Par exemple, à titre indicatif, les figures 4.3 et 4.4 montrent une capture instantanée du logiciel AeRAN pour respectivement l'espace aérien français et nord océanique. Les points bleus

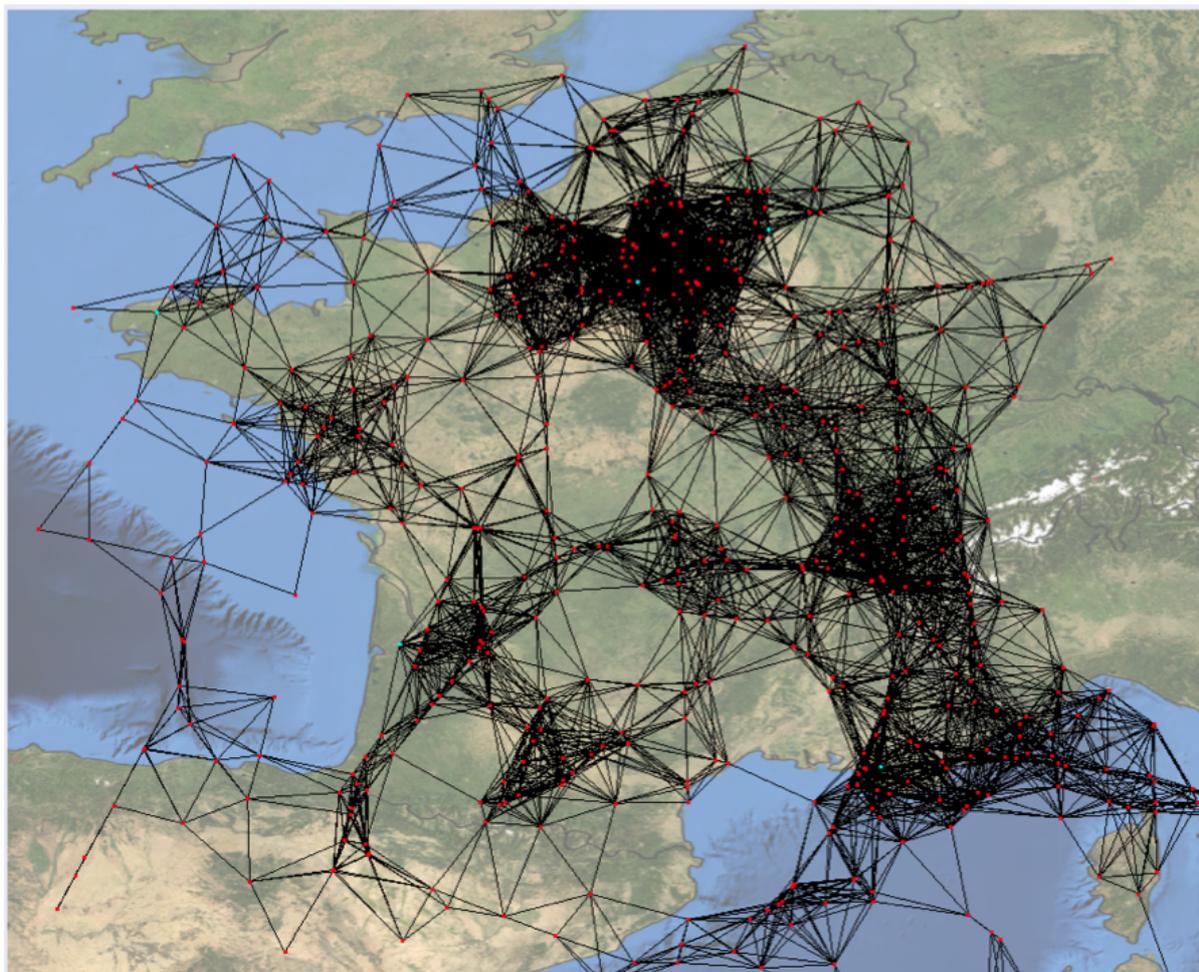


FIGURE 4.3: AeRAN - *Espaces aériens Français*

représentent les stations sol et les rouges les avions. Nous pouvons déjà confirmer que les trajectoires dans l'espace aérien océanique basées sur les NAT (North Atlantic Tracks) que fixent les contrôleurs aériens, révèlent une géométrie plus organisée à l'œil nu.

Nous avons évalué la connectivité du réseau dans les deux espaces aériens et pour plusieurs portées maximales hypothétiques de communication. En espace continental, nous avons fait l'hypothèse de 5 stations sol, une dans chaque centre de contrôle en route français (Paris, Reims, Brest, Aix-en-Provence, et Bordeaux). Une sous-partie de l'étude a permis de démontrer que comme la densité des avions dans le ciel français était relativement homogène pour la portée supposée des stations sols, leur emplacement ne modifie que marginalement les performances du système global.

Pour l'espace océanique, les placements des stations sols sont supposés évidemment sur des zones terrestres telles que les côtes (en Europe, aux Etats-Unis et au Canada) ou les îles (Açores ou encore Bermudes). Les figures 4.5 et 4.6 montrent les résultats obtenus pour une journée du mois de juin 2011



FIGURE 4.4: AeRAN - Espaces aériens océanique

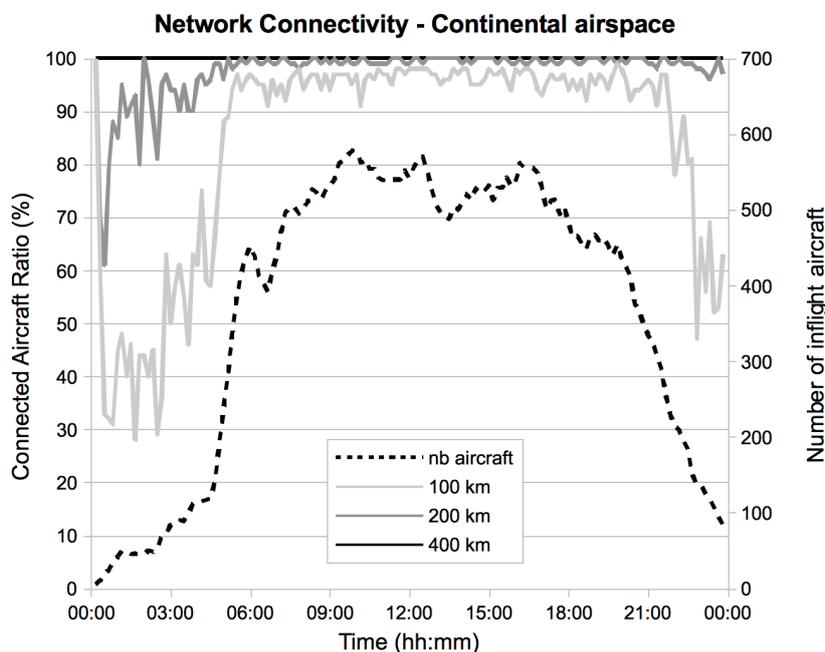


FIGURE 4.5: AeRAN - Connectivité en espaces aériens continental français

pour respectivement l'espace continental français et l'espace océanique atlantique nord.

Tout d'abord, ces résultats soulignent l'influence de la portée maximale des communications entre les noeuds (lignes pleines avec axe y à gauche) dans les espaces aériens considérés. Comme attendu la proportion d'avions connectés croît avec cette portée. Toutefois à partir d'une certaine valeur, l'impact devient marginal. Nous avons intentionnellement inclus aussi le PIAC (Peak Instantaneous Aircraft Count) qui représente le nombre d'avions total simultanés dans les deux contextes (lignes en pointillés avec axe y à droite). Là encore, comme attendu, on peut noter une corrélation entre ce dernier paramètre et la connectivité globale du réseau. Dans le ciel français une portée de 150 km permet de garantir une connectivité pour 90% des avions sur la journée et 99% entre 6h du matin et 21h. Mais pour l'espace océanique considéré la portée devrait être de 350 km pour garantir une connectivité supérieure à 90% dans la journée. Cette différence entre l'espace continental et océanique de l'étude s'explique principalement par le fait que la densité est moindre en espace océanique.

Le nombre de saut entre les avions et une station terrestre représente aussi un résultat intéressant. En effet, en multipliant le nombre de saut pour un paquet de données, on augmente aussi potentiellement le délai d'acheminement de bout en bout mais aussi la probabilité que ce paquet soit impacté par des interférences. Nous supposons dans un premier temps que le chemin choisi depuis un avion vers une station sol sera le plus court. Il s'agit de celui donné par l'algorithme de Dijkstra avec des poids identiques pour chaque lien inter avion. Bien sûr, ce nombre de saut pour atteindre une station sol dépend aussi de la portée maximale inter noeuds supposée. Pour évaluer ce point, nous observons par simula-

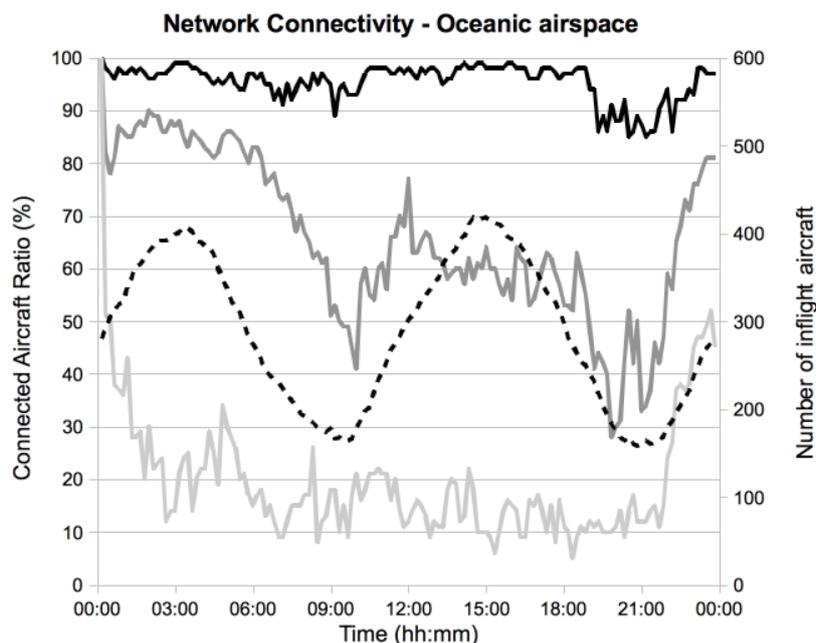


FIGURE 4.6: AeRAN - Connectivité en espaces aériens océanique atlantique nord

tion des journées retenues, le nombre moyen d'avions connectés pour un nombre de saut. Les portées maximales supposées pour permettre la connexion entre deux noeuds sont celles permettant de garantir 90% d'avions connectés dans les espaces aériens français et océanique nord (respectivement 150 km et 350 km). Les résultats sont données dans le tableau 4.2.

	1 hop	2 hops	3 hops	≥ 4 hops
Continental (comm. range : 150km)	29.9	42.1	23.2	4.8
Oceanic (comm. range : 350km)	41.7	27.2	5.8	25.2

TABLE 4.2: Ratio d'avions connectés (%) / distance à une station sol

Ces résultats montrent que même si beaucoup d'avions sont directement connectés à une station sol, l'approche originale proposée multisaut permettrait de connecter une forte proportion d'avions (plus de 2/3 en espace continental et plus de la moitié en espace océanique) non directement couverts.

Ainsi, ces résultats concernant la connectivité laissent entrevoir tous les bénéfices de cette approche innovante et ce d'autant que le coût attendu serait relativement compétitif (infrastructure sol plus légère que pour un système exclusivement cellulaire et équipements bord simple).

4.4 Système proposé

Le réseau ad hoc considéré est basé sur des liens radio entre les noeuds (avions et stations sol) et les couches d'accès doivent pouvoir prendre en compte la topologie dynamique du réseau. Les couches d'accès définissent, entre autres, la façon de partager la capacité offerte entre les noeuds candidats en association avec une méthode d'accès. Concernant le partage de la ressource radio, les méthodes existantes sont basées sur une (ou une combinaison) de ces 3 approches.

- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- TDMA (Time Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)

Compte-tenu de la nature décentralisée (ou répartie) du réseau et nombre important de connexions à envisager, l'approche basée sur un découpage en fréquence ne semble pas pertinente puisqu'elle impliquerait une allocation de capacité relativement faible à chaque noeud. La deuxième approche basée sur un découpage en créneaux temporels poserait les problèmes délicats de la synchronisation des horloges des équipements de communication de tous les noeuds du système et de la définition du format de trames retenu avec les temps de garde qui s'imposent. Aussi, l'approche CDMA nous a paru plus adéquate. De plus, afin de prendre en compte la nature décentralisée du réseau, il semble préférable d'adopter une méthode d'allocation aléatoire plutôt qu'à la demande (DAMA, Demand Assignment Multiple Access) qui nécessiterait d'identifier un ou plusieurs noeuds qui traiteraient et répondraient aux requêtes.

Ainsi, la solution retenue est un accès aléatoire basé sur un partage par étalement de spectre par séquence directe multi-utilisateurs (DS-CDMA). Cette technique permet d'avoir plusieurs connexions effectives entre des noeuds d'une même zone tout en limitant les interférences (MAI, Multiple Access Interference). Les avantages du CDMA sur le CSMA (Carrier Sense Multiple Access) ont par exemple été mis en évidence dans [62]. De plus, on peut citer plusieurs systèmes pour lesquels cette approche a été retenue pour les avantages précédemment énoncés. Les réseaux cellulaires de 3^{ème} génération UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) en font partie. Mais, compte-tenu du contexte, le système de communication aéronautique par satellite IRIS [63] est plus intéressant. Effectivement, ce système pour lequel le DS-CDMA a été adopté, montre l'adéquation de l'approche au profils des trafics de données supposés qui sont a priori les mêmes que dans les AANET que nous envisageons. Les choix technologiques du système IRIS Antares soulignent l'importance d'une méthode d'accès par contention, ou non coordonnée, pour les accès à la ressource dans ce contexte aéronautique.

Dans notre proposition, le format des transmissions est étroitement dérivé de celui défini pour les voies montante dans les réseaux UMTS, c'est-à-dire des terminaux mobiles vers la station de base. L'utilisation d'une modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) et de la méthode d'étalement de spectre à séquence directe permet de créer simultanément deux canaux physique indépendants généralement connus par canal I (in phase) et canal Q (quadrature phase). Le premier peut être vu comme le canal données (data) et utilise un code à longueur variable spécifique à un lien entre deux noeuds, et le

second comme un canal de signalisation utilisant un code d'étalement commun à tous les noeuds. Le canal de signalisation est alors certainement plus exposé aux interférences, compte-tenu du code unique, mais comme la capacité nécessaire est relativement faible sur ce dernier nous pouvons envisager un code d'étalement relativement long.

La capacité de ce type de systèmes est conditionnée par le niveau d'interférence sur le canal de données. Plusieurs études théoriques existent sur le DS-CDMA comme par exemple [64]. La faisabilité d'un réseau ad hoc sans fils pleinement asynchrone a été étudiée dans [65]. Sur la base de simulations menées à l'aide du logiciel Matlab, les auteurs étudient l'influence de plusieurs paramètres tels que le nombre de noeuds, la distance entre les noeuds, la longueur du code d'étalement, ou encore le nombre de connexions simultanées au niveau de chaque noeud. L'utilisation de deux canaux physique pour la gestion du DS-CDMA dans les couches d'accès a été exposée dans [66]. Cependant, l'estimation du niveau d'interférence dans le contexte qui nous intéresse suppose de considérer un nombre important de noeuds (jusqu'à 600 avions simultanés dans le ciel français) et des liens dynamiques. Nous avons traité ce dernier point à l'aide d'un modèle de simulation développé avec le logiciel Opnet. Ce modèle nous a permis d'évaluer l'impact des MAI (Multiple Access Interferences) sur les paquets de données émis dans un contexte aéronautique pour des flux de données ATSC/AOC durant une journée dans le ciel français.

Un paramètre important d'un système CDMA est le facteur d'étalement qui représente le ratio entre le débit des données codées et le débit chip à l'entrée du modulateur. Dans nos hypothèses nous retenons une largeur de bande de 20 MHz. Avec l'utilisation d'une modulation QPSK le débit symbole est de l'ordre de 16 Msps si on considère un roll-off de 0,25 (paramètre du filtre global de mise en forme). Le facteur d'étalement a été fixé à 16 comme valeur hypothétique, il en résulte une capacité des liens égale à 1 Mbit/s. L'effet du facteur d'étalement sur les atténuations dues aux interférences a été étudié de façon à prendre en compte la densité d'avions.

4.5 Etude des performances

4.5.1 Evaluation de la capacité disponible

Afin d'évaluer la capacité disponible dans le pire cas, c'est-à-dire lorsque tous les noeuds émettent en continu et autant qu'ils le peuvent, nous avons fait l'hypothèse de sources basées sur le protocole TCP. L'idée est de profiter ainsi de la capacité d'autorégulation de ce protocole de niveau transport et notamment de son équité lorsque plusieurs flux sont en concurrence afin d'estimer la capacité minimale qui pourrait être attendue depuis chaque avion. Pour ce faire, un modèle de simulation spécifique a été développé à l'aide du logiciel Opnet Modeler (Riverbed), qui est un logiciel de simulation à événements discrets de réseaux de communication. Dans ce modèle, les paramètres d'entrée principaux sont le nombre de noeuds (avions et stations sol) et les positions des avions qui sont définies suivant la même méthode que celle décrite dans la partie 3.2.3.1. Concernant les paramètres de couche physique, la capacité des liens est fixée à 1 Mbit/s.

Pour déterminer la capacité moyenne disponible pour par avion, il faut aussi choisir un chemin depuis chacun vers une station sol. Comme première approche, nous utilisons le chemin le plus court vers la station la plus proche donné par l'algorithme de Dijkstra. On obtient ainsi une liste de liens représentant le chemin depuis un avion vers une station sol. La distance maximale pour qu'un lien soit possible entre deux noeuds (la portée de la communication) est un paramètre de la simulation.

A chaque instant de la simulation, nous considérons un graphe dont les sommets sont les avions et les stations sol et dont les arêtes sont les connexions disponibles entre eux au regard de la portée maximale. Nous faisons aussi l'hypothèse que les stations sols sont interconnectées directement ou indirectement entre elles par une infrastructure de réseau terrestre. Ce graphe est re-évalué périodiquement (toutes les 15 secondes) et l'algorithme de Dijkstra est utilisé pour trouver dans le graphe le chemin le plus court entre chaque avion et une station sol.

Et concernant le niveau applicatif, comme l'objectif de cette partie de l'étude est d'évaluer la capacité disponible pour chaque avion, nous avons retenu des sources TCP "gloutonnes" (TCP Greedy sources). De telles sources génèrent des nouveaux segments TCP dès que ceux précédemment envoyés sont acquittés. Ainsi, les données sont générées au débit le plus élevé possible compte-tenu de la congestion du réseau.

La table 4.3 montre les principaux résultats obtenus après une campagne de simulation. Ils permettent d'analyser les différents contextes retenus. Dans l'espace continental français, le débit moyen par avion est de 38,3 Kbit/s avec un délai d'acheminement de paquet maximum de bout en bout de 551 ms pour 95% des paquets et un délai moyen de 401 ms. Pour l'espace aérien océanique considéré, le débit moyen par avion est de 68,2 Kbit/s avec un délai d'acheminement de paquet maximum de bout en bout de 426 ms pour 95% des paquets et un délai moyen de 184 ms. Ces différences de performances entre l'espace aérien continental et océanique s'expliquent principalement par le fait que dans le corridor atlantique nord le nombre maximum d'avions simultanés est de l'ordre de 400 (avec une moyenne de 275 avions) pour 8 stations sol. En comparaison, dans le ciel français continental, le PIAC (Peak Instantaneous Aircraft Count) est d'environ 600 avions (avec une moyenne de 500 avions entre 6h et 21h) pour 5 stations sol.

	Mean aircraft throughput	Max delay 95% pk (ms)	Mean delay (ms)
Continental	38.3	551	401
Oceanic	68.2	426	184

TABLE 4.3: Capacité disponible et délai de bout en bout - Routage simple basé sur le chemin le plus court

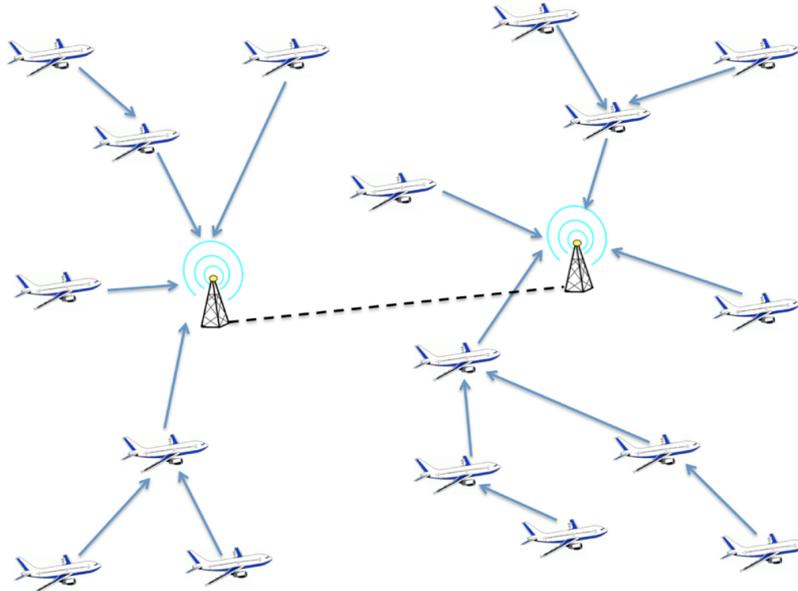
Les capacités disponibles observées peuvent sembler relativement faibles par rapport aux capacités généralement proposées sur des réseaux terrestres que nous utilisons parfois au quotidien. Cependant il convient de tenir compte de plusieurs points. Tout d'abord, ces résultats sont ceux obtenus dans un pire cas puisque nous avons fait l'hypothèse de flux TCP continus modélisés avec des source gloutonnes. Par

ailleurs, ces capacités comparées à celles des systèmes de communication sol bord connus ou en cours de développement soulignent l'intérêt de l'approche multisaut envisagée. Par exemple, le futur système de communication par satellite en bande L dédié aux communications aéronautiques opérationnelles et conçu par l'ESA dans le programme IRIS devrait proposer une capacité de 1 Mbit/s. Mais cette ressource sera partagée par le nombre d'avions couverts par le système qui peut dépasser les 500. Dans ce cas la capacité effectivement disponible par avion ne serait alors que de 2 kbit/s maximum avec des sources gloutonnes. Pour le système continental VDL mode 2 encore en cours de déploiement en Europe dans certaines zones, la capacité totale proposée est de 31,5 kbit/s partagée entre tous les avions couverts par une cellule. Compte-tenu de la portée de ce système (200 NM), il est admis que 200 avions pourraient être en communication avec une station sol VDL mode 2. Encore en cours d'étude dans le contexte du projet Sesar, le système continental LDACS-2 devrait offrir une capacité de 270 kbit/s pour la même portée que la VDL mode 2. Là encore avec un PIAC de 200 avions, la capacité effective par avion serait bien en-dessous de celle attendue dans notre système.

Aussi, à ce stade d'étude, les communications sol bord basées sur un réseau Ad hoc aéronautique représentent une solution innovante et très intéressante, qui plus est au regard des coûts de déploiement et opérationnels attendus.

4.5.2 Routage hiérarchique basé sur un clustering

Dans la partie précédente, la méthode retenue pour déterminer le chemin le plus court entre chaque avion et le sol, et donc le prochain relais, était basée sur un routage à plat utilisant l'algorithme de Dijkstra. Dans cette partie j'expose les résultats obtenus lorsque les performances, et notamment, la capacité disponible pour chaque avion, sont estimées avec l'hypothèse d'un routage hiérarchique. Pour cela nous avons modélisé une variante des scénarios de simulation présentés dans la partie précédente dans laquelle les noeuds sont organisés en groupes (clusters). Bien sûr, comme expliqué dans [67], dans les réseaux Ad hoc il existe plusieurs façons avec différents critères permettant de décider quels sont les noeuds appartenant à un même groupe et lequel est tête de groupe (cluster head). Dans notre cas, les clusters sont formés sur la base des positions de noeuds du réseau. Ainsi, tous les avions volant à un moment donné dans une zone d'une taille prédéfinie appartiennent à un même groupe. Cette approche n'est certainement pas optimale mais elle doit juste nous permettre d'estimer le gain de performance que nous pouvons attendre d'un routage hiérarchique sur la base de clusters. Les avions d'un même cluster ne communiquent qu'avec le noeud de leur groupe désigné cluster head en utilisant une bande de fréquence dédiée B_{intra} pour les communications avions intra cluster. Et les cluster heads utilisent une autre bande de fréquence B_{inter} dédiée aux communications entre les groupes d'avions. On peut souligner que si nous considérons la bande totale B utilisée et partagée pour tous les avions dans le scénario de la partie 4.5.1, nous avons $B = B_{intra} + B_{inter}$. Ainsi, nous définissons un réseau cellulaire pour chaque cluster et nous obtenons un nouveau réseau ad hoc composé des cluster heads utilisant les liens inter cluster pour trouver le chemin le plus court vers une station sol basé sur l'algorithme de Dijkstra. Les figures 4.7 et 4.8 montrent les deux approches considérées pour le routage des données

FIGURE 4.7: *Routage simple basé sur le chemin le plus court*

depuis les avions vers les stations sol.

Nous avons d'abord étudié le paramètre que représente la taille ou portée des clusters. Les meilleures performances ont été observées pour des clusters de 150 km et 200 km pour respectivement les espaces aériens continentaux et océaniques considérés. Concernant la répartition de bande entre les liens inter et intra clusters, les meilleurs résultats ont été obtenus pour un ratio de 0,4 et 0,6.

La table 4.4 montre les résultats obtenus après une campagne de simulation en terme de débit moyen attendu par avion et le délai de bout en bout (avions à station sol) correspondant.

	Mean aircraft throughput	Max delay 95% pk (ms)	Mean delay (ms)
Continental	42.7	872	432
Oceanic	68.3	390	93

TABLE 4.4: *Capacité disponible et délai de bout en bout - Routage hiérarchique*

Comme dans le cas du routage simple, avec du routage hiérarchique nous voyons que la capacité moyenne finalement disponible pour chaque avion est plus importante dans l'espace aérien océanique. Mais les conclusions diffèrent en zone continentale. Dans ce cas le routage hiérarchique permet un gain de 11,5 % sur le débit moyen attendu par avion. Dans le contexte océanique, même si le délai est divisé par deux avec le routage hiérarchique, le débit moyen attendu par avion est sensiblement le même. Ce dernier point peut s'expliquer par le fait que les deux espaces aériens considérés ont

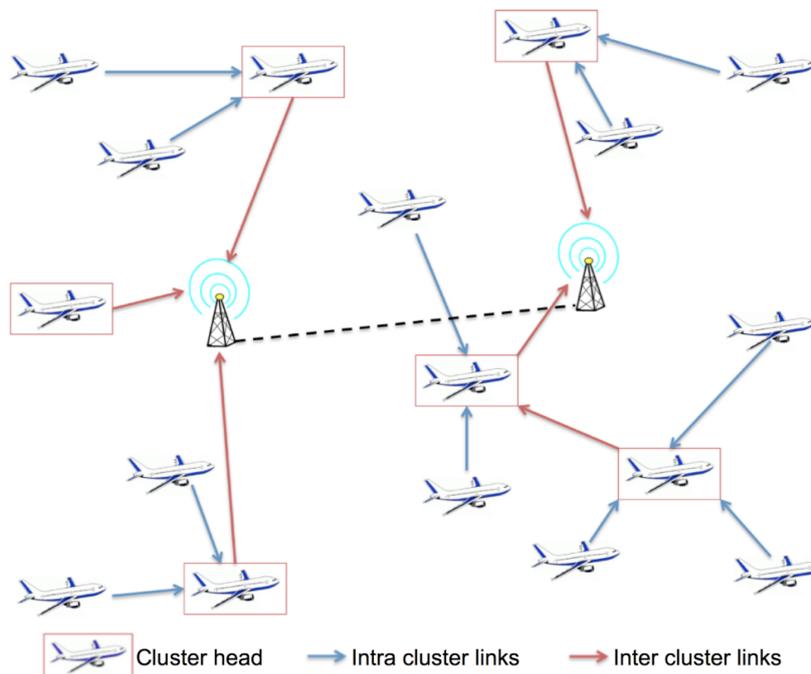


FIGURE 4.8: Routage hiérarchique

des caractéristiques et des propriétés différentes comme par exemple le nombre de vols, le nombre de stations sol et surtout la géométrie des trajectoires des avions. Comme expliqué précédemment, les trajectoires en zone océanique sont organisées relativement aux NAT (North Atlantic Tracks) alors qu'au dessus de l'Europe et la France ces trajectoires sont plus mélangées.

Enfin, il est important de souligner encore que les résultats sont ceux obtenus dans un pire cas puisque nous avons fait l'hypothèse de flux TCP continus modélisés avec des source gloutonnes. Effectivement, nous savons que dans le cas des applications ATSC/AOC par exemple pour lesquelles, ce type de système de communication innovant présenterait un intérêt, les profils de trafic obtenus sont beaucoup plus sporadiques.

4.5.3 Evaluation des performances avec une application réaliste

Enfin, nous avons choisi d'étudier les performances du système avec une application réaliste. Nous avons retenu une application proposée par le Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA) qui est l'autorité responsable des enquêtes de sécurité dans l'aviation civile en France. L'objectif principal de cette application est de faciliter la récupération des données des enregistreurs de vol, plus connus sous le nom de "boîtes noires", qui équipent les avions et enregistrent pendant le vol des données destinées à être utilisées après un accident ou un incident. L'idée consiste à envoyer périodiquement des paramètres du vol vers le sol pendant les vols océaniques. L'ensemble de paramètres le plus lourd qui pourraient être

envoyés chaque seconde représente un volume de 12,288 kbits. Nous avons donc modifié les sources de trafic de notre modèle de simulation de manière à ce qu'elles génèrent ce volume de données toutes les secondes. Il s'agit là de sources de trafic beaucoup plus sporadiques que celles utilisées dans la partie précédente avec les sources TCP gloutonnes. Les résultats des simulations montrent que tous les paquets envoyés sont délivrés à une station sol avec un délai maximum de 178 ms pour 95% des paquets. Ainsi, nous pouvons affirmer que dans ce cas précis notre système de communication sol bord multisaut basé sur un réseau Ad hoc aéronautique est compatible avec l'application réaliste considérée.

Bilan et perspectives

Sommaire

5.1	Bilan	108
5.2	Autour des AANets	109
5.2.1	Routage à base de contenu	109
5.2.2	Le partage de la ressource et le routage	112
5.3	Des moyens de communication pour l'aviation générale	115
5.4	Optimisation de l'utilisation des ressources en environnement multilien	116
5.5	Les réseaux de capteurs pour la surveillance aéroportuaire	117
5.6	Les communications aéronautiques globales du futur	119

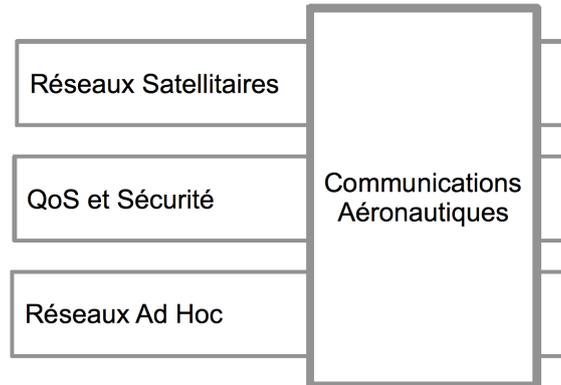


FIGURE 5.1: Domaines Réseaux et domaine d'application

5.1 Bilan

A ce stade de ma carrière, et notamment depuis mon arrivée à l'Enac en février 2003, j'ai pu m'investir à travers mes travaux de recherche dans différents domaines réseaux et notamment leur application au contexte des communications de données aéronautiques. Comme montré dans la figure 5.1, ils sont au nombre de 3 principaux.

Ces travaux m'ont permis de participer directement à plusieurs projets et de contribuer à des domaines réseaux avec des partenaires extérieurs ou des collègues de mon équipe. Ces contributions ont fait l'objet de publications dans des conférences ou revues internationales avec comités de relectures. Ces publications sont rappelées dans la partie 1.2 de ce mémoire.

Concernant les réseaux satellitaires, nous avons proposé une architecture originale et spécifique pour les communications de données sol bord aéronautiques dans un contexte de plusieurs services hétérogènes en termes de propriétés, de priorités, et de qualité de service. Ce travail s'inscrivait dans le cadre d'une thèse de doctorat que j'ai co-encadrée. Nous avons ainsi démontré la faisabilité de ce type de système basé sur un lien unique tout en assurant un premier niveau de ségrégation logique des flux et les QoS requises. Il est à noter que la démonstration de cette notion de ségrégation logique totale est très attendue chez les industriels et que c'est notamment une des raisons qui fait qu'aujourd'hui l'utilisation de systèmes physiquement différents est encore préférée pour les services critiques et les services non critiques.

Dans le cadre des travaux propres de l'équipe ResCo, nous avons aussi mené une nouvelle étude prenant en compte les dernières version du protocole TCP afin de vérifier par une méthodologie originale le gain apporté par une approche PEP (Performance Enhancement Proxy) dans le cas de réseaux d'accès par satellite.

Nous avons proposé une méthode d'estimation des ressources nécessaires pour les communications aéronautiques par satellite en zone océanique basée sur les derniers systèmes de communication satel-

litaires en bande Ka. L'approche originale repose notamment sur l'utilisation des positions pseudo-réelles des avions et la comparaison entre un système satellitaire existant et un hypothétique plus spécifiquement dédié aux communications dans le corridor nord Atlantique.

Enfin, à travers le projet FAST et plus particulièrement la thèse de Slim Ben Mahmoud que j'ai encadrée, nous avons proposé la mise en oeuvre d'une politique de sécurité adaptative prenant en compte le niveau de sécurité minimum requis par chaque flux applicatif, mais aussi les ressources disponibles ainsi que la qualité de service requise. Cette méthode a été détaillée et évaluée soulignant ainsi sa faisabilité et le gain attendu.

Mais, à ce stade de mes travaux de recherche, la contribution la plus originale reste certainement la proposition d'un nouveau système de communication sol bord multisaut basé sur les réseaux ad hoc aéronautiques. Ce thème a fait l'objet d'une première thèse soutenue par l'industriel Thales et que j'ai co-encadrée. Ces premiers travaux ont permis de montrer que ce type de système pouvait être envisagé et quelles seraient les performances attendues au regard de premières hypothèses. Une deuxième thèse a débuté au mois de novembre 2013 avec pour objectif principal de déterminer une politique de routage en adéquation avec les propriétés du système. Il est important de souligner tout l'intérêt que suscite ces travaux ainsi que les nombreuses pistes de travaux de recherches supplémentaires qu'ils ouvrent. Certains sont évoqués dans la partie suivante qui présente des axes de recherche et perspectives à court terme puis à plus long terme autour de la **conception et l'optimisation d'architectures réseaux pour les systèmes de communication aéronautiques**.

5.2 Autour des AANets

5.2.1 Routage à base de contenu

En s'appuyant sur nos connaissances et notre expérience sur les réseaux ad hoc aéronautiques, nous avons eu l'idée de démarrer de nouveaux travaux sur le routage à base de contenu dans ce type de système de communications. Cette piste fait l'objet d'une thèse de doctorat que je co-encadre avec Fabien Garcia, enseignant chercheur dans mon équipe. L'objectif premier est de proposer ainsi des échanges point à multipoint tout en optimisant l'utilisation des ressources. On peut souligner que ce type de problématique a déjà fait l'objet de travaux dans un autre sous-domaine des réseaux ad hoc, celui des VANET (Vehicular Ad hoc Networks). Au début de ces travaux, et comme le montre le tableau 4.1, nous avons montré qu'il y a finalement assez de propriétés communes entre ces deux classes de réseaux pour considérer les AANETs comme une sous-catégorie des VANETs. Ainsi il est pertinent que les solutions proposées dans l'un des systèmes, notamment en matière de routage point à multipoint, soient évaluées dans l'autre.

Le principe du routage à base de contenu est donc de permettre la transmission des messages dans un réseau, dans notre cas ad hoc, non plus sur la base d'une adresse de destination tel que c'est fait généralement, mais sur la base du contenu du message considéré. Dans le domaine d'application choisi, les communications aéronautiques, ce type de fonctionnalité présente un intérêt certain. Il permettrait aux

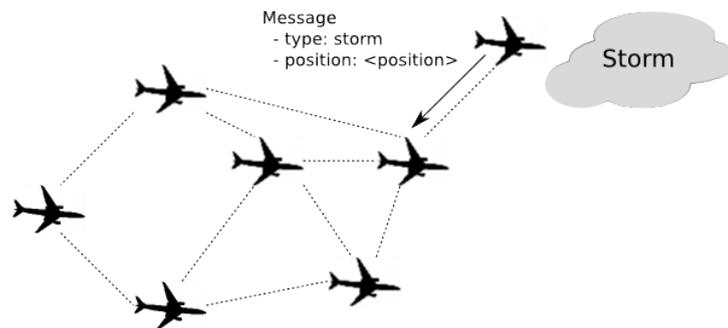


FIGURE 5.2: Exemple, alerte météo

avons d'envoyer ou de recevoir des informations qui les intéressent, ou en intéressent plusieurs, pendant le vol. On peut imaginer par exemple :

- **communications 1 avion vers n avions** : un avion qui durant son vol rencontre un évènement météo particulier peut en informer tous les avions, et uniquement ceux-ci, qui convergent vers cette position dans un certain délai (voir figure 5.2). Par exemple, une information météo importante pendant les vols est celle relative aux vents rencontrés. Parce qu'ils ont une influence sur les trajectoires choisies, aujourd'hui les prédictions concernant les vents sont faites par les centres météo au sol et fournies pour chaque vol pour définir leur trajectoire 4D. Afin d'avoir des estimations plus précises, l'envoi d'informations sur les vents effectifs rencontrés par un avion vers les suivants serait intéressant et a été identifié sous le nom de "wind networking" [68].
- **communications depuis le sol vers n avions** : un aéroport ayant un problème de piste soudain peut informer tous les avions, et uniquement ceux-ci, qui convergent vers ce dernier dans un certain délai (voir figure 5.3).
- **communication vers les avions d'une même compagnie** : une compagnie souhaite communiquer rapidement une information à l'ensemble de son personnel navigant.

Dans ces trois exemples, on comprend bien l'intérêt d'une décision d'acheminer, ou non, des informations vers plusieurs destinataires en fonction du contenu du message. On peut aussi y voir que les avions destinataires pourront être géographiquement regroupés ou éparpillés.

La plupart des implémentations existantes de routage à base de contenu se basent sur le paradigme de communications Publication/Souscription (P/S) présenté en figure 5.4. Toutefois, si l'efficacité de ce paradigme a été démontrée pour les réseaux avec infrastructure (par exemple dans [69]), les solutions qui en découlent ne sont pas adéquates pour les réseaux Ad hoc mobiles tels que le VANET comme expliqué dans [70]. Notamment, les besoins en communication des noeuds mobiles dépendent généralement de l'état du noeud, sa localisation et/ou son environnement. C'est pourquoi, des extensions particulières ont été proposées pour introduire cette notion de *contexte de noeud* (node context).

Plusieurs études et travaux récents ont permis de proposer des systèmes de communication P/S pour les VANETs. Ils peuvent être classés en trois classes :

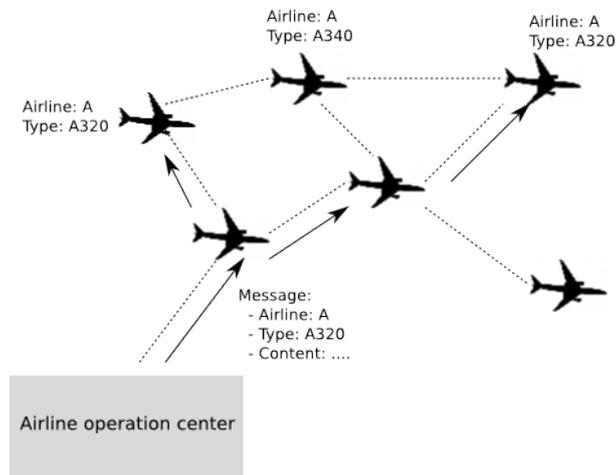


FIGURE 5.3: Exemple, message de la compagnie

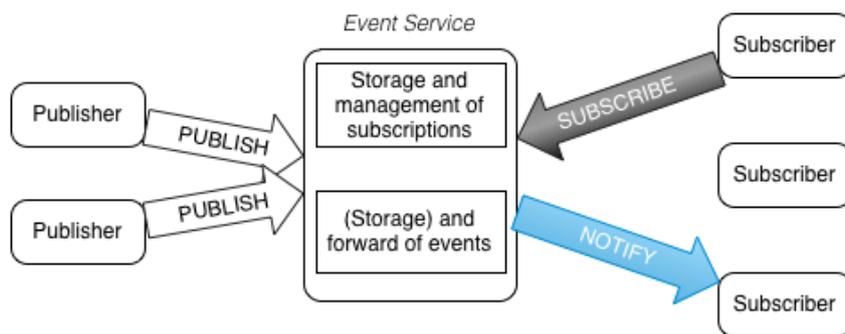


FIGURE 5.4: Paradigme publication/souscription

- les solutions basées sur du routage géographique, comme par exemple PCBD (Persistent Content-Based Dissemination) [71]. Dans ce cas la distribution des messages se fait par un routage géographique. Il faut souligner que cette solution suppose que chaque noeud est équipé d'un système de positionnement (ex : un récepteur GPS) et tous les événements sont relatifs à une position géographique.
- les solutions basées sur du routage de proximité, comme par exemple STEAM (Scalable Timed Events And Mobility) [72]. Dans ce cas, cette solution suppose que la plupart des noeuds intéressés par un événement sont relativement près du noeud qui le publie.
- les solutions basées sur une sur-couche (overlay), comme par exemple REDS (REconfigurable Dispatching System) [73]. Cette classe de solution introduit un nouvel élément dans l'architecture P/S appelé le *broker* (courtier) qui sont des entités responsables de l'expédition des événements depuis les publieurs vers les souscripteurs. Les brokers sont interconnectés formant ainsi une surcouche (overlay) dans la topologie.

A ce stade de l'étude, nous devons à présent vérifier les performances de ces solutions dans un contexte AANETs pour les adapter éventuellement ou en proposer une originale. La méthodologie retenue est basée sur des modèles de simulations permettant de tester le gain des solutions considérées, principalement en terme de taux de distribution et signalisation générée, relativement à une solution de référence basique telle qu'une simple diffusion totale.

5.2.2 Le partage de la ressource et le routage

Plus directement inscrit dans la suite des premiers travaux que nous avons menés sur les AANET, une nouvelle thèse que je co-encadre, a débuté en novembre 2014. Après la démonstration de faisabilité de ce type de système, l'estimation de ses performances, et la démonstration de son adéquation à une application réaliste, nous envisageons dans cette nouvelle étude de concentrer le travail sur le choix et la définition d'une technique de partage de la ressource puis surtout sur la définition d'un routage efficace et adapté aux spécificités de notre système.

Les raisons ainsi que quelques pistes d'investigations sont détaillées ci-après. Il est important de souligner que ce qui implique avant tout l'identification de solutions ou protocoles particuliers et adaptés, ce sont les spécificités du système et de son contexte relativement aux réseaux MANET ou VANET déjà identifiés.

- Nombre de noeuds : ce nombre est relativement élevé (jusqu'à 1600 avions simultanément en vol dans le ciel européen et 400 dans le corridor nord atlantique) requiert des protocoles évolutifs permettant un passage à l'échelle, en particulier pour la couche réseau qui se charge de définir les chemins et du réacheminement de paquets. Compte-tenu de la portée requise pour garantir un pourcentage d'avions connectés satisfaisant (350 à 400 km), le nombre de noeuds couverts peut aussi être important. Aussi, les solutions retenues pour les couches d'accès doivent elles aussi permettre un passage à l'échelle.
- Vitesse des noeuds : la vitesse de croisière d'un avion est d'environ 900 km/h pour l'aviation

commerciale et les longs courriers en particulier. Ce paramètre a un impact certain sur le canal physique de communication. Et il en sera de même pour l'algorithme de routage compte-tenu de l'incidence que cette vitesse aura sur la dynamique de la topologie du réseau.

- Distances géographiques : les distances entre noeuds communicants, ainsi que leur différences, peuvent être importantes et cela devra être pris en compte pour la définition des couches physique et liaison. La distance minimum peut être de 300 mètres, ce qui correspond à la séparation minimum verticale, et la portée maximale peut atteindre 400 kilomètres. Cette disparité dans les distances fait que le système pourra être sensible à un problème connu dans les réseaux sans fils appelé "near-far problem". Il s'agit de conditions particulières dans lesquelles un récepteur capture un signal fort en puissance et ne peut plus ainsi détecter un signal plus faible.

Concernant la couche physique la technique d'étalement de spectre à séquence directe (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum), qui est une technique utilisée dans les communications par satellite ou encore pour les réseaux sans fil tels que le Wi-Fi, est certainement une technique intéressante pour les communications inter-avions. Cette technologie, à présent mature, permet de récupérer des données reçues même s'il y a eu collisions sous certaines conditions. Le facteur d'étalement peut être adaptatif de façon à augmenter la robustesse, au dépend du débit binaire utile, pour tenir compte des conditions d'interférences. De plus, le contrôle automatique de puissance a aussi montré son utilité dans le contexte AANET [74]. En effet cette technique permet d'adapter la puissance d'émission au niveau précisément requis pour la transmission entre deux noeuds compte-tenu notamment de la distance entre les deux. Ainsi elle minimise les interférences pour des noeuds plus éloignés et il en résulte une amélioration des performances globales. Enfin, comme expliqué dans la partie 4.4, la méthode d'étalement de spectre à séquence directe permet de créer simultanément deux canaux physique indépendants connus par canal I (in phase) et canal Q. On peut ainsi garantir la ségrégation du trafic de données et de la signalisation avec un débit moindre mais une robustesse plus importante pour la signalisation.

Pour la couche MAC (Medium Access Control) qui gère les accès concurrents au canal par les différents noeuds, nous avons vu en 4.4 que les approches TDMA (Time division Multiple Access) et FDMA (Frequency Division Multiple Access) ne sont pas adaptées aux AANETs notamment compte-tenu des difficultés que représente l'allocation des ressources ou la synchronisation requise avec autant de noeuds. Le CDMA utilisé en DSSS présente plusieurs avantages pour les réseaux Ad hoc. Par exemple, le CDMA asynchrone (A-CDMA [75]) permet de récupérer certains paquets utilisant un code d'étalement commun en cas de collision, sous condition qu'ils soient reçus avec une différence temporelle. Autre exemple, le Cooperative CDMA-based Multi-channel Mac (CCM MAC [76]) a l'avantage du DSSS de pouvoir complètement discriminer deux paquets envoyés avec des codes d'étalement différents. Il peut aussi être amélioré par l'utilisation des canaux I et Q avec un code adaptatif.

Enfin, pour la couche réseau et plus précisément la définition d'un protocole de routage adapté, de nombreuses études ont déjà été menées dans le contexte général des réseaux Ad hoc mobiles (MANET) ou en particulier véhiculaires (VANET), mais aucune solution universelle n'a à ce jour été retenue. Ceci est principalement dû au fait de l'hétérogénéité des propriétés des différentes classes de

MANET. Toutefois compte-tenu des similarités mises en évidence entre les VANETs et les AANETs, les algorithmes de routage proposés pour la première catégorie représentent certainement un bon point de départ pour la définition d'un protocole de routage pour les AANETs. On constate que les solutions proposées peuvent être classées suivantes 3 grandes catégories :

- **Les approches proactives** : les différentes routes dans le réseau sont préalablement calculées, et ce même si aucun paquet ne doit être ensuite envoyé sur l'une ou l'autre. Il présente l'avantage d'être relativement réactif au moment de l'émission d'un paquet mais le trafic de signalisation engendré est plutôt important compte-tenu de la nécessité de calculer les routes au préalable et ensuite de les maintenir dans une topologie dynamique.
- **Les approches réactives** : les routes dans le réseau sont calculées à la demande ou au besoin lorsque des données doivent être envoyées d'un point vers un autre. Ces algorithmes sont généralement moins réactifs au moment de la première émission d'un paquet entre une source et un destinataire mais le volume de trafic de signalisation généré est moins important. De plus, les ressources de calcul consommées sont moins importantes puisque seules les routes requises sont calculées.
- **L'approche hybride** : Cette approche combine les stratégies proactives et réactives. Dans ce cas, le réseau est découpé en plusieurs zones. Ces approches utilisent alors un protocole proactif pour découvrir le voisinage proche par exemple à deux sauts ou trois sauts. Pour atteindre des noeuds au-delà de cette zone, le protocole hybride applique alors une approche réactive.

De plus, la topologie logique du réseau peut être considérée comme "à plat" ou hiérarchique lorsqu'il y a un découpage logique en différentes zones. Mais quelque soit la philosophie retenue, un protocole de routage peut utiliser généralement une ou plusieurs métriques ou critères différents pour déterminer les chemins que les données empruntent ensuite dans le réseau. Voici quelques exemples de ces métriques (ou critères) et des protocoles existants associés :

- **Nombre de saut** : l'intérêt de minimiser le nombre de saut est de réduire les délais de bout en bout et de limiter la probabilité de collision. Exemple : le protocole réactif AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector).
- **Répartition de charge** : un autre moyen de limiter les délais de bout en bout consiste à adopter un protocole de routage assurant une répartition de la charge globale sur les différents liens du réseau Ad hoc. Exemple : le protocole GLSR (Geographic Load Share Routing), on peut noter que ce dernier étant un protocole géographique, on suppose que chaque noeud est équipé d'un système lui permettant de connaître sa position et qu'il partage cette information.
- **Stabilité des liens** : un protocole privilégiant des liens stables (i.e. vers des noeuds se déplaçant dans même direction que lui) va augmenter la stabilité des routes calculées et ainsi réduire les temps de traitement et la signalisation nécessaire lorsqu'une nouvelle route apparaît. Les liens stables peuvent être choisis par la mesure de l'effet Doppler qui permet de déterminer les vitesses radiales. Exemple : le protocole MUDOR (Multipath Doppler Routing).

Comme nous le soulignons ici, la définition des couches d'accès et d'un protocole de routage adapté

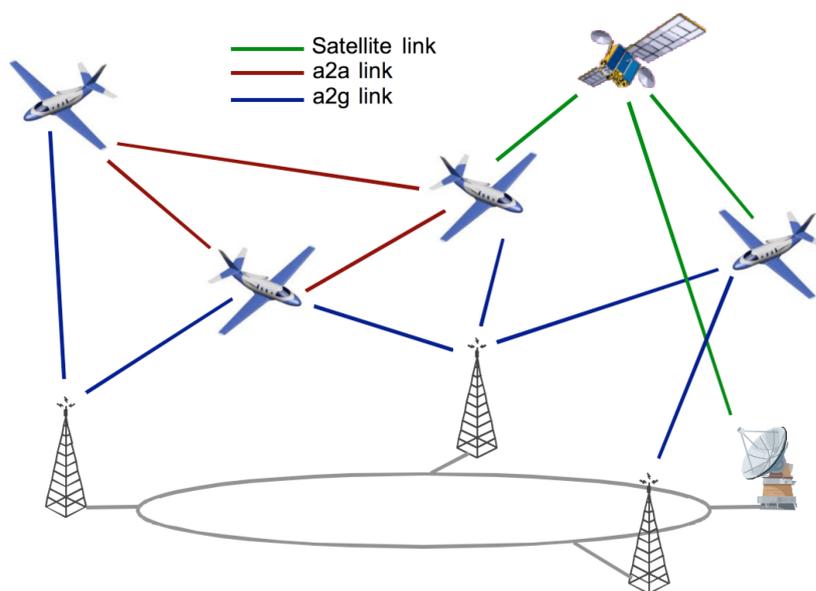


FIGURE 5.5: Infrastructure de communication pour l'aviation générale

aux réseaux AANET est un axe de recherche encore totalement ouvert et présente des challenges intéressants.

5.3 Des moyens de communication pour l'aviation générale

L'aviation générale concerne les activités aériennes civiles autres que l'aviation commerciale. Sans être exhaustif, on peut citer par exemple l'aviation sportive, de loisir, les secours, la formation des pilotes, ou encore l'aviation d'affaires. Notre implication récente dans un projet de recherche nous a permis de mesurer les attentes du monde de l'aviation générale concernant notamment les communications sol bord. Ce projet, AGATHA (Assessment of General Aviation and Small Airport Technology Innovation and Adaptions for Harmonization of the ATM System), s'inscrit dans le contexte des travaux à long termes du projet Européen SESAR. Il vise à identifier les besoins spécifiques de l'aviation générale en terme de communication, navigation, et surveillance puis à définir les systèmes adéquats qui pourraient être proposés pour répondre à ces besoins. L'objectif principal est ainsi de permettre une harmonisation et une interopérabilité entre les mondes de l'aviation générale et aviation commerciale. Nous sommes plus particulièrement investis sur l'identification des besoins en communication et la définition des systèmes de communication sol bord.

Pour la partie communication nous avons proposé, à l'instar de ce qui est envisagé pour l'aviation commerciale, une infrastructure de communication (FCI, Future Communication Infrastructure). Comme le montre la figure 5.5, cette infrastructure serait basée sur différents liens sol bord afin de garantir une disponibilité satisfaisante : des liens directs basés sur des systèmes tels que ceux déployés pour la

téléphonie mobile 3G ou 4G (a2g, air to ground links), des liens directs par satellite pour les sous-classes de l'aviation générale pouvant en supporter le coût (satellite links), des liens multisauts basés sur les réseaux ad hoc aéronautiques (a2a, air to air links).

A ce jour nous avons surtout porté nos efforts sur l'étude des performances de la LTE (aujourd'hui pour la 4G) dans le cas où elle serait utilisée comme moyen de communication sol bord pour l'aviation générale. L'idée serait de pouvoir déployer à terme une AeroLTE spécifiquement conçue et paramétrée pour les besoins identifiés dans AGATHA. Les applications pertinentes au regard des zones de vols et autres propriétés de l'aviation générale ayant été définies en amont, nous avons tout d'abord estimé par des modèles de simulations spécifiquement développés les besoins en terme de débit et capacités. Puis, nous avons estimé les performances que nous pouvions attendre de la LTE lors d'une campagne de vols au-dessus de Toulouse et sa région. Même si nous utilisons en l'occurrence un système non adéquat, l'idée était d'avoir une première estimation des performances que nous pourrions attendre d'un système AeroLTE dédié et spécifique notamment au regard des antennes sol et de leur diagramme de rayonnement. Les premiers résultats sont très encourageants et laissent entrevoir de multiples nouvelles pistes d'investigation et de recherche.

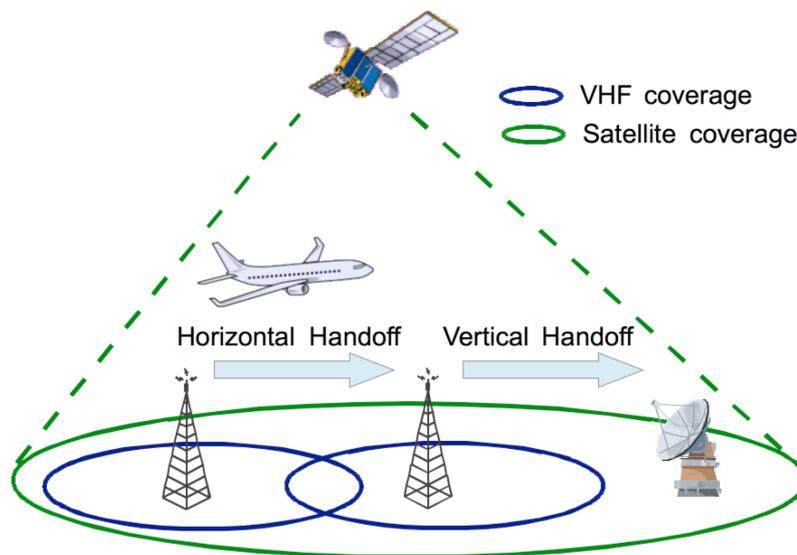
Par ailleurs, l'axe de recherche concernant les liens multisaut basés sur les AANET pour l'aviation générale, n'en est qu'au démarrage. Et là encore beaucoup de pistes doivent être explorées autour par exemple de l'interopérabilité avec un système similaire de l'aviation commerciale.

5.4 Optimisation de l'utilisation des ressources en environnement multi-lien

Comme expliqué et détaillé en 2.5 et 2.6, l'une des propriétés des communications de données sol bord est qu'elles sont basées sur plusieurs liens différents. Chaque avion est ainsi équipé de plusieurs systèmes de communication afin principalement de garantir une disponibilité très élevée telle qu'elle est requise par les services applicatifs notamment pour les services critiques. Cependant, la sélection d'un lien en particulier, VHF ou Satcom par exemple, durant le vol n'est pas encore automatisée et transparente comme on pourrait s'y attendre. Par analogie, on peut souligner qu'on retrouve cette problématique par exemple dans le contexte quotidien des téléphones mobiles qui ne sélectionnent pas automatiquement un mode de communication ou un autre (Wifi, 3G, 4G,...).

Il existe des axes de recherches inhérents à ces environnements multilien. On peut citer par exemple :

- Les avantages d'un système de détection et de choix d'un lien permettrait certainement une meilleure utilisation des ressources tout en assurant la disponibilité. Ce système automatique pourrait être "débrayable" pour les situations d'urgence dans le contexte aéronautique. De plus, cette approche pourrait aussi permettre une meilleure gestion globale des ressources dans le système en répartissant par exemple la charge globale induite par l'ensemble des noeuds sur les différents liens ("load balancing") lorsque c'est possible, et tout en tenant de la QoS requise par les différents services concurrents.

FIGURE 5.6: *Handoff horizontal et handoff vertical*

- La continuité des communications dans un contexte multilien constitue aussi un domaine à investiguer pour définir des méthodes permettant d'assurer que les communications qui changeraient automatiquement de type de lien puissent retrouver leur contexte pour que la procédure reste aussi transparente que possible pour l'utilisateur final. Comme à chaque fois dans le domaine aéronautique, cette problématique connue aussi sous le nom de "hand-off verticaux" et illustrée en figure 5.6, doit être prise en considération sans omettre les contraintes spécifiques et élevées du contexte.

Comme l'explique [77], la problématique des handoff verticaux et les solutions qui pourraient être proposées sont motivées aussi par la convergence de plus en plus marquée vers le *tout IP* et notamment avec l'hétérogénéité des réseaux sans fils existants. Ce même article précise que même si quelques solutions ont déjà été proposées la recherche sur les mécanismes de décision de handoff vertical reste un axe de recherche ouvert.

5.5 Les réseaux de capteurs pour la surveillance aéroportuaire

Les axes de recherche autour des réseaux de communication dans le domaine aéronautique ne sont pas exclusivement concentrés sur les problématiques de communications sol bord. Nous envisageons actuellement de démarrer des travaux dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil étendus dédiés aux collectes de données environnementales avec comme domaine d'application la surveillance des pistes aéroportuaires. L'idée consiste à prévoir des capteurs organisés en réseaux sans fils et qui seraient implantés à des endroits particuliers tels que le bord des pistes. Ils permettraient la collection d'au moins

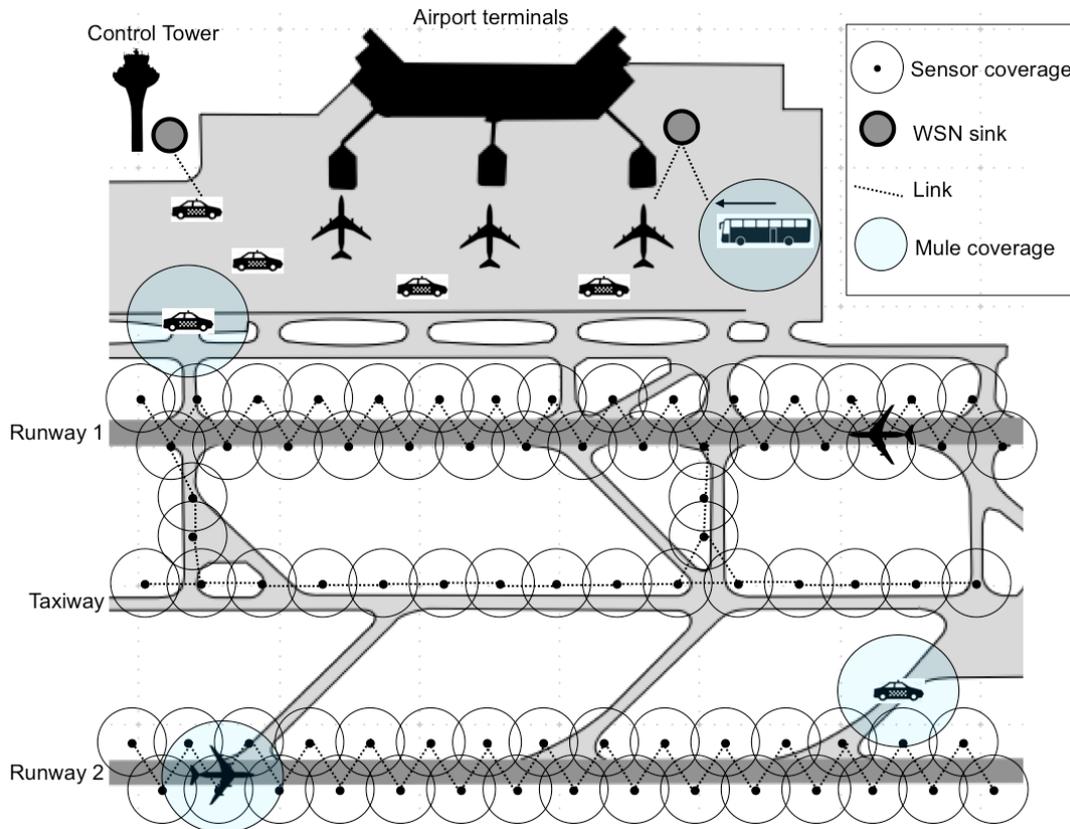


FIGURE 5.7: Surveillance Aéroportuaire par réseaux de capteurs sans fils

deux classes de données :

- Données critiques (pour la sécurité aérienne) : détection de défaut de piste, d'objets, d'animaux mais aussi mesure de la pression atmosphérique, détection de gel, ...
- Données non critiques (ou informatives) : niveau sonore, pollution, ... ou plus largement les données pour les mesures de nuisances.

Comme le montre la figure 5.7, compte-tenu des superficies des aéroports et aérodromes, les réseaux de capteurs déployés seront certainement composés de plusieurs sous-ensembles disjoints donc de type SS-WSN (Spatially Separated Wireless Sensor Networks). Comme l'explique [78], ce type de topologie requiert le plus souvent d'avoir recours à des noeuds mobiles particuliers appelés "data mule" et dont la fonction principale est la récolte des données des capteurs. Ces noeuds mobiles sont parfois des véhicules qui peuvent être dédiés à cette fonction de récolte. On peut aussi s'appuyer sur une approche opportuniste en utilisant des véhicules qui circulent dans le domaine du réseau de capteurs considéré. Comme l'explique [79], on parle alors de collection de données opportuniste.

Dans le contexte de notre domaine d'application aéroportuaire, la récolte des données pourrait être assurée par :

- des véhicules de services présents sur les zones,
- des autobus accompagnant les passagers jusqu'au avions,
- les avions eux-mêmes pendant le roulage arrivée,
- ...

Les verrous scientifiques sont plusieurs ordres, et pour chacune de ces problématiques la solution retenue doit prendre en compte la QoS requise par les différentes classes de flux de données. On peut citer par exemple :

- La détermination d'une méthode de partage de la capacité notamment dans un contexte LSN (Linear Sensor Network),
- L'identification ou la détermination d'un protocole de routage adéquat,
- La définition de mécanismes DTN (Disruption-Tolerant Networking) pour la prise en compte de la caractéristique ICN (Intermittently Connected Network) du système proposé,

5.6 Les communications aéronautiques globales du futur

Enfin, en guise d'épilogue, je voudrais souligner que les challenges de demain pour les réseaux et systèmes de communication aéronautique seront nombreux et imposés par la nécessité de converger vers des communications globales. Si aujourd'hui, comme je l'ai illustré dans ce mémoire avec l'aviation commerciale, les travaux de recherche s'inscrivent relativement à une classe d'aéronefs, il faudra immanquablement dans le futur proposer des solutions, mécanismes, protocoles permettant d'assurer une harmonisation et une interopérabilité entre les différentes classes (aviation commerciale, aviation générale, drones,...) et leurs systèmes. L'interconnexion de tous ces systèmes permettra d'optimiser l'utilisation des ressources, d'augmenter la robustesse globale du système et surtout d'accroître la sécurité des vols.

Bibliographie

- [1] T. Signore and M. Girard. *The aeronautical telecommunication network (ATN)*. In *IEEE Military Communications Conference (MILCOM 98)* (1998).
- [2] *Comprehensive aeronautical telecommunication network (ATN) manual. doc 9739*. Technical report, OACI (2001).
- [3] *Manual on the aeronautical telecommunication network (ATN) using internet protocol suite (IPS) standards and protocols. doc 9896*. Technical report, OACI (2010).
- [4] *Communications operating concept and requirements for the future radio system (COCR)*. Technical report, Eurocontrol/FAA (2002).
- [5] *Rapport du groupe de travail : Transmission déclenchée de données de vol*. Technical report, BEA, Bureau d'enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation Civile (2011).
- [6] *Regulatory best practices on the use of mobile phone on-board the aircraft. in aeronautical communications panel (ACP), 17th meeting of working group F*. Technical report, OACI (2007).
- [7] *Annexe 10 : Télécommunications aéronautiques*. Technical report, OACI.
- [8] *FANS 1/A over Iridium and performance-based concept recommendations*. Technical report, FAA (2010).
- [9] *End-user multimedia QoS categories. Serie G : Transmission and media, digital systems and networks - quality of service and performance, recommendation g.1010*. Technical report, ITU (2001).
- [10] W. Jones and M. de La Chapelle. *Connexion by Boeing - broadband satellite communication system for mobile platforms*. In *Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations : Creating the Information Force. IEEE* (2001), volume 2, pp. 755–758 vol.2.
- [11] *SESAR*. <http://www.sesarju.eu/>.
- [12] *NEXTGEN*. <http://www.faa.gov/nextgen/>.
- [13] R. Jain, F. Templin and K.-S. Yin. *Analysis of L-Band Digital Aeronautical Communication Systems : L-DACS1 and L-DACS2*. In *Proceedings of the 2011 IEEE Aerospace Conference* (IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2011), AERO '11, pp. 1–10.
- [14] *ETSI 300 421, Digital Video Broadcasting (DVB) ; framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services*. Technical report, ETSI (1997).
- [15] *ETSI 301 790 V1.4.1, Digital Video Broadcasting (DVB) ; interaction channel for satellite distribution systems*. Technical report, ETSI (2005).
- [16] *ETSI 101 790 V1.4.1, Digital Video Broadcasting (DVB) ; interaction channel for satellite distribution systems ; guidelines for the use of EN 301 790*. Technical report, ETSI (2006).

- [17] ETSI 302 307, *Digital Video Broadcasting (DVB); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications*. Technical report, ETSI (2006).
- [18] *DVB Document ETSI EN 301 545-2 v1.1.1 2008, digital video broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2)*. Technical report, ETSI (2008).
- [19] L. Brakmo, S. W.O'Malley and L. Peterson. *TCP vegas : New techniques for congestion detection and avoidance*. In *Proceedings of ACM SIGCOMM'94* (1994), pp. 24–35.
- [20] C.Casetti, M.Gerla, S.Mascolo, M.Y.Sanadidi and R.Wang. *TCP westwood : End-to-end congestion control for wired/wireless networks*. In *Wireless Networks* (2002), volume 8, pp. 467–479.
- [21] L. Xu, K. Harfoush and I. Rhee. *Binary increase congestion control (BIC) for fast long-distance networks*. In *INFOCOM* (2004), volume 4, pp. 2514–2524.
- [22] K. Tan, J. Song, Q. Zhang, and M. Shridaran. *Compound TCP : A scalable and TCP friendly congestion control for high speed networks*. In *INFOCOM* (2006).
- [23] I. Rhee and L. Xu. *CUBIC : A new TCP friendly high speed TCP variant*. In *INFOCOM* (2005).
- [24] C. Caini, R. Firrincieli and D. Lacamera. *PEPSal : a performance enhancing proxy designed for TCP satellite connections*. In *Vehicular Technology Conference* (2006).
- [25] *ETSI TS 101 545-1, digital video broadcasting (DVB), second generation dvb interactive satellite system, part 1 : Overview and system level specification*. Technical report, ETSI (2011).
- [26] *ETSI TS 101 545-2, digital video broadcasting (DVB), second generation DVB interactive satellite system, part 2 : Lower layers for satellite standard RCS2*. Technical report, ETSI (2011).
- [27] *ETSI TS 101 545-3, digital video broadcasting (DVB), second generation dvb interactive satellite system, digital video broadcasting (DVB), second generation DVB interactive satellite system ; part 3 : Higher layer for satellite standard RCS2*. Technical report, ETSI (2011).
- [28] P. Chitre, M. Karir and M. Hadjitheodosiou. *TCP in the IPsec environment*. In *AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit (ICSSC)* (2004).
- [29] G. Fairhurst and B. Collini-Nocker. *Extension formats for unidirectional lightweight encapsulation (ULE) and the generic stream encapsulation (GSE)*. Internet RFC 5163 (2008).
- [30] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang and W. Weiss. *An architecture for differentiated services*. Internet RFC 2475 (1998).
- [31] F. Garcia, A. Pirovano and M. Magnaudet. *Satellite link emulation platform for aeronautical application validation*. In *AIAA 28th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2010)* (2010).
- [32] G. Fairhurst and B. Collini-Nocker. *Unidirectional lightweight encapsulation (ULE) for transmission of IP datagrams over an MPEG-2 transport stream (TS)*. Internet RFC 4326 (2005).

- [33] G. Fairhurst and A. Matthews. *A comparison of IP transmission using MPE and a new lightweight encapsulation*. In *IP over Satellite - The next generation : MPLS, VPN and DRM Delivered Services, IEE Seminar* (2003).
- [34] *ETSI TR 101 985 V1.1.2, satellite earth stations and systems (SES) ; broadband satellite multimedia ; IP over satellite*. Technical report, ETSI (2002).
- [35] W. Ivancic. *Modular, cost-effective, extensible avionics architecture for secure, mobile communications over aeronautical data links*. In *IEEE Aerospace Conference Big Sky, Montana* (2006).
- [36] M. Fiacco and A. Ivanov. *Traffic dimensioning for GSM-over-IP services*. In *Telecommunications Quality of Services : The Business of Success. QoS 2004. IEE* (2004).
- [37] Eurocontrol. *VDL mode 2 capacity planning through advanced simulations*. In *AEEC, Brussels* (2003).
- [38] I. W. Habib and T. N. Saadawi. *Multimedia traffic characteristics in broadband networks*. *Comm. Mag.* 30 (1992).
- [39] *ITU-T G.114 Series G, transmission systems and media, digital systems and networks, international telephone connections and circuits – general recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection*. Technical report, ITU-T (2003).
- [40] Boeing - Inmarsat-5. <http://www.boeing.com/boeing/defense-space/space/bss/factsheets/702/Inmarsat-5/Inmarsat-5.page>.
- [41] *European and north atlantic office of ICAO, north atlantic operations and airspace manual*. Technical report, OACI (2012).
- [42] D. Medina, F. Hoffmann, F. Rossetto and C.-H. Rokitansky. *North atlantic inflight internet connectivity via airborne mesh networking*. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE* (2011), pp. 1–5.
- [43] D. Medina, F. Hoffmann, F. Rossetto and C.-H. Rokitansky. *A geographic routing strategy for north atlantic in-flight internet access via airborne mesh networking*. In *IEEE/ACM Transactions on Networking* (2012).
- [44] T. Dierks and E. Rescorla. *The transport layer security (tls) protocol*. Internet RFC 5246 (2008).
- [45] L. Rivest, A. Shamir and A. Adleman. *A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems*. *Communications of the ACM* 21 (1978).
- [46] NIST. *Announcing the advanced encryption standard (AES)*. Federal Information Processing Standards Publication (FIPS PUBS) 197 (2001).
- [47] NIST. *Announcing the standard for secure hash standard*. Federal Information Processing Standards Publication (FIPS- PUBS) 180-1 (1995).
- [48] T. L. Saaty. *Making and validating complex decisions with the AHP/ANP*. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 14 (2005).

- [49] Y. Toor, P. Muhlethaler and A. Laouiti. *Vehicle ad hoc networks : applications and related technical issues*. Communications Surveys Tutorials, IEEE 10 (2008).
- [50] J. Blum, A. Eskandarian and L. Hoffman. *Performance characteristics of inter-vehicle ad hoc networks*. In *Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003 IEEE* (2003), volume 1, pp. 114 – 119 vol.1.
- [51] X. Sun and L. Xia-Miao. *Study of the feasibility of VANET and its routing protocols*. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on* (2008), pp. 1 –4.
- [52] F. Li and Y. Wang. *Routing in vehicular ad hoc networks : A survey*. Vehicular Technology Magazine, IEEE 2, 12 (2007).
- [53] J. Harri, F. Filali and C. Bonnet. *Mobility models for vehicular ad hoc networks : a survey and taxonomy*. Communications Surveys Tutorials, IEEE 11, 19 (2009).
- [54] H. Hartenstein and K. Laberteaux. *A tutorial survey on vehicular ad hoc networks*. Communications Magazine, IEEE 46, 164 (2008).
- [55] E. Sakhaee and A. Jamalipour. *The global in-flight internet*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on 24, 1748 (2006).
- [56] E. Sakhaee, A. Jamalipour and N. Kato. *Aeronautical ad hoc networks*. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE* (2006), volume 1, pp. 246–251.
- [57] K. Karras, T. Kyritsis, M. Amirfeiz and S. Baiotti. *Aeronautical mobile ad hoc networks*. In *Wireless Conference, 2008. EW 2008. 14th European* (2008), pp. 1–6.
- [58] F. Schreckenbach, M. Schnell, N. R. Diaz, P. Platt, J. Gaubert and K. Leconte. *NEWSKY - a concept for networking the sky for civil aeronautical communications*. Space Communications 21, 157 (2008).
- [59] M. Amirfeiz. *ATENAA project : Advanced technologies for networking in aeronautical applications*. Technical report, FP6 (2011).
- [60] D. Medina, F. Hoffmann, S. Ayaz and C.-H. Rokitansky. *Feasibility of an aeronautical mobile ad hoc network over the north atlantic corridor*. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2008. SECON '08. 5th Annual IEEE Communications Society Conference on* (2008), pp. 109–116.
- [61] C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das. *Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing*. Internet RFC 3561 (2003).
- [62] J. Prokkola and T. Bräysy. *A detailed study of a CDMA based approach to enhance ad hoc network performance*. Ad Hoc Netw. 5, 1149 (2007).
- [63] *Indra. antares communication standard design definition file. technical note IRIS-AN-CP-TNO-610-ESA-C1*. Technical report, ESA (2013).

- [64] L. Cottatellucci, R. Muller and M. Debbah. *On the capacity of asynchronous CDMA systems*. In *Signals, Systems and Computers, 2007. ACSSC 2007. Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on* (2007), pp. 67–71.
- [65] G. G. Bernd Thallner. *Simulation of a wireless CDMA ad hoc network*. In *Communications and Computers networks CCN'02* (2002).
- [66] S. Manish, P. S., K. P. and A. K. *Interference based multiple access (ibma) protocol for cdma-based ad-hoc networks*. In *Proceedings of 8th International Conference on Cellular and Intelligent Communications (CIC)* (2003).
- [67] B. GUIZANI. *Algorithme de clusterisation et protocoles de routage dans les réseaux ad hoc*. Mémoire de thèse (2012).
- [68] O. Rodionova, D. Delahaye, M. Sbihi and M. Mongeau. *Aircraft trajectory prediction in North Atlantic Oceanic Airspace by Wind Networking* (2014). DASC 2014, 33rd Digital Avionics Systems Conference, Colorado Springs, October 5-9.
- [69] P. Pietzuch and J. Bacon. *Hermes : a distributed event-based middleware architecture*. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on* (2002), pp. 611 – 618.
- [70] U. Farooq, E. W. Parsons and S. Majumdar. *Performance of publish/subscribe middleware in mobile wireless networks*. SIGSOFT Softw. Eng. Notes 29, 278 (2004).
- [71] I. Leontiadis, P. Costa and C. Mascolo. *Persistent content-based information dissemination in hybrid vehicular networks*. In *Pervasive Computing and Communications, 2009. PerCom 2009. IEEE International Conference on* (2009), pp. 1 –10.
- [72] R. Meier and V. Cahill. *Steam : event-based middleware for wireless ad hoc networks*. In *Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on* (2002), pp. 639 – 644.
- [73] G. Cugola and G. P. Picco. *Reds : a reconfigurable dispatching system*. In *Proceedings of the 6th international workshop on Software engineering and middleware* (ACM, 2006), SEM '06, pp. 9–16.
- [74] F. Besse. *Réseaux ad hoc aéronautiques*. Mémoire de thèse (2013).
- [75] Z. Jiang and M. Zhou. *Spread Spectrum MAC Protocol With Dynamic Rate and Collision Avoidance for Mobile Ad Hoc Network*. IEEE Transactions on Vehicular Technology 56, 3149 (2007).
- [76] Y. Moon and V. R. Syrotiuk. *A Cooperative CDMA-based Multi-channel MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks*. Comput. Commun. 32, 1810 (2009).
- [77] A. Ahmed, L. Merghem-Boulaïhia and D. Gaïti. *Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks : A state-of-the-art and A classification*. IEEE Communications Surveys and Tutorials 16, 776 (2014).

-
- [78] F.-J. Wu, C.-F. Huang and Y.-C. Tseng. *Data gathering by mobile mules in a spatially separated wireless sensor network*. In *Proceedings of the 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management : Systems, Services and Middleware* (IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2009), MDM '09, pp. 293–298.
- [79] Y.-C. Tseng, F.-J. Wu and W.-T. Lai. *Opportunistic data collection for disconnected wireless sensor networks by mobile mules*. *Ad Hoc Netw.* 11, 1150 (2013).
- [80] B. Thallner and G. Gridling. *Simulation of a wireless CDMA Ad Hoc network*. *Communications and Computer Networks* (2002).
- [81] *Inmarsat*. <http://www.inmarsat.com/>.

Table des figures

2.1	Prévision d'augmentation du trafic aérien en Europe	20
2.2	DCDU Airbus A330	22
2.3	Les deux phases du COCR	23
2.4	Les classes de communications sol bord	25
2.5	Les systèmes de communication pour le contrôle aérien	27
2.6	Couverture Inmarsat (source, www.inmarsat.com)	29
2.7	Constellation Iridium (source, www.iridium.com)	30
2.8	Les systèmes de communication sol bord aéronautiques	33
2.9	Future Infrastructure de Communication	36
3.1	Réseaux d'accès satellitaire	44
3.2	Fenêtres de congestion TCP sur lien satellite	47
3.3	Performance Enhancement Proxy	49
3.4	Architecture PEPSal	49
3.5	Performance Enhancement Proxy - Architecture protocolaire	50
3.6	Plateforme d'émulation	52
3.7	Voie aller - Distribution cumulative des délais	52
3.8	Distribution des délais/gigues	53
3.9	Campagne de simulations à charge moyenne	53
3.10	Performances de TCP - Résultats des expérimentations	53
3.11	Communications aéronautiques par satellite	55
3.12	Communications aéronautiques par satellite	56
3.13	Topologie de référence	58
3.14	DVB-RCS - Structure de la supertrame	59
3.15	Architecture système - Approche classique	61
3.16	Architecture système - Approche All-IP	62
3.17	Architecture système - Approche All-IP, vue détaillée	62
3.18	Propriétés du trafic IFE	64
3.19	QoS requise pour le trafic IFE	64
3.20	Trafic GSM - Occupation des trames	65
3.21	Modèle de simulation Opnet	66
3.22	Terminal satellite - Délais files d'attente	66
3.23	Connexion TCP Reno (RTT, fenêtre de congestion, délais)	67
3.24	Couvertures satellites multifaisceaux	69
3.25	Routes aériennes transocéaniques	70

3.26 Estimation des trajectoires	70
3.27 Statistiques sur le nombres de vols	71
3.28 Modèle topologie générale	72
3.29 Modèle réseau cabine	72
3.30 Topologie - points de mesure des débits cumulés	73
3.31 Inmarsat-5 F2 - Nombre d'avions par faisceaux	74
3.32 Occupation moyenne et maximum des faisceaux	74
3.33 Débits générés cumulés pour 5 avions - profil "Classical users"	75
3.34 Débits générés cumulés pour 5 avions - profil "Advanced users"	76
3.35 Débits générés cumulés (29 juin 2012) - Inmarsat-5 F2	77
3.36 Débits générés cumulés (29 juin 2012) - Satellite hypothétique	77
3.37 Architecture système sécurisé projet FAST	80
3.38 SecMan - Architecture protocolaire	81
3.39 SecMan - Diagramme de flux	82
3.40 SecMan - Banc de test d'évaluation	84
3.41 Banc de test FAST - Débits instantanés	87
3.42 Banc de test FAST - Scores politique sécurité instantanés pour le mode Inter-classes	88
4.1 Topologie d'un Réseau Ad hoc Aéronautique	93
4.2 Espaces aériens océanique et continental	94
4.3 AeRAN - Espaces aériens Français	96
4.4 AeRAN - Espaces aériens océanique	97
4.5 AeRAN - Connectivité en espaces aériens continental français	98
4.6 AeRAN - Connectivité en espaces aériens océanique atlantique nord	99
4.7 Routage simple basé sur le chemin le plus court	104
4.8 Routage hiérarchique	105
5.1 Domaines Réseaux et domaine d'application	108
5.2 Exemple, alerte météo	110
5.3 Exemple, message de la compagnie	111
5.4 Paradigme publication/souscription	111
5.5 Infrastructure de communication pour l'aviation générale	115
5.6 Handoff horizontal et handoff vertical	117
5.7 Surveillance Aéroportuaire par réseaux de capteurs sans fils	118

Liste des tableaux

2.1	Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques	19
2.2	Les services Classic-Aero d'Inmarsat	29
2.3	Performances des services multimédia	31
3.1	Bandes de fréquences des systèmes de communication par satellite	41
3.2	Fenêtres de congestion TCP sur lien satellitaire	47
3.3	Projet FAST - Scénarios de test	85
3.4	Sécurité statique/adaptative - Débits moyens (kbit/s)	88
4.1	Comparaison des caractéristiques VANET/AANET	91
4.2	Ratio d'avions connectés (%) / distance à une station sol	99
4.3	Capacité disponible et délai de bout en bout - Routage simple basé sur le chemin le plus court	102
4.4	Capacité disponible et délai de bout en bout - Routage hiérarchique	104