



**HAL**  
open science

## Réseaux ad hoc aéronautiques

Frédéric Besse

► **To cite this version:**

Frédéric Besse. Réseaux ad hoc aéronautiques. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE), 2012. Français. ⟨NNT : 2013ESAE0006⟩. ⟨tel-00974920⟩

**HAL Id: tel-00974920**

**<https://theses.hal.science/tel-00974920v1>**

Submitted on 7 Apr 2014

**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.



HAL Authorization



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Frédéric BESSE**

le vendredi 22 février 2013

**Titre :**

Réseaux ad hoc aéronautiques

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

EDSYS : Informatique et Systèmes embarqués

**Unité de recherche :**

ENAC / Telecom / Resco

**Directeur(s) de Thèse :**

M. Alain PIROVANO (directeur de thèse)

M. José RADZIK (co-directeur de thèse)

**Jury :**

M. Alain PIROVANO - Directeur de thèse

M. José RADZIK - Co-directeur de thèse

Mme Isabelle GUERIN LASSOUS - Rapporteur

M. Congduc PHAM - Rapporteur

Mme Houda LABIOD - Examineur

Mme Béatrice PAILLASSA - Examineur



## Résumé

Dans un contexte de besoins croissants de moyens de communication pour augmenter la sécurité des vols et répondre aux attentes des compagnies et des passagers, le monde de l'aviation civile cherche de nouveaux systèmes de communication pouvant répondre à ces objectifs. Les systèmes de communication sol-bord existants, que ce soit les solutions par satellites en bande L (SATCOM, ...) ou les solutions cellulaires par liaison directe avec le sol (HF, VHF, ...), présentent des limites en terme de capacité, de couverture et de coût.

La proposition avancée dans le cadre de cette thèse est d'utiliser les avions comme relais afin de propager les données jusqu'à une station sol. Ce système peut être vu comme un réseau ad hoc mobile dont les nœuds sont les avions civils en vol. Grâce à plusieurs sauts successifs au travers d'avions relais, chaque avion doit pouvoir joindre le sol sans être à portée directe d'une station. Le réseau ad hoc ainsi formé peut ensuite être utilisé pour différentes classes de communications : contrôle aérien, services pour les compagnies aériennes ou pour les passagers. Une telle solution permettrait d'améliorer la couverture des solutions cellulaires classiques en zone continentale. Elle est également applicable en zone océanique où les seuls moyens disponibles sont actuellement le satellite et la HF. On peut imaginer que les coûts de déploiement et de maintenance seraient relativement bas puisque l'infrastructure sol est limitée.

Dans cette thèse, nous avons étudié la faisabilité puis les performances qui peuvent être attendues pour ce système de communication aéronautique innovant. Nous nous sommes tout d'abord intéressés aux liaisons entre avions. Nous avons choisis une méthode d'accès CDMA, basée sur l'étalement de spectre à séquence directe, qui permet à chaque avion d'émettre lorsqu'il le souhaite. Nous avons étudié les problématiques inhérentes aux interférences observées avec ce type de méthode d'accès multiple. Nous avons ensuite proposé un bilan de liaison réaliste pour estimer les portées maximales des liaisons entre deux avions. Les résultats de cette première étude nous ont permis de démontrer, à travers un outil logiciel que nous avons développé, que compte-tenu des positions réelles des avions dans le ciel français, une portée de 200 km permet de servir plus de 97% des avions en moyenne sur les journées étudiées. Dans le couloir nord atlantique, une portée de 400 km permet d'en servir plus de 95%.

La détermination des chemins dans le graphe ainsi obtenu pour joindre une station sol a été envisagé suivant deux approches : une première avec un algorithme classique de type "plus court chemin" basée sur l'algorithme de Dijkstra, et une seconde reposant sur un algorithme hiérarchique et la notion de groupes de nœuds (clusters).

Concernant la gestion des données de bout en bout opérée par la couche transport dans une architecture réseau, nous avons envisagé des flux UDP et des flux TCP conformément au standard de facto TCP/IP. L'objectif de la première option était d'estimer les débits qui pouvaient être envisagés lorsque les nœuds émetteurs inondent le système. La deuxième

---

option, TCP, nous a permis de proposer des améliorations dans un fonctionnement plus réaliste puisque la fiabilité d'une couche transport devra être envisagée pour palier les pertes dues par exemple aux interférences.

A cette fin, nous avons donc développé un modèle de simulation avec le logiciel OPNET Modeler. Nous avons modélisé différentes applications, couches transport, algorithmes de routage, le calcul d'interférences, et reproduit le mouvement des avions en zone continentale et océanique. Nous avons ainsi pu obtenir des statistiques sur les performances du réseau, notamment en termes de débit, de délai et de perte.

Dans un premier temps, au titre d'une approche expérimentale, nous avons considéré le pire cas dans lequel tous les avions émettent simultanément à destination d'une station au sol. Cela nous a permis de trouver la configuration optimale du système.

Enfin pour finir, afin de souligner les performances et les avantages du système de communication que nous proposons pour les liaisons sol bord, nous avons étudié le système avec des applications plus réalistes, en particulier des applications pour les compagnies aériennes, comme la sauvegarde de boîtes noires en vol et des applications pour les pilotes plus spécifiquement dédiées au contrôle aérien.

## **Mots-clés**

Réseau ad hoc, MANET, aéronautique, CDMA, AANET

# Abstract

In the current aeronautical communications context, there is an increasing interest in offering new services to civil aircraft. For instance, airlines are looking into new solutions to back up flight data and cockpit voice records during the flight, or to provide more accurate meteorological data to pilots. Being able to offer Internet access to passengers is also a major demand from these companies.

All these services represent new types of air-ground communications that require new communication systems. Indeed, traditional datalink systems are based on a direct air-ground link (e.g. VDL Mode 2) or on a satellite link (e.g. L-Band Inmarsat satellites). They all have limits in terms of capacity, coverage and cost.

In this thesis, we study aeronautical ad hoc networks. They have recently been proposed as a new solution for future air-ground communications. The idea of such networks is to introduce wireless links between aircraft. This system can be seen as a mobile ad hoc network whose nodes are civil aircraft in flight. Each aircraft is able to act as a router to send data hop-by-hop to the destination.

Such a solution would improve the coverage of conventional cellular solutions in continental area. It is also applicable to oceanic areas, where the only available solutions are now satellite and HF. The costs of deployment and maintenance would be relatively low because the ground infrastructure is limited.

In this thesis, the feasibility of this innovative aeronautical communication system is investigated. A simulation tool has been developed to study the network connectivity, based on actual aircraft positions data both in continental and oceanic airspace. This study shows that a range of 200 km is enough to serve more than 97% of aircraft flying over the French sky during a day. In the North Atlantic corridor, a range of 400 km can connect more than 95% of aircraft.

Then, the performances that can be expected for this system are studied. First, a solution for the connections between aircraft is proposed. It is based on Code Division Multiple Access (CDMA) and direct sequence spread spectrum. The inherent multiple access interferences are taken into account. A link budget of the connection between two aircraft is proposed. The path between each aircraft and a ground station is determinate following two approaches : the first with a classical "shortest path" based on Dijkstra algorithm, and a second based on a hierarchical algorithm and the notion of node groups (clusters). At the transport layer, we considered both UDP and TCP protocols.

A simulation model has been developed with OPNET Modeler. Several applications, transport layers, routing algorithms have been implemented. The multiple access interferences and the actual aircraft positions in continental and oceanic areas are taken into account. The aeronautical ad hoc network performances have been assessed, especially in terms of throughput, delay and loss.

---

First, as an experimental approach, the worst case in which all aircraft transmit simultaneously to a ground station is considered. Then, to highlight the benefits and performances of the system, realistic applications are studied, in particular applications for airlines, such as automatic flight data transmission, applications for pilots specifically dedicated to air traffic control, and applications for passengers.

## **Keywords**

Ad hoc network, MANET, AANET, CDMA

## Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du groupe RESCO (RESeaux de COmmunications de données) du laboratoire TELECOM de l'Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC).

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse, Alain Pirovano, enseignant-chercheur à l'ENAC et responsable du groupe RESCO, et José Radzik, enseignant-chercheur à l'ISAE, de m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse. Leur encadrement scientifique et leur grande disponibilité m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier THALES Avionics, et en particulier Christophe Picco, pour son soutien et son suivi régulier tout au long de cette thèse.

Je suis également très reconnaissant pour le temps et le travail accordés par l'ensemble des membres du jury de ma thèse : Mme Isabelle Guérin-Lassous, professeur à l'Université Lyon 1 ; M. Congduc Pham, professeur à l'Université de Pau ; Mme Houda Labiod, enseignant-chercheur à Telecom Paristech ; Mme Béatrice Paillassa, professeur à l'INP Toulouse. En particulier, je remercie Mme Guérin-Lassous et M. Pham d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je remercie également tous les membres du groupe RESCO : Fabien, Nicolas, Slim, Antoine, Mickaël, Mathieu et Ons, aussi bien pour leur aide précieuse que pour les excellents moments passés ensemble.

Enfin, je remercie Laure, mon amie, ainsi que ma famille et mes amis pour leur soutien et leur présence pendant ces années de thèse.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
Contexte : les communications aéronautiques . . . . .	3
Les origines . . . . .	3
Les limites de capacité des communications vocales . . . . .	3
L'augmentation du trafic aérien . . . . .	4
Vers les communications de données numériques : le datalink . . . . .	5
Le comité FANS et le concept CNS/ATM . . . . .	5
Du réseau ACARS au réseau ATN . . . . .	6
L'émergence de nouveaux services pour le contrôle aérien . . . . .	8
L'émergence de nouveaux services pour les passagers . . . . .	9
Le besoin de nouveaux moyens de communications sol-bord . . . . .	9
Contributions et organisation du mémoire . . . . .	9
<b>1 Les communications numériques sol-bord : le datalink</b>	<b>13</b>
Introduction . . . . .	15
1.1 Les différents types de communications . . . . .	15
1.1.1 ATSC (Air Traffic Services Communication) . . . . .	15
1.1.2 AOC (Aeronautical Operational Control) . . . . .	16
1.1.3 AAC (Aeronautical Administrative Communication) . . . . .	16
1.1.4 APC (Aeronautical Passenger Communication) . . . . .	16
1.2 Les moyens de communication de données existants pour le contrôle aérien	17
1.2.1 Performances requises . . . . .	17
1.2.2 Solutions par satellite . . . . .	19
1.2.2.1 Inmarsat . . . . .	19
1.2.2.2 Iridium . . . . .	20
1.2.3 Solutions par liaison directe avec le sol . . . . .	21
1.2.3.1 POA : Plain Old ACARS . . . . .	21
1.2.3.2 VDL Mode 1 . . . . .	21
1.2.3.3 VDL Mode 2 . . . . .	22
1.2.3.4 VDL Mode 3 . . . . .	23

1.2.3.5	VDL Mode 4 . . . . .	23
1.2.3.6	HFDL . . . . .	23
1.3	Les moyens de communication de données existants pour les passagers . . .	23
1.3.1	Performances requises . . . . .	23
1.3.2	Solutions par satellite . . . . .	24
1.3.2.1	Connexion-by-Boeing . . . . .	24
1.3.2.2	Inmarsat . . . . .	24
Le service Swift 64 . . . . .	24	
Le service SwiftBroadband . . . . .	25	
1.3.2.3	ARINC - Onboard Internet . . . . .	25
1.3.2.4	Panasonic Avionics Corporation - eXConnect . . . . .	25
1.3.2.5	OnAir . . . . .	25
1.3.2.6	Row44 . . . . .	26
1.3.2.7	AeroMobile . . . . .	26
1.3.3	Solutions par liaison directe avec le sol . . . . .	26
1.3.3.1	Aircell . . . . .	26
1.3.3.2	Wi-Sky . . . . .	26
1.4	Limites des solutions existantes . . . . .	27
1.4.1	Solutions par satellites . . . . .	27
1.4.1.1	Capacité . . . . .	27
1.4.1.2	Couverture . . . . .	27
1.4.1.3	Coût . . . . .	27
1.4.2	Solutions par liaison directe avec le sol . . . . .	28
1.4.2.1	Capacité . . . . .	28
1.4.2.2	Couverture . . . . .	28
1.4.2.3	Coût . . . . .	28
1.5	Les futurs moyens de communications . . . . .	28
1.5.1	L'évolution des systèmes existants . . . . .	28
1.5.1.1	Inmarsat 5 . . . . .	28
1.5.1.2	Iridium next . . . . .	29
1.5.2	L'infrastructure de communication du projet SESAR . . . . .	29
1.5.2.1	AeroMACS . . . . .	30
1.5.2.2	Satellite IRIS . . . . .	30
1.5.2.3	L-DACS . . . . .	31
1.6	Les réseaux ad hoc aéronautiques . . . . .	31
1.6.1	Présentation générale des réseaux ad hoc mobiles . . . . .	31
1.6.1.1	Définition . . . . .	31
1.6.1.2	Caractéristiques . . . . .	32
Communications multi-sauts . . . . .	32	

---

Topologie dynamique . . . . .	33
Bande passante limitée . . . . .	33
Consommation d'énergie . . . . .	33
1.6.1.3 Architecture . . . . .	33
La couche physique . . . . .	33
La couche liaison . . . . .	34
Le routage dans les MANET . . . . .	34
Routage proactif . . . . .	34
Routage réactif . . . . .	35
Routage hybride . . . . .	35
Routage géographique . . . . .	35
Routage hiérarchique . . . . .	36
La couche transport . . . . .	36
UDP (User Datagram Protocol) . . . . .	36
TCP (Transmission Control Protocol) . . . . .	36
Les performances de TCP dans les réseaux ad hoc . . . . .	37
1.6.2 Présentation générale des réseaux ad hoc aéronautiques . . . . .	38
1.6.3 Problématiques spécifiques des réseaux ad hoc aéronautiques . . . . .	39
1.6.4 Quelques projets de recherche . . . . .	39
1.6.4.1 Le projet ATENAA . . . . .	40
1.6.4.2 Le projet NewSky . . . . .	40
1.6.5 Solutions proposées pour les couches physique et liaison . . . . .	41
1.6.5.1 Liaison idéale . . . . .	41
1.6.5.2 Antennes directionnelles, liaisons optiques et TDMA . . . . .	41
1.6.5.3 S-TDMA . . . . .	42
1.6.5.4 IEEE 802.11 . . . . .	42
1.6.6 Protocoles de routage . . . . .	43
1.6.7 Etude de faisabilité . . . . .	43
Résumé du chapitre . . . . .	45
<b>2 Étude de faisabilité</b> . . . . .	<b>47</b>
Introduction . . . . .	49
2.1 Présentation des données de trafic . . . . .	49
2.1.1 Zone continentale . . . . .	49
2.1.1.1 Format des données . . . . .	50
2.1.1.2 Traitement des données . . . . .	51
2.1.2 Zone océanique . . . . .	51
2.1.2.1 Les NAT (North Atlantic Tracks) . . . . .	52
2.1.2.2 Les données DDR (Demand Data Repository) . . . . .	53

---

2.2	Logiciel de simulation AeRAN . . . . .	54
2.3	Etude de faisabilité en zone continentale . . . . .	54
2.3.1	Evolution du nombre d'avions en vol . . . . .	54
2.3.2	Visualisation des trajectoires . . . . .	55
2.3.3	Influence du nombre et de la position des stations au sol . . . . .	56
2.3.4	Influence de la portée des connexions . . . . .	58
2.3.5	Etude de la durée de connexion des avions . . . . .	59
2.3.6	Etude d'un vol Toulouse - Paris . . . . .	60
2.4	Etude de faisabilité en zone océanique . . . . .	61
2.4.1	Evolution du nombre d'avions en vol . . . . .	61
2.4.2	Influence du nombre et de la position des stations au sol . . . . .	62
2.4.3	Influence de la portée des avions . . . . .	62
2.4.4	Etude de la durée de connexion des avions . . . . .	65
2.4.5	Etude d'un vol Paris - New-York . . . . .	65
	Résumé du chapitre . . . . .	67
<b>3</b>	<b>Architecture proposée</b>	<b>69</b>
	Introduction . . . . .	71
3.1	Cahier des charges . . . . .	71
3.2	Topologie . . . . .	72
3.3	Liaisons entre avions . . . . .	72
3.3.1	Technologies existantes . . . . .	73
3.3.1.1	Wi-Fi . . . . .	73
3.3.1.2	Wi-MAX . . . . .	73
3.3.1.3	UMTS . . . . .	74
3.3.1.4	Conclusion . . . . .	75
3.3.2	Choix de la méthode d'accès . . . . .	75
3.3.3	Choix et gestion des codes d'étalement . . . . .	77
3.3.4	Etablissement des connexions . . . . .	79
3.3.5	Interférences d'accès multiples . . . . .	80
3.3.6	Estimation des interférences . . . . .	82
3.3.7	Bilan de liaison . . . . .	83
3.3.8	Choix du modèle de propagation . . . . .	85
3.3.9	Estimation de la portée maximale des connexions . . . . .	86
3.3.10	Gestion des files d'attente . . . . .	87
3.4	Routage . . . . .	88
3.4.1	Algorithme de type "plus court chemin" . . . . .	88
3.4.1.1	Principe général . . . . .	88
3.4.1.2	Implémentation et paramètres . . . . .	89

---

---

3.4.1.3	Stabilité des connexions . . . . .	90
3.4.2	Algorithme hiérarchique . . . . .	90
3.4.2.1	Principe général . . . . .	90
3.4.2.2	Implémentation et paramètres . . . . .	91
	Formation des clusters et élection des cluster-heads . . . . .	91
	Communications intra-cluster et inter-clusters . . . . .	91
3.5	Modèle de simulation OPNET . . . . .	92
3.6	Méthodologie . . . . .	93
	Résumé du chapitre . . . . .	95
<b>4</b>	<b>Dimensionnement du système en zone continentale</b>	<b>97</b>
	Introduction . . . . .	99
4.1	Choix des métriques . . . . .	99
4.1.1	Débits . . . . .	99
4.1.2	Délais . . . . .	100
4.1.3	Pertes . . . . .	100
4.2	Méthodologie . . . . .	100
4.2.1	Influence du contrôle de puissance . . . . .	101
4.2.2	Influence de la taille des paquets . . . . .	102
4.2.3	Influence de la portée maximale des connexions . . . . .	102
4.2.4	Influence de la capacité des connexions . . . . .	103
4.2.5	Influence de l'algorithme de routage . . . . .	104
4.2.6	Définition d'un scénario de référence . . . . .	104
4.3	Evaluation des performances avec du trafic UDP . . . . .	105
4.3.1	Performances observées pour le scénario de référence sans interférence	105
4.3.1.1	Résultats de simulation . . . . .	105
4.3.1.2	Analyse des résultats . . . . .	106
4.3.2	Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	106
4.3.2.1	Résultats de simulation . . . . .	106
4.3.2.2	Analyse des résultats . . . . .	108
4.3.3	Influence du contrôle de puissance . . . . .	109
4.3.3.1	Résultats de simulation . . . . .	109
4.3.3.2	Analyse des résultats . . . . .	110
4.3.4	Influence de la taille des paquets . . . . .	110
4.3.4.1	Résultats de simulation . . . . .	110
4.3.4.2	Analyse des résultats . . . . .	112
4.3.5	Influence de la portée des connexions . . . . .	112
4.3.5.1	Résultats de simulation . . . . .	112
4.3.5.2	Analyse des résultats . . . . .	115

---

4.3.6	Influence de la capacité des connexions . . . . .	115
4.3.6.1	Résultats de simulation . . . . .	115
4.3.6.2	Analyse des résultats . . . . .	118
4.3.7	Conclusion . . . . .	118
4.4	Evaluation des performances avec du trafic TCP . . . . .	119
4.4.1	Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	119
4.4.1.1	Résultats de simulation . . . . .	119
4.4.1.2	Analyse des résultats . . . . .	120
4.4.2	Influence de la taille des paquets . . . . .	121
4.4.2.1	Résultats de simulation . . . . .	121
4.4.2.2	Analyse des résultats . . . . .	122
4.4.3	Influence de la portée des connexions . . . . .	122
4.4.3.1	Résultats de simulation . . . . .	122
4.4.3.2	Analyse des résultats . . . . .	124
4.4.4	Influence de la capacité des connexions . . . . .	124
4.4.4.1	Résultats de simulation . . . . .	124
4.4.4.2	Analyse des résultats . . . . .	125
4.4.5	Utilisation de deux bandes de fréquence . . . . .	126
4.4.5.1	Présentation du scénario . . . . .	126
4.4.5.2	Résultats de simulation . . . . .	126
4.4.5.3	Analyse des résultats . . . . .	128
4.4.6	Utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique . . . . .	129
4.4.6.1	Présentation du scénario . . . . .	129
4.4.6.2	Résultats de simulation . . . . .	129
4.4.6.3	Analyse des résultats . . . . .	131
	Résumé du chapitre . . . . .	132
<b>5</b>	<b>Dimensionnement du système en zone océanique</b>	<b>133</b>
	Introduction . . . . .	135
5.1	Méthodologie . . . . .	135
5.1.1	Définition du scénario de référence . . . . .	135
5.1.2	Influence de la portée maximale des connexions . . . . .	135
5.1.3	Influence de l'algorithme de routage . . . . .	137
5.2	Etude des performances avec du trafic UDP . . . . .	137
5.2.1	Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	137
5.2.1.1	Résultats de simulation . . . . .	137
5.2.1.2	Analyse des résultats . . . . .	138
5.2.2	Influence de la taille des paquets . . . . .	139
5.2.2.1	Résultats de simulation . . . . .	139

---

5.2.2.2	Analyse des résultats . . . . .	140
5.2.3	Influence de la capacité des connexions . . . . .	141
5.2.3.1	Résultats de simulation . . . . .	141
5.2.3.2	Analyse des résultats . . . . .	142
5.2.4	Influence de la portée des connexions . . . . .	143
5.2.4.1	Résultats de simulation . . . . .	143
5.2.4.2	Analyse des résultats . . . . .	144
5.3	Evaluation des performances avec du trafic TCP . . . . .	144
5.3.1	Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	144
5.3.1.1	Résultats de simulation . . . . .	144
5.3.1.2	Analyse des résultats . . . . .	145
5.3.2	Influence de la taille des paquets . . . . .	145
5.3.2.1	Résultats de simulation . . . . .	145
5.3.2.2	Analyse des résultats . . . . .	147
5.3.3	Influence de la capacité des connexions . . . . .	147
5.3.3.1	Résultats de simulation . . . . .	147
5.3.3.2	Analyse des résultats . . . . .	149
5.3.4	Utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique . . . . .	149
5.3.4.1	Résultats de simulation . . . . .	149
5.3.4.2	Analyse des résultats . . . . .	151
	Résumé du chapitre . . . . .	152
<b>6</b>	<b>Etude de performances avec des applications réalistes</b>	<b>153</b>
	Introduction . . . . .	155
6.1	Trafic ATC et AOC en zone continentale . . . . .	155
6.1.1	Présentation du scénario . . . . .	155
6.1.2	Résultats de simulation . . . . .	157
6.1.3	Analyse des résultats . . . . .	158
6.1.4	Etude de la charge des stations . . . . .	158
6.2	Transmission automatique de données de vol en zone océanique . . . . .	159
6.2.1	Présentation du scénario . . . . .	159
6.2.2	Résultats de simulation . . . . .	161
6.2.2.1	Application 1 . . . . .	161
6.2.2.2	Application 2 . . . . .	162
6.2.2.3	Application 3 . . . . .	162
6.2.3	Analyse des résultats . . . . .	163
6.2.4	Etude de la charge des stations . . . . .	164
6.3	Applications web et mails pour les passagers en zone océanique . . . . .	165
6.3.1	Présentation du scénario . . . . .	165

---

6.3.2	Résultats de simulation . . . . .	166
6.3.3	Analyse des résultats . . . . .	166
6.3.4	Etude de la charge des stations . . . . .	166
	Résumé du chapitre . . . . .	168
<b>Conclusion et futurs travaux</b>		<b>169</b>
<b>Publications</b>		<b>175</b>
<b>Liste des symboles</b>		<b>177</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>183</b>
<b>A Le datalink pour la Navigation et la Surveillance</b>		<b>195</b>
A.1	Le datalink pour la Navigation . . . . .	195
A.2	Le datalink pour la Surveillance . . . . .	196
A.2.1	Le Radar Secondaire Mode S . . . . .	196
A.2.2	ADS-C . . . . .	196
A.2.3	ADS-B . . . . .	196
<b>B Le modèle OSI de l'ISO</b>		<b>197</b>
<b>C Exemple de méthodes d'accès au canal utilisées dans les MANET</b>		<b>199</b>
C.1	Méthodes avec canal unique . . . . .	199
C.1.1	ALOHA et Slotted ALOHA . . . . .	199
C.1.2	CSMA/CA . . . . .	200
C.2	Méthodes avec canal multiple . . . . .	200
C.2.1	TDMA . . . . .	201
C.2.2	FDMA . . . . .	201
C.2.3	CDMA . . . . .	201
<b>D Exemple de protocoles de routage dans les MANET</b>		<b>203</b>
D.1	Routage proactif . . . . .	203
D.1.1	DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector Routing) . . . . .	203
D.1.2	OLSR (Optimized Link State Routing) . . . . .	203
D.2	Routage réactif . . . . .	204
D.2.1	DSR (Dynamic Source Routing) . . . . .	204
D.2.2	AODV (Ad hoc On demand Distance Vector routing) . . . . .	205
D.3	Routage hybride . . . . .	205
D.3.1	ZRP (Zone Routing Protocol) . . . . .	205
D.4	Routage géographique . . . . .	206

---

D.4.1	DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) . . . . .	206
D.4.2	GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) . . . . .	206
D.5	Routage hiérarchique . . . . .	207
D.5.1	CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing) . . . . .	207
<b>E</b>	<b>Quelques solutions pour améliorer les performances de TCP dans les réseaux ad hoc mobiles</b>	<b>209</b>
E.1	Solutions au niveau transport . . . . .	209
E.1.1	Fixed RTO . . . . .	209
E.1.2	TCP DOOR . . . . .	209
E.2	Solutions au niveau liaison . . . . .	210
E.2.1	Link RED . . . . .	210
E.2.2	Pacing . . . . .	210
E.3	Solutions cross-layer . . . . .	211
E.3.1	Split TCP . . . . .	211
E.3.2	ATCP . . . . .	211
<b>F</b>	<b>Exemple de protocoles de routage proposées pour les réseaux ad hoc aéronautiques</b>	<b>213</b>
F.1	MUDOR . . . . .	213
F.2	GPSR . . . . .	214
F.3	ARPAM . . . . .	215
F.4	AeroRP . . . . .	215
F.5	GLSR . . . . .	216
F.6	GRAA . . . . .	216
<b>G</b>	<b>Les problèmes du nœud caché et du nœud exposé</b>	<b>219</b>
<b>H</b>	<b>Calcul de la portée optique</b>	<b>221</b>
<b>I</b>	<b>Principe de l'étalement de spectre à séquence directe</b>	<b>223</b>
I.1	Principe général . . . . .	223
I.2	Les codes d'étalement . . . . .	224
I.2.1	Les codes de Walsh-Hadamard . . . . .	225
I.2.2	Les codes OVSF . . . . .	226
I.2.3	Les m-séquences . . . . .	226
I.2.4	Les codes pseudo-aléatoires et les codes de Gold . . . . .	227
<b>J</b>	<b>Logiciel de simulation AeRAN</b>	<b>229</b>
J.1	Principe . . . . .	229
J.2	Les entrées . . . . .	229

---

J.3	La gestion du graphe . . . . .	230
J.3.1	La bibliothèque JgraphT . . . . .	230
J.3.2	Les nœuds . . . . .	230
J.3.3	La création des arêtes . . . . .	230
J.4	Les statistiques . . . . .	231
J.5	La visualisation . . . . .	231
<b>K</b>	<b>Modèle de simulation OPNET</b>	<b>233</b>
K.1	Présentation générale . . . . .	233
K.2	Le Manager . . . . .	234
K.2.1	Le processus <i>manager_node</i> . . . . .	235
K.2.2	Les processus <i>manager_dijkstra</i> et <i>manager_cluster</i> . . . . .	235
K.2.3	Le processus <i>manager_interference</i> . . . . .	236
K.2.4	Le processus <i>manager_stat</i> . . . . .	237
K.3	Les Avions . . . . .	237
K.3.1	Le processus <i>aircraft_mgr</i> . . . . .	238
K.3.2	Le processus <i>aircraft_src</i> . . . . .	238
K.3.3	Le processus <i>aircraft_transport_layer</i> . . . . .	239
K.3.4	Le processus <i>aircraft_network_layer</i> . . . . .	239
K.3.5	Le processus <i>aircraft_link_layer</i> . . . . .	240
K.3.6	Le processus <i>aircraft_physical_layer</i> . . . . .	241
K.3.7	Le processus <i>aircraft_rx</i> . . . . .	241
K.3.8	Le processus <i>aircraft_interf</i> . . . . .	241
K.4	Les Stations . . . . .	242
K.4.1	Le processus <i>station_mgr</i> . . . . .	243
K.4.2	Le processus <i>station_rx</i> . . . . .	243
K.4.3	Le processus <i>station_interf</i> . . . . .	243
K.4.4	Le processus <i>station_transport_layer</i> . . . . .	243
K.5	Modèle de trafic . . . . .	243
K.5.1	Sources paramétrables . . . . .	244
K.5.2	TCP Greedy . . . . .	244
K.6	Les paramètres de simulation . . . . .	244

# Table des figures

1	Prévision d'augmentation du trafic aérien en Europe par Eurocontrol . . .	5
2	Interface du pilote pour les messages CPDLC . . . . .	6
3	Le réseau ATN . . . . .	7
4	Les deux phases du COCR . . . . .	8
1.1	Les moyens de communications existants . . . . .	17
1.2	Couverture des services aéronautiques d'Inmarsat . . . . .	19
1.3	La constellation Iridium . . . . .	21
1.4	Couverture VDL Mode 2 par SITA . . . . .	22
1.5	L'architecture de communication du projet SESAR . . . . .	30
1.6	Mode infrastructure et mode ad hoc . . . . .	32
1.7	Principe général d'un réseau ad hoc aéronautique . . . . .	38
1.8	Densité des avions civils aux Etats-Unis . . . . .	44
1.9	Probabilité d'avoir au moins n avions dans une zone de surface S . . . . .	44
2.1	Exemple de NAT . . . . .	53
2.2	Capture d'écran du logiciel AeRAN . . . . .	54
2.3	Nombre d'avions en vol, le 22-06-2007 . . . . .	55
2.4	Visualisation des trajectoires . . . . .	56
2.5	Influence du nombre de stations sols . . . . .	57
2.6	Positionnement des stations en zone continentale . . . . .	58
2.7	Pourcentage d'avions connectés au cours de la journée pour différentes portées (km) . . . . .	59
2.8	Pourcentage de temps de vol connecté moyen en fonction de la portée . . .	60
2.9	Nombre d'avions en visibilité pour deux vols Toulouse-Paris . . . . .	60
2.10	Nombre d'avions en vol, le 16-09-2011 . . . . .	61
2.11	Positionnement des stations en zone continentale . . . . .	62
2.12	Pourcentage d'avions connectés au cours de la journée pour différentes portées (km) . . . . .	63
2.13	Amérique vers Europe (03h00 UTC) . . . . .	64
2.14	Europe vers Amérique (15h00 UTC) . . . . .	64

---

2.15	Moyenne du pourcentage de temps de vol connecté en fonction de la portée	65
2.16	Trajectoire réelle du vol Paris - New-York du 16 septembre 2011 . . . . .	66
3.1	Topologie proposée pour le réseau ad hoc aéronautique . . . . .	72
3.2	Architecture point-multipoint du Wi-MAX . . . . .	74
3.3	Utilisation des codes pour la voie montante UMTS . . . . .	78
3.4	Utilisation d'un code commun . . . . .	80
3.5	Schéma de la liaison . . . . .	81
3.6	Détection des collisions et estimation de la puissance des interférences . .	83
3.7	Evolution de la capacité maximale des connexions (kbps) en fonction de la portée (km), $f = 2GHz$ , $P_{e_{max}} = 50W$ . . . . .	87
3.8	Algorithme de routage "plus court chemin" . . . . .	89
3.9	Algorithme de routage "cluster" . . . . .	91
3.10	Capture d'écran du modèle de simulation OPNET . . . . .	92
3.11	Modèle d'un avion . . . . .	93
4.1	Effet near-far . . . . .	101
4.2	Puissance du signal reçu . . . . .	101
4.3	Répartition des avions selon leur distance à la station (saut) . . . . .	103
4.4	Nombre de clusters, influence de la taille des clusters . . . . .	104
4.5	Statistiques sur les débits, scénario de référence sans interférence . . . . .	105
4.6	Statistiques sur les délais et les pertes, scénario de référence sans interférence	106
4.7	Statistiques sur les débits, scénario de référence UDP . . . . .	107
4.8	Statistiques sur les délais et les pertes, scénario de référence UDP . . . . .	107
4.9	Statistiques sur les débits, influence du contrôle de puissance . . . . .	109
4.10	Statistiques sur les délais et les pertes, influence du contrôle de puissance .	109
4.11	Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets UDP . . . . .	110
4.11	Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets UDP . . . . .	111
4.12	Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets . . . . .	111
4.13	Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets UDP . . . . .	112
4.14	Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions . . . . .	113
4.15	Statistiques sur les délais, influence de la portée des connexions . . . . .	114
4.16	Statistiques sur les pertes, influence de la portée des connexions . . . . .	114
4.17	Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement . . . . .	116
4.18	Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement . . . . .	117
4.19	Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement . . . . .	117
4.20	Statistiques sur les débits, scénario de référence TCP . . . . .	119
4.21	Statistiques sur les délais, scénario de référence TCP . . . . .	119
4.22	Statistiques sur les pertes, scénario de référence TCP . . . . .	120

---

---

4.23	Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets TCP . . . . .	121
4.24	Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets TCP . . . . .	121
4.25	Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets TCP . . . . .	122
4.26	Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions . . . . .	122
4.26	Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions . . . . .	123
4.27	Statistiques sur les délais, influence de la portée des connexions . . . . .	123
4.28	Statistiques sur les pertes, influence de la portée des connexions . . . . .	123
4.29	Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement . . . . .	124
4.30	Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement . . . . .	125
4.31	Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement . . . . .	125
4.32	Statistiques sur les débits, scénario bifréquence . . . . .	127
4.33	Statistiques sur les délais, scénario bifréquence . . . . .	127
4.34	Statistiques sur les pertes, scénario bifréquence . . . . .	128
4.35	Communications intra-cluster et inter-clusters . . . . .	129
4.36	Statistiques sur les débits moyens par avion, utilisation des clusters . . . . .	130
4.37	Statistiques sur les débits, utilisation des clusters . . . . .	130
4.38	Statistiques sur les délais, utilisation des clusters . . . . .	131
4.39	Statistiques sur les pertes, utilisation des clusters . . . . .	131
5.1	Répartition des avions selon leur distance à la station (saut) pour différentes portées (km) . . . . .	136
5.2	Nombre de clusters, influence de la taille des clusters . . . . .	137
5.3	Statistiques sur les débits, scénario de référence UDP . . . . .	137
5.3	Statistiques sur les débits, scénario de référence UDP . . . . .	138
5.4	Statistiques sur les délais et les pertes, scénario de référence UDP . . . . .	138
5.5	Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets UDP . . . . .	139
5.6	Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets UDP . . . . .	140
5.7	Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets UDP . . . . .	140
5.8	Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement . . . . .	141
5.9	Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement . . . . .	142
5.10	Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement . . . . .	142
5.11	Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions . . . . .	143
5.12	Statistiques sur les débits, scénario de référence TCP . . . . .	144
5.13	Nombre de retransmission TCP, scénario de référence TCP . . . . .	145
5.14	Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets TCP . . . . .	146
5.15	Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets TCP . . . . .	146
5.16	Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets TCP . . . . .	147
5.17	Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement . . . . .	147
5.17	Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement . . . . .	148

---

5.18	Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement . . . . .	148
5.19	Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement . . . . .	148
5.20	Statistiques sur les débits moyens par avion, utilisation des clusters . . . . .	150
5.21	Statistiques sur les débits, utilisation des clusters . . . . .	150
5.22	Statistiques sur les délais, utilisation des clusters . . . . .	150
5.23	Statistiques sur les pertes, utilisation des clusters . . . . .	150
6.1	Statistiques pour le scénario UDP, trafic ATC/AOC . . . . .	157
6.2	Statistiques pour le scénario TCP, trafic ATC/AOC . . . . .	157
6.3	Charge des stations, trafic ATC/AOC . . . . .	159
6.4	Statistiques pour le scénario UDP, application 1 de transmission des données de vol . . . . .	161
6.5	Statistiques pour le scénario TCP, application 1 de transmission des données de vol . . . . .	161
6.6	Statistiques pour le scénario UDP, application 2 de transmission des données de vol . . . . .	162
6.7	Statistiques pour le scénario TCP, application 2 de transmission des données de vol . . . . .	162
6.8	Statistiques pour le scénario UDP, application 3 de transmission des données de vol . . . . .	163
6.9	Statistiques pour le scénario TCP, application 3 de transmission des données de vol . . . . .	163
6.10	Charge des stations, application 3 de transmission des données de vol . . . . .	164
6.11	Exemple de réseau WiFi pour les passagers . . . . .	165
6.12	Exemple de trafic généré par un avion . . . . .	165
6.13	Statistiques sur les délais et les pertes, trafic APC . . . . .	166
6.14	Charge des stations, trafic APC . . . . .	167
C.1	Comparaison des performances de l'ALOHA et du Slotted ALOHA . . . . .	200
C.2	Principe du TDMA, du FDMA et du CDMA . . . . .	201
D.1	GPSR, Mode "Greedy Forwarding" . . . . .	206
D.2	GPSR, Mode "Greedy Perimeter" . . . . .	207
E.1	Fonctionnement de RED . . . . .	210
F.1	Définition du meilleur chemin pour le protocole MUDOR . . . . .	214
F.2	Principe de GLSR . . . . .	216
G.1	Les problèmes du nœud caché et du nœud exposé . . . . .	219
H.1	Calcul de la portée optique . . . . .	221

---

---

I.1	Principe de l'étalement de spectre à séquence directe . . . . .	224
I.2	Arbre des codes OVSF . . . . .	226
I.3	Registre à décalage à rétroaction linéaire à n états . . . . .	227
I.4	Autocorrélation d'une m-séquence . . . . .	227
I.5	Principe des codes de Gold . . . . .	228
J.1	Diagramme UML de la gestion des nœuds . . . . .	230
J.2	Capture d'écran de l'animation du réseau . . . . .	232
K.1	Capture d'écran du modèle OPNET . . . . .	234
K.2	Le nœud <i>manager</i> . . . . .	234
K.3	Le processus <i>manager_node</i> . . . . .	235
K.4	Le processus <i>manager_dijkstra</i> . . . . .	236
K.5	Le processus <i>manager_interf</i> . . . . .	237
K.6	Le processus <i>manager_stat</i> . . . . .	237
K.7	Le nœud <i>avion</i> . . . . .	238
K.8	Le processus <i>aircraft_mgr</i> . . . . .	238
K.9	Le processus <i>aircraft_src</i> . . . . .	239
K.10	Le processus <i>aircraft_transport_layer</i> . . . . .	239
K.11	Le processus <i>aircraft_network_layer</i> . . . . .	240
K.12	Le processus <i>aircraft_link_layer</i> . . . . .	240
K.13	Le processus <i>aircraft_physical_layer</i> . . . . .	241
K.14	Le nœud <i>station</i> . . . . .	242
K.15	Le processus <i>station_mgr</i> . . . . .	243



# Liste des tableaux

1	Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques	4
1.1	Exemples de RCP	18
1.2	Exigences les plus contraignantes définies dans le COCR	18
1.3	Les services Classic-Aero d’Inmarsat	20
1.4	Exigence de performances des services multimédias	24
2.1	Pourcentage d’avions connectés, influence de la portée	59
2.2	Influence de la portée	63
3.1	Rôles des codes de canalisation et d’embrouillage dans la norme UMTS	78
3.2	Notations	81
3.3	Bilan de liaison	85
3.4	Portée maximale d’un avion pour différentes fréquences	86
3.5	Stabilité des connexions	90
4.1	Répartition des avions selon leur distance à la station (saut)	102
4.2	Hypothèses pour le scénario de référence	104
5.1	Hypothèses pour le scénario de référence	135
5.2	Répartition des avions selon leur distance à la station (saut) pour différentes portées (km)	136
5.3	Statistiques sur les délais, scénario de référence TCP	144
5.4	Statistiques sur les pertes, scénario de référence TCP	145
6.1	Définition des domaines aériens du COCR	156
B.1	Modèle OSI de l’ISO	197



# Introduction

## Sommaire

---

<b>Contexte : les communications aéronautiques . . . . .</b>	<b>3</b>
Les origines . . . . .	3
Les limites de capacité des communications vocales . . . . .	3
L'augmentation du trafic aérien . . . . .	4
Vers les communications de données numériques : le datalink . . . . .	5
Le comité FANS et le concept CNS/ATM . . . . .	5
Du réseau ACARS au réseau ATN . . . . .	6
L'émergence de nouveaux services pour le contrôle aérien . . . . .	8
L'émergence de nouveaux services pour les passagers . . . . .	9
Le besoin de nouveaux moyens de communications sol-bord . . . . .	9
<b>Contributions et organisation du mémoire . . . . .</b>	<b>9</b>

---



## Contexte : les communications aéronautiques

Les travaux menés lors de ma thèse de doctorat et présentés dans ce mémoire ont eu pour objectif la conception d'un réseau ad hoc aéronautique. Ce type de réseau peut constituer une solution alternative ou complémentaire aux moyens de communication sol-bord existants ou prévus à brève échéance. Nous allons dans un premier temps présenter le contexte du domaine afin en particulier de poser les objectifs du système projeté. L'exposé du plan du mémoire fournit ensuite la démarche suivie pour la conception du système.

### Les origines

Depuis le premier vol des frères Wright en 1903, la question des communications entre le pilote et le sol s'est toujours posée. Elles sont indispensables pour améliorer la sûreté et l'efficacité des vols. Dans un premier temps, le personnel au sol utilisait des gestes ou des signaux visuels. Les pilotes inclinaient par exemple les ailes de l'avion pour signaler à la tour de contrôle qu'ils allaient atterrir à leur prochain passage.

En 1917, AT&T<sup>1</sup> a inventé le premier émetteur-récepteur radio pour avion. La première communication radio entre un avion et le sol a ainsi eu lieu en juin 1917. Mais c'est seulement au début des années 1930 qu'il est devenu techniquement et commercialement possible d'installer une radio à bord des avions. La société ARINC<sup>2</sup> (Aeronautical Radio Incorporated) a d'ailleurs été fondée en 1929. Dans les années 1940, la radio est devenue disponible sur la plupart des avions, permettant les communications vocales. Cependant, il s'agissait souvent de systèmes propriétaires en bande HF, de qualité et de fiabilité médiocres.

### Les limites de capacité des communications vocales

Après la seconde guerre mondiale, l'aéronautique a connu une évolution majeure avec le transport de passagers. Les premières compagnies aériennes ont fait leur apparition. Il est alors devenu nécessaire d'avoir une approche plus structurée des communications aéronautiques. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI)<sup>3</sup> 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)<sup>4</sup>, que la bande VHF de 118 à 132 MHz est allouée aux services aéronautiques mobiles. Cette bande était alors divisée en 70 canaux de 200 kHz.

---

1. <http://www.att.com>  
2. <http://www.arinc.com>  
3. <http://www.icao.int>  
4. <http://www.itu.int>

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 1 – Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques

En 1958, la compagnie PanAm met en service le Boeing 707. C'est le début du transport aérien commercial de masse. Dès lors, le trafic aérien n'a cessé d'augmenter et les 70 canaux ont rapidement été saturés. L'amélioration de la précision de la fréquence des porteuses a ensuite permis de réduire l'espacement entre les canaux. On est ainsi passé de 200 kHz à 100 kHz en 1958, puis à 50 kHz en 1964 et à 25 kHz depuis 1972. Parallèlement à cela, la bande allouée aux communications aéronautiques par l'UIT a augmentée. 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 pour permettre une réutilisation des fréquences. 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<sup>5</sup> à partir d'octobre 1999, puis au dessus du niveau de vol FL 195 à partir de mars 2007. Le tableau 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 aujourd'hui très difficile d'augmenter la capacité des systèmes de communications vocales.

## L'augmentation du trafic aérien

Le transport aérien est aujourd'hui le moyen de transport qui se développe le plus rapidement. La figure 1, extraite de [Eurocontrol 2011], illustre la prévision d'augmentation du trafic aérien en Europe d'ici 2017 par Eurocontrol<sup>6</sup>. On peut y voir des prévisions de croissance annuelle de plus de 7% d'ici à 2017 dans certaines parties de l'Europe. La congestion des systèmes de communications vocales va donc s'accroître dans les prochaines années.

---

5. Le niveau de vol d'un avion s'exprime en centaine de pieds. FL 245 correspond à 24 500 pieds, soit 7,5 km environ.

6. <http://www.eurocontrol.int>

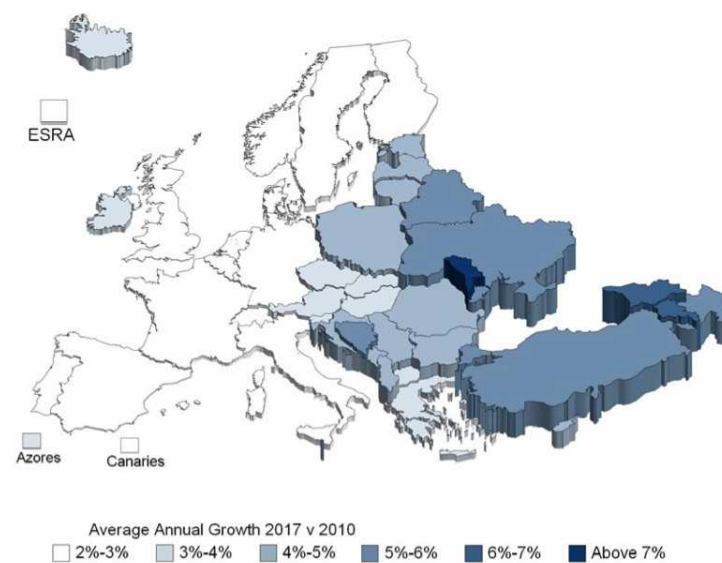


FIGURE 1 – Prédiction d’augmentation du trafic aérien en Europe par Eurocontrol

## Vers les communications de données numériques : le datalink

Dès 1978, les compagnies aériennes ont pris conscience du potentiel et de l’intérêt des communications basées sur les liaisons de données sol bord en introduisant l’ACARS : Aircraft Communications Addressing and Reporting System. Ce système, appelé aussi Plain Old ACARS (POA) ou VDL 0, 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 entre l’avion et la compagnie aérienne. Le mot ”ACARS” désigne aussi le format de ces messages.

La première application a été appelée ”OOOI” pour ”Out, Off, On, In”. Elle a pour but de mieux estimer le temps de travail des pilotes, et donc leur rémunération. Elle 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). L’ACARS est ainsi rapidement devenu le standard *de facto* pour ce type de communication.

## Le comité FANS et le concept CNS/ATM

En 1983, l’OACI a mis en place un comité pour travailler sur les futurs systèmes de navigation aérienne : le 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 aérienne, pour faire face à l’évolution du transport aérien mondial. Un résultat majeur du travail du comité FANS a été l’introduction du concept CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance / Air traffic Management), qui a été approuvé lors de la dixième

conférence de la navigation aérienne en 1991. Il a pour but d'améliorer la capacité et l'efficacité du transport aérien, tout en garantissant la meilleure sûreté possible. Il est présenté dans le Doc 9750 de l'OACI [OACI 2002a].

Au niveau des communications, le changement majeur proposé par le comité FANS concerne la manière même dont les pilotes et les contrôleurs vont communiquer entre eux. Le moyen de communication primaire devrait ainsi passer progressivement des communications vocales aux communications de données numériques à l'horizon 2020. Les communications vocales en VHF et HF, ou plus récemment par satellite, resteront 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), seront utilisées en espace océanique ou polaire, mais elles devraient remplacer à terme les communications vocales en bande VHF dans les zones continentales denses. Ce mode de communication innovant dans le domaine aéronautique basé sur l'échange de données numériques est souvent appelé datalink. 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.

A bord de l'avion par exemple, les messages CPDLC sont affichés et envoyés à partir d'écrans dédiés, appelés DCDU (Data Communication Display Unit). La figure 2 montre le DCDU d'un Airbus A330.



FIGURE 2 – Interface du pilote pour les messages CPDLC

## Du réseau ACARS au réseau ATN

Le concept CNS/ATM nécessite donc une infrastructure de communication mondiale qui gère le transfert des données numériques entre les avions civils et les contrôleurs aériens ou les compagnies au sol. Cette infrastructure est le réseau ATN (Aeronautical Telecommunication Network) [Signore & Girard 1998]. Ses spécifications ont été publiées par l'OACI dans les documents 9705, 9739 et 9896 [OACI 2002b, OACI 2001a, OACI 2010b].

Il est basé sur l'architecture OSI (Open Systems Interconnection) de l'ISO<sup>7</sup>, présenté en annexe B. Il a été conçu pour interconnecter les différents systèmes de communications, y compris les systèmes existants. La figure 3 en montre une illustration.

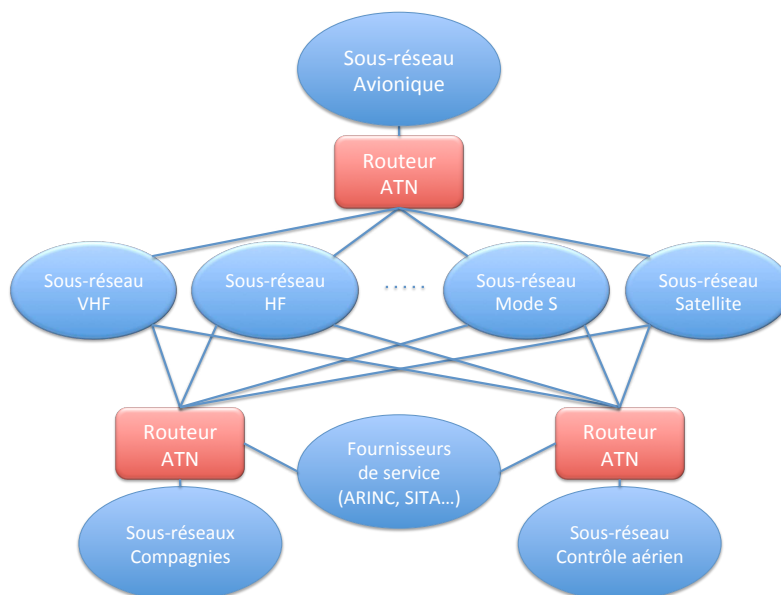


FIGURE 3 – Le réseau ATN

Pour des raisons économiques et commerciales, les compagnies ont fait pression sur les industriels pour pouvoir bénéficier le plus rapidement possible des améliorations proposées par le groupe FANS, même si tous les services n'étaient pas encore implémentés, en particulier le réseau ATN. C'est ainsi que deux premières versions d'équipements FANS ont été développées : le FANS A par Airbus [Airbus 1999] et le FANS 1 par Boeing. On parle de FANS 1/A. Il a été standardisé et approuvé pour les communications du contrôle aérien en 1995. Il est aujourd'hui utilisé dans les zones qui n'ont pas de couverture radar, en particulier en espace océanique.

En espace continental, en attendant le déploiement complet du réseau ATN, certains de ces sous-réseaux sont déjà en cours de déploiement comme la VDL mode 2, un nouveau système de communication de données sol bord basé sur la bande VHF. Une solution intermédiaire facilitant la migration a été adoptée en 1999 : l'AOA (ACARS Over AVLC). Il permet de transporter des messages ACARS sur la VDL mode 2, ce qui améliore les performances du Plain Old ACARS.

Le FANS 2/B est en cours de développement. Il utilisera le réseau ATN en zone océanique et en zone continentale. En 2001, Eurocontrol a lancé le programme LINK 2000+<sup>8</sup> [Eurocontrol 2010b]. Il 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.

7. <http://www.iso.org>

8. <http://www.eurocontrol.int/link2000>

Des applications CPDLC ont ainsi été mises en oeuvre pour les avions en route grâce à la VDL Mode 2 et au réseau ATN depuis 2004 dans le centre de contrôle de Maastricht. Actuellement, le réseau ATN est toujours en cours de déploiement.

## L'émergence de nouveaux services pour le contrôle aérien

Comme nous l'avons expliqué, 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 répertoriant les futures services opérationnels ainsi que leurs exigences : le COCR (Communications Operating Concepts and Requirements) [COCR 2002]. Le COCR est ainsi indépendant de la technologie de communication.

Conformément au concept CNS/ATM, le COCR considère deux phases distinctes pour les communications, illustrées dans la figure 4. 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 deviendront le moyen primaire de communication et de nouvelles applications verront le jour pour remplacer les communications vocales.

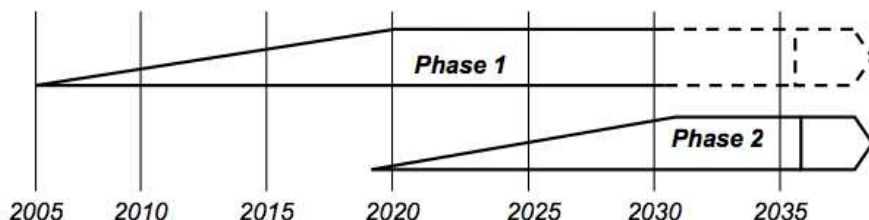


FIGURE 4 – Les deux phases du COCR

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, 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 et les services divers. 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 peut trouver dans la littérature d'autres services envisageables

dans le futur : la vidéo-surveillance [Thanthry *et al.* 2007], la télémédecine ou encore la sauvegarde des boîtes noires en vol [BEA 2011].

## **L'émergence de nouveaux services pour les passagers**

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. 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 [OACI 2007]. Plusieurs projets et entreprises ont alors vu le jour pour fournir ces services. Nous les verrons plus en détail dans le Chapitre 1.

## **Le besoin de nouveaux moyens de communications sol-bord**

L'émergence de ces nouveaux services pour les contrôleurs, les compagnies et les passagers, alimente le besoin de nouveaux moyens de communications sol-bord. 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 des solutions par satellites, des solutions par liaisons directes avec le sol et très récemment des solutions utilisant des liaisons entre avions, c'est-à-dire mettant en oeuvre des réseaux ad hoc aéronautiques. C'est l'objet de cette thèse. Une étude publiée dans [Watkins & Dagli 2011] montre d'ailleurs l'intérêt économique d'une telle solution pour les compagnies, grâce notamment à son coût de déploiement et d'exploitation relativement faible.

## **Contributions et organisation du mémoire**

Le mémoire est organisé en six chapitres. Le premier est consacré à l'état de l'art des communications numériques sol-bord. Nous présenterons les différents types de communications entre l'avion et le sol et les différents moyens de communication de données numériques existants pour le contrôle aérien, ainsi que pour les passagers. Nous mettrons en évidence les limites de ces systèmes et nous présenterons les solutions innovantes envisagées pour les futures communications aéronautiques sol-bord, en particulier les réseaux ad hoc aéronautiques. Nous ferons un rapide état de l'art des réseaux ad hoc mobiles, avec en particulier leurs principales caractéristiques, les solutions proposées pour les couches physique et liaison, ainsi que les problématiques de routage et de transport spécifiques à ce type de réseau. Nous présenterons enfin un état de l'art des réseaux ad hoc aéronautiques. Nous décrirons les solutions proposées pour les couches physique et liaison ainsi que les

différents protocoles de routage proposés dans les études existantes. Enfin, nous verrons les différentes études qui ont été menées pour démontrer la faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques.

Le second chapitre est consacré à la démonstration de faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques. L'objectif de cette étude est de démontrer la faisabilité du système en zone continentale et en zone océanique, et en particulier d'estimer la portée requise pour garantir une bonne connectivité du réseau. Contrairement aux études existantes, nous baserons sur des positions réelles d'avions pendant leur vol. Pour la zone continentale, nous utiliserons des données radar indiquant la position des avions survolant l'espace aérien français pendant plusieurs journées. Pour la zone océanique, nous utiliserons des reports de positions des pilotes volant entre l'Europe et l'Amérique. Dans ce chapitre, nous décrirons donc les données utilisées, ainsi que le logiciel développé pour cette étude. Nous présenterons ensuite les résultats de l'étude en zone continentale et en zone océanique. Nous étudierons en particulier l'influence de la portée maximale des connexions entre avions sur la connectivité du réseau, ainsi que l'influence du nombre et de la position des stations sol.

Le troisième chapitre est consacré à l'architecture proposée pour le réseau ad hoc aéronautique. Nous justifierons en particulier les choix que nous avons faits pour les couches physique et liaison. Contrairement aux études existantes, nous avons choisi d'utiliser le CDMA pour les communications entre avions dans le réseau ad hoc aéronautique. Nous détaillerons en particulier le modèle que nous avons développé pour l'estimation des interférences d'accès multiples. Nous proposerons un bilan de liaison pour les communications entre avions afin d'en estimer la portée maximale. Nous présenterons ensuite les choix que nous avons fait pour le routage et la couche transport. Enfin, nous décrirons la méthodologie et le modèle que nous avons développé avec le logiciel Opnet Modeler pour étudier les performances du réseau ad hoc aéronautique.

Les chapitres 4 et 5 sont ensuite consacrés au dimensionnement du système. Le chapitre 4 présente les résultats pour la zone continentale, et le chapitre 5 pour la zone océanique. Dans ces deux chapitres, nous nous intéresserons au pire cas où tous les avions émettent simultanément et en permanence à destination du sol. L'objectif est de saturer le réseau pour en voir les limites. Nous le ferons avec du trafic exclusivement UDP puis TCP. Dans les deux cas, nous étudierons les performances du réseau en termes de débits, de délais et de pertes. Pour le scénario UDP, chaque avion du réseau générera un trafic à un débit constant donné. Nous augmenterons ce débit jusqu'à obtenir la saturation du réseau. Pour le scénario TCP, nous utiliserons un générateur de trafic de type "TCP Greedy". Il s'agit en fait d'une source de trafic gloutonne qui suppose que la couche applicative a toujours des données à envoyer. Le débit d'émission de chaque avion est ainsi régulé par TCP, qui va s'adapter en cas de congestion du réseau. Nous étudierons ainsi l'influence de différents paramètres sur les performances du système, en particulier la taille des paquets, la portée

des connexions ou encore le gain d'étalement.

Enfin, le chapitre 6 est consacré à l'étude des performances du réseau ad hoc aéronautique avec des applications réalistes. Nous étudierons différentes applications. Tout d'abord, nous considérerons l'ensemble des services opérationnels pour le contrôle aérien et les compagnies en zone continentale. Nous nous baserons sur le COCR (Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System) d'Eurocontrol pour la description de ces services. Nous étudierons ensuite des applications de transmission automatique de données de vol en zone océanique. Ces applications ont été proposées par un groupe de travail du BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation civile) formé à la suite de l'accident du vol AF447 entre Rio et Paris en juin 2010. Elles doivent permettre de faciliter la récupération d'un appareil et des enregistreurs de vol en cas d'accident. Enfin, nous étudierons les performances du système avec des applications pour les passagers. Nous considérerons ainsi des services web et mails, couramment utilisées dans le cas d'un accès à l'Internet.



# Chapitre 1

## Les communications numériques sol-bord : le datalink

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>1.1 Les différents types de communications</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1.1 ATSC (Air Traffic Services Communication) . . . . .	15
1.1.2 AOC (Aeronautical Operational Control) . . . . .	16
1.1.3 AAC (Aeronautical Administrative Communication) . . . . .	16
1.1.4 APC (Aeronautical Passenger Communication) . . . . .	16
<b>1.2 Les moyens de communication de données existants pour le     contrôle aérien</b> . . . . .	<b>17</b>
1.2.1 Performances requises . . . . .	17
1.2.2 Solutions par satellite . . . . .	19
1.2.3 Solutions par liaison directe avec le sol . . . . .	21
<b>1.3 Les moyens de communication de données existants pour les     passagers</b> . . . . .	<b>23</b>
1.3.1 Performances requises . . . . .	23
1.3.2 Solutions par satellite . . . . .	24
1.3.3 Solutions par liaison directe avec le sol . . . . .	26
<b>1.4 Limites des solutions existantes</b> . . . . .	<b>27</b>
1.4.1 Solutions par satellites . . . . .	27
1.4.2 Solutions par liaison directe avec le sol . . . . .	28
<b>1.5 Les futurs moyens de communications</b> . . . . .	<b>28</b>
1.5.1 L'évolution des systèmes existants . . . . .	28
1.5.2 L'infrastructure de communication du projet SESAR . . . . .	29
<b>1.6 Les réseaux ad hoc aéronautiques</b> . . . . .	<b>31</b>

1.6.1	Présentation générale des réseaux ad hoc mobiles . . . . .	31
1.6.2	Présentation générale des réseaux ad hoc aéronautiques . . . . .	38
1.6.3	Problématiques spécifiques des réseaux ad hoc aéronautiques . . . . .	39
1.6.4	Quelques projets de recherche . . . . .	39
1.6.5	Solutions proposées pour les couches physique et liaison . . . . .	41
1.6.6	Protocoles de routage . . . . .	43
1.6.7	Etude de faisabilité . . . . .	43
	<b>Résumé du chapitre . . . . .</b>	<b>45</b>

---

## Introduction

Les communications aéronautiques font l'objet de recommandations émises par l'OACI et regroupées dans l'annexe 10 [OACI ] de la Convention de l'Aviation Civile Internationale de Chicago en 1944. Cette annexe a été plusieurs fois amendée et comporte aujourd'hui cinq volumes. Le volume III est en particulier consacré aux systèmes de communication. Il est divisé en deux parties : la première sur les systèmes de communications de données numériques et la seconde sur les systèmes de communications vocales. Dans cette thèse, nous nous intéressons uniquement aux communications sol-bord numériques.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter une classification des différentes communications qui ont lieu entre l'avion et le sol. Ensuite, nous présenterons les différents moyens dont dispose un avion pour communiquer avec le sol et nous en verrons les limites. Les moyens de communication de l'avion utilisés pour des applications de navigation ou de surveillance sont présentés en annexe A. Enfin, nous présenterons brièvement les recherches actuelles sur les futurs moyens de communication pour l'aéronautique.

### 1.1 Les différents types de communications

L'annexe 10 de l'OACI [OACI ] définit quatre catégories de communications aéronautiques sol-bord : les communications pour le contrôle aérien (ATSC), les communications opérationnelles pour les compagnies (AOC), les communications administratives pour les compagnies (AAC) et les communications pour les passagers (APC). Les communications ATSC et AOC sont appelées communications opérationnelles ou critiques.

#### 1.1.1 ATSC (Air Traffic Services Communication)

L'ATSC regroupe l'ensemble des communications entre les pilotes et le contrôle aérien. Le contrôle aérien est un service assuré par les contrôleurs aériens pour garantir la sûreté, la rapidité et l'efficacité des vols. Ces derniers ont ainsi pour but d'éviter les collisions entre aéronefs, mais aussi de fournir les avis et renseignements 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. Enfin, ils doivent fournir un service d'alerte pour prévenir les organismes appropriés lorsque les avions ont besoin d'aide.

Pour assurer ces services, les contrôleurs aériens utilisent bien sûr des communications vocales pour transmettre leurs instructions aux pilotes. Mais il existe aussi de nombreuses applications qui utilisent des liaisons de données numériques [OACI 2000b]. On peut citer par exemple les communications contrôleur-pilote par liaison de données (CPDLC), la surveillance dépendante automatique (ADS) ou les services d'informations de vol par liaison de données (DFIS).

### 1.1.2 AOC (Aeronautical Operational Control)

Les compagnies aériennes peuvent aussi avoir besoin de communiquer avec leurs avions en vol. On distingue alors les communications opérationnelles (AOC) et les communications administratives (AAC). Les communications opérationnelles 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" [OACI]. Elles permettent la gestion sûre et efficace des vols.

Ces communications permettent aux pilotes de bénéficier d'une liaison directe avec le personnel de la compagnie au sol, en particulier le service des opérations aériennes, mais aussi éventuellement les ingénieurs, le service de maintenance, le service commercial, ... Parmi les applications possibles, on peut citer la transmission des heures exactes de décollage et d'atterrissage de l'avion, utilisées pour calculer la rémunération des pilotes, la transmission du niveau de carburant, de l'état du vol, des planning de l'équipage et de l'avion, des plans de vol, ... L'utilisation de ces services varie selon les compagnies.

### 1.1.3 AAC (Aeronautical Administrative Communication)

Les communications administratives sont les communications entre les pilotes et les compagnies aériennes qui ne sont liés ni à la sécurité ni à l'efficacité du vol. On peut citer par exemple l'envoi d'informations concernant le personnel navigant commercial (planning, réservations de transport au sol, de logement, ...), les passagers (liste des passagers, liste des correspondances, ...) ou la gestion de la cabine (demande de nettoyage, rapport d'incident, ...).

### 1.1.4 APC (Aeronautical Passenger Communication)

L'APC regroupe l'ensemble des communications pour les passagers. L'introduction de nouveaux services pour les passagers à bord des avions civils est un besoin clairement identifié. En effet, le fait de pouvoir se connecter à Internet depuis un avion est une demande de plus en plus forte de la part des passagers et des compagnies. L'homme d'affaire pourra ainsi consulter ses mails, suivre le cours de la bourse, faire une visioconférence, ... Le touriste pourra consulter l'actualité, la météo de sa destination, faire de la messagerie instantanée avec ses amis, ou encore regarder une vidéo en streaming pour se détendre pendant le vol.

C'est pourquoi de nombreuses compagnies et de nombreux équipementiers aéronautiques recherchent actuellement des moyens de fournir de tels services aux passagers. Cela passe en particulier par de nouveaux moyens de communications entre l'avion et le sol. Nous allons maintenant détailler les moyens de communications existants.

## 1.2 Les moyens de communication de données existants pour le contrôle aérien

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement aux moyens de communication de données numériques, par opposition aux moyens de communication par la voix, utilisés pour le contrôle aérien. On peut les classer en deux catégories : les solutions par satellite avec le SATCOM (Satellite Communications) ou AMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service) et les solutions par liaison directe avec le sol avec la VDL (VHF Data Link) et la HFDL (High Frequency Data Link). Cela est illustré dans la figure 1.1. Nous allons maintenant les décrire plus en détail.

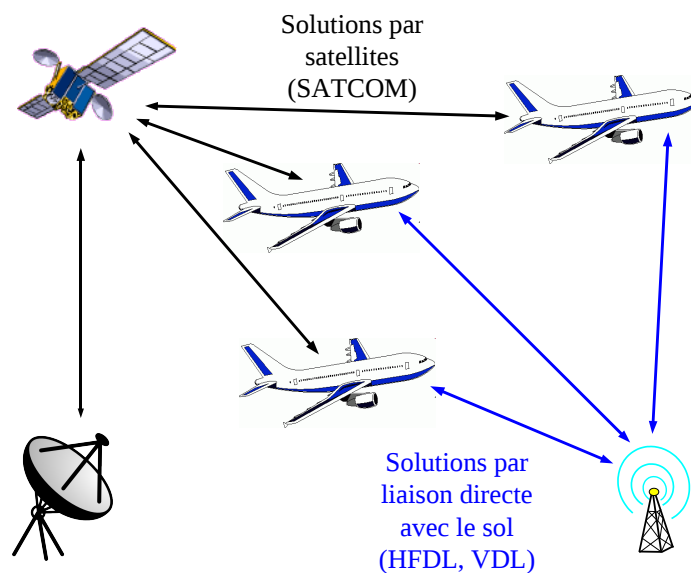


FIGURE 1.1 – Les moyens de communications existants

### 1.2.1 Performances requises

Les performances requises pour les communications aéronautiques sont exprimées sous forme de RCP (Required Communication Performance), qui ont été définies par l'OACI dans [ICAO 2006], puis dans [OACI 2010a]. Les RCP introduisent le concept de transaction opérationnelle. Il s'agit du processus de communication qui débute lorsque l'utilisateur initialise la communication pour transmettre une instruction, une information ou une demande, et qui termine lorsque l'utilisateur est certain que le message a bien été reçu. Les spécifications des RCP portent alors sur quatre critères :

- le temps de transaction exprimé par deux paramètres :
  - ET (Expiration time) : le temps maximum d'une transaction opérationnelle, temps au-delà duquel l'utilisateur doit choisir une procédure alternative

- TT 95% (Nominal time) : le temps nominal pour terminer une transaction opérationnelle dans 95% des cas
- la continuité de service : probabilité qu’une transaction opérationnelle soit terminée pendant le temps de transaction maximum
- la disponibilité : probabilité qu’une transaction opérationnelle puisse être initiée
- l’intégrité : taux d’erreur non détectée acceptable pendant une transaction opérationnelle.

Dans [ICAO 2006], plusieurs types de RCP ont été définies pour différentes valeurs des paramètres précédents. Le tableau 1.1 en donne quelques exemples.

RCP	Temps de transaction ET (s)	Continuité (probabilité par heure de vol)	Disponibilité (probabilité par heure de vol)	Intégrité (taux d’erreur par heure de vol)
RCP 10	10	0,995	0,99998	$10^{-5}$
RCP 60	60	0,99	0,9995	$10^{-5}$
RCP 120	120	0,99	0,9995	$10^{-5}$
RCP 240	240	0,99	0,9995	$10^{-5}$
RCP 400	400	0,99	0,999	$10^{-5}$

TABLE 1.1 – Exemples de RCP

Il faut ensuite déterminer la RCP la mieux adaptée à chaque service du contrôle aérien. Plusieurs méthodes ont alors été proposées. Dans le COCR, les performances requises sont définies pour tous les services décrits. Dans [ED-78A 2000], les services sont regroupés en grandes catégories et une seule RCP est proposée pour chaque catégorie, elle correspond à la RCP du service le plus contraignant. Ces exigences ont ensuite été standardisées dans [ED-120 2004] pour les services en zone continentale et dans [ED-122 2007] pour les zones océaniques. Le tableau 1.2 montre les exigences les plus contraignantes définies dans le COCR pour le domaine de vol "en route". La phase 1 correspond aux exigences actuelles, la phase 2 aux exigences en 2020.

Service	Phase	Temps de transaction TT 95% (s)	Continuité (probabilité par heure de vol)	Disponibilité (probabilité par heure de vol)	Intégrité (taux d’erreur par heure de vol)
ATSC	1	3,8	0,996	0,9995	$5.10^{-6}$
	2	0,74	0,99999992	0,9999999995	$5.10^{-10}$
AOC	1+2	13,6	0,996	0,9995	$5.10^{-10}$

TABLE 1.2 – Exigences les plus contraignantes définies dans le COCR

De telles exigences, en particulier en terme de disponibilité, ne peuvent être satisfaites qu’en utilisant plusieurs moyens de communication différents. Nous allons maintenant les décrire.

## 1.2.2 Solutions par satellite

Le premier moyen de communication qui peut venir à l'esprit pour les avions civils est bien sûr le satellite. En effet, il permet d'avoir une très grande couverture, ce qui est un avantage lorsqu'on veut fournir un service à des avions qui volent partout dans le monde. Nous allons voir quelques-unes des solutions existantes.

### 1.2.2.1 Inmarsat

Inmarsat<sup>1</sup> a été fondé en 1979. C'était à l'origine une organisation internationale. Elle a ensuite été privatisée en 1999. Inmarsat possède et opère aujourd'hui trois constellations complètes de satellites géostationnaires : quatre satellites Inmarsat-2 lancés au début des années 90, 4 satellites Inmarsat-3 lancés à la fin des années 90 et trois satellites Inmarsat-4 lancés en 2005 et 2008. Les satellites Inmarsat offre ainsi une couverture globale entre  $\pm 80^\circ$  de latitude environ. Les pôles ne sont donc pas couverts. La figure 1.2 montre la couverture des services aéronautiques d'Inmarsat.

Inmarsat a été le premier opérateur civil à proposer, dès les années 90, des services de communications par satellite destinés à l'aéronautique. Il a ensuite été le premier à se conformer aux normes et pratiques recommandées par l'OACI. C'est aujourd'hui l'opérateur par satellite le plus largement utilisé, avec plus de 10 000 avions équipés.

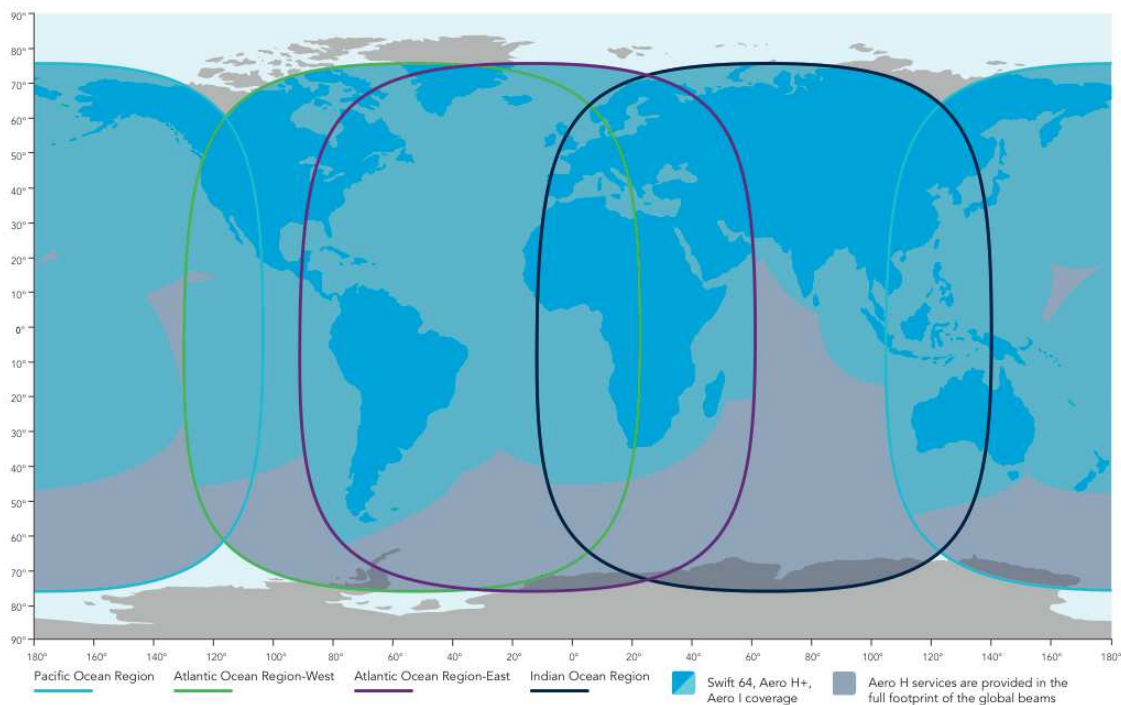


FIGURE 1.2 – Couverture des services aéronautiques d'Inmarsat

1. <http://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 et SwiftBroadband. Seul le service Classic-Aero est approuvé par l'OACI pour les communications critiques du cockpit. Il est supporté par toutes les générations de satellites Inmarsat. Il se décline en fait en six sous-services, dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.3.

Service	Aero H et H+	Aero I	Aero L	Mini M Aero	Aero C
Voix	Multiples canaux	Multiples canaux	-	Un canal	-
Données	10,5 kbps	4,8 kbps	1,2 kbps	2,4 kbps	0,6 kbps
Antenne	Gain élevé	Gain intermédiaire	Gain faible	Gain faible	Gain faible
Approuvé par l'OACI pour les services critiques	Oui	Oui	Oui	Non	Non

TABLE 1.3 – Les services Classic-Aero d'Inmarsat

### 1.2.2.2 Iridium

Iridium<sup>2</sup> propose un service de communication par satellite en bande L depuis novembre 1998. Il s'agit d'une constellation de 66 satellites défilants en orbite basse (LEO) à environ 800 km d'altitude. La figure 1.3 montre cette constellation. Cela permet d'être en communication avec au moins un satellite sur toute la terre à n'importe quel moment. Contrairement au système Inmarsat, Iridium offre donc une couverture mondiale complète. De plus, le système est basé sur des communications entre les satellites, ce qui permet de minimiser le nombre de stations au sol. Il y a ainsi seulement deux stations de contrôle au sol : une pour les communications civiles et une pour les communications militaires.

En juillet 2011, la FAA a autorisé les avions commerciaux à utiliser le système Iridium pour les communications du contrôle aérien en espace océanique, conformément aux recommandations du comité PARC (Performance-based operations Aviation Rulemaking Committee) [FAA 2010]. Ce comité a ainsi réalisé des essais en vol pendant plus d'un an. Iridium constitue donc aujourd'hui une alternative intéressante au système Inmarsat pour les communications aéronautiques par satellite. Elle est en effet plus légère et moins coûteuse. Le débit offert est en revanche limité à 2,4 kbps.

---

2. <http://www.iridium.com>

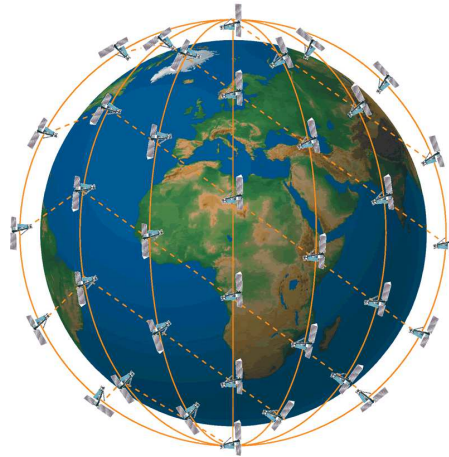


FIGURE 1.3 – La constellation Iridium

### 1.2.3 Solutions par liaison directe avec le sol

Une autre solution envisageable pour fournir une connexion à bord des avions civils est d'établir une liaison directe avec le sol. On obtient alors un réseau cellulaire avec des stations au sol. Voilà quelques-unes des solutions existantes.

#### 1.2.3.1 POA : Plain Old ACARS

Le Plain Old ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System) est un système de communication de données numériques qui a été créé en 1978 par ARINC. Il permet l'envoi de messages relativement simples entre les avions et le sol, sous forme de chaînes de caractères. Les premières applications étaient destinées aux compagnies aériennes. L'ACARS n'est pas standardisé par l'OACI, mais il est spécifié dans les normes ARINC 618, 619, 620, 622 et 623 [ARINC 2006, ARINC 2009, ARINC 2007, ARINC 2001a, ARINC 2005].

L'interface radio utilise des canaux VHF de 25 kHz destinés initialement aux communications vocales entre 118 et 136 MHz. Il utilise une modulation d'amplitude AM-MSK (Minimum Shift Keying), un accès au canal par CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Il offre un débit de 2,4 kbps. Aujourd'hui, les deux principaux fournisseurs de services, ou DSP (Data Link Service Provider), pour l'ACARS sont ARINC et SITA. Il y a une dizaine de canaux VHF réservés à l'ACARS dans le monde.

#### 1.2.3.2 VDL Mode 1

La VDL Mode 1 a été conçue pour remplacer le Plain Old ACARS. Elle a été le premier système datalink standardisé par l'OACI. Malheureusement, elle n'a jamais été implémentée car ses performances étaient trop faibles par rapport à la VDL Mode 2. Elle a donc été retirée de l'Annexe 10 de l'OACI.

### 1.2.3.3 VDL Mode 2

La VDL Mode 2 a été spécifiée par l'OACI en 1996 puis incluse dans l'Annexe 10. En 2001, les spécifications techniques ont fait l'objet d'un manuel de l'OACI [OACI 2001b].

Au niveau de la couche physique, la VDL Mode 2 utilise une modulation de phase D8PSK (Differentially encoded 8-Phase Shift Keying) et offre un débit binaire de 31,5 kbps.

Au niveau de la couche liaison, la sous-couche MAC de la VDL Mode 2 implémente le CSMA p-persistent. Comme dans le CSMA, un avion écoute le canal avant d'émettre pour déterminer s'il est occupé ou non. Si le canal est libre, l'avion émet alors avec une probabilité  $p$ . S'il n'émet pas, il attend un temps aléatoire avant de recommencer l'opération. Au niveau de la sous-couche LLC, la VDL Mode 2 implémente l'AVLC : Aviation VHF Link Control. Ces principales fonctions sont de détecter et de corriger les erreurs de transmission grâce à un codage de type Reed-Solomon, de retransmettre éventuellement les trames perdues, et d'identifier la source et la destination des messages.

Le premier vol commercial utilisant la VDL Mode 2 a eu lieu le 20 novembre 2002. Elle est aujourd'hui proposée aux compagnies par les deux fournisseurs de services ARINC et SITA. Elle est opérationnelle en Europe, en Australie, à Singapour, au Japon et aux Etats-Unis. La figure 1.4 montre la couverture du service VDL Mode 2 offert par SITA en 2009 [SITA 2009].

La VDL Mode 2 est compatible avec le format de messages ACARS. On parle alors d'AOA, pour ACARS over AVLC. Elle sera ensuite utilisée pour l'envoi des messages ATN. Depuis 2004, l'ATN et la VDL Mode 2 sont complètement opérationnels dans le centre de contrôle de Maastricht, sous l'impulsion d'Eurocontrol dans le cadre du projet Link 2000+.



FIGURE 1.4 – Couverture VDL Mode 2 par SITA

#### 1.2.3.4 VDL Mode 3

La VDL Mode 3 est développée aux Etats-Unis avec le soutien de la FAA. Elle est candidate pour devenir le futur moyen de communication pour les communications vocales et les communications de données du domaine ATC. Elle utilise le TDMA (Time Division Multiple Access). Des slots sont ainsi assignés aux avions par la station sol pour la voix et les données. Elle offre un débit de 31,5 kbps.

#### 1.2.3.5 VDL Mode 4

La VDL Mode 4 [OACI 2004b] a été standardisée par l'OACI en 2001. Elle utilise le STDMA (Self-organized Time Division Multiple Access). Elle va principalement être utilisée pour les applications de navigation et de surveillance (ADS-B). Elle offre un débit de 19,2 kbps.

#### 1.2.3.6 HFDL

La HFDL (High Frequency Data Link) est un moyen de communication de données numériques qui permet d'envoyer des messages au format ACARS [OACI 2000a]. Elle a été standardisée par l'OACI puis ajoutée à l'Annexe 10 en 1999. Les spécifications techniques de la HFDL se trouvent dans les normes ARINC 634, 635 et 753 [ARINC 1996, ARINC 2003, ARINC 2001b]. La HFDL utilise trois modulations PSK (Phase Shift Keying) et offre un débit maximum de 1,8 kbps. Elle offre une couverture mondiale.

### 1.3 Les moyens de communication de données existants pour les passagers

Nous allons maintenant voir les exigences requises pour les communications des passagers, puis les solutions existantes.

#### 1.3.1 Performances requises

Les communications aéronautiques pour les passagers ne sont pas soumises aux mêmes exigences de disponibilité, d'intégrité et de continuité que les communications du contrôle aérien car elles n'impactent pas la sûreté de l'avion. Le développement de nouveaux moyens de communication est donc simplifié et il existe un grand nombre de solutions pour les compagnies aériennes.

Toutefois, des recommandations concernant la qualité des services multimédias existent. Les trois principaux paramètres utilisés sont le délai, la gigue et le taux de perte. Le délai

représente la durée entre l'émission et la réception des données, la gigue représente la variation de ce délai et le taux de perte correspond au pourcentage de paquets perdus durant la transmission. Dans [ITU 2001], l'UIT donne ainsi des recommandations pour de nombreuses applications vocales ou de données : la téléphonie, la visioconférence, la navigation sur Internet ou encore l'échange de mails. Le tableau 1.4 en donne quelques exemples.

Applications	Délai	Gigue	Taux de pertes
Téléphonie	< 150 ms (préférable) < 400 ms (limite)	< 1 ms	< 3%
Navigation Internet	< 2 s/page (préférable) < 4 s/page (acceptable)	-	0
Envoi de mail	plusieurs minutes	-	0

TABLE 1.4 – Exigence de performances des services multimédias

## 1.3.2 Solutions par satellite

### 1.3.2.1 Connexion-by-Boeing

La première solution qui a été commercialisée pour les communications sol-bord des passagers est Connexion-by-Boeing [Jones & de La Chapelle 2001]. Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un système développé par Boeing, qui permettait d'offrir une connexion Internet aux avions civils. Les passagers pouvaient alors se connecter via une connexion Wi-Fi ou Ethernet. Le système se composait d'une antenne à pointage électronique ou mécanique en bande Ku embarquée dans l'avion, de plusieurs répéteurs loués sur des satellites ainsi que de stations sol.

Connexion-by-Boeing a été mis en service pour la première fois le 17 mai 2004 par la compagnie Lufthansa. D'autres compagnies se sont ensuite équipées : All Nippon Airways, Japan Airlines et Scandinavian Airlines System, China Airlines, Singapore Airlines, Asiana Airlines, Korean Air, El Al et Etihad Airlines. Cela représentait au total environ 150 avions. Malheureusement, le 17 août 2006, Boeing a annoncé l'arrêt du service Connexion-by-Boeing pour des raisons économiques, tout en promettant d'aider ses clients à un arrêt le moins brutal possible.

### 1.3.2.2 Inmarsat

**Le service Swift 64** Il fournit des communications vocales et des communications de données aux avions avec un débit allant jusqu'à 64 kbps. Les liaisons peuvent être établies en mode paquet ou en mode commutation de circuits. Ce service nécessite toutefois des antennes à gain élevé et donc onéreuses. Il est principalement destiné à l'aviation d'affaire.

**Le service SwiftBroadband** C'est le plus récent des services offerts par Inmarsat. Il est uniquement disponible sur les trois satellites de quatrième génération. Il a été conçu pour fournir des services aux passagers et à l'équipage. Il permet d'avoir simultanément des communications vocales et des communications de données. Il offre un débit allant jusqu'à 432 kbps avec une antenne à gain élevé. Le service propose un mode "Best Effort" : le débit est partagé entre les terminaux et on a une facturation au volume et un mode "garanti" : on a un débit garanti de 8, 16, 32, 64 ou 128 kbps et une facturation à la durée.

### 1.3.2.3 ARINC - Onboard Internet

Depuis 2008, ARINC propose une autre solution d'accès Internet par satellite pour les compagnies. Le système a été baptisé Oi, pour Onboard Internet<sup>3</sup>. Il permet aux passagers de surfer sur Internet, de consulter leurs mails, ... Le système Oi utilise les satellites géostationnaires Inmarsat, soit avec le service SwiftBroadband qui offre un débit allant jusqu'à 432 kbps, soit avec le système Swift 64 pour un débit de 64 kbps.

La solution d'ARINC intègre un portail d'accès personnalisable pour chaque compagnie, qui peuvent choisir de fournir les applications gratuitement ou non, et un système de cache qui permet aux sites les plus consultés d'être directement sur un serveur dans l'avion.

### 1.3.2.4 Panasonic Avionics Corporation - eXConnect

Depuis 2008, Panasonic Avionics Corporation<sup>4</sup> propose aussi une solution pour fournir Internet par satellite aux avions civils. Le système se nomme eXConnect et utilise les satellites géostationnaires d'Intelsat. Il permet de fournir un accès Internet haut-débit aux passagers en exploitant le système existant GlobalConnexSM d'Intelsat. La flotte d'Intelsat étant composée de 53 satellites en orbites géostationnaires, la capacité du système de Panasonic pourra plus facilement s'adapter à une éventuelle hausse de la demande que celle du système d'ARINC, qui doit se contenter de répéteurs sur les 7 satellites Inmarsat de troisième et quatrième générations.

### 1.3.2.5 OnAir

OnAir<sup>5</sup> est une société créée en 2005 dont les deux actionnaires principaux sont Airbus et SITA. Comme la solution d'ARINC, le système d'OnAir utilise de service SwiftBroadband des satellites Inmarsat. Le 30 avril 2009, OnAir a annoncé le 10000ème vol équipé de leur système.

---

3. [http://www.arinc.com/products/inflight\\_entertainment/oi-onboard\\_internet.html](http://www.arinc.com/products/inflight_entertainment/oi-onboard_internet.html)

4. <http://www.mascorp.com>

5. <http://www.onair.aero>

### 1.3.2.6 Row44

Row 44<sup>6</sup> se lance aussi pour fournir une solution concurrente par satellites. Row 44 utilise les satellites de HughesNet pour fournir l'accès Internet. Le système utilise une antenne en bande Ku embarquée sur l'avion. Les compagnies Southwest Airlines et Alaska Airline ont commencé à tester le système en février 2009.

### 1.3.2.7 AeroMobile

AeroMobile<sup>7</sup> fournit une solution pour la téléphonie mobile à bord des avions civils. Elle utilise le service Aero H des satellites Inmarsat. Elle équipe notamment certains avions des compagnies Qantas et Emirates. Panasonic Avionics Corporation est aujourd'hui l'actionnaire majoritaire d'Aeromobile et fournit un service identique appelé eXPhone.

## 1.3.3 Solutions par liaison directe avec le sol

### 1.3.3.1 Aircell

Aircell<sup>8</sup> est la seule entreprise aux États-Unis à être autorisée par la FCC (Federal Communications Commission)<sup>9</sup> et la FAA (Federal Aviation Administration)<sup>10</sup> à utiliser des fréquences pour des communications avec un avion en vol. Aircell a en effet acheté aux enchères une bande de fréquence de 3 MHz pour 31,7 millions de \$.

Le système d'Aircell 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 de ce système. En janvier 2008, le premier avion d'American Airlines fut équipé. En août 2008, Delta Airlines a annoncé qu'elle allait équiper tous ses avions du système d'Aircell. Chez American Airlines, le système Gogo Inflight est facturé 12,95\$ sur les vols de plus de 3 heures.

### 1.3.3.2 Wi-Sky

Wi-SKY<sup>11</sup> travaille sur une solution d'accès Internet à bord des avions en vol grâce à la technologie sans fil. Wi-SKY veut fournir un accès à plus de 10 Mbps à tous les avions en vol au dessus des États-Unis. La technologie sans fil utilisée sera basée sur le Wi-MAX, avec quelques modifications pour répondre aux exigences : utilisation de l'OFDM (Orthogonal Division Frequency Multiplexing), antenne intelligente à pointage électronique, réutilisation de fréquence, ... Le débit, obtenu par calcul, serait de 10 Mbps

---

6. <http://www.row44.com>

7. <http://www.aeromobile.net>

8. <http://www.aircell.com>

9. <http://www.fcc.gov>

10. <http://www.faa.gov>

11. <http://www.wi-skyinflight.com>

à une distance de 50 miles, soit environ 80 km. A des distances plus courtes, les débits offerts pourraient même atteindre 25 Mbps. Wi-SKY a déjà démontré qu'elle pouvait garantir un débit minimum de 1100 kbps en uplink et en downlink en utilisant un spectre d'une largeur de 80 MHz, ce qui répond aux exigences de la FCC, qui demande un débit de 768 kbps en uplink et en downlink pour être considéré comme "haut débit".

Le système de Wi-SKY, baptisé Wi-SKY Inflight, n'est cependant pas encore disponible pour les avions commerciaux. Il nécessite le déploiement de stations sol sur tout le territoire américain, en respectant une distance maximale entre deux stations sols d'environ 150 km.

## 1.4 Limites des solutions existantes

### 1.4.1 Solutions par satellites

#### 1.4.1.1 Capacité

Les solutions actuelles ou disponibles à court terme par satellite présentent des limitations importantes, notamment en terme de capacité disponible. En effet, fournir un accès Internet et téléphonie mobile aux passagers des avions civils suppose la capacité d'acheminer un volume de trafic important, avec une concentration très forte sur certaines zones, du fait de la géométrie des lignes aériennes. Chaque aéronef se comporte d'un point de vue réseau comme un réseau local connectant d'une dizaine à une centaine d'utilisateurs, et la présence d'une centaine d'avions dans une même zone de service est une hypothèse réaliste (couloir transatlantique, grands hubs européens). La capacité maximale offerte par le service SwiftBroadband d'Inmarsat est de 432 kbps. Cette capacité est alors à partager entre tous les utilisateurs de l'avion. Pour les communications opérationnelles, la capacité maximale actuelle est de 10,5 kbps avec le service Aero d'Inmarsat.

#### 1.4.1.2 Couverture

Une autre limite des solutions par satellite est la couverture. En effet, la plupart des solutions proposées actuellement utilisent des satellites géostationnaires qui n'offrent pas de couverture au niveau des pôles. Or beaucoup d'avions, notamment entre les États-Unis et l'Europe, empruntent des couloirs aériens qui passent au dessus du pôle nord.

#### 1.4.1.3 Coût

La dernière limite de l'accès par satellite est bien sûr le coût. En effet, le coût de fabrication et de lancement d'un satellite de télécommunication est très élevé et il faut plusieurs satellites pour obtenir une couverture mondiale. De plus, les problématiques de pointage

d'un satellite géostationnaire ou d'un satellite défilant depuis un avion en vol sont relativement complexes. Cela nécessite des antennes complexes et encombrantes. Leur intégration à bord des avions civils est donc difficile et onéreuse. Le coût du segment spatial a ainsi eu rapidement raison du système Connexion-by-Boeing [Jones & de La Chapelle 2001].

## 1.4.2 Solutions par liaison directe avec le sol

### 1.4.2.1 Capacité

Actuellement, la solution la plus performante pour les communications sol-bord par liaison directe avec le sol est la VDL Mode 2. Elle offre une capacité maximale de 31,5 kbps, ce qui est insuffisant pour fournir des services haut-débit aux avions civils.

### 1.4.2.2 Couverture

Une solution par liaison directe avec le sol pose bien sûr un problème de couverture. En effet, pour assurer la couverture d'un territoire, il faut déployer des stations sols de façon assez régulière car la portée de chaque station est limitée. Cela pose donc un problème pour assurer la couverture des zones océaniques, où il est impossible de déployer de telles stations. Seule la HF permet d'avoir une couverture mondiale grâce à ses propriétés de propagation. En revanche, elle offre un débit très faible. De plus, elle souffre d'une qualité médiocre qui dépend fortement de l'état de la ionosphère.

### 1.4.2.3 Coût

Le problème de la couverture implique bien sûr un problème de coût. En effet, le nombre de station à déployer pour couvrir un pays ou un continent est loin d'être négligeable, ce qui engendre un coût de déploiement et d'entretien élevé.

## 1.5 Les futurs moyens de communications

Dans cette partie, nous allons voir les travaux portant sur l'évolution des moyens de communication existants. Ensuite, nous verrons les nouveaux moyens de communications développés dans le cadre du projet SESAR.

### 1.5.1 L'évolution des systèmes existants

#### 1.5.1.1 Inmarsat 5

Inmarsat a annoncé travailler avec Boeing pour la conception d'une nouvelle génération de satellite : Inmarsat 5. Contrairement aux générations précédentes, elle exploitera la

bande de fréquences Ka. Chaque satellite offrira ainsi 89 spots. Cela devrait permettre de fournir des débits bien supérieurs à ceux actuels (jusqu'à 50 Mbps). Les lancements sont prévus à l'horizon 2014.

### 1.5.1.2 Iridium next

Iridium travaille aussi sur la seconde génération de sa constellation de satellites. En 2010, Iridium en a obtenu le financement et a signé un contrat avec Thales Alenia Space<sup>12</sup> pour la construction de 81 satellites pour un montant d'environ deux milliards d'euros. Le développement et la construction des satellites doivent se poursuivre jusqu'à 2014. La campagne de lancement doit débuter en 2015 et le système devrait être complètement opérationnel en 2017.

## 1.5.2 L'infrastructure de communication du projet SESAR

En Europe, des travaux sur les futures communications aéronautiques sont actuellement menés dans le cadre du projet SESAR<sup>13</sup> : Single European Sky ATM Research. Ce projet se déroule en trois phases :

- une première 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 2013 dont le budget est estimé à 2,1 milliards d'euros
- une phase de déploiement de 2014 à 2020.

Le projet SESAR est donc un projet européen très ambitieux qui a pour but de définir et d'implémenter de nouvelles solutions techniques et opérationnelles pour satisfaire les besoins du contrôle aérien à l'horizon 2020. Il doit ainsi permettre de multiplier par trois la capacité de l'espace aérien, de multiplier par dix la sûreté des vols, de réduire de 10% les émissions de  $CO_2$  et de réduire d'au moins 50% les coûts du contrôle aérien pour l'utilisateur. Un projet similaire est en cours aux Etats-Unis sous la direction de la FAA (Federal Aviation Administration) : NEXTGEN<sup>14</sup> (Next Generation Air Transportation System).

Dans le domaine des communications, l'infrastructure choisie est basée sur trois nouveaux systèmes de communications de données numériques : l'AeroMACS pour les communications à proximité des aéroports, une nouvelle solution par satellite pour les zones océaniques avec le programme IRIS et le L-DACS pour les communications en zone continentale. La figure 1.5 résume cette infrastructure.

---

12. <http://www.thalesgroup.com/space>

13. <http://www.sesarju.eu>

14. <http://www.faa.gov/nextgen/>

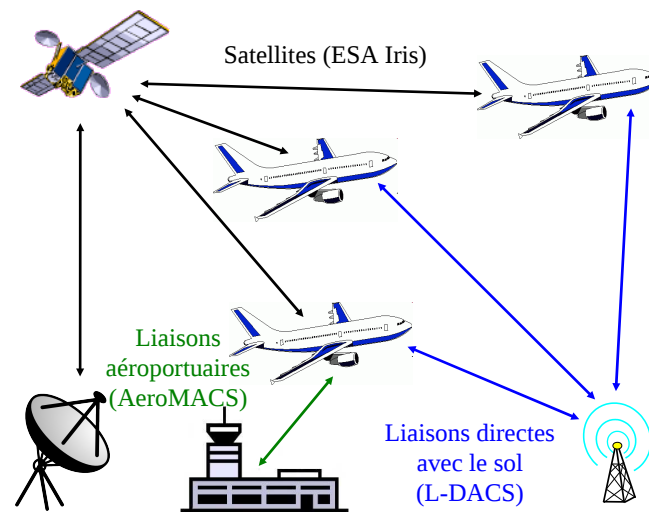


FIGURE 1.5 – L'architecture de communication du projet SESAR

### 1.5.2.1 AeroMACS

L'AeroMACS est un nouveau système "gatelink", c'est-à-dire un système dédié aux communications entre les avions et le sol autour des aéroports. Il doit permettre aux avions au sol d'avoir un accès haut-débit permettant par exemple de télécharger des cartes ou de mettre à jour des bases de données. Il est directement basé sur le standard IEEE 802.16e du WiMAX [802.16]. Il va toutefois opérer en bande C dans une bande réservée à l'aéronautique.

### 1.5.2.2 Satellite IRIS

Une solution satellite est nécessaire pour répondre aux exigences de disponibilité, de capacité et de qualité de service des futures communications aéronautiques, en particulier en espace océanique. Dans le cadre du projet SESAR, le système est en cours de définition en collaboration avec l'Agence Spatiale Européenne (ESA)<sup>15</sup>. Le programme IRIS [IRIS] a ainsi été lancé en 2007 par l'ESA pour proposer une solution opérationnelle en 2020. Plusieurs projets ont alors vu le jour dans le cadre d'IRIS, notamment ANTARES et THAUMAS. Le projet ANTARES étudie le développement d'un nouveau système tandis que le projet THAUMAS étudie une évolution du service SwiftBroadband d'Inmarsat. Les débits offerts par le satellite IRIS devraient être de quelques dizaines de kbps.

---

15. <http://www.esa.int>

### 1.5.2.3 L-DACS

Le L-DACS est une solution de communication par liaison directe avec le sol. Il nécessite le déploiement de stations au sol et sera donc uniquement disponible en espace continental. Deux systèmes sont actuellement candidats pour une implémentation future : le L-DACS 1 et le L-DACS 2 [Jain *et al.* 2011]. Les deux systèmes opèrent en bande L et offrent une capacité d'environ 200 kbps.

Le L-DACS 1 utilise une méthode de partage du canal en fréquence (FDD : Frequency Division Duplex) et une modulation de type OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Le L-DACS 2 est basé sur une méthode de partage temporel du canal (TDD : Time Division Duplex) 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. Un choix devra ensuite être fait pour standardiser l'une des deux solutions.

## 1.6 Les réseaux ad hoc aéronautiques

Les réseaux ad hoc aéronautiques sont un nouveau moyen de communication entre l'avion et le sol. Il s'agit d'un réseau ad hoc mobile dont les nœuds sont les avions civils en vol. Dans cette partie, nous allons donc tout d'abord présenter le concept de réseau ad hoc mobile, suivi d'un état de l'art sur les réseaux ad hoc aéronautiques.

### 1.6.1 Présentation générale des réseaux ad hoc mobiles

Les premiers travaux sur les réseaux ad hoc remontent aux années 1970 dans le cadre du projet "Packet Radio Network" [Jubin & Tornow 1987], financé par le DARPA<sup>16</sup> pour des applications militaires. Il s'agissait de fournir aux militaires un système de communication distribué, multi-saut et qui s'organise et se configure de façon autonome.

En 1998, l'IETF<sup>17</sup> a créé un groupe de travail intitulé MANET (Mobile Ad hoc NETWORK) pour travailler sur ce sujet. Il a pour objectif de standardiser des protocoles de routage pour les réseaux ad hoc mobiles. Le terme "MANET" est aujourd'hui couramment utilisé pour désigner les réseaux ad hoc mobiles.

#### 1.6.1.1 Définition

La locution *ad hoc* signifie en latin « *qui va vers ce vers quoi il doit aller* ». Contrairement aux réseaux cellulaires, un réseau ad hoc est caractérisé par le fait qu'il ne nécessite pas d'infrastructure préexistante. Un réseau ad hoc mobile est donc un ensemble de nœuds

---

16. <http://www.darpa.mil>

17. <http://www.ietf.org>

mobiles qui se configurent et s'organisent de manière autonome. Les nœuds communiquent entre eux grâce à des liaisons sans fil de capacité limitée.

Dans un réseau ad hoc, tous les nœuds peuvent faire office de relais et sont capables de router les informations de proche en proche jusqu'à la destination. Il est ainsi possible de créer de manière spontanée un réseau à partir d'un ensemble de nœuds suffisamment proches les uns des autres. Les nœuds sont autonomes : après une configuration initiale, ils sont capables de découvrir eux-mêmes leur voisinage et les ressources disponibles. De plus, ils sont capables de s'adapter aux changements de la topologie du réseau. Le schéma 1.6 illustre le mode de fonctionnement d'un réseau ad hoc, en comparaison avec le mode infrastructure classique des réseaux cellulaires.

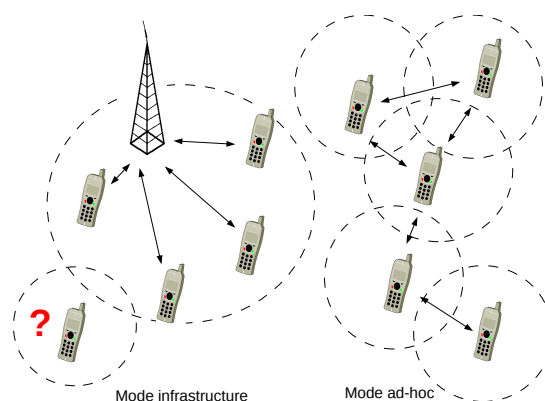


FIGURE 1.6 – Mode infrastructure et mode ad hoc

Les réseaux ad hoc permettent donc de réduire les coûts de mise en place d'une infrastructure. Ils permettent aussi de mettre en place des communications dans des environnements où il n'est pas possible d'installer une infrastructure complète pour des raisons techniques ou fonctionnelles : dans une zone dévastée par un ouragan ou un tsunami, ou encore en territoire ennemi pour les militaires.

### 1.6.1.2 Caractéristiques

Par rapport aux réseaux sans fil classiques, les réseaux ad hoc mobiles ont certaines particularités qui engendrent des problématiques spécifiques [Corson & Macker 1999]. Nous allons en décrire quelques unes.

**Communications multi-sauts** Tout d'abord, il y a bien sûr la problématique des communications multi-sauts. En effet, dans un réseau ad hoc mobile, on doit pouvoir établir une communication entre deux nœuds qui ne sont pas directement à proximité l'un de l'autre. On doit alors utiliser des nœuds intermédiaires qui vont servir de relais pour la communication. Chaque nœud doit donc être capable de trouver une route vers n'importe quelle destination dans le réseau, même si celle-ci n'est pas directement à portée.

**Topologie dynamique** Dans un réseau ad hoc mobile, les nœuds sont mobiles et leur mouvement peut être quelconque. La topologie du réseau est donc plus ou moins dynamique selon la vitesse et la portée de communication des nœuds. De nombreux modèles de mobilité ont donc été proposés pour représenter le comportement d'un type de nœud particulier [Camp *et al.* 2002]. On trouve ainsi des modèles individuels, où les déplacements de chaque nœuds sont modélisés indépendamment les uns des autres (par exemple le modèle Random Walk [Sanchez & Anejos 2001]), et des modèles de groupes, où le déplacement d'un nœud va dépendre du déplacement des autres (par exemple le modèle RPGM [Hong *et al.* 1999]). De plus, la topologie du réseau peut varier à cause de l'évolution de la qualité de la liaison sans fil. En effet, on peut avoir des phénomènes de masquage qui peuvent empêcher momentanément une connexion. Le protocole de routage doit donc être capable de s'adapter à tous ces changements de la topologie du réseau.

**Bande passante limitée** Comme tous les réseaux sans fil, les réseaux ad hoc mobiles disposent d'une bande passante limitée. En effet, la capacité des liaisons sans fil est beaucoup plus faible que la capacité des liaisons filaires. De plus, la capacité réelle utilisable par chaque nœud est généralement beaucoup plus faible que la capacité maximum théorique de la liaison. En effet, les liaisons sans fil sont soumises à de nombreux phénomènes qui en diminuent les performances : bruit, accès multiples, interférences. On a donc un taux d'erreur élevé. Dans le cadre des réseaux ad hoc mobiles, on doit donc minimiser l'échange d'informations de signalisation pour favoriser les données utiles pour l'utilisateur final.

**Consommation d'énergie** Les réseaux ad hoc ont beaucoup été employés pour les réseaux de capteurs. Dans ce contexte, les nœuds mobiles sont généralement de petite taille et disposent donc de faibles ressources énergétiques (batteries). De nombreuses études ont donc été réalisées dans le but de minimiser la consommation énergétique des nœuds [Feeney & Nilsson 2001, Shah & Rabaey 2002].

### 1.6.1.3 Architecture

**La couche physique** D'après le modèle OSI de l'architecture générale des réseaux, présenté en annexe B, la couche physique est responsable de la transmission physique des données. Parmi les principales applications actuelles des réseaux ad hoc, on peut citer les réseaux de capteurs ou les réseaux de véhicules (VANET : Vehicular Ad hoc NETwork). On se trouve donc dans le cadre des Wireless Personal Area Networks (WPAN), des Wireless Local Area Networks (WLAN), voire des Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN). La portée des communications va donc de quelques mètres pour les WPAN à quelques kilomètres pour les WMAN. Diverses technologies de communications sans fils ont été proposées pour chaque type de réseaux. On peut citer par exemple le Bluetooth

(IEEE 802.15 [802.15 ]) pour les WPAN, le WiFi (IEEE 802.11 [802.11 ]) pour les WLAN et le WiMax (IEEE 802.16 [802.16 ]) pour les WMAN.

**La couche liaison** La gestion de l'accès au canal est réalisée par la sous-couche MAC (Medium Access Control) de la couche liaison. L'objectif est de réguler les communications entre les nœuds à travers le canal sans fil. Dans [Jurdak *et al.* 2004, Menouar *et al.* 2006], on peut trouver un état de l'art des nombreux protocoles MAC proposés dans la littérature pour les réseaux ad hoc mobiles. On peut ainsi distinguer les méthodes qui considèrent un canal unique, commun à tous les utilisateurs, comme l'ALOHA [Abramson 1970] ou le CSMA, et celles qui considèrent un canal multiple, qui peut être partagé entre différents utilisateurs, comme le TDMA, FDMA, ou CDMA. Ces méthodes d'accès au canal sont détaillées dans l'annexe C.

**Le routage dans les MANET** Comme pour les protocoles MAC, on trouve dans la littérature de nombreuses propositions de protocoles de routage dans les réseaux ad hoc mobiles. On peut en trouver une taxonomie dans [Mühlethaler 2004, Abolhasan *et al.* 2004, Royer & Toh 1999]. Le groupe de l'IETF qui travaille sur les MANET a pour but de standardiser les fonctionnalités des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc, mobile ou non. En se basant sur les travaux existants sur les protocoles de routage, le groupe de travail a décidé de développer deux standards : un pour les protocoles de routage proactifs et un pour les protocoles de routage réactifs.

**Routage proactif** Les protocoles proactifs ont été les premiers protocoles proposés pour les réseaux ad hoc. Ce sont des protocoles directement inspirés des protocoles de routage existant dans les réseaux filaires classiques. En effet, les protocoles proactifs sont des protocoles qui construisent et maintiennent des tables de routage à jour. Chaque nœud dispose ainsi à chaque instant dans sa table de routage de routes permettant de joindre tous les nœuds du réseau. On a donc un échange périodique de paquets de contrôle entre les nœuds pour établir les tables de routage, puis pour les maintenir si la topologie du réseau change. De plus, dans les protocoles de routage proactif pour les MANET, on retrouve les deux méthodes de routage utilisées dans les réseaux filaires : la méthode "vecteur de distance" et la méthode à "état de liens".

Le principal inconvénient de ses protocoles est dû à la mobilité des nœuds. En effet, plus les nœuds sont mobiles, plus la topologie du réseau va changer fréquemment, et donc plus il faudra de trafic de contrôle pour mettre à jour les tables de routage. Or ce trafic de contrôle va consommer des ressources qui, contrairement aux réseaux filaires classiques, sont limitées à cause des nœuds mobiles qui fonctionnent le plus souvent avec des batteries et surtout à cause du support de communication sans fil dont la capacité est beaucoup plus limitée qu'une liaison filaire. En revanche, l'avantage des protocoles proactifs est de

garantir la disponibilité d'une route vers la destination au moment où l'on en a besoin. Cela peut être un avantage très important dans le cas des réseaux ad hoc aéronautiques où certaines applications, pour le contrôle aérien par exemple, nécessitent une très grande disponibilité.

Parmi les protocoles de routage proactifs dans les MANET, on peut citer DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector Routing) ou OLSR (Optimized Link State Routing). Ces protocoles sont décrits dans l'annexe D.

**Routage réactif** Contrairement au protocole proactif, les protocoles réactifs ne calculent une route vers la destination qu'à la demande. Cela évite ainsi le trafic de contrôle pour maintenir les tables de routage lorsque cela est inutile. Lorsqu'un nœud source a besoin d'une route vers une destination qu'il ne connaît pas, il lance une procédure de découverte de route (Route Discovery) vers la destination. Cela consiste le plus souvent à "inonder" le réseau ad hoc avec des paquets de requête de route (Route Request). Lorsque la destination reçoit l'un de ces paquets, elle répond à la source par un paquet de réponse de route (Route Reply).

Un inconvénient de ce type de protocole est donc qu'il introduit pour les paquets un délai supplémentaire qui correspond à la durée entre la demande d'une nouvelle route et sa découverte. Parmi les protocoles de routage réactifs dans les MANET, on peut citer DSR (Dynamic Source Routing) ou AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing), dont le principe est décrit en annexe D.

**Routage hybride** Les protocoles hybrides sont une combinaison des protocoles proactifs et des protocoles réactifs. Ils tirent profit des avantages des deux catégories de protocoles et essaient de palier les défauts de chacun pour fournir une nouvelle solution. Parmi les protocoles de routages hybrides pour les MANET, on peut citer ZRP (Zone Routing Protocol), décrit dans l'annexe D.

**Routage géographique** Les protocoles géographiques utilisent la localisation des nœuds pour trouver le chemin optimal. Ils se basent en particulier sur la position du destinataire et sur la position des nœuds voisins. Les nœuds peuvent par exemple utiliser la position GPS. Les protocoles géographiques n'ont donc pas besoin des processus de découverte et de maintenance des routes. Il n'y a pas non plus besoin d'échanger les tables de routage entre les nœuds.

Dans [Stojmenovic 2002, Mauve *et al.* 2001], on peut trouver une étude des protocoles de routage géographique existant pour les MANET. On peut citer par exemple DREAM et GPSR, décrits dans l'annexe D.

**Routage hiérarchique** Les protocoles de routage hiérarchique différencient les nœuds du réseau. Il s'agit de découper le réseau en un ensemble de petits groupes appelés "clusters". Chaque cluster est géré par un chef de groupe, ou "cluster-head". Les nœuds d'un cluster vont alors communiquer avec leur cluster-head, et les cluster-heads vont communiquer entre eux pour échanger les informations de routage par exemple. On peut également avoir dans les clusters des nœuds passerelles (ou "gateway") qui font le lien avec les clusters voisins. L'avantage de ce type de routage est d'avoir un nombre de nœud réduit pour le calcul des informations de routage puisqu'on ne considère que les cluster-heads.

La première étape commune à ces protocoles de routage consiste donc à établir les clusters et à élire un cluster-head de façon distribuée. Dans [Yu & Chong 2005] ou [Abbasi & Younis 2007], on peut trouver un état de l'art des principales méthodes utilisées pour établir ces clusters. On peut ainsi établir des clusters de façon géographique en regroupant dans un même cluster les nœuds voisins à un ou plusieurs sauts, on peut également prendre en compte la vitesse des nœuds pour rassembler dans un même cluster des nœuds qui vont dans la même direction. Une fois les clusters établis, les nœuds d'un même cluster doivent élire un cluster-head. Plusieurs critères ont été proposés, il peut s'agir du nœud possédant l'indicatif le plus faible, le plus élevé, ou encore celui ayant le degré le plus élevé.

Le protocole de routage hiérarchique CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing) est décrit en annexe D.

**La couche transport** Les deux principaux protocoles de transport standardisés par l'IETF sont UDP et TCP.

**UDP (User Datagram Protocol)** UDP est un protocole de transport qui a été spécifié dans la RFC 768 [Postel 1980] en 1980. Il permet la transmission de données de façon très simple entre deux entités, définies par une adresse IP et un numéro de port. UDP n'utilise pas de procédure d'ouverture de connexion avant l'envoi des données. Il ne garantit pas la bonne réception des données par le destinataire, ni leur ordre d'arrivée. L'intégrité des données est toutefois vérifiée par une somme de contrôle. UDP est très utilisé pour transmettre rapidement de petites quantités de données (DNS), ou dans des cas où la perte d'un datagramme est moins gênante que l'attente de sa retransmission (voix sur IP).

**TCP (Transmission Control Protocol)** TCP a été spécifié en 1981 dans la RFC 793 [Postel 1981]. TCP offre un service de transfert de données fiables entre deux entités. Une session TCP se décompose en trois phases : l'établissement de la connexion, le transfert de données et la fin de la connexion. L'établissement de la connexion se fait en

trois temps par l'échange des paquets SYN, SYN/ACK et ACK. Cet échange permet de synchroniser les numéros de séquence des deux entités.

Ensuite, l'échange des données a lieu. La fiabilité est assurée par une numérotation des paquets et un système d'acquittement des paquets reçus par le destinataire. Si l'émetteur ne reçoit plus d'acquittement, un mécanisme de timer de retransmission va lui permettre de retransmettre les paquets à partir du dernier paquet acquitté. La durée de ce timer de retransmission est calculée dynamiquement en fonction du temps d'aller-retour (RTT) des paquets. De plus, une somme de contrôle permet de vérifier l'intégrité des données reçues.

TCP permet de faire du contrôle de flux. En effet, chaque entité dispose d'une capacité de réception limitée. Le récepteur peut alors indiquer dans les paquets d'acquittement la taille disponible dans son tampon de réception. L'émetteur adapte alors la taille de sa fenêtre d'émission pour ne pas surcharger le récepteur. TCP permet aussi de faire du contrôle de congestion. En effet, les congestions dans le réseau vont entraîner des pertes. TCP est capable de détecter ces pertes grâce aux acquittements, ou grâce à l'absence d'acquittement reçu. Il va alors s'adapter en réduisant la taille de la fenêtre d'émission pour soulager le réseau.

**Les performances de TCP dans les réseaux ad hoc** Les performances de TCP dans les réseaux ad hoc ont été étudiées dans [Holland & Vaidya 1999, Perkins & Hughes 2002]. Ces études montrent que les performances de TCP sont fortement dégradées dans les environnements sans fil par rapport aux environnements filaires. Cette dégradation des performances s'explique notamment par la bande passante limitée, caractéristique des réseaux sans fil et donc des MANET, ainsi que par le taux d'erreur élevé sur ces liaisons. Ces erreurs se traduisent donc par des pertes de paquets. Le contrôle de congestion de TCP va donc refermer fréquemment la fenêtre d'émission et retransmettre les paquets perdus. De plus, la mobilité des nœuds entraîne des variations plus ou moins fréquente de la topologie du réseau. Cela peut se traduire par une erreur de route et entraîner une expiration des timers de retransmission pendant la recherche d'une nouvelle route.

Les performances de TCP dépendent donc fortement de la distance entre le client et le serveur. En effet, plus ils sont éloignés et plus la probabilité qu'un paquet soit perdu entre les deux est élevée. Cela introduit un problème d'équité, ou "fairness" entre les différents nœuds. Le débit disponible pour chaque nœud ne sera pas le même en fonction de sa distance avec le serveur. Une mesure de la fairness a d'ailleurs été proposée dans [Jain 1984]. Elle permet de mesurer l'indice de fairness  $I_{fairness}$  à partir des débits obtenus par les différents utilisateurs. Il est obtenu par la formule 1.1, où  $n$  représente le nombre d'utilisateurs, et  $x_i$  le débit obtenu par l'utilisateur  $i$ .

$$I_{fairness} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1.1)$$

Ainsi, lorsque tous les utilisateurs obtiennent le même débit, l'indice de fairness vaut 1. Plus l'indice est élevé, plus les débits sont équitables entre les utilisateurs.

Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature pour améliorer les performances de TCP dans les réseaux ad hoc [Al Hanbali *et al.* 2005]. On peut les classer en plusieurs catégories : les solutions au niveau transport, c'est-à-dire les modifications de TCP, les solutions au niveau liaison et les solutions cross-layer qui modifient plusieurs couches simultanément. Quelques-unes de ces solutions sont présentées dans l'annexe E.

### 1.6.2 Présentation générale des réseaux ad hoc aéronautiques

Les réseaux ad hoc aéronautiques, ou AANET (Aeronautical Ad hoc NETwork), ont été proposés pour la première fois en 2006 par Ehssan Sakhaee, Abbas Jamalipour et Nei Kato de l'Université de Sydney dans [Sakhaee *et al.* 2006a, Sakhaee & Jamalipour 2006]. Il s'agit alors d'un nouveau moyen de communication entre l'avion et le sol dont le but est de fournir un accès à Internet aux passagers des avions civils. L'idée est de former un réseau ad hoc dont les nœuds sont les avions en vol en utilisant des connexions entre les avions. On obtient ainsi un réseau à topologie dynamique qui utilise les avions civils comme nœuds de communication actifs (routeurs ou commutateurs en vol). La figure ci-dessous montre le principe général d'un réseau ad hoc aéronautique.

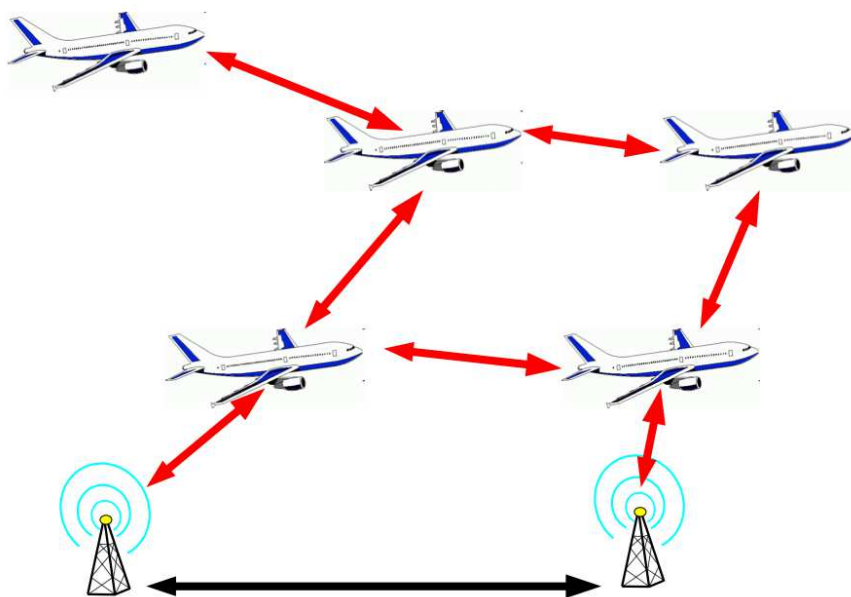


FIGURE 1.7 – Principe général d'un réseau ad hoc aéronautique

On retrouve deux segments : un segment sol constitué d'une ou plusieurs stations sol qui sont reliées entre elles et à Internet, et un segment aéronautique constitué par les avions en vol. Il peut éventuellement être complété par un segment spatial avec un ou plusieurs satellites. Ainsi, lorsqu'un avion est directement à portée d'une station sol, il va pouvoir communiquer directement avec elle. Sinon, il pourra utiliser des avions intermédiaires comme relais afin de joindre une station sol.

### 1.6.3 Problématiques spécifiques des réseaux ad hoc aéronautiques

Les réseaux ad hoc aéronautiques sont donc des réseaux ad hoc mobiles. Ils entrent en fait dans la catégorie des VANET (Vehicular Ad hoc NETwork). Il s'agit du sous-ensemble des MANET dont les nœuds sont des véhicules. L'une des spécificités des VANET, et donc des AANET, est de pouvoir former un système à grande échelle avec un nombre relativement important de nœuds, ainsi qu'avec des ressources et des puissances de transmission élevées. On ne va donc pas s'intéresser ici à la consommation d'énergie.

Ensuite, les véhicules sont caractérisés par des vitesses de déplacement élevées. C'est d'autant plus vrai lorsqu'on considère des avions en vol. On a donc un environnement très dynamique. La topologie du réseau risque de changer fréquemment. Cependant, la mobilité des véhicules n'est pas aléatoire. Les voitures suivent par exemple des routes, tout comme les avions. Cela rend donc leur trajectoire prévisible, au moins pour du court terme. On ne pourra donc pas utiliser un modèle de mobilité de type random walk pour étudier les réseaux ad hoc aéronautiques. Des modèles de mobilité particuliers, basés sur l'utilisation de cartes, ont été proposés pour étudier les VANET. On peut citer par exemple le modèle Manhattan [Bai *et al.* 2003] qui représente le mouvement des nœuds en zone urbaine.

On peut aussi supposer que les véhicules sont équipés d'un système de positionnement. Les avions en possèdent même plusieurs : système de positionnement par satellites (GNSS), VOR (VHF Omnidirectional Range), DME (Distance Measuring Equipment), ... Les avions connaissent donc leur position avec une grande précision. On pourra donc envisager l'utilisation de protocole de routage géographique.

### 1.6.4 Quelques projets de recherche

Les réseaux ad hoc aéronautiques ont récemment fait l'objet de recherches à travers le monde. En Europe, plusieurs projets ont été menés par des industriels et des universitaires pour étudier des futurs moyens de communication sol-bord, et notamment les réseaux ad

hoc aéronautiques. On peut citer le projet ATENAA<sup>18</sup> et le projet NewSky<sup>19</sup>. Le DLR (German Aerospace Center) en Allemagne et l'Université de Salzbourg en Autriche ont été largement impliqués dans ces projets et ont récemment publiés leurs travaux sur les réseaux ad hoc aéronautiques. Nous allons maintenant présenter ces deux projets.

#### 1.6.4.1 Le projet ATENAA

Le projet ATENAA (Advanced Technologies for Networking in Aeronautical Applications)

[Amirfeiz 2006] a débuté en juillet 2004 pour une durée de 33 mois. Il a été financé en partie par l'Union Européenne et regroupe plusieurs entreprises, dont EADS et THALES, et le DLR.

Les objectifs du projet étaient les suivants :

- définir le concept d'un futur réseau aéronautique comprenant des nœuds mobiles (avions et satellites), les infrastructures au sol, les systèmes de communication et les utilisateurs
- évaluer et développer les technologies nécessaires à la gestion et la sécurité de ce réseau
- établir un ensemble d'exigences requises, ainsi que les technologies matérielles et logicielles nécessaires pour :
  - améliorer les performances des systèmes actuels de communication sol-bord
  - la mise en œuvre des futurs systèmes de communication
- tester et valider certaines technologies émergentes pour les communications sol-bord haut-débit :
  - les systèmes de communication en bande Ka
  - les systèmes de communication optique
- évaluer les performances globales du système et préparer sa future implémentation.

#### 1.6.4.2 Le projet NewSky

Le projet NewSky (Networking the Sky for Aeronautical Communications), présenté dans [Schnell & Scalise 2007], est un projet financé par la commission européenne qui s'est déroulé de 2007 à 2009. Il regroupe le DLR, l'université de Salzburg, ainsi que plusieurs industriels, dont Thales Alenia Space et Frequentis.

Le but de ce projet est d'étudier la faisabilité d'un réseau aéronautique global, basé sur le protocole IPv6, qui intégrerait les différents moyens de communication : SATCOM, VHF, HF, et éventuellement des réseaux ad hoc aéronautiques avec des liaisons entre avions. Il s'agirait d'acheminer les informations du contrôle aérien, des compagnies, mais

---

18. <http://www.atenaa.org>

19. <http://www.newsky-fp6.eu>

aussi les services pour les passagers. Dans les conclusions du projet, le consortium NewSky a indiqué que les réseaux ad hoc aéronautiques pourrait devenir intéressant pour les compagnies en tant que solution de communication alternative ou complémentaire dans tous les espaces aériens.

## 1.6.5 Solutions proposées pour les couches physique et liaison

### 1.6.5.1 Liaison idéale

Dans la première étude des réseaux ad hoc aéronautiques de l'Université de Sydney publiée dans [Sakhaee *et al.* 2006a, Sakhaee & Jamalipour 2006], les couches d'accès ne sont pas étudiées. Les auteurs font simplement l'hypothèse d'un moyen de communication entre avions dont la portée varie entre 200 et 600 km. Leur étude se concentre sur les problématiques de routage et de stabilité des liens.

Dans le projet NewSky, les recherches sur les réseaux ad hoc aéronautiques se sont concentrées sur le routage et la topologie du réseau. Dans les travaux publiés dans [Medina *et al.* 2008a, Medina *et al.* 2008b], les liaisons entre avions sont modélisées par un canal de communication idéal dont la portée est un paramètre des simulations.

Dans [Hoffmann *et al.* 2009], des liaisons idéales sans perte sont utilisées. Elles offrent un débit de 2 Mbps, avec une portée de 370 km. La liaison est modélisée par une file d'attente pour les paquets à envoyer. Les seules pertes possibles sont les pertes dues au débordement de cette file d'attente au niveau de chaque avion.

### 1.6.5.2 Antennes directionnelles, liaisons optiques et TDMA

Dans le cadre du projet ATENAA, les avions sont équipés d'un système datalink omnidirectionnel traditionnel en bande VHF ainsi que d'antennes directionnelles pour les liaisons haut-débit entre avions [Karras *et al.* 2008a, Karras *et al.* 2007]. Deux solutions ont alors été proposées pour ces liaisons directionnelles entre avions : des liaisons optiques (OOL : Outer Optical Links) [Karras *et al.* 2008b] et des liaisons en bande Ka. Dans leurs simulations, le lien VHF omnidirectionnel est modélisé par un lien VHF générique qui utilise quatre canaux de 25 kHz et offre ainsi un débit de 100 kbps. Sa portée est de 200 Nm (Nautical Miles), soit environ 370 km. Au niveau MAC, la méthode d'accès utilisée est le TDMA avec réservation. Ensuite, la liaison en bande Ka est modélisée par une antenne directionnelle et offre un débit de 10 Mbps. La liaison optique offre quant à elle un débit de 62 Mbps [Karras *et al.* 2008a]. De plus, ces deux liaisons directionnelles ont la même portée de 200 Nm que la liaison omnidirectionnelle. L'étude de ces antennes directionnelles ainsi que des problématiques de pointage entre deux avions en vol a donc été une partie importante du projet ATENAA.

### 1.6.5.3 S-TDMA

Plus récemment, une équipe japonaise de l'Université de Waseda et de ENRI (Electronics Navigation Research Institute) a publié des travaux sur les réseaux ad hoc aéronautiques dans [Tu & Shimamoto 2009b, Tu & Shimamoto 2009a]. Ils proposent d'utiliser des liaisons entre avions en bande VHF. La portée choisie pour les connexions entre avions est de 678 km, soit la portée optique, et la portée des connexions entre un avion et une station sol est de 300 km. La méthode d'accès proposée est le TDMA.

La synchronisation des avions se fait grâce au système GPS. Le système permet de servir 256 avions simultanément au maximum. Le canal est segmenté en période de deux secondes. Chaque période dispose d'une partie à accès aléatoire de type slotted-aloha pour les demandes d'allocations et de 256 slots réservés à chacun des avions. Lorsqu'un avion rejoint le système, il utilise la partie à accès aléatoire pour demander une allocation. Une station au sol lui attribue alors un slot pendant lequel il peut émettre ses propres paquets ou faire suivre un paquet qu'il a précédemment reçu d'un autre avion. L'application envisagée est le report de position des avions. Les paquets échangés contiennent donc la position de l'avion, son indicatif et sa vitesse. Le système permet donc à chaque avion d'envoyer au maximum 100 bits de données utiles toutes les deux secondes, soit un débit moyen de 100 bps. Ce débit inclut le trafic généré par l'avion lui-même ainsi que le trafic qu'il doit faire suivre.

Dans [Tu *et al.* 2009], ils ont proposé une amélioration de leur solution avec du S-TDMA. Il s'agit en fait de découper l'espace aérien en zone géographique. Dans chaque zone, on met en place le système TDMA proposé précédemment. Chaque avion utilise sa position GPS pour déterminer la zone dans laquelle il se trouve. Cela permet de servir un plus grand nombre d'avions. Cette méthode d'accès a été reprise dans une étude sur le routage publiée dans [Medina *et al.* 2010b].

Dans [Walter *et al.* 2010], les auteurs proposent aussi une méthode d'accès de type S-TDMA pour les réseaux ad hoc aéronautiques. L'espace aérien est divisé en zones. Les auteurs proposent différents patterns pour le découpage de l'espace aérien en zones hexagonales. Dans chaque zone, une méthode d'accès de type TDMA est utilisée. Pour améliorer les performances du TDMA, les auteurs proposent d'utiliser des temps de garde variables afin d'optimiser au mieux l'utilisation des ressources.

### 1.6.5.4 IEEE 802.11

Enfin, dans de nombreuses études sur le routage dans les réseaux ad hoc aéronautiques publiées dans [Seo *et al.* 2008, Fu & DaSilva 2007, Hyeon *et al.* 2010, Peters *et al.* 2011], les auteurs font l'hypothèse de l'utilisation du standard IEEE 802.11 pour les couches d'accès dans leurs simulations. Le standard IEEE 802.11 est en effet déjà implémenté nativement dans de nombreux logiciels de simulation de réseaux.

### 1.6.6 Protocoles de routage

Dans les travaux existants sur les réseaux ad hoc aéronautiques, plusieurs protocoles de routage ont été proposés. On trouve ainsi des protocoles proactifs, réactifs, comme MUDOR (Multipath Doppler Routing), proposé dans [Sakhaee *et al.* 2006a] et [Sakhaee & Jamalipour 2006], qui est inspiré de DSR, ou hybrides, comme ARPAM (Ad hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile ad hoc networks), proposé dans [Jordanakis *et al.* 2006] et [Karras *et al.* 2008a].

La plupart des protocoles sont géographiques. Ils utilisent les données de positions des avions pour calculer les routes. Deux protocoles basés sur GPSR ont par exemple été proposés : le protocole GRAA (Geographic Routing protocol for Aircraft Ad hoc Network) dans [Hyeon *et al.* 2010], et le protocole GLSR (Geographic Load Share Routing) dans [Medina *et al.* 2010b, Medina *et al.* 2011b, Medina *et al.* 2011a, Medina *et al.* 2010a].

Quelques-uns de ces protocoles sont décrits dans l'annexe F.

### 1.6.7 Etude de faisabilité

Une étape importante de l'étude des réseaux ad hoc aéronautiques concerne bien sûr la faisabilité d'un tel système. Il s'agit que démontrer que cette solution est envisageable pour des liaisons sol-bord. Dans [Sakhaee *et al.* 2006a, Sakhaee & Jamalipour 2006], les auteurs étudient la faisabilité d'un réseau ad hoc aéronautique sur le territoire américain. Pour cela, ils ont étudié la densité des avions au dessus des Etats-Unis, illustrée dans la figure 1.8 extraite de [Sakhaee *et al.* 2006a]. Leur étude est basée sur des données de trafic fournies par l'association des contrôleurs aériens américains (NATCA : National Air Traffic Controllers Association<sup>20</sup>) et par le logiciel Flight Explorer<sup>21</sup>. Ils estiment à 700 le nombre minimum d'avions en vol au dessus des Etats-Unis, soit une densité moyenne d'avions  $\lambda \approx 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ avions/km}^2$ . A partir de cette densité, ils déterminent la probabilité  $p(n, S)$  d'avoir  $n$  avions dans une région de surface  $S$  en considérant une distribution de Poisson. Ils obtiennent :

$$p(n, S) = \frac{(\lambda S)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda S} \quad (1.2)$$

Ils considèrent ensuite que les avions ont une portée égale à la portée optique. La probabilité de pouvoir former un réseau ad hoc aéronautique est alors la probabilité d'avoir au moins deux avions dans un zone circulaire  $S$  dont le rayon est égale à la portée optique. Le résultat, illustré dans la figure 1.9, est voisin de 100%.

20. <http://www.natca.org>

21. <http://www.flightexplorer.com>

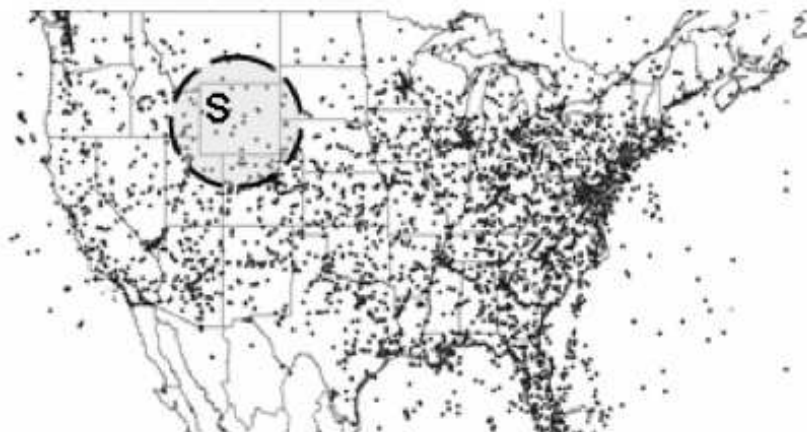


FIGURE 1.8 – Densité des avions civils aux Etats-Unis

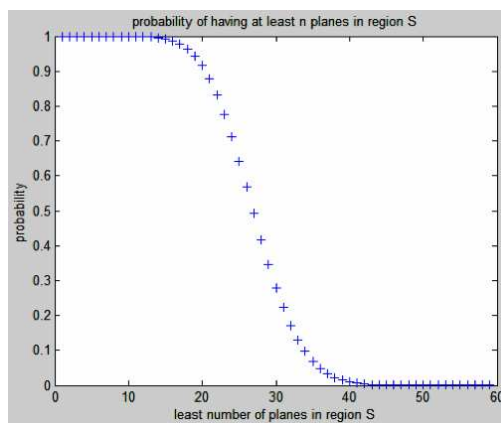


FIGURE 1.9 – Probabilité d’avoir au moins n avions dans une zone de surface S

Dans [Medina *et al.* 2008b, Medina *et al.* 2008a], les auteurs étudient la faisabilité d’un réseau ad hoc aéronautique sur le couloir nord atlantique, c’est-à-dire pour les avions volant entre l’Europe et l’Amérique du Nord. Ils se basent sur des données de plans de vol publiées par le service SRC (Schedule Reference Service)<sup>22</sup> de l’IATA. Ces données comprennent la liste des vols prévus pour différentes journées, avec notamment l’aéroport de départ, l’aéroport d’arrivée ainsi que les heures de décollage et d’atterrissage prévues. Les trajectoires des avions sont ensuite interpolées par une orthodromie entre l’aéroport de départ et l’aéroport d’arrivée. Il s’agit de l’arc de grand cercle qui passe par ces deux points : c’est le chemin le plus court entre deux points à la surface d’une sphère. Ils étudient en particulier l’influence de la portée des liaisons entre avions sur le pourcentage d’avions connectés dans le réseau. Ils montrent que pour une portée d’environ 200 Nm, la majorité des avions ont une connectivité permanente avec une infrastructure sol grâce à un chemin multi-sauts.

---

22. <http://www.iata.org/ps/publications/srs/>

**Résumé du chapitre**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art des communications numériques sol-bord. On peut distinguer quatre catégories de communications sol-bord : les communications ATSC pour le contrôle aérien, les communications AOC et AAC pour les compagnies et les communications APC pour les passagers. Les communications ATSC et AOC sont des communications critiques et ont donc des exigences élevées en terme de temps de transaction, de continuité, de disponibilité et d'intégrité.

Ensuite, nous avons présenté les différents moyens de communication de données existants entre l'avion et le sol. On peut les classer en deux catégories : les moyens de communication par satellite et les moyens de communication par liaison directe avec le sol. Tous ces moyens souffrent de limites en terme de capacité, de couverture et de coût. En effet, les solutions par satellite sont très onéreuses et ont souvent une couverture imparfaite au niveau des pôles, du fait de l'utilisation de satellites géostationnaires. Les solutions par liaison directe avec le sol ne permettent quant à elles pas de couvrir les zones océaniques, sauf la HF, mais celle-ci offre alors des débits très faibles.

Pour palier certaines de ces limites, les réseaux ad hoc aéronautiques ont récemment été proposés comme nouveau moyen de communication entre l'avion et le sol. Il s'agit en fait d'un réseau ad hoc mobile dont les nœuds sont les avions civils en vol. L'idée est donc de mettre en place des communications multi-sauts entre avions pour que tous les avions puissent joindre le sol, même lorsqu'ils ne sont pas à portée directe d'une station.



# Chapitre 2

## Étude de faisabilité

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>2.1 Présentation des données de trafic</b> . . . . .	<b>49</b>
2.1.1 Zone continentale . . . . .	49
2.1.2 Zone océanique . . . . .	51
<b>2.2 Logiciel de simulation AeRAN</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>2.3 Etude de faisabilité en zone continentale</b> . . . . .	<b>54</b>
2.3.1 Evolution du nombre d'avions en vol . . . . .	54
2.3.2 Visualisation des trajectoires . . . . .	55
2.3.3 Influence du nombre et de la position des stations au sol . . . . .	56
2.3.4 Influence de la portée des connexions . . . . .	58
2.3.5 Etude de la durée de connexion des avions . . . . .	59
2.3.6 Etude d'un vol Toulouse - Paris . . . . .	60
<b>2.4 Etude de faisabilité en zone océanique</b> . . . . .	<b>61</b>
2.4.1 Evolution du nombre d'avions en vol . . . . .	61
2.4.2 Influence du nombre et de la position des stations au sol . . . . .	62
2.4.3 Influence de la portée des avions . . . . .	62
2.4.4 Etude de la durée de connexion des avions . . . . .	65
2.4.5 Etude d'un vol Paris - New-York . . . . .	65
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	<b>67</b>

---



## Introduction

Les études de faisabilité existantes sur les réseaux ad hoc aéronautiques sont pour la plupart basées sur une étude statistique du nombre de vol dans la région considérée, à savoir les Etats-Unis dans [Sakhaee *et al.* 2006a, Sakhaee & Jamalipour 2006], et la Chine dans [Cong-jun *et al.* 2008]. Les auteurs en déduisent une densité d'avions au km<sup>2</sup> puis, en faisant l'hypothèse d'une distribution poissonnienne des avions, ils obtiennent la probabilité d'avoir au moins  $n$  avions dans une sphère  $S$  de rayon  $r$ . Ils considèrent ensuite que la probabilité de pouvoir former un réseau ad hoc aéronautique est égale à la probabilité d'avoir au moins deux avions dans une sphère dont le diamètre est égal à la portée optique. Le détail du calcul de la portée optique est présenté en annexe H.

Dans [Medina *et al.* 2008a], les auteurs étudient le couloir transatlantique entre les Etats-Unis et l'Europe. Leur étude de faisabilité se base sur une liste de vols réels pendant plusieurs journées. Les trajectoires des avions sont ensuite interpolées par des orthodromies entre les aéroports d'arrivée et de départ. On a donc une approche plus concrète avec des données réelles, bien que les trajectoires utilisées ne soient pas les trajectoires réelles.

Dans notre étude, nous avons utilisé des données de position d'avions plus réalistes pour démontrer la faisabilité. L'objectif de cette étude est de déterminer les portées nécessaires pour les connexions entre avions pour obtenir une connectivité satisfaisante du réseau. Nous avons ainsi utilisé, d'une part, des données obtenues à partir de positions radar en zone continentale et, d'autre part, des données obtenues à partir de reports de position en zone océanique.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les données de trafic que nous avons utilisées. Ensuite, nous décrirons le programme que nous avons développé en Java pour réaliser cette étude. Enfin, nous verrons les résultats de l'étude en zone continentale puis en zone océanique.

## 2.1 Présentation des données de trafic

### 2.1.1 Zone continentale

Pour l'étude de faisabilité en zone continentale, nous avons utilisé des données fournies par la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA). Ces données contiennent la position toutes les quinze secondes de tous les avions survolant l'espace aérien français pendant une journée. Elles sont obtenues à partir de positions radar. Nous disposons ainsi de plusieurs journées de trafic.

### 2.1.1.1 Format des données

Ces données sont sous la forme d'un fichier texte. Nous disposons ainsi d'un fichier par journée de trafic. La première partie du fichier contient des commentaires qui expliquent le format des données. Voici par exemple le début du fichier pour la journée du 22 juin 2007 :

```
# Le premier caractère donne le "type" de ligne :
# $ FLIGHT HDEB HFIN FL SPEED IVOL AV TERD TERA SSR <-- Mini Plan de Vol
# ! {NOMBAL (V ou T) HEURE FL} <-- Survols balises
# > NOMSECT HENTREE HSORTIE HSTRIP TFL <-- Infos secteurs
# < FLIGHT {H MINVALIDLEVEL MAXVALIDLEVEL ENDALERT} <-- Filet de sauvegarde
# % {HEURE TYPE} <-- Alerte relief (MSAW)
# Autre ligne est un mouvement piste correspondant au dernier mini_pln.
# Le nombre de ces lignes est fourni par "NbPlots"
# Un mouvement est compose de:
# HEURE X(1/64 Nm) Y(1/64 Nm) VX(Kts) VY(Kts) FL TAUX(Ft/min)
```

On trouve ensuite le nombre de vols contenus dans le fichier, c'est-à-dire le nombre d'avions qui ont survolé l'espace aérien français le jour considéré. Pour le 22 juin 2007, on a ainsi 9435 vols. Ensuite, pour chacun de ces vols, on retrouve :

- un mini plan de vol contenant le numéro du vol, l'heure de départ et l'heure d'arrivée, le niveau de vol, la vitesse, l'indicatif du vol, le type d'avion, l'indicatif des aéroports de départ et d'arrivée
- la liste des balises survolées avec les heures de passage estimées
- des informations secteurs
- éventuellement des informations sur le filet de sauvegarde et les alertes reliefs
- le nombre de positions relevées pour ce vol
- la liste des positions, espacées de 15 secondes, avec pour chacune l'heure, l'abscisse, l'ordonnée, la vitesse, l'altitude et le taux de montée.

Le centre de projection pour les coordonnées (abscisse, ordonnée) est le point de latitude 47°N et de longitude 0°E, l'unité est le 1/64 NM.

Voici un exemple de vol (dont l'indicatif à été volontairement masqué pour des raisons de confidentialité) :

```
$ 1003 00:33:00 01:40:30 410 442 XXXXXX CL60 EINN LLBG 1003
! VEULE 00:36:15 V 410 RESMI 00:50:15 V 410 ODEBU 00:53:30 V 410 TFL4
00:55:00 V 410 OKASI 00:55:30 V 410 OKEKO 01:00:30 V 410 OKEPI 01:04:00
V 410 OKIRA 01:05:00 V 410 MOU 01:08:00 V 410 PODEP 01:09:45 V 410
MOKIP 01:16:45 V 410 MILPA 01:21:30 V 410
> HP 00:54:00 01:40:30 00:52:00 410 HP 01:20:30 00:54:00 01:18:30 410
```

```

NbPlots: 271
00:33:00 727 12200 239 -372 410 0
00:33:15 789 12103 239 -372 410 0
00:33:30 851 12006 239 -372 410 0
00:33:45 913 11909 240 -372 410 0
00:34:00 976 11812 239 -372 410 0

```

Enfin, le fichier contient la liste de toutes les balises survolées, avec leur position.

### 2.1.1.2 Traitement des données

Nous disposons d'un fichier par journée de trafic. Nous avons dans un premier temps écrit des scripts UNIX pour filtrer et trier les données. En effet, le fichier de données comporte un certain nombre de données inutiles pour notre étude de faisabilité. De plus, son format le rend assez difficile à exploiter directement. Nous avons donc classé les données utiles par date pour pouvoir étudier plus simplement l'évolution des positions des avions au cours du temps. Ainsi, nous avons obtenu un fichier pour chacun des instants de la journée pour lesquels nous avons des positions d'avions en vol. Chaque ligne d'un fichier représente alors un avion, elle contient 4 éléments : le numéro du vol, l'abscisse, l'ordonnée et le niveau de vol. Voilà par exemple le début du fichier du 22 juin 2007 à 01h00 :

```

1077 -1023 -5104 330
1071 -1025 -4898 300
1073 -10259 -5472 360
1084 -10930 -11839 360
1061 12157 -6849 340

```

L'avion dont l'indicatif est 1077 est par exemple à la position d'abscisse  $x = -1023$ , d'ordonnée  $y = -5104$  et au niveau de vol FL 330. Les abscisses et les ordonnées étant en  $1/64$  Nm<sup>1</sup>, et le niveau de vol en centaine de pieds<sup>2</sup>, la distance en m  $d_{AB}(m)$  entre deux avions  $A(x_A, y_A, FL_A)$  et  $B(x_B, y_B, FL_B)$  est obtenue par la formule suivante :

$$d_{AB}(m) = \sqrt{\left((x_B - x_A) \frac{1852}{64}\right)^2 + \left((y_B - y_A) \frac{1852}{64}\right)^2 + ((FL_B - FL_A) \cdot 30,48)^2} \quad (2.1)$$

### 2.1.2 Zone océanique

Dans le cadre de cette thèse, il nous a paru important de démontrer la faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques en zone océanique en utilisant des données de positions

---

1. 1 Nm = 1 nautique = 1852 m

2. 1 ft = 1 pied = 0,3048 m

plus réalistes que celles utilisées dans les études existantes. En effet, les réseaux ad hoc aéronautiques trouvent un intérêt tout particulier dans ces zones puisque les avions sont hors de couverture des solutions cellulaires continentales. Ils représentent alors une solution intéressante et économique par rapport aux solutions par satellite. De plus, les avions opérant en zone océanique sont des vols long-courriers. L'erreur commise en interpolant la trajectoire des avions par des grands cercles entre les aéroports de départ et d'arrivée va donc être plus importante qu'en zone continentale sur des distances plus courtes.

Nous avons donc recherché des données de position des avions en zone océanique. Malheureusement, ces zones ne bénéficient pas de couverture radar et nous nous sommes rendus compte qu'il était très difficile d'obtenir de telles données. Cela explique sans doute le fait qu'il n'y ait pas, à notre connaissance, d'étude de faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques avec des positions réelles d'avions. En effet, seules les informations de plan de vol sont publiées. Elles contiennent en particulier les aéroports de départ et d'arrivée, ainsi que les heures d'atterrissage et de décollage prévues. Les données plus précises contenant la position réelle des avions sont souvent collectées par les compagnies mais elles restent très confidentielles. Chaque compagnie veut préserver les trajectoires de ses avions, résultats de calculs complexes pour minimiser le coût d'exploitation, et en particulier la consommation de carburant.

Finalement, nous avons pu obtenir des données de positions des avions en zone océanique, entre l'Europe et l'Amérique, grâce à Eurocontrol et à son service DDR (Demand Data Repository). Nous allons tout d'abord décrire le fonctionnement des voies aériennes dans le couloir nord atlantique, puis nous verrons le détail des données DDR.

### 2.1.2.1 Les NAT (North Atlantic Tracks)

Les NAT (North Atlantic Tracks) sont les routes aériennes empruntées par les avions civils sur l'océan Atlantique entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Elles sont définies par un ensemble de points de passage, comme illustré dans la figure 2.1. Elles sont recalculées tous les jours en fonction de la météo pour fournir des routes de temps minimum, ou MTR (Minimum Time Route). Elles sont publiées sur forme de NOTAM (Notice To AirMen). Il y a ainsi 5 ou 6 routes parallèles entre elles dans chaque sens. Les routes allant vers l'Est sont notées de A à F, celles allant vers l'Ouest de U à Z.

Les NAT permettent d'assurer la séparation entre les avions. En zone océanique, où il n'y a pas de couverture radar, l'espacement horizontal requis entre deux avions volant au même niveau et évoluant sur deux tracks différents est de 60 nautiques. La séparation verticale est de 1000 pieds. Deux avions évoluant sur la même track au même niveau de vol doivent être séparés de dix minutes. A titre de comparaison, l'espacement horizontal requis en zone continentale avec couverture radar est typiquement de 5 nautiques.

Etant donné qu'il n'y a pas de couverture radar, tous les avions doivent reporter

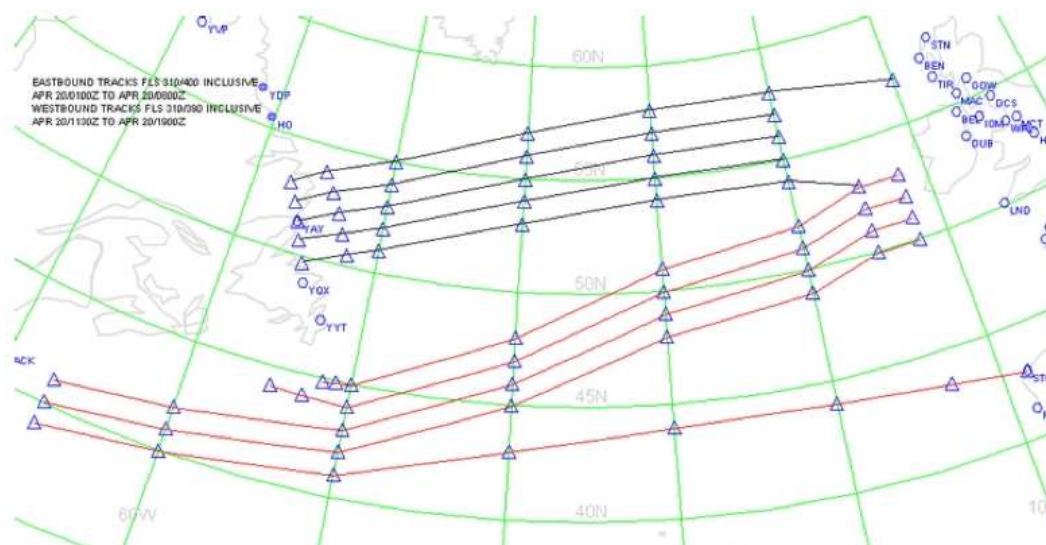


FIGURE 2.1 – Exemple de NAT

périodiquement leur position et leur vitesse aux contrôleurs aériens. Ces reports doivent se faire à des moments précis :

- lors du passage d’un des points du track
- lors d’une demande de changement de niveau de vol
- lorsque 45 minutes se sont écoulées depuis la dernière transmission
- en sortant de l’espace océanique.

Ce sont ces reports de positions qui sont utilisés dans les données DDR, que nous allons maintenant décrire.

### 2.1.2.2 Les données DDR (Demand Data Repository)

Le service DDR<sup>3</sup> d’Eurocontrol fournit différents types de données à ses utilisateurs. On peut y trouver des données réelles de trafic passé ainsi que des données générées à partir de prévisions de trafic. Ces données sont basées sur les données de plans de vol de la CFMU<sup>4</sup> (Central Flow Management Unit), et elles sont mises à jour par des données radar en zone continentale et par des reports de position des avions en zone océanique [Eurocontrol 2010a].

Pour le traitement des données en zone océanique, nous avons interpolé les trajectoires des avions entre les différents reports de position par des arcs de grands cercles. Nous avons ensuite généré des fichiers au même format que pour la zone continentale.

3. <http://www.eurocontrol.int/services/demand-data-repository-ddr>

4. <http://www.cfm.eurocontrol.int>

## 2.2 Logiciel de simulation AeRAN

Pour cette étude de faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques, nous avons développé un logiciel en Java. Il utilise en entrée les fichiers de positions des avions que nous avons décrits précédemment, ainsi qu'un fichier contenant la liste et la position des stations au sol. Il permet d'étudier la connectivité du réseau en fonction de la portée des connexions.

On obtient ainsi des statistiques sur le pourcentage d'avions connectés au cours de la journée ainsi que sur la durée de connexion de chaque avion. Il permet aussi de visualiser l'évolution de la topologie du réseau ad hoc aéronautique au cours du temps, comme illustré dans la figure 2.2.

Le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe J pour de plus amples informations sur le logiciel.

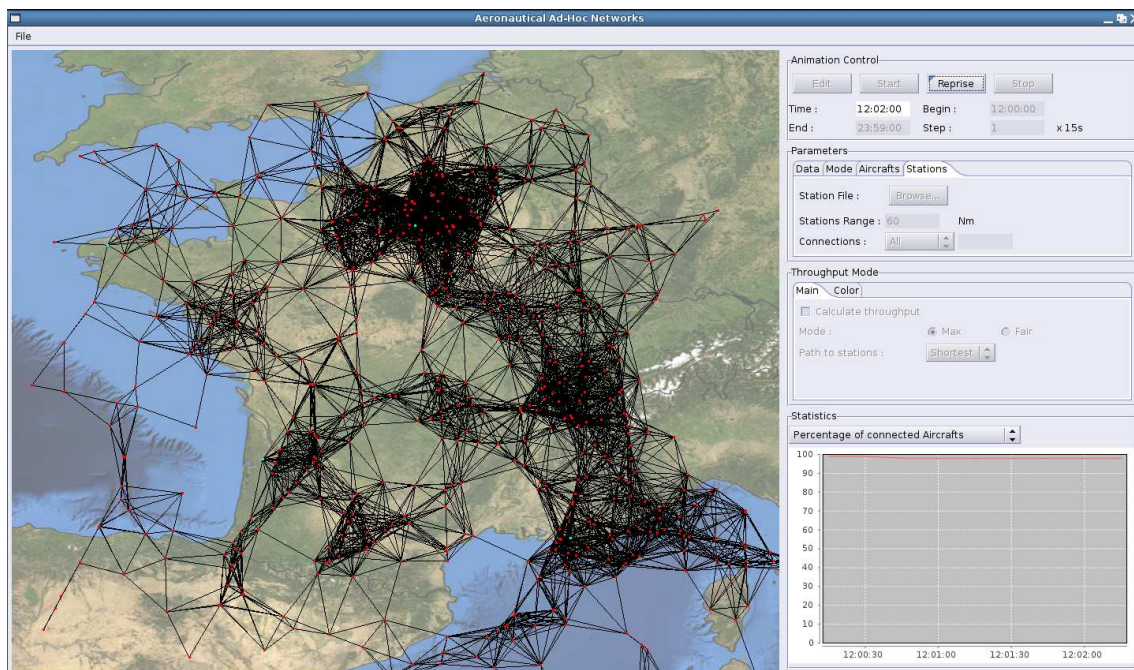


FIGURE 2.2 – Capture d'écran du logiciel AeRAN

## 2.3 Etude de faisabilité en zone continentale

### 2.3.1 Evolution du nombre d'avions en vol

Dans cette partie, les résultats que nous allons présenter sont obtenus à partir des données de trafic de la journée du 22 juin 2007 sur le ciel Français. Il y a eu 9435 vols pendant cette journée. Dans tous les graphiques qui suivent, les heures sont données dans l'échelle de temps UTC. La figure 2.3 montre le nombre d'avions en vol au cours du temps lors de cette journée. Il y a en moyenne 373 avions en vol sur la journée.

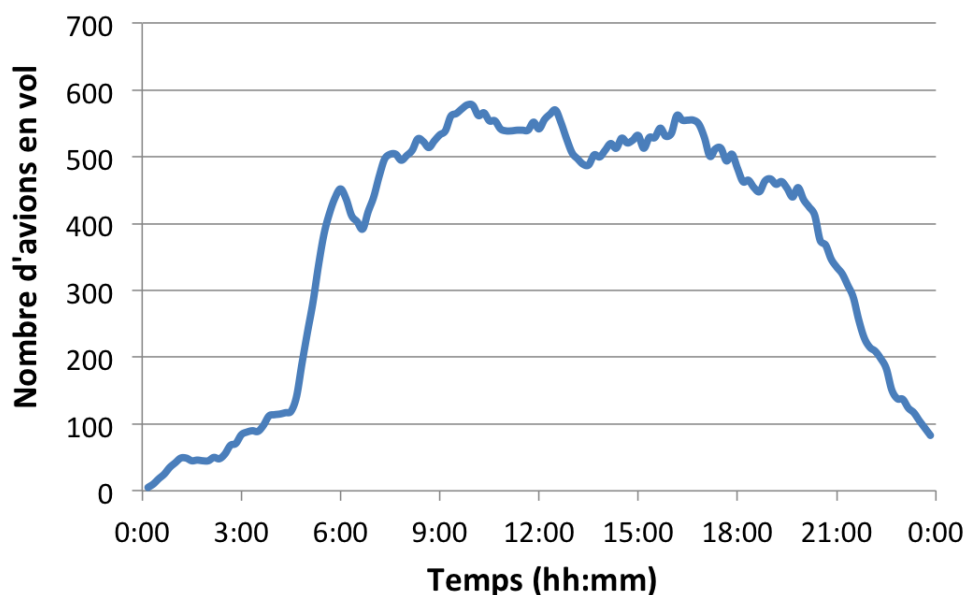


FIGURE 2.3 – Nombre d’avions en vol, le 22-06-2007

En revanche, on remarque que la répartition est inégale. On peut distinguer deux périodes. Entre 6h et 21h environ, le trafic aérien est dense. Le nombre d’avions en vol est supérieur à 400 à chaque instant, et il est en moyenne de 500 avions. Si l’on considère que le territoire français a une superficie de  $550\,000\text{ km}^2$ , cela correspond à une densité moyenne de  $9,1 \cdot 10^{-4}$  avion/ $\text{km}^2$ . Le reste de la journée, le trafic aérien est plus faible, le nombre d’avions en vol est la plupart du temps inférieur à 200, il est en moyenne de 140 avions, ce qui correspond à une densité de  $2,4 \cdot 10^{-4}$  avion/ $\text{km}^2$ .

### 2.3.2 Visualisation des trajectoires

Pour le positionnement des stations sol, il est intéressant de visualiser l’ensemble des trajectoires des avions au cours de la journée. Cela permet de mieux apprécier la densité d’avions. En effet, on peut penser qu’il est intéressant de mettre plusieurs stations dans les zones denses, pour éviter qu’il y ait trop d’avions connectés à une même station. A l’inverse, il peut être intéressant de mettre des stations dans des régions où le trafic est moins dense pour augmenter la connectivité.

Pour visualiser les trajectoires, nous avons utilisés des données fournies par le logiciel FromDady [Hurter *et al.* 2009]. La figure 2.4 montre le résultat obtenu pour la journée du 22 juin 2007. Le gradient de couleur du vert au bleu représente les différences d’altitude des avions, du vert pour les plus faibles au bleu pour les plus élevées.

On peut voir les couloirs aériens. On remarque que la densité des avions est relativement homogène sur le territoire français. Elle est légèrement plus élevée autour des grands aéroports français : Paris, Nice, Lyon, Marseille, Toulouse, Bordeaux.

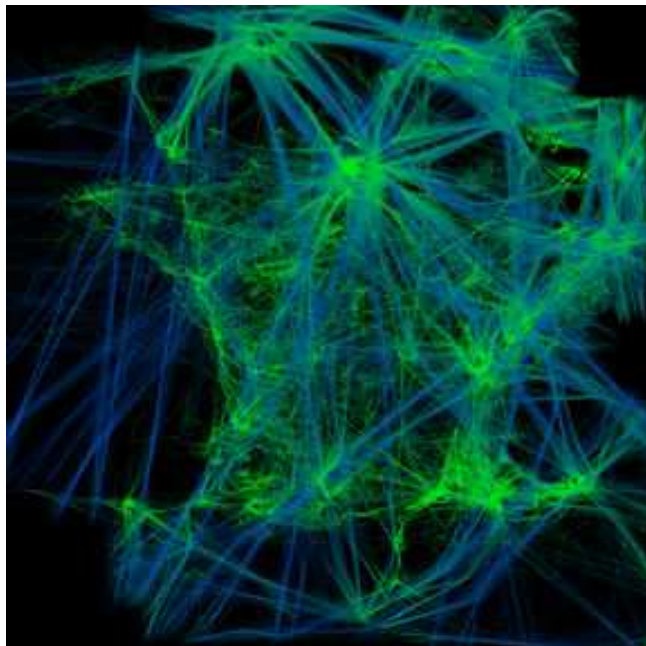


FIGURE 2.4 – Visualisation des trajectoires

### 2.3.3 Influence du nombre et de la position des stations au sol

Tout d’abord, il est important de préciser qu’en zone continentale, les réseaux ad hoc aéronautiques devront être compétitifs par rapport aux solutions de communications cellulaires existantes. L’un des intérêts des réseaux ad hoc est alors de diminuer le nombre de stations sol nécessaire. En effet, pour les solutions cellulaires, il est nécessaire de déployer un grand nombre de stations sol pour garantir que tous les avions en vol soient en contact avec au moins une station, quel que soit l’endroit où il se trouve.

Dans le cas des réseaux ad hoc, des avions intermédiaires peuvent servir de relais lorsqu’il n’y a pas de station sol en ligne de vue directe. On étend ainsi la couverture de chaque station sol. Il est donc intéressant de minimiser le nombre de stations au sol pour réduire les coûts de déploiement et de maintenance d’un tel système, et en particulier le coût des liaisons sol-sol entre la station et le centre de contrôle. Nous avons donc décidé de limiter à cinq le nombre de stations sur le territoire français.

Nous avons ainsi regardé l’influence du nombre de stations sol en testant différents scénarios avec une à cinq stations placées arbitrairement. Ainsi, nous avons un premier scénario avec une seule station sol, située à Paris, et un second avec cinq stations sol positionnées sur les cinq CRNA (Centre en Route de la Navigation Aérienne). Les cinq CRNA sont en effet les cinq centres de contrôle en route de l’espace aérien français. Ils se partagent équitablement le trafic aérien à contrôler. Ils sont situés à Paris, Reims, Brest, Bordeaux et Aix-en-Provence.

La figure 2.5 montre l’évolution du pourcentage d’avions connectés au cours de la

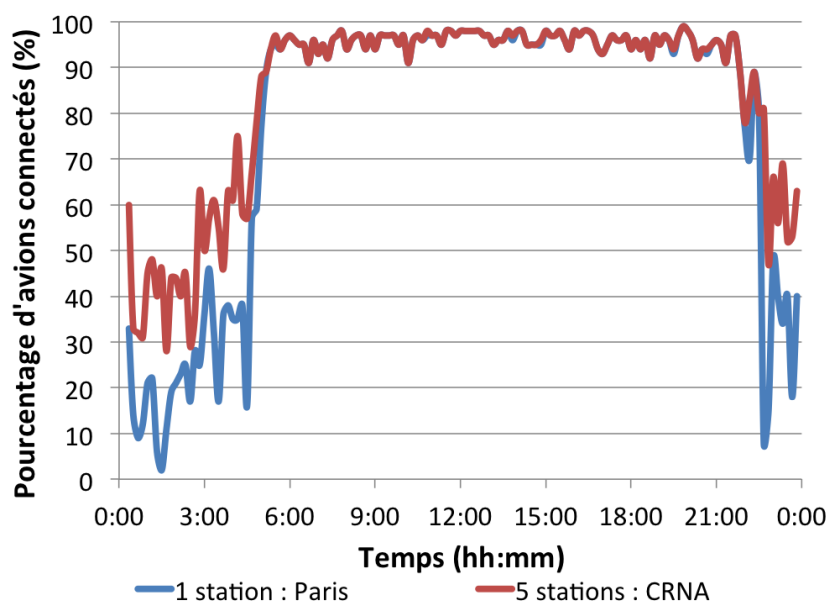


FIGURE 2.5 – Influence du nombre de stations sols

journée pour ces deux scénarios, en considérant une portée maximale de 100 km pour établir une connexion.

On constate que le nombre de stations sol a une influence sur le pourcentage d'avions connectés aux heures creuses de la journée, c'est-à-dire la nuit entre 21h et 6h. En effet, pendant cette période, il y a peu d'avions en vol et le réseau n'est pas très connexe. Seuls les avions proches des stations sont connectés, ce qui explique que le pourcentage d'avions connectés augmente quand le nombre de stations augmente. En revanche, cela n'a pas beaucoup d'influence entre 6h et 21h. En effet, pendant cette période, le nombre d'avion en vol est très important et une portée de 100km permet de connecter un grand nombre d'avion entre eux, quelque soit la position des stations.

Par contre, le fait d'augmenter le nombre de stations permet d'augmenter la capacité globale du réseau et donc d'offrir un débit plus important aux avions.

Nous avons étudié l'influence de la position de ces cinq stations sur le pourcentage d'avions connectés. Il s'avère en fait qu'elle a une très faible influence. Cela est dû au fait que la densité des avions est relativement homogène et que l'on considère une portée des avions élevée par rapport à la taille du territoire français.

Pour la suite de l'étude en zone continentale, nous allons donc considérer que nous disposons de cinq stations pour couvrir le territoire français. Elles seront situées sur les cinq CRNA, comme illustré sur la figure 2.6.



FIGURE 2.6 – Positionnement des stations en zone continentale

### 2.3.4 Influence de la portée des connexions

Dans cette étude, on considère que les avions et les stations ont la même portée de communication. Cette portée est limitée par la courbure de la Terre. La portée maximale des connexions entre deux avions en vol est la portée optique. Son calcul est détaillé en annexe H. Elle est d'environ 680 km pour deux avions volant au niveau de vol FL300, soit environ 9 km d'altitude.

Nous allons étudier l'influence de la portée maximale des connexions sur le pourcentage d'avions connectés au cours de la journée. La figure 2.7 montre le pourcentage d'avions connectés au cours de la journée du 22 juin 2007 pour différentes portées. Le tableau 2.1 montre le pourcentage moyen d'avions connectés sur la journée complète, puis entre 6h et 21h, c'est-à-dire pendant la période où le nombre d'avions en vol est le plus important, pour différentes portées.

On constate donc bien évidemment que plus la portée est grande, plus le pourcentage d'avions connectés est grand. Cependant, on a intérêt à minimiser les portées des connexions pour augmenter leur capacité maximale. On remarque qu'environ 50% des avions sont connectés avec une portée de 50 km seulement. On pourra donc envisager de leur fournir des services à un débit plus élevé.

Pour déterminer la portée des connexions nécessaires pour le système, il faudra en fait tenir compte des exigences de disponibilité des applications envisagées. Ainsi, si on veut

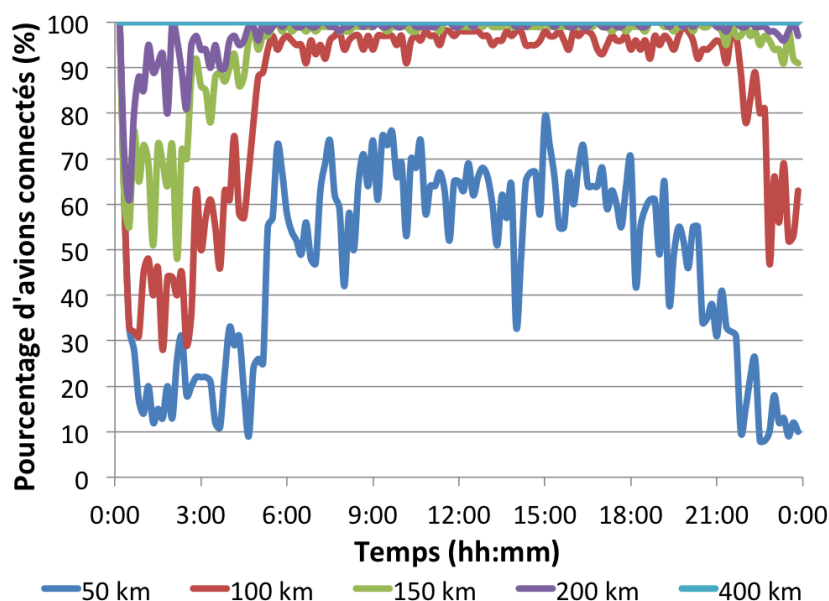


FIGURE 2.7 – Pourcentage d’avions connectés au cours de la journée pour différentes portées (km)

Portée (km)	Moyenne sur la journée (%)	Moyenne entre 6h et 21h (%)
50	46,9	59,7
100	84,3	96,1
150	94,3	99,0
200	97,5	99,5
250	99,1	99,9
300	99,4	99,9
350	99,8	100,0
400	100,0	100,0

TABLE 2.1 – Pourcentage d’avions connectés, influence de la portée

offrir un service à tous les avions durant toute la journée, il sera nécessaire de pouvoir établir des connexions de plus de 400 km. Si on se contente d’une portée maximale de 150 km, on pourra servir plus de 90% des avions en moyenne pendant la journée, et plus de 99% entre 6h et 21h.

### 2.3.5 Etude de la durée de connexion des avions

Nous avons ensuite étudié la durée de connexions de chaque avion, c’est-à-dire le pourcentage du temps pendant lequel un avion est connecté pendant son vol, en fonction de la portée des connexions, pendant la journée du 22 juin 2007.

La figure 2.8 montre l’évolution de la moyenne et de l’écart-type de ce pourcentage, en fonction de la portée.

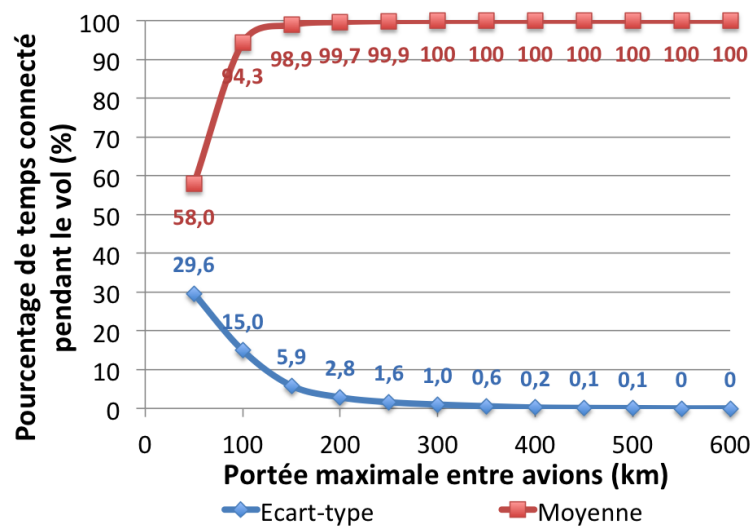


FIGURE 2.8 – Pourcentage de temps de vol connecté moyen en fonction de la portée

On constate donc qu’une portée de 150 km est suffisante pour connecter l’ensemble des avions pendant plus de 98% de leur temps de vol en moyenne.

### 2.3.6 Etude d’un vol Toulouse - Paris

Dans cette partie, nous nous intéressons au cas particulier de deux vols entre Toulouse et Paris : le premier vol de la journée qui décolle de Toulouse à 4h30 UTC, et un vol en fin d’après-midi qui décolle à 16h30 UTC. On considère une portée maximale des connexions de 100 km. Les deux avions considérés sont alors connectés pendant toute la durée de leur vol. La figure 2.9 montre l’évolution du nombre d’avions en visibilité au cours de ces deux vols, c’est-à-dire le nombre d’avions situés à moins de 100 km autour d’eux.

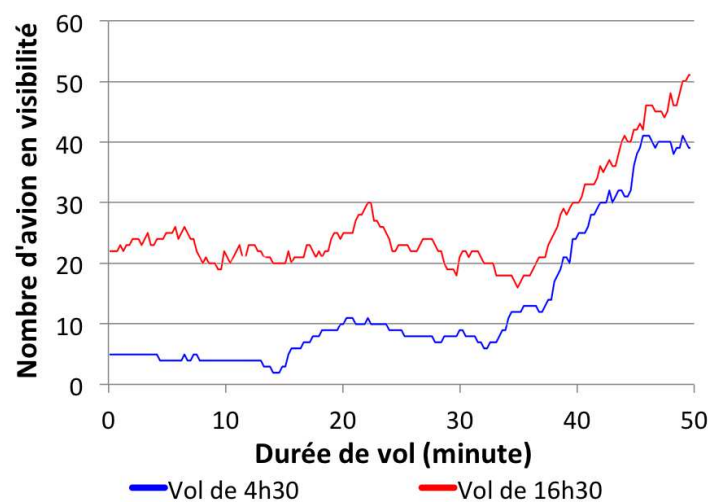


FIGURE 2.9 – Nombre d’avions en visibilité pour deux vols Toulouse-Paris

On constate donc bien que la densité d'avion est plus élevée en fin d'après-midi que tôt le matin. A 4h30, il y a par exemple 6 avions situés à moins de 100 km de Toulouse, et il y en a plus de 20 à 16h30. De plus, la densité d'avion évolue en fonction de la zone géographique. On voit que le nombre d'avions en visibilité augmente lorsque l'avion se rapproche de Paris, atteignant plus de 50 avions pour le vol de 16h30. Un avion donné aura donc potentiellement plusieurs dizaines d'avions à portée de communication immédiate.

## 2.4 Etude de faisabilité en zone océanique

### 2.4.1 Evolution du nombre d'avions en vol

Dans cette partie, les résultats que nous allons présenter sont obtenus à partir des données de trafic de la journée du 16 septembre 2011. Il y a eu ce jour-là 1432 vols entre l'Europe et l'Amérique du nord. La figure 2.10 montre le nombre d'avions en vol au cours du temps lors de cette journée. Il y a en moyenne 275 avions en vol pendant la journée considérée.

La préférence des compagnies aériennes et les différences de fuseau horaire entre l'Europe et les Etats-Unis ont pour effet de canaliser le trafic aérien transatlantique nord en deux courants principaux : un flux vers l'ouest au départ de l'Europe dans la matinée, et un flux vers l'est au départ de l'Amérique du Nord dans la soirée.

Les pointes de trafic vers l'ouest se situent donc entre 11h00 et 18h00 UTC, et vers l'est entre 23h00 et 06h00 UTC. On a alors au maximum 420 avions en vol sur la zone considérée, ce qui correspond à une densité d'environ de  $1,8 \cdot 10^{-5}$  avions/ $km^2$ . On a donc une densité d'avions plus faible qu'en zone continentale.

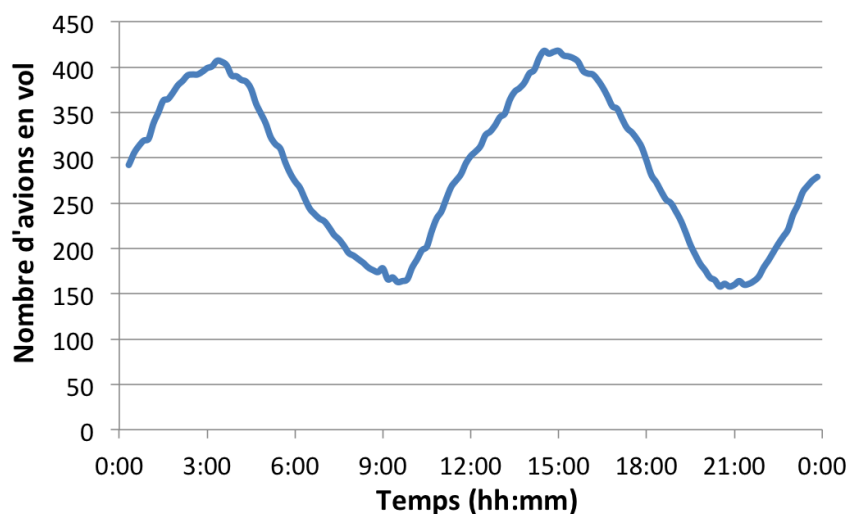


FIGURE 2.10 – Nombre d'avions en vol, le 16-09-2011

### 2.4.2 Influence du nombre et de la position des stations au sol

En zone océanique, l'étude de l'influence du nombre et de la position des stations au sol est moins pertinente qu'en zone continentale. En effet, le choix de la position des stations est limité puisqu'on doit les positionner sur des terres. Le nombre de stations peut être plus important qu'en zone continentale puisque la seule alternative est alors le satellite. Nous avons donc choisi de placer une dizaine de stations sur les côtes (Irlande, Ecosse, Islande, Groenland, Canada et Etats-Unis) et sur les îles (Açores et Bermudes) de la zone océanique considérée, le long de la trajectoire des avions. Le positionnement des stations, représentées par des carrés bleus, est illustré dans la figure 2.11.



FIGURE 2.11 – Positionnement des stations en zone continentale

### 2.4.3 Influence de la portée des avions

Comme en zone continentale, on considère que les avions et les stations ont la même portée. La figure 2.12 montre le pourcentage d'avions connectés au cours de la journée du 16 septembre 2011 pour différentes portées. Le tableau 2.2 montre le pourcentage moyen d'avions connectés sur la journée complète, puis entre 23h et 6h, c'est-à-dire pendant la période où le nombre d'avions en vol est le plus important, pour différentes portées.

Les portées nécessaires en zone océanique sont donc bien plus importantes qu'en zone continentale. Il faut par exemple une portée de 400 km pour connecter 95% des avions en moyenne sur la journée, contre environ 150 km en zone continentale. Cela est principalement dû à la séparation plus importante des avions, ainsi qu'à la grande taille de l'espace considéré et la diversité des routes prises par les avions.

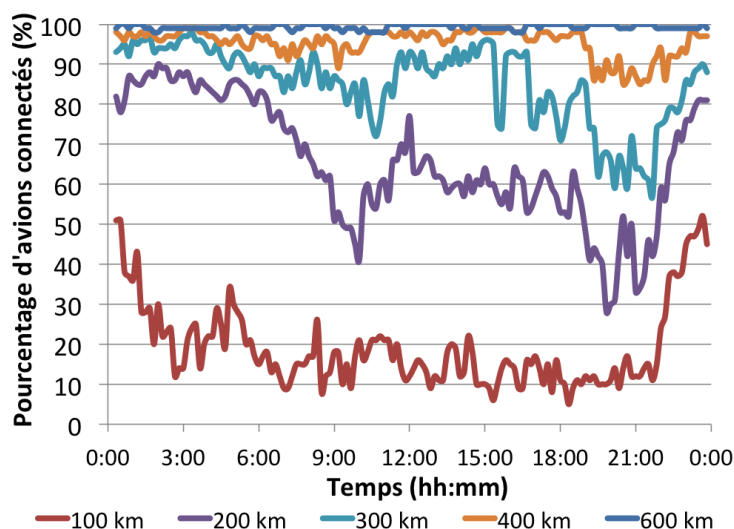


FIGURE 2.12 – Pourcentage d’avions connectés au cours de la journée pour différentes portées (km)

Portée (km)	Moyenne sur la journée (%)	Moyenne entre 23h et 6h (%)
100	19,0	29,2
200	65,5	84,0
300	85,3	92,8
400	95,4	96,9
500	98,4	98,5
600	99,3	99,4

TABLE 2.2 – Influence de la portée

En effet, sur l’océan atlantique, la majorité des avions commerciaux volent entre l’Amérique du Nord et l’Europe. Ils utilisent alors les tracks présentées dans le paragraphe 2.1.2.1. Pour les vols de l’Amérique du Nord vers l’Europe, les vents sont favorables donc les tracks suivent généralement le chemin le plus court.

La figure 2.13 montre le réseau ad hoc aéronautique à 03h00 UTC. On y voit en rouge les avions en vol, et en blanc les connexions possibles entre eux, pour une portée maximale de 300 km. Celle-ci est alors suffisante pour connecter plus de 90% des avions.

La figure 2.14 montre le réseau ad hoc aéronautique à 15h00 UTC. La majorité des avions vole alors de l’Europe vers l’Amérique. Les vents étant défavorables, les tracks passent beaucoup plus au nord pour minimiser les coûts de carburant. La majorité des avions les utilise, d’autres préfèrent utiliser la route directe, plus rapide. Enfin, les avions volant vers l’Amérique du Sud empruntent des trajectoires plus au sud. Leur densité étant plus faible, il faut des portées plus élevées pour les connecter.

L’étude de faisabilité présentée dans [Medina *et al.* 2008a] se limite ainsi au couloir nord atlantique en considérant uniquement les avions volant au dessus de 45° de latitude.



FIGURE 2.13 – Amérique vers Europe (03h00 UTC)



FIGURE 2.14 – Europe vers Amérique (15h00 UTC)

### 2.4.4 Etude de la durée de connexion des avions

La figure 2.15 montre l'évolution de la moyenne et l'écart-type du pourcentage de temps de vol connecté pour l'ensemble des avions sur la journée du 16 septembre 2011, en fonction de la portée.

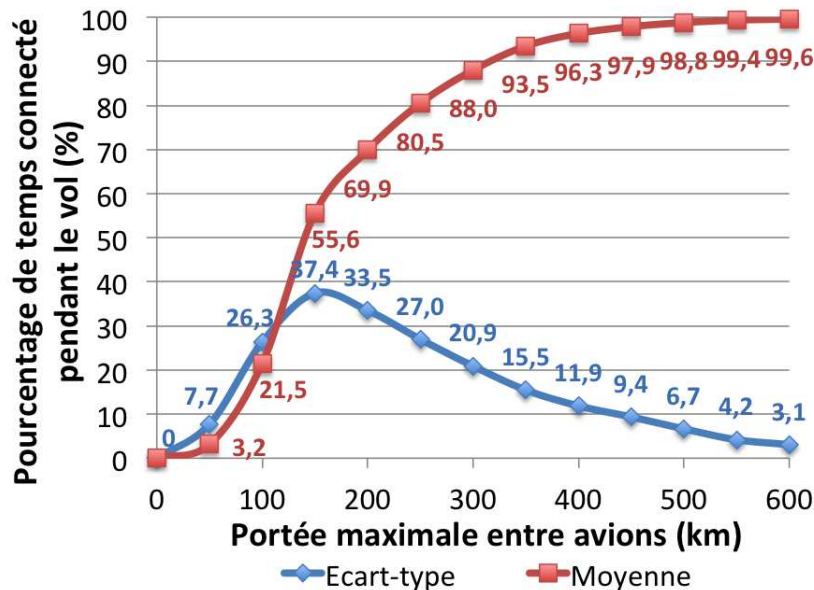


FIGURE 2.15 – Moyenne du pourcentage de temps de vol connecté en fonction de la portée

On constate donc qu'une portée de 400 km est nécessaire pour connecter l'ensemble des avions pendant plus de 95% de leur temps de vol en moyenne sur la journée.

### 2.4.5 Etude d'un vol Paris - New-York

Nous nous intéressons ici au cas particulier d'un vol Paris - New-York du 16 septembre 2011. Dans [Medina *et al.* 2008a], les trajectoires des avions sont interpolées par des orthodromies entre les aéroports de départ et d'arrivée.

La figure 2.16 montre la trajectoire réelle du vol et l'arc de grand cercle entre Paris et New-York. On constate donc que l'erreur de position commise est non négligeable par rapport à la portée de communication envisagée.

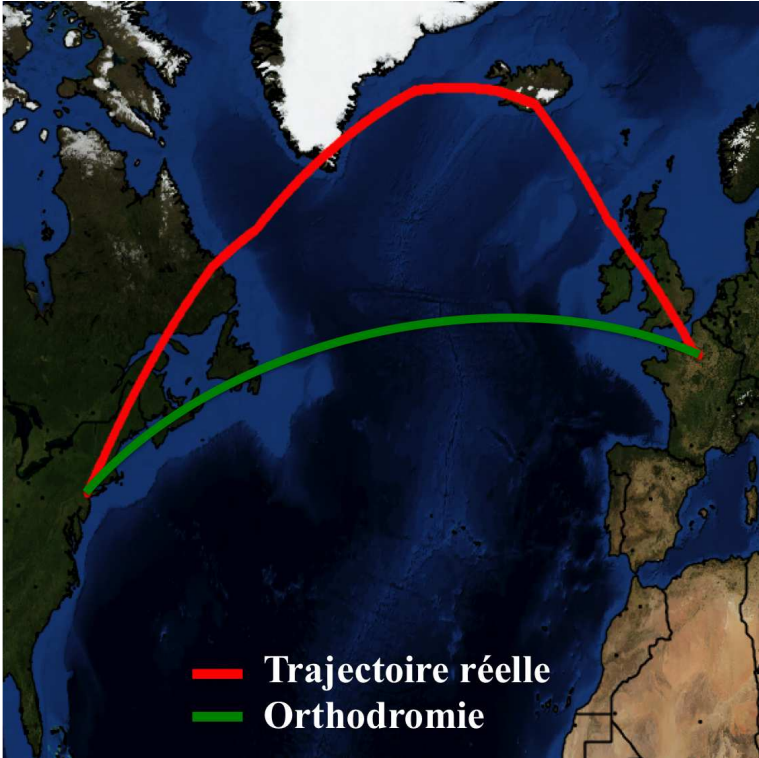


FIGURE 2.16 – Trajectoire réelle du vol Paris - New-York du 16 septembre 2011

**Résumé du chapitre**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la faisabilité d'un réseau ad hoc aéronautique en espace continental et en espace océanique du point de vue de la connectivité du réseau. L'objectif principal de cette étude était de déterminer les portées nécessaires pour les connexions entre avions pour obtenir une connectivité satisfaisante du réseau.

Les études de faisabilité existantes utilisaient soit des données sur la densité moyenne des avions, soit des positions interpolées par des arcs de grands cercles entre les aéroports de départ et d'arrivée, ce qui peut être approximatif pour les vols long-courriers.

L'originalité de cette thèse est donc d'utiliser des données de positions plus réalistes. Pour la zone continentale, nous avons utilisé des données radar pour avoir la position précise des avions sur le ciel Français. Pour la zone océanique, il n'y a malheureusement pas de couverture radar, mais les avions doivent suivre des routes précises : les NAT, et reporter leur position régulièrement au contrôle aérien. Nous avons donc utilisés ces reports de positions.

Nous avons aussi étudié l'influence du nombre et de la position des stations sol. En espace continentale, le réseau ad hoc aéronautique est en concurrence directe avec les solutions cellulaires. Son avantage est alors de pouvoir réduire le nombre de stations nécessaire. Nous nous sommes donc limités à cinq stations pour couvrir la France. Leur position n'a ensuite pas beaucoup d'influence sur la connectivité du réseau. En effet, la densité des avions sur le ciel français est relativement homogène, et les portées des connexions nécessaires sont relativement importantes par rapport à la taille du territoire. Nous avons donc choisi de les positionner sur les cinq CRNA. En espace océanique, les contraintes sur le nombre de stations sont moindres, par contre on ne peut pas les placer n'importe où.

En zone continentale, nous avons démontré qu'une portée de 150 km permettait de connecter plus de 90% des avions en moyenne sur la journée, et plus de 99% entre 6h et 21h. Les avions sont alors connectés en moyenne pendant plus de 98% de leur durée de vol. Il faut en revanche une portée de 400 km si l'on veut garantir une connectivité complète pour l'ensemble des avions pendant la journée complète. En zone océanique, les portées nécessaires sont plus importantes. Il faut par exemple une portée de 350 km pour connecter plus de 90% des avions en moyenne sur la journée.

Nous allons maintenant voir l'architecture que nous proposons pour le système, et en particulier pour les connexions entre avions.



# Chapitre 3

## Architecture proposée

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>71</b>
<b>3.1 Cahier des charges</b> . . . . .	<b>71</b>
<b>3.2 Topologie</b> . . . . .	<b>72</b>
<b>3.3 Liaisons entre avions</b> . . . . .	<b>72</b>
3.3.1 Technologies existantes . . . . .	73
3.3.2 Choix de la méthode d'accès . . . . .	75
3.3.3 Choix et gestion des codes d'étalement . . . . .	77
3.3.4 Etablissement des connexions . . . . .	79
3.3.5 Interférences d'accès multiples . . . . .	80
3.3.6 Estimation des interférences . . . . .	82
3.3.7 Bilan de liaison . . . . .	83
3.3.8 Choix du modèle de propagation . . . . .	85
3.3.9 Estimation de la portée maximale des connexions . . . . .	86
3.3.10 Gestion des files d'attente . . . . .	87
<b>3.4 Routage</b> . . . . .	<b>88</b>
3.4.1 Algorithme de type "plus court chemin" . . . . .	88
3.4.2 Algorithme hiérarchique . . . . .	90
<b>3.5 Modèle de simulation OPNET</b> . . . . .	<b>92</b>
<b>3.6 Méthodologie</b> . . . . .	<b>93</b>
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	<b>95</b>

---



## Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les études existantes sur les réseaux ad hoc aéronautiques se sont principalement intéressées aux problématiques de routage. Il n'y a pas, à notre connaissance, d'étude de performances des réseaux ad hoc aéronautiques. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les hypothèses que nous avons faites pour le système sous la forme d'un cahier des charges. Puis, nous décrirons la topologie du réseau que nous allons étudier. Nous verrons les choix que nous avons faits pour les liaisons entre avions, le routage et la couche transport. Ensuite, nous présenterons le modèle de simulation que nous avons développé avec le logiciel OPNET Modeler. Enfin, nous présenterons la méthodologie que nous avons employée pour étudier les performances des réseaux ad hoc aéronautiques.

### 3.1 Cahier des charges

Dans cette partie, nous allons résumer les spécifications de base du réseau ad hoc aéronautique.

Tout d'abord, conformément à l'étude de faisabilité présentée dans le chapitre précédent, le système doit permettre des communications entre deux avions situés à plusieurs centaines de kilomètres. La portée minimale des connexions doit être d'au moins 300 km pour assurer une bonne connectivité à la fois en zone continentale et en zone océanique.

Ensuite, le système doit rester relativement simple pour permettre une intégration sur tous les types d'avions, y compris les avions court-courriers du type A320. Le coût de déploiement du système doit être faible par rapport aux solutions existantes, notamment les solutions par satellite. De plus, le réseau ad hoc aéronautique doit être complètement asynchrone. On s'affranchit ainsi du besoin d'une administration centralisée permettant de synchroniser les nœuds. On ne se préoccupe pas du choix d'une horloge de référence, de la gestion de la dérivation de ces horloges au niveau de chaque avion, et de la gestion de la synchronisation dans un environnement fortement mobile. Chaque avion peut ainsi émettre lorsqu'il le souhaite.

Enfin, le réseau ad hoc aéronautique doit être compatible avec le standard TCP/IP pour permettre son interconnexion avec d'autres réseaux, que ce soit le réseau Internet pour les passagers, ou des réseaux aéronautiques pour les contrôleurs aériens ou les compagnies. Au niveau des couches physique et liaison, on utilisera donc une technologie de communication sans fil. La couche réseau devra reposer sur IP, la couche transport sur TCP et UDP. De plus, on utilisera un protocole de routage propre aux réseaux ad hoc mobiles.

## 3.2 Topologie

Dans le cadre de cette thèse, on considère le réseau ad hoc aéronautique comme un réseau d'accès pour joindre une station sol. L'étude est donc concentrée sur les communications des avions vers le sol. On suppose que la voie retour, c'est-à-dire la liaison du sol vers l'avion, est obtenue par un système indépendant. Il peut s'agir d'un réseau ad hoc sur une autre bande de fréquence, ou d'un lien satellitaire.

Dans notre modèle, la voie retour est uniquement modélisée par un délai. Pour les simulations, nous avons choisi un délai de 250 ms, qui correspond au délai moyen pour un satellite géostationnaire. De plus, on considère qu'elle ne subit aucune perte. La topologie du système étudiée est illustrée dans la figure 3.1.

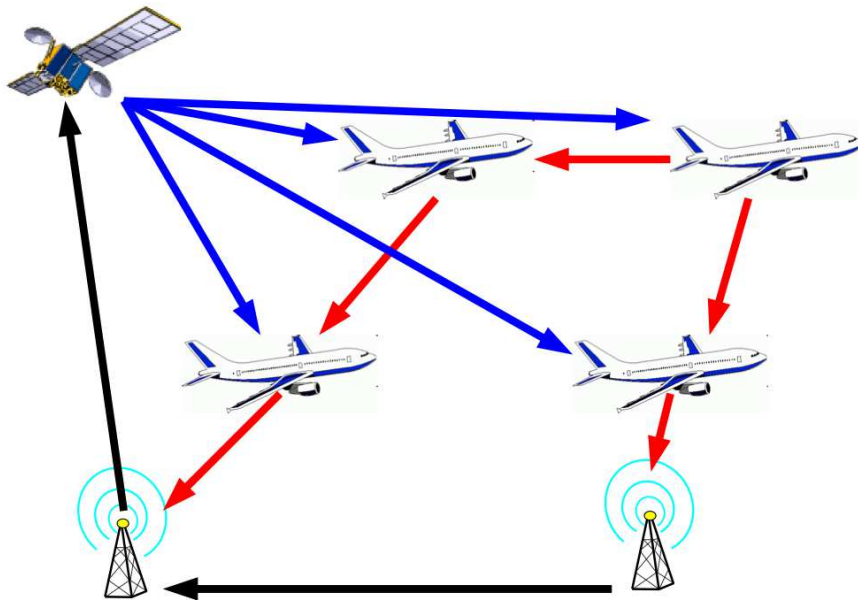


FIGURE 3.1 – Topologie proposée pour le réseau ad hoc aéronautique

## 3.3 Liaisons entre avions

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux problématiques de niveau physique et liaison pour les communications entre avions. Dans toute la suite, nous allons supposer que l'on dispose d'une bande de fréquence  $B$  de 20 MHz pour les communications entre avions. Cette hypothèse est bien sûr aisément modifiable dans le modèle de simulation, mais elle paraît raisonnable pour un tel système.

A titre de comparaison, le système de téléphonie mobile UMTS utilise une bande de 5 MHz pour les communications des mobiles vers les stations (uplink), et 5 MHz pour les communications des stations vers les mobiles (downlink), soit 10 MHz au total. Chaque opérateur téléphonique dispose en fait de plusieurs "lots" de ces bandes, ce qui permet de

faire de la réutilisation de fréquence entre les différentes stations. Orange et SFR disposent par exemple de quatre lots de fréquence, soit 40 MHz au total, Bouygues Telecom de trois lots et Free Mobile d'un lot depuis 2010. Le système de communications par satellite Inmarsat utilise lui 68 MHz.

Tout d'abord, nous allons présenter quelques technologies de communication sans fil existantes afin de voir si elles peuvent être utilisées pour des communications entre avions. Ensuite, nous présenterons les choix que nous avons effectués au niveau des couches physique et liaison. Enfin, nous proposerons un bilan de liaison et nous en déduirons la distance maximale à laquelle on peut établir une connexion entre deux avions.

### 3.3.1 Technologies existantes

Une technologie sans fil est nécessaire pour les connexions entre avions, et entre avions et stations. Tout d'abord, nous avons pensé à utiliser une technologie existante. Nous allons présenter rapidement le WiFi, le Wi-MAX et l'UMTS.

#### 3.3.1.1 Wi-Fi

Le Wi-Fi désigne un ensemble de protocoles de communication sans fil définis par le groupe IEEE 802.11 [802.11]. Un réseau Wi-Fi permet de relier sans fil plusieurs machines. Il offre un débit maximum théorique de 54 Mbps pour la norme 802.11g, et jusqu'à 300 Mbps pour le 802.11n. Sa portée est de quelques dizaines de mètres en intérieur. Il utilise la bande de fréquence de 2,4 GHz.

Au niveau de la couche physique, la norme spécifie trois solutions différentes : l'étalement de spectre par séquence directe, l'étalement de spectre par sauts de fréquence et l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). La méthode d'accès du Wi-Fi est basée sur le CSMA/CA.

#### 3.3.1.2 Wi-MAX

L'acronyme Wi-MAX signifie Worldwide Interoperability for Microwave Access. Le Wi-MAX désigne en fait plusieurs standards sur lesquels travaille le groupe IEEE 802.16 [802.16]. Le Wi-MAX est aussi soutenu par un consortium, appelé Wi-MAX Forum<sup>1</sup>, qui compte plus de 500 membres, dont par exemple Cisco, Intel, Panasonic, ... Le Wi-MAX Forum a lancé un programme de certification des produits et services qui utilisent le Wi-MAX afin de garantir leur compatibilité avec les normes 802.16 et leur interopérabilité.

Le Wi-MAX est une technologie de communication sans fils destinée tout d'abord à des architectures point-multipoint : à partir d'une station de base, on cherche à communiquer

---

1. <http://www.wimaxforum.org>

avec des terminaux multiples, et pour communiquer entre eux, deux terminaux passent par la station de base. La figure 3.2 illustre ce principe.

La norme 802.16e, publiée en 2005, apporte des possibilités d'utilisation mobile, jusqu'à 122 km/h. Dans cette version, le Wi-MAX utilise la modulation SOFDMA (Scalable Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), qui permet de partager la ressource radio à la fois en temps et en fréquence, en utilisant un nombre de porteuses simultanées compris entre 128 et 2048.

Cependant, la vitesse des avions en vol est bien supérieure à cela, typiquement de l'ordre de 800 km/h pour des avions en route. Dans [Zaggoulos *et al.* 2007, Wang *et al.* 2006], les performances du Wi-MAX en environnement fortement mobile sont étudiées, respectivement jusqu'à 140 et 200 km/h. Dans les deux cas, les auteurs montrent que les performances de l'OFDM sont fortement dégradées à cause du décalage Doppler différent qui affecte chaque sous-porteuse. Elles ne sont alors plus orthogonales. Il en résulte des interférences entre les sous-porteuses, appelées ICI (Inter-Carrier Interference).

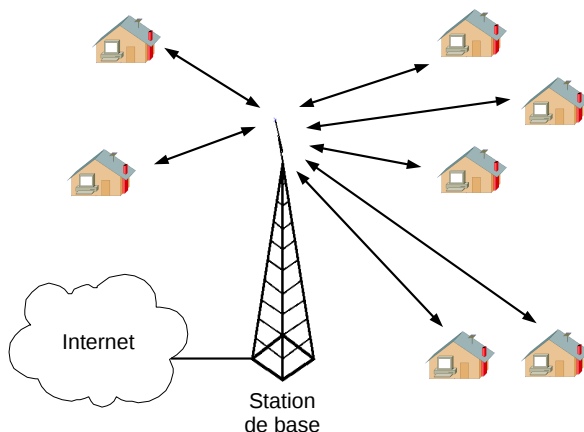


FIGURE 3.2 – Architecture point-multipoint du Wi-MAX

### 3.3.1.3 UMTS

L'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) [Holma & Toskala 2000] est la technologie de téléphonie mobile de troisième génération (3G) européenne. Elle suit les spécifications de l'UIT pour les systèmes radio cellulaires 3G.

L'UMTS repose sur la technique d'accès multiple W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Le W-CDMA réalise un étalement de spectre par séquence directe en multipliant les bits du signal à émettre par un code pseudo aléatoire propre à chaque utilisateur. L'UMTS propose ensuite deux types de multiplexage entre les voies montante et descendante : le FDD (Frequency Division Duplex) et le TDD (Time Division Duplex). Le multiplexage de type FDD utilise une bande passante de 5 MHz pour le débit descendant, et une autre bande passante de 5 MHz pour le débit montant. Le débit maximal supporté

par un seul code est de 384 kbps. Afin de pouvoir supporter un débit de 2 Mbps, plusieurs codes sont nécessaires. Le multiplexage de type TDD n'utilise qu'une seule bande passante de 5 MHz divisée en portions de temps (time slot) utilisables aussi bien pour le débit montant que pour le débit descendant. Cela permet d'obtenir une large gamme de débits de services en allouant plusieurs codes ou plusieurs intervalles de temps à un utilisateur donné.

En Europe, les fréquences retenues pour l'UMTS sont 1900-2025 MHz et 2110-2200 MHz. En 1997, la CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications) a précisé la répartition des deux modes de multiplexage retenus dans ces bandes :

- 1900-1920 MHz et 2010-2025 MHz : TDD ;
- 1920-1980 MHz : FDD, sens mobile vers station de base ;
- 2110-2170 MHz : FDD, sens station de base vers mobile.

#### 3.3.1.4 Conclusion

Les technologies UMTS et WiMAX n'offrent pas des performances satisfaisantes pour des communications entre avions dans un réseau ad hoc aéronautique. En effet, les portées maximales sont de l'ordre de la dizaine de kilomètres. D'après l'étude de faisabilité présentée dans le chapitre 2, il est nécessaire d'avoir des portées de communication de l'ordre de la centaine, voire plusieurs centaines de kilomètres pour avoir une connectivité satisfaisante du réseau.

On peut donc exclure de la même façon l'utilisation du standard IEEE 802.11, pourtant largement étudié et utilisé dans les réseaux ad hoc mobiles, par exemple pour les réseaux de capteurs, et même, comme nous l'avons vu précédemment, dans certaines études sur le routage dans les réseaux ad hoc aéronautiques. En effet, sa portée est typiquement de l'ordre de la dizaine voire centaine de mètres, ce qui est insuffisant dans notre cas.

Nous allons donc décrire maintenant les hypothèses que nous avons faites pour la méthode d'accès et proposer un bilan de liaison.

### 3.3.2 Choix de la méthode d'accès

Dans la plupart des études existantes sur les réseaux ad hoc aéronautiques, les méthodes d'accès proposées sont basées sur le TDMA [Karras *et al.* 2008a, Karras *et al.* 2007, Tu & Shimamoto 2009b, Tu & Shimamoto 2009a, Tu *et al.* 2009, Walter *et al.* 2010]. Cette méthode nécessite une synchronisation des nœuds et permet ensuite d'éviter les collisions des paquets transmis sur le réseau en allouant à chaque nœud un créneau temporel pendant lequel il est seul autorisé à émettre.

Dans le pire cas où tous les avions veulent émettre simultanément, la capacité maximale dont dispose chaque avion est donc inversement proportionnelle au nombre d'avions dans le réseau. Cela peut être problématique pour un réseau ad hoc aéronautique puisque le

nombre d'avions en vol est très élevé. On a par exemple plus de 500 avions en vol au dessus du territoire français durant une grande partie de la journée. En faisant l'hypothèse d'une capacité des connexions de 1 Mbps, le débit offert par avion est alors au maximum de 2 kbps.

Même si l'on considère du S-TDMA [Tu *et al.* 2009], c'est-à-dire une utilisation du TDMA avec un découpage spatial, on aura un grand nombre d'avions dans une même zone car les portées des connexions doivent être élevées, de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres.

D'autres études existantes font l'hypothèse de l'utilisation du WiFi IEEE 802.11 pour les communications entre avions [Seo *et al.* 2008, Peters *et al.* 2011, Fu & DaSilva 2007, Hyeon *et al.* 2010]. Bien que la portée du WiFi ne soit clairement pas suffisante pour les communications entre avions dans le réseau ad hoc aéronautique, la méthode d'accès CSMA/CA peut être envisagée pour un tel réseau. Cependant, si on envisage le CSMA/CA avec des portées de communication de plusieurs centaines de kilomètres, la capacité globale du réseau va être sous utilisée. En effet, lorsqu'un avion va émettre, son émission va être détectée par l'ensemble des avions en visibilité, et ces avions ne vont donc pas pouvoir émettre. Ce phénomène est caractéristique des méthodes d'accès par contention.

Enfin, le CDMA peut être envisagé pour les réseaux ad hoc aéronautiques. Il est aujourd'hui largement utilisé dans les réseaux cellulaires, notamment grâce au gain de capacité qu'il apporte. Dans [Padovani *et al.* 1991], il a été démontré que l'utilisation du CDMA dans les systèmes cellulaires de téléphonie mobile permet de multiplier par six la capacité du réseau par rapport à une solution utilisant le TDMA ou le FDMA. Les technologies de téléphonie mobile de troisième génération sont ainsi basées sur le CDMA.

De plus, comme tous les réseaux sans fil, les systèmes cellulaires et les réseaux ad hoc sont limités par les interférences. Cela signifie qu'augmenter simultanément la puissance d'émission de tous les nœuds ne permet pas forcément d'améliorer la capacité totale du réseau [Andrews *et al.* 2005]. Or, le CDMA est, par conception, robuste aux interférences grâce au gain d'étalement. Le CDMA a donc été étudié comme solution dans les réseaux ad hoc mobiles, par exemple dans [Gridling & Thallner 2002, Andrews *et al.* 2005].

L'un des avantages du CDMA, souligné dans [Andrews *et al.* 2005], est de pouvoir tolérer plusieurs transmissions simultanées dans la même zone géographique. Dans le cas des réseaux en bande étroite, pour qu'une transmission soit réussie, il faut qu'il n'y ait aucun interféreur dans une zone donnée autour du récepteur. En effet, si le récepteur reçoit plusieurs signaux simultanément, il y a collision et aucun signal ne peut être reçu correctement. Cela pose donc des problèmes dans les réseaux denses. Avec le CDMA, cette contrainte est relâchée. En effet, un même récepteur peut recevoir plusieurs transmissions simultanément, à condition que celles-ci utilisent des codes d'étalement différents. Dans le cas des réseaux ad hoc aéronautiques, cela signifie que chaque avion pourra émettre lorsqu'il le souhaite.

Dans [Gridling & Thallner 2002], les auteurs étudient la faisabilité de l'utilisation du CDMA et de l'étalement de spectre à séquence directe dans un réseau ad hoc asynchrone. Pour cela, ils ont proposés un modèle de simulation permettant d'étudier les interférences d'accès multiples dans ce type de réseau, en fonction notamment du nombre de nœud, de la distance minimale entre eux, du nombre de connexions par nœud, du gain d'étalement, ou encore du modèle de propagation.

Dans leur modèle, les nœuds sont placés aléatoirement sur un plan, en garantissant que la distance minimale entre deux nœuds était respectée. Chaque nœud établit ensuite un nombre de connexions donné avec ses voisins. Chaque connexion utilise un code d'étalement différent. Ils supposent ensuite que toutes les connexions sont actives simultanément. Ils en déduisent alors le taux d'erreur binaire de chaque connexion. Il montre en particulier que l'utilisation du CDMA dans les réseaux ad hoc asynchrone est possible, et que les performances du système sont améliorées lorsque la distance minimale entre deux nœuds augmentent, ou encore lorsque le nombre de connexions par nœud diminue.

Finalement, nous avons donc choisi d'utiliser le CDMA (Code Division Multiple Access) pour le partage d'accès au canal entre les différents avions. Cela permettra donc à chaque avion de pouvoir émettre lorsqu'il le souhaite. De plus, nous allons proposer un modèle d'estimation des interférences d'accès multiples permettant de prendre en compte des communications par échange de blocs de données, contrairement au modèle proposé dans [Gridling & Thallner 2002], qui suppose que toutes les connexions sont actives en continu. Notre modèle intégrera en particulier un générateur de trafic paramétrable pour chaque avion.

### 3.3.3 Choix et gestion des codes d'étalement

Parmi les différents type de codes existants, les codes orthogonaux permettent de supprimer les interférences d'accès multiples. En revanche, une parfaite synchronisation entre l'émetteur et de récepteur est nécessaire [Proakis 2000], ce qui est impossible à obtenir pour des émissions simultanés de plusieurs nœuds mobiles. C'est d'autant plus vrai dans un réseau ad hoc mobile où il n'y a pas d'infrastructure centralisée permettant de synchroniser les nœuds. Les codes pseudo-aléatoires sont eux particulièrement adaptés au CDMA asynchrone et permettent de générer un grand nombre de codes différents. En revanche, ils créent des interférences d'accès multiples.

Dans de nombreux systèmes CDMA existants, il a été proposé d'utiliser deux types de codes séquentiellement. On a alors un code de canalisation (channelization code) et un code d'embrouillage (scrambling code). En UMTS, les codes de canalisation utilisés sont des codes orthogonaux OVSF, et les codes d'embrouillage sont des codes de Gold [Holma & Toskala 2000]. Le tableau 3.1 montre le rôle des codes de canalisation et des codes d'embrouillage dans la norme UMTS pour les voies montante et descendante.

	Voie montante (Mobiles→Station)	Voie descendante (Station→Mobiles)
Codes de canalisation (OVSF)	Séparation des différents flux de données d'un même utilisateur	Séparation des différents utilisateurs d'une même cellule
Codes d'embrouillage (Gold)	Séparation des transmissions des différents utilisateurs	Séparation des différentes stations

TABLE 3.1 – Rôles des codes de canalisation et d'embrouillage dans la norme UMTS

Pour la voie montante des mobiles vers la station, les codes orthogonaux OVSF sont utilisés pour séparer les flux d'un même utilisateur, comme illustré dans la figure 3.3. Pour séparer les différents utilisateurs, on ne peut pas utiliser des codes orthogonaux car il est impossible d'obtenir une synchronisation entre tous les nœuds mobiles. On utilise donc des codes de Gold pour les séparer. Dans le sens descendant de la station vers les mobiles, les codes orthogonaux sont utilisés pour séparer les différents utilisateurs. C'est la station qui synchronise toutes les émissions à destination des différents utilisateurs.

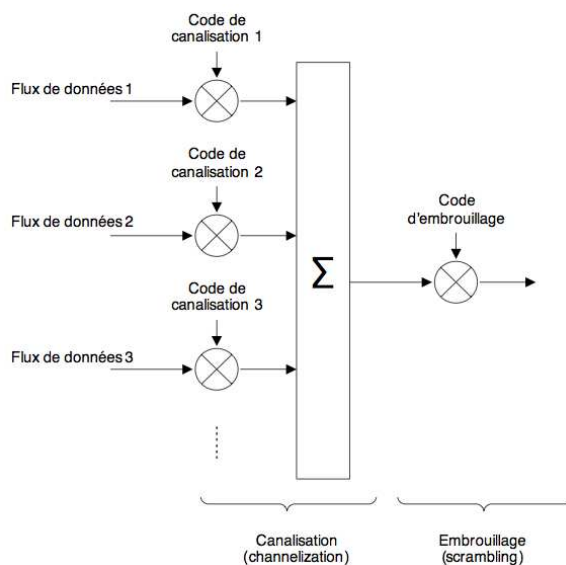


FIGURE 3.3 – Utilisation des codes pour la voie montante UMTS

Dans le cadre de cette thèse, on considère uniquement les communications des avions vers la station. Comme dans la voie montante de la norme UMTS, nous allons utiliser des codes de Gold pour séparer les transmissions des différents avions. Chaque avion pourra ensuite utiliser des codes orthogonaux de type OVSF pour séparer les différents flux de données qu'il génère. Pour simplifier l'étude, nous allons considérer que tous les flux générés par un avion sont agrégés en un seul. On utilisera donc un seul code OVSF par avion. On ne s'intéressera donc pas à la gestion des codes OVSF pour un avion donné.

Pour que tous les avions dans le réseau ad hoc aéronautique puissent émettre simultanément, ils doivent disposer d'un code d'étalement unique. Or le nombre de codes de Gold de longueur  $L$  disponibles est  $L+2$ , donc si le nombre d'avions en vol à un instant donné est supérieur à  $L+2$ , il sera impossible de fournir un code d'étalement unique à chaque avion. Nous allons donc faire l'hypothèse que la longueur des codes est suffisante pour que chaque avion puisse avoir un code d'étalement unique. Ce code lui sera assigné de façon statique.

Dans la littérature, des méthodes ont toutefois été proposées dans le cas où le nombre de codes est insuffisant pour tous les utilisateurs. On peut ainsi faire de l'allocation aléatoire de code. Ainsi, chaque utilisateur choisit aléatoirement un code lorsqu'il veut émettre. Cela peut engendrer des collisions si deux utilisateurs proches choisissent le même code et émettent simultanément. Plusieurs protocoles d'allocation dynamique de codes ont aussi été proposés, par exemple dans [Srivastava *et al.* 2003]. Il s'agit pour la plupart d'allouer les codes aux différents nœuds à la demande, en s'assurant que deux nœuds voisins n'aient pas le même code.

### 3.3.4 Etablissement des connexions

Un autre problème se pose alors dans le réseau ad hoc aéronautique. On a fait l'hypothèse d'un nombre suffisant de codes d'étalement pour tous les avions. On suppose donc que chaque avion dispose d'un code d'étalement unique. Cependant, pour qu'une communication puisse avoir lieu, il faut que l'émetteur et le récepteur utilisent le même code pour étaler et désétaler les données. Deux approches sont alors possibles. On peut utiliser soit le code de l'avion émetteur, soit le code de l'avion récepteur.

Si l'on utilise le code du récepteur, tous les avions vont recevoir les données utiles sur leur propre code. Le récepteur sera donc plus simple puisqu'il suffira de tester un code d'étalement pour recevoir les données. En revanche, des collisions peuvent survenir lorsque deux avions veulent émettre à destination du même avion puisqu'ils utiliseront alors le même code. Il est donc plus intéressant d'utiliser le code de l'émetteur. En effet, les collisions de paquets ayant le même code d'étalement sont alors impossibles. De plus, il devient alors très simple pour un avion de diffuser un message. On va donc considérer que lorsqu'un avion veut émettre des données, il va utiliser son propre code d'étalement.

La difficulté majeure de cette hypothèse concerne alors la réception. En effet, un avion donné va pouvoir recevoir simultanément des données étalées avec plusieurs codes d'étalement différents. S'il n'a a priori aucune connaissance sur les codes d'étalement de ses voisins, cela signifie qu'il va devoir tester, en temps réel, tous les codes utilisés dans le système afin de décoder tous les messages qu'il reçoit. Il est en effet nécessaire de décoder chaque message pour savoir s'il lui est destiné ou non. Même si l'on peut supposer que chaque avion dispose de la liste de tous les codes d'étalement utilisés dans le système,

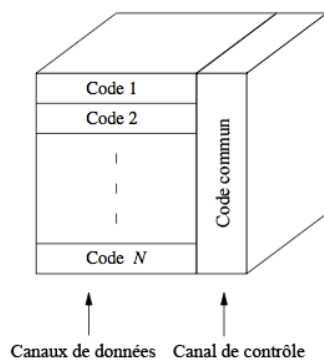


FIGURE 3.4 – Utilisation d’un code commun

la recherche simultanée de pics de corrélation sur tous les codes du système risque d’être très coûteuse en ressources.

Dans le système GPS, certains récepteurs sont capables d’utiliser la dernière position connue et les éphémérides des satellites pour déterminer l’ensemble des satellites qui pourrait être en visibilité. Ils peuvent ainsi accélérer l’acquisition des signaux des satellites en testant uniquement les codes de ces satellites. Dans le cas du réseau ad hoc aéronautique, il serait intéressant que chaque avion se signale à tous ses voisins en envoyant périodiquement un message contenant son indicatif. Cela permettrait à chaque avion de connaître l’ensemble de ses voisins, et donc de réduire l’ensemble des codes sur lesquels il peut recevoir des données. On peut en effet supposer que chaque avion dispose d’une liste permettant d’associer l’indicatif d’un avion au code qu’il utilise. Cela évite d’avoir à transmettre le code d’étalement, qui peut être très long, dans son intégralité.

Pour que ce message de signalisation puisse être reçu facilement par tous les avions alentour, il serait intéressant de disposer d’un canal de communication commun à tous les avions. Dans [Muqattash & Krunz 2003], les auteurs proposent l’utilisation d’un code commun. On va donc supposer que tous les avions disposent d’un code commun, comme illustré dans la figure 3.4. Les avions devront donc écouter en permanence les messages envoyés sur ce canal commun. Celui-ci pourra aussi permettre l’échange des informations de routage.

Pour que le canal de contrôle et les canaux de données soient parfaitement indépendants, on peut utiliser les deux voies I et Q du modulateur QPSK. La voie I sera réservée aux données, la voie Q aux informations de contrôle. On pourra ainsi utiliser des codes d’étalement différents pour les deux canaux.

### 3.3.5 Interférences d’accès multiples

Comme nous l’avons vu, le CDMA permet l’utilisation simultanée du canal par plusieurs signaux codés indépendamment. Malheureusement, pour obtenir des signaux or-

thogonaux, une parfaite synchronisation entre l'émetteur et le récepteur est nécessaire [Proakis 2000]. Dans un réseau ad hoc, on ne dispose pas d'une telle infrastructure pour assurer cette synchronisation. On doit donc faire l'hypothèse d'un réseau ad hoc aéronautique complètement asynchrone. Il y aura donc des interférences entre les utilisateurs. Ces interférences sont appelées MAI, pour Multiple Access Interference. Elles vont donc potentiellement affecter la qualité de la liaison, et donc gêner la réception des paquets.

Ainsi, lorsqu'une communication aura lieu entre deux avions donnés, les communications simultanées des autres avions vont interférer avec elle, même si des codes différents sont utilisés. Ces interférences peuvent être modélisées par un bruit blanc gaussien additif [Simon *et al.* 2002]. La figure 3.5 illustre une transmission entre un émetteur TX et un récepteur RX, et  $n$  transmissions concurrentes utilisant des codes d'étalement différents. Le tableau 3.2 résume les notations.

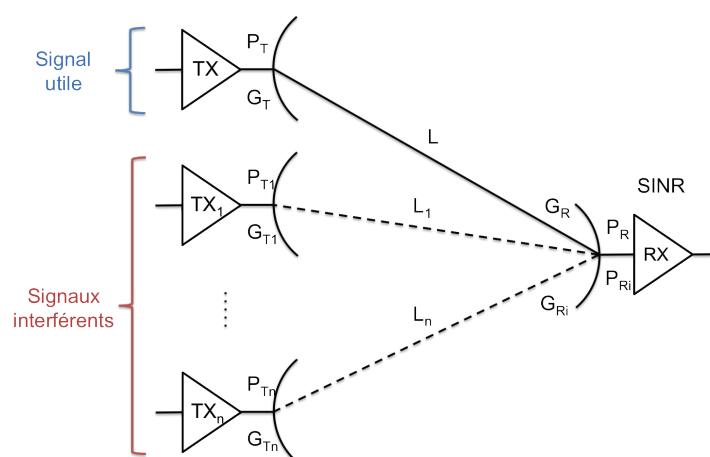


FIGURE 3.5 – Schéma de la liaison

$P_T$	Puissance transmise par l'émetteur TX (W)
$G_T$	Gain de l'antenne d'émission de TX en direction de RX
$L$	Pertes de propagation entre TX et RX
$G_R$	Gain de l'antenne de réception de RX en direction de TX
$P_R$	Puissance reçue de l'émetteur TX par le récepteur RX (W)
$P_{T_i}$	Puissance transmise par l'émetteur TX <sub>i</sub> (W)
$G_{T_i}$	Gain de l'antenne d'émission de TX <sub>i</sub> en direction de RX
$L_i$	Pertes de propagation entre TX <sub>i</sub> et RX
$G_{R_i}$	Gain de l'antenne de réception de RX en direction de TX <sub>i</sub>
$P_{R_i}$	Puissance reçue de l'émetteur TX <sub>i</sub> par le récepteur RX (W)
$P_B$	Puissance du bruit à l'entrée du récepteur RX (W)
$N$	Gain d'étalement
$SINR$	Rapport Signal sur Bruit plus Interférence

TABLE 3.2 – Notations

Le rapport signal sur bruit plus interférence à l'entrée du récepteur SINR est donné par [Simon *et al.* 2002] :

$$SINR = \frac{P_R}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_{Ri} + P_B} \quad (3.1)$$

$P_R$  représente la puissance du signal utile,  $\sum_{i=1}^n P_{Ri}$  la puissance des signaux interférents utilisant des codes différents du signal utile, et  $P_B$  la puissance du bruit. D'après l'équation des télécommunications, on peut lier la puissance reçue à la puissance transmise :

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{1}{L} \quad (3.2)$$

On a donc :

$$SINR = \frac{P_T G_T G_R \frac{1}{L}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_{Ti} G_{Ti} G_{Ri} \frac{1}{L_i} + P_B} \quad (3.3)$$

### 3.3.6 Estimation des interférences

Dans notre modèle, nous calculons les interférences d'accès multiples pour chaque paquet reçu afin de déterminer s'il peut être correctement décodé ou non. Si oui, le paquet est transmis aux couches supérieures, sinon il est détruit.

Pour cela, on détermine tout d'abord s'il y a eu collision ou non entre le paquet utile et d'autres paquets émis simultanément par les autres avions. Il faut donc prendre en compte tous les paquets envoyés précédemment et regarder s'il y a une collision, en tenant compte de la taille des paquets, du débit de la connexion et du délai de propagation entre les avions source et l'avion courant. On obtient ainsi la liste de tous les paquets en collision avec le paquet utile que l'on essaye de décoder.

On suppose ensuite que la puissance d'émission d'un avion est constante pendant toute la durée d'émission d'un paquet. On peut ainsi estimer la puissance des interférences au cours de la réception du paquet utile. On obtient une fonction en escalier, comme illustré dans la figure 3.6. Les paquets 2, 4, 5 et 6 sont en collision avec le paquet utile. Les paquets 1 et 3 sont arrivés respectivement avant et après le paquet utile, ils n'interfèrent donc pas.

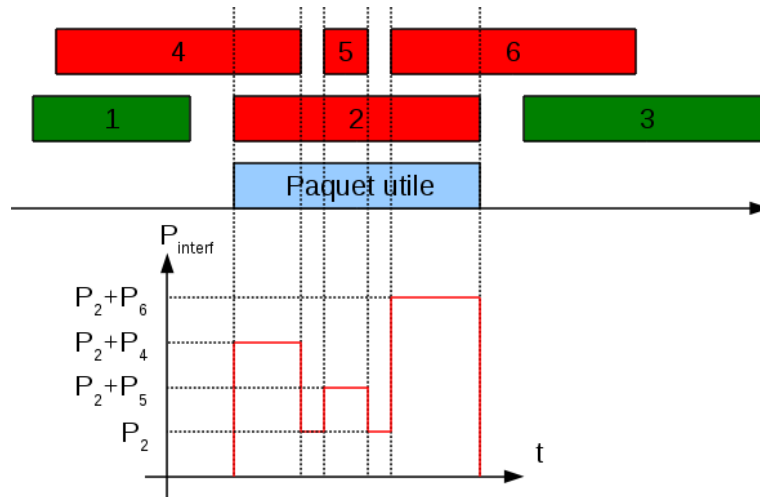


FIGURE 3.6 – Détection des collisions et estimation de la puissance des interférences

On calcule ensuite le rapport signal sur interférence par morceau sur toute la durée de réception du paquet utile grâce à la formule 3.3. Sur chaque segment, on compare le SINR du paquet reçu à un seuil, donné en paramètre de la simulation. Si le SINR est en dessus du seuil, on considère que tous les bits du paquet sont correctement décodés sur le segment considéré. Si le SINR est en dessous du seuil, on considère que tous les bits sont erronés sur le segment. On obtient ainsi le nombre de bits erronés lors de la réception de chaque paquet.

On fait ensuite l'hypothèse d'un code correcteur d'erreur de type Reed-Solomon  $RS(k, n)$ . Il s'agit d'un code bloc linéaire qui associe à chaque mot de données de  $k$  bits un mot de code de  $n$  bits ( $n > k$ ). On ajoute ainsi de la redondance pour détecter et de corriger des erreurs de transmission. Un code  $RS(k, n)$  peut corriger  $(n - k)/2$  erreurs. On remarque donc que plus on veut corriger d'erreurs, plus il faut rajouter de la redondance, donc plus le débit utile pour l'utilisateur diminue.

On compare ensuite le nombre d'erreurs de transmission à cette capacité de correction pour décider si le paquet est correctement reçu ou non. La capacité de correction est donnée en paramètre de la simulation.

### 3.3.7 Bilan de liaison

Dans cette partie, nous proposons un bilan de liaison pour les connexions entre avions, et entre avions et stations. L'objectif est de déterminer les pertes de propagation maximales en fonction du débit des connexions. On pourra ainsi en déduire la portée maximale des connexions.

Dans [Sakhaee & Jamalipour 2006, Sakhaee *et al.* 2006a, Cong-jun *et al.* 2008], les auteurs considèrent que l'on peut établir une connexion entre deux avions dès qu'ils sont à une distance inférieure à la portée optique, soit à moins de 680 km en considérant deux avions volant à une altitude de 9 km [Cong-jun *et al.* 2008]. Le calcul de la portée optique est présenté en annexe H. Leur étude se concentre ensuite sur la faisabilité et aucune hypothèse n'est faite sur le débit des liaisons. Dans [Hoffmann *et al.* 2009], les auteurs considèrent des liaisons idéales offrant un débit de 2 Mbps pour des portées allant jusqu'à 370 km.

Dans le cadre du projet ATENAA, les auteurs proposent l'utilisations d'antennes directionnelles en bande Ka entre les avions offrant un débit de 10 Mbps, puis de liaisons optiques offrant 62 Mbps [Karras *et al.* 2007, Karras *et al.* 2008a, Karras *et al.* 2008b]. Malheureusement, la validation du lien optique, publiée dans [Fuchsa *et al.* 2007], n'est proposée qu'entre deux terminaux fixes, et entre un terminal fixe et un terminal mobile roulant à 20 km/h, à une distance allant de 1,2 à 1,4 km. La faisabilité d'un tel système entre deux avions en vol n'est donc pas démontrée. De plus, un tel système serait onéreux puisqu'il nécessite des antennes complexes, très directives et un mécanisme de pointage et de poursuite performant.

Dans le cadre de cette thèse, nous voulons proposer une solution simple et peu onéreuse pour les réseaux ad hoc aéronautiques. Nous faisons donc le choix d'utiliser uniquement des antennes omni-directionnelles. Cela permet d'avoir une antenne légère et de faible coût. Ce type d'antenne sera donc facile à intégrer sur tous les avions de ligne, y compris les court-courriers de type A320. On considère donc un gain d'antenne de 0 dBi.

Pour la suite du bilan de liaison, nous nous sommes inspirés d'un bilan de liaison standard UMTS entre une station et un mobile, que l'on peut trouver dans [Holma & Toskala 2000]. Nous avons fait des hypothèses pour modifier certains paramètres de la technologie UMTS afin de l'adapter aux connexions entre avions. Tout d'abord, nous avons augmenté la bande du signal de 5 à 20 MHz, ce qui a un impact sur le gain d'étalement et le bruit au niveau du récepteur. On considère ensuite des liaisons à 1 Mbps.

Concernant la puissance d'émission, les terminaux mobiles UMTS sont limités à 250 mW, soit 24 dBm. Dans notre cas, l'antenne d'émission sera embarquée sur un avion donc on peut envisager une puissance supérieure, de l'ordre de la dizaine de Watt, comme une station de base UMTS classique. Nous avons choisi une puissance d'émission maximale de 50 W. C'est aussi cette valeur qui a été retenue dans les spécifications du L-DACS.

Finalement, on obtient le bilan de liaison suivant :

Émetteur		Commentaires
Débit (Mbps)	1	
Puissance d'émission maximale (W)	50	
Puissance d'émission maximale (dBm)	40	
Gain d'antenne (dBi)	0	antenne omnidirectionnelle
PIRE (dBm)	40	
Récepteur		Commentaires
Densité de puissance du bruit (dBm/Hz)	-174	
Niveau de bruit du récepteur (dB)	5	récepteur UMTS
Densité de bruit du récepteur (dBm/Hz)	-169	
Puissance du bruit du récepteur (dBm)	-96	pour une bande de 20 MHz
Marge d'interférence (dB)	3	
Bruit effectif total + interférence (dBm)	-93	
Gain de traitement (dB)	13	pour une bande de 20 MHz
Eb/No requis (dB)	3	
Sensibilité du récepteur (dBm)	-103	récepteur UMTS
Gain d'antenne du récepteur (dBi)	0	antenne omnidirectionnelle
Pertes câble (dB)	1	
Pertes de propagation permise (dB)	149	

TABLE 3.3 – Bilan de liaison

### 3.3.8 Choix du modèle de propagation

Pour trouver la distance qui correspond aux pertes de propagation maximales, nous devons choisir un modèle de propagation. Dans [Green & Obaidat 2002, Cosma *et al.* 2008, Konstantinou *et al.* 2007], on peut trouver des études sur les performances de l'UMTS. Malheureusement, elles sont basées sur des modèles de propagation valable uniquement pour la téléphonie mobile. Les paramètres utilisés sont la différence d'altitude entre la station et le téléphone mobile, les caractéristiques de la végétation ou encore la hauteur moyenne des bâtiments. Ces modèles de propagation ne sont donc pas pertinents pour les réseaux ad hoc aéronautiques.

Pour notre étude, nous avons utilisé un modèle simplifié. On considère que les avions sont toujours en ligne de vue directe, de même que les avions et les stations. On considère qu'il n'y a pas de masquage, ni de multi-trajet. De plus, on néglige les atténuations éventuelles dues à la pluie. En effet, l'altitude de croisière des avions de ligne est de l'ordre de la dizaine de kilomètres, soit au dessus de la couche nuageuse. Nous allons donc utiliser un modèle de propagation en espace libre. On a :

$$\frac{1}{L} = A = \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (3.4)$$

où  $A$  représente l'atténuation due à la propagation,  $\lambda$  la longueur d'onde en m et  $d$  la

distance entre l'émetteur et le récepteur en m. On obtient alors aisément :

$$A_{dB} = 92,44 + 20 \log(f_{GHz}) + 20 \log(d_{km}) \quad (3.5)$$

où  $A_{dB}$  représente la perte de propagation en  $dB$ ,  $f_{GHz}$  la fréquence du signal en  $GHz$  et  $d_{km}$  la distance entre l'émetteur et le récepteur en km.

### 3.3.9 Estimation de la portée maximale des connexions

D'après le bilan de liaison présenté dans le tableau 3.3, l'atténuation maximale du signal pour un débit de la connexion de 1 Mbps et une puissance d'émission de 50 W est de 149 dB. L'équation 3.5, obtenue en considérant un modèle de propagation en espace libre, permet alors d'obtenir la portée maximale de la connexion en fonction de la fréquence du signal. Le tableau 3.4 présente les valeurs de portée maximale pour des fréquences de 2 à 5 GHz.

Fréquence (GHz)	2	3	4	5
Portée maximale (km)	336	224	168	135

TABLE 3.4 – Portée maximale d'un avion pour différentes fréquences

A 2 GHz, chaque avion pourra donc potentiellement établir des connexions à 1 Mbps avec d'autres avions situés dans une sphère de 336 km de rayon autour de lui, contre seulement 135 km à 5 GHz. Pour la suite de l'étude, nous allons supposer que la fréquence du signal est de 2 GHz.

On peut alors s'intéresser à la capacité maximale des connexions en fonction de la portée. D'après le bilan de liaison présenté dans le tableau 3.3, on a :

$$A_{dB} = 149 - 10 \cdot \log(D_{Mbps}) \quad (3.6)$$

où  $A_{dB}$  représente la perte de propagation en  $dB$  et  $D_{Mbps}$  le débit de données en  $Mbps$ .

Pour  $f = 2$  GHz, l'équation 3.5 devient :

$$A_{dB} = 98,46 + 20 \cdot \log(d_{km}) \quad (3.7)$$

On obtient donc la relation suivante entre la capacité des connexions et la portée :

$$D_{Mbps} = \frac{10^{5,054}}{d_{km}^2} \quad (3.8)$$

Pour une fréquence de 2 GHz et une puissance d'émission maximale de 50W, les capacités maximales des connexions en fonction de la distance sont les suivantes :

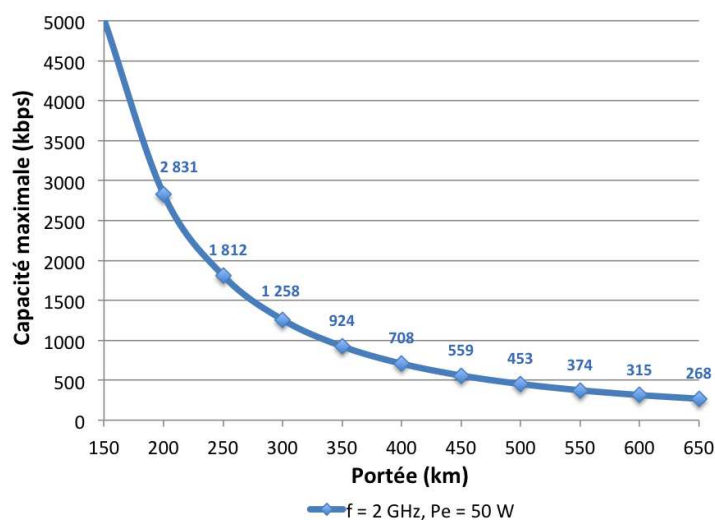


FIGURE 3.7 – Evolution de la capacité maximale des connexions (kbps) en fonction de la portée (km),  $f = 2GHz$ ,  $P_{e_{max}} = 50W$

### 3.3.10 Gestion des files d'attente

Dans le réseau, chaque avion peut envoyer des données. Chaque avion va donc générer son propre trafic. De plus, chaque avion peut recevoir du trafic provenant d'autres avions et doit alors le faire suivre vers la destination voulue. Au niveau de chaque avion, on va donc devoir gérer des flux de données provenant de différents avions source, y compris lui-même. Chaque avion doit donc être capable de stocker tous les paquets reçus, puis de les traiter un à un pour les envoyer vers la bonne destination. Pour cela, on utilise des files d'attente. On peut en utiliser une seule ou plusieurs, et on peut envisager différentes politiques d'ordonnancement au niveau de chaque avion.

On peut par exemple utiliser une seule file d'attente au niveau de chaque avion. On y stocke tous les paquets reçus, y compris ceux provenant de l'avion lui-même, et on les traite ensuite un à un dans l'ordre d'arrivée. On parle de file d'attente FIFO (First-In First-Out). On peut aussi utiliser plusieurs files d'attente FIFO, par exemple une file pour le flux généré par l'avion lui-même et une file pour le trafic reçu des autres avions. On traite ensuite les deux files alternativement. On peut aussi envisager d'utiliser une file d'attente pour chaque flux de données reçus. Dans notre cas, chaque flux est associé à l'avion source qui l'a émis. On traite alors chaque file une à une. On parle de Fair Queuing. C'est cette dernière approche que nous avons retenue pour la suite de l'étude. Elle permet en effet de traiter équitablement tous les flux au niveau de chaque nœud intermédiaire.

## 3.4 Routage

Dans cette thèse, nous ne nous sommes pas intéressés aux données échangées entre les avions par le protocole de routage pour trouver une route vers la destination. Ces informations seront échangées sur le canal de contrôle, et celui-ci est indépendant des différents canaux de données.

On suppose donc que l'on dispose d'un protocole de routage capable de fournir une route vers la destination à tous les avions en vol. Dans notre cas, la destination est toujours un serveur au sol. Chaque avion aura donc besoin d'une seule route vers une station sol. On suppose en effet que toutes les stations sont reliées entre elles, ainsi qu'au serveur.

De plus, on suppose que ce protocole de routage est proactif. Les tables de routage seront donc maintenues en permanence. Ainsi, lorsqu'un avion veut envoyer des données, il connaît instantanément la route vers la destination. On n'a donc pas de délai induit par la phase de découverte de route des protocoles réactifs.

Dans notre modèle de simulation, les routes sont ainsi calculées de façon centralisée et omnisciente. On suppose qu'une entité connaît la position de tous les avions et de toutes les stations, et donc la topologie complète du réseau. C'est cette entité qui calcule la route vers la destination (une station au sol) pour tous les avions de façon centralisée. Les routes sont ensuite mises à jour au niveau de chaque avion toutes les 15 secondes.

Nous avons ainsi implémenté deux algorithmes de routage différents dans notre modèle : un algorithme de routage classique de type "plus court chemin" et un algorithme hiérarchique basé sur des clusters. Nous allons maintenant en décrire le principe.

### 3.4.1 Algorithme de type "plus court chemin"

#### 3.4.1.1 Principe général

Dans un premier temps, nous avons implémenté un algorithme de routage de type "plus court chemin". Nous nous sommes inspirés du protocole DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector Routing). Comme nous l'avons vu, celui-ci est basé sur un algorithme de ce type. Il implémente l'algorithme distribué de Bellman-Ford pour trouver le chemin le plus court entre la source et la destination.

Dans notre cas, on considère des communications entre les avions et le sol. On doit donc trouver une route entre chaque avion et une station au sol. L'idée est donc de connecter chaque avion à la station la plus proche par le chemin le plus court. La figure 3.8 montre une illustration de cet algorithme.

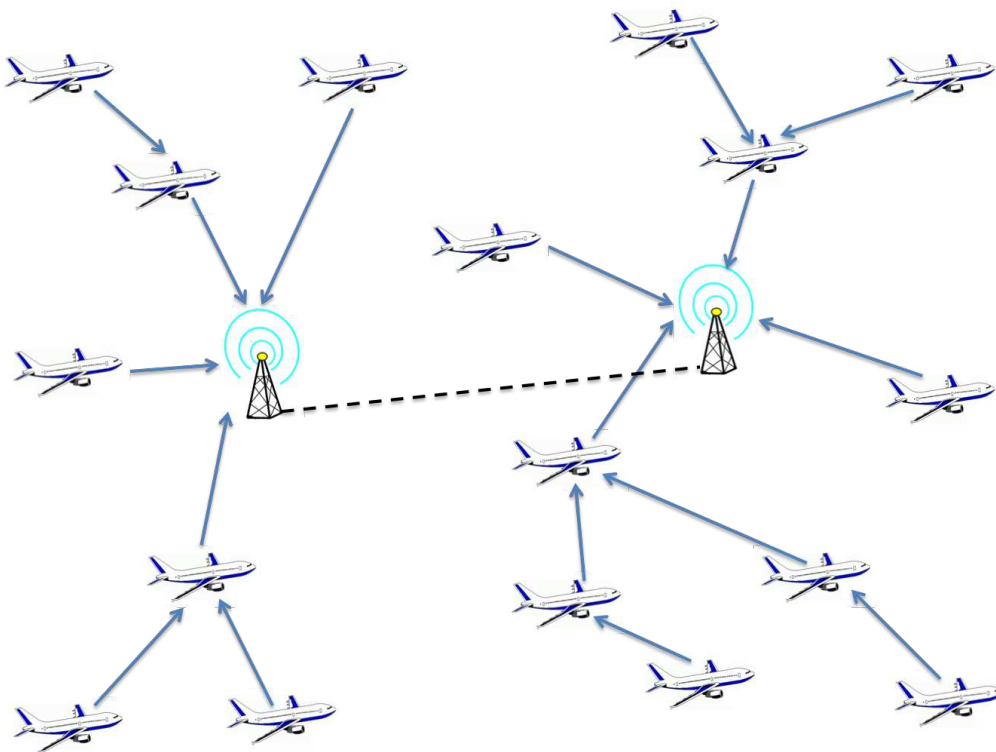


FIGURE 3.8 – Algorithme de routage "plus court chemin"

### 3.4.1.2 Implémentation et paramètres

Dans notre modèle, le réseau ad hoc aéronautique est représenté par un graphe dont les nœuds sont les avions en vol et les stations. Les arêtes sont les connexions possibles entre eux. On considère qu'une connexion est possible entre deux avions lorsque la distance entre eux est inférieure à la portée maximale des connexions, donnée en paramètre de la simulation. Le poids de chaque arête est sa longueur, c'est-à-dire la distance entre les deux avions qu'elle relie. On considère que toutes les stations et le serveur sont reliés entre eux par des arêtes de poids nuls. On obtient ainsi un graphe avec toutes les connexions possibles entre tous les avions et les stations.

Nous avons ensuite implémenté l'algorithme de Dijkstra pour trouver le chemin le plus court entre chaque avion en vol et une station dans ce graphe. Il suffit alors de mettre à jour la table de routage de chaque avion. Dans notre modèle, cette mise à jour est effectuée toutes les 15 secondes.

En faisant varier la portée maximale des connexions, on va modifier le graphe contenant toutes les connexions possibles. Le résultat de l'algorithme de Dijkstra sera donc différent. On pourra donc étudier l'influence de la portée maximale des connexions sur les performances du système.

### 3.4.1.3 Stabilité des connexions

Nous avons ensuite étudié la stabilité des connexions avec cet algorithme de routage en zone continentale et en zone océanique. On considère donc que chaque avion est connecté à la station la plus proche par le chemin le plus court. Ce "meilleur" chemin est mis à jour toutes les 15 secondes. On considère que la portée maximale des connexions est de 150 km pour la zone continentale, et de 300 km pour la zone océanique.

Pour caractériser la stabilité des connexions, nous nous sommes intéressés à la durée entre deux changements dans la table de routage d'un avion donnée. Il s'agit donc de la durée pendant laquelle un avion donné reste connecté au même avion. Nous avons ainsi regardé ces durées pour l'ensemble des avions pendant une journée de trafic. Le tableau 3.5 présente le moyenne des durées, l'écart-type et le maximum obtenus en zone océanique et en zone continentale.

Scénario	Continentale	Océanique
Moyenne	1' 38s	7' 37s
Ecart-type	2' 16s	9' 37s
Maximum	1h 11' 15s	2h 23' 15s

TABLE 3.5 – Stabilité des connexions

On constate donc que les connexions sont plus stables en zone océanique qu'en zone continentale. Les avions qui empruntent les NAT (North Atlantic Tracks) suivent en effet des routes parallèles. Les avions se suivent ainsi pendant toute la traversée de l'Atlantique, ce qui favorise la stabilité des connexions.

## 3.4.2 Algorithme hiérarchique

### 3.4.2.1 Principe général

Nous avons ensuite implémenté un protocole de routage hiérarchique basé sur des clusters. Nous nous sommes inspirés du protocole CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing).

On utilise donc des clusters. Chaque cluster contient un cluster-head, et chaque avion du réseau est rattaché au cluster-head du cluster auquel il appartient. Lorsqu'un avion veut envoyer des données, il les envoie à son cluster-head. Celui-ci détermine alors la route vers le destinataire en utilisant uniquement des cluster-heads comme nœud intermédiaire. Dans le cas du protocole CGSR, les cluster-heads utilisent le protocole DSDV pour trouver cette route. Une fois la route déterminée, il envoie les données vers le prochain cluster. Une fois le dernier cluster atteint, le cluster-head envoie les données à la destination.

Le principe de cet algorithme est illustré dans la figure 3.9

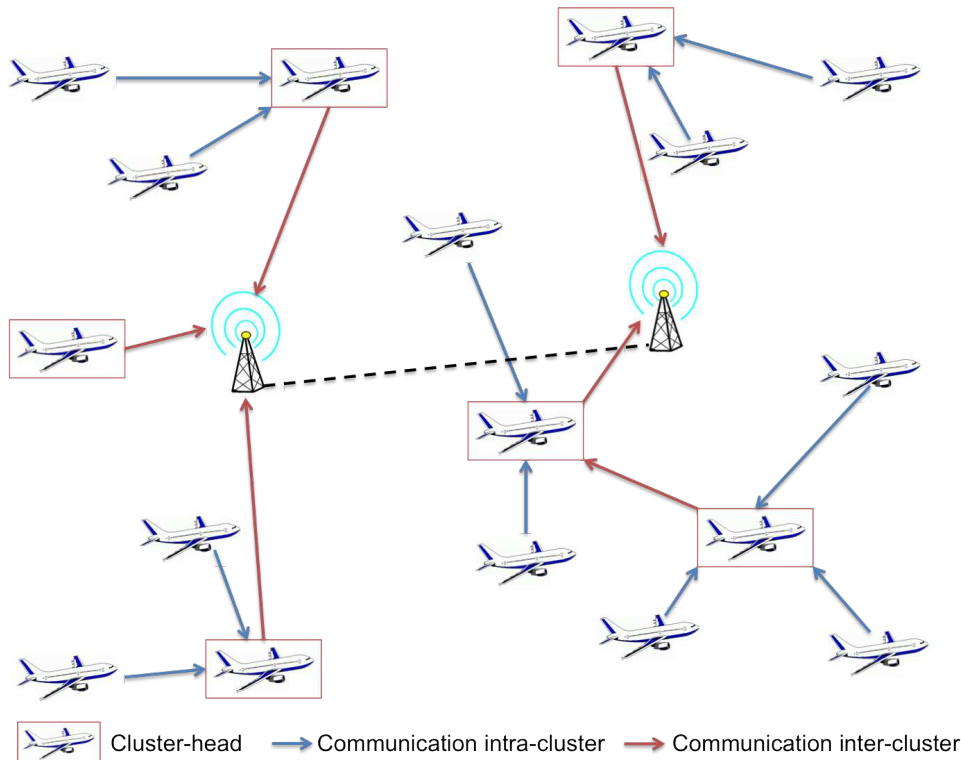


FIGURE 3.9 – Algorithme de routage "cluster"

### 3.4.2.2 Implémentation et paramètres

**Formation des clusters et élection des cluster-heads** La première problématique concerne la formation des clusters et l'élection des cluster-heads. A l'état initial, il n'y a pas de cluster ni de cluster-head. Nous avons choisi de former des clusters par zone géographique.

Pour cela, nous allons parcourir séquentiellement tous les avions. Si l'avion considéré n'appartient pas déjà à un cluster, il devient cluster-head. On considère ensuite une taille de cluster, donnée en paramètre de la simulation. On suppose que tous les avions situés à une distance inférieure à cette taille de cluster rejoignent le cluster de l'avion considéré. On partitionne ainsi le réseau en clusters. On pourra notamment étudier l'influence de la taille des clusters sur les performances du réseau.

**Communications intra-cluster et inter-clusters** Dans le réseau ad hoc aéronautique, on aura donc des communications "intra-cluster" à l'intérieur d'un même cluster, et des communications "inter-clusters" entre les cluster-heads des différents clusters. Nous avons choisi d'utiliser deux bandes de fréquence différentes pour ces communications. Une partie des 20 MHz sera allouée aux communications inter-clusters, le reste aux communications intra-clusters. Dans un premier temps, nous avons choisi de diviser la bande en deux sous-bandes égales de 10 MHz, mais nous pourrions étudier l'influence de cette

répartition.

Pour les communications intra-cluster, on suppose que tous les avions du cluster émettent leurs données vers le cluster-head. On fait l’hypothèse que celui-ci fait un contrôle de puissance parfait à l’intérieur du cluster. On a donc un réseau cellulaire autour de chaque cluster-head. On va alors utiliser une capacité de lien variable pour les communications entre les membres d’un cluster et le cluster-head. Cette capacité sera calculée en fonction du nombre d’avions dans le cluster et de la bande allouée aux communications intra-cluster afin de garantir que tous les avions du cluster puissent communiquer simultanément avec le cluster-head.

Pour les liaisons inter-clusters, on obtient en fait un réseau ad hoc mobile dont les nœuds sont les cluster-heads. Ils communiquent sur une bande de fréquence séparée. Nous allons utiliser l’algorithme de Dijkstra pour trouver le chemin le plus court reliant chaque cluster-head à la station la plus proche.

### 3.5 Modèle de simulation OPNET

Nous avons développé un modèle de simulation des réseaux ad hoc aéronautiques avec le logiciel OPNET Modeler. L’objectif de ce modèle est de pouvoir simuler un réseau ad hoc aéronautique en tenant compte de la position réelle des avions et des stations sol, et de l’ensemble des hypothèses que nous venons de décrire. Le modèle permet donc simuler un nombre quelconque d’avions et de stations.

OPNET Modeler propose des éditeurs multi-niveaux. Tout d’abord, on définit la topologie générale du réseau en plaçant les différents nœuds. Notre modèle se compose finalement de trois types de nœud : les avions, les stations et le manager. La figure 3.10 montre une capture d’écran du modèle sous OPNET. On peut y voir le manager, cinq stations sol ainsi que les avions regroupés dans des "subnet".

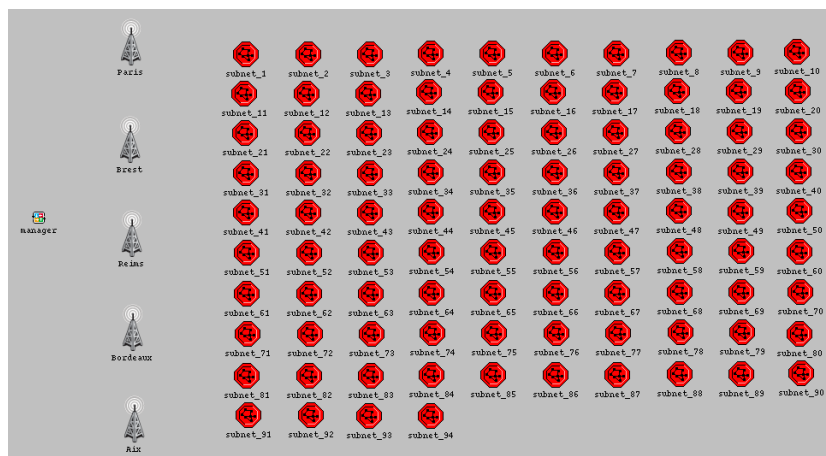


FIGURE 3.10 – Capture d’écran du modèle de simulation OPNET

Le fonctionnement de chaque nœud est ensuite décrit par un ensemble de processus. Pour modéliser les avions par exemple, nous avons utilisé un processus pour chaque couche du modèle OSI, comme illustré dans la figure 3.11. Chaque processus est ensuite décrit par un machine à état, et du code en langage C peut être exécuté dans chaque état pour décrire le fonctionnement du nœud. Nous avons ainsi implémenté la méthode d'estimation des interférences d'accès multiples, les deux méthodes de routage ainsi que les deux protocoles TCP et UDP.

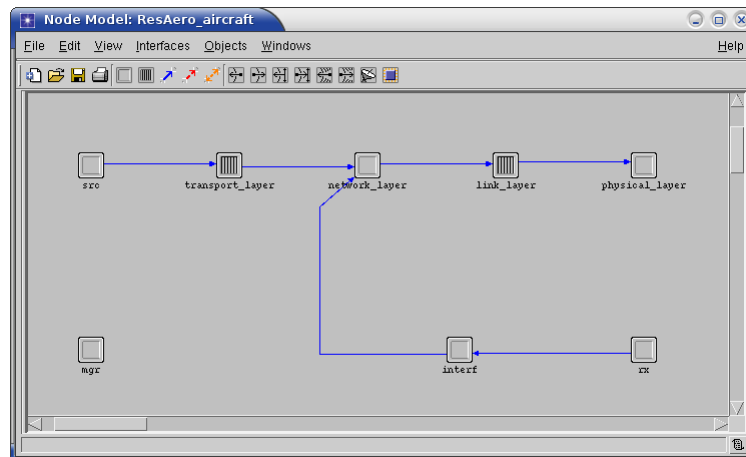


FIGURE 3.11 – Modèle d'un avion

Dans cette thèse, nous n'avons pas souhaité faire d'hypothèse a priori sur les applications possibles ou non avec un réseau ad hoc aéronautique. L'idée est de fournir un moyen de communication entre l'avion et le sol. Ce moyen de communication peut alors être utilisé pour différents types de communications. On peut ainsi envisager des applications pour le contrôle aérien, pour les compagnies ou pour les passagers. Dans notre modèle, nous avons donc implémenté un générateur de trafic paramétrable permettant de générer différents profils de trafic au niveau de chaque avion.

Une description plus détaillée du modèle de simulation est présentée en annexe K.

## 3.6 Méthodologie

Pour étudier les performances du réseau ad hoc aéronautique, nous allons procéder en deux étapes. Dans un premier temps, nous allons faire une étude dans le pire cas, en considérant que tous les avions veulent émettre simultanément et en permanence à destination du sol. L'objectif est donc de "stresser" le réseau au maximum pour déterminer sa capacité maximale dans différents contextes.

Tout d'abord, nous allons utiliser du trafic UDP. Nous avons ainsi développé un générateur de trafic UDP au niveau de chaque avion. Le débit du trafic généré est donné en paramètre de la simulation. On peut choisir la taille des paquets. Elle peut être fixe

ou suivre une distribution donnée. Chaque avion en déduit la durée entre l'envoi de deux paquets successifs, en fonction du débit à générer. Les temps inter-paquets sont ensuite tirés aléatoirement selon une loi exponentielle centrée sur cette valeur. On peut ainsi générer un trafic de plus en plus important, jusqu'à la saturation du réseau. En regardant la quantité de données reçues de chaque avion par le serveur au sol, on en déduit le débit moyen réellement disponible pour chaque avion, en fonction du débit injecté dans le réseau. Cela permet d'avoir une idée rapide de la capacité du réseau.

Ensuite, nous allons étudier les performances du réseau avec du trafic TCP. En utilisant TCP au niveau transport, on ne peut plus imposer à chaque avion de générer un trafic à un débit donné. En effet, l'une des propriétés de TCP est de s'adapter à la capacité du réseau. Tant qu'il n'y a pas de perte, TCP essaye d'utiliser la capacité maximale du canal. En cas de perte, il s'adapte et réduit le débit d'émission des données. De plus, il s'agit d'un mécanisme de transmission fiable. On va donc retransmettre les paquets perdus lorsque l'on ne reçoit pas d'acquittement.

Dans le but de "stresser" le réseau au maximum, nous avons utilisé un modèle de TCP "Greedy". Il s'agit d'une source de trafic gloutonne qui suppose que la couche applicative a toujours des données à envoyer. Notre modèle implémente TCP New Reno. La couche applicative génère donc des données à volonté et le débit d'émission est régulé par TCP.

Les deux générateurs de trafic UDP et TCP sont détaillés en annexe K.5. Les résultats de cette étude, notamment en termes de débits, de délais, de pertes ou encore de fairness entre les différents avions sont présentés dans le chapitre 4 pour la zone continentale et dans le chapitre 5 pour la zone océanique.

Dans un deuxième temps, nous allons étudier les performances du réseau ad hoc aéronautique avec des applications réalistes. Nous considérerons ainsi des applications pour le contrôle aérien, pour les compagnies et pour les passagers en zone continentale et en zone océanique. Les résultats de cette étude sont présentés dans le chapitre 6.

**Résumé du chapitre**

Dans ce chapitre, nous avons proposé une architecture réaliste permettant d'étudier les performances des réseaux ad hoc aéronautiques. Tout d'abord, nous considérons uniquement le réseau ad hoc aéronautique comme un moyen d'accès permettant de joindre le sol. On considère donc uniquement des communications des avions vers le sol. De plus, on suppose que la voie retour, c'est-à-dire du sol vers les avions, est assurée par un système indépendant. Il peut s'agir du même réseau ad hoc sur une autre bande de fréquence, ou d'un satellite.

Pour les liaisons entre avions, nous avons proposé l'utilisation du CDMA. Cette méthode d'accès est basée sur l'étalement de spectre. Elle permet d'avoir plusieurs transmissions simultanées en utilisant des codes différents pour chaque avion du réseau. En revanche, dans le cas des réseaux ad hoc, il n'y a pas d'administration centralisée permettant de synchroniser tous les nœuds. Les codes d'étalement ne seront donc pas parfaitement orthogonaux et il y aura des interférences d'accès multiples (MAI) entre les différents avions.

Ensuite, nous avons proposé un bilan de liaison pour les connexions entre avions afin de déterminer la portée maximale des connexions. Pour cela, nous faisons l'hypothèse de l'utilisation d'antennes omnidirectionnelles afin de réduire le coût du système. Pour une fréquence du signal de 2 GHz, un débit de la connexion de 1 Mbps, une puissance d'émission maximale de 50 W, on obtient une portée maximale d'environ 330 km.

Pour le routage, nous avons proposé deux approches : une approche classique de type "plus court chemin" dans laquelle on considère que chaque avion est connecté à la station la plus proche par le chemin le plus court, et une approche par "cluster" avec des groupes d'avions. Dans chaque groupe, on aura des communications intra-cluster entre les avions et le cluster-head. Puis, on aura des communications inter-cluster entre les cluster-heads.

Enfin, nous avons présenté le modèle de simulation que nous avons développé avec le logiciel OPNET Modeler pour étudier les performances des réseaux ad hoc aéronautiques. Pour cela, nous allons procéder en deux étapes. Dans les chapitres 4 et 5, nous nous placerons dans le pire cas, en supposant que tous les avions veulent émettre simultanément et en permanence à destination du sol, afin d'estimer les capacités maximales du système. Dans le chapitre 6, nous verrons les performances du réseau ad hoc aéronautique avec des applications réalistes.



# Chapitre 4

## Dimensionnement du système en zone continentale

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>99</b>
<b>4.1 Choix des métriques</b> . . . . .	<b>99</b>
4.1.1 Débits . . . . .	99
4.1.2 Délais . . . . .	100
4.1.3 Pertes . . . . .	100
<b>4.2 Méthodologie</b> . . . . .	<b>100</b>
4.2.1 Influence du contrôle de puissance . . . . .	101
4.2.2 Influence de la taille des paquets . . . . .	102
4.2.3 Influence de la portée maximale des connexions . . . . .	102
4.2.4 Influence de la capacité des connexions . . . . .	103
4.2.5 Influence de l'algorithme de routage . . . . .	104
4.2.6 Définition d'un scénario de référence . . . . .	104
<b>4.3 Evaluation des performances avec du trafic UDP</b> . . . . .	<b>105</b>
4.3.1 Performances observées pour le scénario de référence sans inter- férence . . . . .	105
4.3.2 Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	106
4.3.3 Influence du contrôle de puissance . . . . .	109
4.3.4 Influence de la taille des paquets . . . . .	110
4.3.5 Influence de la portée des connexions . . . . .	112
4.3.6 Influence de la capacité des connexions . . . . .	115
4.3.7 Conclusion . . . . .	118
<b>4.4 Evaluation des performances avec du trafic TCP</b> . . . . .	<b>119</b>
4.4.1 Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	119

- 4.4.2 Influence de la taille des paquets . . . . . 121
- 4.4.3 Influence de la portée des connexions . . . . . 122
- 4.4.4 Influence de la capacité des connexions . . . . . 124
- 4.4.5 Utilisation de deux bandes de fréquence . . . . . 126
- 4.4.6 Utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique . . . . . 129
- Résumé du chapitre . . . . . 132**

---

## Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la zone continentale, et en particulier au ciel français. Comme nous l'avons vu dans l'étude de faisabilité, une portée de 150 km est suffisante pour connecter en moyenne plus de 99% des avions entre 6h et 21h. Nous allons donc nous concentrer sur cette partie de la journée et considérer des portées supérieures à 150 km. Tout d'abord, nous présenterons la méthodologie de l'étude. Nous décrirons en particulier les métriques que nous avons choisies, les hypothèses retenues pour le scénario de référence ainsi que les différents paramètres que nous allons étudiés. Ensuite, nous verrons l'évaluation des performances avec du trafic UDP, puis avec du trafic TCP.

### 4.1 Choix des métriques

Pour mesurer les performances du réseau ad hoc aéronautique, nous nous intéressons aux débits, aux délais et aux pertes.

#### 4.1.1 Débits

Dans nos simulations, chaque avion  $i$  envoie des données à destination d'un serveur au sol. On note  $V_{émis}(i)$  le volume de données (en bit) émis par l'avion  $i$  pendant la durée de la simulation. Une partie de ces données sera éventuellement perdue avant d'arriver au serveur, on la note  $V_{pertes}(i)$ . On note  $V_{reçu}(i)$  le volume de données envoyées par l'avion  $i$  et correctement reçu par le serveur au sol. On a donc  $V_{reçu}(i) = V_{émis}(i) - V_{pertes}(i)$ .

On appelle durée de transmission (en s) de l'avion  $i$ , notée  $T_{transmission}(i)$ , la durée entre la réception par le serveur au sol du premier et du dernier paquet émis par l'avion  $i$ . On définit alors le débit utile (en bps) de l'avion  $i$ , noté  $D_{utile}(i)$ , par :

$$D_{utile}(i) = \frac{V_{reçu}(i)}{T_{transmission}(i)} \quad (4.1)$$

On en déduit l'indice de fairness  $I_{fairness}$  permettant de mesurer l'équité des débits utiles entre les différents avions. Il est obtenu par la formule 4.2, où  $n$  représente le nombre d'avions en vol, et  $D_{utile}(i)$  le débit obtenu par l'avion  $i$ .

$$I_{fairness} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n D_{utile}(i)\right)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n (D_{utile}(i))^2} \quad (4.2)$$

Ainsi, lorsque tous les avions obtiennent le même débit, l'indice de fairness vaut 1.

Plus l'indice est faible, moins la répartition des débits est équitable. Dans nos résultats de simulation, nous présenterons différentes statistiques sur les débits utiles des avions en vol pendant la simulation, en particulier la moyenne des débits utiles de l'ensemble des avions, la médiane, l'écart-type, la fairness et la fonction de répartition cumulée, ou CDF (Cumulative Distribution Fonction). Nous étudierons aussi l'évolution de la moyenne des débits utiles en fonction de la distance à la station, c'est-à-dire la moyenne des débits utiles des avions situés à une distance donnée d'une station.

### 4.1.2 Délais

On mesure le délai d'un paquet entre sa date d'émission par l'avion source et sa date de réception par le serveur au sol. Pour les simulations avec du trafic TCP, on peut éventuellement avoir des retransmissions de paquets en cas de détection de perte par le client. Un même paquet peut donc être retransmis plusieurs fois. Dans ce cas, le délai du paquet est mesuré entre la date de sa première émission par l'avion source et la date de sa réception par le serveur sol. On s'intéresse alors au délai moyen des paquets reçus par le serveur, ainsi qu'au délai maximum pour 95% des paquets.

### 4.1.3 Pertes

Dans notre modèle, les pertes de paquets peuvent être causées par les interférences d'accès multiples, ou par un débordement de file d'attente dans les avions intermédiaires entre l'avion  $i$  et le serveur au sol. On a ainsi  $V_{pertes} = \sum_{i=1}^K V_{pertes}(i) = V_{pertes}^{interf} + V_{pertes}^{file}$ , où  $K$  est le nombre d'avions en vol pendant la simulation. On s'intéresse alors au taux de pertes total  $T_{pertes}^{total}$ , au taux de pertes dues aux interférences  $T_{pertes}^{interf}$  et au taux de pertes dues au débordement de file d'attente  $T_{pertes}^{file}$  définis par :

$$T_{pertes}^{total,interf,file} = \frac{V_{pertes}^{total,interf,file}}{V_{emis}} \quad (4.3)$$

Pour les simulations avec du trafic TCP, on pourra également s'intéresser au nombre de retransmissions des paquets reçus par le serveur.

## 4.2 Méthodologie

Nous avons précédemment discuté un certain nombre de paramètres du système. Nous considérons par exemple une bande totale de 20 MHz, une fréquence du signal de 2 GHz, ainsi que cinq stations positionnées sur les cinq CRNA pour l'étude en espace continental. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à cinq autres paramètres importants

du système : la puissance d'émission des avions, la taille maximale des paquets, la portée des connexions, la capacité des connexions, liée au gain d'étalement, et l'algorithme de routage. Nous étudierons l'influence de ces paramètres avec du trafic UDP dans la partie 4.3, puis avec du trafic TCP dans la partie 4.4.

### 4.2.1 Influence du contrôle de puissance

Le premier paramètre auquel nous nous intéressons concerne la puissance d'émission des avions. Nous allons en particulier étudier l'influence du contrôle de puissance. Tout d'abord, nous étudierons les performances du système lorsque tous les avions émettent avec la même puissance. Dans le scénario illustré dans la figure 4.1, la station reçoit des signaux provenant de trois avions situés à des distances différentes. La figure 4.2a montre la puissance de chacun des signaux au niveau du récepteur. Si l'avion 1 est trop proche de la station, les signaux des avions 2 et 3 peuvent être masqués. On dit que l'avion 1 éblouit la station : c'est l'effet near-far.

Pour résoudre ce problème, on peut mettre en place un contrôle de puissance. L'idée est d'adapter la puissance d'émission en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur pour que le récepteur reçoive tous les signaux avec la même puissance, quelque soit la distance de l'émetteur. L'UMTS utilise par exemple un contrôle de puissance en boucle fermée à 1500 Hz. La figure 4.2b montre les puissances reçues au niveau du récepteur lorsqu'on met en place le contrôle de puissance.

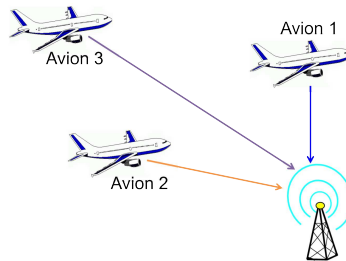


FIGURE 4.1 – Effet near-far

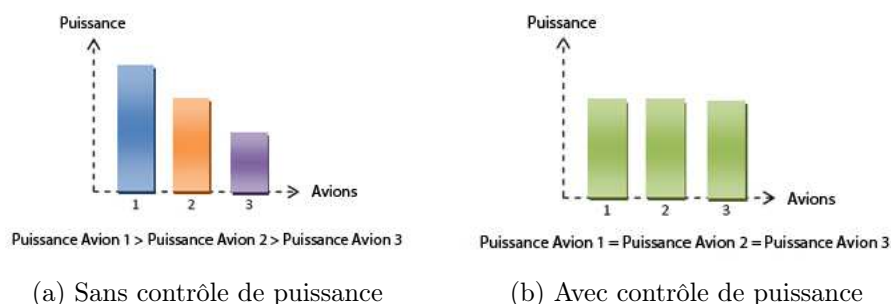


FIGURE 4.2 – Puissance du signal reçu

## 4.2.2 Influence de la taille des paquets

Nous allons ensuite étudier l'influence de la taille maximale des paquets, ou MTU (Maximum Transmission Unit). Dans ce chapitre, nous supposons que tous les paquets envoyés dans le réseau sont de la même taille. Pour générer un trafic à un débit donné, chaque avion peut alors choisir un couple quelconque de valeur (taille des paquets, temps moyen entre l'émission de deux paquets). Sur le protocole Ethernet, la MTU par défaut est par exemple de 1500 octets.

Si on considère une capacité des liaisons donnée, en diminuant la taille des paquets, on diminue le temps nécessaire à sa transmission et à sa réception. La probabilité de collision avec un autre paquet est donc réduite. En revanche, pour générer un débit donné, le nombre de paquets à envoyer est plus important. On risque donc une collision avec un plus grand nombre de paquets. Nous avons donc étudié les performances du système en faisant varier la taille des paquets, avec du trafic UDP et du trafic TCP.

## 4.2.3 Influence de la portée maximale des connexions

En faisant l'hypothèse d'un algorithme de routage de type plus court chemin, la modification de la portée maximale des connexions va changer la topologie du réseau. Si l'on utilise des connexions plus longues, le nombre moyen de sauts nécessaires pour joindre une station va diminuer. De plus, le nombre d'avions directement connectés à une station va augmenter. Nous nous intéressons à la répartition moyenne des avions selon leur distance à la station, en nombre de sauts, en fonction de la portée maximale des connexions. Cette répartition est donnée dans le tableau 4.1, elle est illustrée dans la figure 4.3.

Distance à la station (saut) / Portée (km)	150	200	250	300
1	149	247	364	442
2	210	219	124	54
3	116	30	11	3
4	21	3		
5	2			
6	1			
Total	499	499	499	499

TABLE 4.1 – Répartition des avions selon leur distance à la station (saut)

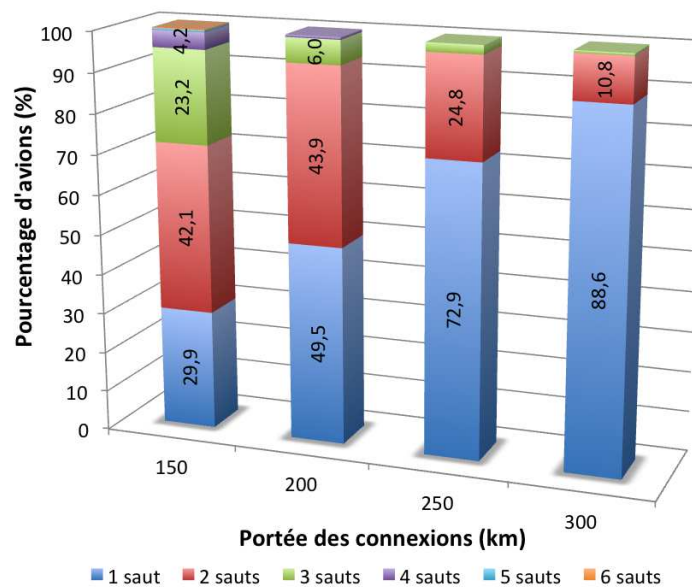


FIGURE 4.3 – Répartition des avions selon leur distance à la station (saut)

Pour une portée maximale de 150 km, les avions sont au maximum à 6 sauts d'une station. Pour une portée de 300 km, ils sont au maximum à 3 sauts. De plus 88,6% d'entre eux sont alors directement connectés à une station. On risque d'avoir un problème de congestion autour des stations.

#### 4.2.4 Influence de la capacité des connexions

Nous allons aussi étudier l'influence de la capacité des connexions. On ne modifiera pas la bande occupée par le système de 20 MHz. On agit donc directement sur le gain d'étalement. Pour l'instant, nous n'avons pas fait d'hypothèse sur la forme d'onde utilisée dans le système. Pour simplifier l'étude, nous allons donc négliger le facteur de roll-off. Nous allons supposer que la fréquence du code d'étalement est de 20 Mcps, et que ce signal occupe la bande de 20 MHz.

Le choix du gain d'étalement est un point essentiel dans la conception de tous les systèmes basés sur le CDMA. En effet, si l'on diminue le gain d'étalement, on augmente la capacité des connexions. Pour une taille de paquet fixée, on transmet donc les paquets plus rapidement. On diminue de ce fait la probabilité de collisions pendant la réception d'un paquet. En revanche, le gain d'étalement étant plus faible, le système devient moins résistant aux interférences. La probabilité de récupérer un paquet en cas de collision est plus faible. On peut faire un raisonnement analogue lorsqu'on augmente le gain d'étalement en diminuant la capacité des connexions.

Il existe donc a priori un gain d'étalement optimal, qui dépend de l'application envisagée.

### 4.2.5 Influence de l'algorithme de routage

Enfin, nous allons étudier l'influence de l'algorithme de routage en remplaçant l'algorithme de type plus court chemin par l'algorithme de routage hiérarchique basé sur des clusters. Nous étudierons en particulier l'influence de la taille des clusters, du gain d'étalement et de la répartition des fréquences entre les communications inter-clusters et les communications intra-clusters.

En faisant varier la taille des clusters, on change le nombre de clusters dans le réseau. On modifie donc le nombre de cluster-heads et le nombre d'avions par cluster. La figure 4.4 montre l'évolution du nombre de clusters dans le réseau en fonction de la taille des clusters. Pour une taille de cluster de 100 km, on a en moyenne 68 clusters, soit environ 7 avions par cluster, contre 33 pour une taille de cluster de 300 km.

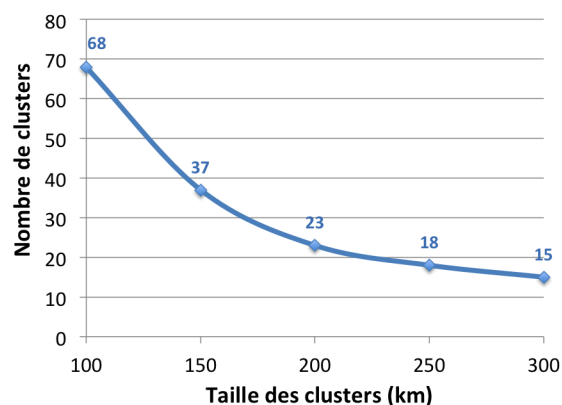


FIGURE 4.4 – Nombre de clusters, influence de la taille des clusters

### 4.2.6 Définition d'un scénario de référence

Nous allons ainsi étudier l'influence de ces différents paramètres sur les performances du système en termes de débits, de délais et de pertes. Pour cela, nous avons défini un scénario de référence dans lequel nous avons fait des hypothèses de départ pour chacun de ces cinq paramètres. Ce scénario va nous permettre de tester le modèle et d'avoir une première idée des performances du système. Le tableau 4.2 résume les paramètres du système pour le scénario de référence. Ensuite, nous étudierons successivement l'influence des différents paramètres pour ne faire varier qu'un paramètre à la fois.

Puissance d'émission	Maximale
Taille des paquets	1500 octets
Portée des connexions	150 km
Capacité des connexions	1000 kbps
Algorithme de routage	Plus court chemin

TABLE 4.2 – Hypothèses pour le scénario de référence

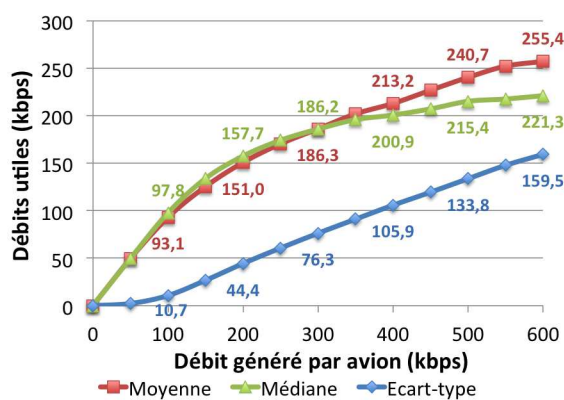
## 4.3 Evaluation des performances avec du trafic UDP

### 4.3.1 Performances observées pour le scénario de référence sans interférence

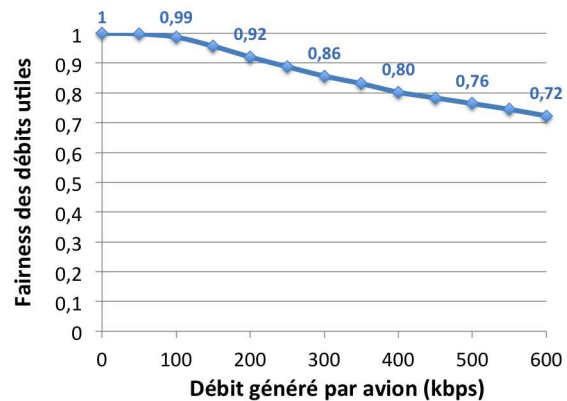
#### 4.3.1.1 Résultats de simulation

On considère ici le scénario de référence. Dans un premier temps, nous avons menés des simulations sans interférence. Les pertes de paquets sont alors uniquement dues au débordement de file d'attente. Cela nous permet d'avoir une borne supérieure pour les débits utiles dans le cas idéal sans interférence entre les différents avions.

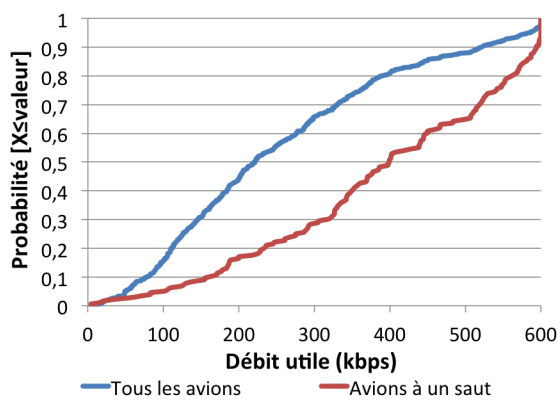
La figure 4.5 montre les statistiques sur les débits utiles, la figure 4.6 sur les délais et les pertes.



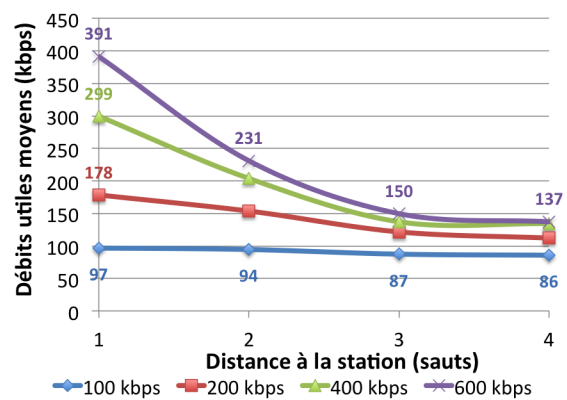
(a) Moyenne, médiane, écart-type



(b) Fairness



(c) CDF, débit généré = 600 kbps



(d) Moyenne en fonction de la distance à la station, pour différents débits générés

FIGURE 4.5 – Statistiques sur les débits, scénario de référence sans interférence

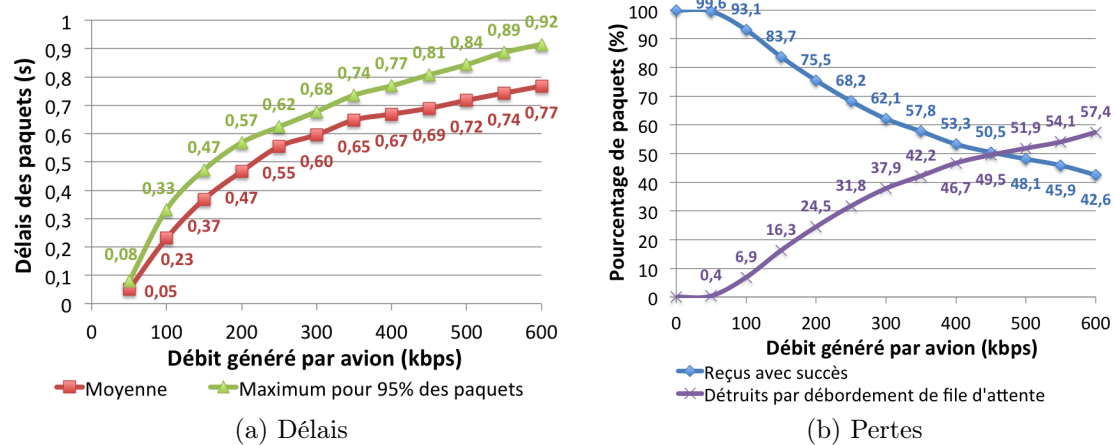


FIGURE 4.6 – Statistiques sur les délais et les pertes, scénario de référence sans interférence

#### 4.3.1.2 Analyse des résultats

On constate donc qu'en augmentant le débit généré par avion jusqu'à 600 kbps, on arrive à atteindre un débit utile d'environ 255 kbps par avion (figure 4.5a). On a alors plus de 50% de paquets perdus (figure 4.6b). Nous ne sommes donc pas allés au delà. De plus, on remarque que plus le débit généré par avion est élevé, plus l'équité entre les différents avions diminue (figure 4.5b). Les débits utiles dépendent en particulier de la distance entre l'avion et la station. Ainsi, pour un débit généré moyen de 100 kbps, les avions à une distance supérieure ou égale à 4 sauts d'une station ont un débit utile de 86 kbps en moyenne. Pour un débit généré de 600 kbps, ils ont alors seulement 137 kbps en moyenne (figure 4.5d).

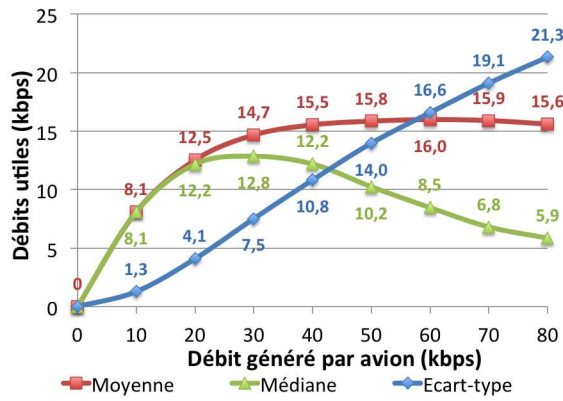
### 4.3.2 Performances observées pour le scénario de référence

#### 4.3.2.1 Résultats de simulation

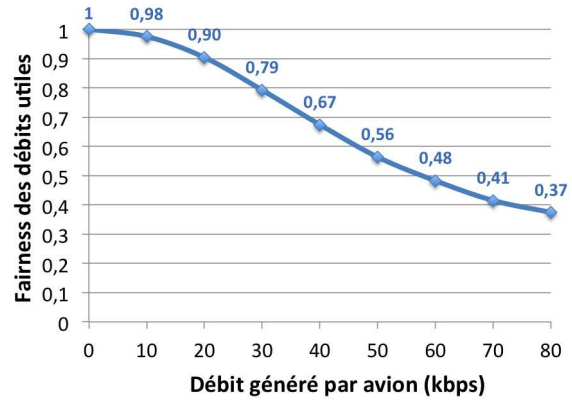
On considère ici le scénario de référence avec du trafic UDP. On suppose que chaque avion génère un trafic à un débit donné à destination du sol. Dans nos simulations, on fait varier ce débit jusqu'à la saturation du réseau et on observe les performances du système en termes de débits, de délais et de pertes.

La figure 4.7 montre différentes statistiques sur les débits reçus par le serveur : évolution de la moyenne, de la médiane, de l'écart-type, de la fairness en fonction du débit généré par avion, ainsi que la répartition de ces débits et l'évolution du débit moyen des avions en fonction de leur distance à la station, en nombre de sauts, pour un trafic généré de 50 kbps. La figure 4.8 montre les statistiques sur les délais et les pertes.

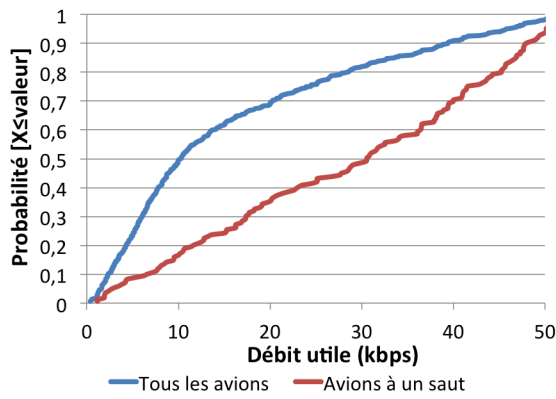
### 4.3. Evaluation des performances avec du trafic UDP



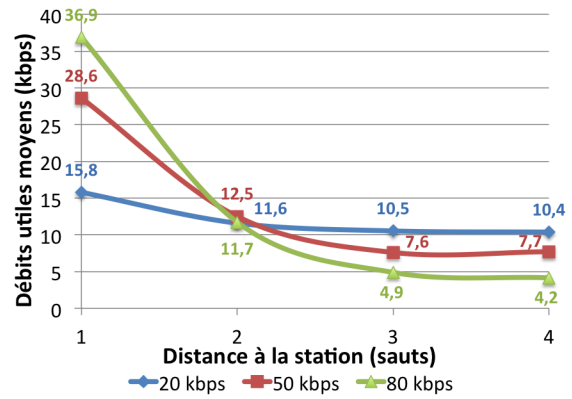
(a) Moyenne, médiane et écart-type



(b) Fairness

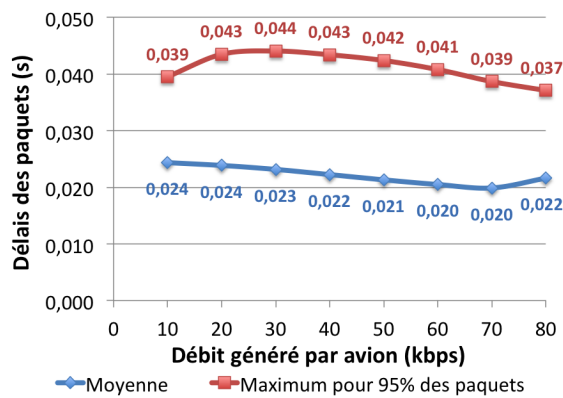


(c) CDF, débit généré = 50 kbps

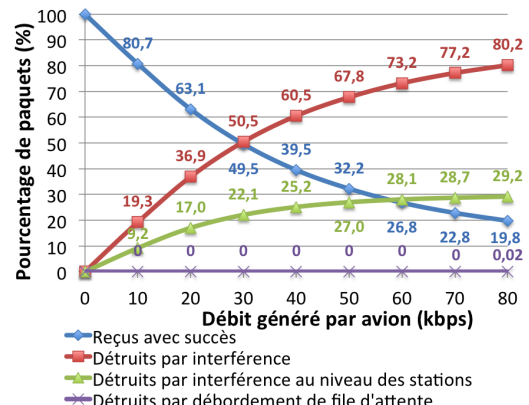


(d) Moyenne en fonction de la distance à la station, pour différents débits générés

FIGURE 4.7 – Statistiques sur les débits, scénario de référence UDP



(a) Délais



(b) Pertes

FIGURE 4.8 – Statistiques sur les délais et les pertes, scénario de référence UDP

### 4.3.2.2 Analyse des résultats

On constate que les performances du système sont limitées par les interférences. En effet, pour un débit généré de 80 kbps par avion, plus de 80% des paquets envoyés par les avions sont détruits à cause des interférences (figure 4.8b). Les pertes dues au débordement de file d'attente dans les routeurs intermédiaires sont quant à elles quasiment nulles (figure 4.8b). En augmentant le débit généré par chaque avion de 10 à 80 kbps, on constate que le débit effectivement reçu par le serveur, ou débit utile, n'excède pas 16 kbps en moyenne par avion (figure 4.7a).

De plus, on constate un problème d'équité entre les avions. En effet, l'écart-type des débits utiles augmente avec le débit généré (figure 4.7a). C'est d'ailleurs confirmé par la courbe de fairness qui diminue lorsque le débit généré augmente (figure 4.7b). Plus le débit généré par chaque avion est élevé, moins la répartition des débits reçus par le serveur est homogène entre les différents avions du réseau. Pour un débit généré de 50 kbps par avion, le débit utile moyen est 15,8 kbps par avion (figure 4.7a), mais on constate que la moitié des avions a un débit utile inférieur à 10 kbps (figure 4.7c).

En étudiant plus précisément les débits utiles des différents avions, il s'avère que le débit utile d'un avion donné est fortement lié à la distance de cet avion à la station, en nombre de sauts. Pour une portée maximale des connexions de 150 km, sur les 499 avions en vol pendant la durée de la simulation, on a 149 avions directement connectés à une station, donc à un saut d'une station, 210 avions à deux sauts, 116 avions à trois sauts et 24 avions à quatre sauts ou plus au début de la simulation. Nous reviendrons sur cette répartition dans l'étude de l'influence de la portée des connexions dans la partie 4.3.5. La figure 4.7d montre l'évolution du débit utile moyen des avions en fonction de leur distance à la station au début de la simulation, toujours pour un débit généré de 50 kbps. On constate que les avions directement connectés à une station ont un débit utile de 28,6 kbps en moyenne, contre 7,9 kbps pour les avions à quatre sauts ou plus.

Si on s'intéresse uniquement aux avions directement connectés à une station, on constate que l'écart-type des débits utiles est élevé. Nous avons là-aussi un problème d'équité, même parmi les avions connectés à une même station (figure 4.7c). Certains avions ont un débit plus important que d'autres. En fait, ce problème est dû au fait que tous les avions émettent avec la même puissance. La puissance reçue par la station est donc uniquement fonction de la distance entre l'avion et la station. Plus un avion est proche de la station, plus la puissance de son signal au niveau de la station est élevée, et donc moins il est sensible aux interférences. Les avions proches de la station ont donc un débit utile plus élevé que les avions lointains. Nous allons donc maintenant étudier l'influence du contrôle de puissance.

### 4.3.3 Influence du contrôle de puissance

#### 4.3.3.1 Résultats de simulation

La figure 4.9 montre les statistiques sur les débits obtenus avec le contrôle de puissance. La figure 4.10 montre les statistiques sur les délais et les pertes.

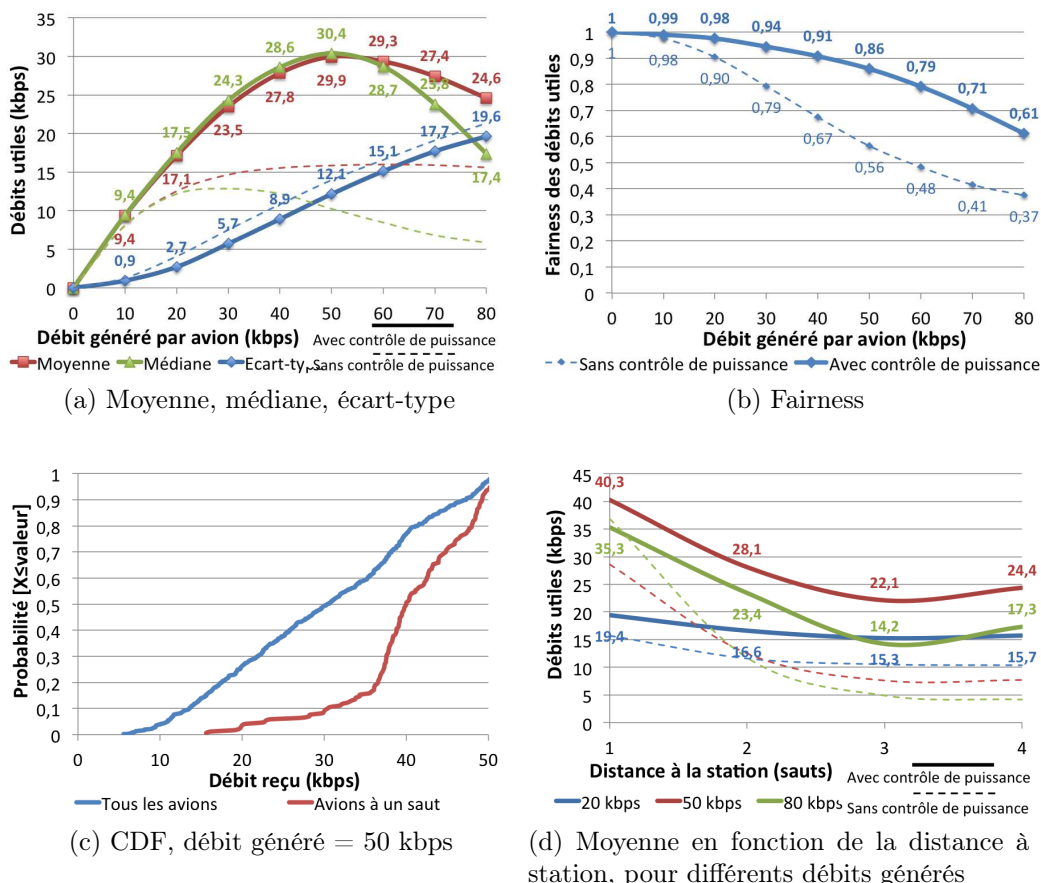


FIGURE 4.9 – Statistiques sur les débits, influence du contrôle de puissance

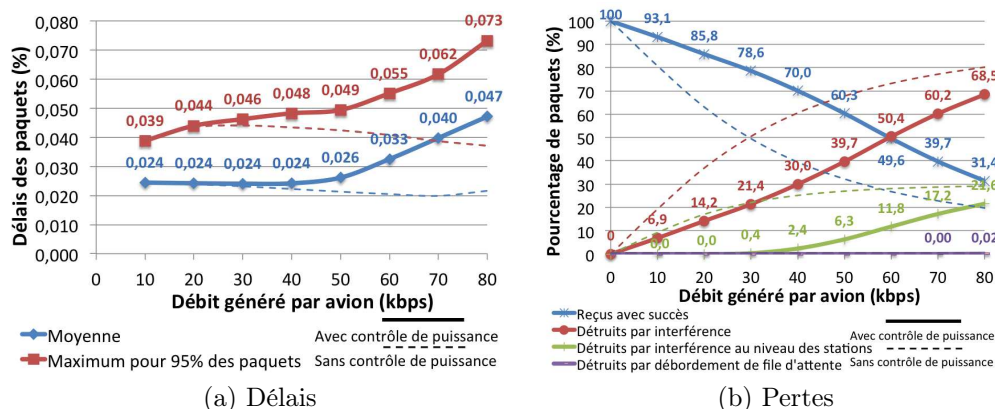


FIGURE 4.10 – Statistiques sur les délais et les pertes, influence du contrôle de puissance

### 4.3.3.2 Analyse des résultats

On constate que l'utilisation du contrôle de puissance améliore significativement les performances du système. Les débits utiles moyens sont doublés par rapport au scénario de référence (figure 4.9a). L'utilisation maximale du réseau est obtenue lorsque tous les avions génèrent 50 kbps, le serveur reçoit alors un débit d'environ 30 kbps en moyenne par avion (figure 4.9a). De plus, on constate que la répartition des débits utiles entre les différents avions est meilleure. La fairness est améliorée quelque soit la charge du réseau (figure 4.9b).

Pour un débit généré de 50 kbps par avion, la proportion d'avions ayant un débit utile inférieur à 10 kbps chute à moins de 4%, contre près de 50% dans le scénario de référence (figure 4.9c). On constate là-aussi une dépendance des débits utiles avec la distance à la station. Les avions directement connectés à la station ont par exemple un débit moyen de 40,3 kbps, contre 29,9 kbps en moyenne pour l'ensemble des avions (figure 4.9d). Par contre, la répartition des débits entre eux est meilleure puisque plus de 90% d'entre eux ont un débit utile supérieur à 30 kbps (figure 4.9c). Le délai moyen des paquets effectivement reçus par le serveur au sol est de 26 ms, et le délai maximum pour 95% des paquets de 49 ms (figure 4.10a).

### 4.3.4 Influence de la taille des paquets

#### 4.3.4.1 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'influence de la taille des paquets. Nous avons donc réalisé des simulations en faisant varier la taille des paquets de 200 à 1500 octets, toujours pour générer un trafic de 10 à 80 kbps par avion. Pour chaque simulation, tous les paquets envoyés sont de la même taille. La figure 4.11 montre les statistiques sur les débits, la figure 4.12 sur les délais et la figure 4.13 sur les pertes.

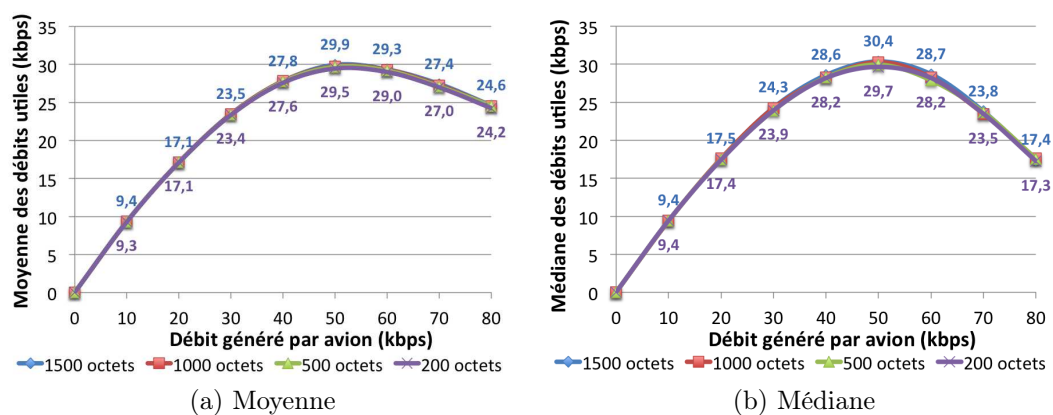


FIGURE 4.11 – Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets UDP

### 4.3. Evaluation des performances avec du trafic UDP

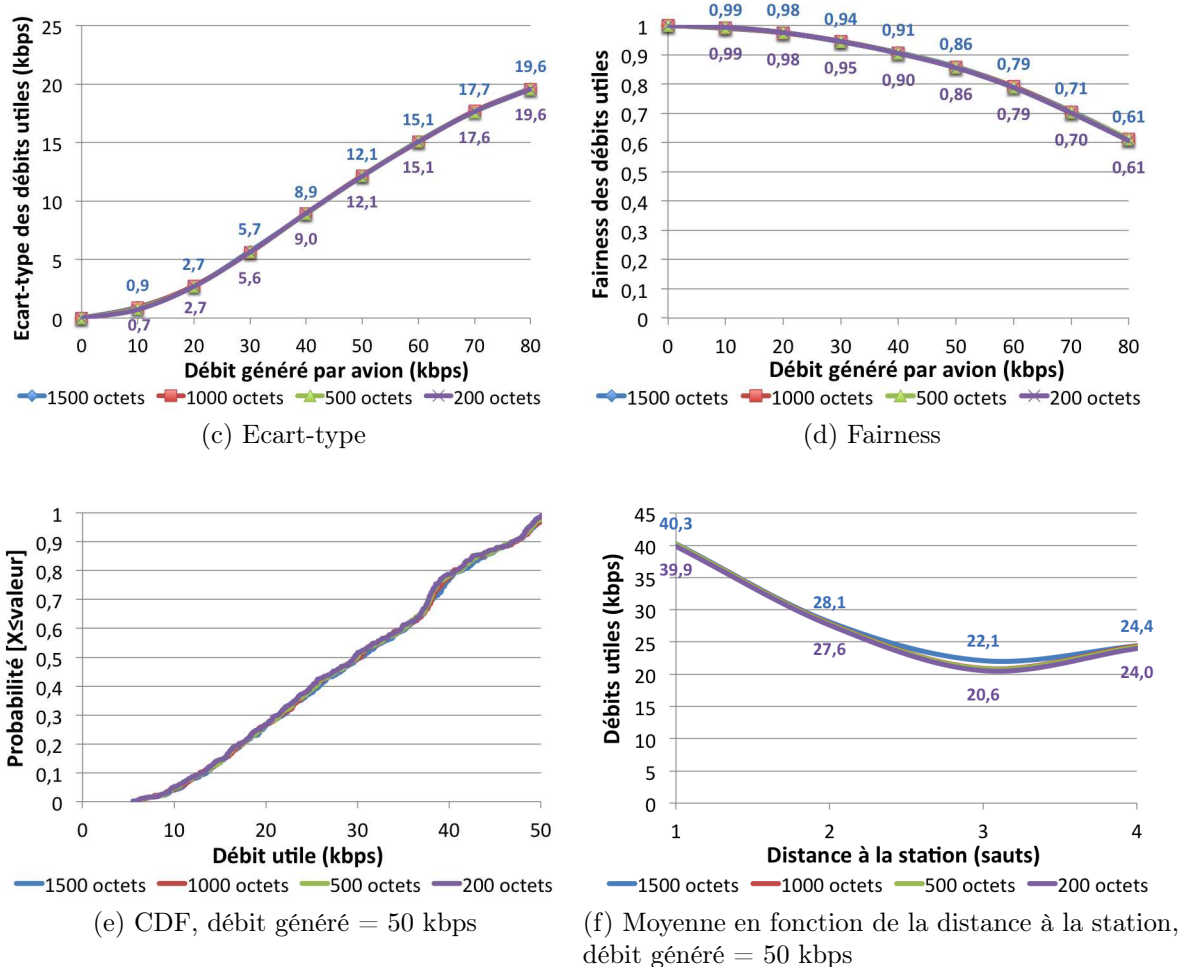


FIGURE 4.11 – Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets UDP

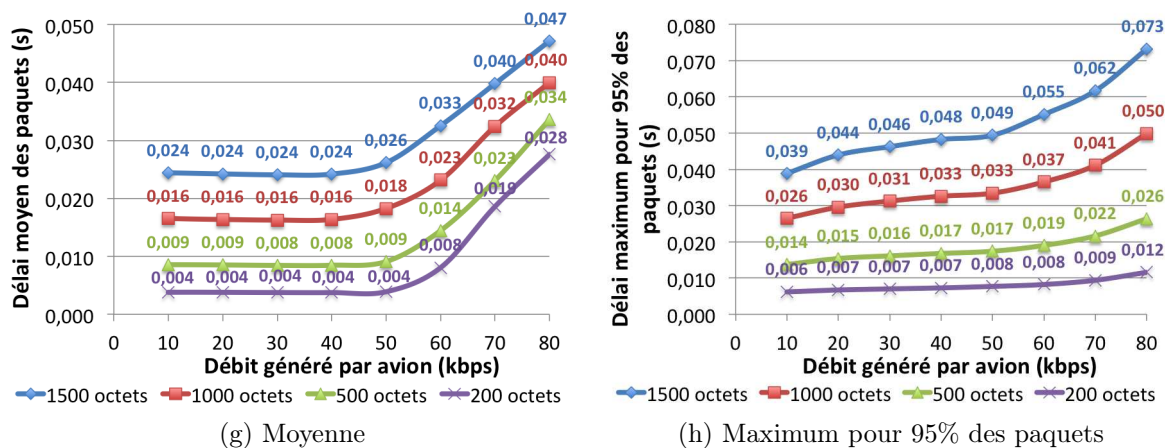


FIGURE 4.12 – Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets

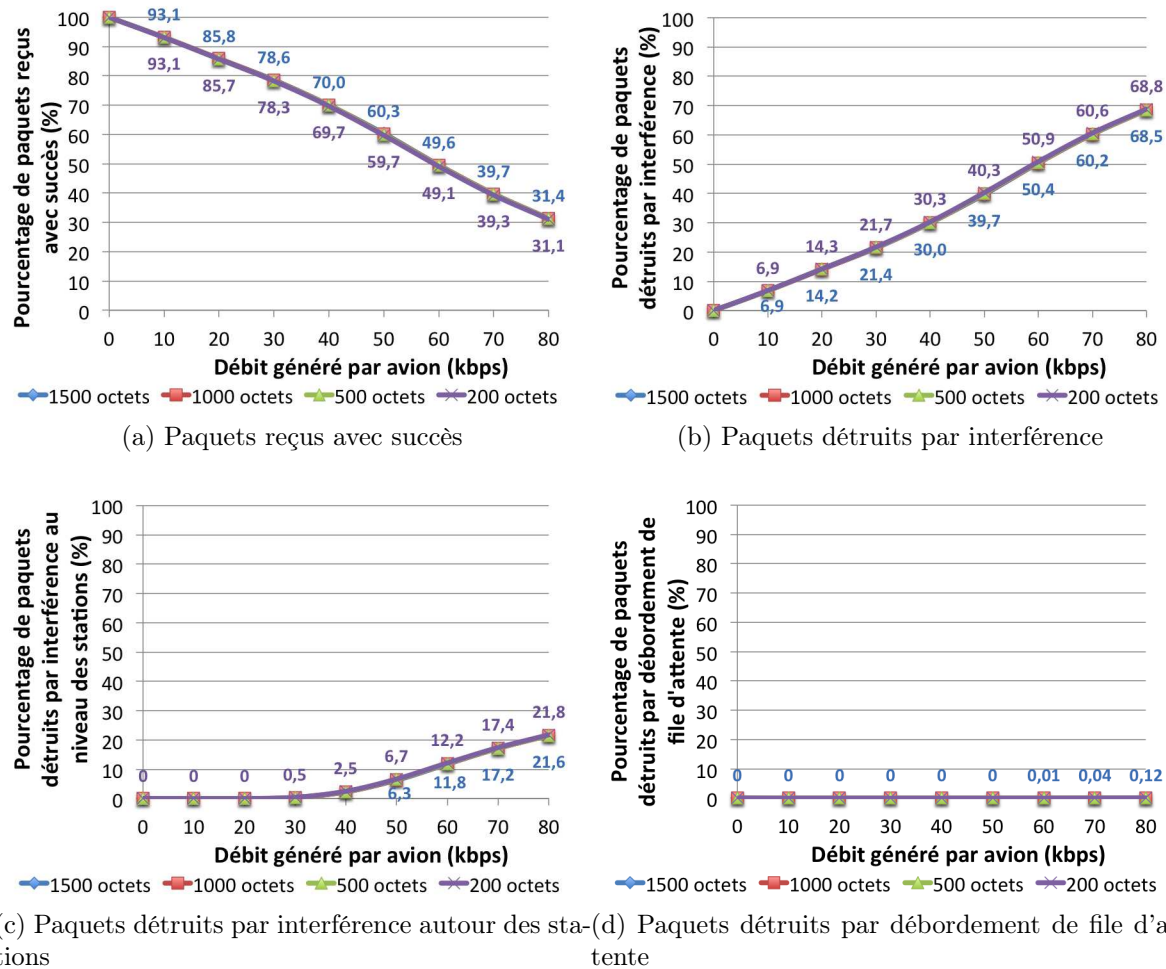


FIGURE 4.13 – Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets UDP

#### 4.3.4.2 Analyse des résultats

Dans ce scénario avec du trafic UDP, on constate donc que la taille des paquets n'a pas d'influence significative sur les performances du système en terme de débits (figure 4.11) et de pertes (figure 4.13). Seul le délai des paquets est impacté (figure 4.12). En effet, la capacité des liens étant fixée, plus un paquet est court, plus il est émis rapidement. Cependant, pour un même volume de données à transmettre, il faudra plus de paquets. Dans la suite de l'étude, on considèrera donc des paquets de 1500 octets.

### 4.3.5 Influence de la portée des connexions

#### 4.3.5.1 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'influence de la portée des connexions. Comme nous l'avons déjà dit, nous considérons uniquement des portées supérieures ou égales à 150 km pour garantir une bonne connectivité du réseau. D'après le bilan de

liaison, on peut envisager des connexions à 1 Mbps jusqu'à une portée de 337 km. Nous avons donc mené une campagne de simulations avec des portées de 150 à 300 km. Les statistiques sur les débits, les délais et les pertes sont présentées respectivement dans les figures 4.14, 4.15 et 4.16.

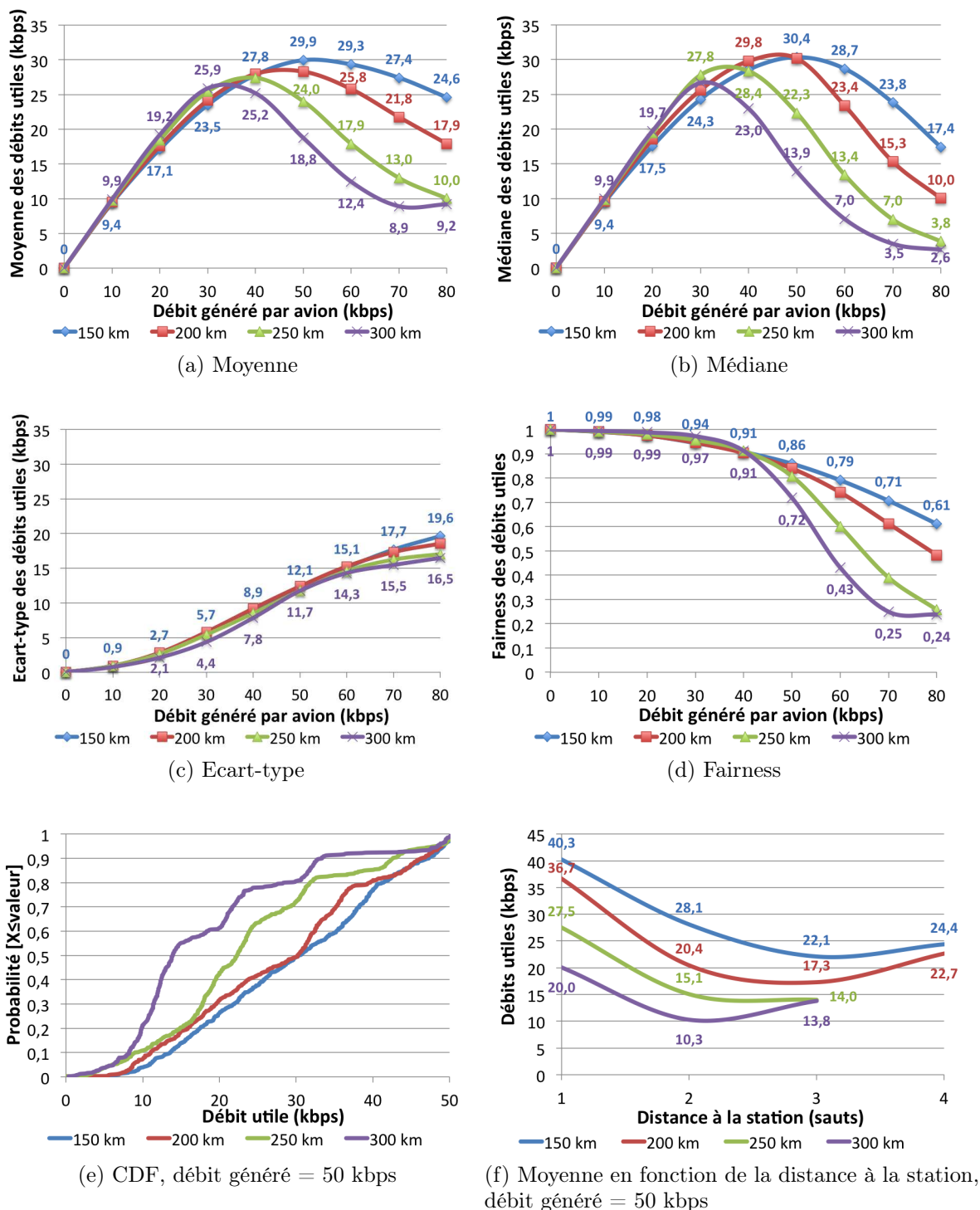


FIGURE 4.14 – Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions

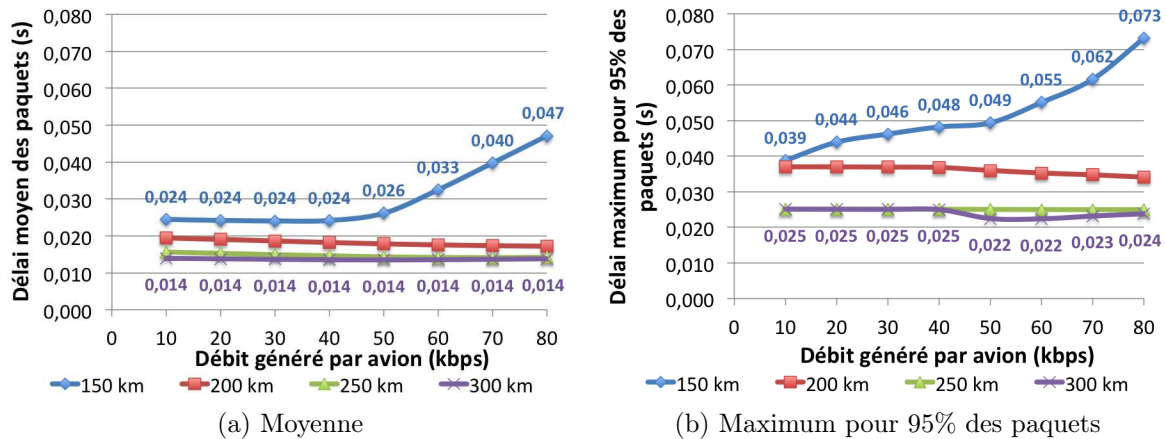


FIGURE 4.15 – Statistiques sur les délais, influence de la portée des connexions

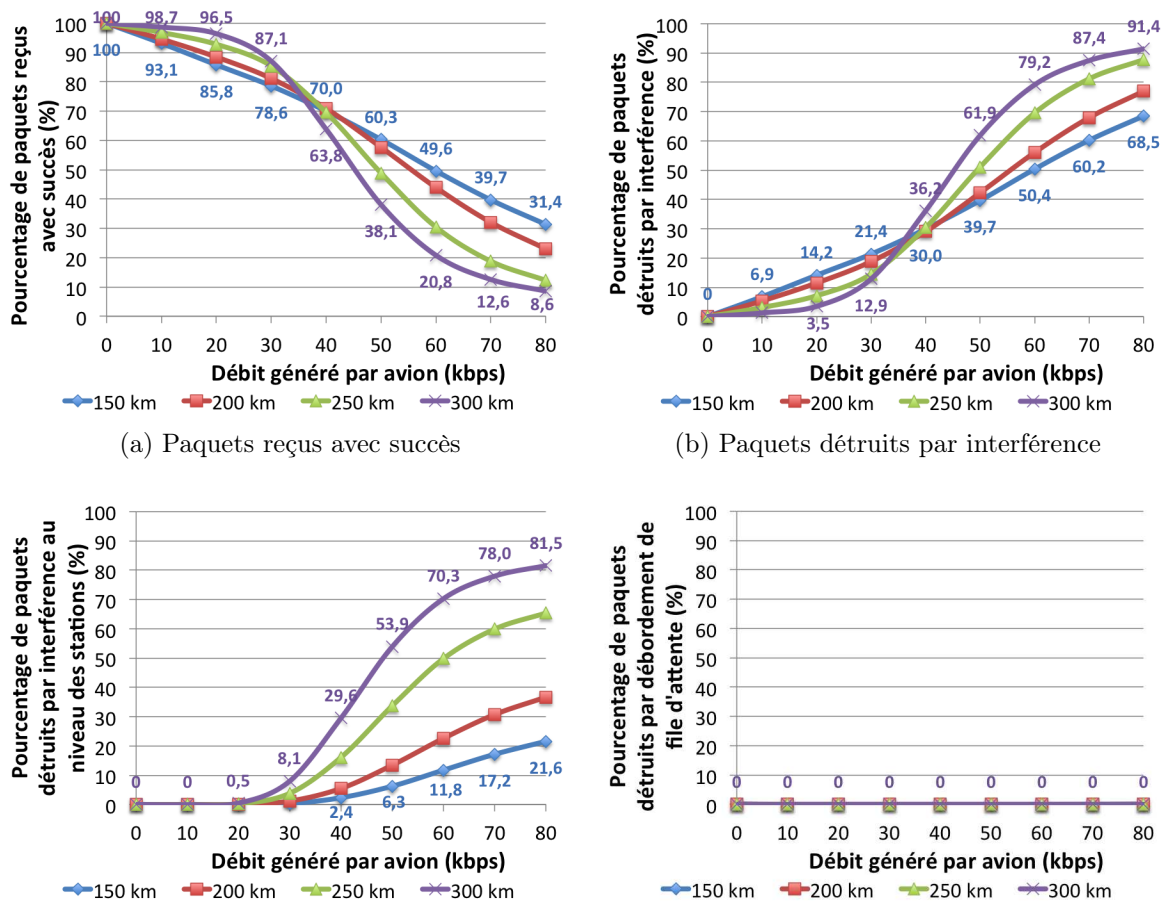


FIGURE 4.16 – Statistiques sur les pertes, influence de la portée des connexions

### 4.3.5.2 Analyse des résultats

Dans les résultats précédents, on peut observer que, pour un trafic généré par avion inférieur à 30 kbps, c'est-à-dire une charge du réseau relativement faible, la portée maximale des connexions n'a pas beaucoup d'influence sur les performances du réseau. Les débits utiles obtenus par chaque avion présentent des caractéristiques similaires en termes de moyenne, de médiane, d'écart-type et de fairness (figure 4.14). Concernant les délais, plus la portée augmente, plus le nombre de sauts pour joindre la station diminue. On peut donc s'attendre à des délais plus faibles avec des connexions plus longues. Pour un débit généré de 30 kbps par avion, le délai maximum pour 95% des paquets est de 25 ms avec une portée maximale de 300 km, contre 46 ms pour une portée de 150 km (figure 4.15), ce qui reste acceptable.

Pour un débit généré par avion supérieur à 30 kbps, le réseau arrive à saturation. En augmentant le débit généré par avion, le pourcentage de paquets détruits à cause des interférences augmente significativement (figure 4.16). On observe que le débit utile moyen se stabilise puis diminue (figure 4.14). On a alors un comportement différent selon la portée maximale des connexions. Les meilleures performances à forte charge sont obtenues pour une portée de 150 km. En effet, en augmentant la portée maximale des connexions, on augmente le nombre d'avions directement connectés à la station. Cette dernière est donc saturée plus rapidement lorsqu'on augmente le trafic généré par chaque avion. Elle n'est alors plus capable de recevoir correctement la plupart des paquets qui lui sont envoyés, comme on peut le voir sur la figure 4.16c.

Pour la suite de l'étude en zone continentale, on va donc considérer une portée maximale des connexions de 150 km.

## 4.3.6 Influence de la capacité des connexions

### 4.3.6.1 Résultats de simulation

Jusqu'ici, nous avons considéré une capacité de 1 Mbps pour les connexions, soit un gain d'étalement de 20 puisque le débit du code d'étalement est de 20 Mcps. Nous allons maintenant étudier l'influence du gain d'étalement sur les performances du système. Pour cela, nous allons uniquement faire varier la capacité des connexions. On ne modifie pas la bande occupée par le système. Nous avons donc réalisé plusieurs simulations en faisant varier la capacité des liens de 200 à 2000 kbps. La figure 4.17 montre les statistiques sur les débits, la figure 4.18 sur les délais et la figure 4.19 sur les pertes.

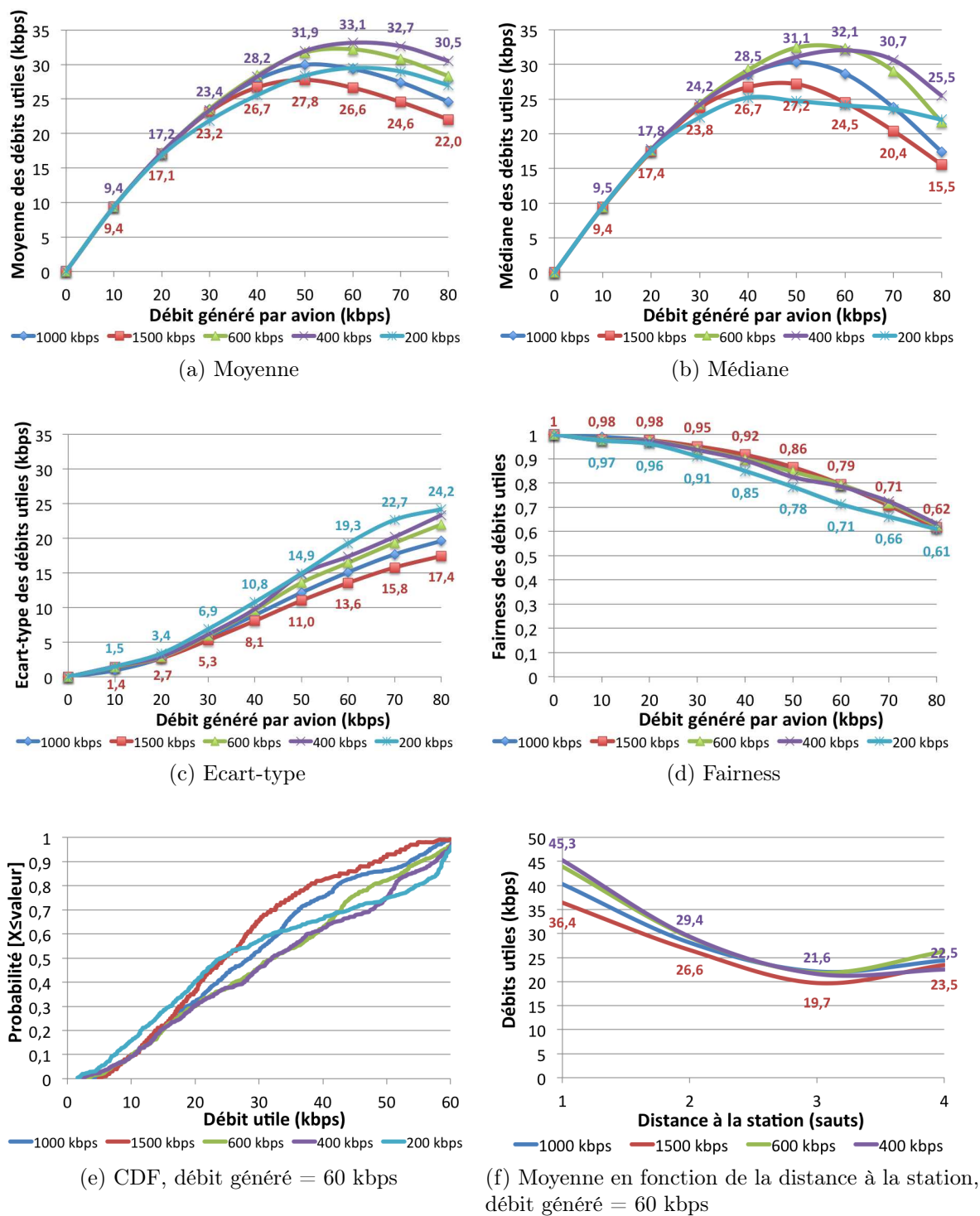


FIGURE 4.17 – Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement

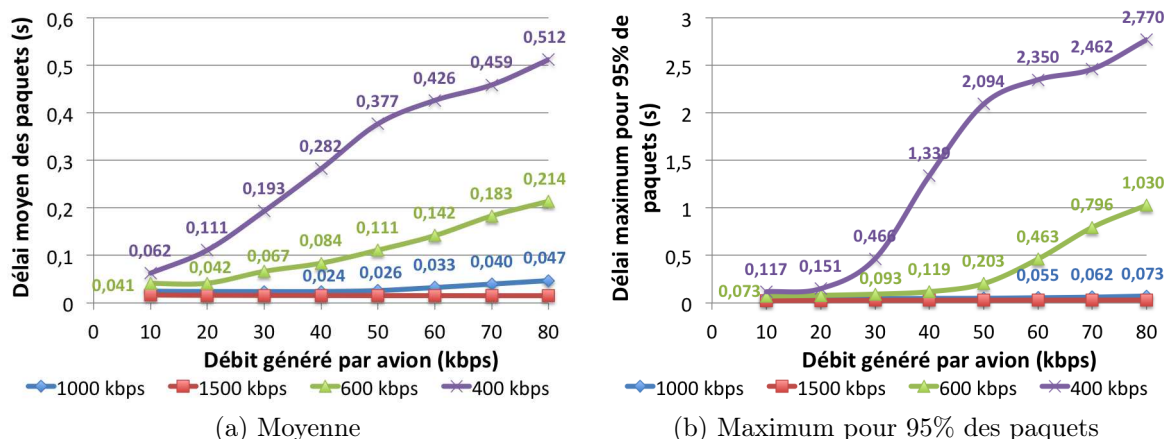


FIGURE 4.18 – Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement

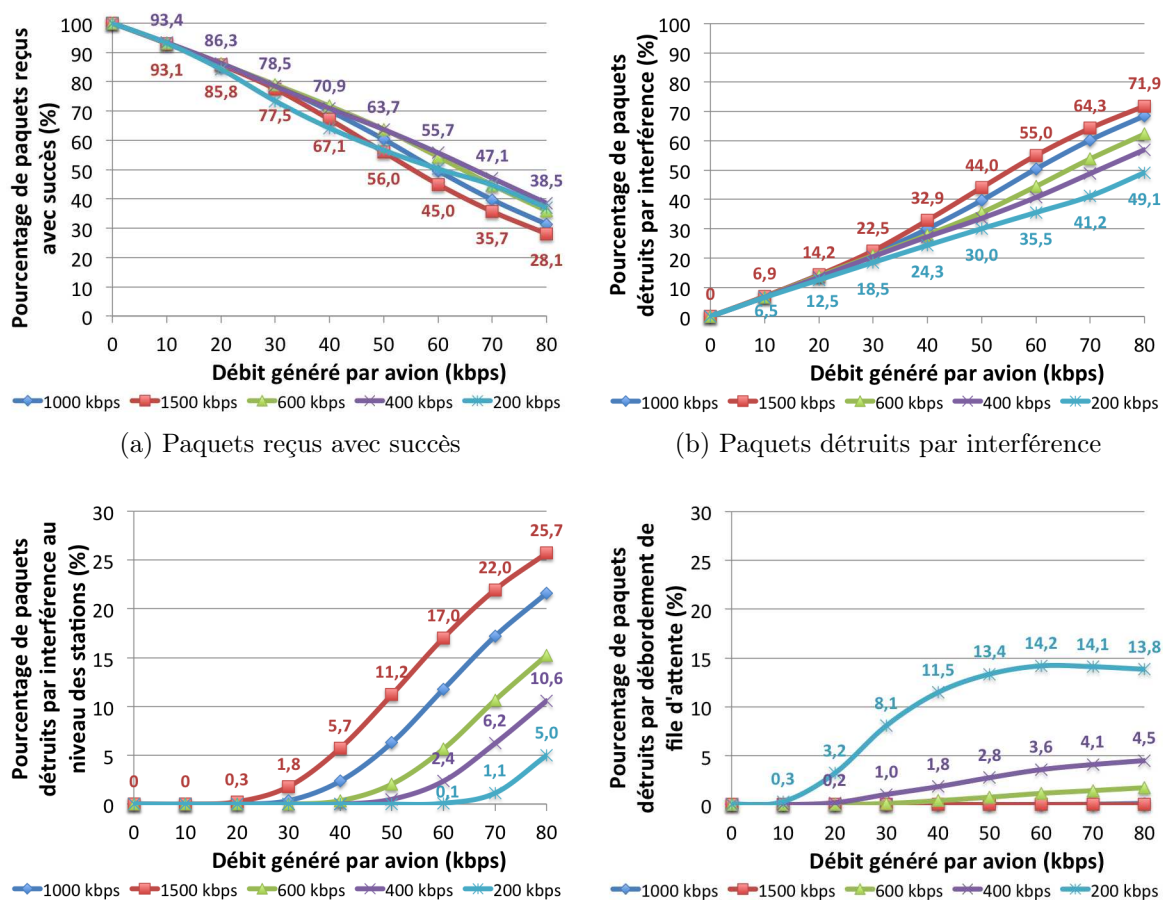


FIGURE 4.19 – Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement

#### 4.3.6.2 Analyse des résultats

Dans la figure 4.19b, on constate bien que plus le gain d'étalement est élevé, c'est-à-dire plus la capacité des liaisons est faible, plus le système est résistant aux interférences. En effet, pour un débit généré de 60 kbps par avion, 35,5% des paquets envoyés sont détruits à cause des interférences avec des connexions à 200 kbps, soit un gain d'étalement de 100, contre 55% avec des connexions à 1500 kbps, soit un gain d'étalement de 13.

Par contre, en augmentant le gain d'étalement, on diminue la capacité de lien. Il faut donc plus de temps pour transmettre un paquet de taille donnée. Les files d'attente dans les routeurs intermédiaires vont donc se vider plus lentement. On augmente donc le risque de congestion. Dans la figure 4.19d, on peut voir que pour un débit généré par avion de 60 kbps, 14,2% des paquets émis sont perdus à cause d'un débordement de file d'attente avec des connexions à 200 kbps. Avec une capacité des connexions de 1500 kbps, il n'y a pas de débordement de file d'attente dans le réseau.

Il existe donc un gain d'étalement optimal qui minimise l'ensemble des pertes, et donc qui maximise les débits utiles moyens. D'après la figure 4.17a, la capacité optimale des connexions est de 400 kbps, ce qui correspond à un gain d'étalement de 50.

De plus, lorsque le gain d'étalement augmente, le délai des paquets augmente puisqu'il faut plus de temps pour les émettre. Pour un débit généré de 60 kbps, on a par exemple un délai moyen des paquets de 33 ms avec des connexions à 1000 kbps, contre 426 ms avec des connexions à 400 kbps (figure 4.18a). Le délai maximum pour 95% des paquets passe de 55 ms à 2,35 s (figure 4.18b), ce qui peut être problématique pour certaines applications.

#### 4.3.7 Conclusion

Ces premières simulations nous ont donc permis de déterminer la capacité maximale du réseau dans le pire cas où tous les avions émettent simultanément. Avec des connexions entre avions offrant une capacité maximale de 400 kbps, on obtient alors un débit utile d'environ 33 kbps par avion. Nous avons aussi mis en évidence un taux de pertes de paquets élevé. Or, parmi les différentes applications envisageables pour un tel système, certaines vont nécessiter une fiabilité garantie de bout en bout. Dans la suite de l'étude, nous allons donc utiliser le protocole TCP au niveau transport.

## 4.4 Evaluation des performances avec du trafic TCP

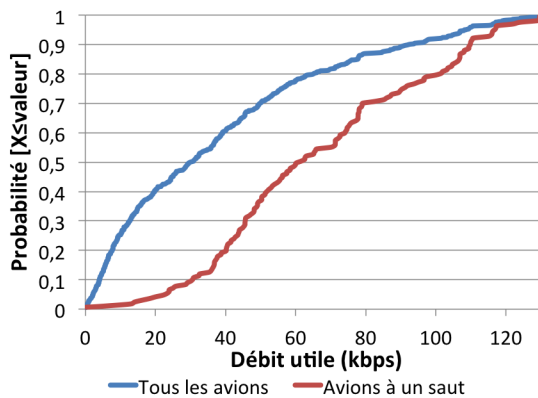
### 4.4.1 Performances observées pour le scénario de référence

#### 4.4.1.1 Résultats de simulation

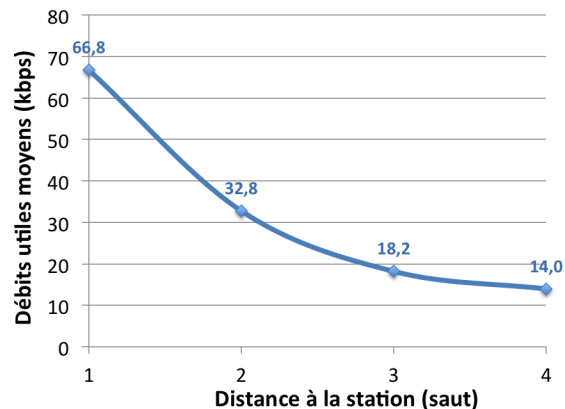
On considère ici le scénario de référence avec le contrôle de puissance. On utilise le générateur de trafic "TCP Greedy" au niveau de chaque avion. Dans ce cas, on suppose que chaque avion a toujours des données à envoyer. Le débit d'émission des données de chaque avion est ensuite régulé par TCP pour s'adapter à la capacité du réseau. On ne peut donc plus fixer le débit généré par chaque avion. On regarde ensuite la quantité de données provenant de chaque avion qui est effectivement reçue par le serveur au sol pour en déduire le débit utile moyen pour chaque avion. La figure 4.20 montre les statistiques sur les débits obtenus, la figure 4.21 sur les délais et la figure 4.22 sur les pertes et les retransmissions des paquets.

Moyenne (kbps)	38,3
Médiane (kbps)	30,2
Ecart-type (kbps)	33,5
Fairness	0,57

(a) Moyenne, médiane, écart-type et fairness



(b) CDF



(c) Moyenne en fonction de la distance

FIGURE 4.20 – Statistiques sur les débits, scénario de référence TCP

Moyenne (s)	0,401
Maximum pour 95% des paquets (s)	0,551

FIGURE 4.21 – Statistiques sur les délais, scénario de référence TCP

Pourcentage de paquets reçus avec succès (%)	94,17
Pourcentage de paquets détruits par interférences (%)	5,83
Pourcentage de paquets détruits par interférences au niveau des stations (%)	2,94
Pourcentage de paquets détruits par débordement de file d'attente (%)	0,00

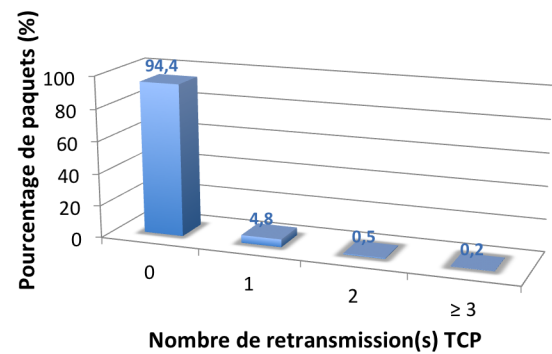


FIGURE 4.22 – Statistiques sur les pertes, scénario de référence TCP

#### 4.4.1.2 Analyse des résultats

Pour le scénario de référence avec contrôle de puissance, on obtient un débit utile moyen de 38,3 kbps par avion avec du trafic "TCP Greedy" (figure 4.20a). Dans le même contexte, on avait obtenu un débit moyen maximal de 30,4 kbps avec le trafic UDP. On a donc une amélioration de 25% des débits utiles moyens par avion. L'une des propriétés de TCP est de s'adapter en cas de congestion en diminuant le débit d'émission. Les performances du réseau en sont ici globalement améliorées.

Par contre, la répartition des débits entre les différents avions est moins bonne. Le coefficient de fairness est plus faible qu'avec du trafic UDP (figure 4.20a). On remarque aussi que la dépendance entre le débit utile d'un avion et sa distance à la station est plus marquée (figure 4.20c). En effet, la probabilité qu'un paquet soit perdu augmente avec le nombre de sauts pour rejoindre la station. Les agents TCP des avions lointains vont donc subir plus de pertes que ceux des avions proches, et donc réduire d'autant plus leur débit d'émission.

Au niveau des délais, on constate que les délais moyens et maximum pour 95% des paquets sont plus importants qu'avec du trafic UDP (figure 4.21). En effet, les débits utiles par avion sont plus élevés donc le réseau est plus chargé. Le taux de remplissage des files d'attente dans les routeurs intermédiaires augmente. Un paquet met donc plus de temps pour traverser le réseau. De plus, TCP est un protocole fiable. Lorsqu'un paquet est perdu, il ne va pas être acquitté par le serveur au sol. La perte va alors être détectée et le paquet va être retransmis. Dans nos statistiques, le délai d'un paquet est calculé entre sa première émission et sa réception par le serveur.

Dans la figure 4.22, on constate que le taux de paquets perdus est beaucoup plus faible qu'avec du trafic UDP. Les ressources sont donc mieux utilisées. On constate par exemple que plus de 94% des paquets envoyés arrivent au serveur sans avoir besoin d'être retransmis. Avec du trafic UDP, on était à environ 60% pour un trafic généré de 50 kbps par avion, et les paquets perdus n'étaient alors pas retransmis.

## 4.4.2 Influence de la taille des paquets

### 4.4.2.1 Résultats de simulation

Dans la partie 4.3.4, nous avons vu que la taille des paquets n'avait pas beaucoup d'influence sur les performances du système avec du trafic UDP. Nous allons maintenant voir si ces conclusions peuvent être étendues à du trafic TCP ou non.

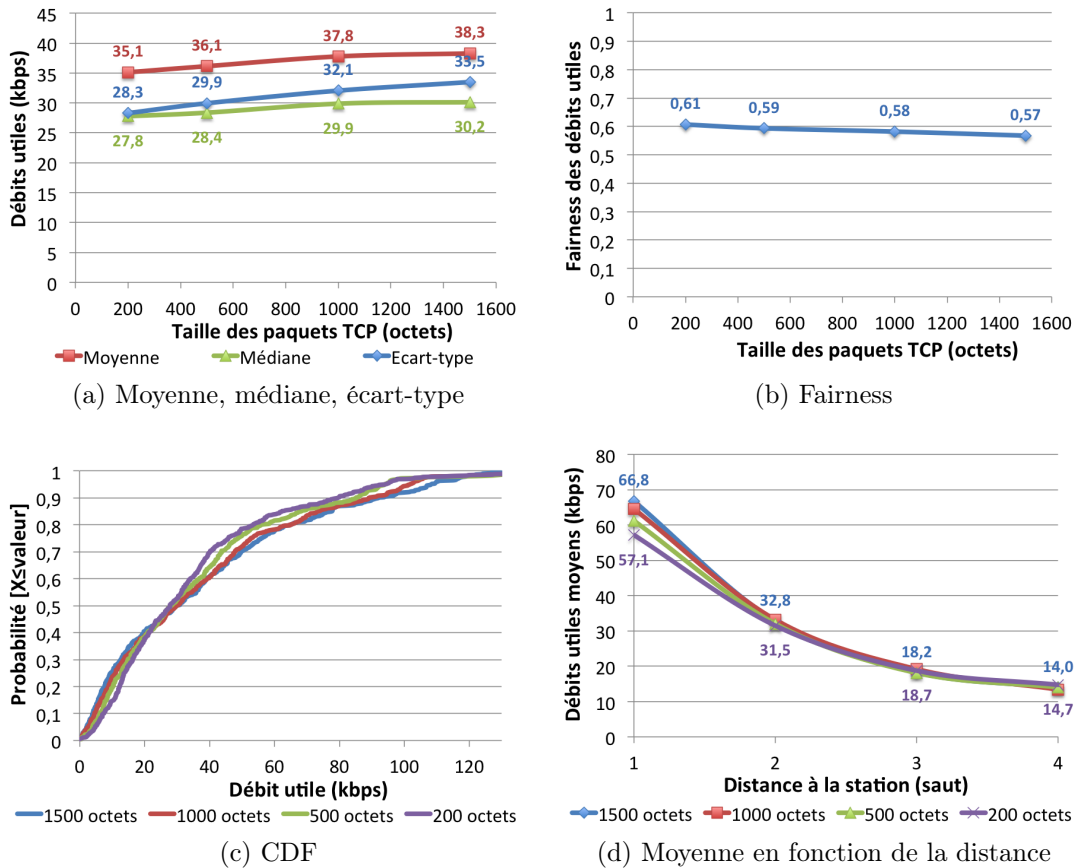


FIGURE 4.23 – Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets TCP

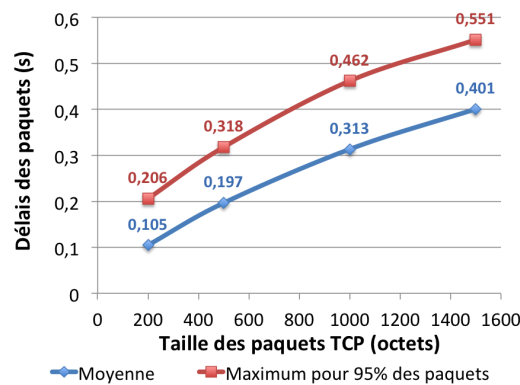


FIGURE 4.24 – Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets TCP

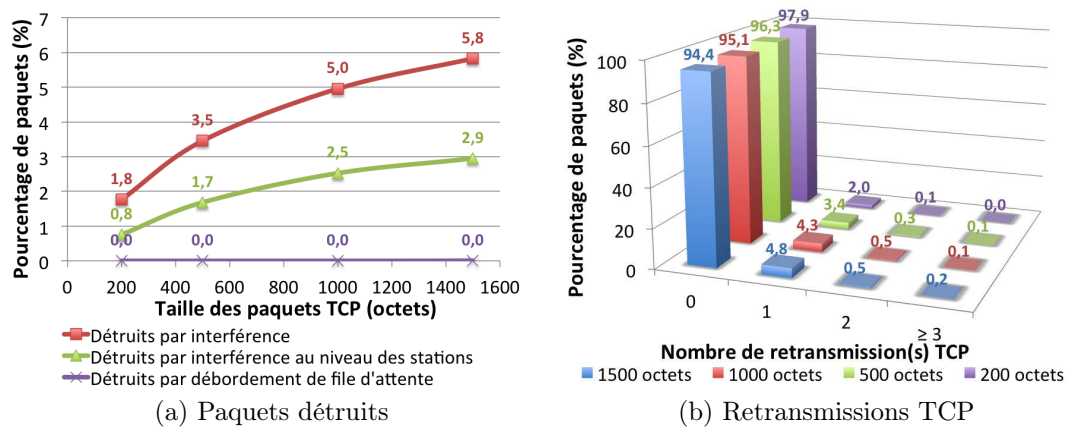


FIGURE 4.25 – Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets TCP

#### 4.4.2.2 Analyse des résultats

Au niveau des délais, comme dans le cas du trafic UDP, on constate que les délais diminuent avec la taille des paquets puisqu'il faut alors moins de temps pour les transmettre (figure 4.24). Par contre, on constate que la taille des paquets a plus d'influence sur le débit utile moyen que dans le cas du trafic UDP. Pour des paquets de 200 octets, on a un débit moyen de 35,1 kbps par avion, contre 38,3 kbps dans le scénario de référence avec des paquets de 1500 octets (figure 4.23), soit un écart d'environ 10%. La fairness quant à elle varie peu (figure 4.23b). L'utilisation de paquets de grande taille améliore donc globalement la capacité du système. Pour la suite de l'étude, on va donc considérer des paquets de 1500 octets.

#### 4.4.3 Influence de la portée des connexions

##### 4.4.3.1 Résultats de simulation

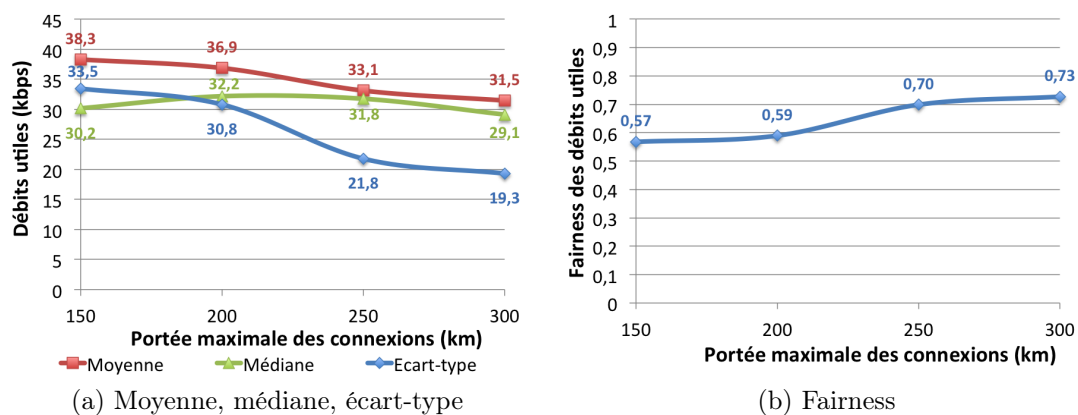


FIGURE 4.26 – Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions

#### 4.4. Evaluation des performances avec du trafic TCP

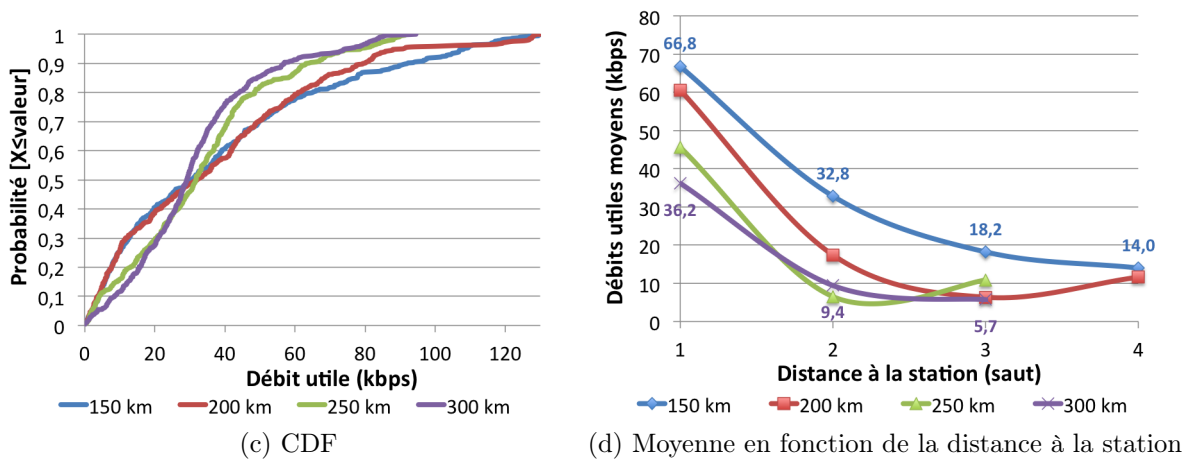


FIGURE 4.26 – Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions

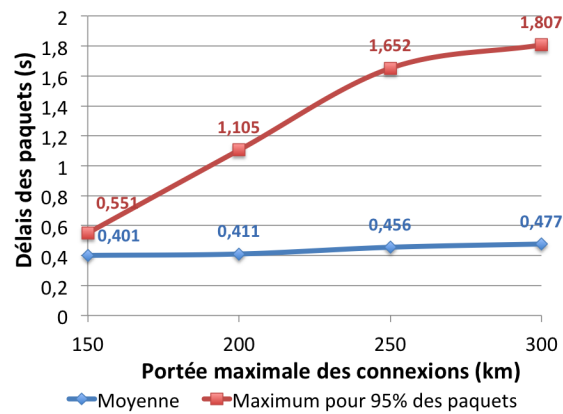


FIGURE 4.27 – Statistiques sur les délais, influence de la portée des connexions

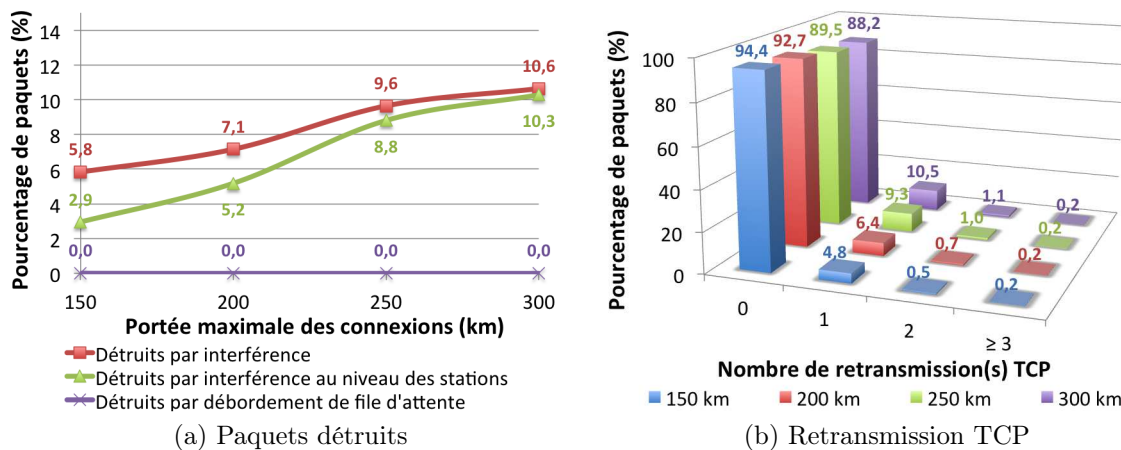


FIGURE 4.28 – Statistiques sur les pertes, influence de la portée des connexions

### 4.4.3.2 Analyse des résultats

Comme dans la partie 4.3.5, on constate qu'une portée de 150 km permet de maximiser le débit utile moyen par avion. On obtient 38,3 kbps, contre 31,5 kbps avec une portée de 300 km (figure 4.26a). En augmentant la portée maximale des connexions, on augmente le nombre d'avions directement connectés à la station. Celle-ci est donc saturée plus rapidement. Dans la figure 4.28a, on peut voir que le pourcentage de paquets détruits à cause des interférences au niveau des stations passe de moins de 3% pour une portée de 150 km à plus de 10% pour une portée de 300 km. En étudiant le nombre de retransmissions TCP des paquets reçus par le serveur au sol, illustré dans la figure 4.28b, on voit plus la portée augmente, plus le nombre de retransmissions moyen des paquets augmente. Cela explique aussi que les délais augmentent aussi lorsque la portée augmente, contrairement à ce que l'on avait observé avec du trafic UDP. Pour la suite de l'étude, nous allons donc considérer une portée maximale des connexions de 150 km.

## 4.4.4 Influence de la capacité des connexions

### 4.4.4.1 Résultats de simulation

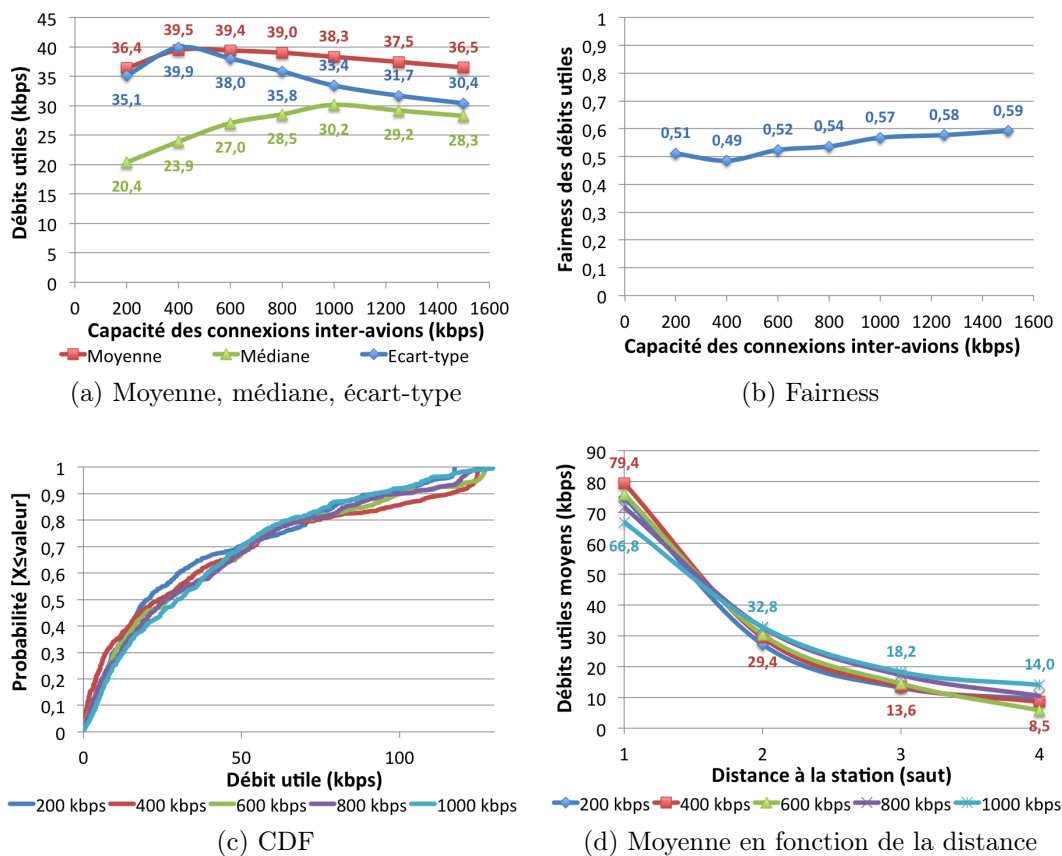


FIGURE 4.29 – Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement

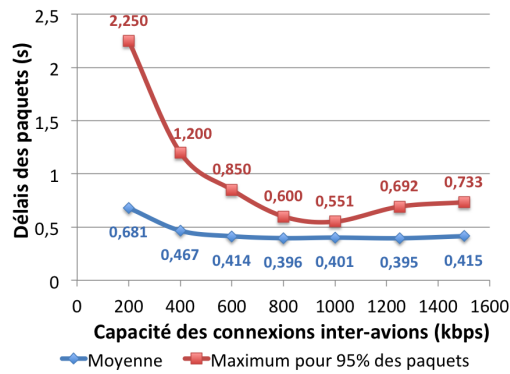


FIGURE 4.30 – Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement

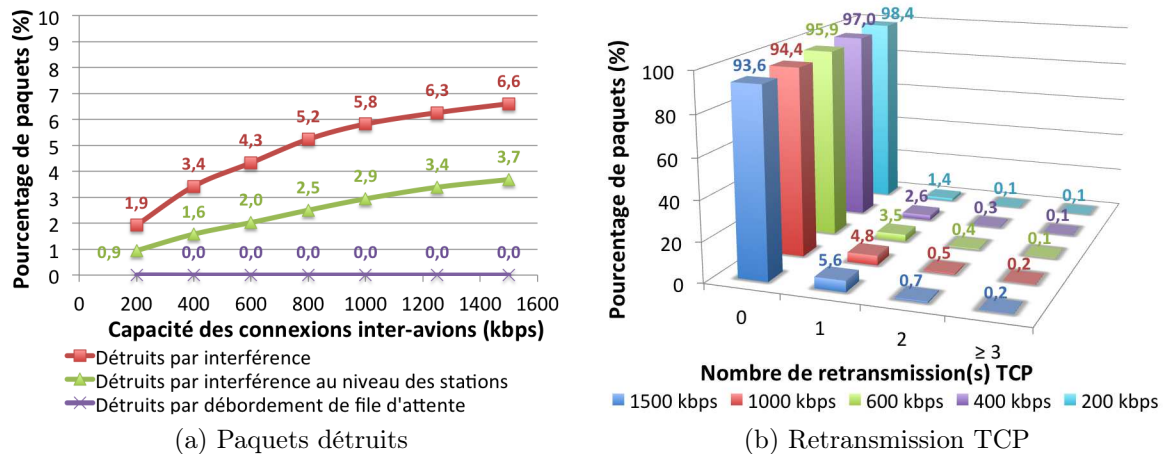


FIGURE 4.31 – Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement

#### 4.4.4.2 Analyse des résultats

Comme dans la partie 4.3.6 avec du trafic UDP, on constate qu'un gain d'étalement de 50, correspondant à une capacité des connexions de 400 kbps, permet de maximiser le débit utile moyen par avion. On obtient alors 39,5 kbps en moyenne par avion (figure 4.29). Par contre, on constate là-aussi que les délais augmentent fortement lorsque la capacité des connexions diminue. Dans la figure 4.30, on constate que le délai moyen des paquets passe de 401 ms dans le scénario de référence à plus de 680 ms avec des connexions à 200 kbps. Le délai maximum pour 95% des paquets passe lui de 551 ms à plus de 2,25 s. Le choix du gain d'étalement est donc un compromis. Il doit être adapté en fonction des exigences des applications.

## 4.4.5 Utilisation de deux bandes de fréquence

### 4.4.5.1 Présentation du scénario

Dans ce chapitre, nous avons voulu stresser le réseau au maximum pour en découvrir ses limites. En générant simultanément du trafic depuis tous les avions en vol à destination du sol, on crée de la congestion au niveau des stations. En effet, on a une topologie de réseau en étoile autour des stations. Plus on se rapproche des stations, plus le trafic est important puisqu'on agrège le trafic de tous les avions plus éloignés. Les liaisons autour des stations sont donc les plus chargées. Ce sont elles qui subissent le plus de pertes à cause des interférences, comme le montre par exemple la figure 4.31a.

C'est pourquoi nous proposons ici d'utiliser deux bandes de fréquence disjointes pour les communications entre avion et station d'une part, et entre deux avions d'autre part. Les avions vont donc utiliser une bande de fréquence pour communiquer entre eux, puis une autre lorsqu'ils seront directement connectés à une station. On suppose qu'il n'y a pas d'interférence entre les deux types de communications. Cela modéliserait aussi un scénario dans lequel un système indépendant serait utilisé pour les liaisons directes avion-sol. On pourrait ainsi imaginer utiliser une solution cellulaire comme le L-DACS lorsque la connectivité directe avec le sol est possible. Le réseau ad hoc aéronautique serait alors uniquement utilisé pour les liaisons entre avions, pour étendre la couverture du système cellulaire déployé.

Dans notre étude, nous considérons uniquement le réseau ad hoc aéronautique. La bande totale du système de 20 MHz sera donc utilisée pour les communications entre avions et pour les communications entre un avion et une station. Dans un premier temps, nous avons simplement divisé la bande en deux sous-bandes égales. On considère donc une bande de 10 MHz pour les communications entre avions, et 10 MHz pour les liaisons autour des stations. Nous avons ainsi réalisé plusieurs simulations en regardant l'influence du gain d'étalement sur chacune des deux bandes.

Ensuite, nous avons regardé l'influence de la répartition de la bande totale de 20 MHz entre les communications avion-avion et les communications avion-station. Voilà les résultats obtenus.

### 4.4.5.2 Résultats de simulation

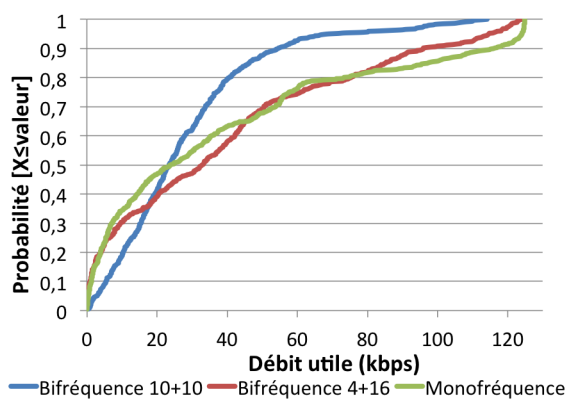
Dans le premier scénario avec une répartition égale des bandes entre les communications avion-avion et les communications avion-station, nous avons constaté qu'un gain d'étalement de 50 sur les deux bandes, correspondant à une capacité des connexions de 400 kbps, permettait de maximiser le débit utile moyen par avion. Nous avons ensuite fait varier la répartition des deux bandes pour maximiser le débit utile moyen par avion. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une bande de 4 MHz pour les communications entre

avons, soit un gain d'étalement de 10, et donc une bande de 16 MHz pour les stations, soit un gain d'étalement de 40.

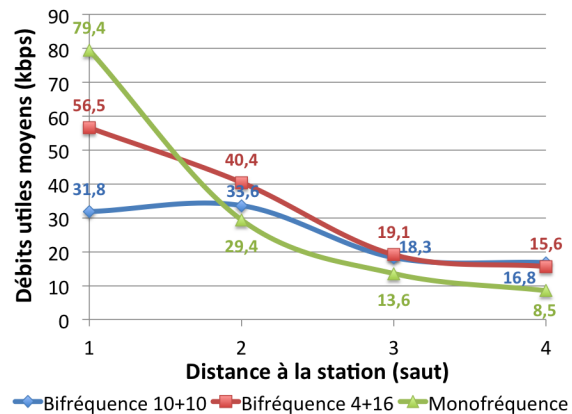
La figure 4.32 montre les statistiques sur les débits obtenus, la figure 4.33 sur les délais et la figure 4.34 sur les pertes pour le scénario "bifréquence, 10+10 MHz, 400 kbps" et le scénario "bifréquence, 4+16 MHz, 400 kbps", en comparaison avec le scénario "monofréquence, 400 kbps", présenté dans la partie 4.4.4.

Scénario	Monofréquence, 400 kbps	Bifréquence, 400 kbps, 10+10 MHz	Bifréquence, 400 kbps, 4+16 MHz
Moyenne (kbps)	39,5	28,2	39,3
Médiane (kbps)	23,9	23,5	33,1
Ecart-type (kbps)	39,9	22,0	36,3
Fairness	0,49	0,62	0,54

(a) Moyenne, médiane, écart-type et fairness



(b) CDF



(c) Moyenne en fonction de la distance

FIGURE 4.32 – Statistiques sur les débits, scénario bifréquence

Scénario	Monofréquence, 400 kbps	Bifréquence, 400 kbps, 10+10 MHz	Bifréquence, 400 kbps, 4+16 MHz
Moyenne (s)	0,467	0,620	0,376
Maximum pour 95% des paquets (s)	1,200	1,649	0,822

FIGURE 4.33 – Statistiques sur les délais, scénario bifréquence

Scénario	Monofréquence, 400 kbps	Bifréquence, 400 kbps, 10+10 MHz	Bifréquence, 400 kbps, 4+16 MHz
Paquets reçus avec succès (%)	96,6	91,6	96,2
Paquets détruits par interférences (%)	3,4	8,4	3,8
Paquets détruits par interférences au niveau des stations (%)	1,6	7,7	2,5
Paquets détruits par débordement de file d'attente (%)	0,0	0,0	0,0

(a) Pertes

Nombre de retransmission(s)	Pourcentage de paquets		
	Monofréquence, 400 kbps	Bifréquence, 400 kbps, 10+10 MHz	Bifréquence, 400 kbps, 4+16 MHz
0	97,0	90,9	96,2
1	2,6	8,3	3,4
2	0,3	0,7	0,3
>3	0,1	0,1	0,1

(b) Retransmissions TCP

FIGURE 4.34 – Statistiques sur les pertes, scénario bifréquence

#### 4.4.5.3 Analyse des résultats

D'après la figure 4.32, on constate que l'utilisation de deux bandes de fréquence distinctes pour les communications avion-avion et les communications avion-station ne permet pas d'améliorer le débit utile moyen par avion, quelque soit le gain d'étalement et la répartition des fréquences utilisés (figure 4.32). En revanche, cela permet d'améliorer la répartition des débits entre les différents avions. On remarque en particulier que les avions lointains sont moins pénalisés que dans le scénario monofréquence, ce qui peut être intéressant pour certaines applications.

En utilisant une fréquence différente autour des stations, on établit en fait des clusters. En effet, on a plusieurs clusters d'avions, chacun étant constitué de l'ensemble des avions directement connectés à une station, et un cluster regroupant tous les autres avions. Nous allons maintenant regarder les performances du système avec un algorithme de routage hiérarchique.

## 4.4.6 Utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique

### 4.4.6.1 Présentation du scénario

Jusqu'ici, nous avons utilisé un algorithme de routage de type plus court chemin. Chaque avion était connecté à la station la plus proche par le chemin le plus court. Nous allons maintenant étudier les performances du système avec un algorithme de routage hiérarchique. On va ainsi former des clusters d'avion. Pour cela, nous avons utilisé une approche géographique. Un cluster réunit les avions d'une même zone géographique. Nous allons ainsi étudier l'influence de la taille de cette zone sur les performances du système.

On suppose ensuite que les avions d'un même cluster communiquent avec le cluster-head sur une bande de fréquence  $B_{intra}$ , et que les cluster-heads communiquent entre eux sur une autre bande de fréquence  $B_{inter}$ . On considère toujours une bande totale de 20 MHz. On a donc  $B_{inter} + B_{intra} = 20MHz$ . A l'intérieur d'un même cluster, tous les avions utilisent la même capacité de connexions  $C_{intra}$  pour communiquer avec le cluster-head. Celle-ci est calculée dynamiquement en fonction du nombre d'avions dans le cluster pour garantir que toutes les connexions soient possibles. Les cluster-heads utilisent des connexions avec une capacité  $C_{inter}$ . Cette architecture est illustrée dans la figure 4.35.

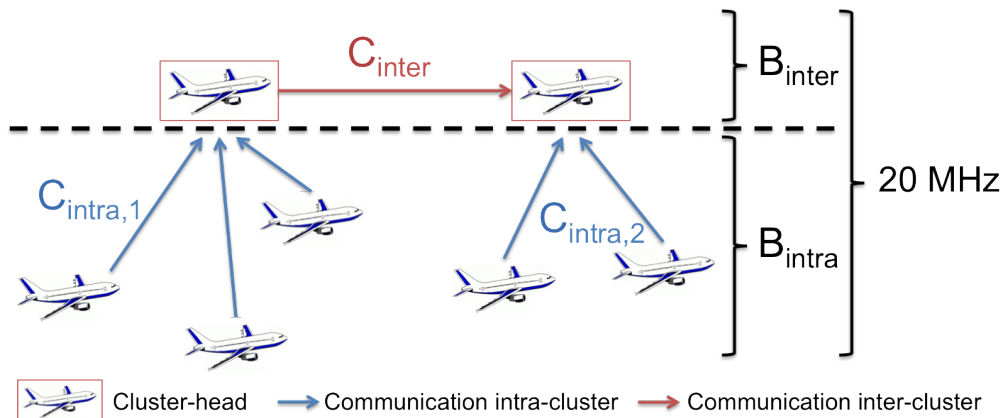


FIGURE 4.35 – Communications intra-cluster et inter-clusters

On peut donc faire varier la taille des clusters, la capacité des connexions inter-cluster ainsi que la répartition de la bande totale de 20 MHz entre les communications inter et intra-cluster. Nous avons optimisé ces paramètres pour maximiser le débit utile moyen.

### 4.4.6.2 Résultats de simulation

Tout d'abord, nous considérons que la bande de 20 MHz est divisée en deux sous-bandes égales pour les communications inter et intra-clusters. On a donc  $B_{inter} = B_{intra} = 10MHz$ . La figure 4.36a montre l'évolution du débit moyen par avion en fonction de la taille des clusters pour différents gains d'étalement. La figure 4.36b montre ensuite

l'évolution du débit moyen par avion en fonction de la taille des clusters en faisant varier la bande allouée aux communications inter-clusters, pour une capacité de ces liaisons  $C_{inter}$  de 1200 kbps.

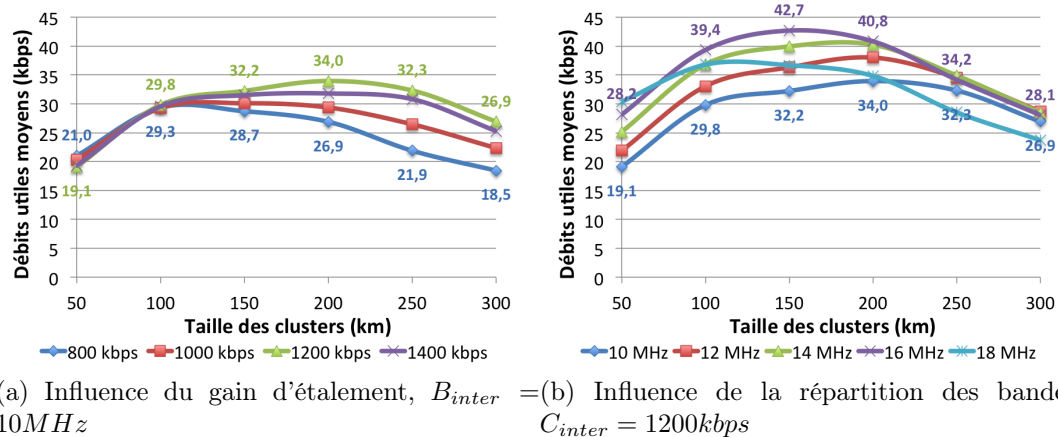


FIGURE 4.36 – Statistiques sur les débits moyens par avion, utilisation des clusters

D'après les résultats précédents, les débits moyens par avion les plus élevés sont donc obtenus pour une taille de clusters de 150 km, avec une bande de 16 MHz et un gain d'étalement de 13,3 pour les communications inter-cluters. Les figures 4.37, 4.38 et 4.39 montrent respectivement les statistiques sur les débits, les délais et les pertes obtenues avec ces paramètres.

Moyenne (kbps)	42,7
Médiane (kbps)	38,9
Ecart-type (kbps)	26,1
Fairness	0,73

(a) Moyenne, médiane, écart-type et fairness

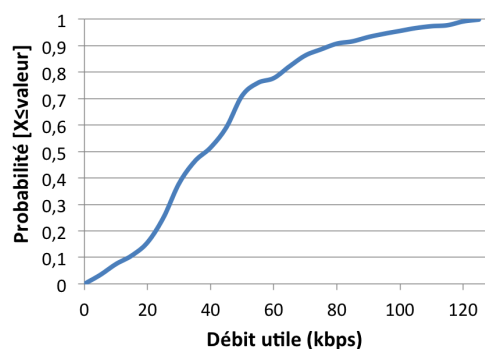


FIGURE 4.37 – Statistiques sur les débits, utilisation des clusters

Moyenne (s)	0,432
Maximum pour 95% des paquets (s)	0,873

FIGURE 4.38 – Statistiques sur les délais, utilisation des clusters

Pourcentage de paquets reçus avec succès (%)	98,1
Pourcentage de paquets détruits par interférences (%)	1,2
Pourcentage de paquets détruits par interférences au niveau des stations (%)	0,8
Pourcentage de paquets détruits par débordement de file d'attente (%)	0,7

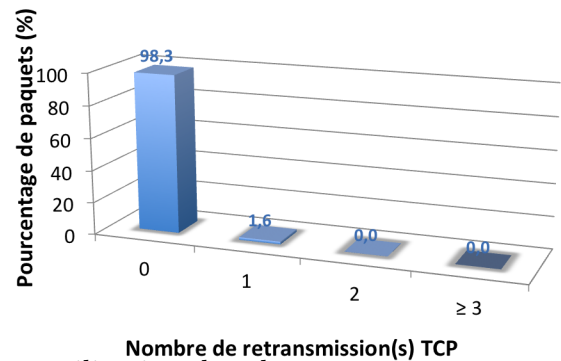


FIGURE 4.39 – Statistiques sur les pertes, utilisation des clusters

#### 4.4.6.3 Analyse des résultats

D'après la figure 4.37, on obtient donc un débit utile moyen de 42,7 kbps pour le scénario optimal, soit un gain d'environ 8% par rapport au meilleur scénario avec un algorithme de routage de type plus court-chemin. De plus, l'équité entre les différents avions est meilleure. La fairness passe en effet de 0,49 à 0,73. Les pertes sont aussi réduites (figure 4.39), ce qui a pour conséquence de réduire les délais moyens. On passe ainsi de 467 à 432 ms pour le scénario utilisant des clusters (figure 4.38).

### Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances du système en zone continentale. Nous avons considéré le pire cas où tous les avions veulent émettre simultanément à destination d'un serveur au sol. Nous l'avons fait avec du trafic UDP en augmentant progressivement le débit généré par chaque avion, puis avec du trafic TCP en considérant une source gloutonne au niveau de chaque avion, c'est-à-dire en supposant que la couche applicative a toujours des données à envoyer.

Dans la première partie de l'étude avec du trafic UDP, nous avons mis en évidence l'efficacité du contrôle de puissance qui permet presque de doubler les performances du système. De plus, quelque soit la taille des paquets UDP envoyés sur le réseau, nous n'avons pas observé d'influence significative sur le débit moyen disponible pour chaque avion, pour une taille de paquet variant de 200 à 1500 octets et un débit généré par avion allant jusqu'à 80 kbps. Nous avons ensuite montré que la portée optimale des connexions était de 150 km. Enfin, nous avons vu que, pour le trafic UDP que nous avons généré, le gain d'étalement maximisant les débits utiles moyens était de 50, ce qui correspond à une capacité des connexions de 400 kbps. On obtient alors un débit utile d'environ 33 kbps par avion.

Dans la seconde partie de l'étude avec du trafic TCP, nous avons vu que l'utilisation de TCP permettait de réduire fortement les pertes par rapport à du trafic UDP. En effet, TCP s'adapte en cas de pertes en réduisant le débit d'émission. Cela permet de ne pas aggraver la situation en cas de congestion. Chaque avion s'adapte ainsi au mieux à la capacité offerte par le réseau. Tout d'abord, nous avons considéré un algorithme de routage de type "plus court chemin". Nous avons alors optimisé le débit utile moyen par avion. Les meilleurs résultats sont obtenus pour des paquets de 1500 octets, une portée maximale des connexions de 150 km, un gain d'étalement de 50. On obtient alors un débit utile moyen de 39,5 kbps par avion, soit un gain de près de 20% par rapport au trafic UDP. Enfin, nous avons étudié l'utilisation des clusters dans le réseau ad hoc aéronautique. Là aussi, on constate une amélioration de près de 8% des débits moyens par rapport à l'algorithme de routage de type plus court chemin. L'utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique est donc très intéressante pour les réseaux ad hoc aéronautique en zone continentale.

# Chapitre 5

## Dimensionnement du système en zone océanique

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>135</b>
<b>5.1 Méthodologie</b> . . . . .	<b>135</b>
5.1.1 Définition du scénario de référence . . . . .	135
5.1.2 Influence de la portée maximale des connexions . . . . .	135
5.1.3 Influence de l'algorithme de routage . . . . .	137
<b>5.2 Etude des performances avec du trafic UDP</b> . . . . .	<b>137</b>
5.2.1 Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	137
5.2.2 Influence de la taille des paquets . . . . .	139
5.2.3 Influence de la capacité des connexions . . . . .	141
5.2.4 Influence de la portée des connexions . . . . .	143
<b>5.3 Evaluation des performances avec du trafic TCP</b> . . . . .	<b>144</b>
5.3.1 Performances observées pour le scénario de référence . . . . .	144
5.3.2 Influence de la taille des paquets . . . . .	145
5.3.3 Influence de la capacité des connexions . . . . .	147
5.3.4 Utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique . . . . .	149
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	<b>152</b>

---



## Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la zone océanique. On considère les avions volant sur le couloir transatlantique entre l'Europe et l'Amérique du Nord. Comme nous l'avons vu dans l'étude de faisabilité, les portées nécessaires sont plus importantes en zone océanique qu'en zone continentale pour avoir une connectivité équivalente. Nous allons donc considérer ici des portées supérieures à 300 km, ce qui permet de connecter plus de 90 % des avions entre 23h et 6h.

Nous allons utiliser la même méthodologie que pour l'étude en zone continentale. Nous allons donc tout d'abord présenter les hypothèses retenues pour le scénario de référence, ainsi que la nouvelle répartition des avions en fonction de leur distance à la station. Nous présenterons ensuite l'évaluation des performances avec du trafic UDP, puis avec du trafic TCP.

### 5.1 Méthodologie

#### 5.1.1 Définition du scénario de référence

Le tableau 5.1 montre l'ensemble des paramètres du système choisis pour le scénario de référence. Par rapport au scénario de référence en zone continentale, nous avons modifié le nombre de stations et la portée des connexions, conformément aux résultats obtenus dans l'étude de faisabilité. Nous allons aussi faire l'hypothèse de l'utilisation du contrôle de puissance. En effet, nous avons vu dans le chapitre précédent que cela apporte un gain important pour les performances du système.

Bande totale du système	20 MHz
Fréquence	2 GHz
Nombre de stations	11
Portée des connexions	300 km
Capacité des connexions	1000 kbps
Algorithme de routage	Plus court chemin
Puissance d'émission	Adaptée par le contrôle de puissance

TABLE 5.1 – Hypothèses pour le scénario de référence

#### 5.1.2 Influence de la portée maximale des connexions

On considère ici l'algorithme de routage de type plus court chemin. Le tableau 5.2 montre la répartition des avions en fonction de leur distance à la station, en nombre de sauts, en fonction de la portée maximale des connexions. Elle est illustrée dans la figure 5.1.

Distance à la station (sauts) / Portée (km)	300	350
1	106	129
2	83	84
3	31	18
4	10	8
5	9	12
6	5	12
7	7	8
8	5	10
9	5	11
10	8	9
11	5	5
12	8	2
13	3	1
14	5	
15	8	
16	1	
17	2	
18	1	
Total	302	309

TABLE 5.2 – Répartition des avions selon leur distance à la station (saut) pour différentes portées (km)

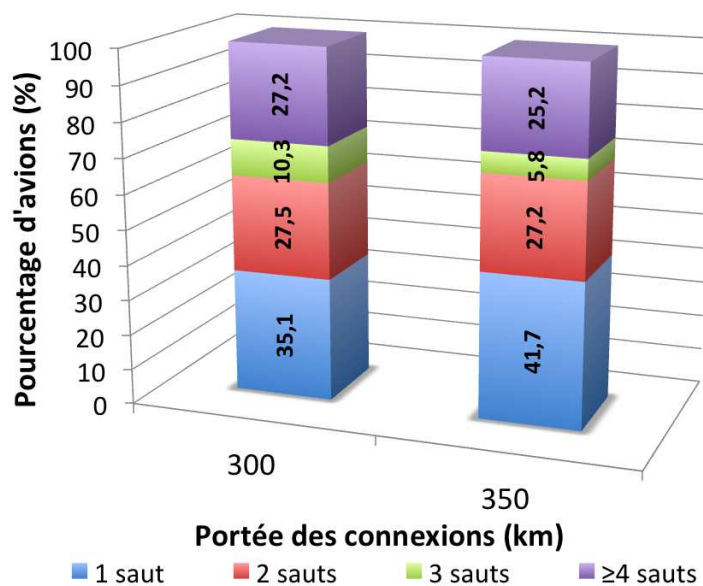


FIGURE 5.1 – Répartition des avions selon leur distance à la station (saut) pour différentes portées (km)

### 5.1.3 Influence de l'algorithme de routage

La figure 5.2 montre l'évolution du nombre de clusters dans le réseau en fonction de la taille des clusters. Pour une taille de cluster de 100 km, on a en moyenne 170 clusters, soit environ 2,4 avions par cluster, contre 5,8 pour une taille de cluster de 300 km. On a donc un nombre de clusters plus important qu'en zone continentale car la superficie de la zone est plus importante.

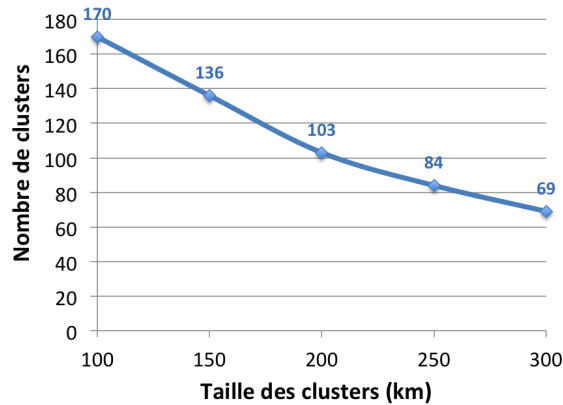


FIGURE 5.2 – Nombre de clusters, influence de la taille des clusters

## 5.2 Etude des performances avec du trafic UDP

### 5.2.1 Performances observées pour le scénario de référence

#### 5.2.1.1 Résultats de simulation

La figure 5.3 montre différentes statistiques sur les débits, la figure 5.4 sur les délais et les pertes.

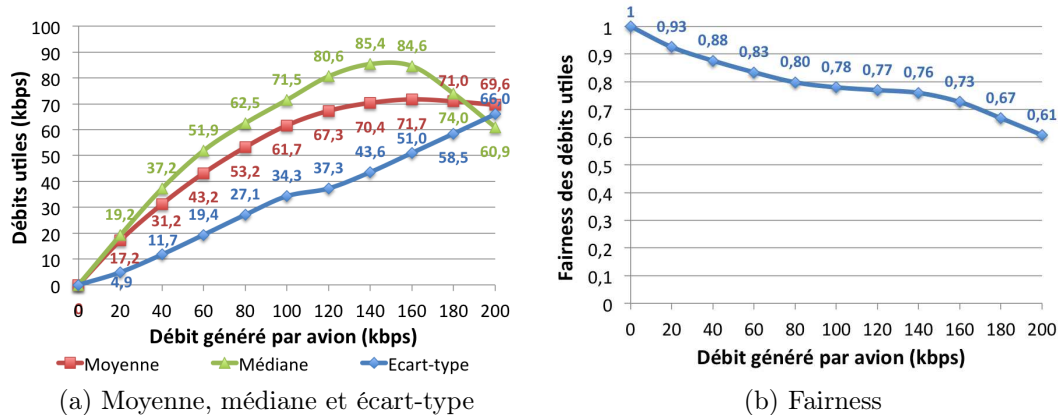


FIGURE 5.3 – Statistiques sur les débits, scénario de référence UDP

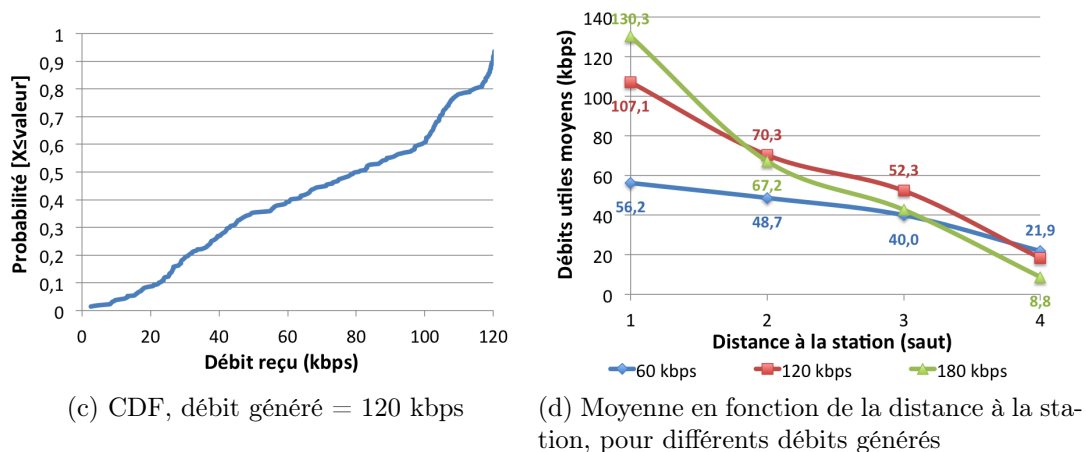


FIGURE 5.3 – Statistiques sur les débits, scénario de référence UDP

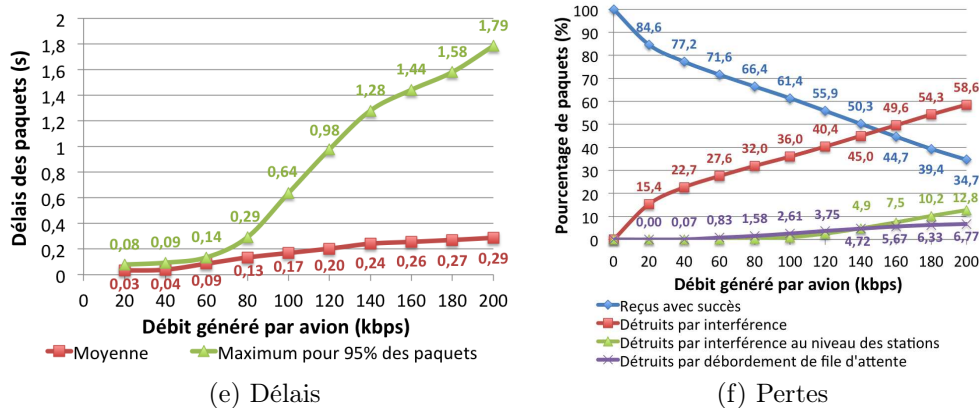


FIGURE 5.4 – Statistiques sur les délais et les pertes, scénario de référence UDP

### 5.2.1.2 Analyse des résultats

On constate que les débits utiles obtenus en zone océanique sont meilleurs qu'en zone continentale. On atteint par exemple un débit utile moyen de 71,7 kbps par avion au maximum (figure 5.3), contre 30,4 kbps en zone continentale. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le nombre d'avions en vol est plus faible. On a environ 275 avions en vol en moyenne en zone océanique et 500 en zone continentale. La densité d'avion est donc plus faible. De plus, on considère 12 stations en espace océanique, contre 5 en espace continental. La répartition des débits est elle aussi meilleure. Pour un débit généré de 80 kbps par avion, on a une fairness de 0,80 (figure 5.3b), on avait alors 0,61 en zone continentale. Les délais sont eux plus élevés qu'en zone continentale. En effet, le nombre de saut pour joindre une station est en moyenne plus élevé. Pour un débit généré de 80 kbps, le délai moyen des paquets est de 130 ms, contre 47 ms en espace continental (figure 5.4).

## 5.2.2 Influence de la taille des paquets

### 5.2.2.1 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous étudions l'influence de la taille des paquets. Les figures 5.5, 5.6 et 5.7 montrent respectivement les résultats obtenus en termes de débits, de délais et de pertes lorsqu'on fait varier la taille des paquets de 200 à 1500 octets.

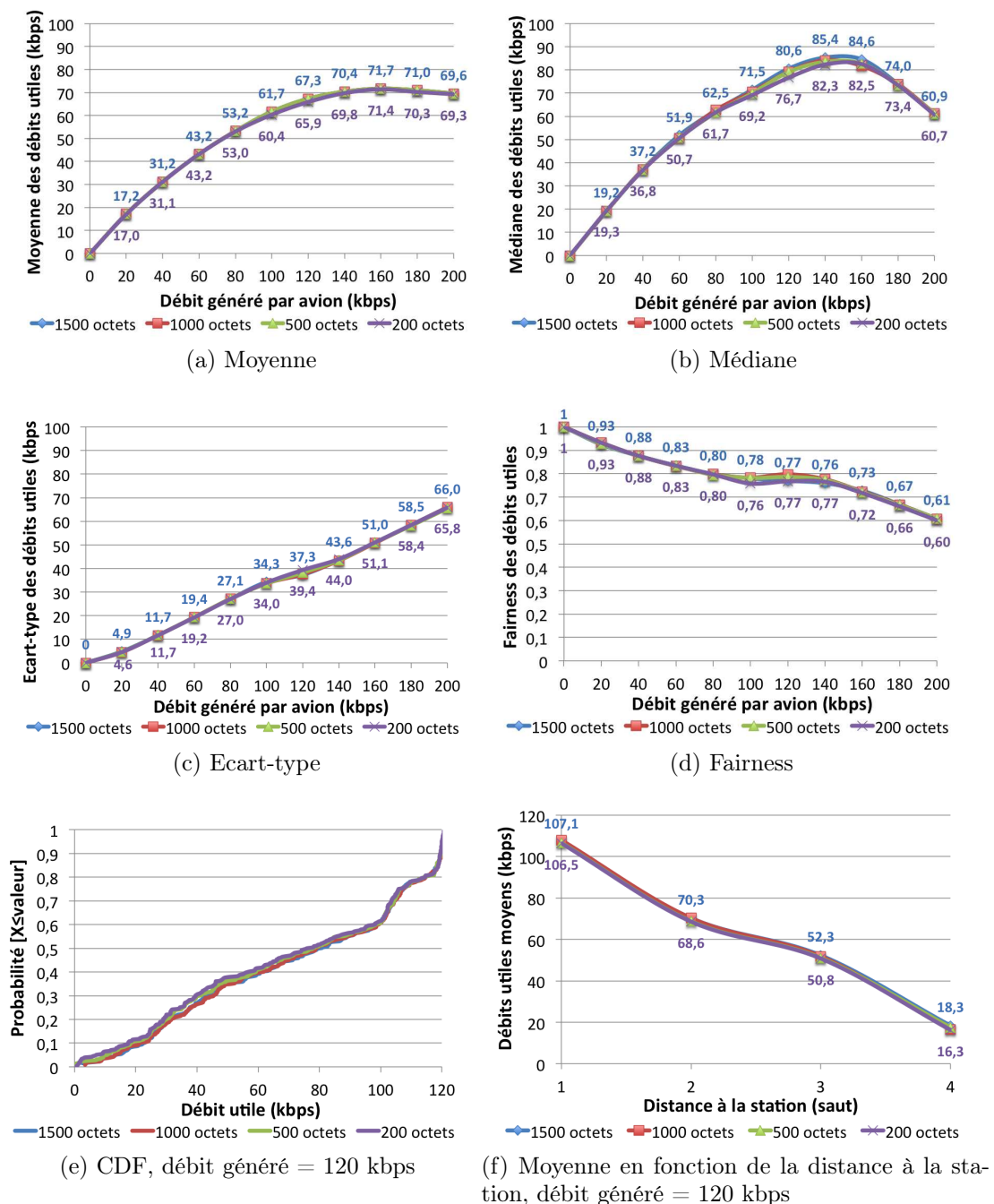


FIGURE 5.5 – Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets UDP

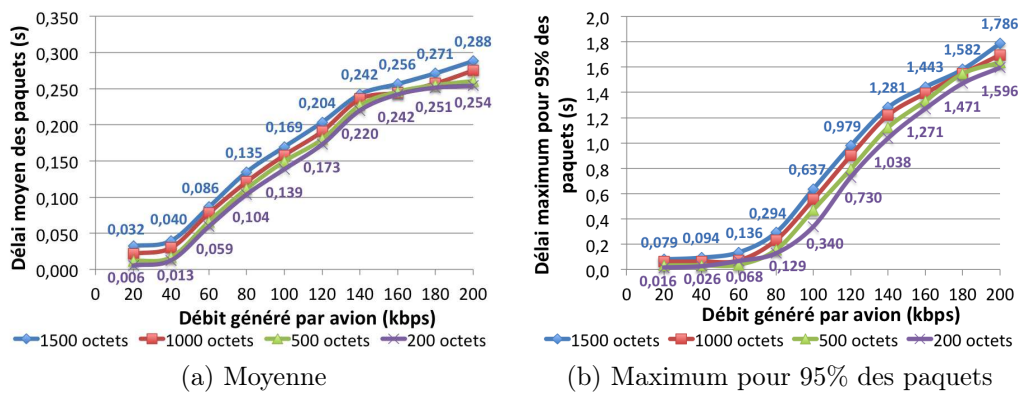


FIGURE 5.6 – Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets UDP

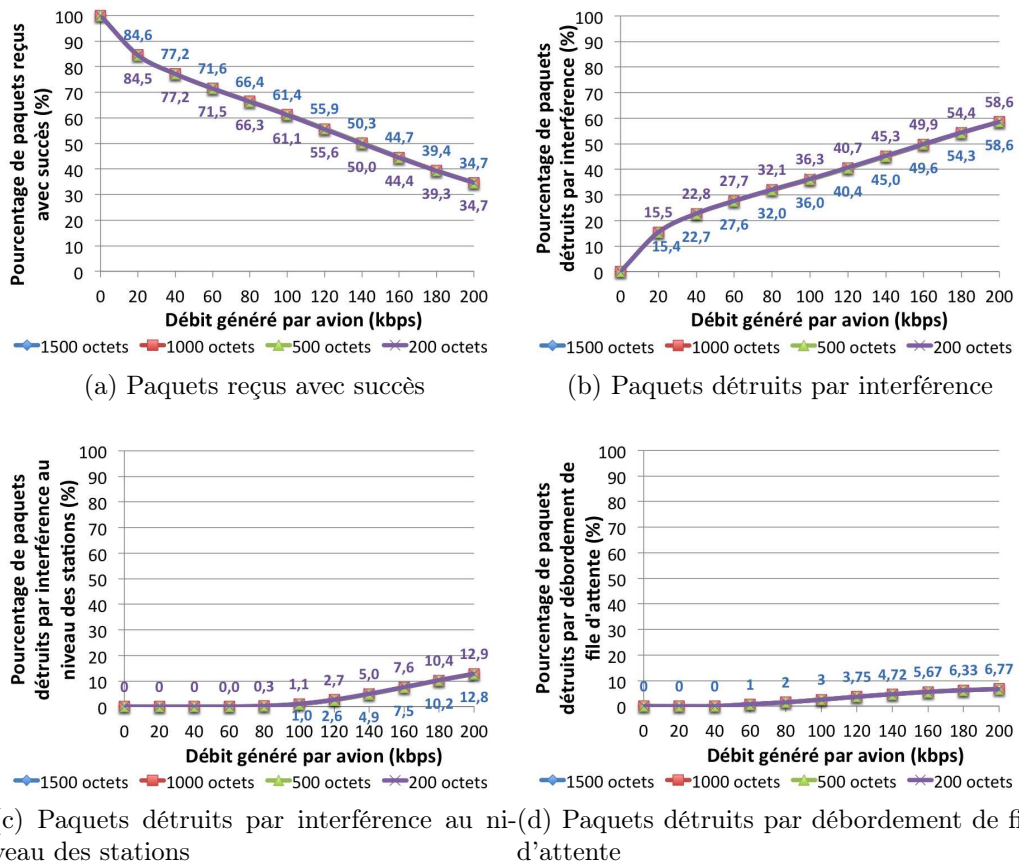


FIGURE 5.7 – Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets UDP

### 5.2.2.2 Analyse des résultats

Nous arrivons donc aux mêmes conclusions qu'en espace continental. La taille des paquets n'a pas d'influence significative sur les performances du système en termes de débits, de délais et de pertes. Pour la suite de l'étude, nous allons donc considérer des

paquets de 1500 octets.

### 5.2.3 Influence de la capacité des connexions

#### 5.2.3.1 Résultats de simulation

Nous avons réalisé plusieurs simulations en faisant varier la capacité des liens de 200 à 2000 kbps. Les figures 5.8, 5.9 et 5.10 montrent les résultats obtenus.

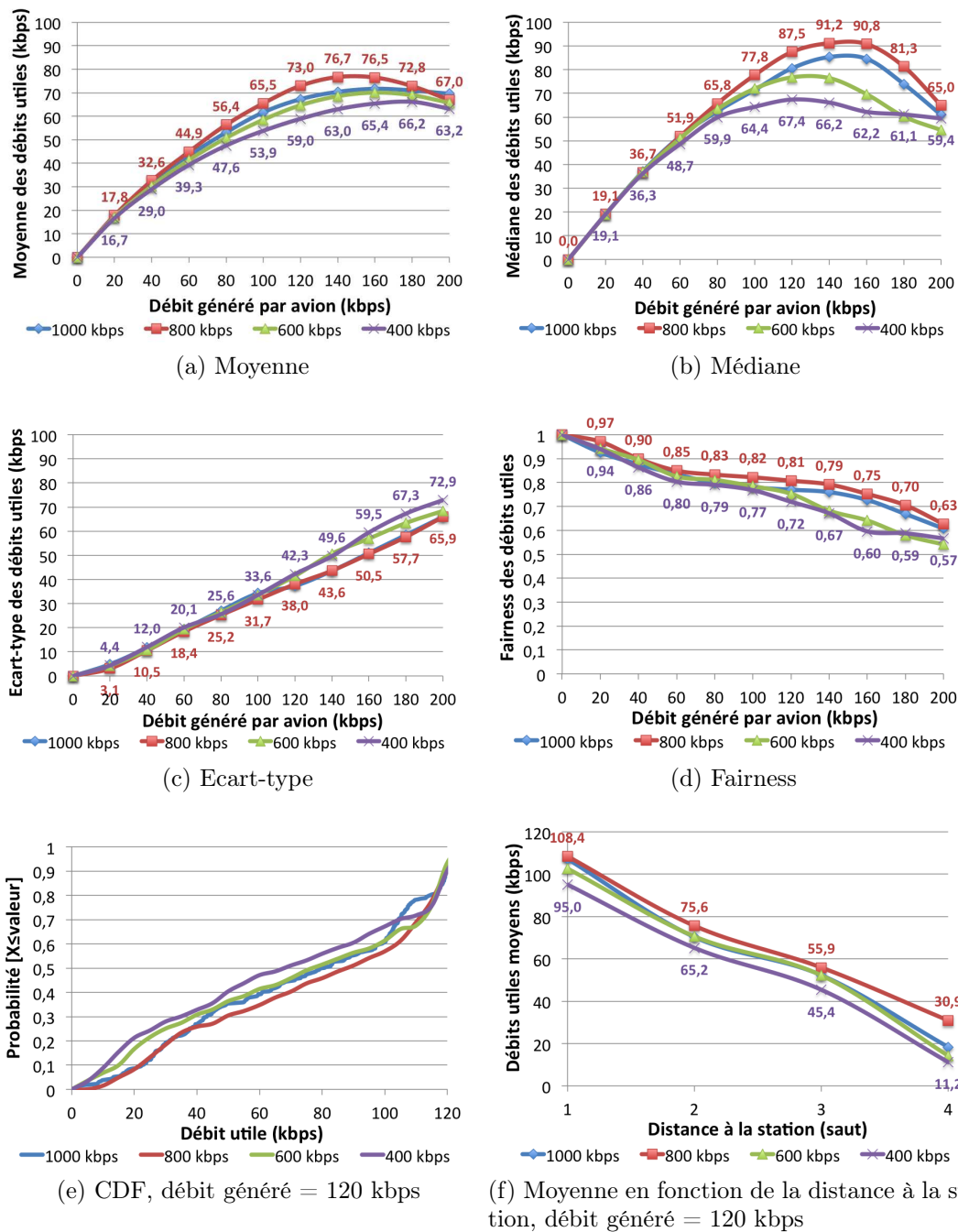


FIGURE 5.8 – Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement

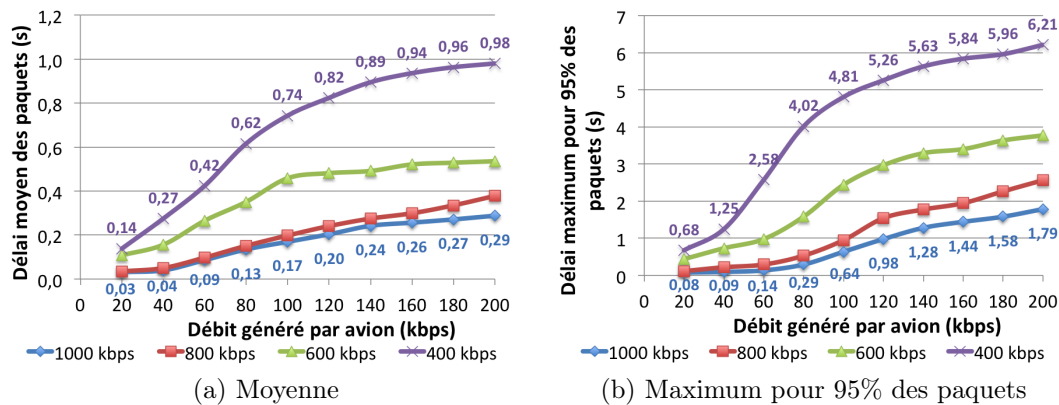


FIGURE 5.9 – Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement

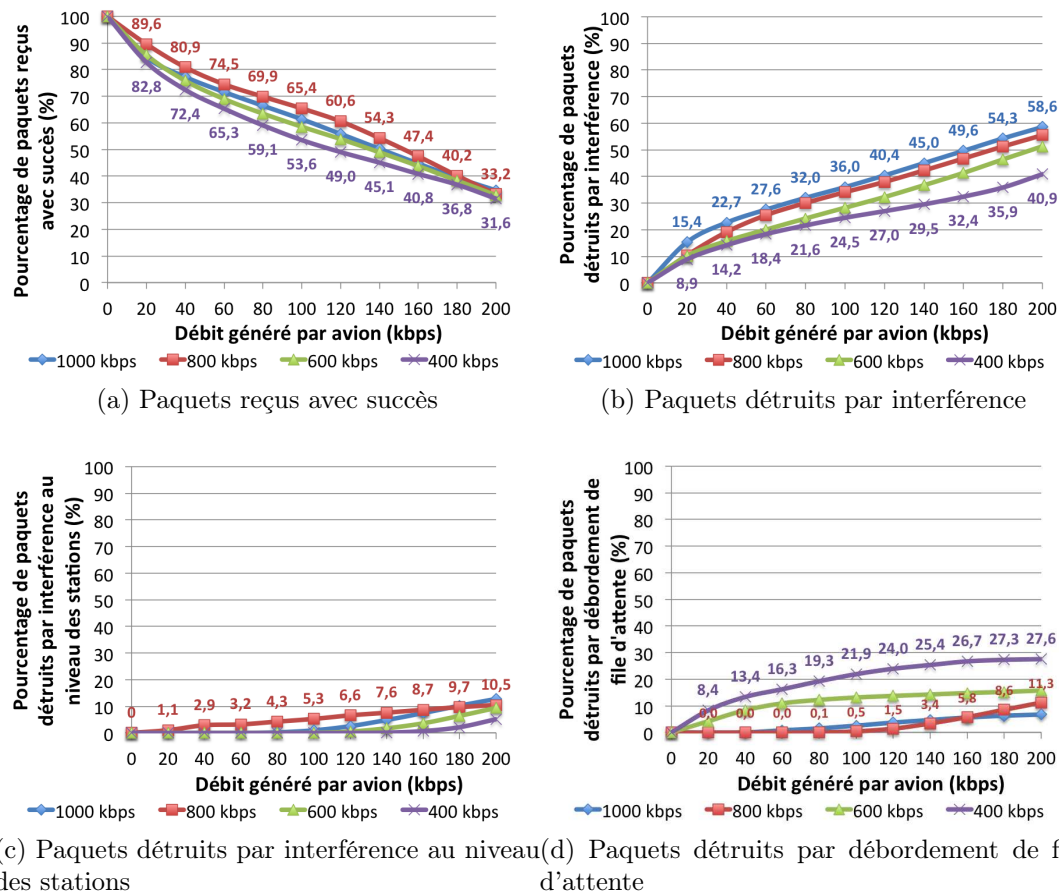


FIGURE 5.10 – Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement

### 5.2.3.2 Analyse des résultats

D'après la figure 5.8, on constate que les meilleures performances en termes de débits sont obtenues pour une capacité des connexions de 800 kbps, ce qui correspond à un gain

d'étalement de 25. En zone continentale, le gain d'étalement optimal était de 50. Le niveau d'interférence est donc plus faible en zone océanique. Cela s'explique notamment par la densité d'avions plus faible. Dans le pire cas où tous les avions émettent simultanément, la contribution aux interférences des avions en visibilité est donc plus faible.

Comme en zone continentale, on constate que plus le gain d'étalement augmente, c'est-à-dire plus la capacité des connexions diminue, plus les délais moyens des paquets augmentent (figure 5.9). Au niveau des pertes (figure 5.10), plus on augmente le gain d'étalement, plus on diminue le taux de paquets détruits à cause des interférences, mais plus on augmente le taux de paquets perdus par débordement de file d'attente.

## 5.2.4 Influence de la portée des connexions

### 5.2.4.1 Résultats de simulation

Pour un gain d'étalement de 50, c'est-à-dire une capacité des connexions de 800 kbps, la portée maximale des connexions est d'environ 350 km. Nous avons donc réalisé les mêmes simulations que précédemment avec des portées maximales de 300 à 350 km.

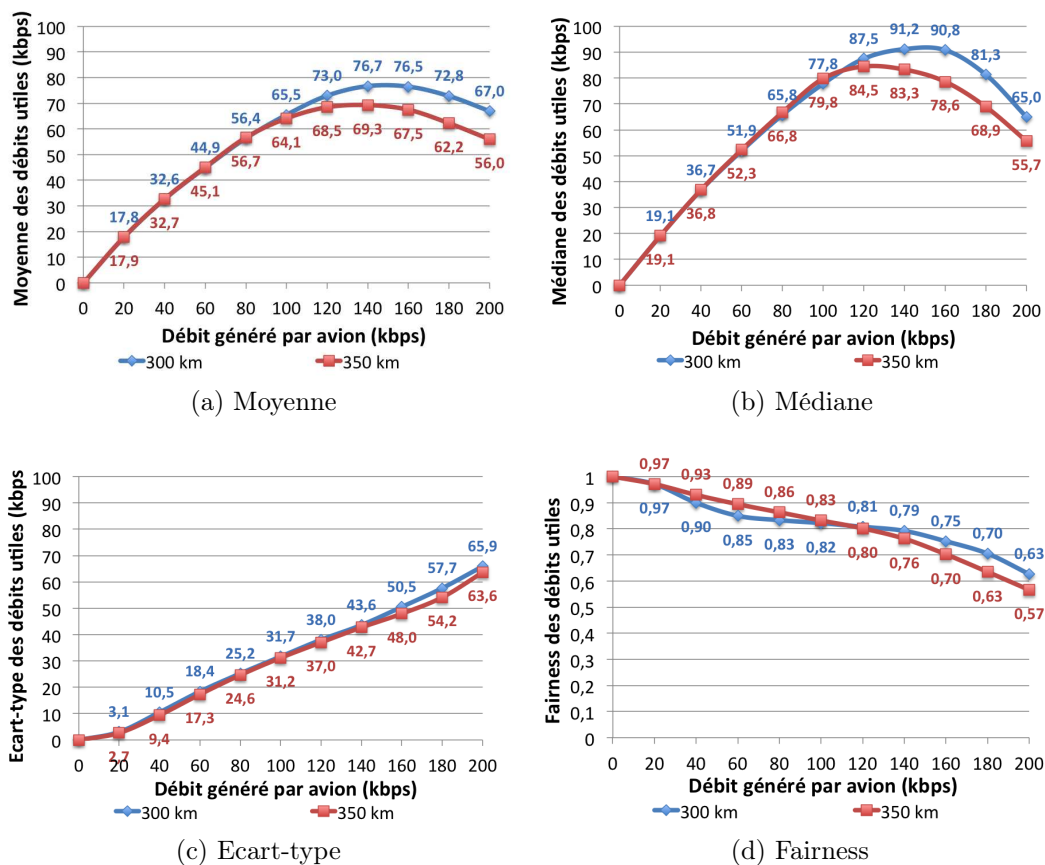


FIGURE 5.11 – Statistiques sur les débits, influence de la portée des connexions

### 5.2.4.2 Analyse des résultats

On constate donc qu'à faible charge, jusqu'à un débit généré par avion d'environ 100 kbps, la portée maximale des connexions a peu d'influence sur les performances du système. En revanche, à forte charge, il est préférable de minimiser la portée des connexions. Pour un débit généré de 140 kbps par avions, on obtient par exemple un débit utile moyen de 76,7 kbps par avion pour une portée de 300 km, contre 69,3 kbps pour une portée de 350 km.

## 5.3 Evaluation des performances avec du trafic TCP

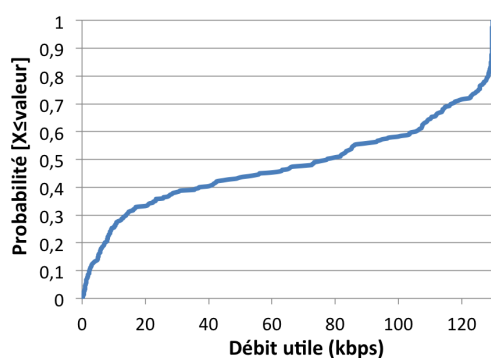
### 5.3.1 Performances observées pour le scénario de référence

#### 5.3.1.1 Résultats de simulation

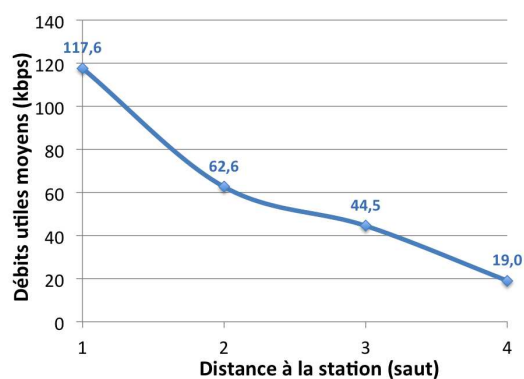
Dans cette partie, on considère le scénario de référence avec le générateur de trafic "TCP Greedy". Les figures 5.12, 5.3 et 5.13 montrent les résultats obtenus.

Moyenne (kbps)	68,2
Médiane (kbps)	77,5
Ecart-type (kbps)	52,2
Fairness	0,63

(a) Moyenne, médiane, écart-type, fairness



(b) CDF



(c) Moyenne en fonction de la distance à la station

FIGURE 5.12 – Statistiques sur les débits, scénario de référence TCP

Moyenne (s)	0,184
Maximum pour 95% des paquets (s)	0,426

TABLE 5.3 – Statistiques sur les délais, scénario de référence TCP

Pourcentage de paquets reçus avec succès (%)	98,25
Pourcentage de paquets détruits par interférences (%)	1,75
Pourcentage de paquets détruits par interférences au niveau des stations (%)	0,29
Pourcentage de paquets détruits par débordement de file d'attente (%)	0,00

TABLE 5.4 – Statistiques sur les pertes, scénario de référence TCP

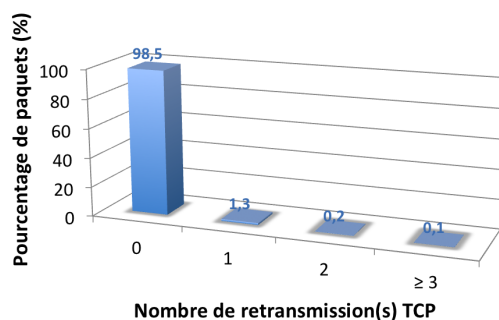


FIGURE 5.13 – Nombre de retransmission TCP, scénario de référence TCP

### 5.3.1.2 Analyse des résultats

Comme dans le cas du trafic UDP, on constate là-aussi que les performances du système sont meilleures qu'en zone océanique. D'après la figure 5.12, on atteint par exemple un débit moyen par avion de 68,2 kbps, contre 38,3 kbps en zone continentale. De plus, l'équité entre les avions est meilleure.

D'après la figure 5.3, on constate que le délai moyen des paquets est plus faible qu'en zone continentale. Cela est surprenant car le nombre de sauts moyens pour joindre une station est plus élevé en zone océanique qu'en zone continentale. On pourrait donc s'attendre à des délais plus élevés. En fait, ce phénomène est dû aux retransmissions TCP. En effet, en zone océanique, 98,5% des paquets arrivent au serveur sans avoir été retransmis (figure 5.13), contre seulement 94,4% en zone continentale. Les paquets retransmis vont donc avoir des délais très élevés, d'autant plus qu'on a considéré un délai de 250 ms pour la voie retour. On a donc un temps d'aller-retour des paquets important.

## 5.3.2 Influence de la taille des paquets

### 5.3.2.1 Résultats de simulation

Nous avons fait varier la taille des paquets de 200 à 1500 octets. Les figures 5.14, 5.15 et 5.16 montrent respectivement les statistiques sur les débits, les délais et les pertes, obtenues pour les différentes valeurs de taille de paquets.

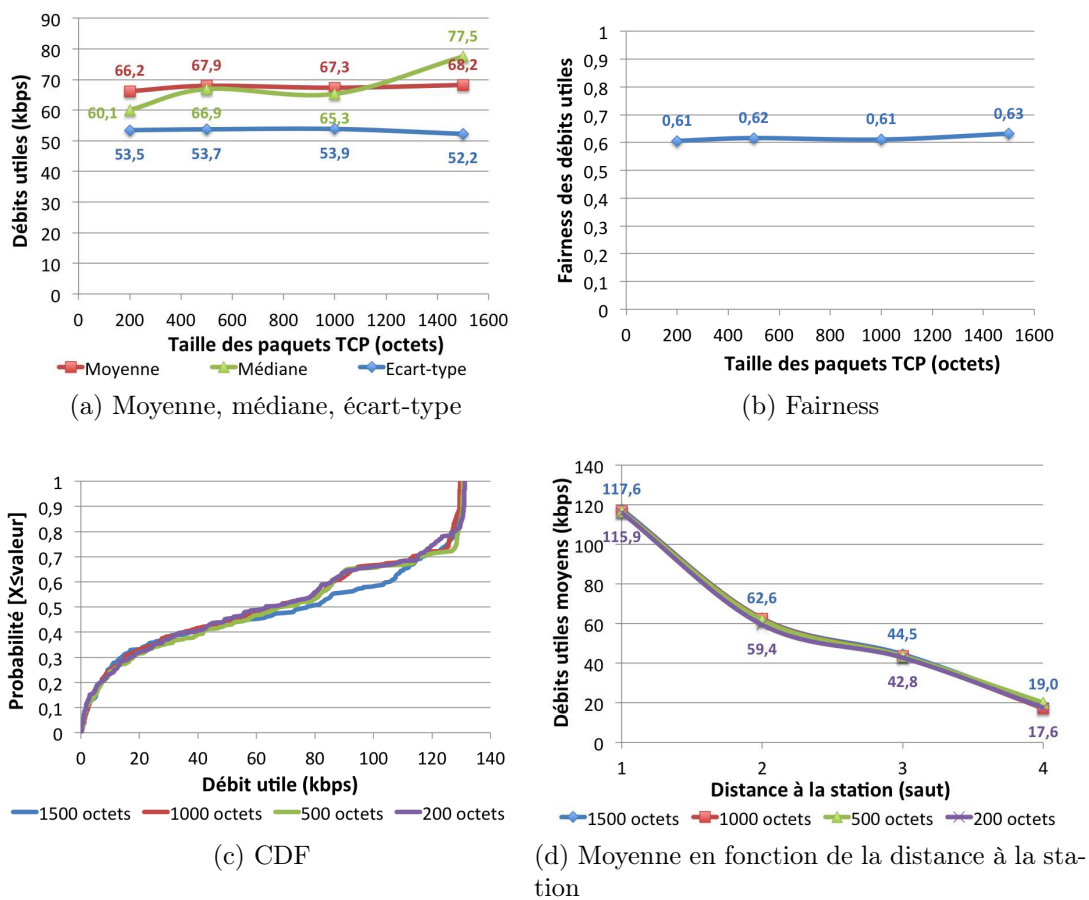


FIGURE 5.14 – Statistiques sur les débits, influence de la taille des paquets TCP

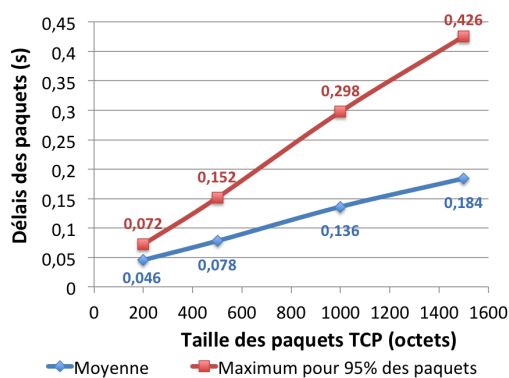


FIGURE 5.15 – Statistiques sur les délais, influence de la taille des paquets TCP

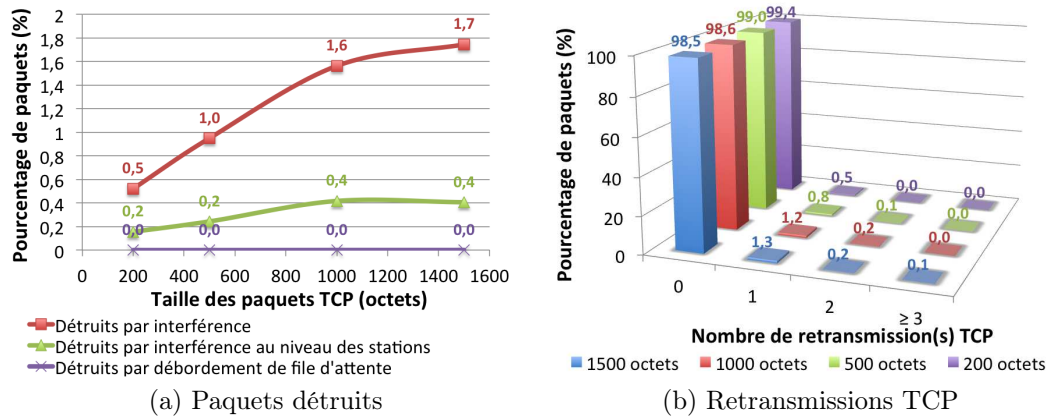


FIGURE 5.16 – Statistiques sur les pertes, influence de la taille des paquets TCP

### 5.3.2.2 Analyse des résultats

D'après la figure 5.14, on constate que des paquets de 1500 octets permettent de maximiser le débit utile moyen par avion avec 68,2 kbps en moyenne, contre 66,2 kbps avec des paquets de 200 octets. La fairness est elle-aussi améliorée. L'influence de la taille des paquets est donc relativement faible. Pour la suite de l'étude, on va donc considérer des paquets de 1500 octets.

## 5.3.3 Influence de la capacité des connexions

### 5.3.3.1 Résultats de simulation

Nous faisons ici varier la capacité des connexions, et donc le gain d'étalement. Les figures 5.17, 5.18 et 5.19 montrent les résultats obtenus.

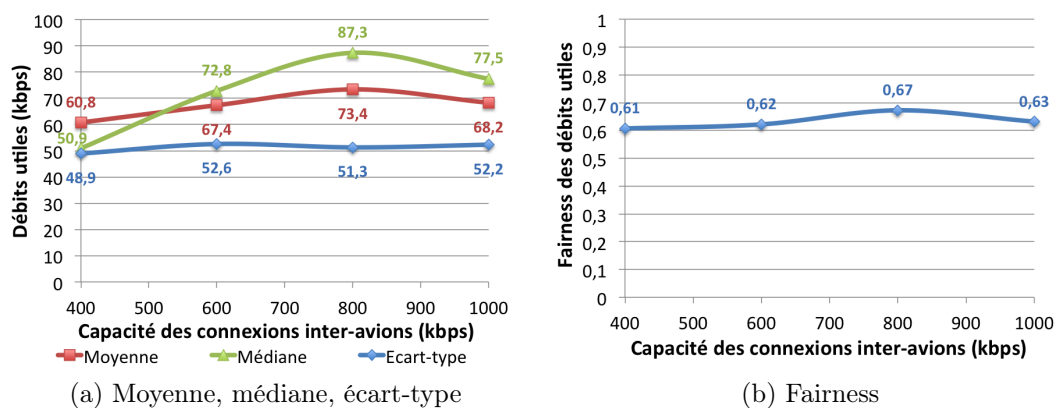
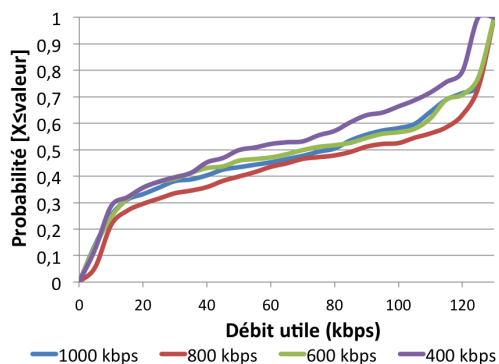
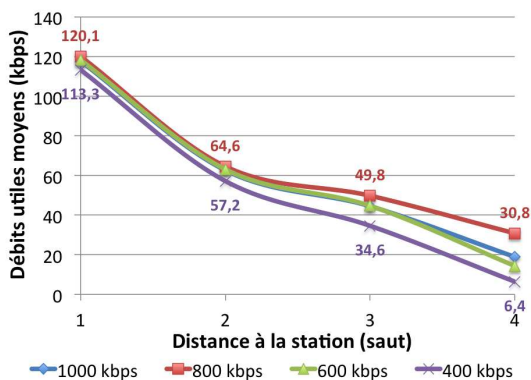


FIGURE 5.17 – Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement



(c) CDF



(d) Moyenne en fonction de la distance à la station

FIGURE 5.17 – Statistiques sur les débits, influence du gain d'étalement

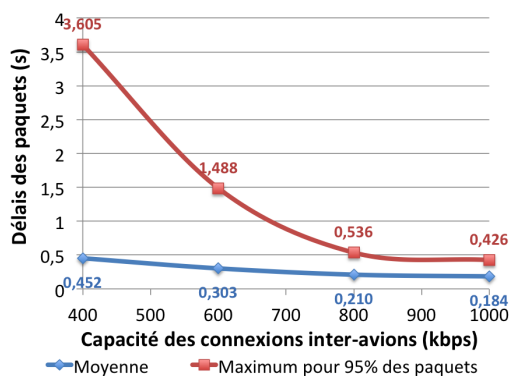
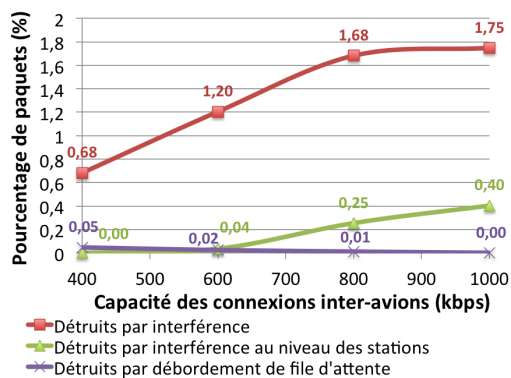
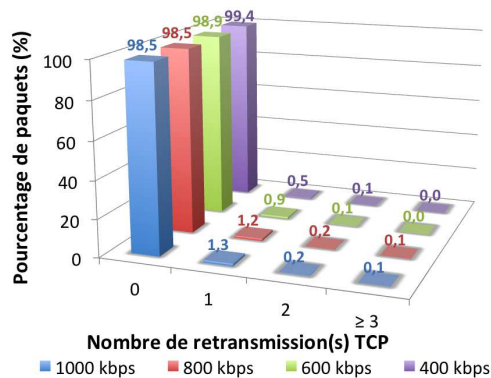


FIGURE 5.18 – Statistiques sur les délais, influence du gain d'étalement



(a) Paquets détruits



(b) Retransmission TCP

FIGURE 5.19 – Statistiques sur les pertes, influence du gain d'étalement

### 5.3.3.2 Analyse des résultats

Comme avec le trafic UDP, on constate que la capacité des connexions qui maximise le débit utile moyen par avion est de 800 kbps, soit un gain d'étalement de 25. D'après la figure 5.17, on obtient alors un débit utile moyen de 73,4 kbps par avion.

Là aussi, la répartition des débits entre les différents avions est inégale. Les avions directement connectés à une station obtiennent par exemple un débit utile d'environ 120 kbps, contre environ 30 kbps en moyenne pour les avions situés à plus de 4 sauts d'une station, ce qui représente plus de 27% des avions.

Pour un gain d'étalement de 25, on obtient un délai moyen des paquets de 210 ms, et un délai maximum pour 95% des paquets de 536 ms. Le taux de pertes reste lui relativement faible, 98,5 % des paquets transmis arrivent au serveur sans aucune retransmission.

## 5.3.4 Utilisation d'un algorithme de routage hiérarchique

### 5.3.4.1 Résultats de simulation

Nous allons maintenant étudier les performances du système en zone océanique avec un algorithme de routage hiérarchique. Nous avons ainsi fait varier la taille des clusters, la capacité communications inter-cluster ainsi que la répartition de la bande totale de 20 MHz entre les communications inter et intra-clusters. Nous avons optimisé ces paramètres pour maximiser le débit utile moyen par avion.

Tout d'abord, nous avons considéré que la bande de 20 MHz était divisée en deux sous-bandes égales pour les communications inter et intra-clusters. On a donc  $B_{inter} = B_{intra} = 10MHz$ . La figure 5.20a montre l'évolution du débit moyen par avion en fonction de la taille des clusters pour différents gains d'étalement.

La figure 5.20b montre ensuite l'évolution du débit moyen par avion en fonction de la taille des clusters en faisant varier la bande allouée aux communications inter-clusters, pour une capacité de ces liaisons  $C_{inter}$  de 800 kbps.

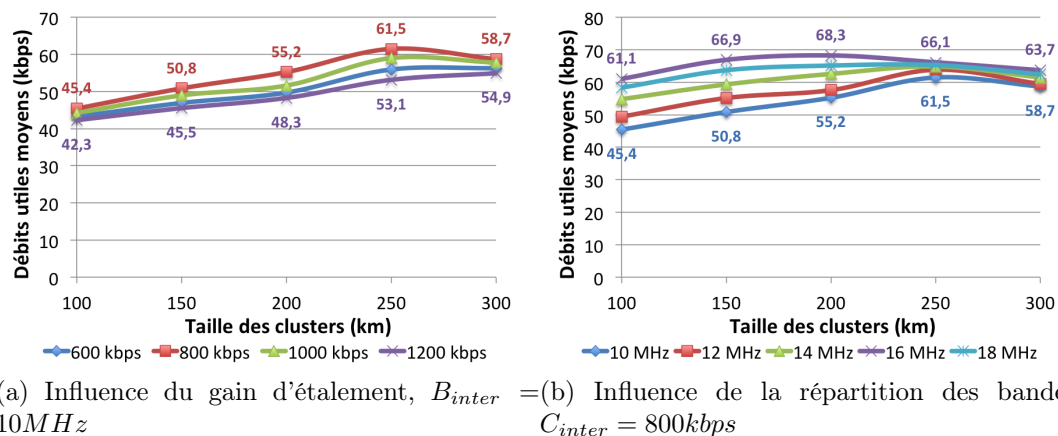


FIGURE 5.20 – Statistiques sur les débits moyens par avion, utilisation des clusters

D'après les résultats précédents, les débits moyens par avion les plus élevés sont donc obtenus pour une taille de clusters de 200 km, avec une bande de 16 MHz et un gain d'étalement de 20 pour les communications inter-clusters. Les figures 5.21, 5.22 et 5.23 montrent respectivement les statistiques sur les débits, les délais et les pertes obtenues avec ces paramètres.

Moyenne (kbps)	68,3
Médiane (kbps)	74,6
Ecart-type (kbps)	54,4
Fairness	0,58

FIGURE 5.21 – Statistiques sur les débits, utilisation des clusters

Moyenne (s)	0,093
Maximum pour 95% des paquets (s)	0,390

FIGURE 5.22 – Statistiques sur les délais, utilisation des clusters

Pourcentage de paquets reçus avec succès (%)	99,2
Pourcentage de paquets détruits par interférences (%)	0,8
Pourcentage de paquets détruits par interférences au niveau des stations (%)	0,6
Pourcentage de paquets détruits par débordement de file d'attente (%)	0,0

FIGURE 5.23 – Statistiques sur les pertes, utilisation des clusters

#### 5.3.4.2 Analyse des résultats

Pour le meilleur scénario, on obtient donc un débit utile moyen de 68,3 kbps par avion (figure 5.21), contre 73,4 kbps dans le meilleur scénario avec un algorithme de routage de type plus court chemin. La fairness est elle-aussi plus faible. Les statistiques sur les délais (figure 5.22) et les pertes (figure 5.23) sont quant-à-elles meilleures, mais cela s'explique notamment par une charge du réseau plus faible.

L'algorithme de routage hiérarchique que nous avons proposé ne permet donc pas d'améliorer les performances du système en zone océanique, contrairement à ce que nous avons pu observer en zone continentale dans le chapitre précédent.

En zone continentale, nous avons obtenus les meilleures performances pour une taille de cluster de 150 km, une bande de 16 MHz et une capacité de 1200 kbps pour les communications inter-clusters. On a alors en moyenne 37 clusters, et donc 37 cluster-heads qui communiquent sur la même bande de 16 MHz. En zone océanique, elles sont obtenues pour une taille de cluster de 200 km. On a alors 103 clusters, et donc 103 cluster-heads. Le niveau d'interférence sera donc plus élevé. En conséquence, le gain d'étalement optimal est plus élevé en zone océanique, la capacité des liaisons inter-clusters est donc plus faible, ce qui limite les performances du système.

### Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances du système en zone océanique. Nous avons considéré le pire cas où tous les avions veulent émettre simultanément à destination d'un serveur au sol. Nous l'avons fait avec du trafic UDP en augmentant progressivement le débit généré par chaque avion, puis avec du trafic TCP en considérant une source gloutonne au niveau de chaque avion.

Dans la première partie de l'étude avec du trafic UDP, nous avons montré que la taille des paquets n'a pas d'influence significative sur les performances du système. Nous avons ensuite montré que la portée optimale des connexions était de 300 km. Enfin, nous avons vu que, pour le trafic UDP que nous avons généré, le gain d'étalement maximisant les débits utiles moyens était de 25, ce qui correspond à une capacité des connexions de 800 kbps. On obtient alors un débit utile d'environ 77 kbps par avion.

Dans la seconde partie de l'étude avec du trafic TCP, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'algorithme de routage de type plus court chemin, pour des paquets de 1500 octets, une portée maximale des connexions de 300 km et un gain d'étalement de 25. On obtient alors un débit utile moyen de 73,4 kbps par avion.

On a donc des performances supérieures à la zone continentale. Cela s'explique notamment par la densité d'avions plus faible. Le niveau d'interférence est donc réduit, ce qui permet d'utiliser un gain d'étalement plus faible, et donc une capacité des connexions plus élevée.

# Chapitre 6

## Etude de performances avec des applications réalistes

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>155</b>
<b>6.1 Trafic ATC et AOC en zone continentale</b> . . . . .	<b>155</b>
6.1.1 Présentation du scénario . . . . .	155
6.1.2 Résultats de simulation . . . . .	157
6.1.3 Analyse des résultats . . . . .	158
6.1.4 Etude de la charge des stations . . . . .	158
<b>6.2 Transmission automatique de données de vol en zone océanique</b>	<b>159</b>
6.2.1 Présentation du scénario . . . . .	159
6.2.2 Résultats de simulation . . . . .	161
6.2.3 Analyse des résultats . . . . .	163
6.2.4 Etude de la charge des stations . . . . .	164
<b>6.3 Applications web et mails pour les passagers en zone océanique</b>	<b>165</b>
6.3.1 Présentation du scénario . . . . .	165
6.3.2 Résultats de simulation . . . . .	166
6.3.3 Analyse des résultats . . . . .	166
6.3.4 Etude de la charge des stations . . . . .	166
<b>Résumé du chapitre</b> . . . . .	<b>168</b>

---



## Introduction

Jusqu'ici, nous avons étudié le pire cas où tous les avions veulent émettre en permanence à destination du sol. Nous avons ainsi cherché les limites du réseau en le saturant avec du trafic UDP puis avec des sources "TCP Greedy" au niveau de chaque avion. Dans ce chapitre, nous allons étudier les performances du réseau ad hoc aéronautique avec des applications réalistes.

Tout d'abord, nous allons étudier les performances du système avec du trafic ATC et AOC en zone continentale. Ensuite, nous étudierons une application de transmission automatique de données de vol en zone océanique. Enfin, nous considérerons le trafic généré par les passagers pour des applications web et mails.

## 6.1 Trafic ATC et AOC en zone continentale

### 6.1.1 Présentation du scénario

Dans cette partie, nous nous intéressons au trafic ATC et AOC. Il s'agit des services opérationnels pour le contrôle aérien et les compagnies aériennes. Ces services sont répertoriés dans le COCR (Communications Operating Concepts and Requirements) [COCR 2002]. Il s'agit d'un document rédigé conjointement par Eurocontrol et la FAA.

Le COCR propose tout d'abord une taxonomie de l'ensemble des services ATC pour le contrôle aérien. Ils sont ainsi classés en huit catégories :

- 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
- les services divers.

Le COCR définit ensuite les 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. Le COCR décrit ainsi une trentaine d'applications pour le contrôle aérien et une vingtaine pour les compagnies.

Ensuite, le COCR propose une estimation du trafic généré par chacun des services ATC et AOC. Il donne ainsi la taille et le nombre de paquets envoyés à chaque utilisation du service. Il reste alors à déterminer la fréquence de l'utilisation de chaque service. En fait, celle-ci dépend de la phase de vol dans laquelle se trouve l'avion. Le service DCL (Departure Clearance) par exemple permet au contrôleur aérien d'envoyer à l'avion son

autorisation de décollage par la liaison de données numériques. Il est donc seulement utilisé lorsque l'avion est au sol.

Le COCR définit ainsi cinq domaines aériens, correspondant aux différentes phases de vol de l'avion. Ces domaines sont présentés dans le tableau 6.1. Pour chacun de ces domaines, le COCR donne une estimation de la fréquence d'utilisation de chaque service.

Domaine	Définition du COCR
APT (Airport)	Le domaine APT, ou aéroport, est un cylindre de 10 nautiques de diamètre et de 5000 pieds de hauteur autour d'un aéroport.
TMA (Terminal Manoeuvring Area)	Le domaine TMA, ou approche, est un cylindre de 50 nautiques de diamètre autour d'un aéroport. Il est au dessus du domaine APT. Il commence donc à une altitude de 5000 pieds et s'étend jusqu'au FL245, soit 24500 pieds.
ENR (En Route)	Le domaine ENR est au dessus du domaine TMA en espace continental. Il commence donc au FL245 et s'étend jusqu'au FL600.
ORP (Oceanic, Remote, Polar)	Le domaine ORP est l'équivalent du domaine ENR pour les zones océaniques ou polaires.
AOA (Autonomous Operations Area)	Le domaine AOA est un espace aérien autonome, c'est-à-dire non contrôlé.

TABLE 6.1 – Définition des domaines aériens du COCR

Différentes études [Eurocontrol 2006, CNES 2009, Mahmoud 2012] ont ensuite été réalisées, notamment par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) [CNES 2009] et par Eurocontrol [Eurocontrol 2006], pour modéliser le trafic généré par l'ensemble de ces services pour un avion donné, en fonction des différentes phases de vol. Toutes ces études donnent des résultats similaires en terme de débit généré, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de bits par seconde en moyenne par avion selon les domaines.

Dans notre étude, nous considérons les avions en zone continentale. Nous nous sommes donc intéressés au domaine de vol "En Route". En effet, les avions sont dans ce domaine de vol pendant toute la phase de croisière, c'est-à-dire pendant la plus grande partie du vol. D'après [Eurocontrol 2006], pour un avion donné, le trafic généré par l'ensemble des services décrits dans le COCR dans le domaine "En Route" peut être modélisé par :

- une taille de paquet uniformément distribuée entre 32 et 265 octets
- une fréquence moyenne d'envoi des paquets de 1,56 paquets par minute.

Le débit généré moyen est alors d'environ 30 bps par avion. Nous avons donc implémenté ces paramètres dans notre modèle pour voir les performances du système avec ce type de trafic.

### 6.1.2 Résultats de simulation

Nous considérons ici les avions volant en espace continental sur le ciel français. Nous considérons une portée maximale des connexions de 150 km. Au niveau transport, nous allons regarder les performances avec les deux protocoles UDP et TCP. Nous verrons ainsi les performances avec et sans fiabilité de bout en bout. Nous étudierons en particulier l'influence du gain d'étalement.

La figure 6.1 montre les statistiques pour le scénario UDP et la figure 6.2 pour le scénario TCP. Nous avons fait varier la capacité de connexions de 200 à 2000 kbps, ce qui correspond à un gain d'étalement variant de 100 à 10. La figure 6.2 montre les statistiques sur les pertes, avec le pourcentage de paquets correctement reçus par le serveur pour le scénario UDP, et le nombre maximum de retransmissions d'un paquet pour le scénario TCP.

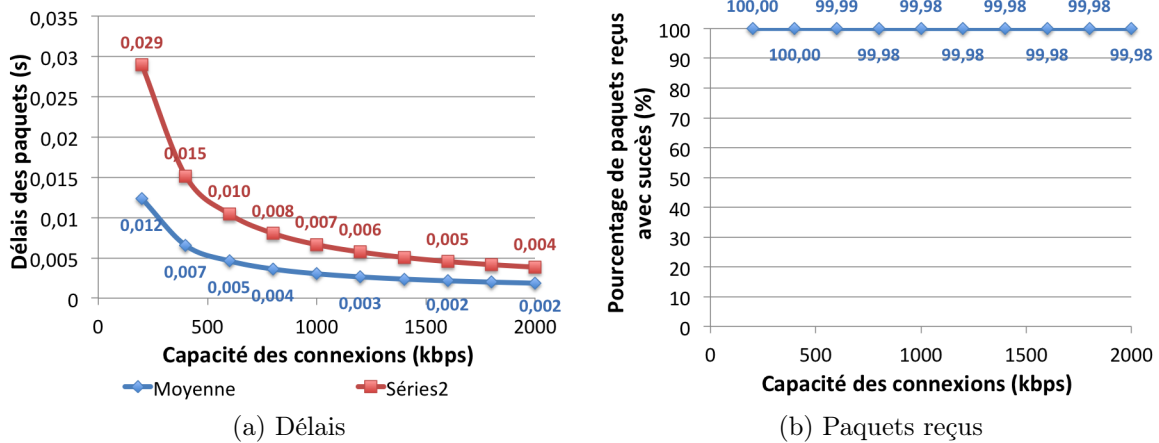


FIGURE 6.1 – Statistiques pour le scénario UDP, trafic ATC/AOC

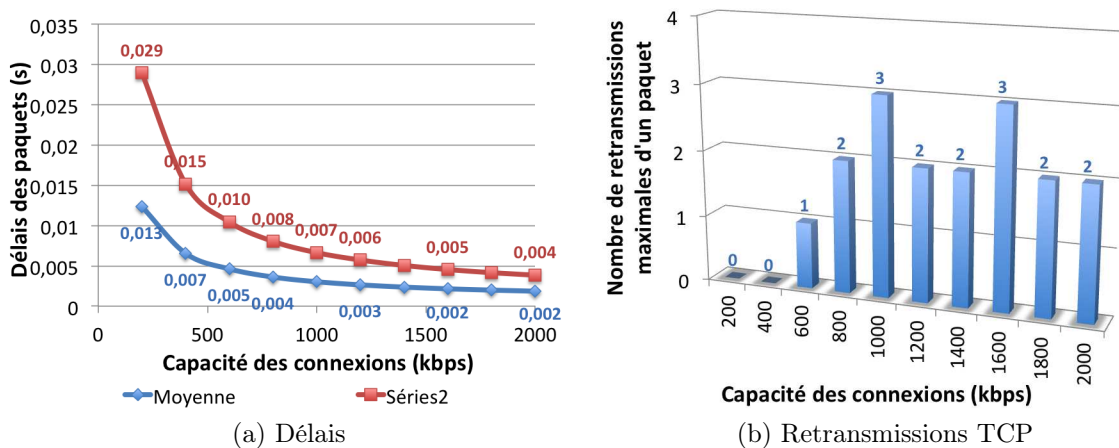


FIGURE 6.2 – Statistiques pour le scénario TCP, trafic ATC/AOC

### 6.1.3 Analyse des résultats

Pour le scénario UDP, les paquets sont envoyés sans garantie de fiabilité de bout en bout. Les paquets éventuellement perdus ne sont pas retransmis. On constate qu'en faisant varier le gain d'étalement de 10 à 100, le pourcentage de paquets reçus avec succès par le serveur au sol est toujours d'au moins 99,98% (figure 6.1b). Les délais les plus importants sont obtenus lorsque la capacité des connexions est minimale, soit 200 kbps, ce qui correspond à un gain d'étalement de 100. On a alors un délai moyen de 13 ms et un délai maximum pour 95% des paquets de 29 ms (figure 6.1a).

Pour le scénario TCP, on garantit la fiabilité de la transmission des paquets de bout en bout. Chaque avion peut détecter les pertes et retransmettre les paquets éventuellement perdus. En fait, dans TCP, le nombre de retransmissions maximales d'un paquet est borné. La valeur par défaut est de 16. Après 16 tentatives de retransmissions d'un même paquet, celui-ci est définitivement perdu. Dans nos simulations avec le trafic ATC et AOC, tous les paquets envoyés par les avions sont correctement reçus par le serveur. La figure 6.2b montre que, pour un gain d'étalement variant de 10 à 100, le nombre maximum de retransmission nécessaire pour transmettre un même paquet est de 3. Au niveau des délais, on obtient des résultats très similaires au scénario UDP (figure 6.1a).

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, le COCR définit des exigences pour chacun des services ATC et AOC. Au niveau du délai maximum pour 95% des paquets, les exigences les plus contraignantes sont de 3,8 secondes pour la phase 1, et de 740 ms pour la phase 2. Les réseaux ad hoc aéronautiques répondent donc parfaitement à ces exigences.

### 6.1.4 Etude de la charge des stations

Nous nous sommes ensuite intéressés à la charge des stations. La figure 6.3a montre l'évolution du débit reçu par chacune des cinq stations pendant une heure de simulation. On constate que le trafic ATC et AOC généré par l'ensemble des avions en vol pendant cette période est de l'ordre de quelques kbps. La figure 6.3b montre la répartition de la charge entre les cinq stations pour une journée complète de trafic. On constate que la station située à Paris est la plus chargée. Elle reçoit environ un tiers du trafic généré par l'ensemble des avions. On pourrait utiliser cette répartition de charge pour optimiser la position des stations sol.

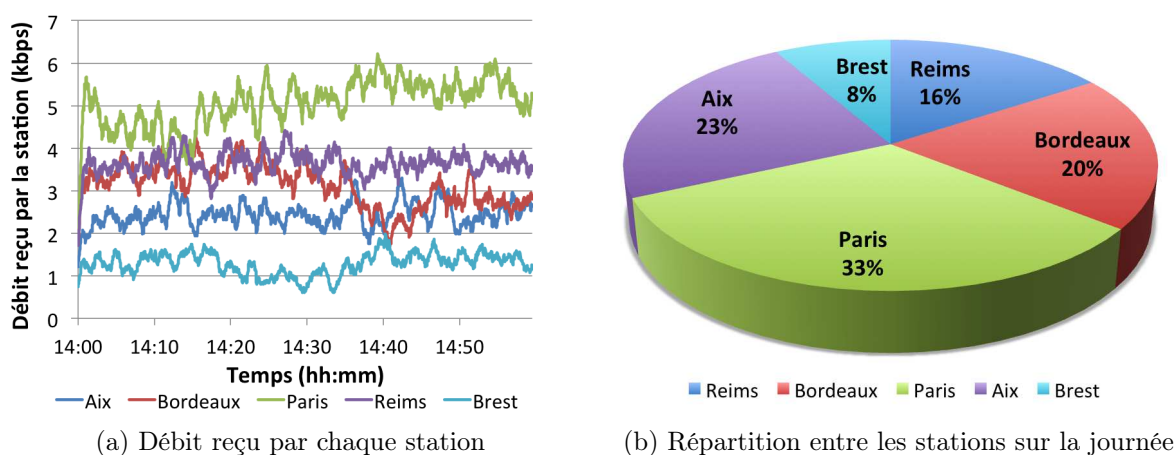


FIGURE 6.3 – Charge des stations, trafic ATC/AOC

## 6.2 Transmission automatique de données de vol en zone océanique

### 6.2.1 Présentation du scénario

Le 1er juin 2009, le vol AF447 d'Air France s'est abîmé dans l'océan atlantique sur sa route entre Rio de Janeiro et Paris. Plusieurs campagnes de recherche sous-marines ont alors été entreprises pour localiser l'épave, ainsi que les enregistreurs de vol, afin de comprendre les circonstances de l'accident. Ces recherches ont été particulièrement difficiles, notamment à cause de la profondeur et de l'incertitude sur le lieu exact du crash. Le coût des trois premiers mois de recherche a été estimé par le BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile) à 40 millions de dollars. Les recherches ont finalement duré près de deux ans. L'épave et les deux boîtes noires ont été retrouvées au printemps 2011 grâce à un robot sous-marin.

Suite à cet accident, ainsi que d'autres opérations difficiles de récupération des enregistreurs de vol en mer, le BEA a créé un groupe de travail appelé "Récupération de Données de Vol" pour examiner les nouvelles technologies permettant de faciliter la localisation et la récupération des enregistreurs de vol. Le groupe de travail a ainsi étudié des nouvelles technologies de localisation des épaves, des nouvelles technologies d'enregistreurs de vol, ainsi que des applications de transmission des données de vol. Chacune de ces solutions a été évaluée, notamment en fonction de sa faisabilité technique et de son coût. Le rapport de ce groupe de travail a été publié dans [BEA 2010].

Dans cette partie, nous allons nous intéresser en particulier aux six applications de transmission automatique de données de vol proposées. L'idée générale est de transmettre automatiquement pendant tout le vol des informations permettant, le cas échéant, de

localiser l'avion, et donc les enregistreurs de vol, en cas d'accident. Les enregistreurs de vol, ou "boîtes noires", sont en fait constitués de deux équipements : le FDR (Flight Data Recorder), qui enregistre les paramètres de vol, et le CVR (Cockpit Voice Recorder) qui enregistre les conversations et sons dans le cockpit.

Parmi les six applications proposées, les trois premières concernent le CVR. Elles proposent la retransmission audio et/ou vidéo du cockpit pendant toute la durée du vol. Le débit généré par avion va alors de 256 kbps à 8 Mbps. Les trois suivantes, qui ont obtenues la meilleure évaluation du groupe de travail, concernent le FDR. La première propose la transmission de trois paramètres de vol toutes les secondes. Ces trois paramètres sont la latitude, la longitude et l'altitude de l'avion. Le débit généré par avion est alors de 0,072 kbps. La seconde propose la transmission des paramètres de vol essentiels, concernant la position, la vitesse et l'attitude de l'avion. Cela représente un débit de 0,768 kbps par avion. Enfin, la dernière propose la transmission en continu de tous les paramètres de vol enregistrés dans le FDR. Le débit généré par avion serait alors au maximum de 12,288 kbps.

Suite à ce rapport, le groupe FLIRECP (Flight Recorder Panel) de l'OACI a proposé en juin 2010 une modification de l'annexe 6 de l'OACI pour obliger les avions civils à installer un dispositif permettant de transmettre automatiquement des informations suffisantes pour déterminer la position d'un accident sur l'eau dans un rayon de 4 nautiques, soit environ 7,4 km, à partir de 2018. Si cette modification est approuvée par la commission de l'OACI, de telles applications devront être implémentées pour les avions volant en espace océanique. C'est en effet là que la récupération des enregistreurs de vol est généralement la plus difficile en cas d'accident.

Dans le rapport, le BEA recommande l'utilisation du SATCOM pour ces applications en espace océanique. Il souligne toutefois les problèmes de connectivité avec le système Inmarsat en cas d'accident. En effet, la majorité des antennes Inmarsat embarquées sur des avions long-courriers sont des antennes à gain élevé montées sur le dessus de l'avion. Elles sont orientables et commandées par le système avionique Satcom. Le système calcule l'élévation et l'azimut du satellite en visibilité et les transmet à l'antenne. Malheureusement, lorsque l'avion sort de son domaine de vol, c'est-à-dire lorsqu'il est dans une position inusuelle, ce qui peut arriver en cas d'accident, le pointage du satellite par l'antenne n'est parfois plus possible. L'émetteur-récepteur passe alors en mode "panne de liaison". Il va alors tenter de rétablir la liaison sans couper l'appel pendant 11 secondes. Si la connexion est rétablie pendant ce délai, la transmission de données peut reprendre immédiatement, sinon, l'appel sera coupé. Le système devra alors se reconnecter, obtenir une nouvelle attribution de canal, ce qui peut prendre jusqu'à 40 secondes.

Le réseau ad hoc aéronautique pourrait donc être intéressant pour de telles applications. L'utilisation d'antennes omnidirectionnelles permet en effet de pouvoir émettre dans toutes les configurations de l'avion.

## 6.2.2 Résultats de simulation

Nous considérons ici les avions volant en espace océanique, avec une portée maximale des connexions de 300 km. Nous regardons les performances du système avec les trois applications présentées précédemment. Au niveau transport, nous envisageons les deux protocoles UDP et TCP pour voir les performances avec et sans fiabilité de bout en bout. Nous étudions en particulier l'influence du gain d'étalement.

### 6.2.2.1 Application 1

Pour la première application, le débit généré par avion est de 0,072 kbps. Sachant que les messages sont envoyés toutes les secondes, on suppose que chaque avion génère un paquet de 72 bits toutes les secondes. La figure 6.4 montre les statistiques sur les délais et les pertes pour le scénario UDP, la figure 6.5 pour le scénario TCP.

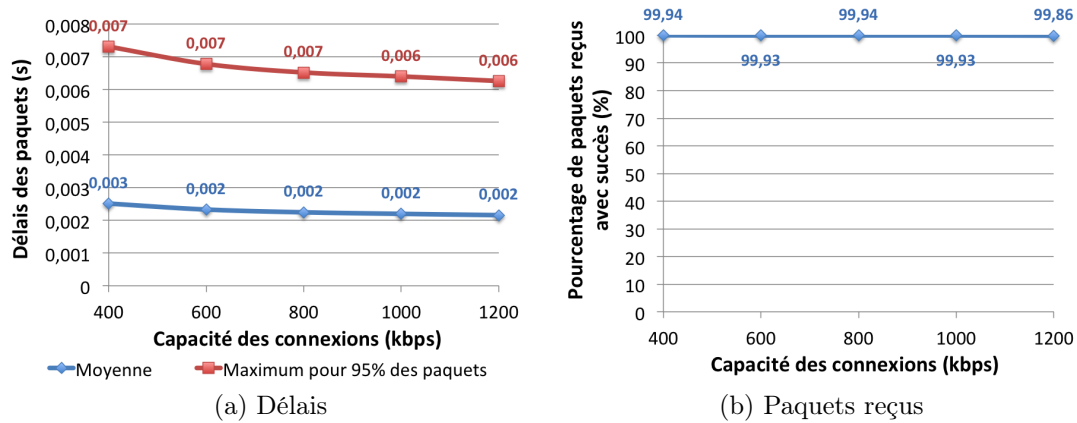


FIGURE 6.4 – Statistiques pour le scénario UDP, application 1 de transmission des données de vol

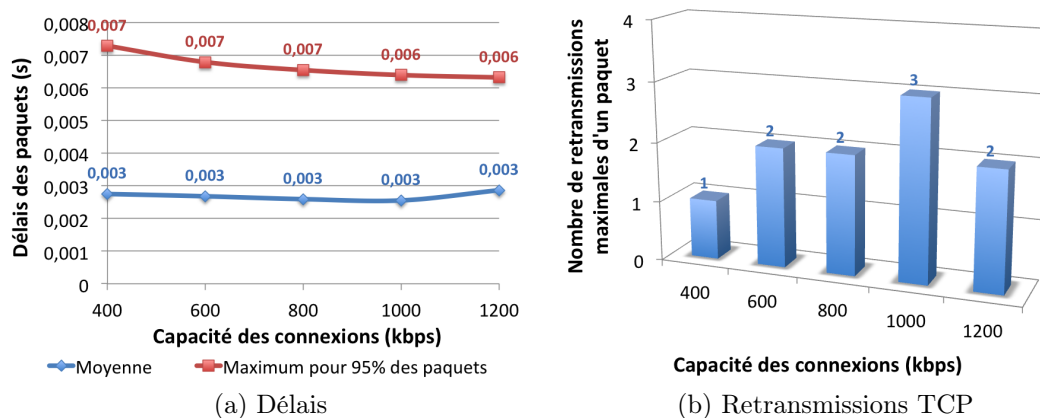


FIGURE 6.5 – Statistiques pour le scénario TCP, application 1 de transmission des données de vol

### 6.2.2.2 Application 2

Pour la seconde application, le débit généré par avion est de 0,768 kbps. Sachant que les messages sont envoyés toutes les secondes, on va donc supposer que chaque avion génère un paquet de 768 bits toutes les secondes. La figure 6.6 montre les statistiques sur les délais et les pertes pour le scénario UDP, la figure 6.7 pour le scénario TCP.

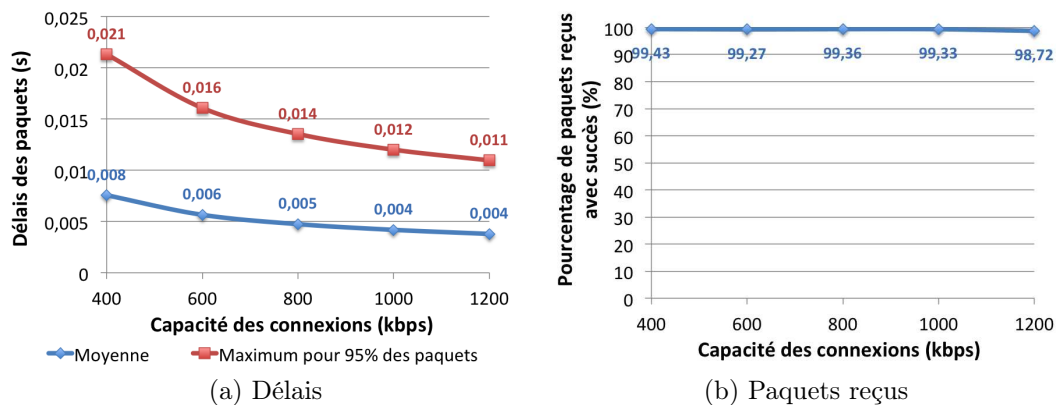


FIGURE 6.6 – Statistiques pour le scénario UDP, application 2 de transmission des données de vol

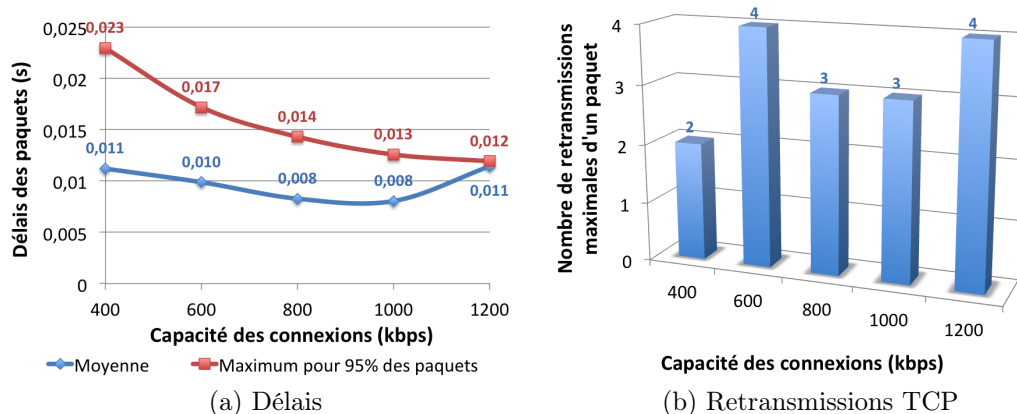


FIGURE 6.7 – Statistiques pour le scénario TCP, application 2 de transmission des données de vol

### 6.2.2.3 Application 3

Pour la seconde application, le débit généré par avion est de 12,288 kbps. Sachant que les messages sont envoyés toutes les secondes, on va donc supposer que chaque avion génère un paquet de 12288 bits toutes les secondes. La figure 6.8 montre les statistiques sur les délais et les pertes pour le scénario UDP, la figure 6.9 pour le scénario TCP.

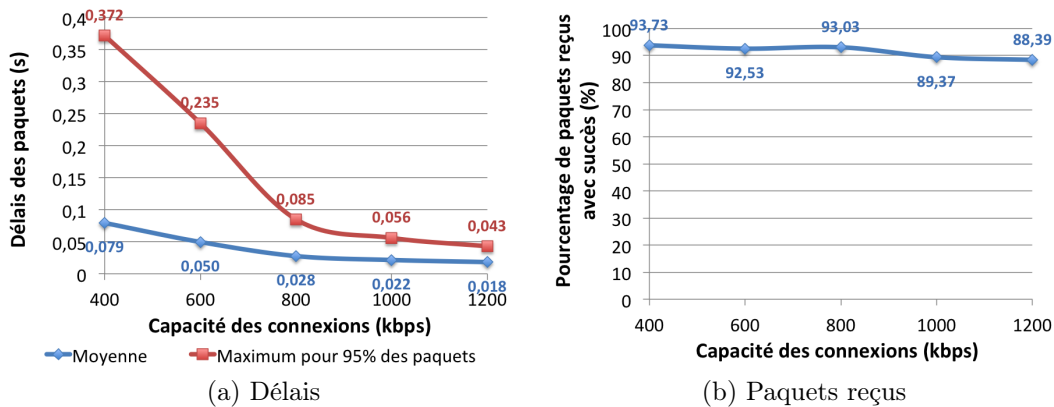


FIGURE 6.8 – Statistiques pour le scénario UDP, application 3 de transmission des données de vol

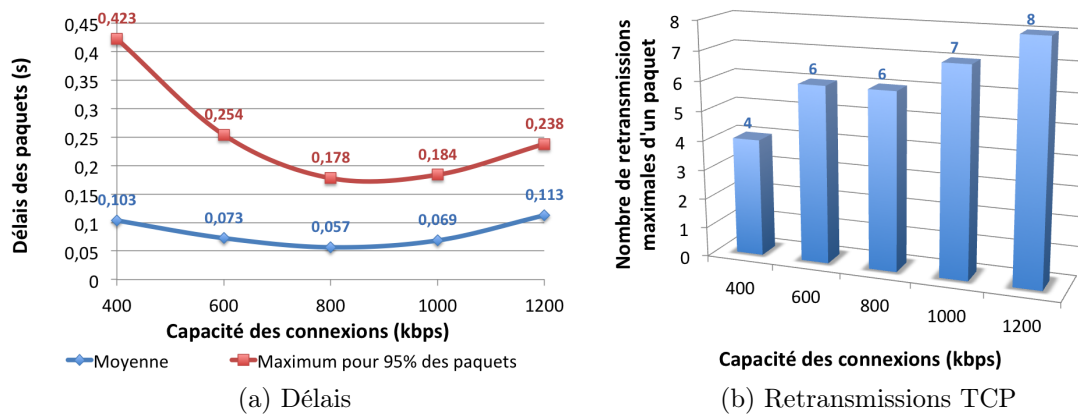


FIGURE 6.9 – Statistiques pour le scénario TCP, application 3 de transmission des données de vol

### 6.2.3 Analyse des résultats

Les résultats précédents montrent que les trois applications de transmissions automatiques de données de vol sont envisageables avec le réseau ad hoc aéronautique. Pour la première application, la plus légère, on constate que, même sans fiabilité de bout en bout, plus de 99,8 % des paquets envoyés sont correctement reçus par le serveur au sol (figure 6.4b), quelque soit le gain d'étalement variant de 16 à 50. Avec TCP, tous les paquets sont correctement reçus par le serveur, avec au maximum trois retransmissions (figure 6.5b). Le délai maximum pour 95% des paquets est alors de 7 ms, ce qui est inférieur aux exigences du COCR.

Pour la seconde application, qui représente un débit généré d'environ 0,8 kbps par avion, plus de 98,7 % des paquets envoyés sont correctement reçus dans le scénario UDP

(figure 6.6b). Avec TCP, tous les paquets sont correctement transmis, avec au maximum 4 retransmissions. Le délai maximum pour 95 % des paquets est alors de 23 ms, avec un gain d'étalement de 50.

Pour la dernière application, le débit généré par avion est d'environ 12,3 kbps. Dans le scénario UDP, le pourcentage de paquets reçus avec succès varie de 88,4 à 93,7 %, selon le gain d'étalement (figure 6.8b). Avec TCP, tous les paquets envoyés par les avions sont là-aussi correctement reçus par le serveur. Le nombre de retransmissions requis est au maximum de 8 (figure 6.9b). Le délai maximum pour 95% des paquets est alors au maximum de 423 ms (figure 6.9a). Ce délai est donc inférieur aux exigences les plus contraignantes du COCR, à savoir un délai maximum pour 95% des paquets de 740 ms.

Le réseau ad hoc aéronautique serait donc une solution intéressante pour de telles applications. On pourrait même envisager d'envoyer les données uniquement aux avions en visibilité, qui les enregistreraient alors directement à bord. Les données de chaque avion seraient ainsi répliquées sur plusieurs avions. On n'aurait donc plus besoin de les transmettre au sol pendant le vol. La charge globale du réseau serait donc réduite.

### 6.2.4 Etude de la charge des stations

Nous nous sommes ensuite intéressés à la charge des stations avec la troisième application. Chaque avion génère environ 12 kbps. La figure 6.10a montre l'évolution du débit reçu par les cinq stations les plus chargées de 14h à 15h. On a alors environ 400 avions en vol. La station "Canada1" est alors la plus chargée. Elle reçoit un trafic moyen de 800 kbps. La figure 6.10b montre ensuite la répartition de la charge du réseau entre les différentes stations pendant une journée complète. On constate que les stations situées au Canada et celle en Irlande sont les plus chargées. Il conviendrait alors d'augmenter le nombre de stations dans ces zones pour améliorer les performances du système.

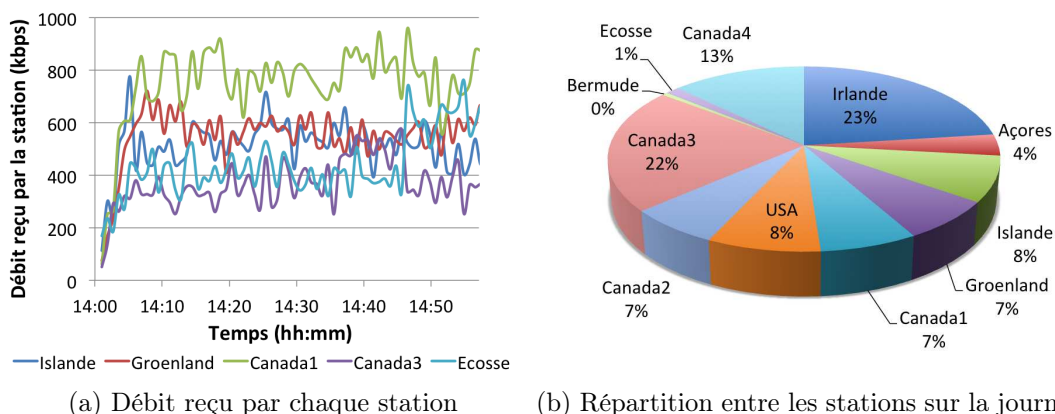


FIGURE 6.10 – Charge des stations, application 3 de transmission des données de vol

## 6.3 Applications web et mails pour les passagers en zone océanique

### 6.3.1 Présentation du scénario

Dans cette partie, nous considérons le trafic APC généré par les passagers. Du point de vue réseau, chaque avion se comporte comme un réseau local. Les passagers se connectent via un point d'accès WiFi ou un réseau filaire Ethernet. Nous avons utilisé Opnet Modeler pour modéliser ce réseau. Il est illustré dans la figure 6.11. Nous faisons l'hypothèse de 50 utilisateurs par avion. Les applications seront limitées à la navigation web et à l'échange de mail. Le trafic généré par chaque avion se compose donc essentiellement de requêtes HTTP, ainsi que de mails envoyés et reçus via les protocoles SMTP, POP et IMAP. Nous avons utilisé les profils d'utilisation par défaut du logiciel Opnet Modeler.

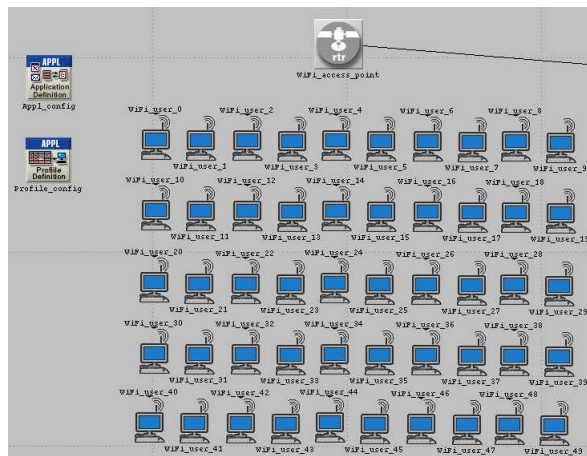


FIGURE 6.11 – Exemple de réseau WiFi pour les passagers

La figure 6.12 montre un exemple de trafic généré par un avion.

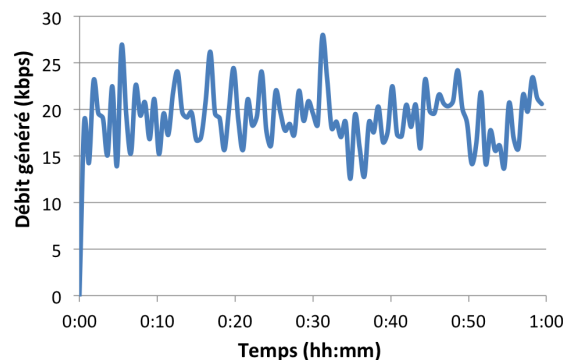


FIGURE 6.12 – Exemple de trafic généré par un avion

### 6.3.2 Résultats de simulation

Nous considérons ici les avions volant en espace océanique. Nous considérons une portée maximale des connexions de 300 km. La figure 6.13 montre les résultats obtenus en termes de délais et de nombre maximum de retransmissions TCP, en fonction de la capacité des connexions, et donc du gain d'étalement.

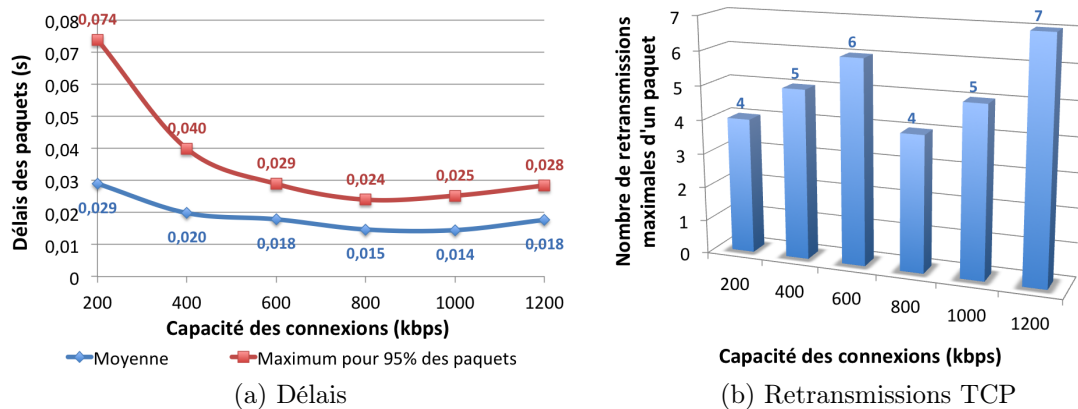


FIGURE 6.13 – Statistiques sur les délais et les pertes, trafic APC

### 6.3.3 Analyse des résultats

Les résultats précédents montrent que le réseau ad hoc aéronautique peut aussi être envisagé comme un réseau d'accès pour joindre le sol pour des applications passagers. En considérant uniquement des applications web et des échanges de mails, on constate que le réseau ad hoc est tout à fait capable de supporter la charge de trafic généré par 50 utilisateurs dans chaque avion. Le délai moyen des paquets pour traverser le réseau ad hoc aéronautique varie de 14 à 29 ms, selon le gain d'étalement, ce qui est tout à fait satisfaisant pour une navigation confortable.

### 6.3.4 Etude de la charge des stations

La figure 6.14 montre l'évolution du débit reçu pour les cinq stations les plus chargées entre 14h et 15h. La station la plus chargée est ainsi capable de recevoir un débit cumulé d'environ 1300 kbps en moyenne. La répartition de la charge entre les différentes stations sur la journée est similaire à celle obtenue dans la partie 6.2.4.

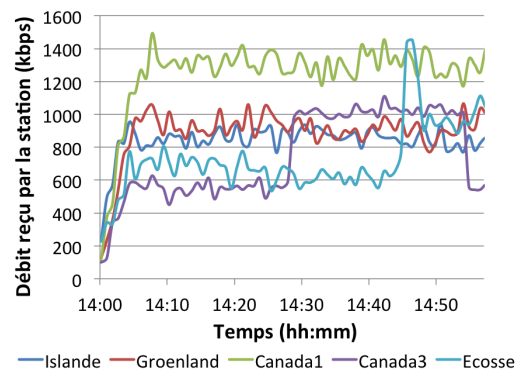


FIGURE 6.14 – Charge des stations, trafic APC

### Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié les performances du réseau ad hoc aéronautique avec des applications réalistes. Tout d'abord, nous avons étudié le trafic ATC et AOC défini dans le COCR. Il s'agit de l'ensemble des services opérationnels pour le contrôle aérien et les compagnies aériennes. Nous avons montré qu'en zone continentale, le réseau ad hoc permettait de satisfaire les exigences définies dans le COCR en termes de délais.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à trois applications de transmissions automatiques de données de vol. Ces applications ont été proposées par le BEA. Il s'agit de transmettre en continu pendant le vol des informations permettant de faciliter la localisation de l'avion, et donc des enregistreurs de vol, en cas d'accident. De telles applications pourraient être rendues obligatoires par l'OACI en zone océanique pour l'ensemble des avions civils à partir de 2018. Là-aussi, nous avons montré que le réseau ad hoc aéronautique pouvait être envisagé pour toutes ces applications.

Enfin, nous nous sommes intéressés aux communications des passagers. Nous avons fait l'hypothèse d'une utilisation limitée à la navigation sur Internet et à l'échange de mails. Nous faisons l'hypothèse de 50 utilisateurs par avion, ce qui paraît raisonnable car un tel service serait a priori payant pour les passagers. Nous avons ainsi montré que le trafic généré par l'ensemble des avions était parfaitement supporté par le réseau ad hoc aéronautique.

Le système que nous avons proposé permet donc d'envisager un large spectre d'applications, que ce soit pour le contrôle aérien, pour les compagnies ou pour les passagers.

# Conclusion et futurs travaux

Cette thèse sur les réseaux ad hoc aéronautiques s'inscrit dans le contexte des moyens de communications aéronautiques sol-bord. Les capacités offertes par les moyens existants ne permettront pas de répondre aux besoins et attentes des compagnies et des passagers qui souhaitent disposer de nouvelles applications communicantes avec le sol pendant les vols. De plus, ces nouveaux besoins s'inscrivent dans un contexte de forte croissance du trafic aérien.

Ainsi, de nombreux travaux sont en cours pour étudier de nouveaux systèmes de communication, notamment dans le cadre du projet européen SESAR et de son équivalent américain NextGen. L'objectif de ces projets est de proposer et spécifier des systèmes innovants dans les domaines des communications, de la navigation et de la surveillance, pour satisfaire notamment les besoins du contrôle aérien à l'horizon 2020.

Dans le cadre des communications, les solutions envisagées sont généralement des systèmes cellulaires basés sur des communications directes avec des stations sol pour les zones continentales, et des communications par satellite pour les zones océaniques. Dans cette thèse, nous étudions un système de communication innovant pour les communications aéronautiques basé sur l'utilisation d'avions tiers pour relayer des données transmises par un avion n'étant pas en visibilité d'une station sol. Cette solution est appelée réseaux ad hoc aéronautiques.

Les avantages attendus par cette approche sont nombreux. D'une part, les réseaux ad hoc aéronautiques nécessiteront moins de stations sols que les réseaux cellulaires pour une même couverture en zone continentale. Ceci permettra d'obtenir des coûts de déploiement et opérationnels avantageux. D'autre part, les réseaux ad hoc aéronautiques pourront aussi être proposés comme complément aux seules solutions existantes à ce jour en zone océanique : la liaison de données HF et les communications par satellites.

## Démonstration de faisabilité

Dans la première partie de cette thèse, nous nous sommes intéressés à la démonstration de faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques, compte-tenu de l'évolution de la densité du trafic aérien dans le temps en zone continentale puis en zone océanique. Cette

première partie a permis d'estimer la portée des connexions nécessaire pour garantir une connectivité satisfaisante dans le réseau ad hoc. Nous avons utilisé des données de trafic réel en espace continental sur le ciel français et en espace océanique entre l'Europe et l'Amérique du Nord.

Nous avons en particulier démontré qu'en espace continental, une portée de communication de 150 km permet de connecter plus de 90% des avions en moyenne sur la journée, et plus de 99% en moyenne entre 6h et 21h, c'est-à-dire lorsque le trafic aérien est le plus important. En zone océanique, la densité d'avions est plus faible. Les portées de communication nécessaires pour obtenir la même connectivité sont donc plus importantes. Il faut par exemple une portée de 350 km pour connecter plus de 90% des avions en moyenne sur une journée.

## Conception du système

Ensuite, nous avons proposé une architecture permettant d'étudier les performances d'un réseau ad hoc aéronautique dans différents contextes. Nous nous sommes concentrés sur l'étude des communications des avions vers le sol car il s'agit de la voie la plus contraignante puisque chaque station sol recevra les flux de données de différents avions et pourra représenter un goulet d'étranglement. Dans l'ensemble de l'étude, le réseau ad hoc aéronautique est considéré comme un moyen d'accès permettant de joindre une station sol.

Nous avons proposé un bilan de liaison des connexions entre avions. Nous avons fait l'hypothèse de l'utilisation d'antennes omnidirectionnelles pour simplifier l'intégration, et donc réduire le coût du système, d'une puissance d'émission maximale de 50 W, d'une bande occupée de 20 MHz et d'une fréquence de la porteuse de 2 GHz.

Nous avons ensuite proposé l'utilisation d'un accès multiple par étalement de spectre à séquence directe (CDMA). L'un des avantages de cette méthode d'accès est de permettre plusieurs transmissions simultanées grâce à l'utilisation de codes d'étalement différents pour chaque transmission. Il n'est donc pas nécessaire de synchroniser les nœuds. Cependant, dans le cas d'un réseau asynchrone, il n'existe pas de famille de codes d'étalement parfaitement orthogonaux. Il y a donc des interférences d'accès multiples entre les différents avions en cas de transmissions simultanées. Nous avons développé un modèle d'estimation de ces interférences d'accès multiples au niveau de chaque avion, en prenant en compte le trafic généré par l'ensemble des autres avions du réseau, le facteur d'étalement et la capacité de détection et de correction d'erreurs de transmission.

La détermination du chemin suivi par les paquets de données est un point clef dans la conception d'un réseau ad-hoc. Nous avons étudié deux approches. La première utilise un algorithme classique de type "plus court chemin". On suppose ainsi que chaque avion

---

est connecté à la station la plus proche par le chemin le plus court. Ensuite, nous avons utilisé un algorithme hiérarchique basé sur des clusters. Au niveau transport, nous avons implémenté les deux protocoles TCP et UDP. Enfin, nous avons implémenté au niveau de chaque avion un générateur de trafic paramétrable permettant de tester différentes applications.

## Dimensionnement du système

Pour étudier les performances du réseau ad hoc aéronautiques, nous avons tout d'abord considéré le pire cas où tous les avions veulent émettre simultanément et en permanence à destination d'une station au sol. Notre objectif est de déterminer la capacité offerte aux avions par le réseau en optimisant les principaux paramètres : portée des connexions, facteur d'étalement, taille des paquets. L'étude est menée en zone continentale et en zone océanique avec du trafic UDP et du trafic TCP. Le gain apporté par le routage hiérarchique est également évalué.

Dans chaque cas, nous avons montré que la taille des paquets n'avait pas d'influence significative sur les performances du système. Ensuite, nous avons montré que le débit utile moyen par avion est maximum lorsque la portée des connexions est minimale. En tenant compte des contraintes pour avoir une bonne connectivité du réseau pendant la journée, la portée optimale des connexions est donc de 150 km en zone continentale, et 300 km en zone océanique.

Nous avons ensuite étudié l'influence du gain d'étalement. En zone continentale, le gain d'étalement optimal est de 50, ce qui correspond à une capacité des connexions de 400 kbps. On obtient alors un débit utile moyen de 39,5 kbps par avion avec le générateur de trafic "TCP Greedy" et l'algorithme de routage de type plus court chemin. L'utilisation de l'algorithme de routage hiérarchique permet d'atteindre un débit utile moyen de 42,7 kbps, soit un gain d'environ 8%.

En zone océanique, le gain d'étalement optimal est de 25, soit une capacité des connexions de 800 kbps. On obtient alors un débit utile moyen de 73,4 kbps par avion. L'utilisation de l'algorithme de routage hiérarchique ne permet pas d'améliorer ces performances. On a donc des performances supérieures en zone océanique qu'en zone continentale. Cela s'explique notamment par la densité d'avions plus faible. Le niveau moyen d'interférence dans le réseau est donc plus faible.

## Etude de performances avec des applications réalistes

Enfin, la dernière partie de la thèse a été consacrée à l'étude des performances du réseau ad hoc aéronautique avec des applications réalistes. Tout d'abord, nous avons considéré

l'ensemble des services opérationnels pour le contrôle aérien et les compagnies définis dans le COCR (Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System). Nous avons par exemple montré qu'en fiabilisant ce trafic de bout en bout avec TCP, et en utilisant un gain d'étalement de 50, tous les paquets envoyés par les avions en zone continentale étaient correctement reçus par le serveur au sol, avec un délai maximum pour 95% des paquets de 15 ms. Le réseau ad hoc aéronautique répond donc parfaitement aux exigences du COCR en terme de délai maximum pour 95% des paquets, qui sont de 740 ms.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à trois applications de transmission automatique de données de vol. Ces applications, proposées par le BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation civile) ont pour but de faciliter la localisation des avions en cas d'accident. La plus lourde de ces applications consiste à envoyer tous les paramètres de vol stockés dans les enregistreurs de vol de l'avion toutes les secondes pendant toute la durée du vol. Le débit généré par avion est alors d'environ 12,3 kbps. Là-aussi, nous avons montré qu'en utilisant TCP, un gain d'étalement de 50, tous les paquets envoyés par les avions en zone océanique étaient correctement reçus par le serveur au sol. Le délai maximum pour 95% des paquets est alors de 423 ms. Le réseau ad hoc aéronautique peut donc aussi être envisagé pour ce type d'applications.

Enfin, nous avons étudié des applications pour les passagers. Nous avons modélisé chaque avion par un réseau local connectant 50 utilisateurs. Pour chacun de ces utilisateurs, nous avons modélisés des applications web et mails. Là-aussi, nous avons montré que le trafic généré par l'ensemble des avions en zone océanique était supporté par le réseau ad hoc aéronautique. Avec un gain d'étalement de 50, on obtient un délai maximum pour 95% des paquets de 20 ms, ce qui est compatible avec une navigation sur Internet de bonne qualité.

Dans cette thèse, nous avons donc montré que les réseaux ad hoc aéronautiques étaient une solution envisageable pour les futures communications aéronautiques, que ce soit en zone continentale ou en zone océanique. L'architecture que nous avons proposée permet d'avoir un système relativement simple à mettre en œuvre et à intégrer sur avion, grâce notamment à l'utilisation d'antenne omnidirectionnelle, ou à l'utilisation du CDMA qui permet de s'affranchir des contraintes de synchronisation entre les différents avions dans le système. Nous avons montré que les performances obtenues en utilisant une bande de 20 MHz permettaient de satisfaire les exigences des applications actuelles.

## Futurs travaux

Les travaux réalisés lors de cette thèse ont démontré la faisabilité d'un réseau ad hoc aéronautique offrant une capacité suffisante pour les applications identifiées à l'horizon

---

2020. De futurs travaux peuvent être envisagés : la mise en œuvre pratique du réseau ad hoc, l'amélioration des performances et l'extension du champ d'application.

Un élément fondamental du réseau ad hoc est la sélection et l'établissement des connexions. Nous avons identifié les critères permettant de définir la topologie la plus favorable. L'étape suivante consisterait à définir la signalisation afin que chaque avion puisse déterminer localement les connexions à établir. Les éléments de signalisation pourraient être la position des avions voisins, leur cap et leur vitesse ... Notre étude a montré que le trafic aérien présente des caractéristiques de nature à assurer une bonne stabilité des connexions, la prise en compte des éléments mentionnés peut permettre d'améliorer encore cette stabilité et faciliter ainsi le choix des chemins. Le canal de signalisation pourrait également être utilisé pour la gestion des codes, suivant une procédure inspirée de celle mise en œuvre pour les clés de chiffrement.

Sur la base du réseau ad hoc établi, un axe d'amélioration des performances existe sans doute au niveau du routage. De nombreux travaux sont actuellement en cours pour les réseaux ad hoc mobiles. De nouveaux algorithmes de routage sont régulièrement publiés dans la littérature. Les travaux du groupe de travail MANET de l'IETF pour standardiser un ou plusieurs protocoles de routage dans les réseaux ad hoc mobiles sont eux-aussi toujours en cours. Dans notre modèle de simulation, nous avons implémenté un algorithme de type plus court chemin. On pourrait donc étudier l'influence du choix de la métrique pour estimer le coût d'un chemin. On pourrait ainsi prendre en compte de nombreux paramètres pour calculer le chemin optimal vers la destination, par exemple la charge des avions intermédiaires, ou encore la stabilité du chemin. On pourrait aussi envisager des approches multi-chemins pour introduire une redondance. Des améliorations peuvent être apportées à notre algorithme de routage hiérarchique. On pourrait par exemple optimiser la formation des clusters pour améliorer leur stabilité.

Un second axe d'amélioration concerne le niveau transport. Nous avons montré que l'utilisation de TCP dans le réseau ad hoc aéronautique entraînait des problèmes d'équité entre les avions lorsque tous les avions veulent émettre simultanément. Les avions les plus éloignés des stations sont ainsi pénalisés par rapport aux avions proches. Différentes solutions ont été proposées pour améliorer cela dans les réseaux ad hoc mobiles. On pourrait donc implémenter ces solutions dans le modèle pour voir leur efficacité dans le cas des réseaux ad hoc aéronautiques.

Dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur la voie aller, des avions vers le sol. Nous avons modélisé la voie retour par un délai. Il est cependant tout à fait possible d'utiliser le réseau ad hoc du sol vers les avions. Deux solutions paraissent envisageables : un réseau ad hoc aéronautique indépendant pour chaque direction avec une bande de fréquence associée, ou le même réseau ad hoc aéronautique pour les deux directions. L'avantage de la première solution tient à la topologie différente pour la voie aller et la voie retour. Dans le cas du trafic du sol vers les avions, il s'agit de partir d'un point source

et de diffuser vers les feuilles. Un multiplexage temporel peut alors être introduit, au moins pour le premier bond (station terrienne vers les avions les plus proches). Par ailleurs, les performances du réseau ad hoc étant limitées en terme de débit, un routage adaptatif en fonction de la nature des flux de trafic paraît pertinent : pour les applications interactives nécessitant un faible délai, le chemin choisi utiliserait le réseau ad hoc aéronautique, et pour les autres applications, le chemin retenu utiliserait un satellite géostationnaire.

Enfin, un dernier axe de recherche concerne la sécurité des communications dans un réseau ad hoc aéronautique. En effet, une telle solution suppose la coopération de l'ensemble des avions des différentes compagnies. Chaque avion pourra donc acheminer des données provenant d'avions d'une autre compagnie. Il faudra donc être capable de pouvoir assurer la confidentialité de certaines données échangées.

# Publications

## Conférences internationales avec comité de lecture

- Frédéric Besse, Fabien Garcia, Alain Pirovano et José Radzik. *Wireless Ad Hoc Networks Access For Aeronautical Communications*. 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2010), Anaheim, CA, USA, 2010.
- Frédéric Besse, Alain Pirovano, Fabien Garcia et José Radzik. *Aeronautical Ad Hoc Networks : a new Datalink for ATM*. 9th Innovative Research Workshop and Exhibition (INO 2010), Bretigny-sur-Orge, France, 2010.
- Frédéric Besse, Alain Pirovano, Fabien Garcia et José Radzik. *Interference Estimation in an Aeronautical Ad Hoc Network*. 30th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC 2011), Seattle, WA, USA, 2011.

## Conférences internationales sans comité de lecture

- Frédéric Besse, Alain Pirovano, José Radzik et Fabien Garcia. *Aeronautical ad hoc network*. International Graduate Summer School in Aeronautics and Astronautics, Beihang University of Aeronautics and Astronautics (BUAA), Beijing, China, 2012.

## Conférences nationales

- Frédéric Besse, Alain Pirovano, Fabien Garcia et José Radzik. *”Réseaux ad hoc aéronautiques”*. 11ème Congrès des doctorants EDSYS 2011, Toulouse, France, 2011.
- Frédéric Besse, Alain Pirovano, Fabien Garcia et José Radzik. *”Réseaux ad hoc aéronautiques”*. Journée de la Recherche de l’Ecole Nationale de l’Aviation Civile (ENAC), Toulouse, France, 2012.



# Liste des symboles

AAC	Aeronautical Administrative Communication
AANET	Aeronautical Ad hoc NETWORK
ABAS	Aircraft-Based Augmentation Systems
ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System
ADS	Automatic Dependant Surveillance
ADS-B	Automatic Dependant Surveillance - Broadcast
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance – Contract
AeroMACS	Aeronautical Mobile Airport Communications System
AM	Amplitude Modulation
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service
AOA	ACARS Over AVLC
AOA	Autonomous Operations Area
AOC	Aeronautical Operational Control
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing
APC	Aeronautical Passenger Communication
APT	Airport
ARINC	Aeronautical Radio INCorporated
ARPAM	Ad hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile ad hoc networks
ATCP	Ad hoc Transmission Control Protocol
ATENAA	Advanced Technologies for Networking in Aeronautical Applications
ATM	Air Traffic Management
ATN	Aeronautical Telecommunication Network

ATSC	Air Traffic Services Communication
AVLC	Aviation VHF Link Control
BEA	Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile
CDF	Cumulative Distribution Fonction
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	Conférence Européenne des Postes et Télécommunications
CFMU	Central Flow Management Unit
CGSR	Clusterhead Gateway Switch Routing
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNS	Communication, Navigation, Surveillance
COCR	Communications Operating Concepts and Requirements
CPDLC	Controller Pilot Data Link Communications
CPFSK	Continuous Phase Frequency Shift Keying
CRNA	Centre en Route de la Navigation Aérienne
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
CVR	Cockpit Voice Recorder
D8PSK	Differentially encoded 8-Phase Shift Keying
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DCDU	Data Communication Display Unit
DCL	Departure Clearance
DDR	Demand Data Repository
DFIS	Data Link Flight Information Services
DLR	German Aerospace Center
DME	Distance Measuring Equipment
DNS	Domain Name System
DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility

DSB-AM	Double Side Band - Amplitude Modulation
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector Routing
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
DSP	Data Link Service Provider
DSR	Dynamic Source Routing
ENR	En Route
ENRI	Electronics Navigation Research Institute
FAA	Federal Aviation Administration
FANS	Future Air Navigation System
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDR	Flight Data Recorder
FIFO	First-In First-Out
FL	Flight Level
FLIRECP	Flight Recorder Panel
GBAS	Ground-Based Augmentation Systems
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	High Frequency
HFDL	High Frequency Data Link
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IARP	IntrAzone Routing Protocol
IATA	International Air Transport Association
ICI	Inter-Carrier Interference
ICMP	Internet Control Message Protocol

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IERP	Interzone Routing Protocol
IETF	Internet Engineering Task Force
IMAP	Internet Message Access Protocol
IP	Internet Protocol
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
L-DACS	L-band Digital Aeronautical Communications System
LEO	Low Earth Orbit
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MAI	Multiple Access Interference
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
MPR	Multi-Point Relay
MSK	Minimum Shift Keying
MTR	Minimum Time Route
MUDOR	Multipath Doppler Routing
NAT	North Atlantic Tracks
NATCA	National Air Traffic Controllers Association
NewSky	Networking the Sky for Aeronautical Communications
NEXTGEN	Next Generation Air Transportation System
Nm	Nautical Miles
NOTAM	NOtice To AirMen
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OFDM	Orthogonal Division Frequency Multiplexing
OLSR	Optimized Link State Routing
OOL	Outer Optical Links
ORP	Oceanic, Remote, Polar
OSI	Open Systems Interconnection

---

OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor
PARC	Performance-based operations Aviation Rulemaking Committee
PIRE	Puissance Isotropique Rayonnée Equivalente
PN	Pseudo Noise
POA	Plain Old ACARS
POP	Post Office Protocol
PRN	Pseudo Random Noise
PSK	Phase Shift Keying
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RCP	Required Communication Performance
RED	Random Early Detection
RFC	Requests For Comments
RPGM	Reference Point Group Model
RTO	Retransmission TimeOut
RTS	Request To Send
RTT	Round-Trip Time
S-TDMA	Space-Time Division Multiple Access
SATCOM	Satellite Communications
SBAS	Satellite-Based Augmentation Systems
SESAR	Single European Sky Air Traffic Management Research
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
SRC	Schedule Reference Service
STDMA	Self-organized Time Division Multiple Access
TC	Topology Control
TCP	Transmission Control Protocol
TCP DOOR	Transmission Control Protocol Detection of Out-of-Order and Response
TDD	Time Division Duplex

---

TDMA	Time Division Multiple Access
TMA	Terminal Manoeuvring Area
TTI	Time To Intercept
UDP	User Datagram Protocol
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTC	Temps Universel Coordonné
VANET	Vehicular Ad hoc NETwork
VDL	VHF Data Link
VHF	Very High Frequency
VOR	VHF Omnidirectional Range
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
Wi-MAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Networks
ZRP	Zone Routing Protocol

# Bibliographie

- [802.11 ] IEEE 802.11. *Website*. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>.
- [802.15 ] IEEE 802.15. *Website*. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>.
- [802.16 ] IEEE 802.16. *Website*. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>.
- [Abbasi & Younis 2007] A. Abbasi and M. Younis. *A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks*. Computer Communications, vol. 30, pages 2826 – 2841, 2007.
- [Abolhasan *et al.* 2004] Mehran Abolhasan, Tadeusz Wysocki and Eryk Dutkiewicz. *A review of routing protocols for mobile ad hoc networks*. Ad Hoc Networks, vol. 2, no. 1, pages 1 – 22, 2004.
- [Abramson 1970] Norman Abramson. *THE ALOHA SYSTEM : another alternative for computer communications*. In Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference, AFIPS '70 (Fall), pages 281–285, New York, NY, USA, 1970. ACM.
- [Adachi *et al.* 1997] F. Adachi, M. Sawahashi and K. Okawa. *Tree-structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for forward link of DS-CDMA mobile radio*. Electronics Letters, vol. 33, no. 1, pages 27 –28, jan 1997.
- [Airbus 1999] Airbus. *Getting to grips with FANS*. 1999.
- [Al Hanbali *et al.* 2005] A. Al Hanbali, E. Altman and P. Nain. *A survey of TCP over ad hoc networks*. Communications Surveys Tutorials, IEEE, vol. 7, no. 3, pages 22–36, 2005.
- [Amirfeiz 2006] Massimiliano Amirfeiz. *ATENAA Project : Advanced Technologies for Networking in Aeronautical Applications*. 2006.
- [Andrews *et al.* 2005] Jeffrey G. Andrews, Xiangying Yang, Aamir Hasan and Gustavo de Veciana. *The flexibility of CDMA Mesh Networks*. IEEE Wireless Communications Magazine, 2005.
- [ARINC 1996] ARINC. *HF Data Link System Design Guidance Material*. Specification 634, 1996.
- [ARINC 2001a] ARINC. *ATS Data Link Applications Over ACARS Air-Ground Network*. Specification 622, 2001.

- [ARINC 2001b] ARINC. *HF Data Link System*. Specification 753, 2001.
- [ARINC 2003] ARINC. *HF Data Link Protocols*. Specification 635, 2003.
- [ARINC 2005] ARINC. *Character-Oriented Air Traffic Service (ATS) Applications*. Specification 623, 2005.
- [ARINC 2006] ARINC. *Air/Ground Character-Oriented Protocol Specification*. Specification 618, 2006.
- [ARINC 2007] ARINC. *DataLink Ground System and Interface Specification*. Specification 620, 2007.
- [ARINC 2009] ARINC. *ACARS Protocols for Avionic End Systems*. Specification 619, 2009.
- [Bai *et al.* 2003] F. Bai, N. Sadagopan and A. Helmy. *IMPORTANT : a framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing Protocols for Adhoc Networks*. In INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies, volume 2, pages 825–835 vol.2, 2003.
- [Basagni *et al.* 1998] Stefano Basagni, Imrich Chlamtac, Violet R. Syrotiuk and Barry A. Woodward. *A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)*. In 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '98, pages 76–84, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [BEA 2010] BEA. *Rapport du groupe de travail : Récupération de Données de Vol*. Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA) pour la Sécurité de l'Aviation Civile, 2010.
- [BEA 2011] BEA. *Rapport du groupe de travail : Transmission déclenchée de Données de Vol*. Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA) pour la Sécurité de l'Aviation Civile, 2011.
- [Camp *et al.* 2002] T. Camp, J. Boleng and V. Davies. *A survey of mobility models for ad hoc network research*. In Wireless Communications Mobile Computing (WCMC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trends and Applications, 2002.
- [Chiang *et al.* 1997] C.-C. Chiang, H.-K. Wu, W. Liu and M. Gerla. *Routing in clustered multi-hop, mobile wireless networks with fading channel*. In IEEE Singapore International Conference on Networks (SICON'97), pages p. 197–211, 1997.
- [Clausen & Jacquet 2003] T. Clausen and P. Jacquet. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. RFC 3626 (Experimental), October 2003.
- [CNES 2009] CNES. *SATCOM for ATM : Estimation of Capacity Required for AMS(R)S Communications Around 2020 Over European Area*. Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 2009.

- [COCR 2002] COCR. *Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System*. Eurocontrol/FAA, 2002.
- [Cong-jun *et al.* 2008] Shi Cong-jun, Ren Qing-hua, Zheng Bo and Liu Yun-jiang. *Analysis of Node Density and Probability of Forming a Network in Military Aeronautical Ad hoc Networks*. 2008.
- [Corson & Macker 1999] S. Corson and J. Macker. *Mobile Ad hoc Networking (MANET) : Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*. RFC 2501 (Informational), January 1999.
- [Cosma *et al.* 2008] R. Cosma, Albert Cabellos-Aparicio, J. Domenech-Benlloch, J. Gimenez-Guzman, J. Martinez-Bauset, M. Cristian, A. Fuentetaja, A. Lopez, J. Domingo-Pascual and J. Quemada. *Measurement-Based Analysis of the Performance of several Wireless Technologies*. 2008.
- [Dinan & Jabbari 1998] E.H. Dinan and B. Jabbari. *Spreading codes for direct sequence CDMA and wideband CDMA cellular networks*. Communications Magazine, IEEE, vol. 36, no. 9, pages 48–54, 1998.
- [Dyer & Boppana 2001] Thomas D. Dyer and Rajendra V. Boppana. *A comparison of TCP performance over three routing protocols for mobile ad hoc networks*. In 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '01, pages 56–66, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [ED-120 2004] RTCA DO-290/EUROCAE ED-120. *Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace*. 2004.
- [ED-122 2007] RTCA DO-306/EUROCAE ED-122. *Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Oceanic and Remote Airspace*. 2007.
- [ED-78A 2000] RTCA DO-264/EUROCAE ED-78A. *Guidelines for Approval of the Provision and Use of Air Traffic Services Supported by Data Communication*. 2000.
- [Eurocontrol 2006] Eurocontrol. *VDL Mode 2 Capacity Analysis through Simulations*. 2006.
- [Eurocontrol 2010a] Eurocontrol. *DDR Reference Manual*. 2010.
- [Eurocontrol 2010b] Eurocontrol. *Link 2000+ Programme : ATC Data Link Operational Guidance for LINK 2000+ Services*. 2010.
- [Eurocontrol 2011] Eurocontrol. *Medium-Term Forecast*. Février 2011.
- [FAA 2010] FAA. *FANS 1/A over Iridium and Performance-Based Concept Recommendations*. September 2010.
- [Feeney & Nilsson 2001] L.M. Feeney and M. Nilsson. *Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment*. In

- Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001), volume 3, pages 1548–1557 vol.3, 2001.
- [Franklin *et al.* 2007] A.A. Franklin, B.V. Ramana and C.S. Ram Murthy. *A link layer adaptive pacing scheme for improving performance of Wireless Mesh Networks*. In IEEE Sarnoff Symposium, pages 1–5, 2007.
- [Fu & DaSilva 2007] Bo Fu and Luiz A. DaSilva. *A Mesh in the Sky : A Routing Protocol for Airborne Networks*. In IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2007), pages 1–7, 2007.
- [Fu *et al.* 2003] Z. Fu, P. Zerfos, H. Luo, S. Lu, L. Zhang and M. Gerla. *The impact of multihop wireless channel on TCP throughput and loss*. In INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies, volume 3, pages 1744–1753 vol.3, 2003.
- [Fuchsa *et al.* 2007] Christian Fuchsa, Hennes Hennigera, Bernhard Epplea, Dirk Giggenbacha, Massimiliano Amirfeizb, Massimo Jentileb, Giorgia Di Nepib, Francesco Mazzic and Gianluca Martinic. *Broadband communications for aeronautical networks : the ATENAA outer optical link validation*. 1st CEAS European Air and Space Conference, 2007.
- [Gao 2007] Jie Gao. *Analysis of Aloha and Slotted Aloha*. 2007.
- [Gold 1967] R. Gold. *Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing*. IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 4, pages 619–621, october 1967.
- [Green & Obaidat 2002] D.B. Green and A.S. Obaidat. *An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices*. In IEEE International Conference on Communications (ICC 2002), volume 5, pages 3424–3428 vol.5, 2002.
- [Gridling & Thallner 2002] Gunther Gridling and Bernd Thallner. *Simulation of a wireless cdma ad hoc network*. 2002.
- [Haas 1997] Z.J. Haas. *A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks*. In IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications, volume 2, pages 562–566 vol.2, oct 1997.
- [Hoffmann *et al.* 2009] F. Hoffmann, D. Medina and A. Wolisz. *Two-step delay based Internet gateway selection scheme for aeronautical ad hoc networks*. In IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pages 2638 –2642, sept. 2009.
- [Holland & Vaidya 1999] Gavin Holland and Nitin Vaidya. *Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks*. In 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '99, pages 219–230, New York, NY, USA, 1999. ACM.

- [Holma & Toskala 2000] Harri Holma and Antti Toskala. *UMTS : les réseaux mobiles de troisième génération*. 2000.
- [Hong *et al.* 1999] X. Hong, M. Gerla, G. Pei and C.-C. Chiang. *A group mobility model for ad hoc wireless networks*. In ACM/IEEE MSWiM, 1999.
- [Hurter *et al.* 2009] C. Hurter, B. Tissoires and S. Conversy. *FromDaDy : Spreading Aircraft Trajectories Across Views to Support Iterative Queries*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 15, no. 6, pages 1017 –1024, nov.-dec. 2009.
- [Hyeon *et al.* 2010] SeUng Hyeon, Ki-Il Kim and SangWoo Yang. *A new geographic routing protocol for aircraft ad hoc networks*. In Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2010 IEEE/AIAA 29th, pages 2.E.2–1 –2.E.2–8, oct. 2010.
- [ICAO 2006] ICAO. *Manual on Required Communication Performance (RCP)*. Doc 9869, 2006.
- [Iordanakis *et al.* 2006] Michael Iordanakis, Dimitrios Yannis, Kimon Karras, Georgios Bogdos, Georgios Dilintas, Massimiliano Amirfeiz, Giorgio Colangelo and Stefano Baiotti. *Ad-hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile Ad-Hoc Networks*. 5th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing, 2006.
- [IRIS ] IRIS. *ESA (European Space Agency) Website*. <http://telecom.esa.int/telecom/www/area/index.cfm?fareaid=56>.
- [ITU 2001] ITU. *End-user multimedia QoS categories*. Series G : Transmission systems and media, digital systems and networks / Quality of service and performance, Recommendation G.1010, 2001.
- [Jabbar & Sterbenz 2009] Abdul Jabbar and James P.G. Sterbenz. *AeroRP : A Geolocation Assisted Aeronautical Routing Protocol for Highly Dynamic Telemetry Environments*. In International Telemetering Conference (ITC 2009), 2009.
- [Jacquet *et al.* 2001] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum and L. Viennot. *Optimized link state routing protocol for ad hoc networks*. In IEEE International Multi Topic Conference (INMIC 2001), Technology for the 21st Century., pages 62 – 68, 2001.
- [Jain *et al.* 2011] Raj Jain, Fred Templin and Kwong-Sang Yin. *Analysis of L-Band Digital Aeronautical Communication Systems : L-DACS1 and L-DACS2*. In IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2011.
- [Jain 1984] Raj Jain. *A Quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in Shared Computer Systems*. In ACM Transaction on Computer Systems, 1984.

- [Johnson & Maltz 1996] D. Johnson and D. Maltz. *Dynamic source routing in ad hoc wireless networks*. In Mobile Computing, vol. 353, pages p. 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [Johnson *et al.* 2001] David B. Johnson, David A. Maltz and Josh Broch. *Ad hoc networking*. chapitre DSR : the dynamic source routing protocol for multihop wireless ad hoc networks, pages 139–172. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2001.
- [Johnson *et al.* 2007] D. Johnson, Y. Hu and D. Maltz. *The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4*. RFC 4728 (Experimental), February 2007.
- [Jones & de La Chapelle 2001] William H. Jones and Michael de La Chapelle. *Connexion by Boeing - Broadband Satellite Communication System for Mobile Platforms*. 2001.
- [Jubin & Tornow 1987] J. Jubin and D. Tornow. *The DARPA Packet Radio Network protocol*. January 1987.
- [Jurdak *et al.* 2004] R. Jurdak, C.V. Lopes and P. Baldi. *A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks*. IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 6, no. 1, pages 2–16, 2004.
- [Karp & Kung 2000] Brad Karp and H. T. Kung. *GPSR : greedy perimeter stateless routing for wireless networks*. In 6th annual international conference on Mobile computing and networking, MobiCom '00, pages 243–254, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [Karras *et al.* 2007] Kimon Karras, Theodore Kyritsis, Dimitris Yannis and Georgios Bogdos. *Applicability of Mobile Ad Hoc Networks in an Aeronautical Environment*. 2007.
- [Karras *et al.* 2008a] K. Karras, T. Kyritsis, M. Amirfeiz and S. Baiotti. *Aeronautical Mobile Ad Hoc Networks*. In Wireless Conference, 2008. EW 2008. 14th European, pages 1–6, june 2008.
- [Karras *et al.* 2008b] Kimon Karras, Dimitrios Marinos and Pavlos Kouros. *Optical Terminal Requirements for Aeronautical Multi-Hop Networks*. In Christopher C. Davis Arun K. Majumdar, editeur, Free-Space Laser Communications VIII, volume Proc. of SPIE Vol. 7091, 2008.
- [Konstantinou *et al.* 2007] K. Konstantinou, S. Kang and C. Tzaras. *A Measurement-Based Model for Mobile-to-Mobile UMTS Links*. In IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC 2007), pages 529–533, april 2007.

- [Kopparty *et al.* 2002] S. Kopparty, S.V. Krishnamurthy, M. Faloutsos and S.K. Tripathi. *Split TCP for mobile ad hoc networks*. In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '02), pages 138 – 142 vol.1, nov. 2002.
- [Liu & Singh 2001] J. Liu and S. Singh. *ATCP : TCP for mobile ad hoc networks*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 19, no. 7, pages 1300–1315, jul 2001.
- [Mahmoud 2012] Mohamed-Slim Ben Mahmoud. *Addressing Security Challenges in Emerging Data-based Aeronautical Communications*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse), 2012.
- [Mauve *et al.* 2001] M. Mauve, A. Widmer and H. Hartenstein. *A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks*. Network, IEEE, vol. 15, no. 6, pages 30–39, nov/dec 2001.
- [Medina *et al.* 2008a] D. Medina, F. Hoffmann, S. Ayaz and C.-H. Rokitansky. *Feasibility of an Aeronautical Mobile Ad Hoc Network Over the North Atlantic Corridor*. In 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 08), pages 109 –116, june 2008.
- [Medina *et al.* 2008b] D. Medina, F. Hoffmann, S. Ayaz and C.-H. Rokitansky. *Topology characterization of high density airspace aeronautical ad hoc networks*. In 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2008), pages 295 –304, 29 2008-oct. 2 2008.
- [Medina *et al.* 2010a] D. Medina, F. Hoffmann, F. Rossetto and C.-H. Rokitansky. *A Crosslayer Geographic Routing Algorithm for the Airborne Internet*. In IEEE International Conference on Communications (ICC 2010), pages 1 –6, may 2010.
- [Medina *et al.* 2010b] D. Medina, F. Hoffmann, F. Rossetto and C.-H. Rokitansky. *Routing in the Airborne Internet*. In Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS 2010), pages A7–1 –A7–10, may 2010.
- [Medina *et al.* 2011a] D. Medina, F. Hoffmann, F. Rossetto and C. Rokitansky. *North Atlantic Inflight Internet Connectivity via Airborne Mesh Networking*. In IEEE Vehicular Technology Conference, pages 1 –5, sept. 2011.
- [Medina *et al.* 2011b] 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*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011.
- [Menouar *et al.* 2006] H. Menouar, F. Filali and M. Lenardi. *A survey and qualitative analysis of mac protocols for vehicular ad hoc networks*. Wireless Communications, IEEE, vol. 13, no. 5, pages 30 –35, october 2006.
- [Mühlethaler 2004] Paul Mühlethaler. *Routage dans les réseaux ad hoc*. Techniques de l'ingénieur, 2004.

- [Muqattash & Krunz 2003] Alaa Muqattash and Marwan Krunz. *CDMA-based MAC protocol for wireless ad hoc networks*. In 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '03, pages 153–164, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [OACI ] OACI. Annexe 10 : Télécommunications aéronautiques.
- [OACI 2000a] OACI. *Manual on HF Data Link*. Doc 9741, 2000.
- [OACI 2000b] OACI. *Manuel des applications de la liaison de données aux services de la circulation aérienne*. Doc 9694, 2000.
- [OACI 2001a] OACI. *Comprehensive Aeronautical Telecommunication Network (ATN) Manual*. Doc 9739, 2001.
- [OACI 2001b] OACI. *Manual on VHF Digital Link (VDL) Mode 2*. Doc 9776, 2001.
- [OACI 2002a] OACI. *Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems*. Doc 9750, 2002.
- [OACI 2002b] OACI. *Manual of Technical Provisions for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN)*. Doc 9705, 2002.
- [OACI 2004a] OACI. *Manual on Mode S Specific Services*. Doc 9688, 2004.
- [OACI 2004b] OACI. *Manual on VHF Data Link (VDL) Mode 4*. Doc 9816, 2004.
- [OACI 2007] OACI. *Regulatory best practices on the use of mobile phone on-board the aircraft*. In Aeronautical Communications Panel (ACP), 17th meeting of working group F, 2007.
- [OACI 2010a] OACI. *Global Operational Data Link Document (GOLD)*. 2010.
- [OACI 2010b] OACI. *Manual on the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using Internet Protocol Suite (IPS) Standards and Protocols*. Doc 9896, 2010.
- [Padovani *et al.* 1991] R. Padovani, A.J. Viterbi, L.A. Weaver, C.E. Wheatley, K.S. Gilhousen and I.M. Jacobs. *On the capacity of a cellular CDMA system*. 1991.
- [Perkins & Bhagwat 1994] Charles Perkins and Pravin Bhagwat. *Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 24, no. 4, pages 234–244, 1994.
- [Perkins & Hughes 2002] Dmitri Perkins and Herman Hughes. *Investigating the performance of TCP in mobile ad hoc networks*. Computer Communications, vol. 25, no. 11-12, pages 1132–1139, 2002.
- [Perkins & Royer 1999] C.E. Perkins and E.M. Royer. *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. In Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99), pages 90 –100, feb 1999.
- [Perkins *et al.* 2003] C. Perkins, E. Belding-Royer and S. Das. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. RFC 3561 (Experimental), July 2003.

- [Peters *et al.* 2011] K. Peters, A. Jabbar, E.K. Cetinkaya and J.P.G. Sterbenz. *A geographical routing protocol for highly-dynamic aeronautical networks*. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2011), pages 492 –497, march 2011.
- [Postel 1980] J. Postel. *User Datagram Protocol*. RFC 768 (Standard), August 1980.
- [Postel 1981] J. Postel. *Transmission Control Protocol*. RFC 793 (Standard), September 1981. Updated by RFCs 1122, 3168, 6093, 6528.
- [Proakis 2000] John Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill Science, 2000.
- [Royer & Toh 1999] E.M. Royer and Chai-Keong Toh. *A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks*. Personal Communications, IEEE, vol. 6, no. 2, pages 46 –55, apr 1999.
- [Sakhaee & Jamalipour 2006] E. Sakhaee and A. Jamalipour. *The Global In-Flight Internet*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 9, pages 1748 –1757, sept. 2006.
- [Sakhaee & Jamalipour 2007] E. Sakhaee and A. Jamalipour. *A New Stable Clustering Scheme for Pseudo-Linear Highly Mobile Ad Hoc Networks*. In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '07), pages 1169 –1173, nov. 2007.
- [Sakhaee *et al.* 2006a] E. Sakhaee, A. Jamalipour and N. Kato. *Aeronautical ad hoc networks*. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006), volume 1, pages 246 –251, april 2006.
- [Sakhaee *et al.* 2006b] E. Sakhaee, A. Jamalipour and Nei Kato. *Multipath Doppler Routing with QoS Support in Pseudo-linear Highly Mobile Ad Hoc Networks*. In IEEE International Conference on Communications (ICC '06), volume 8, pages 3566 –3571, june 2006.
- [Sanchez & Anejos 2001] M. Sanchez and P. Manzoni. Anejos. *A java based simulator for ad-hoc networks*. In Future Generation Computer Systems, 2001.
- [Sarwate & Pursley 1980] D.V. Sarwate and M.B. Pursley. *Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences*. Proceedings of the IEEE, vol. 68, no. 5, pages 593 – 619, may 1980.
- [Schnell & Scalise 2007] M. Schnell and S. Scalise. *NEWSKY : Concept for NETWorking the SKY for Civil Aeronautical Communications*. 2007.
- [Seo *et al.* 2008] Dong-Woo Seo, Sok-Hyong Kim and Young-Joo Suh. *System integration of GPSR and ADS-B for aeronautical ad hoc networks*. In IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2008), pages 1 –6, nov. 2008.
- [Shah & Rabaey 2002] R.C. Shah and J.M. Rabaey. *Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks*. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2002), volume 1, pages 350 – 355 vol.1, mar 2002.

- [Signore & Girard 1998] T.L. Signore and M. Girard. *The Aeronautical Telecommunication Network (ATN)*. In IEEE Military Communications Conference (MILCOM 98), 1998.
- [Simon *et al.* 2002] Marvin K. Simon, Jim K. Omura, Robert A. Scholtz and Barry K. Levitt. *Spread Spectrum Communications Handbook*. 2002.
- [SITA 2009] SITA. *SITA AIRCOM Service*, 2009.
- [Srivastava *et al.* 2003] S. Srivastava, S. Tripathi, D. Sanghi and A.K. Chaturvedi. *A code allocation protocol for maximizing throughput in CDMA based ad hoc networks*. In IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC 2003), volume 2, pages 1385–1390, march 2003.
- [Stojmenovic 2002] I. Stojmenovic. *Position-based routing in ad hoc networks*. IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 7, pages 128–134, jul 2002.
- [Thanthry *et al.* 2007] N. Thanthry, I. P. Emmadi, A. Srikumar, K. Namuduri and R. Pendse. *SVSS : an intelligent video surveillance system for aircraft*. In IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference (DASC 07), 2007.
- [Tu & Shimamoto 2009a] H.D. Tu and S. Shimamoto. *A Proposal for High Air-Traffic Oceanic Flight Routes Employing Ad-Hoc Networks*. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2009), april 2009.
- [Tu & Shimamoto 2009b] Ho Dac Tu and Shigeru Shimamoto. *Mobile Ad-Hoc Network Based Relaying Data System for Oceanic Flight Routes in Aeronautical Communications*. In International journal of Computer Networks and Communications, 2009.
- [Tu *et al.* 2009] Ho Dac Tu, Park Jingyu, S. Shimamoto and J. Kitaori. *Oceanic air traffic control based on space-time division multiple access*. In IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference (DASC 09), pages 7.D.2–1 –7.D.2–13, oct. 2009.
- [Walter *et al.* 2010] M. Walter, N. Franzen and M. Schnell. *New concepts for a decentralized, self-organizing air-to-air radio link*. In IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC 2010), pages 3.D.1–1 –3.D.1–12, oct. 2010.
- [Wang & Zhang 2002] Feng Wang and Yongguang Zhang. *Improving TCP performance over mobile ad-hoc networks with out-of-order detection and response*. In 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '02, pages 217–225, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [Wang *et al.* 2006] Tiejun Wang, J.G. Proakis, E. Masry and J.R. Zeidler. *Performance degradation of OFDM systems due to Doppler spreading*. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, no. 6, pages 1422 –1432, june 2006.

- [Ware *et al.* 2001] C. Ware, T. Wysocki and J. Chicharo. *Hidden terminal jamming problems in IEEE 802.11 mobile ad hoc networks*. In IEEE International Conference on Communications (ICC 2001), volume 1, pages 261 –265 vol.1, jun 2001.
- [Watkins & Dagli 2011] C.B. Watkins and C.H. Dagli. *Agent-based model of aerial ad-hoc network market potential*. In IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference (DASC 2011), pages 8D2–1 –8D2–15, oct. 2011.
- [Yu & Chong 2005] J.Y. Yu and P.H.J. Chong. *A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks*. IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 7, no. 1, pages 32 –48, qtr. 2005.
- [Zaggoulos *et al.* 2007] G. Zaggoulos, A. Nix and A. Doufexi. *WiMAX System Performance in Highly Mobile Scenarios with Directional Antennas*. In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on, pages 1 –5, sept. 2007.



# Annexe A

## Le datalink pour la Navigation et la Surveillance

Le datalink peut être utilisé à d'autres fins que les communications sol-bord, par exemple pour des applications de navigation et de surveillance.

### A.1 Le datalink pour la Navigation

Le datalink permet d'améliorer les performances du GNSS (Global Navigation Satellite System) dans le cadre de la navigation aérienne. Le GNSS est un système de positionnement par satellite. Il permet de déterminer l'heure, la position ainsi que la vitesse de l'avion. Il utilise plusieurs constellations de satellites : GPS, GLONASS et GALILEO.

Le GNSS est utilisée par beaucoup de compagnies pour améliorer la navigation en route. Malheureusement, la précision du GNSS est actuellement insuffisante pour réaliser des approches de précision. Pour en améliorer les performances, plusieurs systèmes d'augmentations ont été proposés : l'ABAS (Aircraft-Based Augmentation Systems), le SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems) et le GBAS (Ground-Based Augmentation Systems). Dans tous ces systèmes, il s'agit en fait d'utiliser des informations supplémentaires pour améliorer la précision et la fiabilité du système de positionnement par satellite.

Dans l'ABAS, on utilise des informations complémentaires provenant de l'avion lui-même. On utilise par exemple la redondance entre plusieurs constellations ou plusieurs satellites d'une même constellation pour détecter les défaillances éventuelles. On parle alors de RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring). On peut aussi utiliser des informations provenant d'autres systèmes de navigation, par exemple les centrales inertielles. L'ABAS permet uniquement d'améliorer l'intégrité du GNSS.

Pour améliorer la précision du GNSS, on utilise des corrections différentielles locales. Pour cela, on utilise des stations au sol de positions connues. Elles vont déterminer l'erreur de positionnement que commet chaque satellite pour les localiser. Cela permet de mettre

en évidence des décalages d'horloge, d'éphémérides ainsi que des erreurs locales dues à la traversée de l'atmosphère. Ces erreurs sont ensuite diffusées grâce au datalink par satellite (SBAS) ou par liaisons directes avec le sol (GBAS). Les avions peuvent alors corriger leurs positions estimées par le système GNSS.

## A.2 Le datalink pour la Surveillance

### A.2.1 Le Radar Secondaire Mode S

Le radar est un moyen de surveillance des avions. Il en existe plusieurs types. Le radar primaire utilise des ondes radio pour détecter et déterminer la position des avions en vol. Il est autonome et ne nécessite aucun équipement à bord de l'avion. Le radar secondaire, au contraire, nécessite une coopération des avions. Il fonctionne en envoyant des "interrogations" à l'avion, le transpondeur de l'avion lui envoie alors automatiquement son indicatif, sa position et son altitude. Le radar Mode S [OACI 2004a] offre ainsi un service de datalink grâce à ce système d'interrogations-réponses. Il permet d'échanger des messages dont la taille va jusqu'à 162 bits (en mode Extended Squitter) à chaque interrogation. Les transpondeurs Mode S sont ainsi capables de répondre à 250 interrogations différentes. De nombreux paramètres de vol peuvent ainsi être envoyés au sol sans l'intervention du pilote.

### A.2.2 ADS-C

L'ADS-C (Automatic Dependent Surveillance – Contract) est un système de surveillance automatique. Il permet à l'avion d'envoyer automatiquement des informations (position, vitesse, route prévue, ...) au centre de contrôle, selon un contrat. Ce contrat détermine les conditions selon lesquelles les informations doivent être envoyées : périodiquement, sur événement, en cas d'urgence ou à la demande. Ce système nécessite donc une liaison de données entre l'avion et le sol. L'ADS-C peut ainsi utiliser la VDL, la HFDL ou le SATCOM. Il est typiquement utilisé dans les zones ne bénéficiant pas d'une couverture radar.

### A.2.3 ADS-B

L'ADS-B (Automatic Dependant Surveillance - Broadcast) permet à l'avion de diffuser automatiquement sa position et d'autres informations (vitesse, indicatif de vol...). La position et la vitesse sont ainsi transmises deux fois par seconde. Contrairement à l'ADS-C qui utilise un protocole de communication point à point, les messages ADS-B sont diffusés (broadcast). Ils peuvent donc être utilisés par le contrôle aérien, mais aussi par les avions à proximité pour des applications de surveillance embarquées.

# Annexe B

## Le modèle OSI de l'ISO

Le modèle OSI de l'ISO est un modèle permettant de faciliter l'interconnexion des systèmes informatiques. Il décrit les fonctionnalités nécessaires à la communication entre plusieurs machines. Il propose une architecture en couches, illustrée dans la figure B.1.

Application
Présentation
Session
Transport
Réseau
Liaison
Physique

TABLE B.1 – Modèle OSI de l'ISO

La couche « physique » est chargée de la transmission effective des signaux, c'est-à-dire de l'émission et de la réception d'un bit de données.

La couche « liaison de données » gère les communications entre deux machines adjacentes, directement reliées entre elles par un support physique.

La couche « réseau » gère les communications de proche en proche. Elle est chargée du routage et de l'adressage des paquets.

La couche « transport » gère les communications de bout en bout entre les machines source et destination.

La couche « session » gère la synchronisation des échanges. Elle permet l'ouverture et la fermeture de session.

La couche « présentation » est chargée du codage des données applicatives. Elle permet de convertir les données manipulées au niveau applicatif en chaînes d'octets.

La couche « application » est le point d'accès aux services réseaux.



# Annexe C

## Exemple de méthodes d'accès au canal utilisées dans les MANET

### C.1 Méthodes avec canal unique

#### C.1.1 ALOHA et Slotted ALOHA

L'ALOHA est la plus ancienne des méthodes d'accès. Elle a été proposée dans les années 1970 par l'université de Hawaii [Abramson 1970]. Elle est extrêmement simple puisqu'elle permet à chaque utilisateur d'émettre lorsqu'il le souhaite. Si deux utilisateurs émettent simultanément, il y a collision et les messages envoyés sont perdus. Si un nœud ne reçoit pas d'acquiescement, il considère qu'il y a eu collision et va réémettre le paquet après une durée tirée aléatoirement. Il réitère ainsi le processus jusqu'au succès de la transmission du paquet.

Cette méthode d'accès à l'avantage de sa simplicité, mais elle ne permet pas d'atteindre des performances très élevées. Une étude théorique montre qu'elle ne permet pas d'utiliser plus de 20% de la capacité du canal [Gao 2007].

Pour améliorer ces performances, le Slotted ALOHA a ensuite été proposé. Il s'agit en fait de discrétiser le temps en intervalles (slot) de durée identique. Lorsqu'un nœud veut émettre, il attend ainsi le début du slot suivant. Cette approche permet d'utiliser presque 40% de la capacité du canal [Gao 2007]. La figure C.1 permet de comparer les performances de l'ALOHA et du Slotted ALOHA.

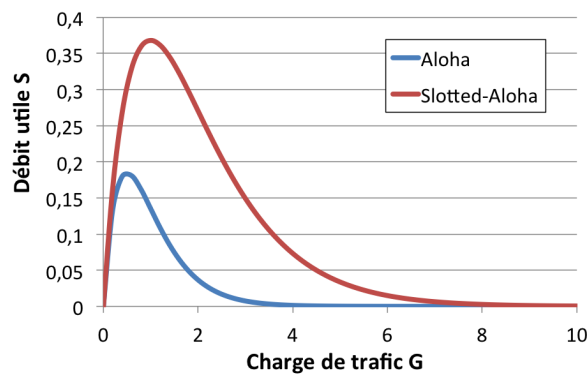


FIGURE C.1 – Comparaison des performances de l'ALOHA et du Slotted ALOHA

### C.1.2 CSMA/CA

Le CSMA est une méthode d'accès multiple avec détection de porteuse. Il s'agit en fait d'écouter le canal avant d'émettre. Si le canal est libre, on peut émettre. Sinon, on doit différer la transmission. Plusieurs déclinaisons ont ensuite été proposées, par exemple le CSMA/CA pour les réseaux sans fil. Il est par exemple utilisé dans la norme 802.11 [802.11]. Il s'agit en fait de faire de l'évitement de collision en utilisant un accusé de réception entre l'émetteur et le récepteur. Lorsqu'un nœud veut émettre, il va donc écouter le canal. Si le canal est occupé, il va différer sa transmission. Sinon, il va envoyer un message RTS (Request To Send) contenant le volume des données à transmettre ainsi que la vitesse de transmission. Le récepteur répond alors par un message CTS (Clear To Send). L'émetteur peut alors commencer la transmission. Si un nœud reçoit un CTS alors qu'il n'a pas envoyé de RTS, il sait qu'une transmission va avoir lieu et en attend donc la fin avant de commencer la sienne.

## C.2 Méthodes avec canal multiple

Dans ces méthodes, chaque nœud dispose d'une partie du canal. On a alors le TDMA (Time Division Multiple Access), le FDMA (Frequency Division Multiple Access) et le CDMA (Code Division Multiple Access). La figure C.2 résume le principe de ces trois méthodes d'accès. On peut aussi avoir des méthodes hybrides combinant plusieurs de ces méthodes.

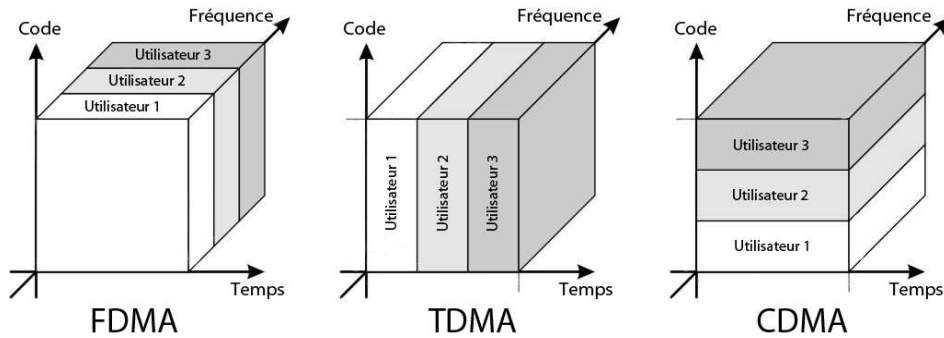


FIGURE C.2 – Principe du TDMA, du FDMA et du CDMA

### C.2.1 TDMA

Le TDMA est un mode de multiplexage temporel du canal. Le principe est de partager le temps disponible entre les différents utilisateurs du réseau. Les nœuds émettent alors à tour de rôle sur la même fréquence. Cette technique est par exemple utilisée dans la norme de téléphonie mobile de deuxième génération (GSM).

Le principal inconvénient de cette méthode est que tous les nœuds doivent être synchronisés pour émettre au bon moment. De plus, la capacité disponible pour chaque nœud décroît de façon inversement proportionnelle au nombre de nœuds dans le réseau, ce qui est problématique pour les réseaux ad hoc à grande échelle, par exemple les réseaux ad hoc aéronautiques.

### C.2.2 FDMA

Le FDMA est un mode de multiplexage fréquentiel du canal. Le principe est de partager la bande de fréquence disponible de façon à attribuer à chaque nœud une fraction du spectre disponible. Chaque nœud dispose donc d'une fréquence unique. Tous les nœuds peuvent émettre simultanément. On n'a donc pas besoin d'une synchronisation de tous les nœuds. En revanche, la capacité disponible pour chaque nœud décroît là-aussi de façon inversement proportionnelle au nombre de nœuds dans le réseau.

### C.2.3 CDMA

Le CDMA est un mode de multiplexage par code. Il s'agit en fait d'utiliser un système de codage des transmissions grâce à l'étalement de spectre [Proakis 2000]. Chaque utilisateur se voit en fait attribuer un code qui lui permet d'isoler ses communications de celles des autres. Il peut ainsi utiliser toute la bande de fréquence disponible et émettent lorsqu'il le souhaite. On peut ainsi avoir plusieurs communications simultanées sur la même fréquence.

Le CDMA est utilisé dans la norme de téléphonie mobile de troisième génération (UMTS), ou encore dans le système de navigation par satellite GPS. Nous verrons le principe de l'étalement de spectre à séquence directe plus en détail dans l'annexe I.

# Annexe D

## Exemple de protocoles de routage dans les MANET

### D.1 Routage proactif

#### D.1.1 DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector Routing)

DSDV [Perkins & Bhagwat 1994] est un protocole de routage proposé pour les MANET. Il est basé sur l'algorithme distribué de Bellman-Ford permettant de trouver le chemin le plus court dans un graphe. Chaque nœud du réseau dispose d'une table de routage qui contient toutes les destinations accessibles depuis ce nœud. Pour chacune de ces destinations, on stocke le nombre de nœuds intermédiaires pour l'atteindre. De plus, à chacune des entrées de la table de routage est associée un numéro de séquence, donné par le nœud destination. Cela est utilisé pour différencier les nouvelles routes des plus anciennes. Chaque nœud transmet ensuite périodiquement sa table de routage à ses voisins directs. Il peut ainsi la transmettre entièrement ou de façon incrémentale avec uniquement les mises à jour et les nouvelles entrées pour limiter la quantité d'information échangée. Il peut également la transmettre spontanément lorsqu'un changement important a lieu.

#### D.1.2 OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR [Jacquet *et al.* 2001] est un protocole de routage proactif proposé pour les MANET. Il fait l'objet d'une RFC [Clausen & Jacquet 2003] de l'IETF. Il s'agit d'un protocole à état de liens qui cherche le chemin le plus court dans le réseau. OLSR introduit le concept de relais multipoints (MPR : Multi-Point Relay). Il s'agit en fait de considérer uniquement les nœuds pertinents pour le calcul du plus court chemin. Chaque nœud va ainsi sélectionner parmi ses voisins le sous-ensemble de nœuds permettant d'atteindre l'ensemble de son voisinage à deux sauts : c'est l'ensemble des relais multipoints. Les

voisins ne faisant pas partie de cet ensemble sont redondants pour le calcul du plus court chemin.

Ensuite, des messages sont échangés périodiquement. OLSR utilise deux types de messages : des messages "Hello" et des messages "TC" (Topology Control). Chaque nœud du réseau envoie périodiquement des messages "Hello" contenant des informations sur son voisinage et sur l'état des liens. Ces messages permettent à chaque nœud de découvrir son voisinage et de choisir ses MPR. Chaque nœud envoie ensuite des messages "TC" contenant la liste de ses voisins l'ayant choisi comme MPR. Ces messages TC sont ensuite relayés dans tout le réseau par les nœuds MPR uniquement, ce qui permet de réduire le volume total d'informations échangées. Chaque nœud détermine ensuite la meilleure route vers chaque destination accessible.

## D.2 Routage réactif

### D.2.1 DSR (Dynamic Source Routing)

Le protocole DSR [Johnson & Maltz 1996, Johnson *et al.* 2001] fait l'objet de la RFC 4728 [Johnson *et al.* 2007]. Il s'agit d'un protocole de routage réactif dans lequel la source détermine la route complète vers la destination. Lorsqu'un nœud veut émettre un paquet, il doit entamer un processus de recherche de route. Il va donc diffuser un paquet "Route Request" contenant l'adresse de la source et de la destination à tous ses voisins. Chaque nœud recevant un paquet Route Request va, s'il n'est pas le destinataire et s'il n'a pas déjà reçu le paquet, le diffuser à nouveau à tous ses voisins en y ajoutant son adresse. Le paquet "Route Request" contient donc la liste de tous les nœuds traversés depuis la source jusqu'au nœud courant. Lorsque la destination, ou un nœud connaissant une route vers la destination, reçoit le paquet, elle y répond par un "Route Reply" contenant la route complète en remontant la liste des nœuds traversés par le paquet "Route Request".

La source peut alors envoyer ses paquets de données qui contiennent la route complète vers la destination. Chaque nœud intermédiaire n'a alors qu'à enlever son adresse de la route et à envoyer le paquet au nœud suivant de la liste. Les nœuds intermédiaires n'ont donc pas besoin de maintenir à jour des informations sur les routes dont ils ne sont pas la source. Il y a aussi un mécanisme de maintenance de route qui permet de signaler à la source que la route demandée n'est plus disponible, à la suite d'un changement de topologie du réseau par exemple. La source peut alors utiliser une route alternative qu'elle aurait en cache ou recommencer le processus de découverte de route.

### D.2.2 AODV (Ad hoc On demand Distance Vector routing)

Le protocole AODV [Perkins & Royer 1999] fait l'objet de la RFC 3561 [Perkins *et al.* 2003]. Il s'agit d'un protocole réactif basé, comme DSR, sur un mécanisme de découverte de route et sur un mécanisme de maintenance de route. AODV utilise en plus un numéro de séquence pour les routes afin de différencier les anciennes routes des nouvelles. Les routes sont ainsi découvertes de la même façon que DSR par le mécanisme de Route Request / Route Reply, à la différence que les nœuds intermédiaires recevant un Route Request mettent à jour leurs informations concernant la source du paquet et le dernier nœud parcouru par le paquet, qui permet donc de joindre la source. Le paquet Route Request contient donc l'adresse de la source et de la destination, le numéro de séquence de demande de route de la source ainsi que le numéro de séquence de la destination le plus récent connu par la source. Lorsqu'un nœud reçoit un paquet Route Request, il répond par un Route Reply s'il est la destination ou s'il connaît une route vers la destination avec un numéro de séquence supérieur au numéro indiqué dans le Route Request. Sinon, il diffuse à nouveau le paquet Route Request s'il ne l'a pas déjà reçu. Lorsque la source reçoit un paquet Route Reply, elle peut commencer à envoyer des paquets de données. Si elle reçoit ensuite d'autre paquet Route Reply avec un numéro de séquence supérieur ou avec un nombre de saut inférieur, elle met à jour sa table de routage pour utiliser la meilleure route. Lorsque la source arrête d'envoyer des paquets de données, la route expire et elle est supprimée par les nœuds intermédiaires. Comme dans DSR, on a aussi le mécanisme de maintenance de route qui permet d'informer la source que la destination n'est plus joignable par un paquet Route Error.

## D.3 Routage hybride

### D.3.1 ZRP (Zone Routing Protocol)

Le protocole ZRP [Haas 1997] est un protocole de routage hybride. Il est à la fois proactif et réactif, afin de profiter des avantages des deux approches. Il définit en fait des "zones" autour de chaque nœud source du réseau. Cette zone est définie en nombre de sauts, par exemple tous les voisins à deux sauts du nœud source considéré. Pour tous les nœuds de cette zone, ZRP utilise le protocole proactif IARP (Intrazone Routing Protocol). Chaque nœud va donc maintenir une table de routage permettant de joindre tous ses voisins à un nombre de sauts donné. Si la destination ne se trouve pas dans cette zone, ZRP utilise le protocole réactif IERP (Interzone Routing Protocol) et initialise une procédure de découverte de route.

## D.4 Routage géographique

### D.4.1 DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)

DREAM [Basagni *et al.* 1998] est un protocole de routage géographique. Chaque nœud du réseau échange périodiquement des messages pour informer les autres nœuds de sa position. Le protocole s'adapte à la mobilité en faisant varier la fréquence de ces messages en fonction de la vitesse des nœuds. Chaque nœud maintient donc à jour une table contenant la position de tous les nœuds dans le réseau. Lorsqu'un nœud veut émettre un message, il détermine la position de la destination grâce à cette table. Il va ensuite transmettre le message à tous ses voisins dans la direction de la destination.

### D.4.2 GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR [Karp & Kung 2000] est un protocole de routage géographique. Il calcule les routes à la demande et ne maintient donc aucune table de routage. Comme dans DREAM, chaque nœud émet périodiquement sa position à tous ces voisins. Le protocole possède ensuite deux modes distincts pour le routage des paquets : le mode "greedy forwarding" et le mode "greedy perimeter". En mode "greedy forwarding", lorsqu'un nœud reçoit un paquet, il l'envoie au nœud de son voisinage le plus proche de la destination, ou à la destination si celle-ci est dans son voisinage direct. Ce mode est illustré dans la figure D.1. S'il n'y a pas de nœud plus proche de la destination que lui-même dans son voisinage, il passe en mode "greedy perimeter", illustré dans la figure D.2. Il établit alors un graphe de son voisinage et utilise la règle de la main droite pour déterminer le nœud auquel il va envoyer le paquet.

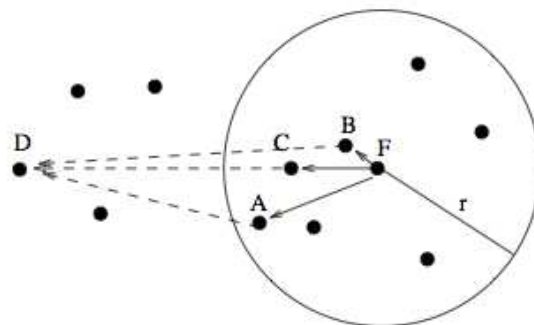


FIGURE D.1 – GPSR, Mode "Greedy Forwarding"

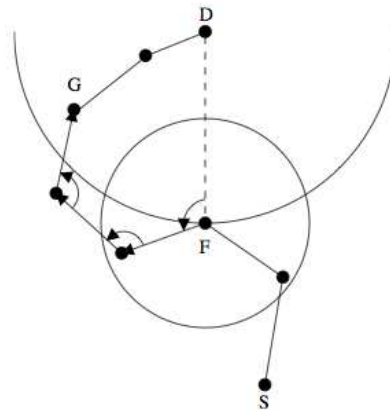


FIGURE D.2 – GPSR, Mode "Greedy Perimeter"

## D.5 Routage hiérarchique

### D.5.1 CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing)

Le protocole CGSR [Chiang *et al.* 1997] utilise des clusters. Il y a donc différents types de nœuds : des nœuds sans état, des cluster-heads et des nœuds passerelle. Chaque nœud du réseau est rattaché au cluster-head du cluster auquel il appartient. Celui-ci est responsable du partage du canal entre les différents nœuds du cluster et toutes les communications du cluster passent par lui. Si un nœud appartient à plusieurs clusters, il sert de passerelle entre ces clusters.

Lorsqu'un nœud veut envoyer des données, il les envoie à son cluster-head. Celui-ci détermine la route vers le destinataire grâce au protocole DSDV en utilisant uniquement des cluster-heads comme nœud intermédiaire. Une fois la route déterminée, il envoie les données au nœud qui sert de passerelle vers le prochain cluster. Une fois le dernier cluster atteint, le cluster-head envoie les données à la destination.



# Annexe E

## Quelques solutions pour améliorer les performances de TCP dans les réseaux ad hoc mobiles

Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature pour améliorer les performances de TCP dans les réseaux ad hoc [Al Hanbali *et al.* 2005]. On peut les classer en plusieurs catégories : les solutions au niveau transport, c'est-à-dire les modifications de TCP, les solutions au niveau liaison et les solutions cross-layer qui modifient plusieurs couches simultanément. Nous allons dans chaque cas décrire deux solutions proposées.

### E.1 Solutions au niveau transport

#### E.1.1 Fixed RTO

Cette solution a été proposée dans [Dyer & Boppana 2001]. Elle permet de distinguer les pertes dues à la congestion et les pertes dues à une erreur de route au niveau TCP. Pour cela, lorsque le timer de retransmission (RTO) expire deux fois consécutivement, on considère qu'une erreur de route est survenue. On retransmet alors le paquet non acquitté mais on ne double pas une deuxième fois le RTO, contrairement au fonctionnement normal de TCP avec l'algorithme de backoff exponentiel.

#### E.1.2 TCP DOOR

TCP DOOR (TCP Detection of Out-of-Order and Response) a été proposé dans [Wang & Zhang 2002]. Là aussi, cette version permet de détecter les erreurs de route et donc de différencier les pertes dues à une erreur de route des pertes dues à la congestion. Ces erreurs sont détectées grâce aux déséquences de l'arrivée des paquets et des

acquittements. Un champ est ainsi ajouté aux paquets d’acquiescement, afin de numéroter les acquiescements dupliqués, et aux paquets de données, afin de numéroter séquentiellement tous les paquets émis, y compris les paquets retransmis. L’émetteur et le récepteur peuvent ainsi détecter une erreur. Si le récepteur détecte un déséquencecment, il envoie un paquet ”Out-Of-Order” (OOO). Une fois l’émetteur informé, il va temporairement désactiver le contrôle de congestion en gelant le RTO et la taille de la fenêtre de congestion.

## E.2 Solutions au niveau liaison

### E.2.1 Link RED

Link RED a été proposé dans [Fu *et al.* 2003]. Il s’agit de détruire aléatoirement des paquets dans la file d’attente au niveau liaison. La probabilité de destruction d’un paquet arrivant est fonction du taux de remplissage de la file, comme illustré dans E.1. Cela permet de décorrélérer les pertes des différents flux TCP et donc d’améliorer la fairness. La difficulté consiste alors à régler le seuil bas à partir duquel RED commence à détruire des paquets et le seuil haut au delà duquel RED détruit tous les paquets entrants.

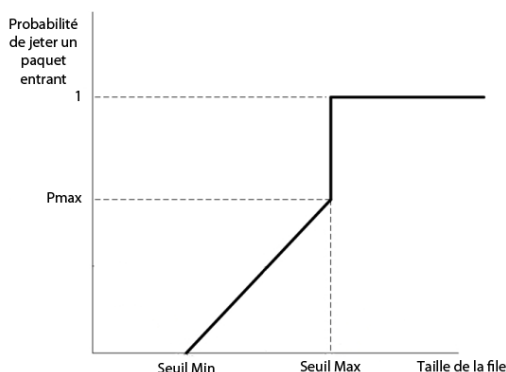


FIGURE E.1 – Fonctionnement de RED

### E.2.2 Pacing

Cette solution a été proposée dans [Franklin *et al.* 2007]. Il s’agit en fait d’espacer l’envoi des paquets au niveau liaison afin d’éviter les congestions et les pertes en rafales très pénalisantes pour TCP. En effet, il va considérer qu’il y a une rupture de lien et non pas une perte isolée. La solution proposée consiste à déterminer le délai moyen des paquets dans la file d’attente du nœud suivant et à lui appliquer ce même délai afin d’uniformiser les délais d’attente sur toute la route. Cela nécessite donc d’écouter les transmissions des nœuds voisins.

## E.3 Solutions cross-layer

### E.3.1 Split TCP

Split TCP a été proposé en 2002 dans [Kopparty *et al.* 2002]. Il part du constat que les performances de TCP dans les réseaux ad hoc dépendent fortement de la distance entre le client et le serveur. En effet, les connexions longues sont plus souvent sujettes aux erreurs de transmission et aux erreurs de route. L'idée de Split TCP est donc de couper les longues connexions TCP en plusieurs segments. L'interface entre deux segments est appelée proxy. Ainsi, Split TCP définit un paramètre indiquant la distance maximale entre proxy. Lorsque l'agent de routage détecte que la connexion est plus longue que ce paramètre, le nœud devient un proxy. Il intercepte alors les paquets TCP, les stocke et envoie des acquittements à la source, ou au proxy précédent. Il se charge ensuite de les envoyer jusqu'à la destination comme s'il en était la source. Il faut cependant optimiser le paramètre de distance entre deux proxys en fonction de la dynamique du réseau.

### E.3.2 ATCP

ATCP (Ad hoc TCP) a été proposé dans [Liu & Singh 2001]. Il s'agit d'ajouter une couche intermédiaire entre IP et TCP au niveau de l'émetteur. Cette couche contrôle l'état de TCP et du réseau. Quatre états sont alors définis : "normal", "congestion", "perte" et un nouvel état "déconnexion". Ce dernier état signifie qu'une erreur de route a eu lieu. Elle est détectée par des messages ICMP (Internet Control Message Protocol). TCP génère alors des paquets sondes jusqu'au rétablissement de la connexion. Il repasse alors en mode "normal" et la fenêtre de congestion est réinitialisée à sa taille minimale.



# Annexe F

## Exemple de protocoles de routage proposées pour les réseaux ad hoc aéronautiques

Dans les travaux existants sur les réseaux ad hoc aéronautiques, de nombreuses études ont été consacrées au routage. Nous allons maintenant décrire les différentes solutions proposées.

### F.1 MUDOR

Dans la première étude sur les réseaux ad hoc aéronautiques [Sakhaee *et al.* 2006a, Sakhaee & Jamalipour 2006], les auteurs ont proposé un protocole de routage appelé MUDOR (Multipath Doppler Routing). Pour eux, le meilleur chemin dans un réseau ad hoc aéronautique est le chemin le plus stable, c'est-à-dire le chemin qui a la durée de vie la plus longue. Il est illustré dans la figure F.1, extraite de [Sakhaee *et al.* 2006a].

Pour trouver ce meilleur chemin, les auteurs proposent de mesurer le décalage en fréquence des paquets reçus, dû à l'effet Doppler. Cela permet de déterminer la vitesse relative entre l'avion émetteur et l'avion récepteur. On peut ensuite en déduire une estimation de la durée de vie du lien.

Le protocole MUDOR est un protocole de routage réactif inspiré du protocole DSR [Johnson *et al.* 2007]. Il utilise l'inondation pour découvrir les routes en diffusant un paquet Route Request. Chaque nœud qui reçoit un tel paquet le rediffuse, s'il ne l'a pas déjà reçu, en ajoutant son indicatif ainsi que la valeur de Doppler mesuré par rapport au nœud précédent. La destination répond par un paquet Route Reply. Le protocole prend ensuite en compte ces valeurs de Doppler pour sélectionner le chemin qui a la durée de vie la plus longue. Les auteurs ont ensuite comparé les performances de MUDOR et de DSR par simulation. Leurs résultats montrent que les chemins choisis par MUDOR sont plus

longs que ceux choisis par DSR, mais le nombre de handoff est diminué d'environ 50%.

Dans [Sakhaee & Jamalipour 2007], les mêmes auteurs ont proposé d'utiliser la méthode de mesure de Doppler pour établir des clusters d'avions stables. L'idée est donc là aussi de maximiser la durée de vie des clusters en regroupant dans un même cluster des avions qui vont dans la même direction. Ces avions ont donc un décalage Doppler faible.

Dans [Sakhaee *et al.* 2006b], ils ont proposé une amélioration du protocole MUDOR pour prendre en compte la qualité de service. Le nouveau protocole est appelé QoS-MUDOR. L'objectif de ce protocole est de maximiser la durée de vie des routes, tout en intégrant certaines contraintes de qualité de service, par exemple un délai maximum de propagation.

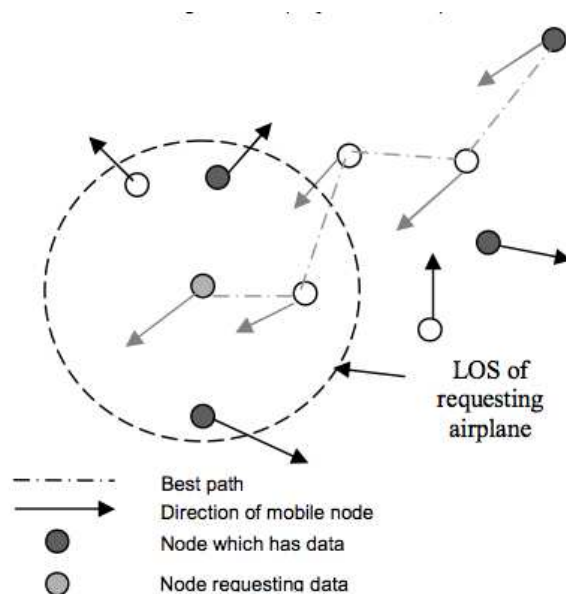


FIGURE F.1 – Définition du meilleur chemin pour le protocole MUDOR

## F.2 GPSR

Dans [Medina *et al.* 2008a, Medina *et al.* 2008b], les auteurs ont implémenté une version simplifiée de GPSR avec uniquement la méthode de routage Greedy Forwarding. Lorsqu'un nœud envoie un paquet, il indique dans le paquet la position de la destination. La décision de routage est ensuite prise localement au niveau de chaque nœud intermédiaire. Lorsqu'un nœud reçoit un paquet, il détermine le nœud le plus proche de la destination parmi l'ensemble de ses voisins directs et lui envoie le paquet. S'il est lui-même le nœud le plus proche de la destination mais qu'il ne peut pas la joindre, alors le paquet est détruit.

GPSR est un protocole de routage géographique qui nécessite des informations sur la position des nœuds dans le réseau. Dans [Seo *et al.* 2008], les auteurs proposent d'utiliser

les données ADS-B diffusées par chaque avion pour obtenir ces informations. Cela permet d'utiliser un système existant pour obtenir les informations de position et réduit donc les échanges de messages de contrôle.

## F.3 ARPAM

Dans [Karras *et al.* 2008a, Iordanakis *et al.* 2006], les auteurs proposent un protocole de routage hybride et géographique pour les réseaux ad hoc aéronautiques : ARPAM (Ad hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile ad hoc networks). Il est basé sur AODV et est donc en partie réactif. Il utilise en plus les informations de position des avions dans le réseau pour découvrir le chemin le plus court entre la source et la destination. Comme dans AODV, lorsqu'un nœud veut émettre un message et qu'il ne possède pas de route vers la destination, il diffuse un message Route Request. Ce message contient des informations de géolocalisation, en particulier la position et le vecteur vitesse de la source. Cette information est utilisée par les nœuds intermédiaires pour calculer la position courante de la source, qui évolue rapidement à cause de la vitesse élevée des avions. Lorsque la destination reçoit le message, elle répond par un Route Reply qui est envoyé à la source en unicast.

ARPAM propose ensuite un mécanisme de maintenance de route à la demande. Il s'agit en fait de maintenir des tables de routage lorsque c'est nécessaire, pour certaines applications par exemple, comme la voix sur IP ou la vidéo à la demande qui nécessite des temps de réponse du réseau faible. ARPAM est donc un protocole de routage réactif qui peut être proactif à la demande.

## F.4 AeroRP

AeroRP est un protocole de routage qui a été proposé pour les réseaux ad hoc aéronautiques dans [Jabbar & Sterbenz 2009, Peters *et al.* 2011]. Il s'agit d'un protocole de routage géographique. Contrairement à MUDOR ou ARPAM, les décisions de routage sont prises localement sans connaissance a priori de la route complète vers la destination. Chaque nœud doit envoyer les paquets à l'avion le plus proche de la destination. Pour cela, AeroRP utilise un système de signalisation. Chaque avion diffuse périodiquement des messages hello contenant des informations sur sa position et sa vitesse. En écoutant ces messages, chaque avion dispose de la position et de la vitesse de tous ses voisins. Pour chacun d'entre eux, il va déterminer le TTI (Time To Intercept). Il s'agit du temps au bout duquel il sera potentiellement à portée de transmission de la destination. Il va ainsi envoyer les paquets à l'avion qui a le plus faible TTI. Si aucun avion ne va intercepter la destination, ou s'il a lui-même le plus faible TTI, il pourra conserver le paquet un certain

temps ou le supprimer.

## F.5 GLSR

GLSR (Geographic Load Share Routing) est un protocole de routage géographique proposé pour les réseaux ad hoc aéronautiques dans [Medina *et al.* 2010b, Medina *et al.* 2011b, Medina *et al.* 2011a, Medina *et al.* 2010a]. GLSR est une extension du protocole GPSR qui exploite la multiplicité des chemins entre la source et la destination. L'idée de GLSR est d'utiliser simultanément plusieurs chemins entre la source et la destination. Son principe est illustré dans la figure F.2. Comme dans GPSR, l'idée principale est d'envoyer les paquets au nœud qui permet de se rapprocher le plus de la destination. Pour cela, GLSR détermine l'"avancement"  $a_k^m$  que permet chaque voisin  $k$  pour joindre la destination  $m$ .  $a_k^m$  est définie comme étant la différence entre  $\delta_{im}$ , la distance entre le nœud courant  $i$  et la destination  $m$ , et  $\delta_{km}$ , la distance entre le voisin  $k$  et la destination  $m$ . Si  $a_k^m$  est positif, le voisin  $k$  permet d'avancer vers la destination. Ensuite, GLSR va déterminer le meilleur chemin parmi les différents chemins disponibles. Pour cela, chaque nœud dispose de plusieurs files d'attente pour les paquets à envoyer. Il y a une file d'attente pour chacun des voisins. GLSR va prendre en compte le taux de remplissage de ces files pour déterminer le meilleur chemin. La métrique utilisée pour le choix du meilleur voisin est finalement le rapport entre l'avancement  $a_k^m$  et la taille de la file  $Q_k$ . Cela permet de favoriser les nœuds qui ont le meilleur avancement et le plus faible temps d'attente dans la file. Dans leur étude, les performances de GLSR sont testées avec des liens multiples très directionnels entre avion et une méthode d'accès S-TDMA.

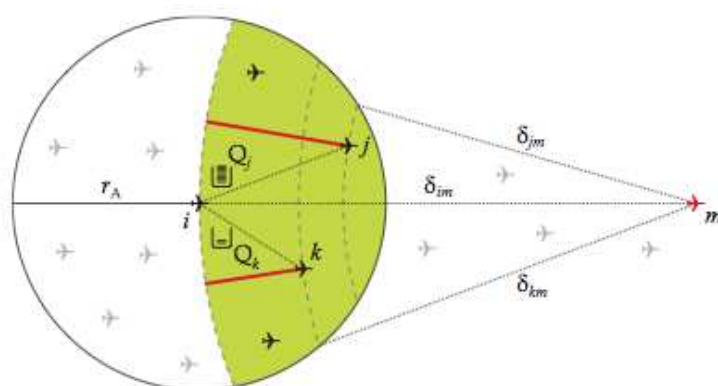


FIGURE F.2 – Principe de GLSR

## F.6 GRAA

GRAA (Geographic Routing protocol for Aircraft Ad hoc Network) a été proposé dans [Hyeon *et al.* 2010]. Il s'agit là aussi d'un protocole géographique basé sur GPSR.

La décision de routage est donc prise localement au niveau de chaque nœud intermédiaire. Pour déterminer le prochain saut, chaque nœud prend en compte la position de ses voisins et de la destination, mais aussi leur vitesse. Dans un premier temps, le nœud calcule la position estimée de la destination après une période de temps  $t$ , à partir de sa position actuelle et de sa vitesse. Ensuite, il calcule la position estimée de chacun de ses voisins après ce même temps  $t$ . Le nœud choisi pour le prochain saut est celui dont la position estimée est la plus proche de la position estimée de la destination au bout du temps  $t$ .



## Annexe G

### Les problèmes du nœud caché et du nœud exposé

Le problème du nœud caché [Ware *et al.* 2001] est illustré dans la figure G.1a. Les nœuds A et C veulent communiquer avec le nœud B et ils sont hors de portée l'un de l'autre. Dans cette situation, le nœud A ne peut pas détecter l'émission du nœud C et réciproquement. Ils peuvent donc émettre simultanément et une collision peut avoir lieu au niveau du nœud B.

Le problème du nœud exposé est illustré dans la figure G.1b. Le nœud B veut transmettre des données au nœud A et le nœud C veut transmettre des données au nœud D. Lorsque B transmet ses données, C va détecter que le canal est occupé et ne va donc pas émettre alors qu'il aurait pu car les nœuds A et D ne sont pas à portée l'un de l'autre.

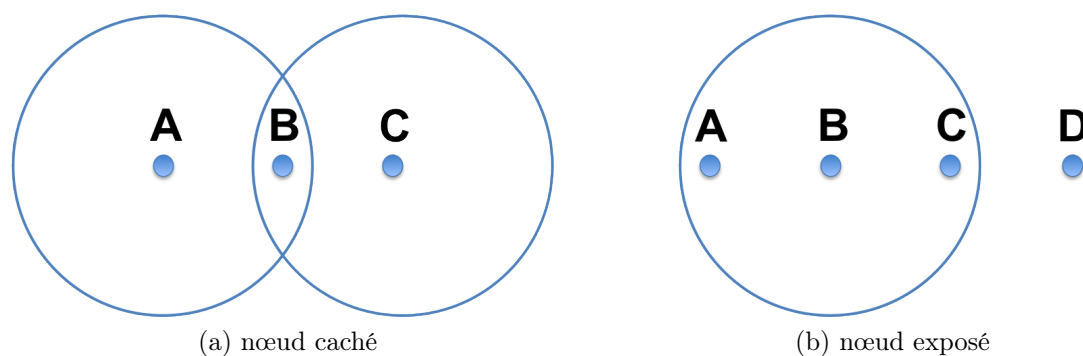


FIGURE G.1 – Les problèmes du nœud caché et du nœud exposé



# Annexe H

## Calcul de la portée optique

Dans cette partie, nous allons détailler le calcul de la portée optique. On considère deux avions  $A$  et  $B$  volant à une même altitude  $h$ . On veut déterminer la distance maximale  $d$  pour laquelle les deux avions sont en ligne de vue directe. Cette distance est limitée par la courbure de la Terre. Soit  $C$  le centre de la Terre et  $R_T$  son rayon. Le schéma H.1 illustre ce problème.

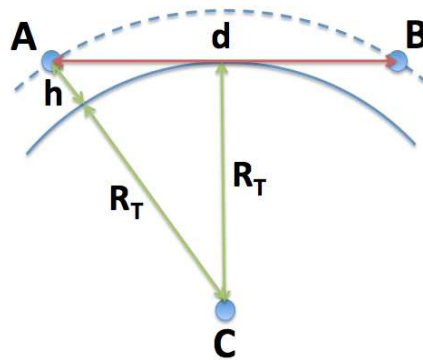


FIGURE H.1 – Calcul de la portée optique

On a donc :

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 + R_T^2 = (R_T + h)^2 \quad (\text{H.1})$$

d'où :

$$d = 2\sqrt{h(h + 2R_T)} \quad (\text{H.2})$$

Pour le niveau de vol FL300, soit une altitude de vol de 30000 pieds, soit  $h = 9,144km$  et  $R_T = 6371km$ , on obtient une portée optique  $d = 683km$ .



# Annexe I

## Principe de l'étalement de spectre à séquence directe

### I.1 Principe général

Le CDMA utilise la technique de l'étalement de spectre à séquence directe. Il s'agit en fait de transmettre les données sur une bande passante considérablement plus large que l'ensemble des fréquences composant le signal original. Pour cela, chaque nœud dispose d'un code d'étalement pseudo-aléatoire unique  $c(t)$  de fréquence  $f_c = 1/T_c$  bit/s. Ce code d'étalement est une séquence binaire de "chip" qui apparaît statistiquement comme une séquence aléatoire, mais qui peut être reproduite de façon exacte par le récepteur en suivant des règles mathématiques.

Lorsqu'un nœud veut envoyer un signal de données  $d(t)$  de fréquence  $f_d = 1/T_d$  bit/s, il "étale" ce signal avec le code d'étalement et envoie donc le signal  $s(t) = c(t).d(t)$ . Ce principe est illustré dans la figure I.1.

Le rapport  $N$  entre le débit du signal étalé et le débit des données est appelé facteur d'étalement ou gain d'étalement. Il représente une propriété importante de l'étalement de spectre. Il représente le nombre de chips utilisés pour "étaler" un bit de donnée, il est supérieur à 1. Ainsi, on a :

$$N = \frac{f_c}{f_d} = \frac{T_d}{T_c} \quad (\text{I.1})$$

Le signal étalé occupe donc une bande de fréquence plus large que le signal de départ. Cela a pour conséquence d'étaler l'énergie du signal utile sur toute la bande disponible, et donc de transmettre le signal avec un très faible niveau de puissance, éventuellement en dessous du niveau de bruit ambiant. Les premières applications de l'étalement de spectre furent d'ailleurs développées par les militaires pour cacher des communications. L'étalement de spectre permet d'avoir une très faible probabilité de détection et d'interception.

De plus, les signaux sont très résistants aux interférences et aux brouillages.

Au niveau du récepteur, il suffit ensuite de reproduire le code d'étalement utilisé par l'émetteur et, une fois synchronisé, en multipliant le signal reçu par ce code d'étalement, on peut "désétalement" le signal reçu pour retrouver le signal original. Le fait d'avoir des codes différents pour les différents utilisateurs permet de séparer les communications simultanées. Nous allons maintenant nous intéresser aux différentes familles de codes d'étalement qui peuvent être utilisées pour le CDMA.

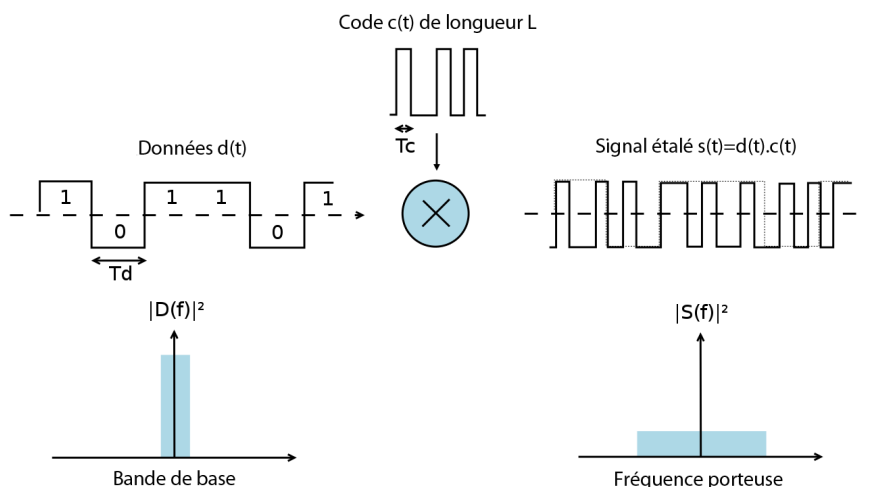


FIGURE I.1 – Principe de l'étalement de spectre à séquence directe

## I.2 Les codes d'étalement

Pour le CDMA, chaque avion doit utiliser un code d'étalement pour envoyer ses données. La capacité de décoder les messages des différents avions vient en fait de l'orthogonalité des codes d'étalement utilisés. Cette orthogonalité des codes est mesurée mathématiquement par leur autocorrélation et leur intercorrélation. Pour un code  $C_i$  de longueur  $L$ , tel que :

$$C_i = \left[ c_i(0) \quad c_i(1) \quad \dots \quad c_i(L-1) \right] \quad (\text{I.2})$$

on définit  $K_{C_i}(m)$  sa fonction d'autocorrélation telle que :

$$K_{C_i}(m) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} c_i(k) \cdot c_i(k+m) \quad (\text{I.3})$$

Pour deux codes  $C_i$  et  $C_j$  de longueur  $L$ , on définit leur intercorrélation  $K_{C_i C_j}(m)$  telle que :

$$K_{C_i C_j}(m) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} c_i(k) \cdot c_j(k+m) \quad (\text{I.4})$$

Ainsi, l'autocorrélation des codes d'étalement doit présenter un pic étroit pour faciliter la synchronisation du code généré localement avec le signal reçu. De plus, les codes d'une même famille doivent avoir une intercorrélation la plus faible possible, voire nulle, afin de séparer correctement les différents utilisateurs. De nombreux travaux de recherche ont alors portés sur la conception de famille de codes ayant de telles propriétés [Dinan & Jabbari 1998]. Plusieurs familles de codes ont ainsi été développées et sont aujourd'hui largement utilisées dans les systèmes CDMA. Nous allons en décrire quelques-unes.

### I.2.1 Les codes de Walsh-Hadamard

Tout d'abord, des codes d'étalement parfaitement orthogonaux ont été créés. Ces codes ont une intercorrélation nulle lorsqu'ils sont parfaitement synchronisés. On parle de CDMA synchrone. Cela permet de séparer parfaitement tous les utilisateurs et d'utiliser au mieux la capacité du système, à condition que l'émetteur et le récepteur soient parfaitement synchronisés. On peut citer par exemple les codes de Walsh-Hadamard. Ce sont des codes de longueur  $L = 2^n$  qui sont obtenus à partir de la matrice de Hadamard de taille  $L$ . Ces matrices sont obtenues par récurrence :

$$H_1 = [0], H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, H_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, H_{2L} = \begin{bmatrix} H_L & H_L \\ H_L & \overline{H_L} \end{bmatrix} \quad (\text{I.5})$$

La matrice de Hadamard de taille  $L$  permet d'obtenir  $L$  codes de longueur  $L$  parfaitement orthogonaux : ce sont les lignes de la matrice. Cependant, ces codes ont des inconvénients. Tout d'abord, ils n'ont pas un pic d'autocorrélation unique et étroit. En effet, il est possible que deux séquences d'une même famille puissent être obtenues par un simple décalage. Il est donc absolument nécessaire d'avoir une parfaite synchronisation entre l'émetteur et le récepteur et le système sera particulièrement sensible aux multitrajets. De plus, les codes ne sont parfaitement orthogonaux que si l'on prend en compte l'intercorrélation complète de deux codes. L'intercorrélation partielle d'une sous-partie de deux codes n'est pas nulle, ce qui peut être problématique pour les longs codes puisqu'il va falloir intégrer sur toute la longueur du code pour être certain d'avoir identifié le bon code. Enfin, tous les codes d'une même famille sont de la même longueur, ce qui ne permet pas de s'adapter à différents débits de données.

## I.2.2 Les codes OVSF

Les codes OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor) ont été introduits dans [Adachi *et al.* 1997]. Il s'agit d'une variante des codes de Walsh-Hadamard. Ils sont obtenus de la même façon, par récurrence. La famille de codes OSVF de longueur  $N$  comprend tous les codes de Walsch-Hadamard de longueur inférieure ou égale à  $N$ . On les représente généralement sous forme d'arbre, comme illustré dans la figure I.2. On a donc un ensemble de codes de longueurs différentes, ce qui permet de faire varier le gain d'étalement et de s'adapter à différents débits de données. Les codes se trouvant à une même profondeur dans l'arbre sont parfaitement orthogonaux. En revanche, les codes se trouvant dans une même branche sont liés et ne sont pas forcément orthogonaux. Ainsi, lorsque l'on utilise un code dans l'arbre, tous ses codes fils ne peuvent plus être utilisés. Ces codes nécessitent là aussi une parfaite synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.

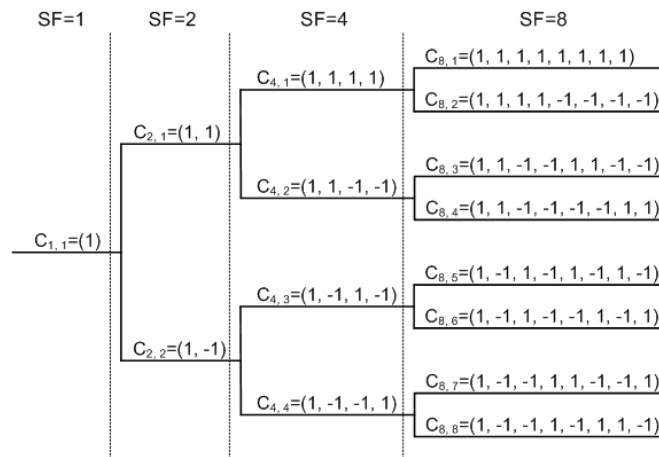


FIGURE I.2 – Arbre des codes OVSF

## I.2.3 Les m-séquences

Les m-séquences, ou séquences maximales, sont des codes obtenus grâce à des registres à décalage à rétroaction linéaire, dont le schéma général est présenté dans la figure I.3. On a donc un registre à  $n$  états,  $a_{n-k}$  représente la valeur binaire stockée dans la case  $k$ ,  $\alpha_{n-k}$  représente le poids associé au retour de la case  $k$  (0 ou 1) et  $x(n)$  est la valeur de sortie du registre. Chaque valeur binaire fournie par ce registre est donc une combinaison linéaire des valeurs précédentes. Le mot binaire constitué par les  $n$  cases de ce registre s'écrit  $X(n) = [a_{n-1} \dots a_0]$ . On montre que la succession des  $X(n)$  est périodique, donc la sortie du registre  $x(n)$  aussi. Le nombre maximal de mots binaires  $X(n)$  différents contenus dans la période est  $2^n$ . Or l'état  $X(n) = [0 \dots 0]$  est absorbant et on montre qu'il ne peut être atteint que si on initialise le registre avec cet état. Le nombre maximal d'états de la période de valeurs de  $X(n)$  est donc  $L = 2^n - 1$ . Si un tel registre fournit

une succession d'états  $X(n)$  de période maximale  $L$ , la séquence des  $x(n)$  est appelée une séquence maximale, ou m-séquence.

On montre que la condition nécessaire et suffisante pour que la séquence  $x(n)$  fournie par un registre à décalage soit une m-séquence est que le polynôme  $Q(X) = \sum_{i=0}^n \alpha_i X^i$ , avec  $\alpha_0 = 1$ , soit un polynôme primitif. Le polynôme primitif  $Q(X)$  engendre les  $2^n - 1$  éléments non nuls du corps de Galois  $CG(2^n)$ . On montre aussi que les m-séquences possèdent de bonnes propriétés d'équilibre entre le nombre de "0" et de "1". La fonction d'autocorrélation des m-séquences est la suivante :  $\forall k \in \mathbb{Z}, K_C(kL) = 1$ , et  $\forall m \neq kL, K_C(m) = -\frac{1}{L}$ , illustrée dans la figure I.4.

Malheureusement, les m-séquences ne possèdent pas de bonnes propriétés d'intercorrélacion [Sarwate & Pursley 1980]. Elles ne sont donc pas adaptées au CDMA. C'est pourquoi un autre type de codes a été proposé : les codes pseudo-aléatoires, avec en particulier les codes de Gold.

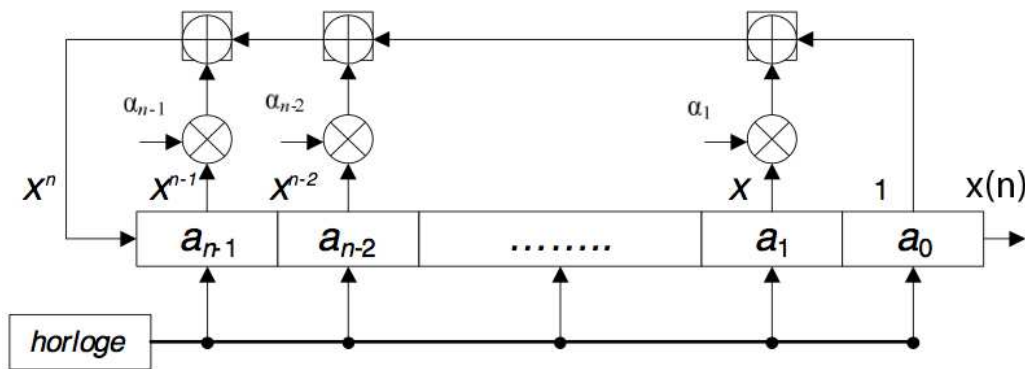


FIGURE I.3 – Registre à décalage à rétroaction linéaire à  $n$  états

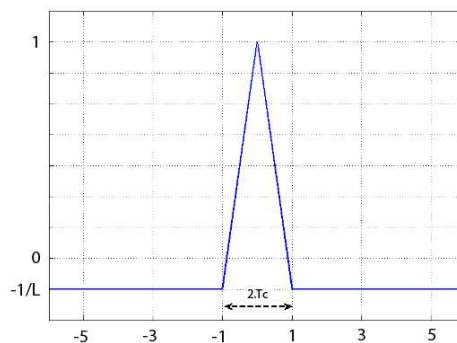


FIGURE I.4 – Autocorrélation d'une m-séquence

### I.2.4 Les codes pseudo-aléatoires et les codes de Gold

Un code pseudo-aléatoire, ou code PRN (Pseudo Random Noise), ou code PN (Pseudo Noise), est une séquence binaire dont les propriétés pseudo-aléatoires sont les plus proches

possibles de celles des m-séquences : équilibre du nombre de "0" et de "1" et autocorrélation présentant un pic étroit et des valeurs très faibles en dehors. L'objectif est ensuite de trouver une famille de codes PRN avec de bonnes propriétés d'intercorrélation. Les codes PRN de la famille doivent être le moins corrélé possible entre eux. A l'heure actuelle, l'une des seules théories complètes existantes pour former de telle famille est celle des codes de Gold [Gold 1967]. Ils sont notamment utilisés dans le système GPS.

Une famille de codes de Gold est une famille de codes PRN fabriqués comme étant la somme modulo 2 de deux m-séquences différentes fabriquées par le même registre à décalage. Le principe est illustré dans la figure I.5. Une famille de codes de Gold de longueur L possède L+2 codes PRN distincts. Leur intercorrélation est bornée [Gold 1967].

La théorie de Gold permet donc de générer un très grand nombre de codes. De plus, leurs propriétés d'autocorrélation et d'intercorrélation les rendent particulièrement efficaces pour le CDMA, et en particulier pour le CDMA asynchrone lorsqu'une synchronisation parfaite entre l'émetteur et le récepteur n'est pas possible, en environnement mobile par exemple. Cependant, les codes de Gold n'étant pas parfaitement orthogonaux, un résidu d'intercorrélation apparaît entre le code de l'utilisateur utile et celui des autres utilisateurs. Ce résidu génère une forme d'interférence appelée interférence d'accès multiple, ou MAI (Multiple Access Interference), que nous détaillerons dans la partie 3.3.5.

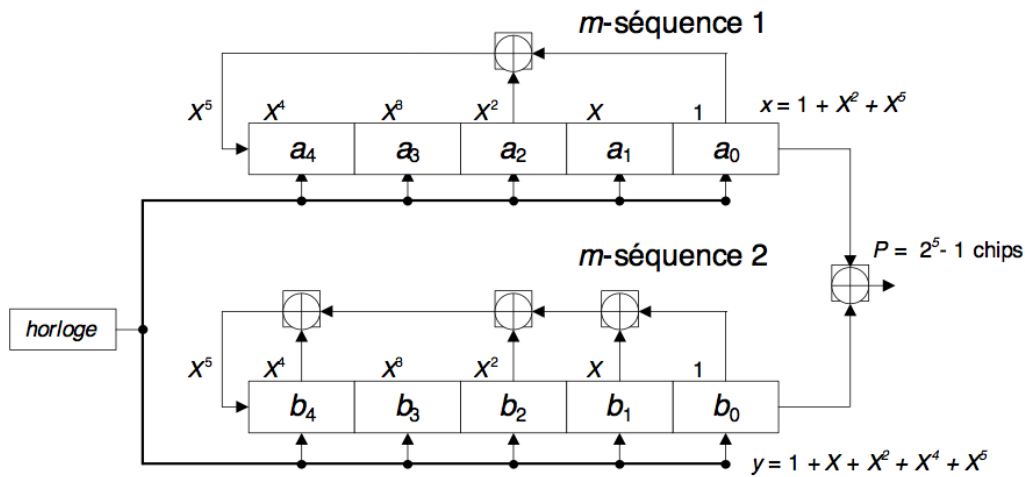


FIGURE I.5 – Principe des codes de Gold

# Annexe J

## Logiciel de simulation AeRAN

Le logiciel que nous avons développé pour réaliser l'étude de faisabilité a été écrit en JAVA. Il s'agit d'un outil de simulation et de visualisation pour les réseaux ad hoc aéronautiques et plus généralement pour les réseaux ad hoc mobiles. Nous allons voir maintenant son principe puis détailler ses fonctionnalités.

### J.1 Principe

Nous disposons en entrée de fichiers contenant l'indicatif et la position de chaque avion à chaque instant de la journée. Dans un premier temps, le logiciel lit donc les données contenues dans l'un de ces fichiers. On fera ensuite une boucle pour traiter tous les fichiers de la même façon et obtenir des statistiques sur la journée entière. Ensuite, nous construisons un graphe dont les nœuds sont les avions et les stations sols, et dont les arêtes sont les connexions que l'on peut établir entre eux. Enfin, nous explorons le graphe pour voir le nombre d'avions connectés. On en déduit alors des statistiques sur le pourcentage d'avions que l'on peut connecter à une ou plusieurs stations sol, sur la durée de connexion de chaque avion. Le logiciel permet aussi de visualiser le graphe et de voir son évolution au cours du temps.

### J.2 Les entrées

Pour l'étude de faisabilité, ce logiciel a besoin des entrées suivantes :

- les fichiers contenant les indicatifs et les positions de chaque avion à chaque instant de la journée
- un fichier contenant la liste des stations au sol ainsi que leurs positions
- la portée maximale de chaque avion et de chaque station.

## J.3 La gestion du graphe

### J.3.1 La bibliothèque Jgrapht

Pour la gestion du graphe, nous avons utilisé la bibliothèque Jgrapht<sup>1</sup>. Il s'agit d'une bibliothèque Java libre qui permet de gérer différents types de graphes. Les graphes sont constitués de nœuds et d'arêtes, qui peuvent être simples, pondérées, orientées, ...

### J.3.2 Les nœuds

Dans notre cas, les nœuds sont des avions ou des stations. On a donc implémenté dans le programme une interface `Node` qui est implémentée par les deux classes `Aircraft` et `Station`. Chaque nœud contient un type ("Aircraft" ou "Station"), une position (abscisse, ordonnée et niveau de vol) et une portée. Les avions contiennent en plus un numéro de vol. On peut aussi rajouter d'autres éléments comme l'heure de départ et d'arrivée, les aéroports de départ et d'arrivée, le nom de la compagnie, ...

Les nœuds sont chargés dans une classe `NodeVector`, qui hérite de la classe `Vector`, à partir d'un fichier de données d'un instant donné. On se sert ensuite de ce `NodeVector` pour créer le graphe avec ses arêtes.

Voilà le diagramme UML qui illustre cela :

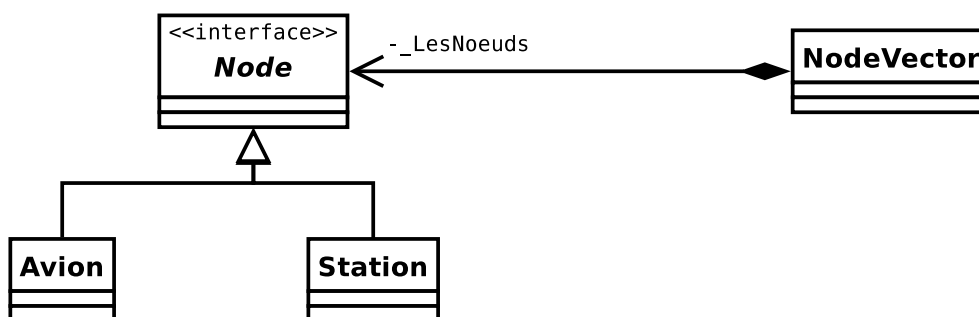


FIGURE J.1 – Diagramme UML de la gestion des nœuds

### J.3.3 La création des arêtes

A partir du `NodeVector` obtenu précédemment, on doit maintenant construire le graphe. C'est le rôle de la classe `ReceptionGraphCreator`. Cette classe parcourt le vecteur `NodeVector`, calcule la distance entre chaque avion à partir de leur position. Dès que la distance entre deux avions est inférieure à leur portée, on établit une connexion entre eux, c'est-à-dire que l'on rajoute une arête entre eux dans le graphe.

On obtient ainsi le graphe complet, dont les nœuds sont les avions, et dont les arêtes sont toutes les connexions possibles entre eux.

---

1. <http://jgrapht.org/>

## J.4 Les statistiques

Une fois que l'on a obtenu le graphe complet, nous devons déterminer le pourcentage d'avions connectés aux stations sol. Pour cela, nous explorons le graphe complet afin d'en extraire le sous-graphe connexe qui contient les stations sol. On suppose que toutes les stations sol sont reliées entre elles. C'est le rôle de la classe `ConnectivityInspector`. Il suffit alors de compter le nombre d'avions contenus dans ce sous-graphe et de le comparer au nombre d'avion du graphe complet. On peut ensuite afficher ces données ou les sauvegarder dans un fichier pour une étude ultérieure.

## J.5 La visualisation

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'affichage graphique du réseau. Nous avons donc développé une application permettant d'afficher le réseau, c'est-à-dire le graphe complet dont les nœuds sont les avions et dont les arêtes sont toutes les connexions possibles entre eux.

Pour cela, nous avons utilisé la librairie Java LWJGL<sup>2</sup>. Nous avons créé la classe `GraphDrawer` qui permet d'afficher les avions et les arêtes d'un graphe à l'écran. Nous avons ensuite créé la classe `MultiDrawer` qui permet d'afficher plusieurs éléments, à savoir le graphe, la carte en fond, les paramètres de la simulation (date, heure, portée, pas).

Ensuite, nous avons pu faire une animation de ce graphe sur la journée en affichant successivement les graphes obtenus à chaque instant. La figure J.2 montre le résultat obtenu. Les points rouges représentent des avions en vol, les points verts des stations au sol et les arêtes noires les connexions possible entre eux.

---

2. <http://www.lwjgl.org>

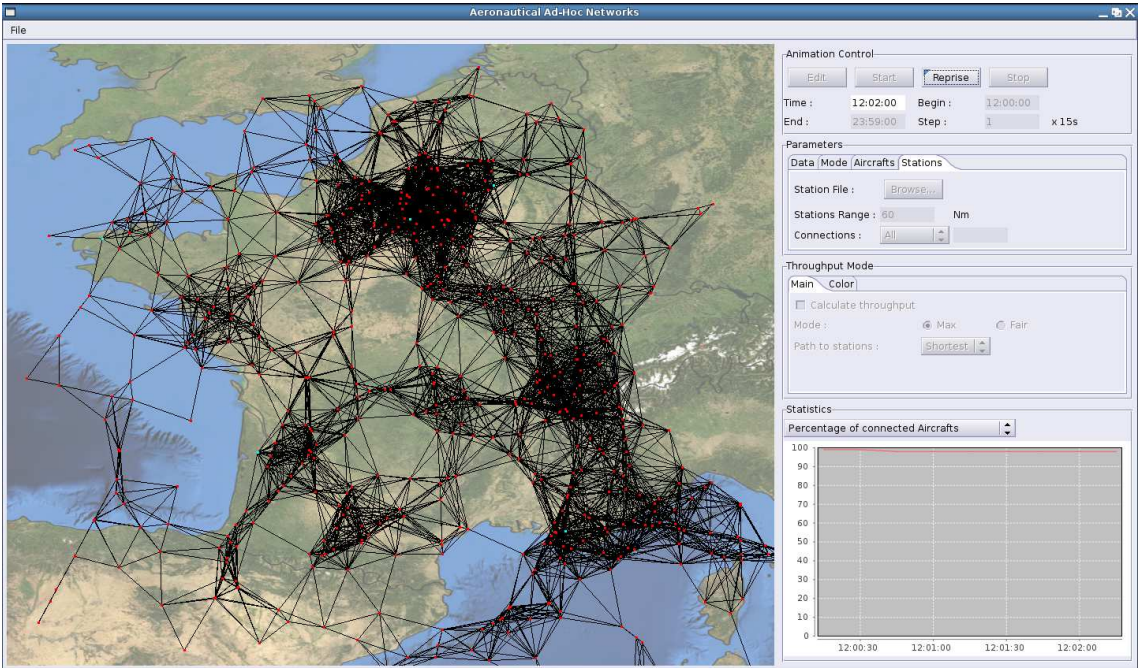


FIGURE J.2 – Capture d'écran de l'animation du réseau

# Annexe K

## Modèle de simulation OPNET

### K.1 Présentation générale

Nous avons développé un modèle de simulation des réseaux ad hoc aéronautiques avec le logiciel OPNET Modeler. L'objectif de ce modèle est de pouvoir simuler de façon réaliste un réseau ad hoc aéronautique en tenant compte de la position réelle des avions et des stations sol, tout en pouvant paramétrer le trafic généré par chaque avion en fonction des applications envisagées. Le modèle permet donc simuler un nombre quelconque d'avions et de stations.

Au niveau de la méthode d'accès. Nous avons choisi le CDMA. Dans le cas d'un réseau asynchrone, nous avons vu que des interférences d'accès multiples existaient entre les différents utilisateurs. Le modèle permet donc de calculer ces interférences d'accès multiples pour chaque paquet reçu afin de déterminer si le paquet est correctement reçu ou non. Enfin, il permet d'étudier le routage dans le réseau ad hoc aéronautique.

Pour l'instant, nous avons choisi de considérer le réseau ad hoc comme un réseau d'accès vers une station sol. On considère que la voie retour utilise un autre moyen de communication, par exemple un satellite géostationnaire. Tous les avions vont donc émettre des paquets à destination de la station sol et vont avoir besoin d'une route vers celle-ci. La station sol va uniquement recevoir les paquets émis par les avions, elle ne va pas en injecter dans le réseau. On considère donc une topologie en étoile autour de la (ou des) station(s).

OPNET Modeler propose des éditeurs multi-niveaux. Tout d'abord, on définit la topologie générale du réseau en plaçant les différents nœuds. Notre modèle se compose finalement de trois types de nœud : les avions, les stations et le manager. La figure K.1 montre une capture d'écran du modèle sous OPNET. On peut y voir le manager, cinq stations sol dont les positions correspondent aux cinq CRNA (Centre en Route de la Navigation Aérienne) : Paris, Reims, Brest, Bordeaux et Aix-en-Provence, ainsi que les avions regroupés dans des "subnets".

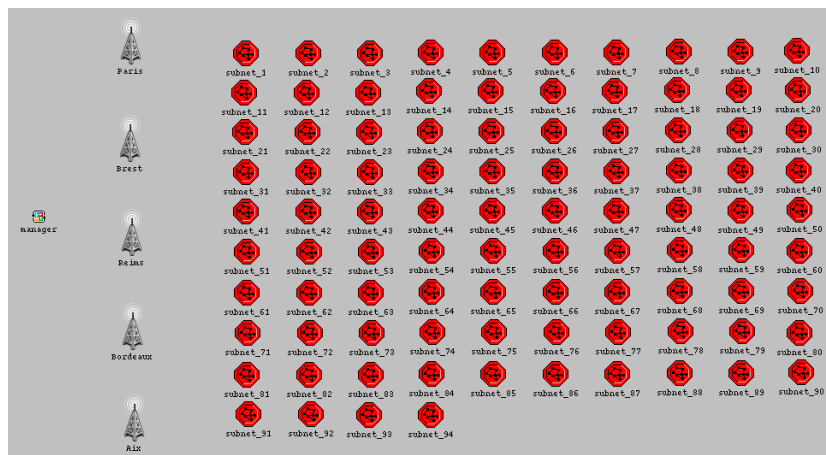


FIGURE K.1 – Capture d’écran du modèle OPNET

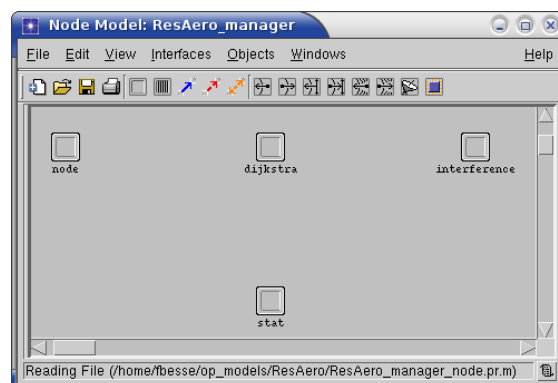
Ensuite, on doit spécifier le fonctionnement général de chaque type de nœud dans le ”node editor”. Nous nous sommes inspirés du modèle OSI de l’architecture générale des réseaux pour fragmenter le nœud en plusieurs processus représentant chacun une couche du modèle OSI. Enfin, on spécifie le fonctionnement de chaque processus à l’aide d’un diagramme à état.

Nous allons maintenant décrire plus en détail chacun des nœuds du modèle.

## K.2 Le Manager

La figure K.2 montre une capture d’écran du nœud *manager*. Celui-ci est composé de quatre processus :

- un processus *node* qui gère les avions et les stations
- un processus *dijkstra* qui gère le routage par l’algorithme de type ”plus court chemin”
- un processus *cluster* qui gère le routage par l’algorithme hiérarchique
- un processus *interference* qui gère les interférences
- un processus *stat* qui gère les statistiques globales des simulations.

FIGURE K.2 – Le nœud *manager*

Nous allons maintenant décrire chacun de ces processus.

### K.2.1 Le processus *manager\_node*

La figure K.3 montre le détail du processus *manager\_node*. Ce processus va créer une liste des avions et une liste des stations dans lesquelles les avions et les stations vont respectivement venir s'inscrire. Ensuite, il va lire le fichier contenant la liste des stations avec leurs positions et attribuer à chacune des stations de la simulation un identifiant et une position. De même, il va lire le fichier qui contient la liste de tous les avions présents dans les fichiers de données avec leurs heures de décollage et d'atterrissage et attribuer à chaque avion de la simulation un identifiant, une heure de décollage et une heure d'atterrissage.

Ensuite, c'est ce processus qui va régulièrement mettre à jour les positions de chacun des avions en vol durant la simulation. Il va aussi maintenir une matrice *distance* contenant les distances entre tous les avions, ainsi qu'entre les avions et les stations. Cela évite à chaque avion de devoir recalculer les distances lorsqu'il en a besoin, par exemple pour le calcul d'interférence à chaque fois qu'il reçoit un paquet. Les avions ont directement accès à cette matrice.

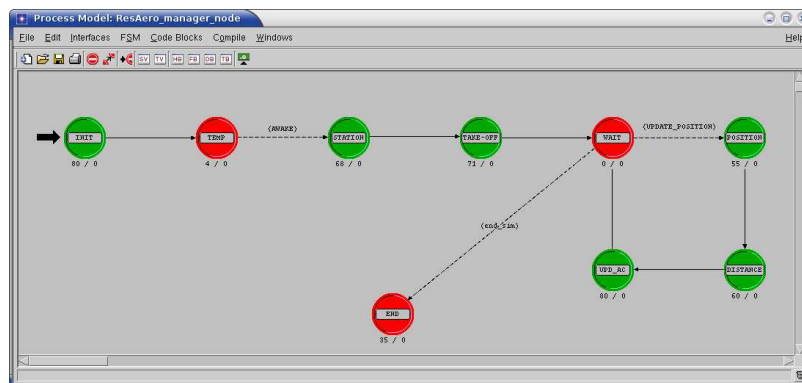


FIGURE K.3 – Le processus *manager\_node*

### K.2.2 Les processus *manager\_dijkstra* et *manager\_cluster*

La figure K.4 montre le détail du processus *manager\_dijkstra*. Pour l'instant, nous n'avons pas implémenté de protocole de routage. On suppose que chaque avion va se connecter à la station la plus proche par le chemin le plus court, donné par l'algorithme de Dijkstra. Pour éviter d'avoir à refaire le calcul des routes au niveau de chaque avion, nous avons choisi de faire ce calcul de façon centralisée dans le processus *manager\_dijkstra*. Ce calcul va se faire immédiatement après la mise à jour des positions des avions.

On dispose donc de la matrice *distance* contenant toutes les distances entre avions et entre les avions et les stations. Dans un premier temps, le processus va construire

une matrice *cost* représentant le coût des connexions dans le graphe. C'est cette matrice qui servira au calcul du Dijkstra. Elle est construite de la façon suivante : on donne en paramètre de la simulation une portée maximale, c'est-à-dire une distance maximale pour laquelle deux avions, ou un avion et une station peuvent établir une connexion. On parcourt ensuite la matrice *distance*, si la distance entre deux avions est supérieure à cette portée, le coût de la connexion est infini : on ne peut pas avoir de connexion entre les deux avions, sinon le coût est égale à la distance. Le coût des connexions entre les stations et ensuite fixé à zéro.

L'algorithme de Dijkstra calcul ensuite le chemin le plus court à partir d'une station vers tous les autres nœuds du graphe. On obtient ainsi pour chaque avion un chemin vers la station la plus proche, avec la contrainte que toutes les connexions intermédiaires utilisées pour joindre la station ont une longueur inférieure à la portée. Il y a donc éventuellement des avions non connectés, c'est-à-dire qui ne disposent d'aucun chemin vers une station.

Enfin, le processus *manager\_dijkstra* met à jour chaque avion en lui indiquant son prochain destinataire dans la route qui va vers la station.

Nous avons utilisé la même méthode pour le processus *manager\_cluster*, qui implémente lui l'algorithme de routage hiérarchique.

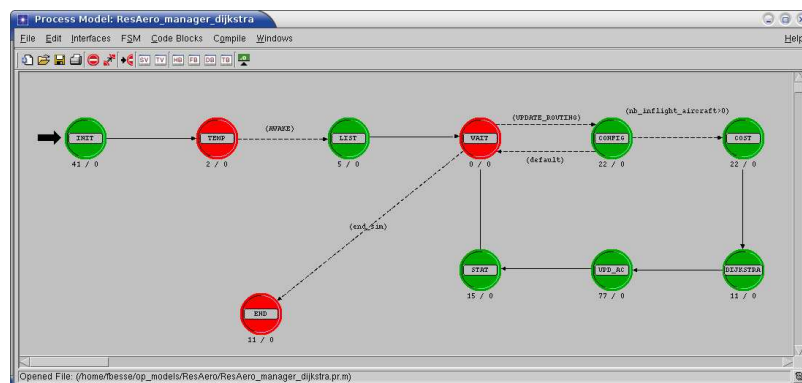


FIGURE K.4 – Le processus *manager\_dijkstra*

### K.2.3 Le processus *manager\_interference*

La figure K.5 montre le détail du processus *manager\_interference* qui gère les interférences. Dans le modèle, nous avons choisi de calculer les interférences à chaque fois qu'un nœud reçoit un paquet qui lui est destiné, qu'il soit la destination finale du paquet ou un nœud intermédiaire. Pour ce calcul, nous avons en fait besoin de connaître la liste des paquets émis immédiatement avant la réception du paquet pour lequel on fait le calcul d'interférence afin de déterminer s'il y a eu collision ou non. Le rôle du processus *manager\_interference* est donc de créer cette liste des *pending\_packet*. Ainsi, chaque fois qu'un avion va émettre un paquet, il va venir ajouter dans cette liste une structure contenant

des informations sur le paquet qu'il vient d'envoyer : identifiant du paquet, identifiant de l'émetteur, date d'émission, puissance d'émission, ...

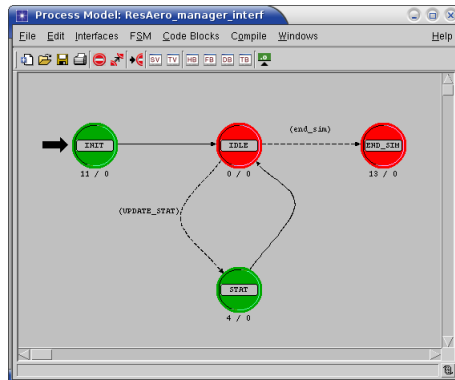


FIGURE K.5 – Le processus *manager\_interf*

#### K.2.4 Le processus *manager\_stat*

Le processus *manager\_stat* (figure K.6) sert à déclarer les paramètres de la simulation, les variables globales ainsi que les statistiques globales. Chaque avion pourra y avoir accès pour les mettre à jour.

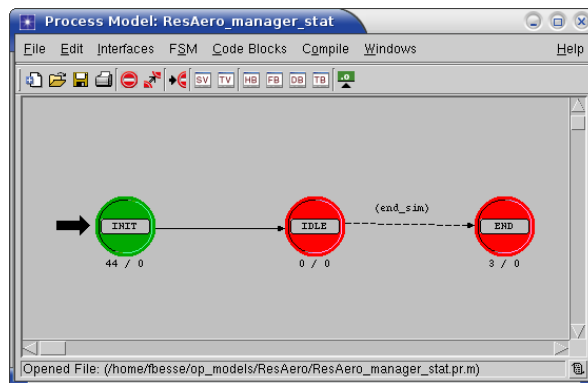


FIGURE K.6 – Le processus *manager\_stat*

### K.3 Les Avions

La figure K.7 montre l'architecture du nœud *aircraft*. Nous avons choisi de découper le modèle en suivant le modèle OSI de l'architecture des réseaux. De plus, nous avons séparé dans le modèle l'émission et la réception, ce qui est possible si l'on suppose que chaque avion dispose de deux antennes indépendantes : une pour la réception et une pour l'émission. Le modèle se compose donc des processus suivants : un processus *aircraft\_src* qui représente les applications : c'est la source de trafic, puis un processus pour les couches transport, réseau, liaison et physique du modèle OSI. Pour la réception, on a un processus

*aircraft\_rx* et un processus *aircraft\_interf* qui va calculer les interférences. On a en plus un processus manager *aircraft\_mgr* pour gérer l'avion. Nous allons maintenant décrire plus en détail chacun de ces processus.

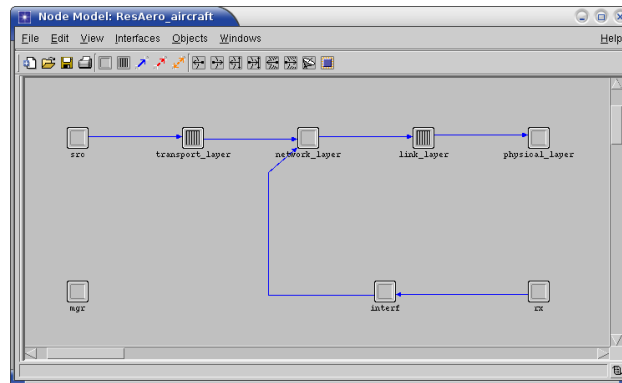


FIGURE K.7 – Le nœud *avion*

### K.3.1 Le processus *aircraft\_mgr*

Le processus *aircraft\_mgr* (figure K.8) va tout d'abord inscrire l'avion dans la liste des avions de la simulation du processus *manager\_node*. Ensuite, une fois que celui-ci lui aura assigné un identifiant, et donc une heure de décollage et d'atterrissage, le processus *aircraft\_mgr* programme une interruption pour son décollage et son atterrissage. Au décollage, il va inscrire l'avion dans la liste des avions en vol auprès du processus *manager\_node*, et il programme le démarrage de la source de trafic. De la même façon, à l'atterrissage, il enlève l'avion de la liste des avions en vol et stoppe la source de trafic.

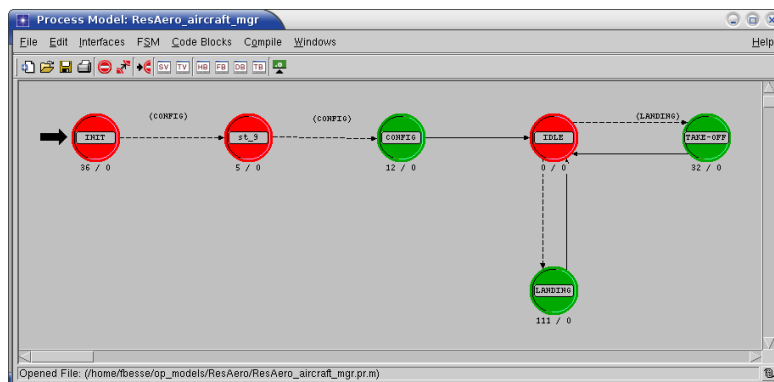


FIGURE K.8 – Le processus *aircraft\_mgr*

### K.3.2 Le processus *aircraft\_src*

Le processus *aircraft\_src* (figure K.9) est lancé par le processus *aircraft\_mgr* au décollage de l'avion. C'est le générateur de trafic. Il est paramétrable en fonction des applications que l'on veut simuler. On peut par exemple paramétrer la taille des paquets

en choisissant une taille fixe, une taille moyenne avec sa loi de distribution (uniforme, exponentielle,...) ou même donner une fonction de distribution quelconque issue d'autres simulations. De même, on peut paramétrer le temps moyen d'inter-arrivée des paquets (iat), qui va directement être lié à la charge du réseau.

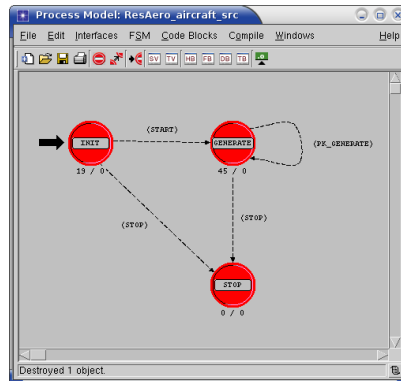


FIGURE K.9 – Le processus *aircraft\_src*

### K.3.3 Le processus *aircraft\_transport\_layer*

Dans le modèle, nous avons décidé d'implémenter les deux protocoles UDP et TCP au niveau transport. La figure K.10 montre le processus *TCP\_Greedy*.

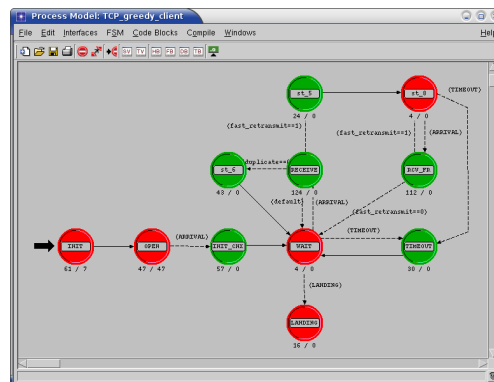
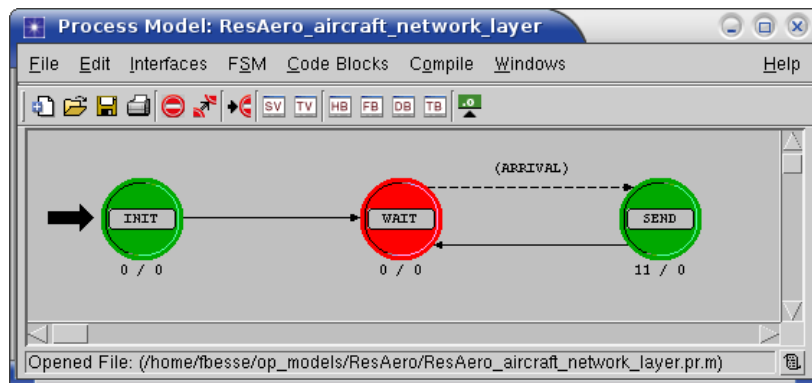


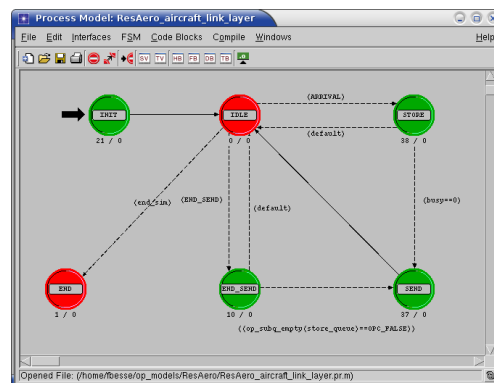
FIGURE K.10 – Le processus *aircraft\_transport\_layer*

### K.3.4 Le processus *aircraft\_network\_layer*

La couche réseau, illustrée dans la figure K.11, est relativement simple puisque l'on a pas encore implémenté de protocole de routage. Elle va donc simplement lire l'identifiant du nœud à qui l'avion doit envoyer ses paquets. Cet identifiant a été calculé par le processus *manager\_dijkstra*. Cette couche gère les paquets provenant des couches hautes de l'avion, c'est-à-dire créés par l'avion lui-même, ainsi que les paquets reçus par l'avion qu'il doit faire suivre.

FIGURE K.11 – Le processus *aircraft\_network\_layer*

### K.3.5 Le processus *aircraft\_link\_layer*

FIGURE K.12 – Le processus *aircraft\_link\_layer*

Au niveau de la couche liaison, on stocke tous les paquets arrivant des couches supérieures dans une file d'attente. Ensuite, on envoie les paquets de cette file d'attente séquentiellement, en tenant compte de la longueur de chacun des paquets, et du débit des connexions. A la fin de la simulation, tous les paquets en file d'attente sont détruits. Le nombre de paquets maximal dans la file d'attente est un paramètre de la simulation. Pour l'instant, nous avons choisi d'implémenter la fiabilité de la connexion de bout en bout uniquement, c'est-à-dire au niveau transport. Au niveau liaison, il n'y a donc aucun mécanisme d'acquiescement et de retransmission. Il pourra cependant être intéressant pour les futurs travaux de tester la fiabilité au niveau liaison, c'est-à-dire entre chacune des liaisons avion-avion du chemin vers la station, afin de voir si cela apporte ou non un gain de performance.

### K.3.6 Le processus *aircraft\_physical\_layer*

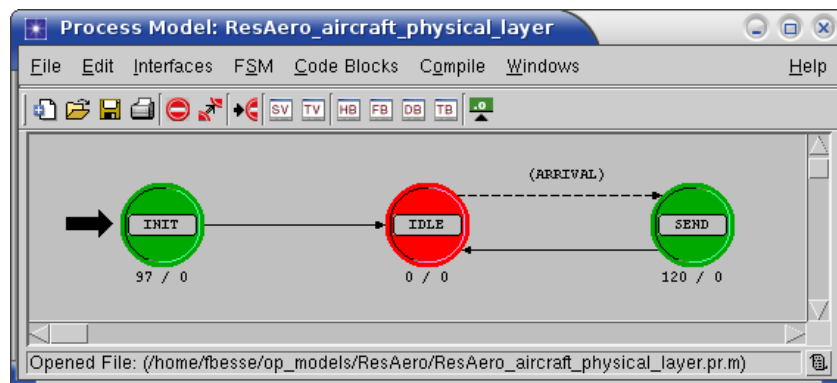


FIGURE K.13 – Le processus *aircraft\_physical\_layer*

La couche physique est là aussi relativement simple puisque l'on va envoyer les paquets reçus des couches supérieures au nœud suivant dans le chemin vers la station. De plus, on va créer une structure représentant le paquet que l'on envoie. Cette structure contient l'identifiant unique du paquet, l'identifiant de l'avion courant qui émet le paquet, l'identifiant de la source du paquet, la date courante d'émission, la puissance d'émission, le nombre de saut jusqu'à l'avion courant (que l'on va incrémenter au passage) ainsi que le nombre de retransmission du paquet.

On va ensuite ajouter cette structure à la liste des *pending\_packet* du processus *manager\_interference*.

### K.3.7 Le processus *aircraft\_rx*

Le processus *aircraft\_rx* reçoit les paquets et les fait remonter aux couches supérieures, en l'occurrence au processus *aircraft\_interf*.

### K.3.8 Le processus *aircraft\_interf*

Le processus *aircraft\_interf* est le processus qui calcule les interférences. Ce calcul se fait donc à chaque fois que l'on reçoit un paquet. La première étape consiste à déterminer si l'on a eu ou non une collision avec le paquet courant que l'on traite. Pour cela, on détermine les dates de début et de fin de réception du paquet courant, en fonction de la date actuelle de la simulation, de la taille du paquet et du débit de la connexion. Ensuite on va parcourir la liste des *pending\_packet* du processus *manager\_interference*. Pour chacun des paquets de la liste, on regarde sa date d'émission. Si le paquet a été émis avant une certaine date, correspondante à la durée de propagation pour parcourir la distance maximale d'interférences, donnée en paramètres de la simulation, on considère que le paquet ne peut plus interférer, on le supprime alors de la liste des *pending\_packet*.

Sinon, on calcule la date à laquelle l'avion courant va recevoir, reçoit ou à reçu le paquet, en fonction de la taille du paquet, de sa date d'émission et du débit de la connexion. On peut alors regarder s'il y a un chevauchement avec le paquet courant que l'on reçoit. S'il n'y a pas de collision, le paquet considéré n'interfère pas, on passe au paquet suivant de la liste des *pending\_packet*. En revanche, s'il y a collision, on regarde l'identifiant du paquet, ainsi que l'identifiant de l'émetteur et le nombre de saut. On les compare à ceux du paquet courant. S'ils sont identiques, le paquet considéré de la liste représente le paquet courant que l'on reçoit : il s'agit du paquet utile. On détermine alors la puissance du paquet en fonction de la puissance d'émission, de la distance entre l'avion émetteur et l'avion courant ainsi que de la fréquence du signal, donnée en paramètre de la simulation. On sauvegarde cette puissance dans la variable puissance utile. Dans le cas contraire, le paquet considéré représente un paquet interférant. On calcule alors sa puissance que l'on ajoute à la variable puissance interférence. Ensuite, s'il n'y a pas eu de collision, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de paquet interférant, on passe dans l'état forward. Le paquet est correctement reçu et on le fait remonter aux couches supérieures. En revanche, s'il y a eu une ou plusieurs collisions, on passe dans l'état SINR où l'on va calculer le rapport signal sur interférence du paquet reçu. On tient alors compte de la puissance utile, de la puissance d'interférence, du bruit, et du gain d'étalement, que l'on détermine en fonction du débit de la connexion et du débit chip du code d'étalement, tout deux donné en paramètre de la simulation. On compare alors la valeur de ce rapport signal sur interférence avec la valeur seuil donné en paramètre de la simulation. Cela permet de décider si le paquet est correctement reçu, auquel cas on passe à l'état forward et on envoie le paquet à la couche supérieur, ou si le paquet n'est pas correctement reçu. Dans ce cas, le paquet est détruit.

## K.4 Les Stations

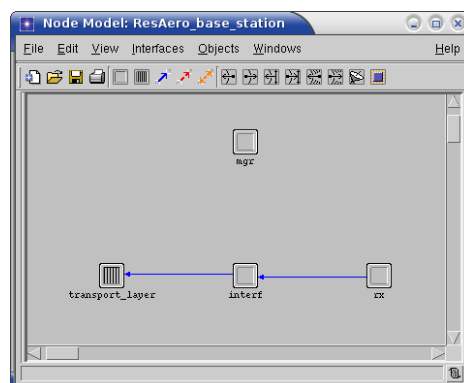


FIGURE K.14 – Le nœud *station*

### K.4.1 Le processus *station\_mgr*

Au début de la simulation, le processus *station\_mgr* va inscrire la station dans la liste des stations du processus *manager\_node* du manager. Cela permettra à la station de se voir attribuer un identifiant puis une position.

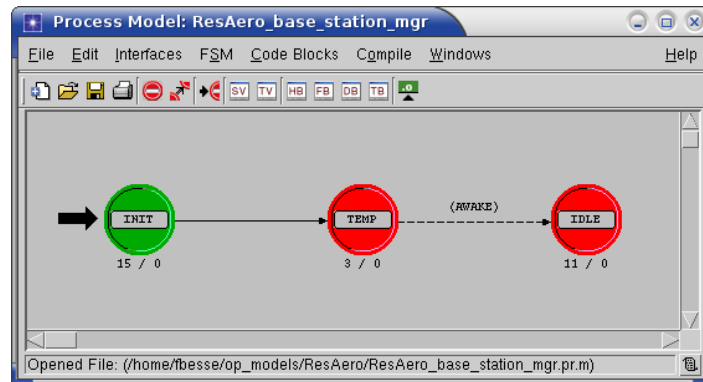


FIGURE K.15 – Le processus *station\_mgr*

### K.4.2 Le processus *station\_rx*

idem processus *aircraft\_rx*

### K.4.3 Le processus *station\_interf*

idem processus *aircraft\_interf*

### K.4.4 Le processus *station\_transport\_layer*

Le processus *station\_transport\_layer* traite uniquement les paquets correctement reçus par la station. Dans le cas du protocole TCP, on envoie un acquittement à la source du paquet. Ces acquittements sont envoyés directement à l'avion source sans passer par le réseau ad hoc, avec un délai donné en paramètre de la simulation.

## K.5 Modèle de trafic

Pour l'instant, nous disposons d'un modèle de trafic paramétrable pour les simulations et nous implémentons actuellement un modèle de TCP Greedy. Nous allons maintenant décrire brièvement ces deux modèles de trafic.

### K.5.1 Sources paramétrables

Le générateur de trafic par défaut est un modèle de source simple et paramétrable. On choisit la taille des paquets envoyés par chaque avion ainsi que la durée d'inter-arrivée des paquets. On peut choisir une valeur constante ou une distribution (exponentielle, uniforme,...). On peut éventuellement ajouter dans ce modèle un mécanisme de retransmission analogue à celui de TCP pour retransmettre les paquets lorsqu'on détecte des pertes.

Ce modèle nous permet par exemple de simuler du trafic ATC généré par chaque avion en choisissant les bonnes valeurs de taille de paquets et d'inter-arrivée. D'après une étude d'Eurocontrol, le trafic ATC peut être représenté par des paquets de taille uniformément répartie entre 32 et 265 octets, avec un temps d'inter-arrivée des paquets suivant une loi exponentielle de moyenne 38s, soit 1.56 messages par minute et par avion en moyenne.

### K.5.2 TCP Greedy

Le modèle de TCP Greedy que nous incluons actuellement dans le modèle de simulation implémente deux versions de TCP : TCP Reno et TCP New Reno. Dans les deux cas, il s'agit d'un TCP Greedy, c'est-à-dire que l'on considère que la couche applicative a toujours des données à envoyer. On laisse donc TCP réguler le débit de la connexion. Le débit va donc augmenter tant qu'il n'y a pas de pertes, puis la fenêtre de congestion de TCP va se réduire lorsqu'on va en détecter. De plus, il s'agit d'un mécanisme de transmission fiable. On va donc retransmettre les paquets perdus lorsque l'on ne reçoit pas d'acquiescement.

Ce modèle va nous permettre de voir quel est le débit maximum offert aux avions par TCP.

## K.6 Les paramètres de simulation

Les paramètres de simulation sont les suivants, entre parenthèse figurent les valeurs par défaut :

- le C/I seuil pour le calcul d'interférence (3 dB)
- le débit chip du code d'étalement (20 Mcps)
- l'exposant de la distance pour le coût des connexions dans le calcul du dijkstra (1)
- la fréquence du signal (2 GHz)
- la longueur maximale d'une connexion (100 km)
- la distance maximale d'interférence (2000 km)
- la taille maximale des paquets (1500 octets)
- la taille maximale des files d'attente (1000 paquets)

- le nombre de stations sol actives (5)
- le nombre de retransmission maximale par paquet (16)
- la durée du timer de retransmission (500 ms)
- le délai de la voie retour (250 ms)
- l'heure de début de simulation (0h)
- le débit des connections (1 Mbps)

