

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Université de Blida 1, SAAD DAHLEB



RESEAUX AD HOC AERONAUTIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER

EN AERONAUTIQUE

Spécialité : Communication Navigation Surveillance/Air Traffic
Management

CNS/ATM

Rostom CHADI

Ishak CHAKAL

Encadrement :

Azine Houria

Blida, Octobre 2014

DEDICACES

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail à ma mère Nassira symbole d'amour d'affection et de bienveillance.

A mon père Noureddine qui m'a soutenu tout au long de ma vie, pour son encouragement continu, et son sacrifice.

A mon épouse pour son soutien et l'intérêt constant qu'elle a porté à l'égard de mes travaux.

A mes frères Racim, Noufel et sa femme, ma sœur Mouna et Aïssi que son époux Talal auxquels je souhaite une vie pleine de bonheur et une carrière pleine de gloire. Et en particulier à mon binôme Ishak et mes amis « Krime, Adel, Sidahmed, Omar, Noufel, Alderahmen, Noureddine, Jalil et Fakhreddine, »

Merci encore à vous tous

Je dédie ce modeste travail à ma raison de vivre et ma fleur de vie ma mère, symbole d'amour d'affection de bienveillance, pour sa patience, ses sacrifices, sa conscience, ses conseils qui ont éclairé mon chemin.

A mon père en reconnaissance de tout ce qu'il a fait pour moi tout au long de mon existence, pour son soutien moral, et pour sa compréhension.

A mes très chers frères : Ayoub, Amine, Rafik, Chafik auxquels je souhaite une vie pleine de bonheur.

J'ai le plaisir de le dédier à Moussa, Abderrahim, Oussama, Brahim, Foudil. Ainsi tous mes oncles et à toutes mes tantes.

À la mémoire de mes grand parent, que dieu les accueille dans son vaste paradis.

REMERCIEMENTS

Avant tout propos, Nous tenons à rendre grâce à **Dieu** qui nous a guidés sur la bonne voie.

Nous remercions vivement le président de jury de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse,

Nous tenons également à remercier tous les membres de notre jury pour avoir présider la soutenance de notre thèse, pour leurs questions pertinentes sur nos travaux et pour leurs remarques sur ce manuscrit.

Nous exprimons toute notre gratitude à Mme AZINE HOURIA pour nous avoir accueillis, encadrés et formés tout au long de cette thèse. Cette première expérience de la recherche que vous nous avez permis de vivre, a comblé nos attentes et nous pousse à continuer dans cette voie.

Nous remercions également tous nos professeurs, qui, chacun dans son rôle, dans une période de notre vie, donné le plus escompté, Ce plus qui nous a permet aujourd'hui de présenter une thèse de master.

Nous tenons à remercier Mr BEN AISSA pour son aide et son soutien, ainsi qu'à toutes les personnes de l'Institut d'Aéronautique et des études spatiales

Nous remercions chadi Noureddine pour son aide, ainsi qu'à tous nos amis : Mustapha, Abdelkader, Abdenour, Bilal, Mokhtar de s'être toujours surpassés pour nous.

En fin cette thèse est le résultat d'échanges, de discussions et de collaborations. Nous remercions donc toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

RESUME

Ce mémoire de master se propose d'apporter une humble et modeste contribution à une réflexion sur la recherche de nouveaux systèmes de communication pour une large couverture des zones continentales et surtout océaniques et désertiques.

Dans cette réflexion nous nous proposons d'étudier la faisabilité de performances innovantes pour une meilleure sécurité et plus de couverture aux moindres coûts.

Notre étude devra servir toutes les différentes classes de communication: le contrôle aérien et les services pour les compagnies et les passagers surtout dans le contexte actuel et futur besoins croissant en moyen de communication.

Actuellement le monde de l'aviation, qui nous intéresse dans notre étude, est la recherche de nouveaux systèmes pour satisfaire ces objectifs.

Les seuls moyens existants de nos jours air/sol par satellites en Bandes L (SATCOM...) ou les solutions cellulaire par liaisons directes avec le sol (HF, VHF) présentent depuis toujours des limites en terme de capacités, de couvertures et de coûts.

Nous espérons contribuer aux différent réflexions et études pour utiliser les appareils où qu'ils soient (zones continentales, océaniques et désertiques) comme relais de propagation de données et d'informations entre eux et le sol sans être à portée directe d'une station.

Pour la simulation, nous avons utilisé le logiciel OPNET (Optimum Network Performance)

Ces systèmes réseaux « AD HOC MOBILES »apporteront un jour une réponse pour une portée directe à toutes les attentes.

ملخص

نقترح في اطروحة الماجستير هذه، تقديم مساهمة متواضعة للتفكير في البحث عن أنظمة الاتصالات الجديدة لتغطية واسعة من المناطق القارية وخصوصا المحيط والصحراء .

نتطرق في هذه المناقشة لدراسة امكانية الأداء المبتكرة لتحسين الأمن والمزيد من التغطية بأقل تكلفة .

دراستنا يجب أن تخدم جميع فئات الاتصال المختلفة: خدمات الاتصال ومراقبة الحركة الجوية وخدمات شركات الطيران والركاب خاصة في سياق الاحتياجات المتزايدة في وسائل الاتصال الحالية والمستقبلية .

حاليا عالم الطيران، ونحن مهتمون في دراستنا، بالبحث عن أنظمة جديدة لتلبية هذه الأهداف .

الوسائل الوحيدة المتاحة في يومنا الجوا\ سطح الارض بواسطة الأقمار الصناعية في الشريط لسات كوم (SATCOM) أو الحلول الخلوية بواسطة روابط مباشرة على سطح الأرض (HF, VHF) منذ ذلك الحين دائما محدودة من حيث السعة، التغطية والتكلفة .

نأمل أن تساهم الأفكار والدراسات المختلفة لاستخدام الاجهزة أينما كانوا (المناطق القارية، المحيطات والصحراء) عبارة عن مرّحل نشر البيانات والمعلومات بينها وبين الأرض دون أن يكون رابط مباشر للمحطة .

من اجل المحاكاة استخدمنا برنامج الابات OPNET (شبكة الاداء المثلى) .

فإن هذه شبكة الأنظمة 'AD HOC' موبايل 'تقدم رد واحد في اليوم للحصول على رابط مباشر الى جميع التوقعات.

ABSTRACT

This memory of master proposes to contribute humble and modest share to a reflection on the search for new communication systems for a broad cover of the continental and especially oceanic and desert zones.

In this reflection we propose to study the feasibility of performances innovating for a better safety and more cover with the lower costs.

Our study will have to be used all the various classes as communication: control air and services for the companies and the passengers especially in the current context and future requirements increasing in means of communication.

Currently the world of the aviation, which interests us in our study, is research new systems to satisfy these objectives.

Only existing means now a days ground/ on board by satellites in Bands L (SATCOM...) or the solutions cellular by direct connections with the ground (HF, VHF) present since always limits in term of capacities, covers and costs.

We hope to contribute to different the reflections and studies to use the apparatuses where which they are (continental, oceanic and desert zones) like relay of propagation of data and information between them and ground without being with direct range of a station.

For simulation, we used software OPNET (Optimum Network Performance)

These systems networks "AD HOC MOBILES" will bring one day an answer for a direct range to all waitings.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	2
REMERCIEMENTS	4
RESUME.....	5
ملخص.....	6
ABSTRACT	7
TABLE DES MATIERES	8
LISTE DES FIGURES.....	13
LISTE DES TABLEAUX	18
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS.....	19
INTRODUCTION.....	24
I. CHAPITRE I GENERALITES SUR LES RESEAUX.....	27
I.1 Définition.....	27
I.2 Organisme de normalisation.....	27
I.1 Définition	27
I.2 Principaux Organismes	27
I.3 Classification	29
I.4 Types de reseaux	31
I.4.1 Réseaux Câblés	31
I.4.2 Réseaux sans Fil	32
I.5 Multiplexage	38

I.5.1	Multiplexage temporel (TDMA)	38
I.5.2	Multiplexage fréquentiel (FDMA)	39
I.5.3	Multiplexage par Répartition de Codes (CDMA)	39
I.6	Modes d'accès.....	40
I.6.1	Liaison point à point.....	40
I.6.2	Liaison multipoints	41
I.7	Architecture d'un reseau	41
I.7.1	Modèle osi d'iso	41
I.7.2	Modèle TCP/IP	43
I.8	Comparaison entre modele tcp/ip et le modele osi	44
I.9	Notion de routage	45
I.9.1	Types de routage.....	45
II.	CHAPITRE II LES COMMUNICATIONS AERONAUTIQUES.....	48
II.1	Les origines	48
II.2	Les differents types de communications.....	48
II.2.1	ATSC (Air Traffic Services Communication).....	49
II.2.2	AOC (Aeronautical Operational Control).....	50
II.2.3	AAC (Aeronautical Administrative Communication).....	51
II.2.4	APC (Aeronautical Passenger Communication)	51
II.3	Les limites de capacite des communications vocales.....	51
II.4	Le comite fans et le concept cns/atm.....	53

II.5	Du réseau ACARS au réseau ATN.....	54
II.6	L'émergence de nouveaux services	56
II.7	Le besoin de nouveaux moyens de communications sol-bord	58
II.8	Vers les communications de données numériques : le DATALINK	58
II.9	Les moyens de communication de données existants.....	59
II.9.1	Performances requises.....	60
II.9.2	Solutions par satellite.....	61
II.9.2.3	Solution par liaison directe avec le sol.....	67
II.10	Les limites des solutions existantes	70
II.10.1	Solutions par satellite.....	70
II.10.2	Solutions par liaison directe avec le sol.....	71
II.11	Les futurs moyens de communications	72
II.11.1	L'évolution des systèmes existants.....	73
II.12	L'infrastructure de communication du projet SESAR	73
II.12.1	AeroMACS.....	74
II.12.2	Satellite IRIS.....	75
II.12.3	L-DACS	75
III.	CHAPITRE III RESEAU AD HOC AERONAUTIQUE.....	77
III.1	Présentation générale des réseaux AD HOC mobiles.....	77
III.1.1	Définition.....	77

III.1.2	Caractéristiques.....	78
III.1.3	Architecture	81
III.2	Présentation générale des réseaux AD HOC aéronautiques	88
III.3	Problématiques spécifiques des réseaux AD HOC aéronautiques.	90
III.4	Quelques projets de recherche	91
III.1	Le projet ATENAA	91
III.2	Le projet NewSky.....	92
III.5	Solutions proposées pour les deux couches physique et liaison....	93
III.5.1	Liaison idéale.....	93
III.5.2	Antennes directionnelles, liaisons optiques et TDMA	93
III.5.3	IEEE 802.11	95
III.6	Protocoles de routage	95
III.6.1	Exemple de protocoles de routage proposés pour les réseaux ad hoc aéronautiques.....	95
IV.	CHAPITRE IV LE LOGICIEL DE SIMULATION OPNET	101
IV.1	Introduction.....	101
IV.2	La simulation	103
IV.2.1	Les différents scenarios de la simulation.....	103
IV.2.2	Les métriques de performance.....	104
IV.2.3	Scénario 1. Modèle de base « distance courte entre deux stations terrestres »	105
IV.2.4	Scénario 2. « Distance lointaine entre les deux stations terrestres ».....	113

IV.2.5 Scénario 3 : Modèle de la mobilité «Deux stations fixes et un avion comme relai ».....	115
IV.2.6 Scénario 4.1 : Modèle de la mobilité « Rapprochement de l'avion par rapport aux stations ».....	120
IV.2.7 Scénario 4.2 : Modèle de la mobilité « L'avion est hors de portée d'une seule station.....	122
IV.2.8 Scénario 5 : Modèle de la mobilité« plusieurs relais entre les stations ».....	124
CONCLUSION	131
PERSPECTIVE	133
ANNEXES.....	134
REFERENCES	149

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Classification des réseaux	29
Figure I-2 Types de réseaux	31
Figure I-3 Classification des réseaux sans fil	33
Figure I-4 catégories des réseaux mobiles sans fil	37
Figure I-5 Réseau en infrastructure.....	37
Figure I-6 Réseau en ad hoc.....	38
Figure I-7 Techniques de multiplexage	38
Figure I-8 Multiplexage temporel.....	39
Figure I-9 Multiplexage fréquentiel.....	39
Figure I-10 Multiplexage par Répartition de Codes.....	40
Figure I-11 Liaison point à point.....	40
Figure I-12 Liaison multipoints	41
Figure I-13 Comparaison entre modèle TCP/IP et le modèle OSI	45
Figure I-14 Exemple de routage par inondation	47
Figure II-1 Les différents types de communications	49
Figure II-2 Interface du pilote pour les messages CPDLC	54
Figure II-3 Le réseau ATN.....	55
Figure II-4 Les nouveaux services de communication Sol-Bord	56
Figure II-5 Les deux phases du COCR	57
Figure II-6 Les moyens de communication de données numériques	59

Figure II-7 Les moyens de communications existants.....	60
Figure II-8 Couverture des services aéronautiques d'Inmarsat [1].....	62
Figure II-9 La constellation Iridium	64
Figure II-10 Couverture VDL Mode 2 par SITA	68
Figure II-11 L'évolution des systèmes existants.....	72
Figure II-12 L'architecture de communication du projet SESAR	74
Figure III-1 Mode infrastructure et mode ad hoc	78
Figure III-2 Problématiques spécifiques.....	79
Figure III-3 Classification des protocoles de routage ad hoc.....	82
Figure III-4 Routage dans les MANETs.....	83
Figure III-5 Principaux protocoles de transport standardisés par l'IETF.....	86
Figure III-6 Segment sol.....	89
Figure III-7 Segment aéronautique.....	89
Figure III-8 Segment spatial	89
Figure III-9 Principe général d'un réseau ad-hoc aéronautique (avec segment spatial).....	90
Figure III-10 Principe général d'un réseau ad-hoc aéronautique (sans segment spatial).....	90
Figure III-11 Définition du meilleur chemin pour le protocole MUDOR.....	97
Figure III-12 Principe de GLSR	99
Figure IV-1 Modélisation hiérarchique dans l'environnement OPNET	102
Figure IV-2 Stations proches.....	105

Figure IV-3 Paramètres des stations.....	106
Figure IV-4 Graphe représentant le débit émis et reçu des deux stations....	107
Figure IV-5 Station 1 émettrice	108
Figure IV-6 Datagramme du 1er scénario	108
Figure IV-7 Station 2 émettrice	109
Figure IV-8 Datagramme du 2ème scénario	109
Figure IV-9 Graphe représentant les délais des deux stations.....	110
Figure IV-10 Graphe représentant les délais des deux stations.....	110
Figure IV-11 Graphe représentant les délais des deux stations.....	111
Figure IV-12 Taille du paquet en fonction du temps de transmission.....	112
Figure IV-13 Taille du paquet en fonction du temps de transmission.....	112
Figure IV-14 stations lointaines.....	113
Figure IV-15 chaine de transmission.....	114
Figure IV-16 Graphe représentant le débit émis et reçu	114
Figure IV-17 Modèle de la mobilité.....	116
Figure IV-18 Modèle de la mobilité liaison directe.....	117
Figure IV-19 Modèle de la mobilité : station 2 émettrice	118
Figure IV-20 Modèle de la mobilité : avion émetteur.....	119
Figure IV-21 Graphe représentant les délais	119
Figure IV-22 Exemple de trafic généré par un avion	120
Figure IV-23 Exemple de trafic généré par un avion.....	121

Figure IV-24 Exemple de trafic généré par un avion	122
Figure IV-25 Exemple de trafic généré par un avion	123
Figure IV-26 Conception d'un réseau ad hoc aéronautique	125
Figure IV-27 Exemple de trafic généré par les avions.....	127
La figure IV-28 montre l'évolution du débit émis et reçu pour les dix avions les plus chargées entre 9h23 et 10h46. La station la plus chargée est ainsi capable de recevoir un débit cumulé d'environ 13 kbps en moyenne.	127
Figure IV-29 Graphe représentant les délais des relais (avions 6 et 10)	128
Figure IV-30 Graphe représentant les délais des relais des deux stations ..	128
Figure 0-1 Graphe représentant les débits émis et reçu des deux stations.	129

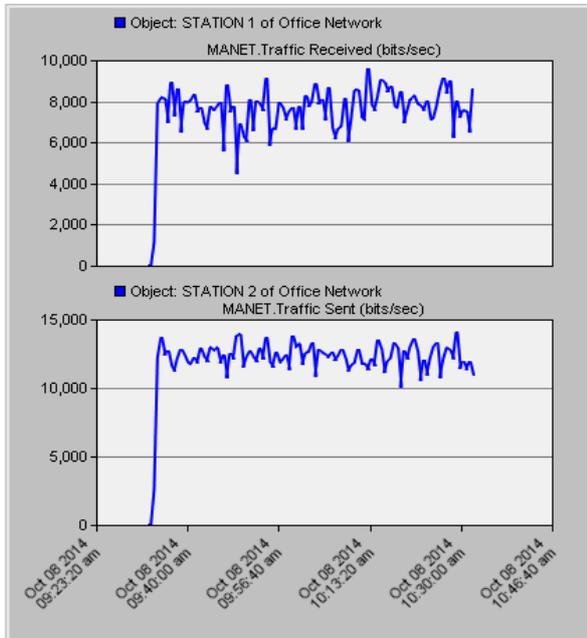
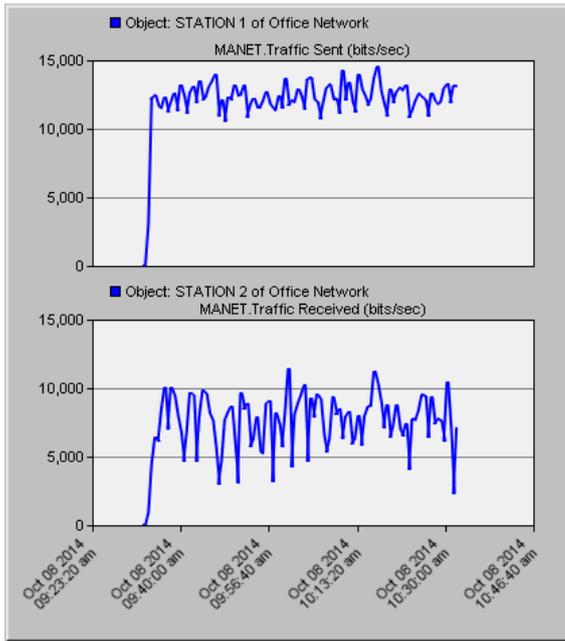


Figure IV-31 Graphe représentant les débits

émis et reçu des deux stations 130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 Topologies des réseaux.....	32
Tableau I-2 Description des fonctionnalités de chaque couche du Modèle OSI d'ISO.....	42
Tableau I-3 Description des fonctionnalités de chaque couche du Modèle TCP/IP.....	43
Tableau II-1 Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques.....	52
Tableau IV-1 l'influence de la taille du message sur le Temps d'arrivé(Delay).....	111
Tableau IV-2 récapitulatif des différents résultats	129

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

SCC	Standards Council of Canada
AFNOR	Association Française de Normalisation
ISO	International Organization for Standardization
UIT	Union Internationale des Télécommunication, anciennement
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
ANSI	American National Standard Institute
DIN	Deutsches Institut Für Normung
BSI	British Standards Institute
IEEE	Istitute of Electrical and Electronics Engineers
IANOR	Institut Algérien de Normalisation
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
WLAN	Wireless Local Area Network
Wi-Fi	wireless fidelity
HyperMAN	High PERformance radio MAN
Hyperlan	High Performance radio LAN
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
3GPP	3rd Generation Partnership Project
GSM	Global System for Mobile communications
PAN	Personal Area Network
LAN	Local Area Network
MAN	Metropolitan Area Network

WAN	Wide Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
IBSS	Independent Basic Service Set
TDMA	Time division multiple access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
CDMA	Code division multiple access
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
UIT-T	Union Internationale de Télécommunication
UIT-T	Union Internationale de Télécommunication
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ATSC	Air Traffic Services Communication
AOC	Aeronautical Operational Control
AAC	Aeronautical Administrative Communication
APC	Aeronautical Passenger Communication
CPDLC	Controller Pilot Data Link Communications
ADS	Automatic dependent surveillance
DFIS	European Development Finance Institutions.
VHF	very high frequency
FL	Flight Level
DSB-AM	Double Side Band - Amplitude Modulation
FANS	Future Air Navigation System
CNS/ATM	Communication Navigation Surveillance / Air traffic Management
HF	high frequency
DCDU	Data Communication Display Unit

ATN	Aéronautique Télécommunication Network
ARINC	Aeronautical Radio, Incorporated
VDL	VHF Data Link
AOA	ACARS Over AVLK
POA	Plain Old ACARS
COCR	Communications Operating Concepts and Requirements
Aircraft	Communications Addressing and Reporting System
OOOI	Out, Off, On, In
HFDL	High Frequency Data Link
SATCOM	Satellite Communications
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service
RCP	Required Communication Performance
LEO	Low Earth Orbit
FAA	Federal Aviation Administration
PARC	Performance-based operations Aviation Rulemaking Committee
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AM-MSK	Minimum Shift Keying
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DSP	Data Link Service Provider
D8PSK	differential 8 Phase Shift Keying
MAC	Medium Access Control
LLC	Logical Link Control
AVLC	aviation VHF link control
ATC	air traffic control
STDMA	Self-organized Time Division Multiple Access
ADS-B	Automatic dependent surveillance-broadcast
PSK	Phase Shift Keying

FCC	Federal Communications Commission
Wi-MAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
OFDM	Orthogonal Division Frequency Multiplexing
FCC	Federal Communications Commission
SESAR	Single European Sky ATM Research
NEXTGEN	Next Generation Air Transportation System
IRIS	Institut de Relations Internationales et Stratégiques
L-DACS	L-band Digital Aeronautical Communication System
ESA	European Space Agency
TDD	Time Division Duplex
CPFSK	Continuous Phase Frequency Shift. Keying
IETF	Internet Engineering Task Force
MANET	Mobile Ad hoc Network
RPGM	Reference Point Group Mobility Model
VANET	Vehicular Ad hoc NETWORK
ALOHAA	Learning Opportunity for High Achievers (Hawaii)
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector Routing
OLSR	Optimized Link State Routing
DSR	Dynamic Source Routing
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing
ZRP	Zone Routing Protocol
DREAM	Distance Routing Effect Algorithm for Mobility.
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
CGSR	Cluster-head Gateway Switch Routing
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
SYN/ACK	synchronize-acknowledgment

RTT	réduction du temps de travail
AANET	Aeronautical Ad hoc NETwork
VANET	Vehicular Ad hoc NETwork
GNSS	Global Navigation Satellite System
VOR	Omnidirectional Range
DME	Distance Measuring Equipment
DLR	German Aerospace Center
ATENAA	Advanced Technologies for Networking in Aeronautical Applications
EADS	European Aeronautic Defence and Space
NewSky	Networking the Sky for Aeronautical Communications
OOL	Outer Optical Links
Nm	Nautical Miles
MUDOR	Multipath Doppler Routing
ARPAM	Ad hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile ad hoc networks
GRAA	Geographic Routing protocol for Aircraft Ad hoc Network
GLSR	Geographic Load Share Routing
TTI	Time To Intercept
QoS	Quality of Service
OPNET	Optimized Network Engineering Tool

INTRODUCTION

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 ce mémoire 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 et désertique 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.

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.

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.

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) 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, 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. Le transport aérien est aujourd'hui le moyen de transport qui se développe le plus rapidement.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres. **Le premier est** consacré à l'état de l'art de la transmission. Nous avons présenté la classification, l'architecture OSI / TCP-IP d'un réseau et les différents modes de fonctionnement de cette transmission. Ensuite nous avons présenté les deux modes d'accès, point à point et multipoint qui permettent d'interconnecter les machines entre eux afin de partager l'information à travers les différentes techniques de multiplexage. Enfin nous avons résolu un des problèmes majeurs dans les réseaux ad hoc qui est le routage.

Dans le second chapitre nous avons en premier temps présenté l'historique de la communication aéronautique, Ensuite nous avons cité les différents types et leurs limites qui ont incités l'émergence de nouveaux services tels que la communication de données numériques : le DATALINK. Enfin nous nous sommes portés sur l'évolution des moyens de communication existants tels que le projet SESAR

Le troisième chapitre est consacré à la démonstration de faisabilité des réseaux ad hoc aéronautiques. En premier lieu nous avons commencé par une présentation des réseaux ad hoc mobiles, pour aboutir aux réseaux ad hoc aéronautiques et ses problématiques rencontrées. Ensuite nous avons cité quelques projets de recherche et les solutions proposées pour les couches, physique et liaison. Enfin nous avons mentionné les différents protocoles de routage proposés pour les réseaux ad hoc aéronautiques.

Enfin, le chapitre 4 est consacré aux simulations. Tout d'abord nous avons présenté le logiciel de simulation de réseaux OPNET MODELER 14.5 utilisé dans notre mémoire. Ensuite nous avons développé des modèles de simulation de réseaux ad hoc. Pour terminer ce chapitre nous avons interprété les résultats obtenus de chaque scénario.

Et nous terminerons par une conclusion

I. CHAPITRE I GENERALITES SUR LES RESEAUX

I.1 Définition

Un réseau est un ensemble de moyens matériels et logiciels géographiquement dispersés destinés à offrir un service, comme le réseau téléphonique, ou à assurer le transport de données.-

Les techniques à mettre en œuvre diffèrent en fonction des finalités du réseau et de la qualité de service désiré.

I.2 Organisme de normalisation

- Qu'est-ce qu'une norme ?

Des accords documentés décrivant des spécifications des produits ou des services.* Exemple : format d'une carte bancaire (longueur, largeur, épaisseur, position de la bande magnétique, etc.).

- Pourquoi une norme ?

Éliminer les incompatibilités entre les produits et les services. Si on ne parle pas le même «Langage», alors comment peut-on communiquer et se comprendre ?

- Qui définit les normes ?

Des organismes nationaux (SCC« Standards Council of Canada», AFNOR« France», ANSI« USA») et internationaux (ISO« International Organization for Standardization»).

I.1 Définition

La normalisation est nécessaire dans tout processus de fabrication à caractère répétitif. Elle fixe un cadre réglementaire indispensable à l'industrie, à la sécurité de la fabrication, aux utilisateurs ainsi qu'à la chaîne économique du produit.

I.2 Principaux Organismes

- **L'ISO** (date de 1947, 1, rue de Varembé Case postale 56CH-1211

Genève 20) : pour <International Standard Organization> en anglais, et <Organisme de Normalisation International> en français, se situe à un niveau international et s'occupe de normalisation dans à peu près tous les domaines.

- **UIT** (date de 1932, Place des Nations CH-1211 Genève) : Union Internationale des Télécommunication, anciennement CCITT (Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique)
- **L'ANSI** (American National Standard Institute) : est l'institut américaine(USA) de normalisation, et possède un rôle semblable à celui de l'ISO, mais au niveau national

Il existe l'équivalent de l'ANSI ailleurs :

- En France, c'est l'**AFNOR** (Association Française de Normalisation).
- En Allemagne c'est le **DIN** (Deutsches Institut Für Normung) bien connu pour sa normalisation des connecteurs (prises DIN)
- En Angleterre c'est le **BSI** (British Standards Institute).
- **IEEE** (Istitute of Electrical and Electronics Engineers) : C'est-à-dire l'Institut des ingénieurs en Électricité et Électronique, est une entité américaine qui gère différents projets de recherche, avec cependant une vocation internationale.
- **IANOR** (Institut Algérien de Normalisation)

Les groupes de travail qui se chargent de la normalisation des produits commercialisés pour les réseaux sans fil sont IEEE aux états unis et l'ETSI.

Les différentes catégories des réseaux sans fil existent suivant leur étendue. Les principales normes sont :

- IEEE 802.15 Bluetooth et ETSI Hiperpan pour les petits réseaux personnels d'une dizaine de mètres de portée,
- IEEE 802.11 ou Wi-Fi et ETSI Hyperlan pour les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network),
- IEEE 802.16 et ETSI HyperMAN et HyperACCESS pour les réseaux WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) atteignant plus de dix kilomètres,
- IEEE 802.20, pour les réseaux WWAN (Wireless Wide Area Network) et 3GPP, EDGE (GSM) c'est-à-dire les très grands réseaux.

L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a normalisé plusieurs catégories de réseaux locaux :

- Ethernet (IEEE 802.3).
- Token Bus (IEEE 802.4).
- Token Ring (IEEE 802.5).

I.3 Classification

On distingue les réseaux selon différents critères. La classification traditionnelle, fondée sur la notion d'étendu géographique, correspond à un ensemble de contraintes que le concepteur devra prendre en compte lors de la réalisation de son réseau. La figure I.1 ci-dessous nous donne un aperçu sur la classification de réseaux.

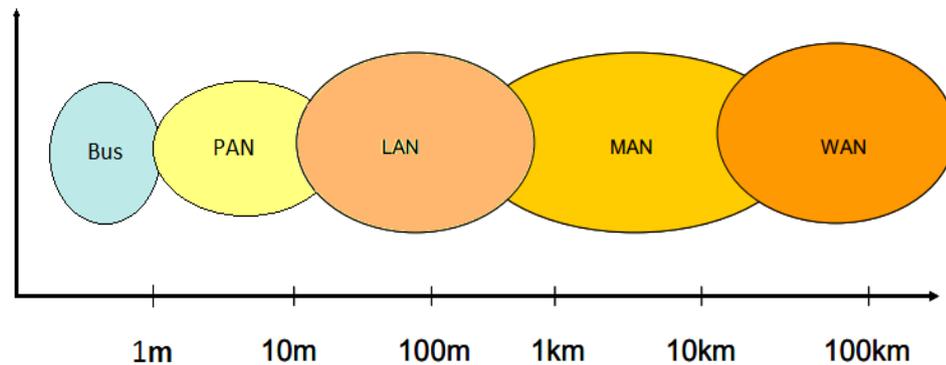


Figure I-1 Classification des réseaux

BUS

Le bus est le support physique de transmission de l'information. Les machines émettent simplement sur le câble. Par contre si le câble est défectueux, cassé, le réseau est paralysé. On trouve à chaque extrémité d'un brin des bouchons qui empêchent le signal de se réfléchir. Il s'agit de la forme encore la plus rencontrée. Cette topologie permet une connexion multipoint. On peut choisir l'exemple des réseaux Ethernet

PAN (*Personal Area Network*)

Réseau d'étendue limitée à quelques mètres pour l'interconnexion des équipements personnels (GSM, PDA, PC et PC portable) d'un seul utilisateur.

LAN (Local Area Network)

Réseau local d'entreprise ou encore appelé **réseau local**, constitué d'ordinateurs et de périphériques reliés entre eux et implantés dans une même entreprise, et à caractère privé.

Il ne dépasse pas généralement la centaine de machines et ne dessert jamais au-delà du kilomètre.

Le partage des ressources est ici fréquent et les vitesses de transmissions vont de 10 à 100 Mb/s (Mega-bits/seconde).

Nous allons (plus tard) analyser les différentes architectures des réseaux locaux : IEEE802.x

MAN (Metropolitan Area Network)

Réseau **métropolitain** ou **urbain** correspond à la réunion de plusieurs réseaux locaux(LAN) à l'intérieur d'un même périmètre d'une très grande entreprise ou d'une ville par exemple, pouvant relier des points distants de 10 à 25 Km.

En général le câble coaxial est le support physique le plus utilisé dans ce type de réseau. Il existe alors une interconnexion qui nécessite quelques matériels particuliers conçus pour réunir ces différents réseaux et aussi pour protéger l'accès de chacun d'eux suivant des conventions préalables.

- Peut être privé ou public.
- Utilise un ou deux câbles de transmission.
- Pas d'éléments de commutation (routage).
- Norme spéciale IEEE-802.6

WAN (Wide Area Network)

Réseau **grande distance** Il s'agit cette fois d'un réseau multiservices couvrant un pays ou un groupe de pays, qui est en fait constitué d'un ensemble de réseaux locaux interconnectés.

Un WAN peut être privé ou public, et les grandes distances qu'il couvre (plusieurs centaines de kms) font que les liaisons sont assurées par du matériel moins sophistiqué (raisons financières) et le débit s'en trouve un peu pénalisé.

I.4 +Types de réseaux

On distingue deux types de réseaux comme le montre la figure I.2 ci-dessous.

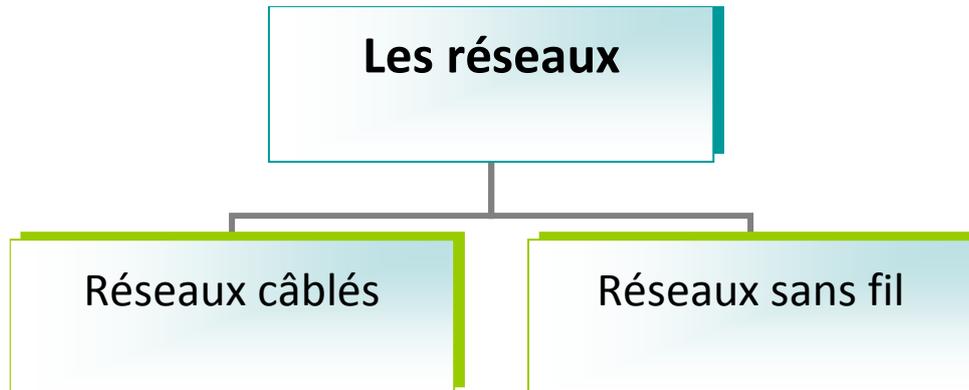


Figure I-2 Types de réseaux

I.4.1 Réseaux Câblés

I.4.1.1 Définition

Le réseau câblé est un réseau qui, comme son nom l'indique, est un réseau utilisé grâce à une connexion filaire. Ce réseau comporte des câbles Ethernet pour relier des ordinateurs et des périphériques grâce à un routeur ou à un commutateur.

I.4.1.2 Topologies des réseaux

La topologie d'un réseau recouvre tout simplement la manière dont ses composants sont reliés entre eux. Nous en distinguerons quelques-unes dans le tableau I.1.

Tableau I-1 Topologies des réseaux

Types de topologies	Modes	Avantages	Inconvénients	Protocoles
Structure en BUS	Les stations sont reliées à un support commun.	Lorsqu'un ordinateur envoie des données, tous les autres ordinateurs écoutent. Chaque ordinateur à la charge de «trier» les données qui lui sont destinées.	Problème de partage du support physique (collision). Elle ne permet qu'un seul dialogue (monologue) à un instant donné.	CSMA CSMA/CA
Structure en Anneaux	Les stations sont enchaînées les unes aux autres.	L'anneau est unidirectionnel (possibilité de recevoir et transmettre des données simultanément).	Les données ne peuvent circuler que dans un sens donné dans la boucle (si une machine tombe en panne, le réseau est coupé).	TOKEN RING (Technique de jeton)
Structure en Etoile	Toutes les stations sont reliées à un nœud central.	Dans le cas où la liaison est momentanément indisponible, le «central» peut mémoriser les données pour un envoi ultérieur et permet plusieurs dialogues simultanés.	La fiabilité du réseau est conditionnée par le nœud central.	ALOHA

I.4.2 Réseaux sans Fil

Les réseaux sans fil sont en plein développement du fait de la flexibilité de leur interface, qui permet à un utilisateur de changer facilement de place dans son entreprise. Les communications entre équipements terminaux peuvent s'effectuer directement ou par le biais de stations de base.

I.4.2.1 Classification

Il est possible de classer les réseaux sans fil de plusieurs manières ; la figure 1.3 présente une classification possible selon les critères suivants : l'étendue géographique, la topologie et l'infrastructure utilisée.

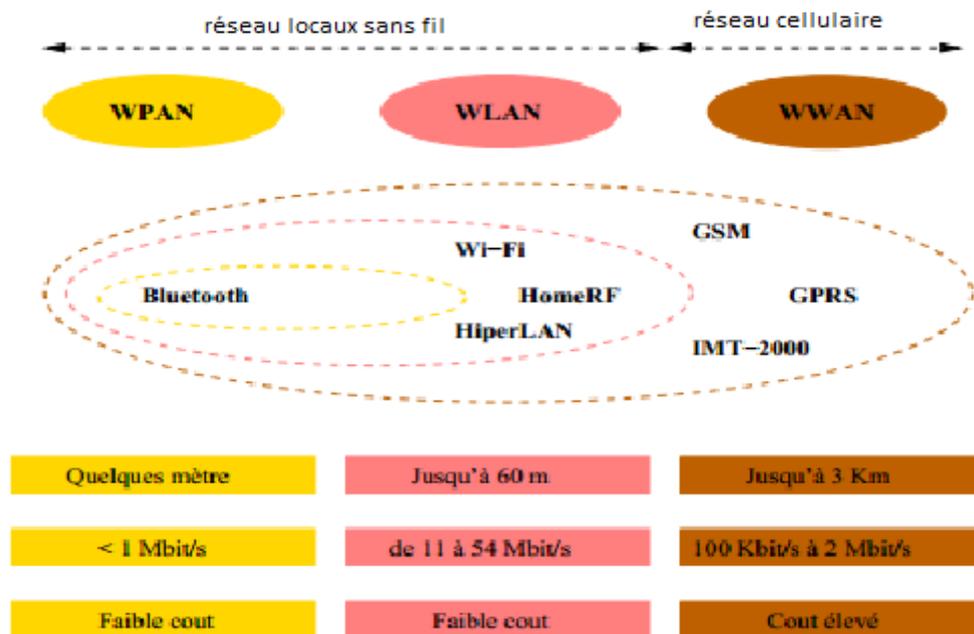


Figure I-3 Classification des réseaux sans fil

Les réseaux personnels sans fil (WPAN)

Les réseaux personnels concernent les liaisons de données en rapport direct avec l'individu et son entourage immédiat (télécommande, appareillage électroménager et accessoires, etc.). Comme pour les WLAN, le confort de l'utilisateur (mobilité, absence d'infrastructure lourde, etc.) est souvent la motivation première des concepteurs des produits utilisant ces technologies.

Cependant, on note une certaine aptitude de quelques WPAN à s'adapter au monde industriel. A la différence des WLAN, dont l'objectif principal, voire unique, est de permettre un accès sans fil à un réseau plus étendu, les WPAN ne permettent que de relier entre eux des équipements autonomes et, de fait, sont conçus pour s'adapter parfaitement au monde de l'embarqué.

Les réseaux locaux sans fil (WLAN)

Les réseaux locaux sont de taille plus réduite que les réseaux métropolitains. Ils visent généralement la couverture d'une zone de quelques centaines de mètres maximum comme une entreprise ou un petit campus.

Conditions au développement des WLAN

- Mobilité → régulation des fréquences entre pays nécessaire : bandes de fréquences communes
- Limitation de l'utilisation des batteries
- Limitation des interférences avec d'autres équipements (antennes)
- Installation aussi transparente que possible
- Compatibilité avec les LAN existants
- Transparence pour les utilisateurs et applications (location aware applications...)

Caractéristiques des wireless LANs**➤ Avantage des réseaux sans fil**

- Très flexible pour la zone de réception
- Réseaux ad hoc sans planification possible
- Limitation des problèmes de câblage (monument historique,..)
- Robustesse en cas de catastrophe naturelle

➤ Inconvénients

- Typiquement très peu de bande passante (comparé aux réseaux filaires (1-54 Mbit/s))
- Plusieurs solutions propriétaires, la normalisation prend un temps égal au consensus (IEEE 802.11)
- Les produits doivent se conformer aux restrictions nationales : difficile d'avoir une solution globale

Les réseaux sans fil métropolitains (WMAN)

Les réseaux métropolitains ont pour objectif de créer un ensemble de liens de communication sur une zone étendue de la taille d'une ville ou d'une région. Ces liens peuvent servir à interconnecter plusieurs sites d'une même entreprise ou d'une administration.

En ce qui concerne les réseaux sans fil métropolitains, ils sont généralement utilisés dans les campagnes pour palier à la faiblesse des accès de type xDSL.

Les réseaux sans fil étendus (WWAN)

Cette catégorie compte assez peu de technologies à l'heure actuelle ; en effet, la plupart des réseaux étendus sont des réseaux filaires. Cette constatation s'explique très simplement par la physique des transmissions : lorsque l'on souhaite transporter des informations sur un médium immatériel, il est généralement admis de faire porter ces informations par une fréquence porteuse.

Les seules technologies de WWAN disponibles sont des technologies utilisant les satellites géostationnaires ou en orbite basse pour relayer l'information entre plusieurs points du globe.

I.4.2.2 Mode de fonctionnement

La norme 802.11 offre deux modes de fonctionnement comme le montre schématiquement la figure I.4 ci-dessous.

- Le réseau en mode infrastructure est défini pour fournir aux différentes stations des services spécifiques, sur une zone de couverture déterminée par la taille du réseau. Les réseaux d'infrastructure sont établis en utilisant des points d'accès qui jouent le rôle de station de base pour l'ensemble des stations.
- Le réseau en mode ad-hoc est un groupe de terminaux formant un IBSS (Independent Basic Service Set), dont le rôle consiste à permettre aux stations de communiquer sans l'aide d'une quelconque infrastructure, telle qu'un point d'accès.

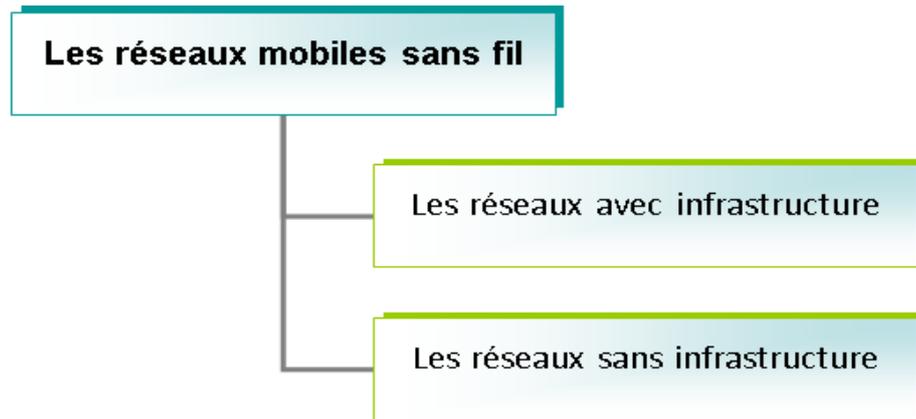


Figure I-4 catégories des réseaux mobiles sans fil

Les réseaux mobiles sans fil, peuvent être catégorisés en deux classes :

- Les réseaux avec infrastructure.
- les réseaux sans infrastructure ou < **Réseaux ad hoc** > qui font l'objet de notre étude.

Les réseaux en infrastructure

Ces réseaux utilisent généralement le modèle de la communication cellulaire. Plusieurs systèmes utilisent déjà ce modèle et connaissent une très forte expansion à l'heure actuelle (les réseaux GSM par exemple) mais requièrent une importante infrastructure logistique et matérielle fixe. Comme l'illustre la figure I.5.

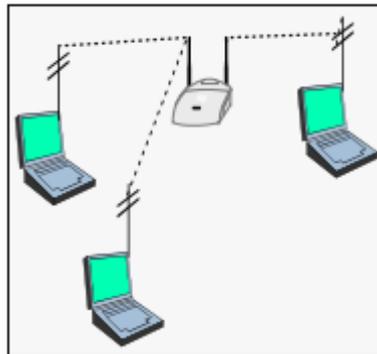


Figure I-5 Réseau en infrastructure

Les réseaux sans infrastructure (réseau ad hoc)

La contrepartie des réseaux cellulaires sont les réseaux sans infrastructure (réseaux ad hoc). Un réseau **ad hoc** peut être défini comme une

collection d'entités mobiles interconnectées par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide de toute administration ou de tout support fixe. Comme l'illustre la figure 1.6. Aucune supposition ou limitation n'est faite sur la taille du réseau ; cela veut dire qu'il est possible que le réseau ait une taille très énorme.

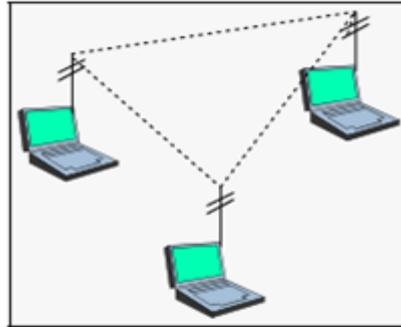


Figure I-6 Réseau en ad hoc

I.5 Multiplexage

Le multiplexage est une technique qui consiste à faire passer plusieurs informations à travers un seul support de transmission. Elle permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs. Il existe plusieurs techniques de multiplexage comme le montre schématiquement la figure I.7 ci-dessous.

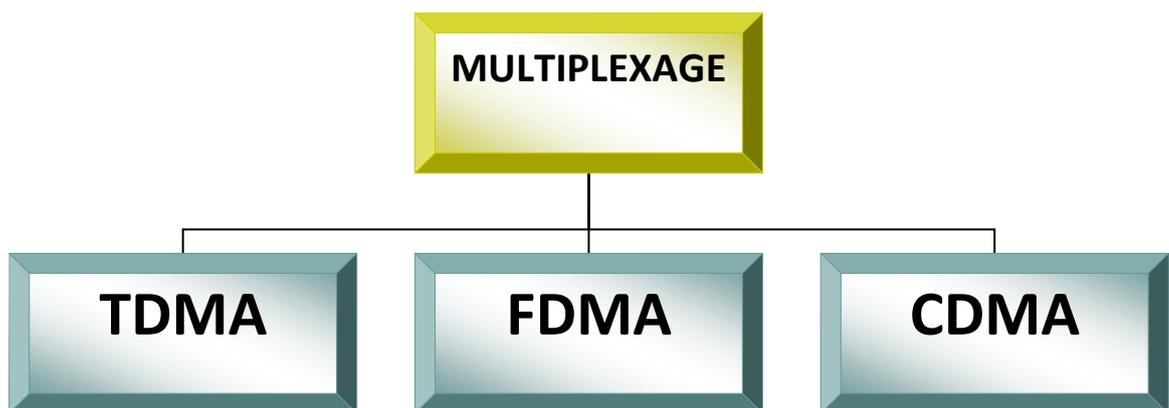


Figure I-7 Techniques de multiplexage

I.5.1 Multiplexage temporel (TDMA)

Le multiplexage en temps consiste à répartir la transmission d'une porteuse sur des intervalles de temps distincts, comme l'illustre la Figure 1.8. La porteuse est émise

sur des intervalles de temps, appelés time slots de durée T_s , chacune de ces durées correspondant à un temps pendant lequel un utilisateur peut transmettre ses données.

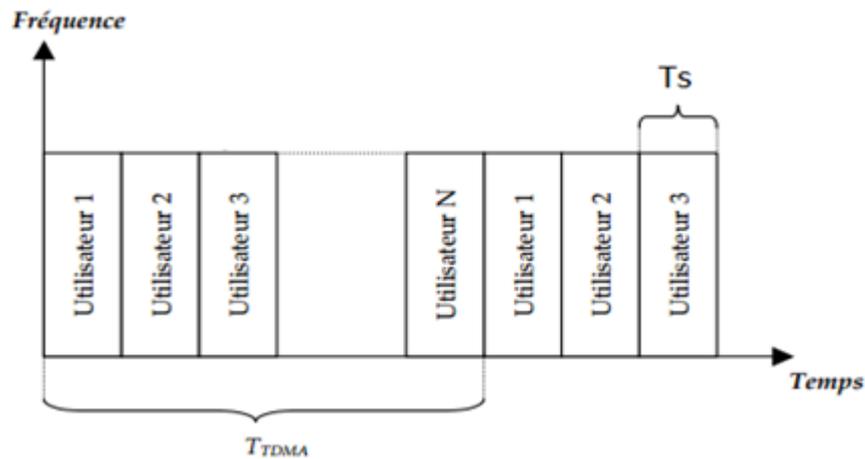


Figure I-8 Multiplexage temporel

I.5.2 Multiplexage fréquentiel (FDMA)

Largement utilisée dans les systèmes de communications radiofréquences. Le FDMA consiste à transmettre les signaux provenant de 'N' utilisateurs différents sur des bandes de fréquences distinctes. La Figure 1.9 donne un exemple de la manière dont ce multiplexage peut s'effectuer.

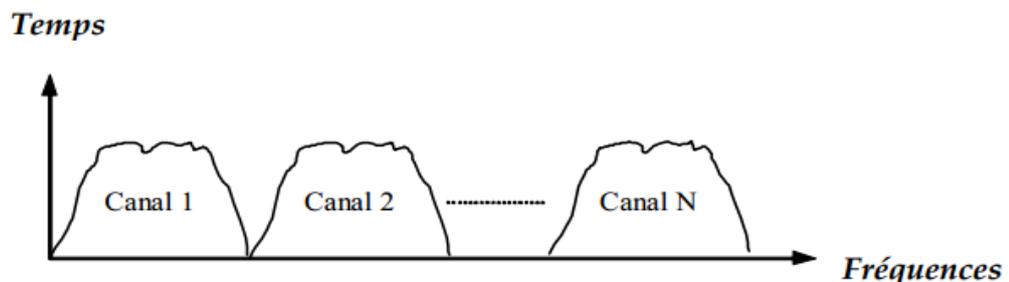


Figure I-9 Multiplexage fréquentiel

I.5.3 Multiplexage par Répartition de Codes (CDMA)

L'accès Multiple par Répartition de Codes, est une technique de multiplexage plus récente que le TDMA et le FDMA.

Dans cette technique d'accès multiple, les utilisateurs partagent le même espace fréquentiel et transmettent sur les mêmes intervalles temporels. Il s'agit, dans ce cas, d'affecter à chaque émetteur un code, aussi appelé signature ou encore

séquence de code, qui lui permet de transmettre des informations en évitant d'interférer avec les messages provenant d'autres utilisateurs. La Figure 1.10 schématise la répartition des utilisateurs sur la bande de fréquence et dans le temps en fonction de la distribution des séquences de codes.

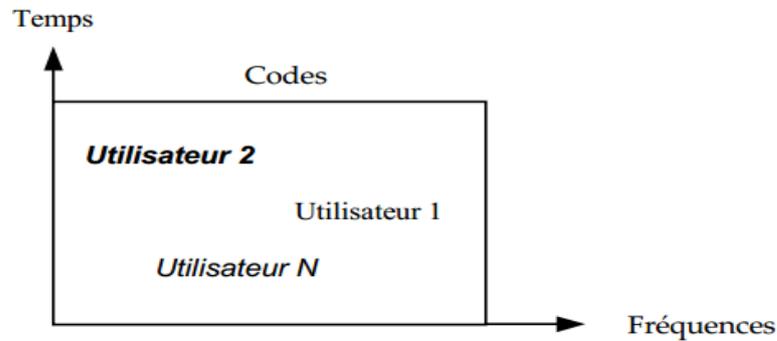


Figure I-10 Multiplexage par Répartition de Codes

I.6 Modes d'accès

Il y a différentes manières d'interconnecter plusieurs machines ; nous en distinguerons les deux configurations logiques suivantes :

I.6.1 Liaison point à point

Les liaisons point à point permettent d'interconnecter deux extrémités distantes (le site central à l'un des sites extrémités du réseau). Comme l'illustre la Figure I.11.

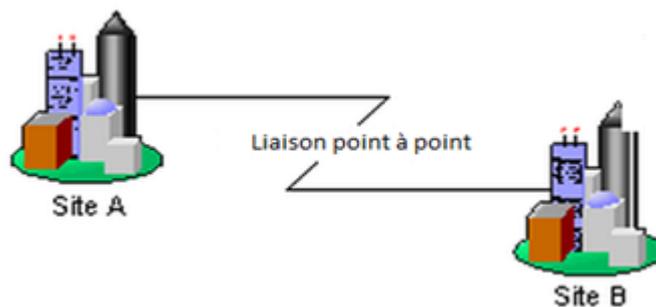


Figure I-11 Liaison point à point

I.6.2 Liaison multipoints

Les liaisons multipoint permettent d'interconnecter une extrémité commune (site central) à au moins deux extrémités distinctes (site extrémité), comme l'illustre la Figure I.12

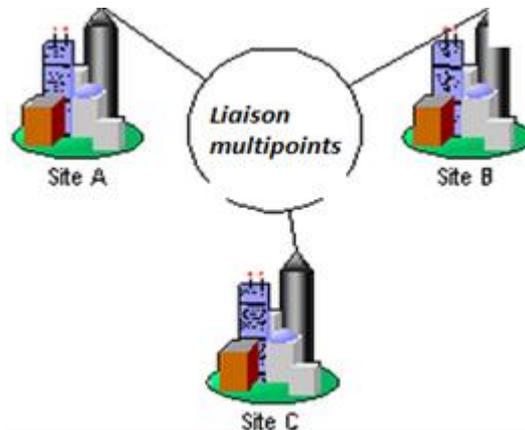


Figure I-12 Liaison multipoints

I.7 Architecture d'un réseau

Deux grandes familles d'architectures se disputent le marché :

- La première provient de l'ISO et s'appelle OSI (Open System Interconnexion)
- La deuxième est TCP/IP
- Une Troisième architecture plus récente est UIT-T (Union Internationale de Télécommunication). Il s'agit de l'adaptation du modèle OSI pour prendre en compte le réseau haut-débit

I.7.1 Modèle OSI d'ISO

Afin de fournir une base commune pour décrire les systèmes de communication et réduire la complexité de conception d'un réseau, l'organisation internationale de normalisation (**ISO** Internationale Organization for Standardization) a introduit un modèle d'interconnexion de système appelé **OSI** (Open Systems Interconnection).

Le concept important du modèle OSI est l'organisation en couches : chaque couche représente un modèle indépendant qui contient un ensemble de fonctions et utilise des services de la couche inférieure. Les données sont traitées successivement couche par couche ; chaque couche ajoute un en-tête à l'émission qui sera retiré puis utilisé à la réception.

Le modèle de référence OSI contient 7 couches, l'organisation et la fonctionnalité de chaque couche est montrée dans le tableau I.2

Tableau I-2 Description des fonctionnalités de chaque couche du Modèle OSI d'ISO

N° de couche	Nom de couche	Fonction
Couche 7	Application	Permet le déroulement correct des programmes communiquant (transferts de fichiers, courrier électronique...)
Couche 6	Présentation	Assure l'échange et la mise en forme de données. Assure la conversion des codes pour délivrer à la couche « application » un message dans une syntaxe compréhensible. <i>(C'est donc la première couche non impliquée dans le mécanisme de transfert d'informations).</i>
Couche 5	Session	Assure l'échange de données et la transaction entre deux applications distantes Assure la synchronisation de l'échange et la définition de point de reprise.
Couche 4	Transport	Assure le contrôle du transfert des informations et la transmission de données de bout en bout. Assure le découpage des messages en paquet pour le compte de la couche réseau.
Couche 3	Réseau	Assure l'acheminement des données (paquets) à travers les différents nœuds d'un sous réseau. Assure le routage (choix du chemin à partir des adresses). Définit la taille des blocs de données.
Couche 2	Liaison	Assure le maintien du lien logique entre les entités Assure le transfert des blocs de données (trames et paquets) en assurant le contrôle. Se charge de relier deux nœuds sur la liaison physique.
Couche 1	Physique	Assure l'établissement et le maintien de la liaison physique. Définit la façon dont les données sont transférées (binaire). Définit les supports et les moyens d'y accéder.

I.7.2 Modèle TCP/IP

TCP/IP désigne communément une architecture réseau, mais cet acronyme désigne en fait 2 protocoles étroitement liés : un protocole de transport, **TCP** (Transmission Control Protocol) qu'on utilise "par-dessus" un protocole réseau, **IP** (Internet Protocol).

Ce qu'on entend par "modèle TCP/IP", c'est en fait une architecture réseau en 4 couches dans laquelle les protocoles TCP et IP jouent un rôle prédominant, car ils en constituent l'implémentation la plus courante. Par abus de langage, TCP/IP peut donc désigner deux choses : le modèle TCP/IP et la suite de deux protocoles TCP et IP. Le tableau I.3 montre le rôle de chaque couche.

Tableau I-3 Description des fonctionnalités de chaque couche du Modèle TCP/IP

N° de couche	Nom de couche	Fonction
Couche 4	Application	Contrairement au modèle OSI, c'est la couche immédiatement supérieure à la couche transport, tout simplement parce que les couches présentation et session sont apparues inutiles Elle contient les logiciels capables de fonctionner en réseau et choisi le protocole de transport à utiliser.
Couche 3	Transport	Gère le transport des données d'un hôte à un autre. Remplace dans l'ordre les fragments transmis sur la couche internet pour reconstruire le message initial. TCP S'occupe également du contrôle de flux de la connexion et corrige les erreurs.
Couche 2	Internet	Réaliser l'interconnexion des réseaux (hétérogènes) distants sans connexion et gère le routage. Permet l'injection de paquets dans n'importe quel réseau et l'acheminement de ces paquets indépendamment les uns des autres jusqu'à destination.
Couche 1	Accès réseau	Regrouper les couches, physique et liaison de données du modèle OSI. Permet d'envoyer des paquets IP sur le réseau. Gère la bonne transmission des trames sur une liaison physique.

I.8 Comparaison entre modèle tcp/ip et le modèle osi

Les points communs entre les deux modèles

- Sont tous les deux fondés sur le concept de pile de protocoles indépendants.
- Les fonctionnalités des couches sont globalement les mêmes.

Les points qui diffèrent entre les deux modèles

- Conception des couches
 - Le modèle OSI faisait clairement la différence entre 3 concepts principaux,
 - Alors que ce n'est plus tout à fait le cas pour le modèle TCP/IP, ces trois concepts sont les concepts de services, interfaces et protocoles. En effet, TCP/IP fait peu la distinction entre ces concepts,

Cela est dû au fait que pour le modèle TCP/IP, ce sont les protocoles qui sont d'abord apparus. Le modèle ne fait finalement que donner une justification théorique aux protocoles, sans les rendre véritablement indépendants les uns des autres.

- La dernière grande différence est liée au mode de connexion. Certes, les modes orientés
 - connexion et sans connexion sont disponibles dans les deux modèles mais pas à la même couche :
 - Pour le modèle OSI, ils ne sont disponibles qu'au niveau de la couche réseau (au niveau de la couche transport, seul le mode orienté connexion est disponible),
 - Alors qu'ils ne sont disponibles qu'au niveau de la couche transport pour le modèle TCP/IP (la couche internet n'offre que le mode sans connexion).

Le modèle TCP/IP a donc cet avantage par rapport au modèle OSI: les applications qui utilisent directement la couche transport ont véritablement le choix entre les deux modes de connexion.

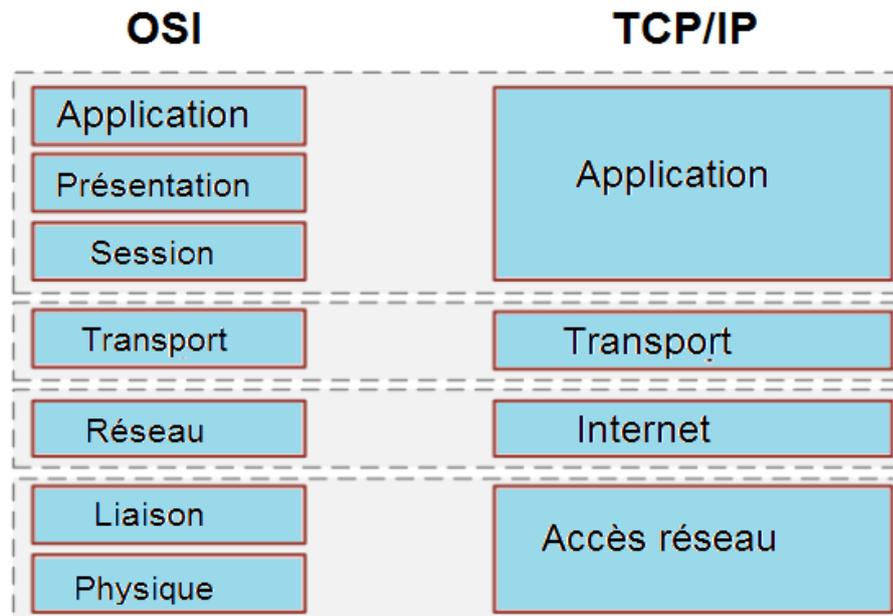


Figure I-13 Comparaison entre modèle TCP/IP et le modèle OSI

I.9 Notion de routage

Un réseau ad-hoc sans fil est une collection de nœuds mobiles formant un réseau temporaire à topologie variable et fonctionnant sans station de base et sans administration centralisée. Dans ce contexte, un des problèmes majeurs dans les réseaux ad-hoc est le routage. Le routage est la recherche d'un chemin entre les différents éléments du réseau dans le but d'envoyer un message entre deux éléments qui ne communiquent pas directement entre eux.

I.9.1 Types de routage

On peut les classer selon différents points de vue. En particulier, la classification suivante est couramment retenue :

- Routage fixe
- Routage par inondation
- Routage aléatoire
- Routage adaptatif

Une autre classification consiste à distinguer les algorithmes de routage selon l'endroit où sont prises les décisions :

- Routage par la source : C'est la source d'un paquet qui détermine le chemin que doit suivre ce paquet. Le fonctionnement de ce routage suppose que chaque source a une vue complète (topologie et éventuellement charge) du réseau. Ce type de routage est mal adapté aux réseaux de grandes tailles.
- Routage pas à pas (dit aussi hop-by-hop) : La décision du chemin est prise par chaque nœud. En effet, chaque nœud détermine, selon ses informations, le prochain nœud auquel il devra envoyer chaque paquet qui lui parvient. C'est ce routage qui est le plus déployé dans les réseaux Internet.

Routage hiérarchique : Le réseau est subdivisé en zones et chaque zone a son routage et elle n'est vue, par les autres zones, qu'à travers son représentant. Nous reviendrons sur ce routage plus loin.

I.9.1.1 Routage fixe

Dans chaque routeur, on calcule le meilleur chemin pour atteindre chaque destination puis on fige les tables de routage. Ces tables ne changent que si la topologie du réseau change suite à des pannes, retrait ou adjonction d'équipement. Cette solution a l'avantage d'être simple à implanter. Elle permet aussi de trouver un chemin optimal, même moyennant un algorithme complexe, mais cette complexité ne gêne pas car l'algorithme est exécuté rarement. Malheureusement, ce type de routage ne prend pas en compte l'évolution dynamique du réseau, notamment la surcharge momentanée de liens et routeurs. Dans beaucoup de réseaux, il est difficile, voire impossible, de tout savoir à l'avance et donc de fixer définitivement la table de routage. En réalité, même si on parle de routage fixe, les tables de routage sont modifiées de temps en temps pour tenir compte du fonctionnement du réseau (pannes de nœuds ou lignes, etc.).

I.9.1.2 Routage par inondation (flooding routing)

Si on ne connaît pas la topologie du réseau, on peut procéder par inondation. Le même paquet sera transmis sur tous les liens et routeurs. Ainsi, on est sûr que s'il y a un chemin pour atteindre le destinataire, le paquet est remis à son destinataire. C'est le type de routage le plus sûr pour livrer un paquet si on ne désire pas gérer les états des liens et routeurs. Quelques exemples sont montrés dans la figure I.14.

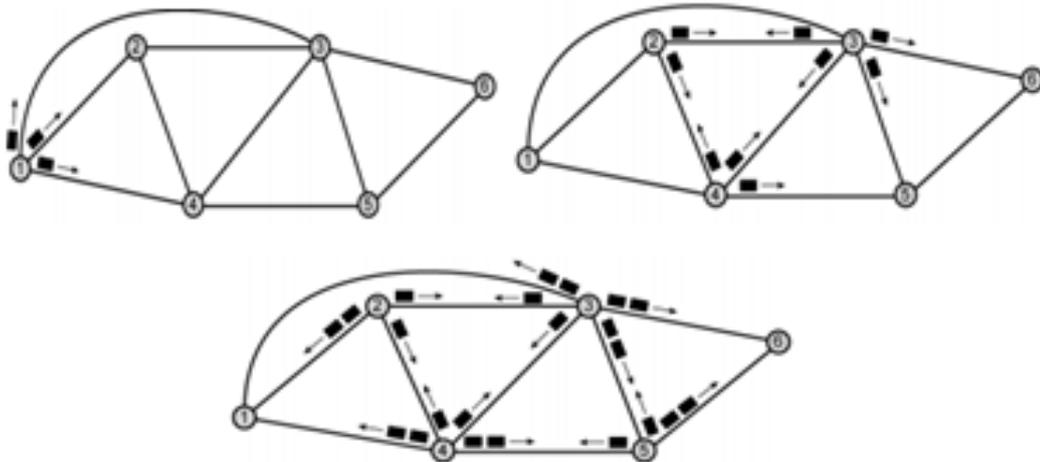


Figure I-14 Exemple de routage par inondation

I.9.1.3 Routage aléatoire

Lorsqu'un paquet arrive, le routeur choisit un lien de sortie (sauf celui par lequel le paquet est arrivé) et transmet le paquet. De cette manière, le routeur n'a pas besoin d'informations d'état sur les autres routeurs. C'est un algorithme simple, mais peu efficace lorsque le réseau est fortement maillé et/ou avec beaucoup de routeurs. Il ne permet pas de trouver le chemin optimal. Par ailleurs, un paquet peut boucler indéfiniment dans le réseau.

I.9.1.4 Routage adaptatif

Le routage adaptatif est utilisé aujourd'hui par presque tous les réseaux. Les décisions de routage sont prises en fonction de l'état des liens et routeurs. Les informations d'état sont échangées (périodiquement ou à la demande) entre les nœuds du réseau. L'échange d'informations d'état conduit à une surcharge du réseau et il faut trouver un compromis entre la fréquence des échanges des informations d'état et le surcoût engendré. Le routage adaptatif conduit à une certaine complexité dans les réseaux et les différences entre réseaux, au niveau routage, réside dans la manière de gérer les informations d'états.

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents réseaux existant, câblés et sans fil. Aussi les types de multiplexages, mode d'accès et les protocoles routage

Et cette étude est importante pour la suite de notre thèse .

II. CHAPITRE II LES COMMUNICATIONS AERONAUTIQUES

II.1 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. Elle est indispensable 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 [1] 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 [2] (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.

II.2 Les différents types de communications

Les communications aéronautiques font l'objet de recommandations émises par l'OACI et regroupées dans l'annexe 10 OACI [3] 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

L'annexe 10 de l'OACI définit quatre catégories de communications aéronautiques sol-bord Comme illustré dans la figure II.1.suivante.

- Les communications pour le contrôle aérien (ATSC)
- Les communications opérationnelles pour les compagnies (AOC)
- Les communications administratives pour les compagnies (AAC)
- Les communications pour les passagers (APC)

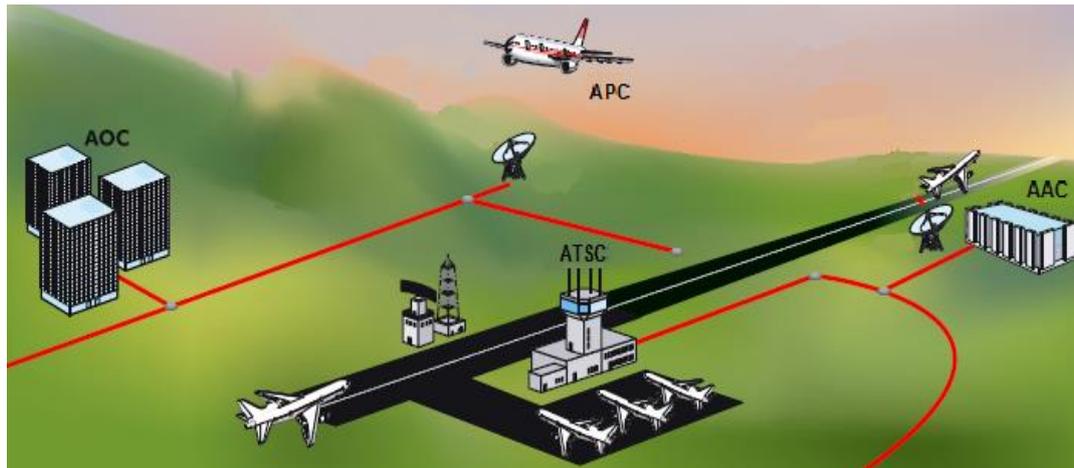


Figure II-1 Les différents types de communications

- ❖ Les communications ATSC et AOC sont appelées communications opérationnelles ou critiques.
- ❖ Les compagnies aériennes peuvent aussi avoir besoin de communiquer avec leurs avions en vol, on distingue alors :
 - Les communications opérationnelles (AOC)
 - Les communications administratives (AAC).

II.2.1 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 ;
- 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 tels que :

- 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
- Aussi, de nombreuses applications qui utilisent des liaisons de données numériques OACI 2000b [4]. On peut citer par exemple :
 - Les communications contrôleur-pilote par liaison de données (CPDLC).
 - La surveillance dépendante automatique (ADS).
 - Les services d'informations de vol par liaison de données (DFIS).

II.2.2 AOC (Aeronautical Operational Control)

Les communications opérationnelles regroupent l'ensemble des communications nécessaires à l'exercice de l'autorité sur :

- la continuation
- le déroutement ou l'achèvement du vol pour des raisons de sécurité, de régularité ou d'efficacité OACI [3].
- 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
 - L'état du vol
 - Les plans de vol, ...
 - Les plannings de l'équipage et de l'avion.

L'utilisation de ces services varie selon les compagnies.

II.2.3 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, ...)
- La gestion de la cabine (demande de nettoyage, rapport d'incident, ...)

II.2.4 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 voir l'émergence des nouveaux services et détailler les moyens de communications existants.

II.3 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) 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 [5], 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. Comme le montre le tableau II.1 ci-dessous.

Tableau II-1 Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques

Années	Bandes de fréquences	Espacement des canaux	Nombres 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

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 5à partir d'octobre 1999, puis au-dessus du niveau de vol FL 195 à partir de mars 2007. Le tableau 2.1 montre l'évolution du nombre de canaux VHF de 1947 à nos jours.

Aujourd'hui, les fréquences de radiocommunication sont très convoitées. Il est donc difficile d'étendre la bande aéronautique VHF. De plus, la séparation des canaux

de 8,33 kHz correspond à l'espacement minimal qui permet de transmettre de la voix avec une qualité suffisante, avec la modulation actuelle DSB-AM (Double Side Band - Amplitude Modulation). Il est donc aujourd'hui très difficile d'augmenter la capacité des systèmes de communications vocales.

II.4 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 2002a [6].

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 II.2 montre le DCDU d'un Airbus A330.



Figure II-2 Interface du pilote pour les messages CPDLC

II.5 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 [7]. Ses spécifications ont été publiées par l'OACI dans les documents 9705, 9739 et 9896 / OACI 2002b, OACI 2001a, OACI 2010b [8, 9,10]

L'ATN est basé sur l'architecture OSI (Open Systems Interconnection) de l'ISO [11]. Il a été conçu pour interconnecter les différents systèmes de communications, y compris les systèmes existants. La figure II.3 en montre une illustration.

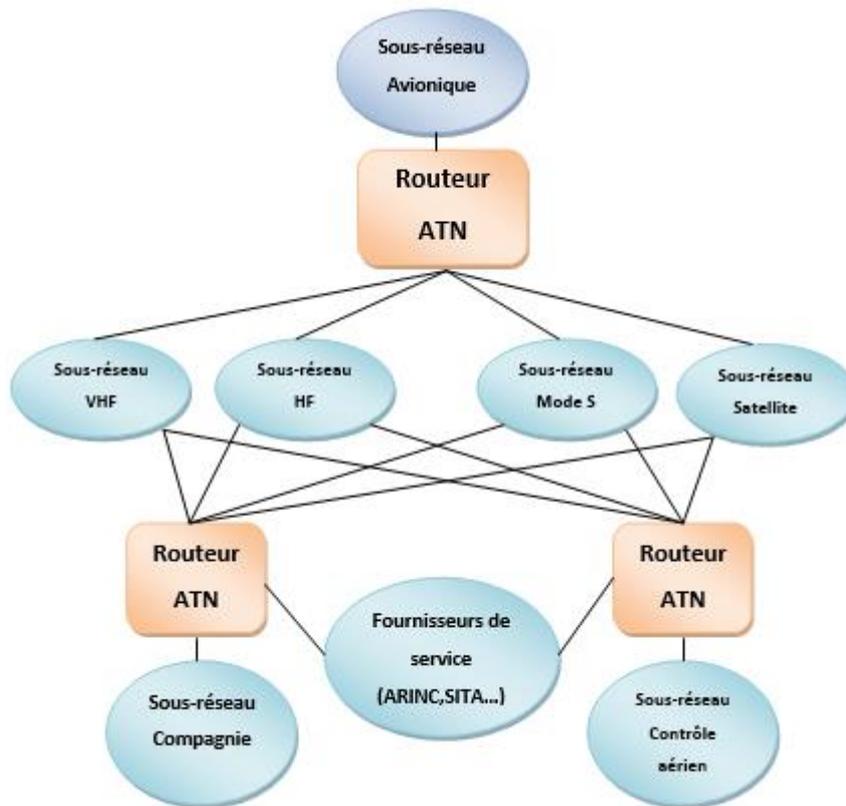


Figure II-3 Le réseau ATN

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 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). Elle 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+ 8 Eurocontrol 2010b [12]. Il a pour but de planifier et de coordonner la mise en œuvre de services opérationnels de liaison de données pour la gestion du trafic aérien en Europe.

Des applications CPDLC ont ainsi été mises en œuvre 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.

II.6 L'émergence de nouveaux services

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. La figure II.4 nous montre les nouveaux services de communication entre avions et sol.

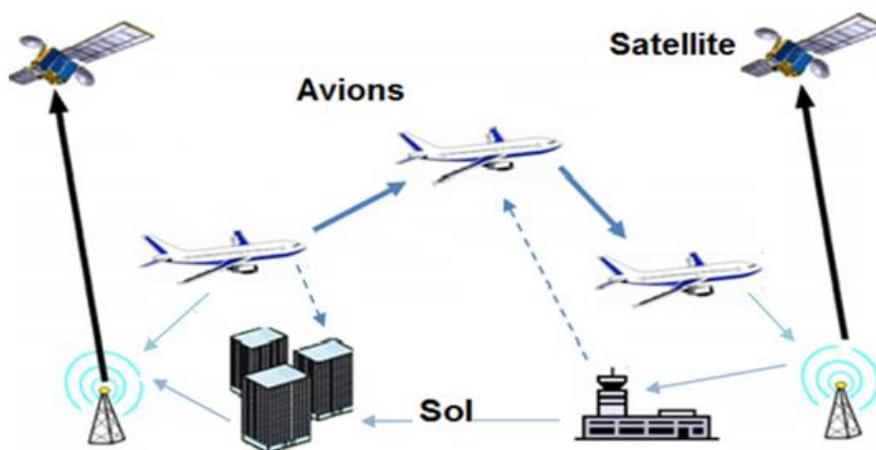


Figure II-4 Les nouveaux services de communication Sol-Bord

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 futurs services opérationnels ainsi que leurs exigences le COCR (Communications Operating Concepts and Requirements) COCR 2002 [13]. 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 II.5.

- 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 certainement le jour pour remplacer les communications vocales.

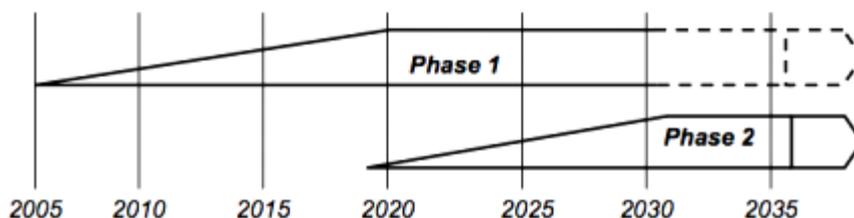


Figure II-5 Les deux phases du COCR

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.
- 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, la télémédecine ou encore la sauvegarde des boîtes noires en vol.

D'autre part, 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 [3]. Plusieurs projets et entreprises ont alors vu le jour pour fournir ces services.

II.7 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 œuvre des réseaux ad hoc aéronautiques.

II.8 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 DATALINK peut être utilisé à d'autres fins que les communications sol-bord, par exemple pour des applications de navigation et de surveillance, voir annexe B

II.9 Les moyens de communication de données existants

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. Comme illustré dans la figure II.6 ci-dessous.

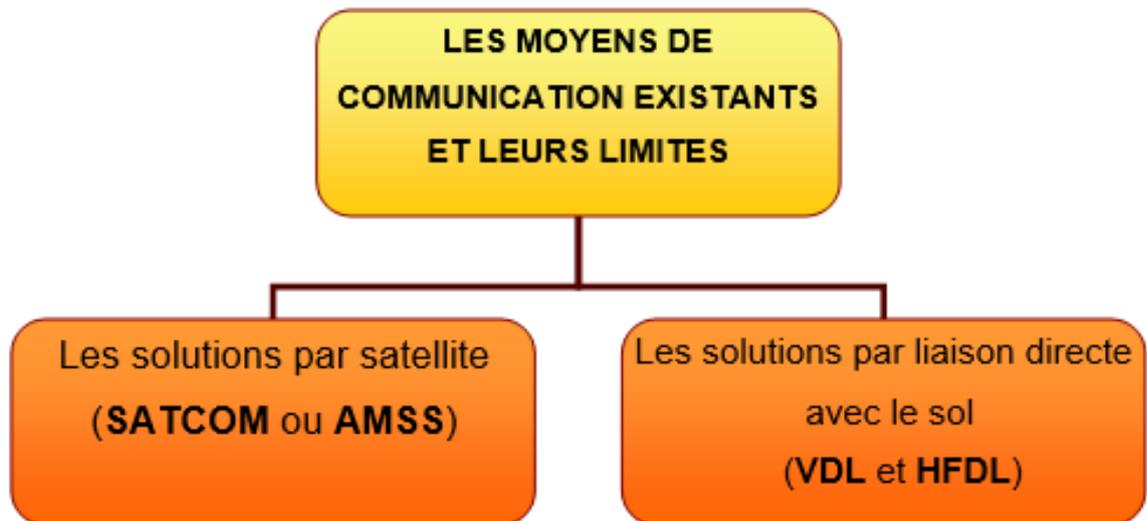


Figure II-6 Les moyens de communication de données numériques

- Les solutions par satellite avec le SATCOM (Satellite Communications) ou AMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service)
- Les solutions par liaison directe avec le sol avec la VDL (VHF Data Link) et la HF DL (High Frequency Data Link). Cela est illustré dans la figure II.7. Nous allons maintenant les décrire plus en détail.

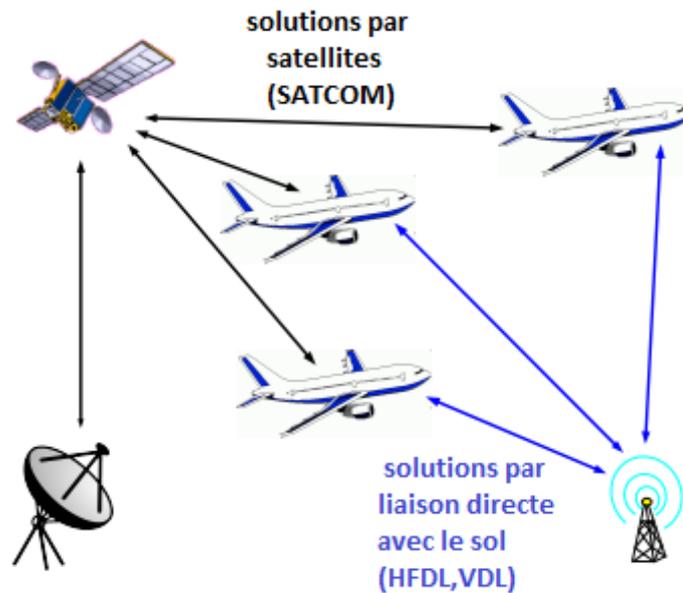


Figure II-7 Les moyens de communications existants

Parallèlement à cela, de nouveaux services pour les passagers à bord des avions, pour pouvoir se connecter à INTERNET, est une demande de plus en plus forte aussi bien pour l'homme d'affaires, qui souhaite travailler, consulter ses mails, suivre le cours de la bourse, faire une visio-conférence, ...etc. Ou alors, pour un simple touriste qui veut consulter l'actualité, discuter sur les réseaux sociaux, ou encore regarder une vidéo pour se détendre pendant le vol.

Afin de pouvoir fournir une connexion INTERNET aux passagers à bord d'avions, plusieurs solutions existent déjà ; Certaines ont même été commercialisées, d'autres sont encore à l'étude. Nous allons les entrevoir en deux variantes :

- solution par satellite.
- solution par liaison directe avec le sol.

Nous allons tout d'abord voir les performances requises pour les contrôleurs aériens et les passagers.

II.9.1 Performances requises

Les performances requises des communications aéronautiques pour le contrôle aérien sont exprimées sous forme de RCP (Required Communication Performance), qui ont été définies par l'OACI. 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 :

- Le temps de transaction opérationnelle.
- La continuité, la disponibilité et l'intégrité du service.

L'objectif étant d'arriver à déterminer la RCP la mieux adaptée à chaque service du contrôle aérien.

Par contre, 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.

Trois principaux paramètres de la qualité de service des communications aéronautiques pour les passagers sont:

- **Le délai:** Représente la durée entre l'émission et la réception des données
- **La gigue:** Représente la variation de ce délai.
- **Le taux de pertes:** correspond au pourcentage de paquets perdus durant la transmission.

Il est entendu que dans ITU 2001[14], l'UIT donne des recommandations pour de nombreuses applications vocales ou de données à savoir la téléphonie, la visio-conférence, la navigation sur internet ou encore l'échange des mails.

II.9.2 Solutions par satellite

Le premier moyen de communication pour le contrôle aérien qui peut venir à l'esprit 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.

II.9.2.1 Quelques solutions pour le contrôle aérien

Inmarsat

Inmarsat [15] 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 offrent ainsi une couverture globale entre $\pm 80^\circ$ de latitude environ. Les pôles ne sont donc pas couverts. La figure II.8 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.

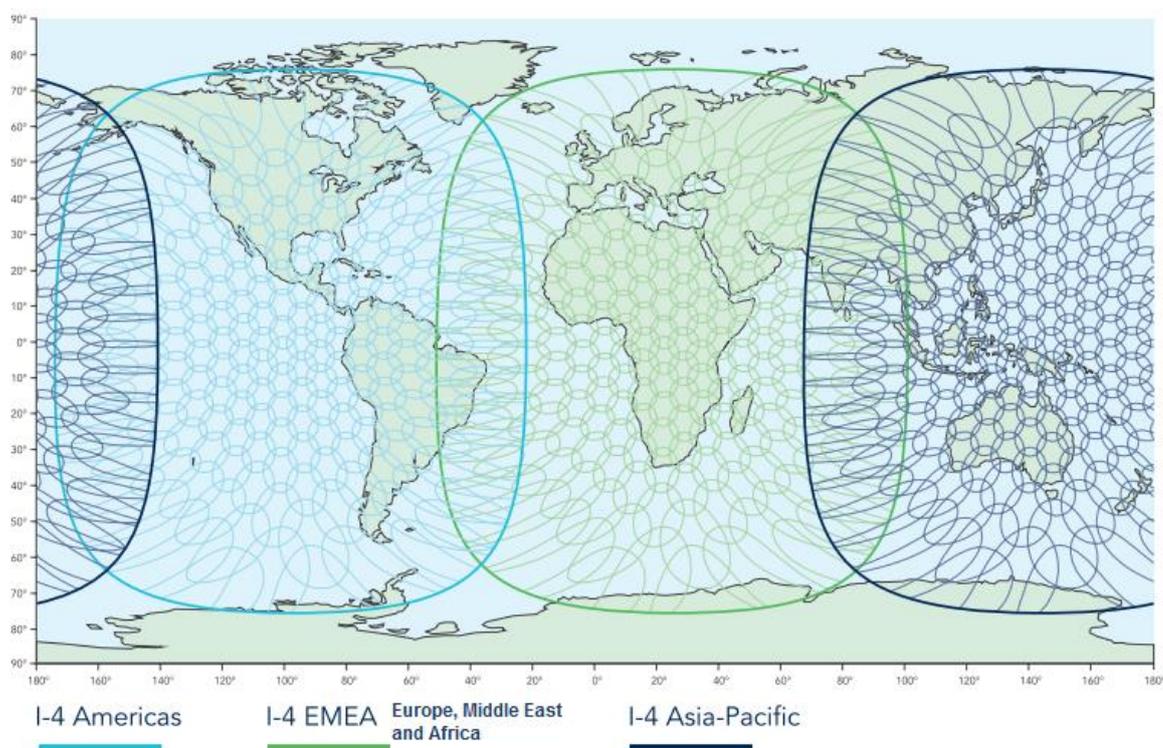


Figure II-8 Couverture des services aéronautiques d'Inmarsat [1]

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.

Iridium

Iridium [16] 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 II.9 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 [17]. 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.

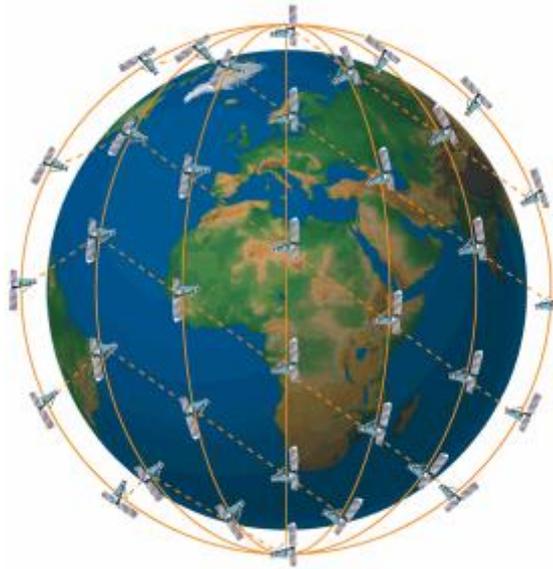


Figure II-9 La constellation Iridium

Par ailleurs, la connexion INTERNET est de plus en plus demandée par les passagers qui ont amené de nombreuses compagnies aériennes à trouver un moyen de fournir de tels services et les commercialiser aux particuliers, notamment dans les régions où l'accès par ADSL n'est pas possible: il suffit d'installer une antenne parabolique pour recevoir INTERNET par satellite. Nous allons voir quelques-unes des solutions existantes.

II.9.2.2 Quelques solutions pour les passagers

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[18]. 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.

Inmarsat

Le service Swift 64 II 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'affaires.

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.

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 [19]. 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.

Panasonic Avionics Corporation - eXConnect

Depuis 2008, Panasonic Avionics Corporation [20] 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 composé 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.

OnAir

OnAir [21] 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 Swift Broadband des satellites Inmarsat. Le 30 avril 2009, OnAir a annoncé le 10000ème vol équipé de leur système.

Row44

Row 44 [22] 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.

AeroMobile

AeroMobile [23] 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.

II.9.2.3 Solution par liaison directe avec le sol

Une autre solution envisageable pour le contrôle aérien et pour les passagers a été mise en place aux communications de données numériques et vocales partant, et pour établir une liaison directe avec le sol et ainsi fournir une connexion à bord des avions civils. Il s'agit d'un réseau cellulaire avec une station au sol fixe et un avion mobile.

Le téléphone portable illustre bien cette solution si ce n'est que son utilisation se trouve à une altitude et à une vitesse donnée. Nous allons voir quelques solutions pour le contrôle aérien et pour les passagers.

III.1 Quelques solutions pour le contrôle aérien

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 [19] 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.

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.

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 [3]. Au niveau de la couche physique, la VDL Mode 2 utilise une modulation de phase D8PSK qui 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-persistant. 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 II.10 montre la couverture du service VDL Mode 2 offert par SITA en 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 II-10 Couverture VDL Mode 2 par SITA

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.

VDL Mode 4

La VDL Mode 4 OACI [3] 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.

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 [3]. 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 [19]. La HFDL utilise trois modulations PSK et offre un débit maximum de 1,8 kbps. Elle offre une couverture mondiale.

III.2 Quelques solutions pour les passagers

Aircell

Aircell [24] est la seule entreprise aux États-Unis à être autorisée par la FCC [25] (Federal Communications Commission) et la FAA [17] (Federal Aviation Administration) 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.

Wi-Sky

Wi-SKY [26] 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 à une distance de 50 miles, soit environ 80km. 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.

II.10 Les limites des solutions existantes

II.10.1 Solutions par satellite

II.10.1.1 Capacité

Les solutions actuelles ou disponibles à court terme par satellite présentent des limitations importantes, notamment en termes 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.

II.10.1.2 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.

II.10.1.3 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.

II.10.2 Solutions par liaison directe avec le sol

II.10.2.1 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.

II.10.2.2 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 l'ionosphère.

II.10.2.3 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.

II.11 Les futurs moyens de communications

Dans cette partie, nous allons voir les travaux portant sur l'évolution des moyens de communication existants. La figure II.11 nous donne une illustration.

Ensuite, nous verrons les nouveaux moyens de communications développés dans le cadre du projet SESAR.

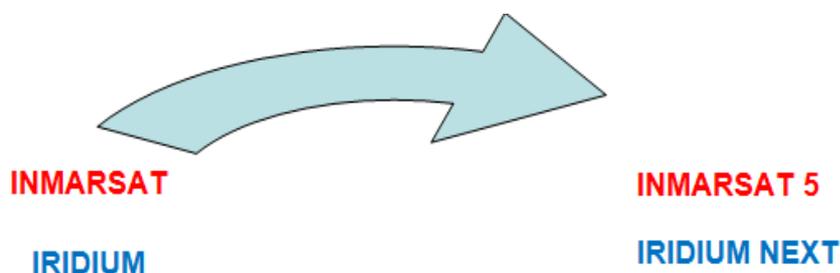


Figure II-11 L'évolution des systèmes existants

II.11.1 L'évolution des systèmes existants

II.11.1.1 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.

II.11.1.2 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 [27] 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.

II.12 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 [28] : 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

vois, de réduire de 10% les émissions de CO2 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 [29] (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 II.12 résume cette infrastructure.

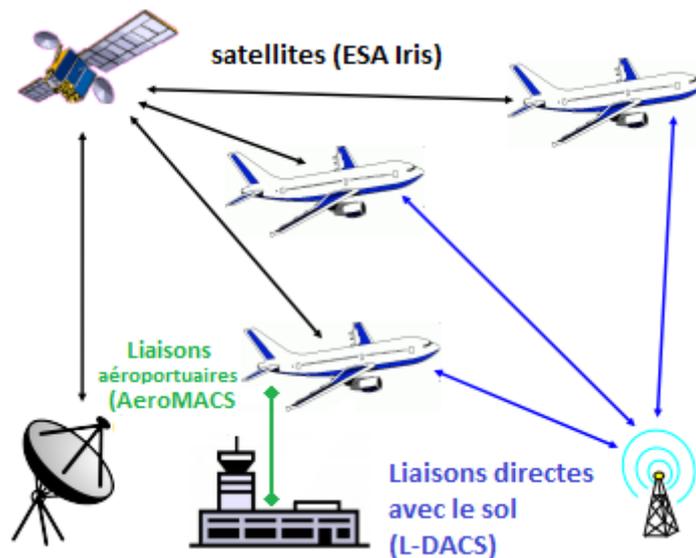


Figure II-12 L'architecture de communication du projet SESAR

II.12.1 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 [30].

Il va toutefois opérer en bande C dans une bande réservée à l'aéronautique.

II.12.2 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. Le programme IRIS [31] 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.

II.12.3 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 [32]. 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 : et une modulation de type OFDM). 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. 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.

Dans ce chapitre, nous avons présenté 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.

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 termes de capacité, de couverture et de coût.

III. CHAPITRE III RESEAU AD HOC AERONAUTIQUE

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.

III.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 "Pocket Radio Network" JUBIN & TORNOW 1987 [33]. 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 [34] 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.

III.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 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 III.1 illustre le mode de fonctionnement d'un réseau ad hoc, en comparaison avec le mode infrastructure classique des réseaux cellulaires.

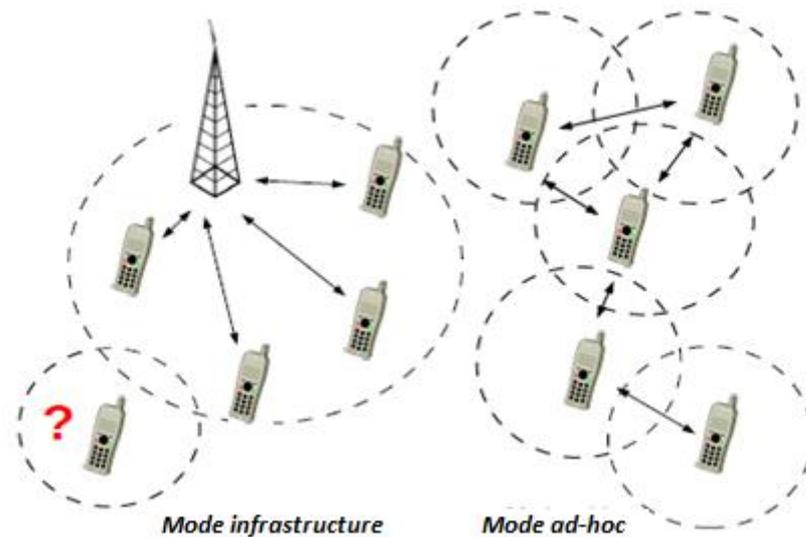


Figure III-1 Mode infrastructure et mode ad hoc

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.

III.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 [35]. Nous allons en décrire quelques-unes. Comme indiqué sur la figure III.2 ci-dessous.

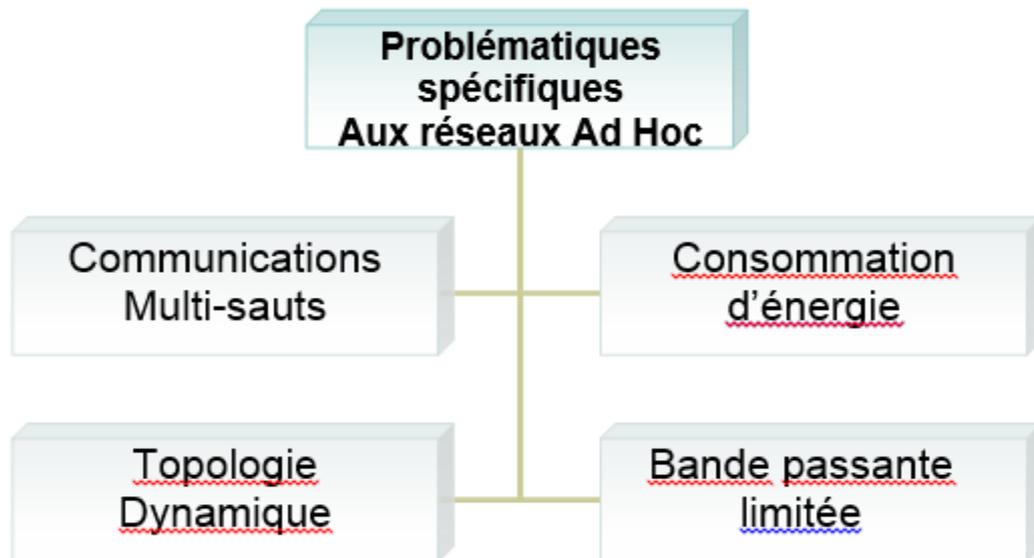


Figure III-2 Problématiques spécifiques

III.1.2.1 Communication 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.
- 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.

III.1.2.2 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.
- 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.

On trouve ainsi des modèles :

- Individuels, où les déplacements de chaque nœuds sont modélisés indépendamment les uns des autres.
- Modèles de groupes, où le déplacement d'un nœud va dépendre du déplacement des autres.

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.

III.1.2.3 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.

III.1.2.4 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.

III.1.3 Architecture

III.1.3.1 La couche physique

D'après le modèle OSI de l'architecture générale des réseaux, 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 fil sont été proposées pour chaque type de réseaux.

On peut citer par exemple :

- Le Bluetooth (IEEE 802.15 [36]) pour les WPAN.
- le Wifi (IEEE 802.11 [37]) pour les WLAN.
- le WiMax (IEEE 802.16 [30]) pour les WMAN.

III.1.3.2 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.

On peut ainsi distinguer les méthodes qui considèrent :

- un canal unique, commun à tous les utilisateurs, comme l'ALOHA ou le CSMA,
- 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.

III.1.3.3 La couche réseau (Le routage dans les MANET)

Comme pour les protocoles MAC, Il existe plusieurs critères pour la conception et la classification de protocoles de routage ; on trouve dans la littérature de nombreuses propositions de protocoles de routage dans les réseaux ad hoc mobiles, il est possible de distinguer trois grandes catégories de routage comme indiqué par le schéma en figure III.3.

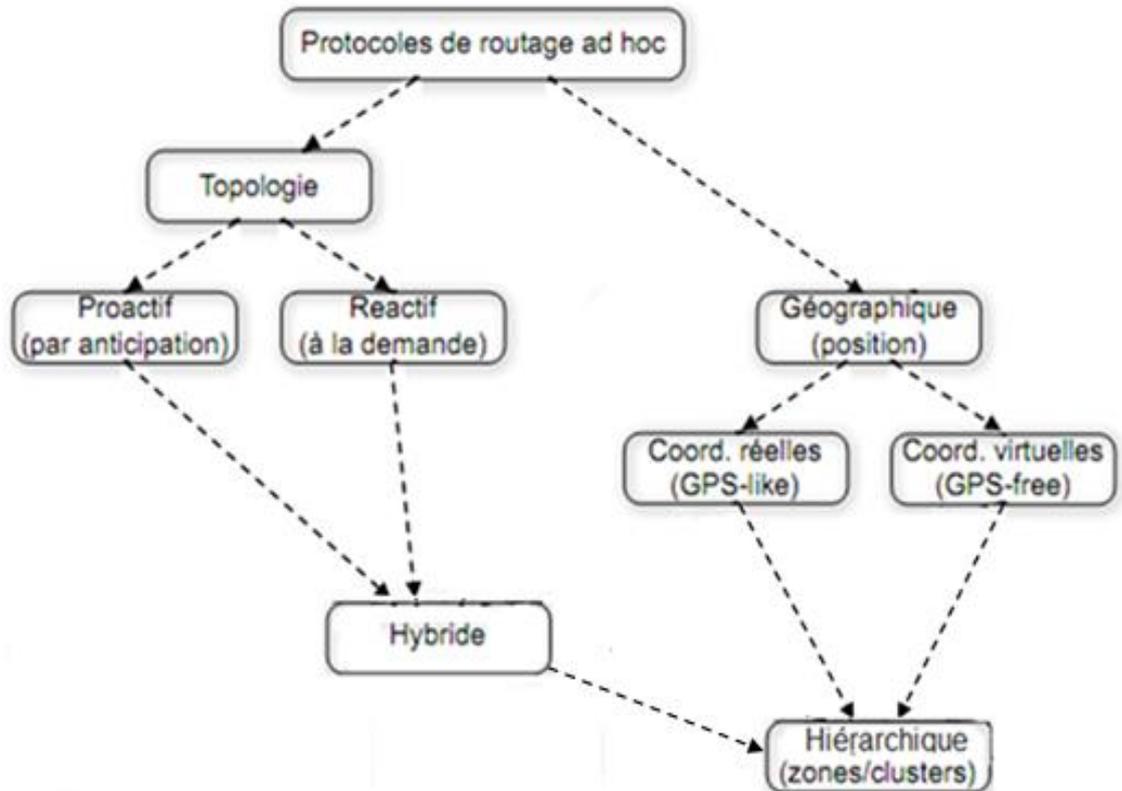


Figure III-3 Classification des protocoles de routage ad hoc

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
- Un pour les protocoles de routage réactifs.

La figure III.4 qui suit nous montre deux grandes catégories pour classer les protocoles de routage dans les MANETs.

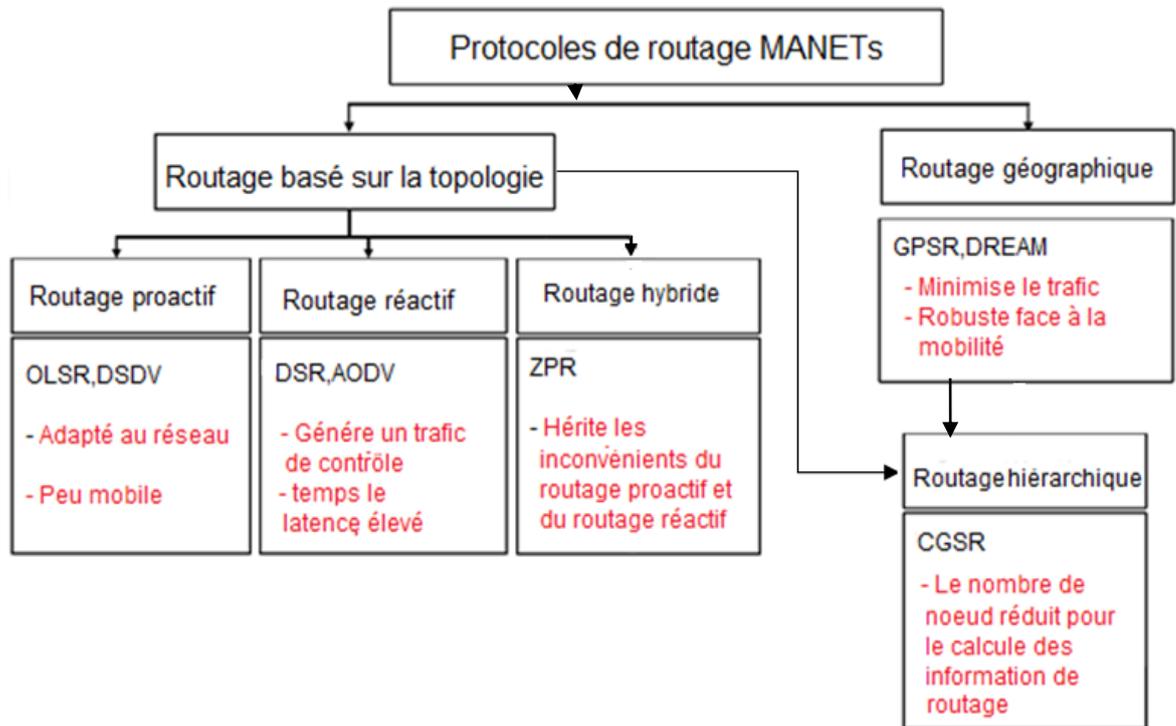


Figure III-4 Routage dans les MANETs

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 des 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 C.

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 C.

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 C.

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.

On peut citer par exemple DREAM et GPSR, décrits dans l'annexe C.

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,
- 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.

Remarque :

La première étape commune à ces protocoles de routage consiste donc à établir les clusters et à élire un cluster-head de façon distribuée.

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 C.

La couche transport

Les deux principaux protocoles de transport standardisés par l'IETF comme l'illustre la figure 3.5 sont UDP et TCP.



Figure III-5 Principaux protocoles de transport standardisés par l'IETF

UDP (User Datagram Protocol) UDP est un protocole de transport qui a été spécifié dans la RFC 768 POSTEL 1980 [38] 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 RFC793 POSTEL 1981 [39]. 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
- La fin de la connexion.

L'établissement de la connexion se fait en trois temps par l'échange des paquets :

- SYN,
- SYN/ACK
- 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 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 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 fréquentes 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. Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature pour améliorer les performances de TCP dans les réseaux ad hoc. 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.
- Les solutions cross-layer qui modifient plusieurs couches simultanément. Quelques-unes de ces solutions sont présentées dans l'annexe D.

III.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 SAKHAEI, ABBAS JAMALIPOUR ET NEIKATO de l'Université de Sydney dans SAKHAEI & JAMALIPOUR 2006 [40].

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).

On retrouve deux segments :

- un **segment sol** constitué d'une ou plusieurs stations sol qui sont reliées entre elles et à Internet. comme l'illustré la figure III.6.

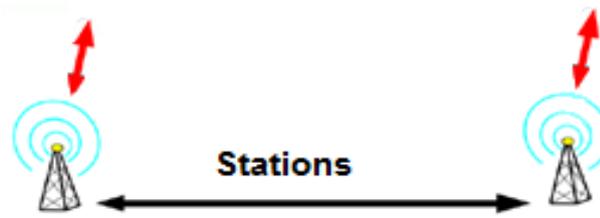


Figure III-6 Segment sol

- **segment aérien** constitué par les avions en vol. comme l'illustré la figure III.7 ci-dessous.

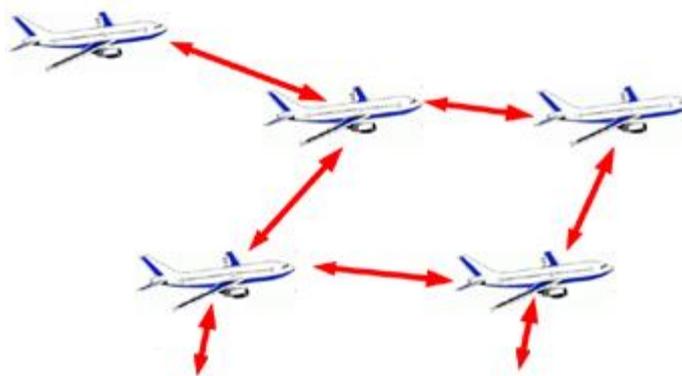


Figure III-7 Segment aérien

Il peut éventuellement être complété par un **segment spatial** avec un ou plusieurs satellites. Comme l'illustré la figure III.8 ci-dessous



Figure III-8 Segment spatial

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. Les figures III.9 et III.10 ci-dessous montrent le principe général d'un réseau ad hoc aéronautique, avec et sans segment spatial.

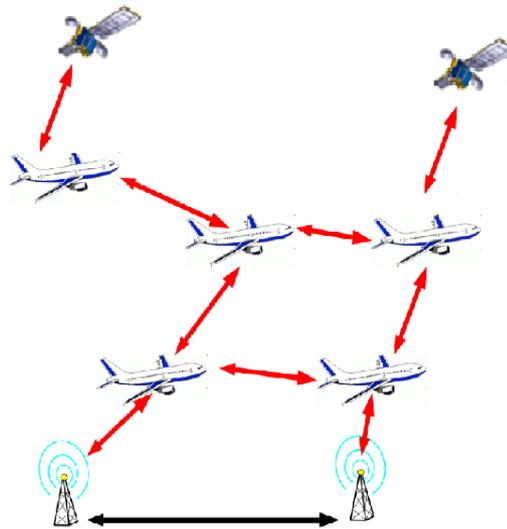


Figure III-9 Principe général d'un réseau ad-hoc aéronautique (avec segment spatial)

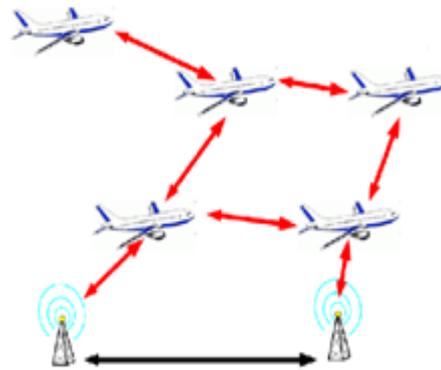


Figure III-10 Principe général d'un réseau ad-hoc aéronautique (sans segment spatial)

III.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 (SANCHEZ & ANEJOS 2001[41]), 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 [42]) 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 :

- (GNSS) système de positionnement par satellites.
- 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.

III.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 et le projet NewSky. 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.

III.4.1 Le projet ATENAA

Le projet ATENAA (Advanced Technologies for Networking in Aeronautical Applications) (AMIRFEIZ 2006 [43]) 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.
- Evaluer et développer les technologies nécessaires à la gestion et la sécurité de ce réseau.
- Etablir 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
 - Evaluer les performances globales du système et préparer sa future implémentation.

III.4.2 Le projet NewSky

Le projet NewSky (Networking the Sky for Aeronautical Communications) SCHNELL & SCALISE 2007 [44], présenté dans, 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 Fréquentais.

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

III.5 Solutions proposées pour les deux couches physique et liaison

III.5.1 Liaison idéale

Dans la première étude des réseaux ad hoc aéronautiques de l'Université de Sydney publiée dans SAKHAEET AL.2006a, SAKHAEE & JAMALIPOUR 2006 [45,40], 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 MEDINA ET AL.2008A, MEDINA ET AL.2008b [46, 47], 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 [48], 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.

III.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. Deux solutions ont alors été proposées pour ces liaisons directionnelles entre avions : des liaisons optiques (OOL : Outer Optical Links) 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. 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.

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 [49, 50]. 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 attribut 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 inclus le trafic généré par l'avion lui-même ainsi que le trafic qu'il doit faire suivre.

Dans TU ET AL. 2009 [51], ils ont proposé une amélioration de leur solution avec du STDMA. 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.

Dans WALTERET AL.2010 [52], 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.

III.5.3 IEEE 802.11

Enfin, dans de nombreuses études sur le routage dans les réseaux ad hoc aéronautiques publiée dans SEO ET AL.2008, [53] 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.

III.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) qui est inspiré de DSR, ou hybrides, comme ARPAM (Ad hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile ad hoc networks)

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) et le protocole GLSR (Geographic Load Share Routing). Voici quelques-uns de ces protocoles.

III.6.1 Exemple de protocoles de routage proposés 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.

III.6.1.1 MUDOR

Dans la première étude sur les réseaux ad hoc aéronautiques SAKHAEI & JAMALIPOUR 2006 [40], 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 3. 1.

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 [54]. 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 SAKHAE & JAMALIPOUR 2007 [55], 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 SAKHAE ET AL.2006b [56], 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.

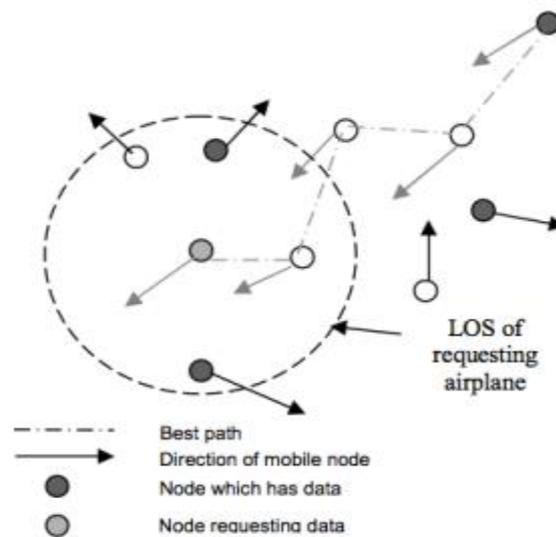


Figure III-11 Définition du meilleur chemin pour le protocole MUDOR

III.6.1.2 GPSR

Dans MEDINA ET AL.2008a, MEDINA ET al.2008b [57, 58], 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 [53], 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.

III.6.1.3 ARPAM

Dans KARRAS ET AL.2008a, IORDANAKIS ET AL.2006 [59, 60], les auteurs proposent un protocole de routage hybride et géographique pour les réseaux ad hoc aéronautiques : ARPAM (Ad hoc Routing78 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.

III.6.1.4 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 [61, 62]. 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.

III.6.1.5 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 [63, 64, 65, 66]. 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 III.12, 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 amk que permet chaque voisin «k» pour joindre la destination m. amk est définie comme étant la différence entre δ_{im} , la distance entre le nœud courant 'i' et la destination m, et δ_{km} , la distance entre le voisin k et la destination. Si amk 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 amk 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.

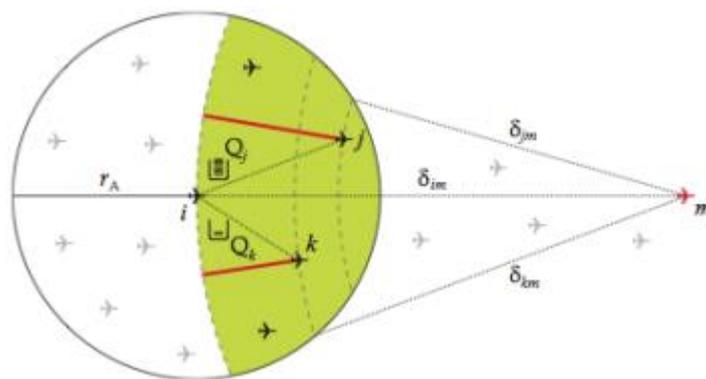


Figure III-12 Principe de GLSR

III.6.1.6 GRAA

GRAA (Geographic Routing protocol for Aircraft Ad hoc Network) a été proposé dans HYEONET AL.2010 [67]. 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.

Dans ce chapitre nous avons commencé par une présentation des réseaux ad hoc mobiles pour aboutir aux réseaux ad hoc aéronautiques et ses limites. Ensuite nous avons cité quelques projets de recherche à savoir les projets ATEENA et NEWSKY.

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 afin qu'ils puissent joindre le sol, même lorsqu'ils ne sont pas à portée directe d'une station. Enfin nous avons mentionné les différents protocoles de routage proposés pour ces réseaux.

IV. CHAPITRE IV LE LOGICIEL DE SIMULATION OPNET

IV.1 Introduction

OPNET (OPTimum Network Engineering Tool) est une famille des logiciels de modélisation et de simulation de réseaux, s'est actuellement imposé dans le monde de la recherche et développement pour la modélisation et la simulation de réseaux de télécommunication. Il travaille sur toutes les couches du modèle OSI et permet de récupérer une grande quantité d'informations tant que l'on reste au niveau de granularité égale au paquet. Il utilise une interface graphique afin de permettre aux utilisateurs de modéliser et de simuler les réseaux facilement et intuitivement. OPNET dispose de codes sources totalement ouverts et clairement expliqués, cela aide les développeurs à mieux comprendre les fonctionnements détaillés de chaque composant dans le réseau.

OPNET Modeler est la version académique de cette famille; il offre la possibilité de modéliser et d'étudier des réseaux de communications, des équipements, des protocoles et des applications avec facilité et évolutivité. Elle est proposée par la société OPNET Technologies (www.opnet.com). Pour simplifier la présentation, nous l'appelons par la suite OPNET.

OPNET est basée sur des modélisations hiérarchiques; cette méthode correspond bien à la structure des réseaux actuels. Comme le montre la Figure IV-1, Il dispose de trois niveaux hiérarchiques imbriqués :

- Le plan de réseau
- Le plan de nœud
- Le plan de processus

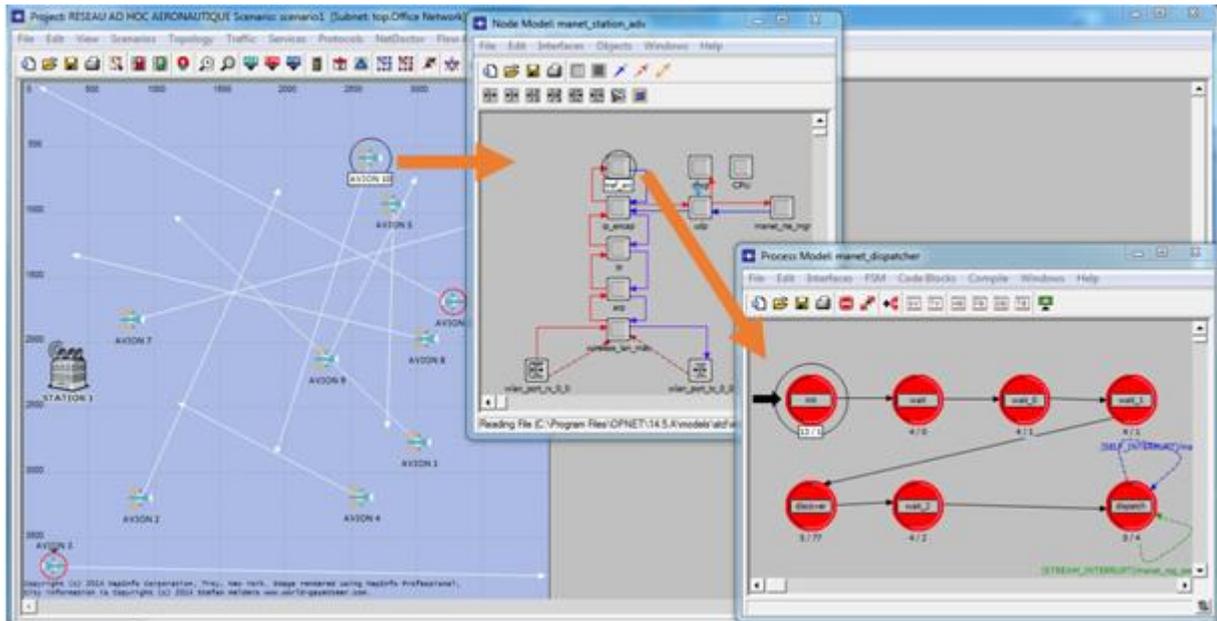


Figure IV-1 Modélisation hiérarchique dans l'environnement OPNET

Plan de réseau (Network domain) : Est le niveau le plus élevé de la hiérarchie d'OPNET. Il permet de décrire la topologie générale du réseau étudié. Le réseau est décrit sous forme d'un ensemble d'éléments de communication qui dispose de deux types de nœuds :

- Fixes (serveurs, stations de travail, routeurs...)
- Mobiles (téléphones portables, satellites...)

Les utilisateurs peuvent configurer le réseau en paramétrant les attributs associés aux nœuds et aux liens.

- **Plan de nœud (Node domain) :** Permet de définir l'architecture des nœuds en traduisant les flux de données échangés entre les blocs fonctionnels appelés les modules. Les modules peuvent représenter les applications, les couches de protocoles, les buffers, etc... Les modules peuvent communiquer entre eux via des flux des paquets ou via des liens statistiques (échanger des informations de statistiques, par exemple : remplissage de file d'attente, délai limite de transmission, etc.). La fonctionnalité de chaque module est ensuite spécifiée au niveau processus.

Au niveau du plan de nœud certains modules sont non programmables ; il s'agit des transmetteurs (**transmitters**) et des receveurs (receivers), dont la seule fonction est de joindre le nœud et les liens auxquels ils sont connectés.

- **Plan de processus (Process domain)** : Permet de définir le rôle du module composant le nœud. Le comportement du module est spécifié au niveau du processus à l'aide de machine à états finis.

Chaque état correspond à une activité décrite en code C/C++ supporté par une bibliothèque de fonctions préprogrammées. Les transitions entre les différents états sont déterminées par des conditions d'exécution, par exemple : les événements d'interruption.

Pour chaque niveau hiérarchique présenté ci-dessus, les éditeurs graphiques correspondants sont utilisés pour simplifier la modélisation. De plus, OPNET dispose de beaucoup d'éditeurs/outils supplémentaires (éditeur de paquets, outil de sondes, outil de simulation, etc... qui permettent facilement et efficacement de simuler et analyser le réseau étudié.

La modélisation et la simulation sous OPNET peuvent se faire de deux manières :

- En utilisant la palette pré-modélisée dans la bibliothèque d'OPNET
- En programmant soi-même les composants suivant l'ordre hiérarchique.

Certainement, la première méthode est beaucoup plus rapide et facile que la deuxième car les programmations et les descriptions des éléments sont transparentes pour les utilisateurs. Par contre, dans le cas où des nouveaux algorithmes ou protocoles doivent être testés, la deuxième méthode, qui est une étape indispensable, est plus souple et plus facile à adapter que la première.

Dans cette thèse, les simulations sont toutes basées sur la première méthode.

IV.2 La simulation

IV.2.1 Les différents scénarios de la simulation

Nous avons développé un modèle de simulation des réseaux ad hoc aéronautiques avec le logiciel OPNET Modeler 14.5. L'objectif de ce modèle est de pouvoir simuler de façon réaliste un réseau ad hoc aéronautique en tenant compte de la position des avions et des stations sol, tout en pouvant paramétrer le trafic généré par chaque avion. Le modèle permet donc de simuler un nombre quelconque d'avions et de stations.

Au début de la simulation, le processus station va inscrire chaque station dans la liste des stations. Cela permettra à la station de se voir attribuer un identifiant puis une position.

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 émettre et recevoir les paquets émis et reçu par les avions. On considère donc une topologie en étoile autour de la (ou des) station(s).

IV.2.2 Les métriques de performance

Avant de présenter les différents scénarios et les résultats et les analyses des simulations réalisées, nous définirons quelques termes qui seront abordés dans ce chapitre. Ces définitions, tirées de la documentation d'OPNET, sont :

- Délai de bout en bout message ou PEED (Packet End to End Delay) :
Le temps que prend un paquet partant de la couche application de la source et arrivant à la couche application de la destination. Cette statistique enregistre des données relatives à tous les nœuds du réseau.
- Délai "mouth-to-ear" = délai du réseau + délai de codage + délai de décodage + délai de compression + délai de décompression.

Les termes ci-haut mentionnés se définissent ainsi :

- Le délai du réseau est le temps pendant lequel l'émetteur cède le paquet au RTP (*Real Time Protocol*) jusqu'au temps où le récepteur le reçoit du RTP.
- Le délai de codage (sur le nœud émetteur) est calculé par l'encodeur. Notons que le délai de décodage (sur le nœud de récepteur) est égal au délai de codage.
- Les délais de compression et de décompression deviennent des attributs correspondants dans la configuration de l'application en général. Cette statistique enregistre des données de tous les nœuds dans le réseau.
- La gigue mesure les écarts entre les délais de transmission. Par exemple soit deux paquets consécutifs qui sont émis de la source aux instants t_1 et t_2 et ils s'exécutent à la réception aux instants t_3 et t_4 , ce qui donne l'équation suivante :

$$\text{La gigue} = (t_4 - t_3) - (t_2 - t_1).$$

- La gigue négative indique que la différence entre les temps de réception des deux paquets (à la destination) est inférieure à celle relative aux temps de leurs émissions (à la source).
- Les paquets perdus correspondent à la taille totale des paquets de données perdus de la couche supérieure (en bits/seconde) dans le réseau à cause des insuccès de retransmissions.
- Le débit est la quantité d'informations transmises via un canal de communication selon un intervalle de temps donné. Le débit s'exprime généralement en kbps (kilobits par seconde)

IV.2.3 Scénario 1. Modèle de base « distance courte entre deux stations terrestres »

C'est le modèle de base où la qualité de service et la correction d'erreurs ne sont pas utilisées. Ce scénario présente le modèle que nous utiliserons comme référence dans nos simulations, bien sûr avec une distance courte pour ce cas, afin de voir la limite de la transmission.

Dans ce scénario, nous simulons le réseau sans *background traffic*, ni mobilité, ni réduction de la puissance c'est-à-dire que les deux stations du réseau sont fixes et la puissance utilisée est la même que celle utilisée dans le modèle de mobilité

La figure ci-dessous nous donne le premier scénario de base.

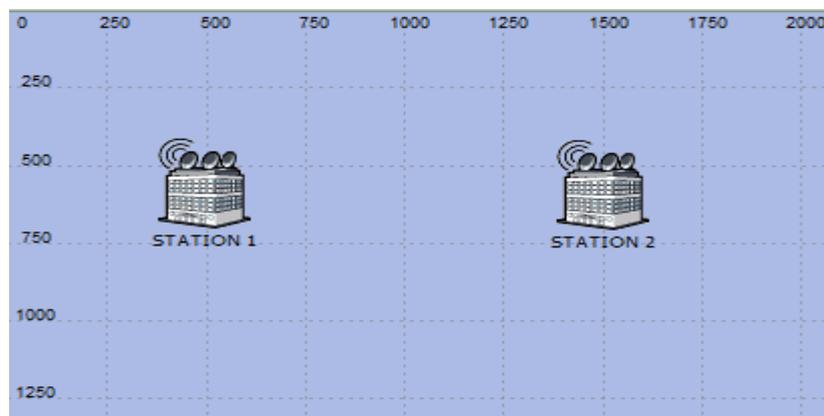


Figure IV-2 Stations proches

IV.2.3.1 Paramètres des deux stations

- Par défaut la **station 1** est nommée **primaire** et la **deuxième secondaire** **c'est-à-dire** c'est toujours **la station 1** qui prend la parole.
- Distance entre les deux stations : $1500 - 500 = 1000 \text{ m} = 1 \text{ km}$.
- Mode d'adressage : IPv4
- Row = 0 si la station est réceptrice
- Row =2 si la station est réceptrice et émettrice.
- Le protocole de routage utilisé : **OLSR** (Optimized Link State Routing Protocol). Notre choix s'est porté sur ce protocole parce qu'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 : Multipoint Relay) et permet de réduire le volume total d'informations échangées.

Attribute	Value
name	Station 1
AD-HOC Routing Parameters	
AD-HOC Routing Protocol	OLSR
AODV Parameters	Default
DSR Parameters	Default
GRP Parameters	Default
OLSR Parameters	(...)
Willingness	Willingness Default
Hello Interval (seconds)	2.0
TC Interval (seconds)	5.0
Neighbor Hold Time (seconds)	6.0
Topology Hold Time (seconds)	15.0
Duplicate Message Hold Time (seconds)	30.0
Addressing Mode	IPv4
TORA/IMEP Parameters	Default
DHCP	
Reports	
IP	
MANET Traffic Generation Parameters	(...)
Number of Rows	2
100.0	
Start Time (seconds)	100.0
Packet Inter-Arival Time (seconds)	exponential (1)
Packet Size (bits)	exponential (1024)
Destination IP Address	Random
Stop Time (seconds)	End of Simulation
100.0	...
Wireless LAN	

Figure IV-3 Paramètres des stations

IV.2.3.2 Simulations et résultats graphiques

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats des simulations faites pour tous les scénarios présentés.

IV.2.3.1.1 Mode simplex

La station 1 émet « Row=2 » et la station 2 reçoit « Row=0 »

Le mode de transmission est unidirectionnel « simplex » la station 1 émettrice et la station 2 réceptrice.

La figure ci-dessous nous montre les débits émis et reçus par les deux stations.

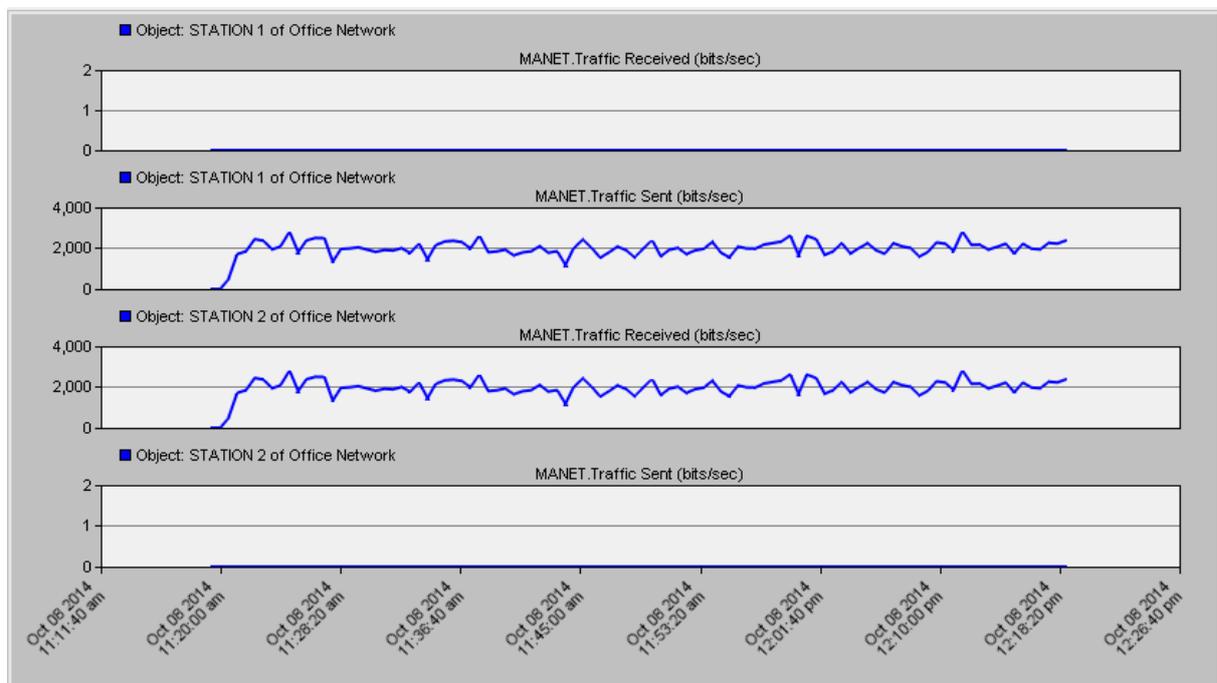


Figure IV-4 Graphe représentant le débit émis et reçu des deux stations

IV.2.3.1.2 Mode semi-duplex

Le mode de transmission est bidirectionnel c'est-à-dire duplex. Les deux stations peuvent émettre en même temps.

a) La station 1 émet « Row=2 » et la station 2 reçoit « Row=2 »

La figure ci-dessous nous montre le débit émis par la station 1 et le débit reçu par la station réceptrice.

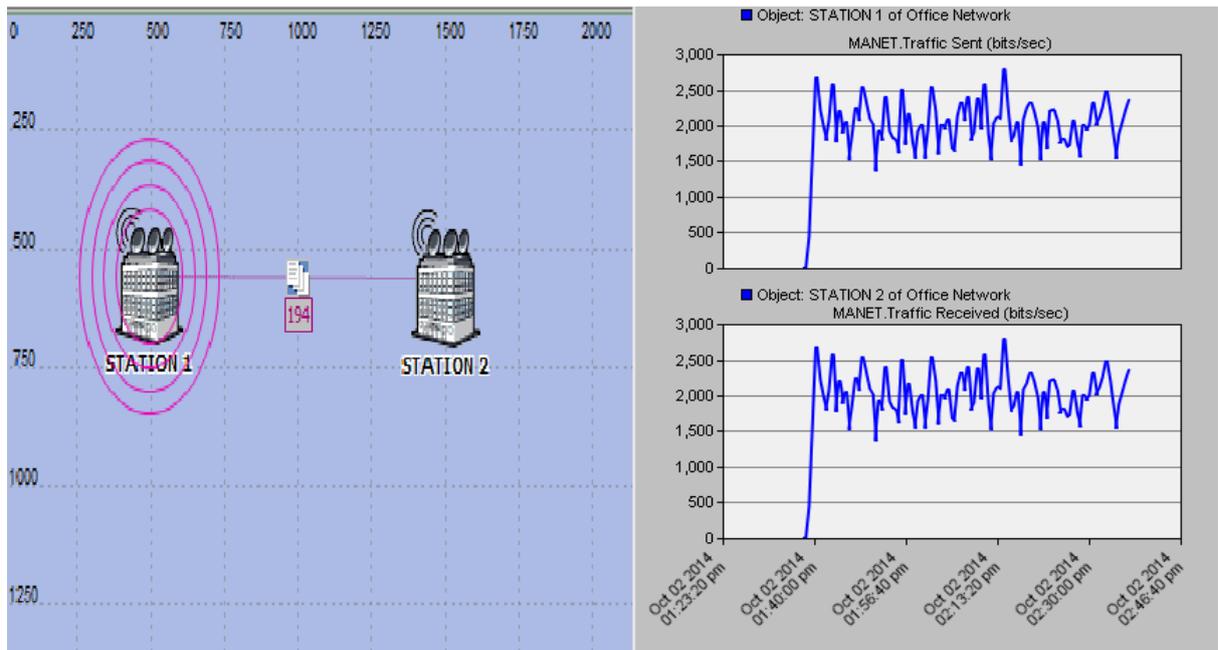


Figure IV-5 Station 1 émettrice

Le datagramme du scénario de base 1 :

La station 1 émet et l'autre reçoit mais la station 1 ne reçoit pas l'accusé de réception (ACK) tant que le message n'est pas reçu correctement. Le datagramme nous montre le délai.

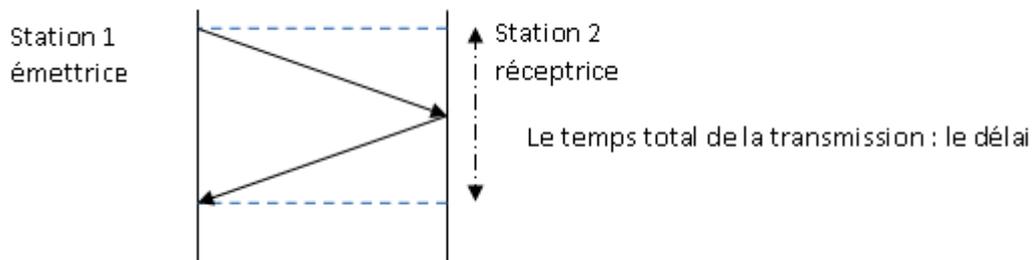


Figure IV-6 Datagramme du 1er scénario

Le temps de transmission $T_t = t_p + t_{ACK} + t_{messages}$

$T_p =$ temps de propagation $= 2x/v$

$T_{ack} =$ temps de l'accusé de réception

b) La station 2 émet « Row=2 » et la station 1 reçoit « Row=2 »

La figure ci-dessous nous montre le débit émis par la station 2 et le débit reçu par la station réceptrice.

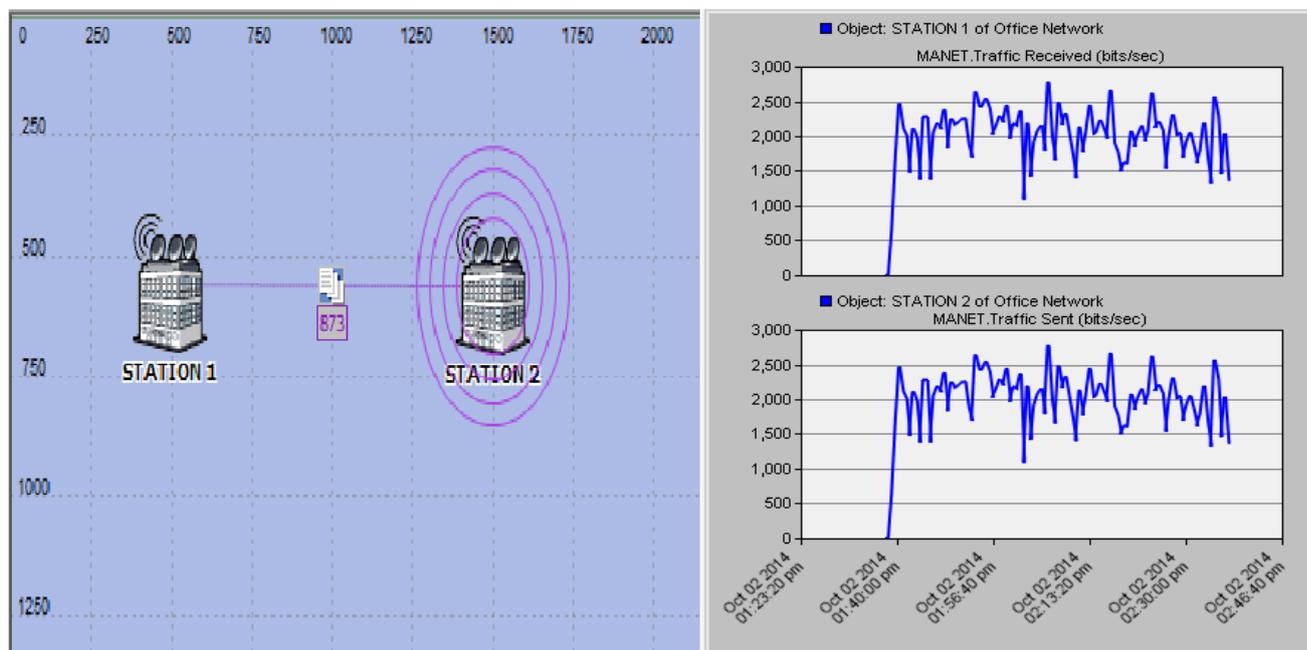


Figure IV-7 Station 2 émettrice

Le datagramme du scénario de base 2 :

La station 2 émet et l'autre reçoit mais la station 2 ne reçoit pas l'accusé de réception ACK tant que le message n'est pas reçu correctement. Le datagramme nous montre le délai.

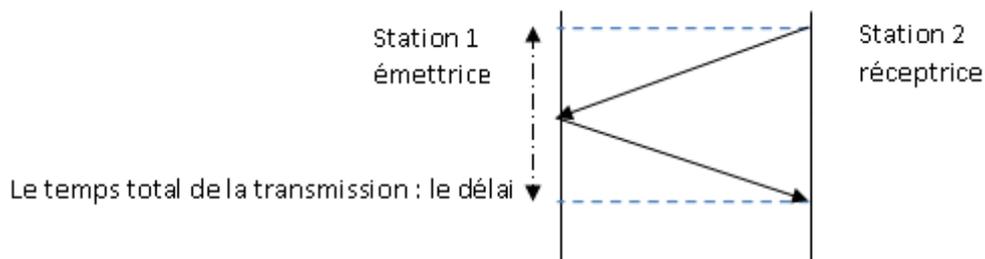


Figure IV-8 Datagramme du 2ème scénario

Le temps d'arrivé des paquets (Delay)

Pour voir l'influence de la taille du message sur le temps de transmission total, nous avons pris plusieurs cas selon la taille des paquets.

Les figures ci-dessous nous montrent respectivement les statistiques sur les délais tenues pour les différentes valeurs de taille de paquets. Pour cela nous avons fait varier la taille de ces paquets de 64 à 1024 bits. Comme indiqué sur les figures IV.9, IV.10, IV.11

Taille du paquet : 1024 bits

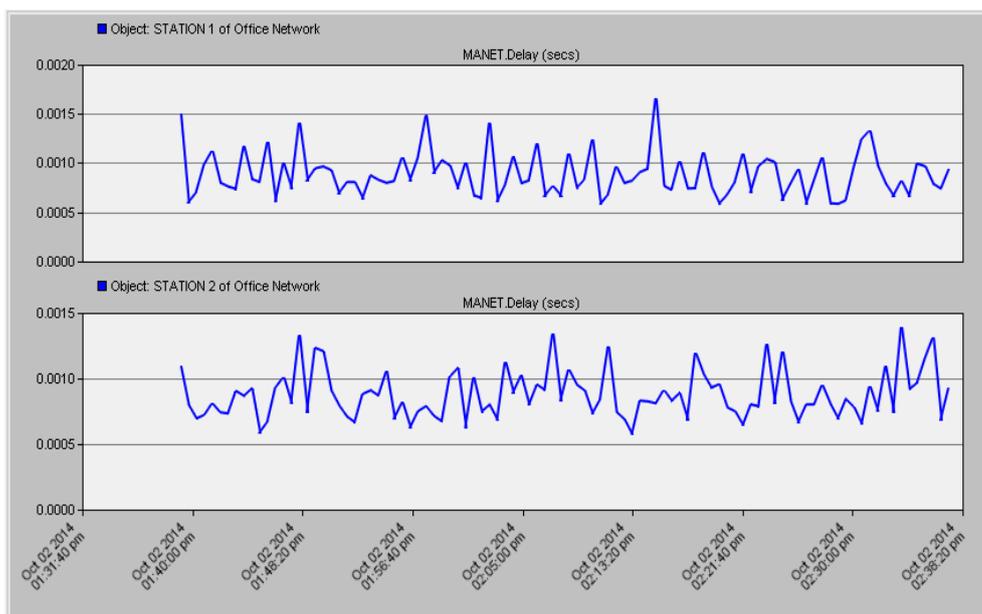


Figure IV-9 Graphe représentant les délais des deux stations

Taille du paquet : 256 bits

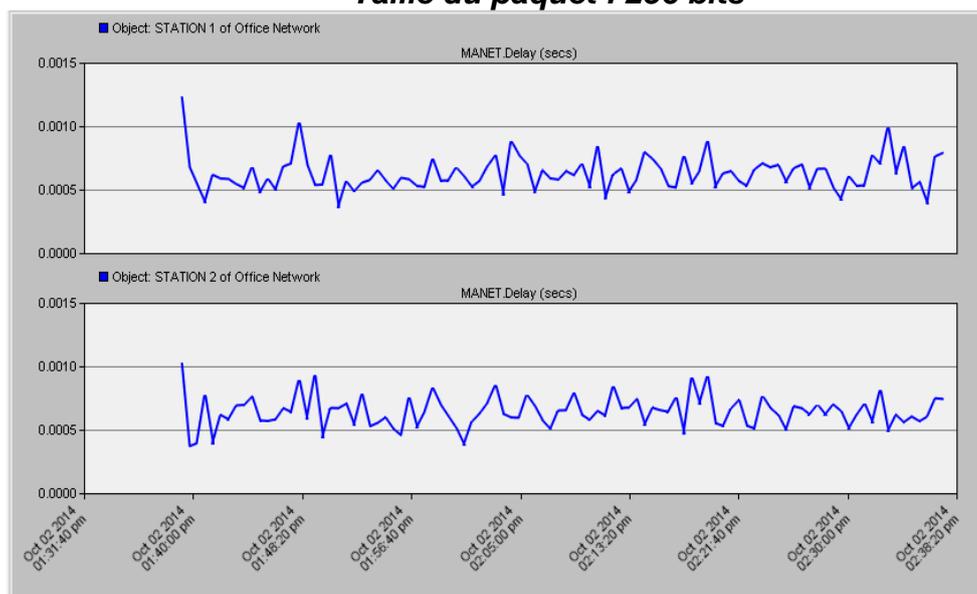


Figure IV-10 Graphe représentant les délais des deux stations

Taille du paquet : 64 bits



Figure IV-11 Graphe représentant les délais des deux stations

Le tableau ci-dessous nous donne les temps de transmission c'est-à-dire le temps qu'un message met pour arriver à la station réceptrice d'arrivée en fonction de la taille des paquets.

Tableau IV-1 l'influence de la taille du message sur le Temps d'arrivé(Delay)

	Taille du paquet (bits)	Durée de la transmission (Delay)
Le temps d'arrivée de l'information à la station 2	1024	$15 * 10^{-4}$
Le temps d'arrivée de l'information à la station 1		$11 * 10^{-4}$
Le temps d'arrivée de l'information à la station 2	256	$12.4 * 10^{-4}$
Le temps d'arrivée de l'information à la station 1		$10.4 * 10^{-4}$
Le temps d'arrivée de l'information à la station 2	64	$10.5 * 10^{-4}$
Le temps d'arrivée de l'information à la station 1		$8.8 * 10^{-4}$

$$T_{\text{Transmission (Delay)}} = L/D + l_{\text{ack}}/d + 2*x/v$$

- D = débit en bit/s
- L= taille du message en bits
- l= taille de l'accusé de réception
- x= distance entre les deux stations
- v= vitesse de transmission « $3 \cdot 10^8$ m/s, vitesse de la lumière dans le vide »

Les deux figures ci-dessous nous montrent le temps d'arrivé de l'information des deux stations en fonction de sa taille.

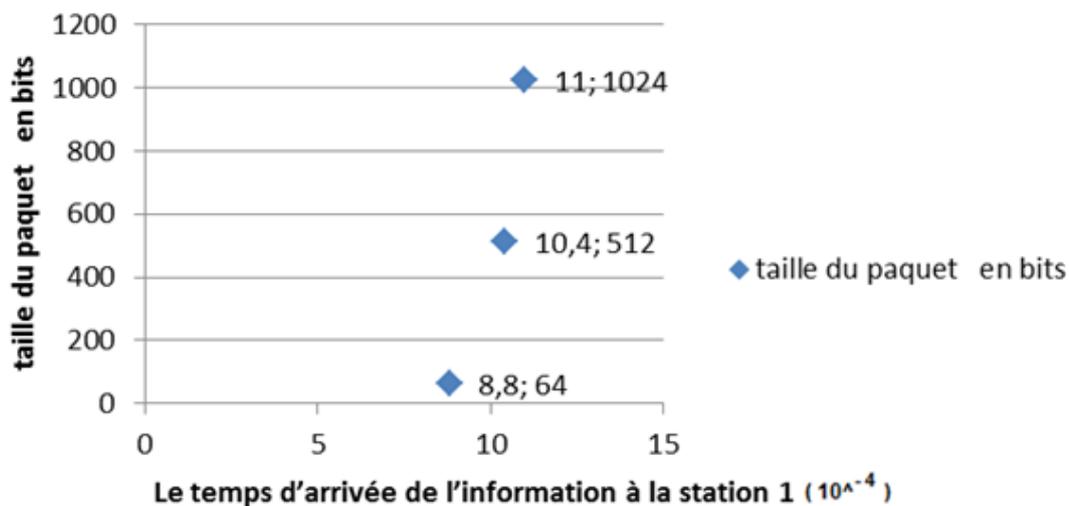


Figure IV-12 Taille du paquet en fonction du temps de transmission

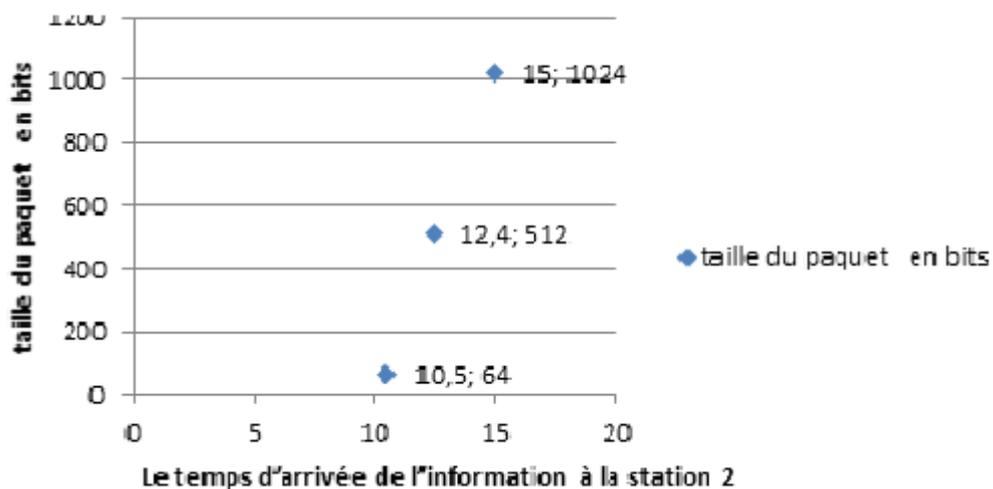


Figure IV-13 Taille du paquet en fonction du temps de transmission

Interprétation

- 1- En faisant la superposition du signal émis (station 1) et du signal reçu (station2) nous constatons que les deux signaux sont identiques, nous concluons donc que le signal est reçu correctement et sans perte, avec la même puissance.
- 2- Et en faisant varier la taille du message nous avons constatés que la taille du message est proportionnelle avec le temps de transmission.
- 3- Par contre le délai est inversement proportionnel avec le débit augmente.
- 4- et le temps de propagation est négligeable devant le temps total de transmission.
- 5- le temps de trainement T_{ACK} est négligeable devant le temps total du message « ou paquet ».
- 6- L'impact de la distance et la taille du message est très important lors d'une transmission. Ce qui permet de conclure que les trois modèles (Figures IV.9, IV.10 et IV.11) donnent des valeurs acceptables et stables en ce qui concerne la gigue.

IV.2.4 Scénario 2. « Distance lointaine entre les deux stations terrestres »

Le schéma ci-dessous nous montre que les deux stations terrestres sont trop lointaines $d = 2500 - 500 = 2000 \text{ m} = 2 \text{ km}$



Figure IV-14 stations lointaines

IV.2.4.1 Paramètres des deux stations

Nous gardons les mêmes paramètres que le scénario de base.

IV.2.4.2 Simulation et résultats graphiques

La transmission de l'information dans les deux sens

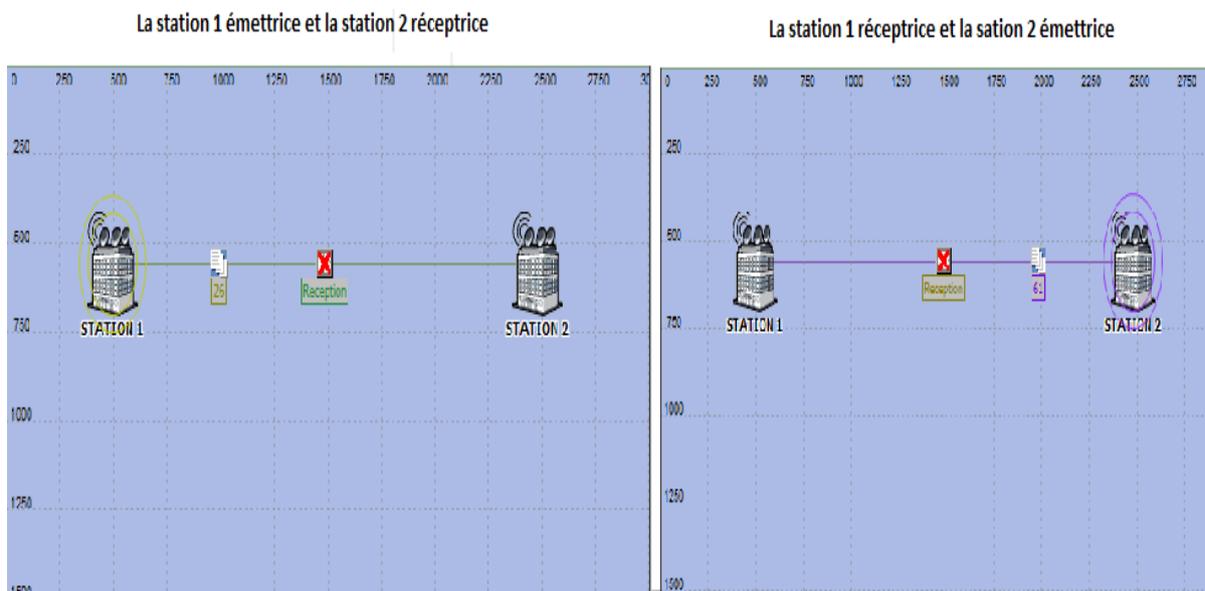


Figure IV-15 chaîne de transmission

La figure ci-dessous nous donne le débit émis et le débit reçu par les deux stations.

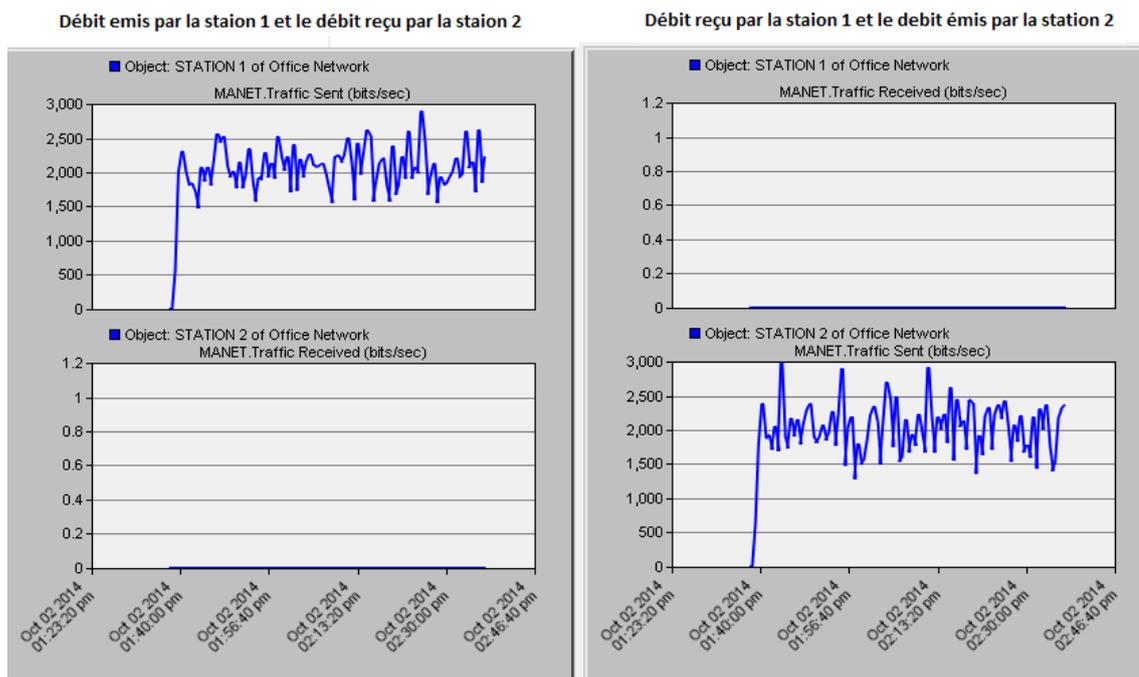


Figure IV-16 Graphe représentant le débit émis et reçu

Interprétation

Nous constatons que dans les deux cas il n'y a pas eu de transmission (perte des paquets) donc la distance est un critère très important lors d'une transmission.

- La forme aléatoire du graphe est due au signal émis.
- La présence de La croix rouge montre que la portée du signal est trop faible pour couvrir toute la zone.

IV.2.5 Scénario 3 : Modèle de la mobilité «Deux stations fixes et un avion comme relai »

Pour pallier le problème de transmission entre stations terrestres lointaines (zones océaniques ou désertiques) nous avons supposé plusieurs solutions :

- Ajouter Plusieurs stations terrestres, d'où augmentation du coût, maintenance, personnels, matériel ..., mais cette solution n'est pas toujours valable car dans certains endroits comme les zones océaniques et désertiques nous ne pouvons pas implémenter ce genre de stations.
- Utiliser les avions comme relais puisque l'infrastructure existe déjà.

Pour notre simulation nous avons opté pour la deuxième solution .Dans ce modèle, la destination et la source sont fixes et les relais sont mis en mouvement suivant le protocole de routage OLSR afin de créer des situations où il y a une bonne transmission.

Nous avons gardés la même distance entre les deux stations que le scenario précédent où il n'y avait pas de transmission.

Nous avons aussi laissé les mêmes paramètres sur les relais (avion) sauf qu'il n'est pas fixe mais plutôt mobile d'où l'ajout d'une trajectoire avec une vitesse de 100 km/h.

La figure 4.14 nous donne le schéma d'une chaîne de transmission constituée de deux stations fixes et un avion comme relai. « Ou nœud »avec une trajectoire qui s'éloigne de la station 2

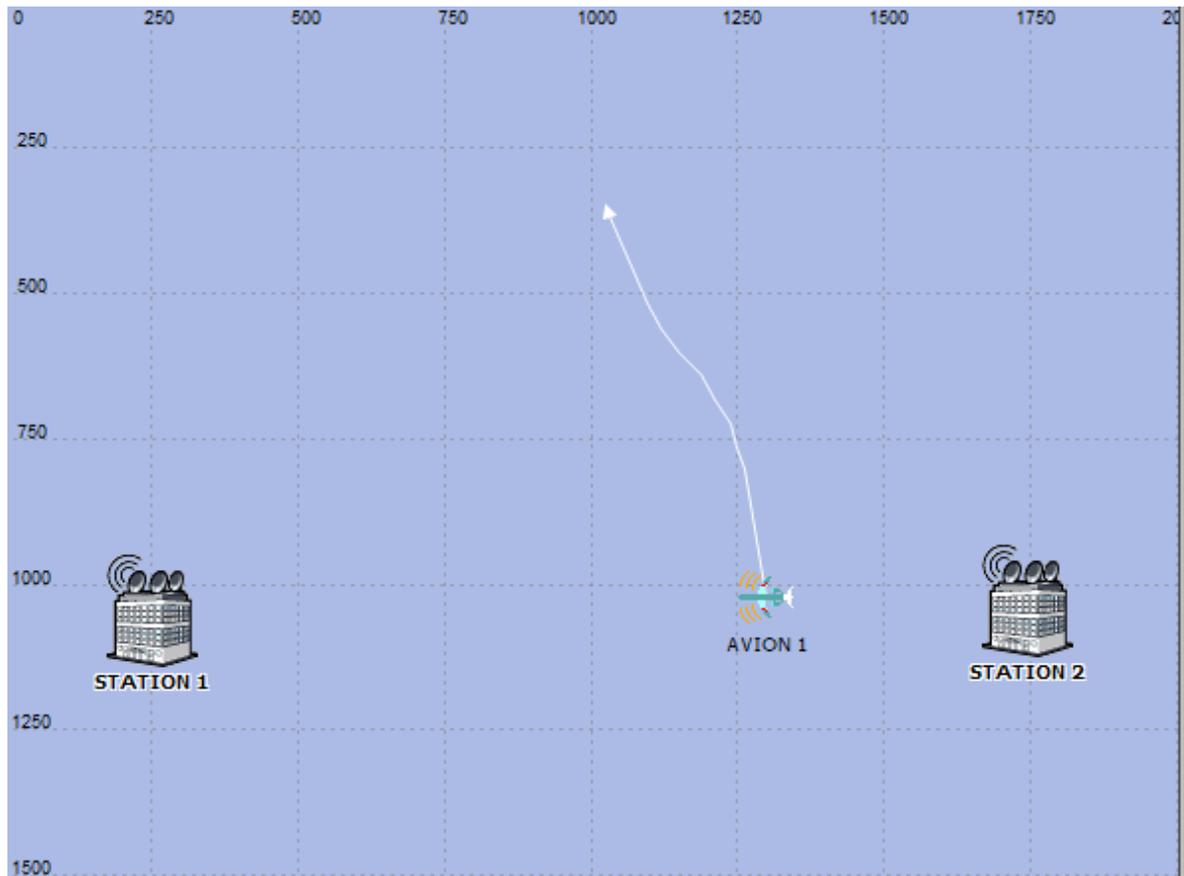


Figure IV-17 Modèle de la mobilité

IV.2.5.1 Simulations et résultats graphiques

Dans cette partie, nous étudions le scénario général avec différentes charges de trafic, et son protocole. Nous étudions également l'impact de la mobilité sur le mécanisme de la transmission du message.

a) Station 1 émettrice

- La liaison directe entre les deux stations fixes sans passer par le relai.
- La liaison indirecte entre les deux stations fixes en utilisant l'avion comme intermédiaire.
- ❖ La liaison directe entre les deux stations fixes :
 - Station 1 envoi / station 2 ne reçoit pas
- ❖ La liaison indirecte entre les deux stations fixes
 - La Station 1 envoi / avion 1 reçoit
 - Avion 1 envoi / station 2 reçoit

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception

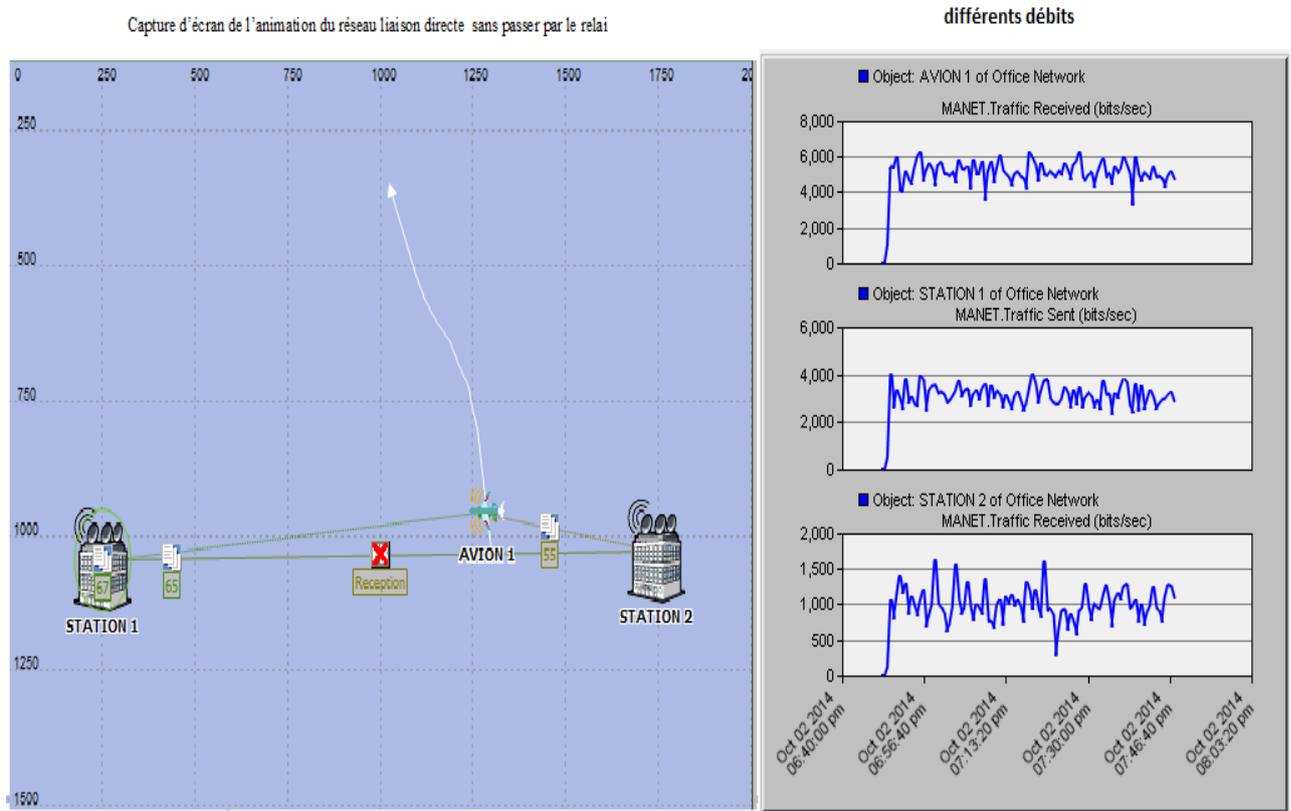


Figure IV-18 Modèle de la mobilité liaison directe

b) Station 2 émettrice

Nous avons refait la même simulation que la simulation précédente sauf que maintenant c'est la station 2 qui émet.

- La liaison directe entre les deux stations fixes :
 - Station 2 envoi / station 1 ne reçoit pas
- La liaison indirecte entre les deux stations fixes
 - La Station 2 envoi / avion 1 reçoit
 - Avion 1 envoi / station 1 reçoit

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception

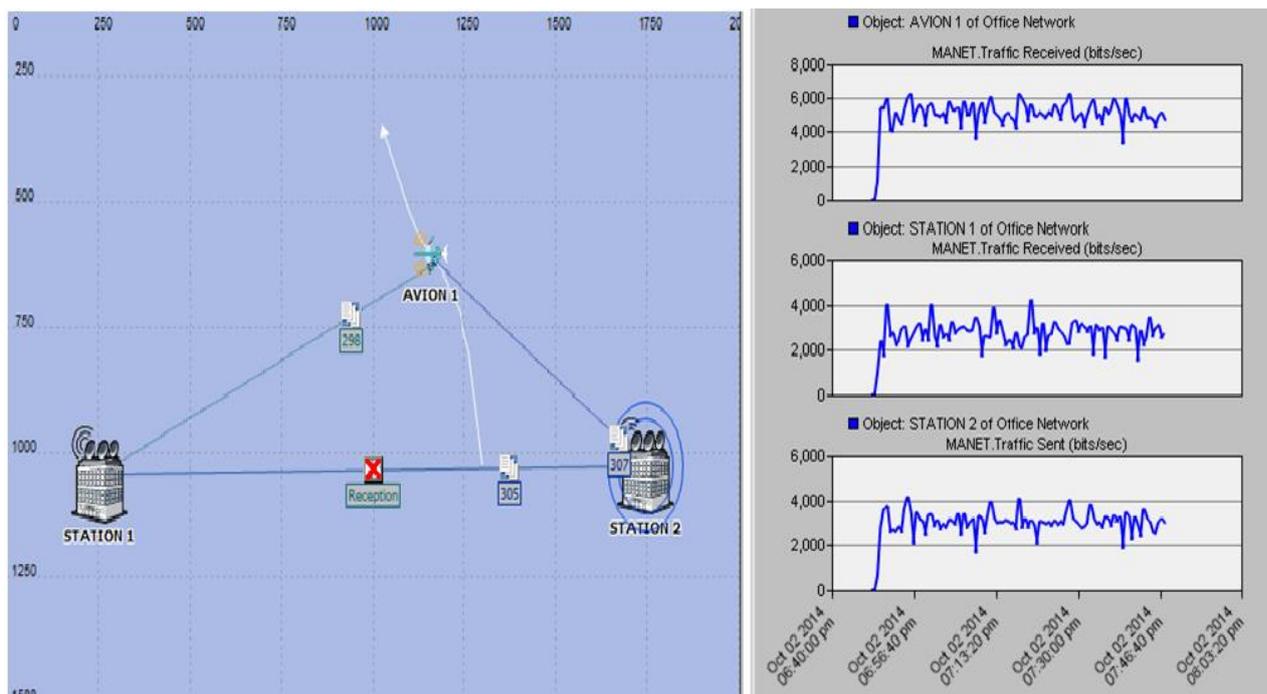


Figure IV-19 Modèle de la mobilité : station 2 émettrice

c) l'avion émetteur

Nous avons refait la même simulation que la simulation précédente sauf que maintenant c'est l'avion qui diffuse l'information vers la station 1 et la station 2.

- La liaison directe entre les deux stations fixes :
 - Aucune réception entre stations
- La liaison indirecte entre les deux stations fixes
 - Avion 1 envoi / station 1 reçoit
 - Avion 1 envoi / station 2 reçoit

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception.

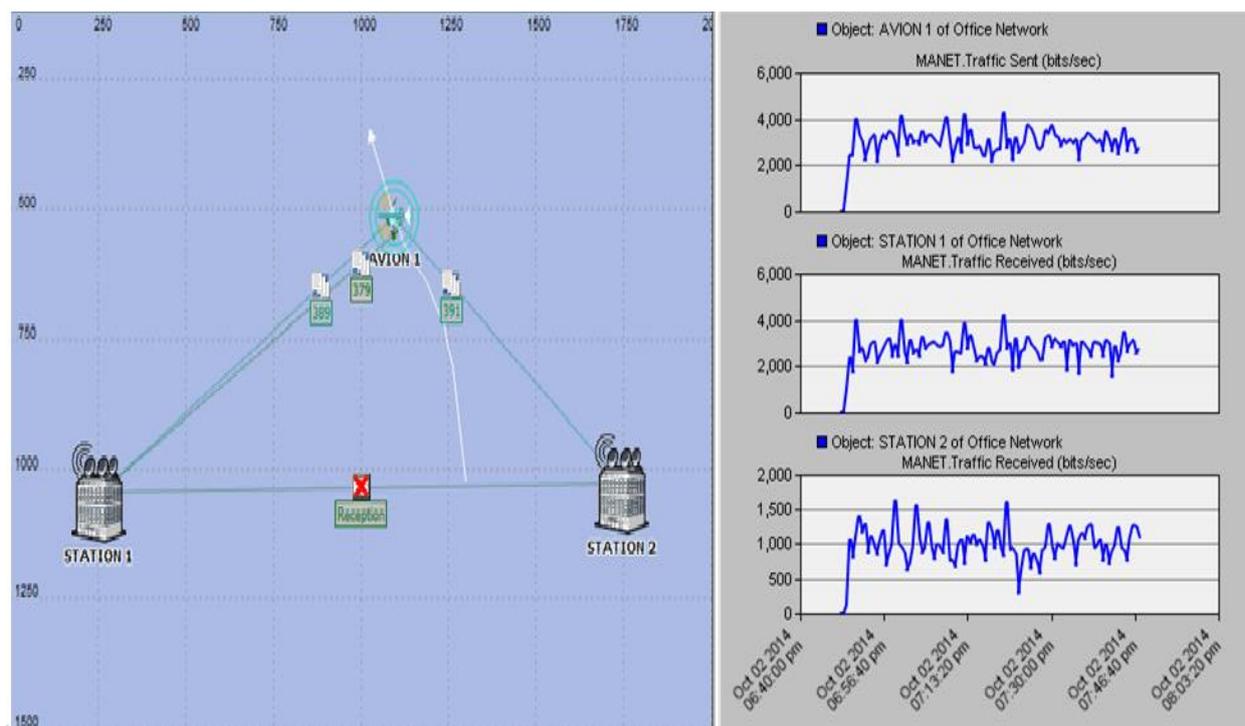


Figure IV-20 Modèle de la mobilité : avion émetteur

Le temps d'arrivé des paquets (Delay)

La figure ci-dessous nous montre un aperçu sur les différents temps d'arrivé des paquets (Delay) du modèle de mobilité.

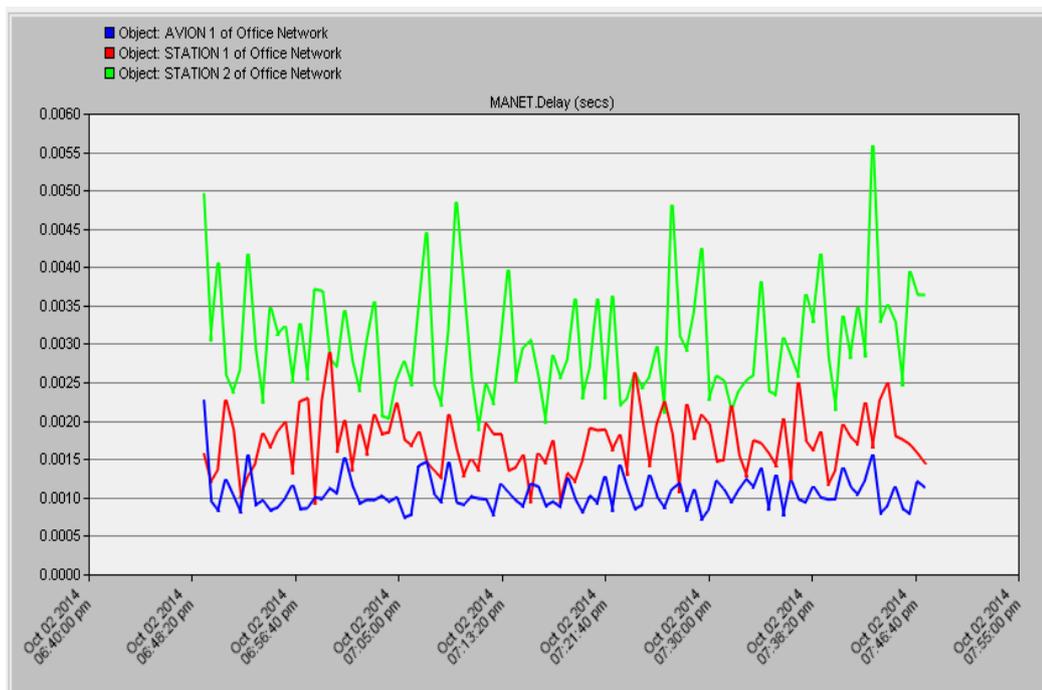


Figure IV-21 Graphe représentant les délais

Interprétation

Ce scénario n'est autre que la fusion entre le scénario 1 et le scénario 2.

La variation du débit en fonction du temps est dû au protocole de routage c'est-à-dire indirectement de la distance où se trouve l'avion.

- Le délai est inversement proportionnel avec le débit augmente.
- le temps de propagation est négligeable devant le temps total de transmission.
- le temps de traitement TACK est négligeable devant le temps total du message « ou paquet ».
- le nœud transmis avec un débit de moyen 4000 bits/s et la station 1 reçoit un débit moyen de 4000 bits/s par contre la station 2 reçoit environ 1500 bits/s.

IV.2.6 Scénario 4.1 : Modèle de la mobilité « Rapprochement de l'avion par rapport aux stations »

a) Avion 1 se rapproche de la station 1

Dans cette figure nous avons étudié le cas où l'avion se rapproche plus de la station 1 par rapport à la station 2, sans être hors de portée.

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception du modèle de la mobilité

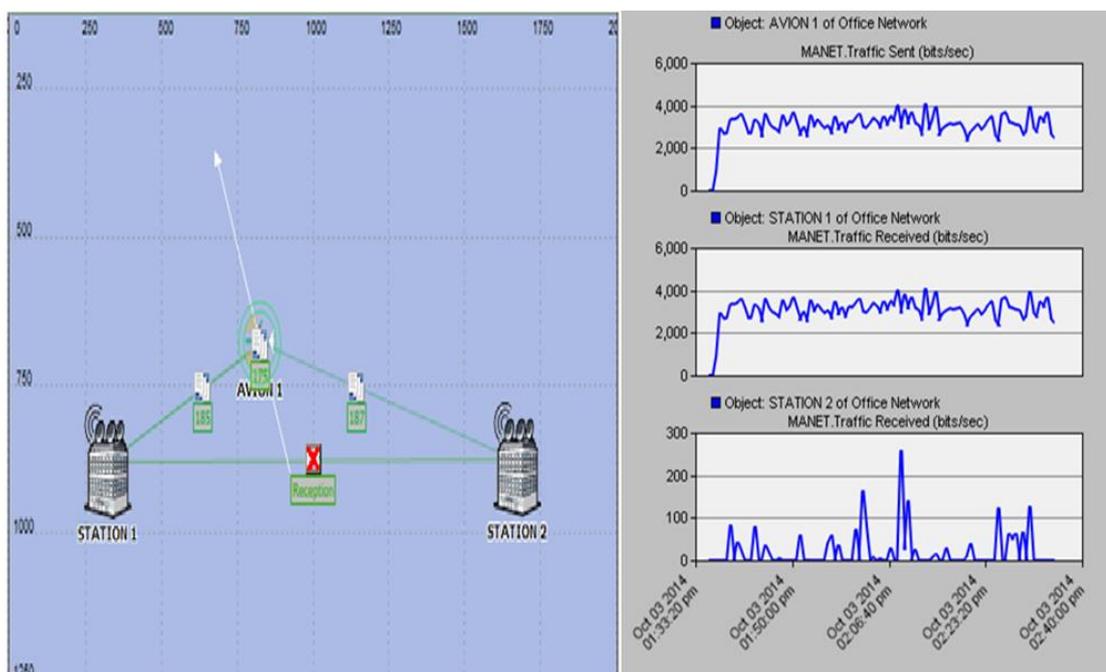


Figure IV-22 Exemple de trafic généré par un avion

Interprétation

On remarque dans ces graphes que :

- Le débit envoyé par l'avion est symétrique au débit reçu par la station 1, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de pertes et cela parce que l'avion se rapproche de la station 1.
- La station 2 reçoit 260 bits/s de la part de la station 1 par l'intermédiaire de l'avion 1. (Ce qui est très peu comparé à la station 1)
- La station 2 reçoit peu (260 bits/s) parce que l'avion 1 s'approche de la station 1

b) Avion 1 se rapproche de la station 2

Dans cette figure nous avons étudié le cas où l'avion se rapproche plus de la station 2 par rapport à la station 1, sans être hors de portée.

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception du modèle de la mobilité.

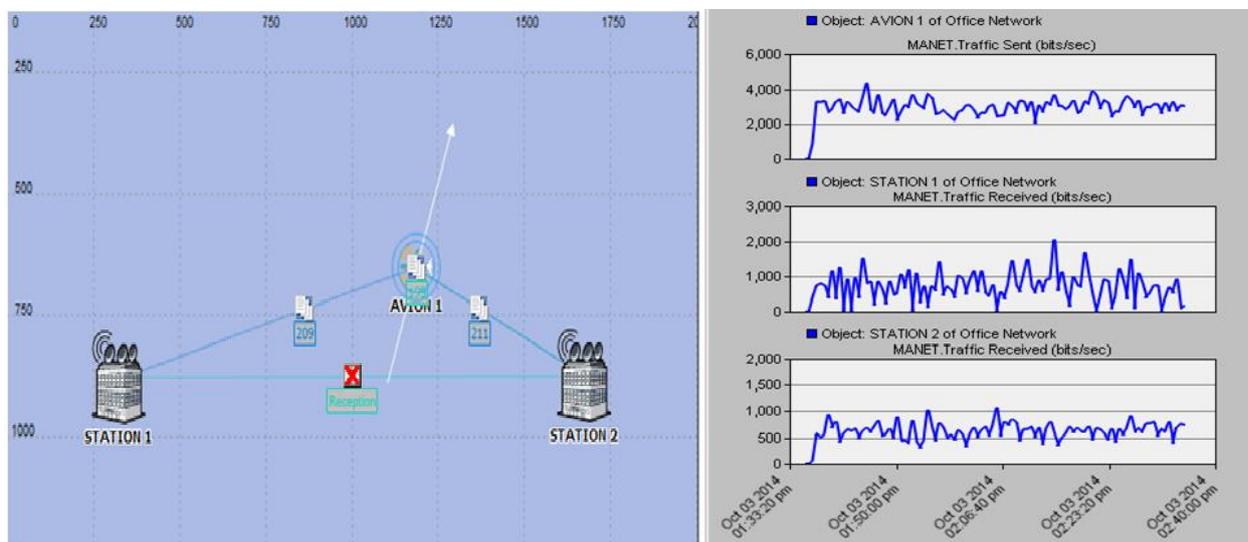


Figure IV-23 Exemple de trafic généré par un avion

Interprétation

On remarque que :

- La station 1 reçoit un débit de 2.2 kbits/s qui est inférieur au débit trouvé à la simulation précédente de 4,2 bits/s et la station 2 reçoit un débit supérieur que la simulation précédente

- Et cet écart est dû à la trajectoire que l'avion prend « le routage » donc nous pouvons conclure que le débit entrant de la station réceptrice augmente avec le rapprochement du relai.

IV.2.7 Scénario 4.2 : Modèle de la mobilité « L'avion est hors de portée d'une seule station

- a) L'avion se rapproche de la station1 et il est hors de portée de la station 2

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception du modèle de la mobilité.

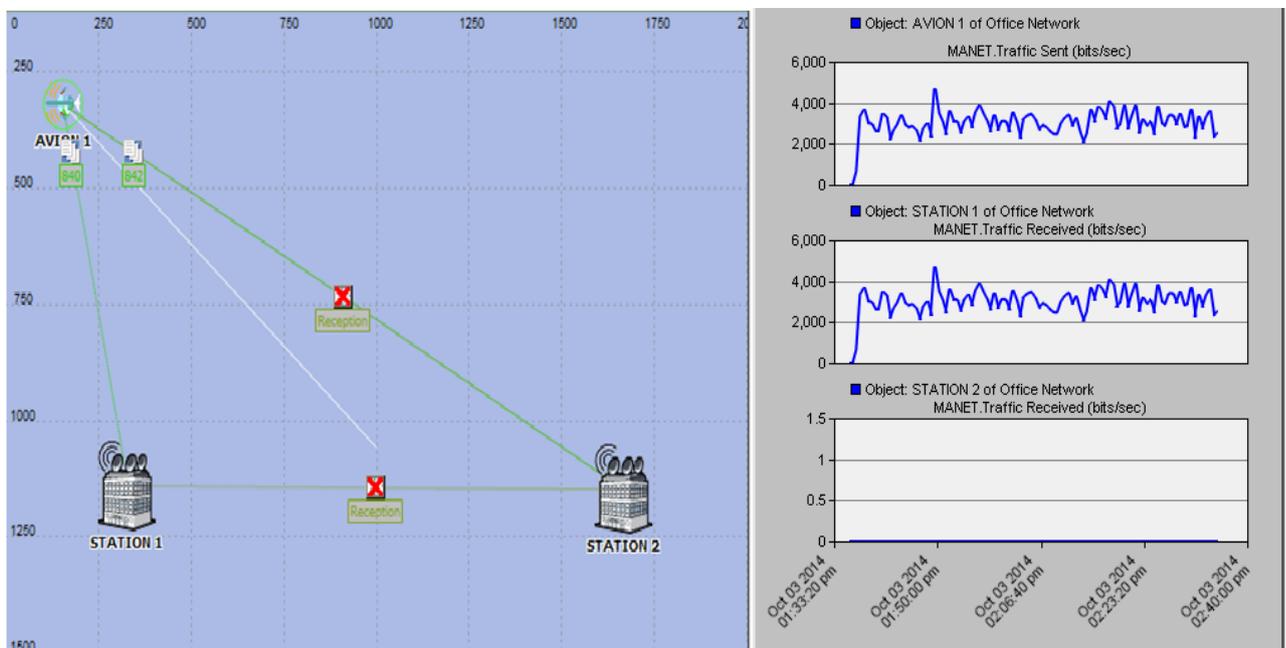


Figure IV-24 Exemple de trafic généré par un avion

Interprétation

- Le débit envoyé par l'avion est symétrique au débit reçu par la station 1, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de pertes entre l'avion et la station1
- Dans la simulation du scénario précédent la station 2 reçoit de la part de la station 1 par l'intermédiaire de l'avion mais dans cette simulation on remarque que la station ne reçoit pas, parce que l'avion est hors de portée de la station2.

b) L'avion se rapproche de la station 2 et il est hors de portée de la station1

La figure ci-dessous nous montre les graphes des différents débits de l'émission et de la réception du modèle de la mobilité.

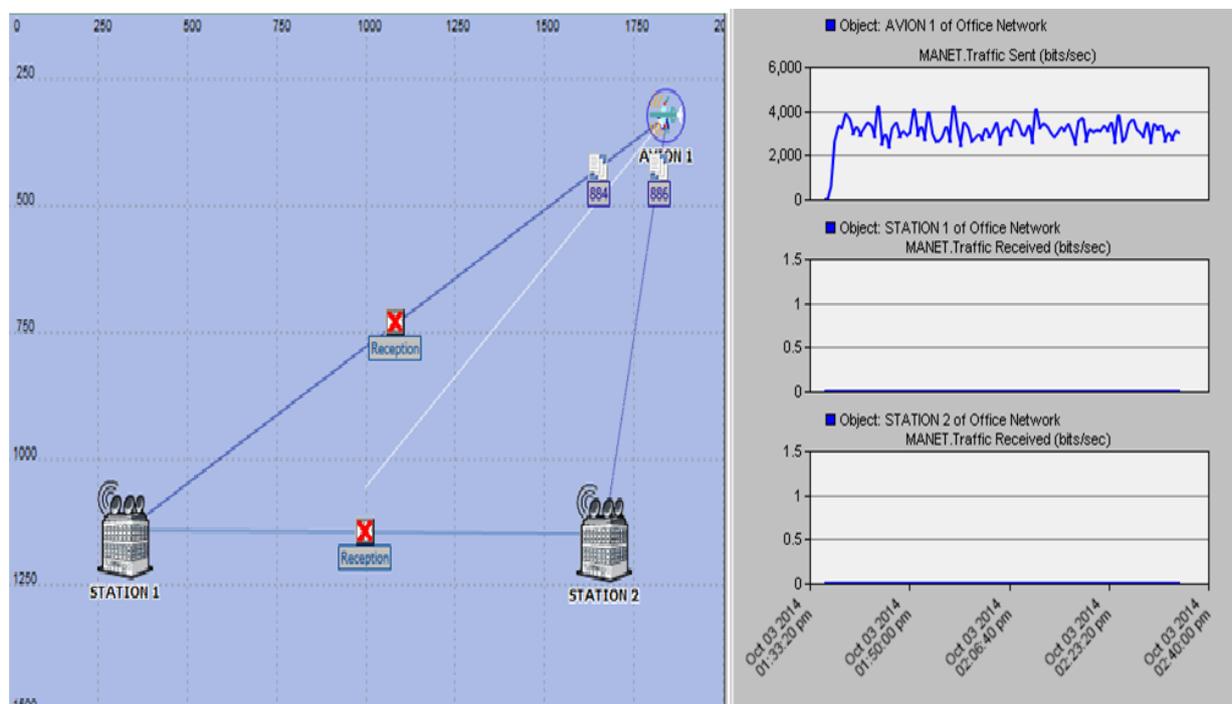


Figure IV-25 Exemple de trafic généré par un avion

- La station 1 ne reçoit pas parce que l'avion est au-delà de la portée minimale (station1 ' primaire ' reçoit de la part du relais 'avion')
- Station 2 ne reçoit pas parce que station 1 est au-delà de la portée minimale, (station 2 "secondaire' reçoit de la station 1 'primaire')

Interprétation

Dans ce scénario, nous avons montré l'avantage et l'inconvénient du protocole de routage sur la transmission et la réception du message.

Ainsi, nous avons montré qu'un seul relais (avion) n'est pas suffisant pour pallier le problème de distance entre les stations surtout dans de grandes distances, tel que les zones océanique.

Nous avons proposé un nouveau modèle de scénario en ajoutant plusieurs relais mobiles pour pallier le problème de distance entre les deux stations lointaines. Nous avons clairement pris en compte l'impact du différent chemin que le relai prend et la distance entre les deux stations et le nœud (relai).

Donc, nous avons constatés que l'utilisation d'un seul nœud (relai) est insuffisant ; la meilleure observation est obtenue lorsque le nombre de nœuds (relais) est augmenté d'où la portée entre les stations fixes augmente.

IV.2.8 Scénario 5 : Modèle de la mobilité« plusieurs relais entre les stations »

Nous avons proposé un nouveau modèle de scénario en ajoutant plusieurs relais mobiles pour pallier le problème de distance entre les deux stations lointaines. Nous avons clairement pris en compte l'impact du différent chemin que le relai prend et la distance entre les deux stations et le nœud (relai).

On obtient 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.

Pour ce scénario nous avons pris :

- Deux stations fixes terrestres lointaines ($d= 3.5$ km)
- 10 avions et chaque avion à sa propre trajectoire
- Vitesse de croisière 100 km/h

Nous considérons ici les avions volant en espace océanique avec une portée maximale des connexions.

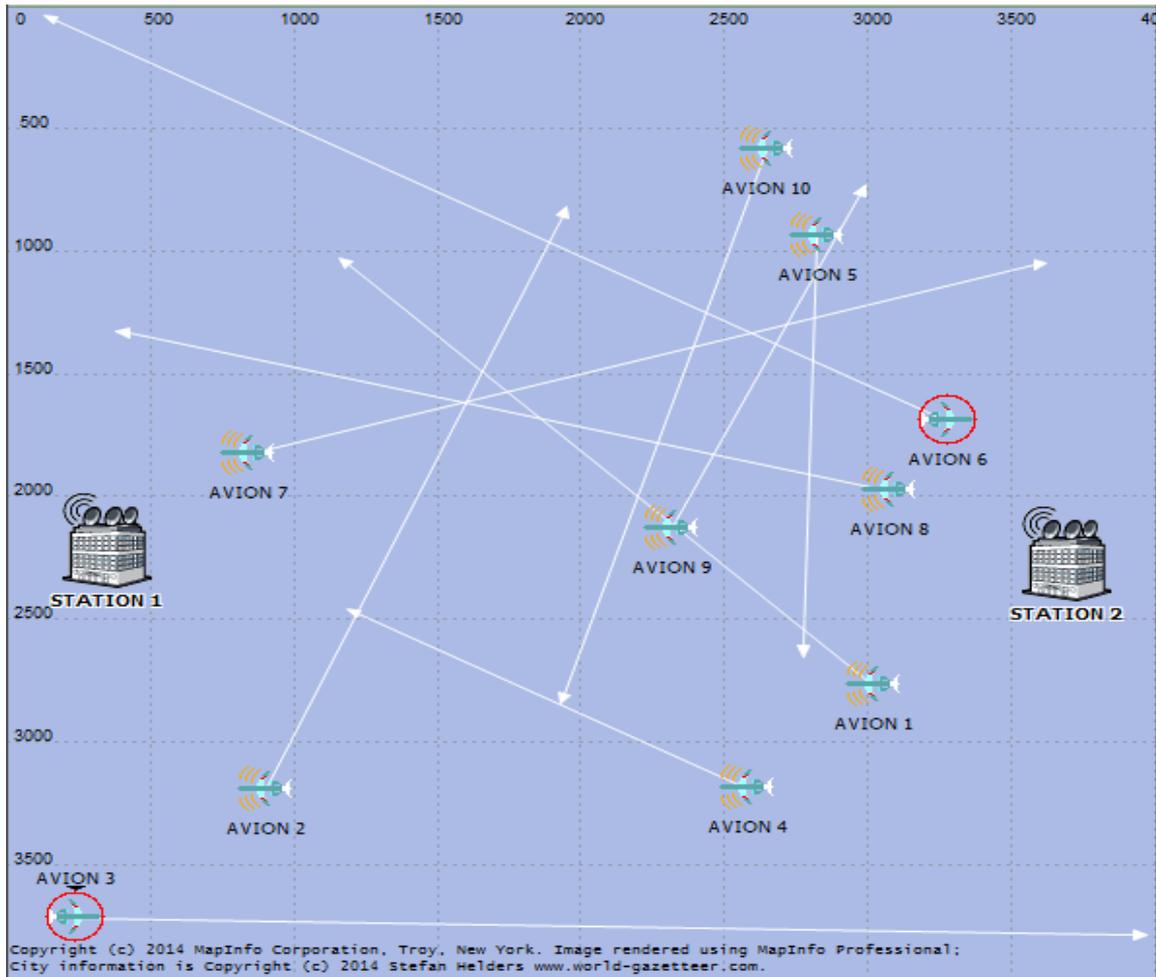
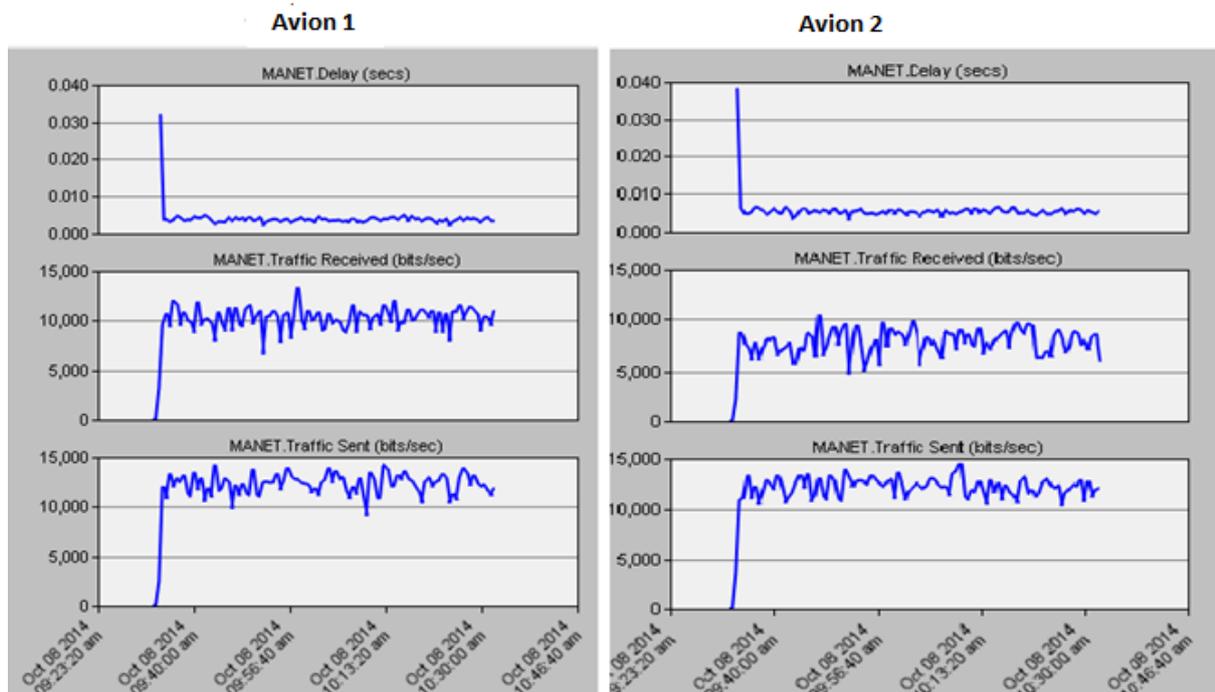
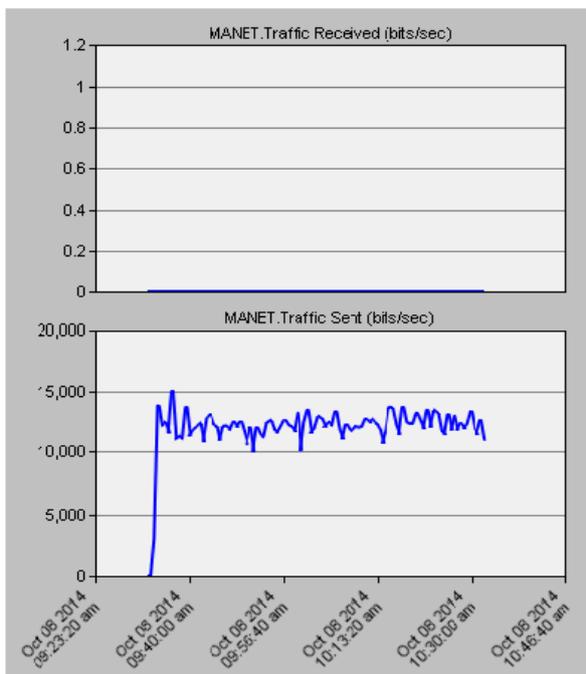


Figure IV-26 Conception d'un réseau ad hoc aéronautique

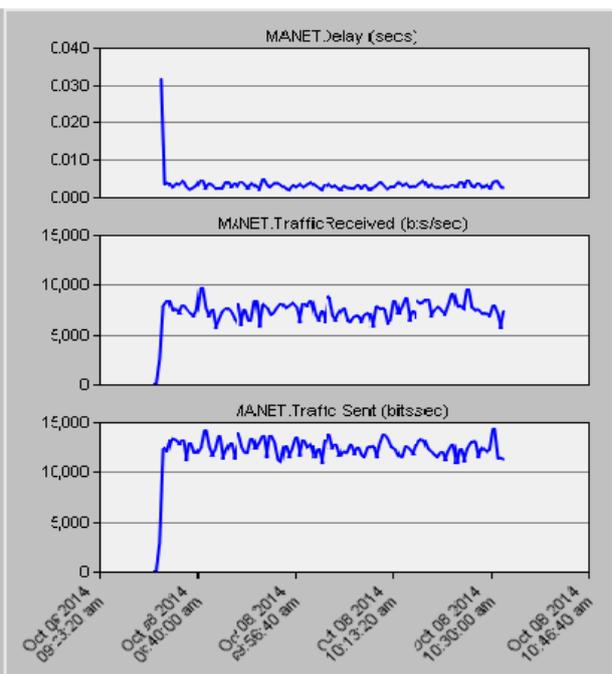
La figure ci-dessous illustre les graphes des différents délais et débits de l'émission et de la réception du modèle de la mobilité des dix avions.



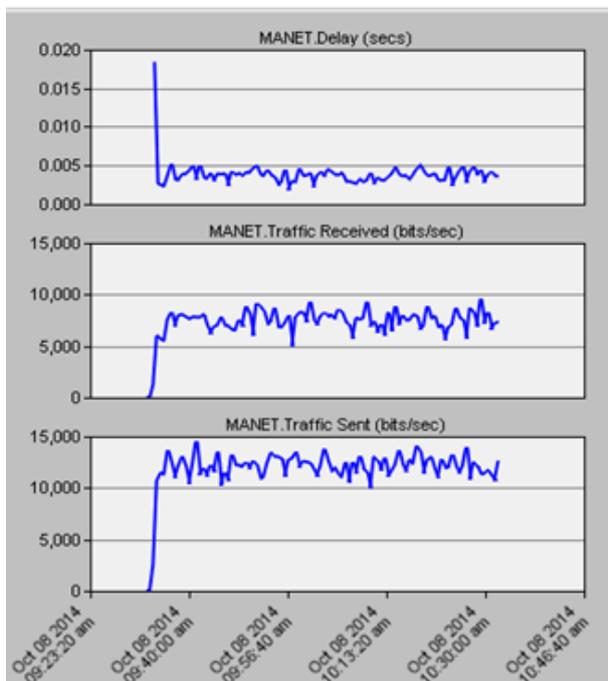
Avion 3



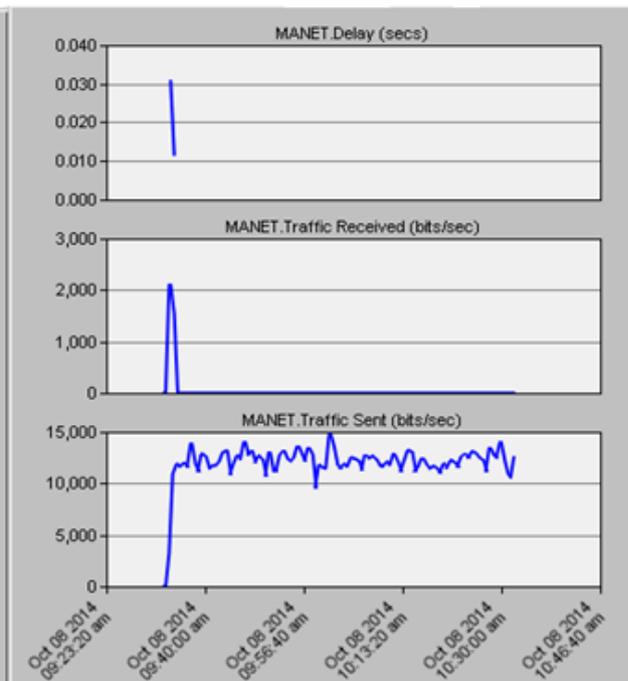
Avion 4



Avion 5



Avion 6



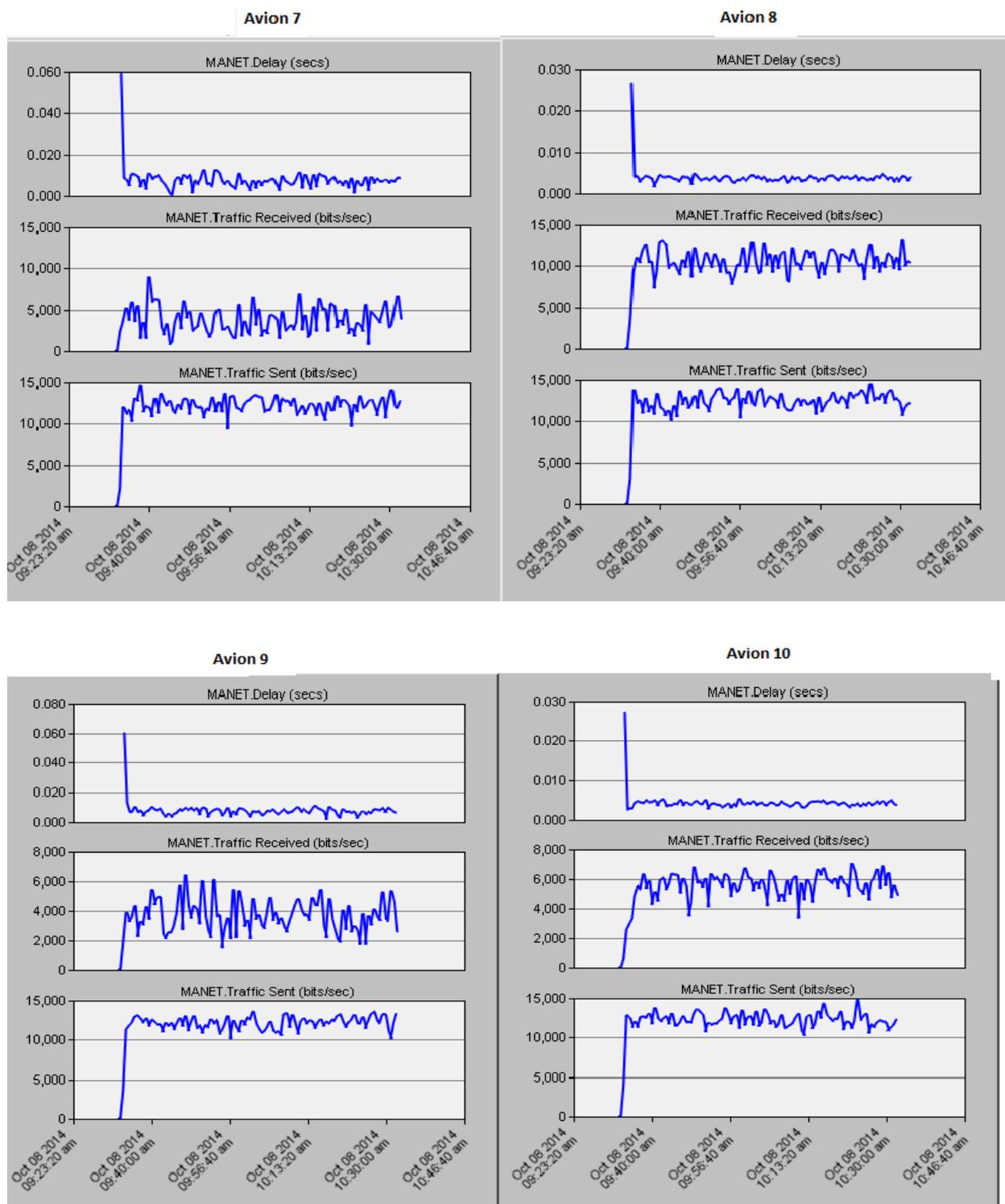


Figure IV-27 Exemple de trafic généré par les avions

La figure IV-28 montre l'évolution du débit émis et reçu pour les dix avions les plus chargées entre 9h23 et 10h46. La station la plus chargée est ainsi capable de recevoir un débit cumulé d'environ 13 kbps en moyenne.

Nous concluons que plus l'avion est proche d'une station terrestre, plus l'information est reçue correctement, par contre s'il s'éloigne de la station fixe, l'information reçue est trop faible.

Les figures ci-dessous nous montrent les différents graphes du temps de transmission (Delay) des relais (avions 6 et 10).

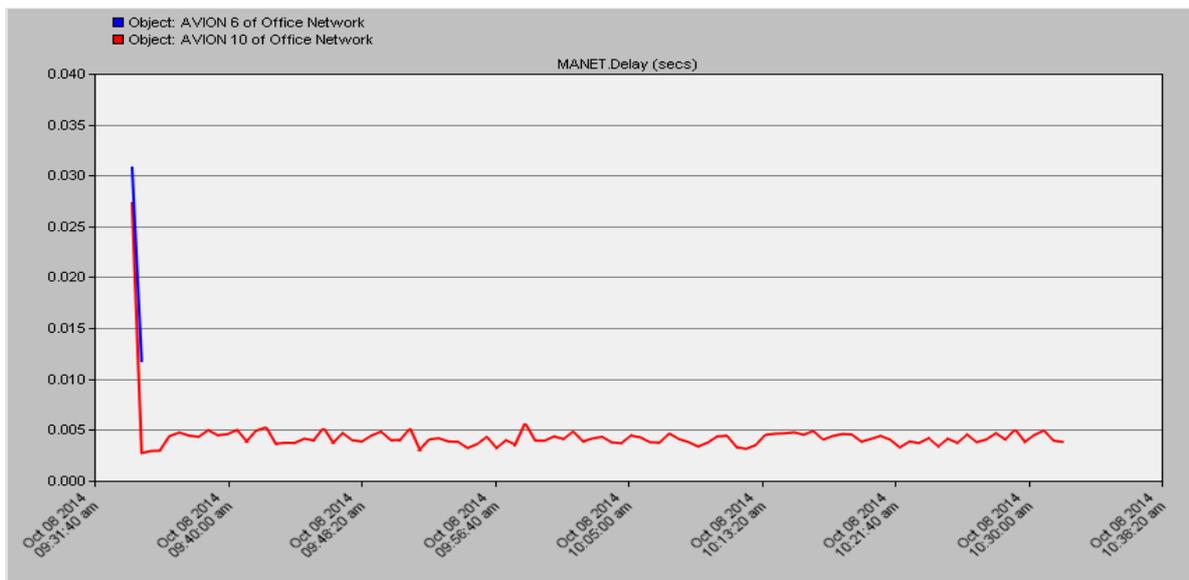


Figure IV-29 Graphe représentant les délais des relais (avions 6 et 10)

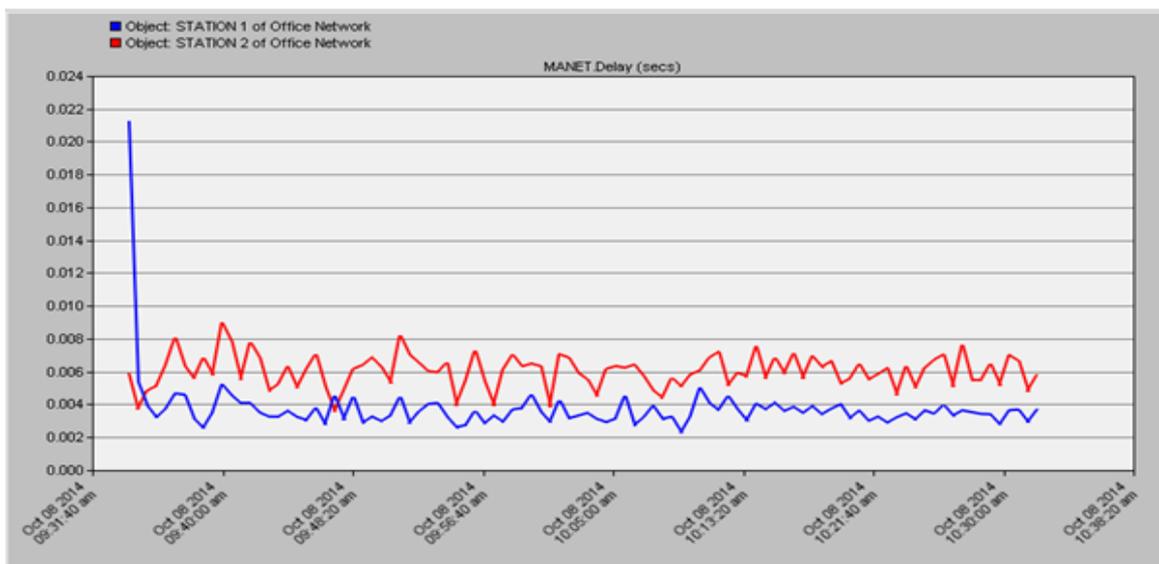


Tableau IV-2 récapitulatif des différents résultats

Relai	Délai (s)	Information entrante (kbits/s)	Information sortante (kbits/s)	Connexion
Avion1	0.03	11 - 13	14	Bonne Connexion
Avion 2	0.04	8 - 9	14	Moyenne Connexion
Avion 3	/	0	14	Déconnexion
Avion 4	0.04	9	14	Moyenne Connexion
Avion 5	0.02	8 - 9	14	Moyenne Connexion
Avion 6	0.03	2 - 0	14	Déconnexion
Avion 7	0.06	5 - 5.5	14	Connexion faible
Avion 8	0.03	13 - 14	14	Bonne connexion
Avion 9	0.06	4 - 6	14	Connexion faible
Avion 10	0.03	6 - 7	14	Connexion moyenne

La figure IV.31 nous montre le débit émis et reçu des deux stations

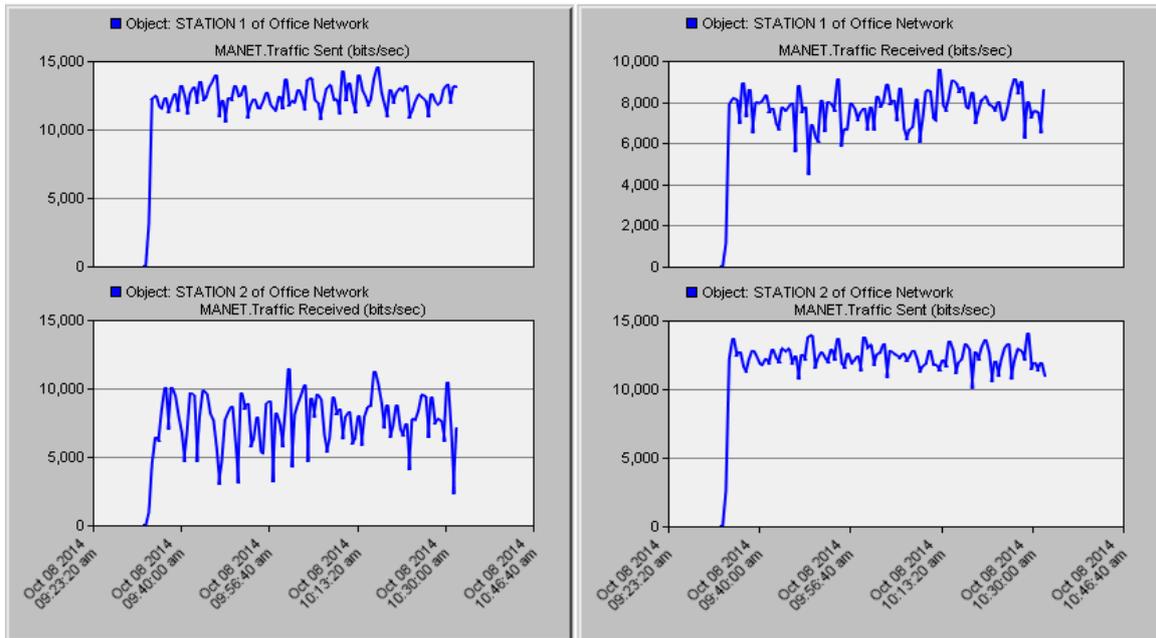


Figure IV-31 Graphe représentant les débits émis et reçu des deux stations

Interprétation

La figure IV.31 nous montre que les deux stations ont bien reçu l'information bien qu'ils soient éloignés c'est-à-dire, hors de portée l'une de l'autre. Nous concluons que Les avions ont effectivement bien accomplie le rôle de relais entre ses deux stations.

Conclusion

Nous avons montré que le débit utile moyen par avion est maximal lorsque la portée des connexions est minimale.

Dans ce chapitre nous avons montré l'avantage et l'inconvénient du protocole de routage sur la transmission et la réception du message, aussi nous avons montré qu'un seul relais n'est pas suffisant pour pallier le problème de distance entre les stations, surtout dans de grandes distances. La solution proposée était d'ajouter plusieurs relais mobiles, ce n'est rien d'autre qu'une réalisation d'un réseau AD HOC en considérant les avions comme relais mobiles. Et plus le trafic aérien est dense, plus nous pourrons augmenter la distance entre stations fixes.

Nous avons aussi étudié l'impact de la distance, taille du paquet et du protocole de routage sur la transmission de données.

CONCLUSION

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.

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 avons étudié 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.

Ensuite, nous avons proposé une architecture permettant d'étudier les performances d'un réseau ad hoc aéronautique dans différents contextes et différents scénarios. Nous nous sommes concentré 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 partant réduire le coût du système. Nous avons ensuite proposé l'utilisation d'un accès multiple par étalement de spectre à séquence directe. 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.

La détermination du chemin suivi par les paquets de données est un point clef dans la conception d'un réseau ad-hoc. Nous avons supposé que chaque avion est connecté à la station la plus proche par le chemin le plus court. 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 et taille des paquets.

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.

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, désertique ou océanique.

PERSPECTIVE

Nous pensons que, pour notre travail surtout en vue des simulations il faudrait, en plus de tout ce dont nous avons fait jusqu'ici :

Faire la simulation avec les différents protocoles tels que « AODV, DSR, TORA, GRP. » pour voir l'impact du routage sur la transmission de données.

Utiliser la première méthode « En programmant soi-même les composants suivant l'ordre hiérarchique », cette méthode nous permet de faire une programmation et une description des éléments transparente pour les utilisateurs, donc utiliser les données réelles tels que : la connexion entre passagers, contrôle aérien, connexion entre avion et les paramètres réels de la position des avions et cela on connaissant la plan de vol de chaque avion et cela nous permet d'optimiser le protocole de routage.

Crypter les données lors d'une transmission entre avion ou passagers pour plus de sécurité qui est critère très important actuellement

Ajouter une redondance qui va jouer le rôle de la boîte noire en vol ; bien sûr ces données-là seront chiffrées et enregistré et elles pourront être exploité par les compagnies aériennes,

-

ANNEXES

ANNEXE A

EXEMPLE DE MÉTHODES D'ACCÈS AU CANAL UTILISÉES DANS LES MANET

A.1 MÉTHODES AVEC CANAL UNIQUE

A.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 d'Hawaii ABRAMSON 1970 [68]. 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

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 [69]. La figure A.1 permet de comparer les performances de l'ALOHA et du Slotted ALOHA.

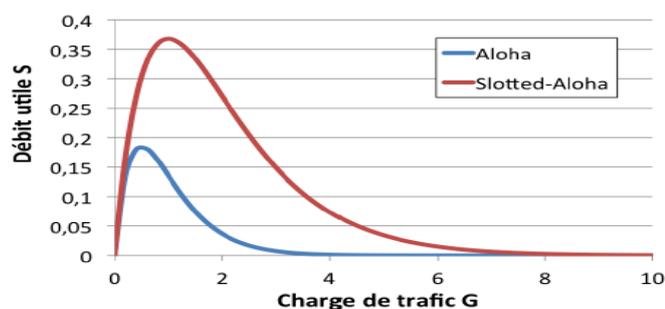


Figure A- 1 Comparaison des performances de l'ALOHA et du Slotted ALOHA

A.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. 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.

A.1.3.Token ring

C'est un réseau local en bande de base développé par IBM. Token Ring définit les couches "physique" et "liaison" du modèle OSI (comme Ethernet). Il n'y a pas de poste de commandement du réseau, l'"intelligence" est répartie sur les unités connectées.

Les terminaux sont reliés entre eux en anneau. Un "jeton" circule sur l'anneau de station en station en étant régénéré au passage (il représente un droit à la parole).

Le jeton est matérialisé par une trame qui circule en permanence sur l'anneau.

Un bit particulier de cette trame indique l'état du JETON : libre ou occupé.

Une station qui veut envoyer un message à une autre attend le jeton libre, elle y accroche son message avec l'adresse du destinataire. Le jeton passe à l'état occupé, ce message circule sur l'anneau de station en station, le destinataire prend en compte le message, et le réémet avec un indicateur d'accusé de réception (trame non erronée, destinataire présent, trame copiée).

Quand la station originaire du message reçoit à nouveau le message, elle envoie un jeton libre à la suivante.

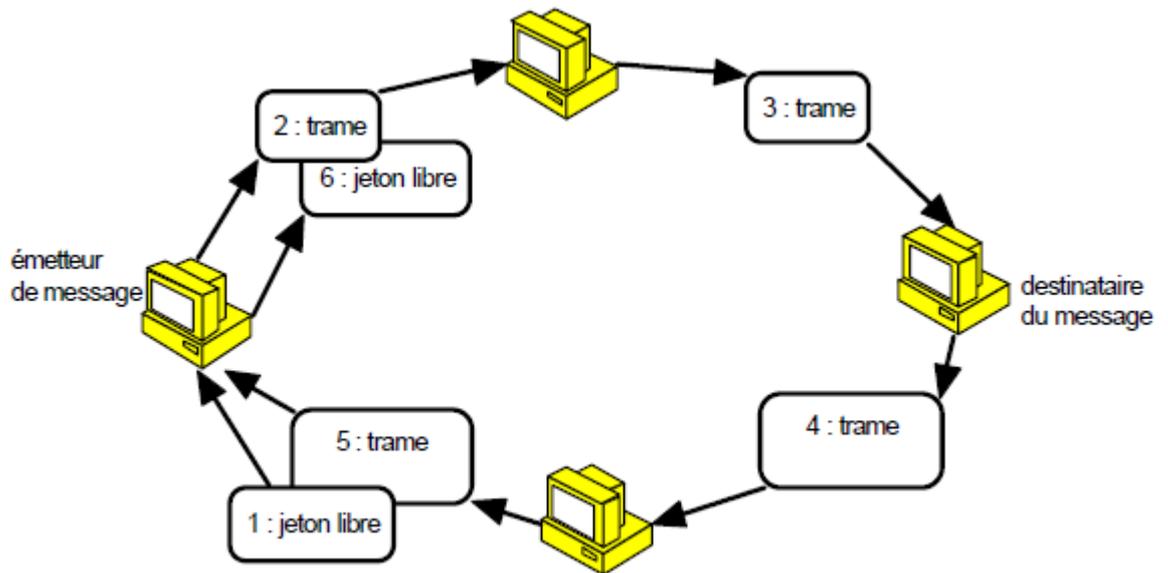


Figure A- 2 Technique en anneaux (TOKEN RING)

ANNEXE B

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.

B.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 inertiels. 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.

B.2 LE DATALINK POUR LA SURVEILLANCE

B.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 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.

B.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.

B.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'ADSC 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 C

Exemple de protocoles de routage dans les MANET

C.1 ROUTAGE PROACTIF

C.1.1. DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector Routing)

DSDV PERKINS & BHAGWAT 1994 [70] 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 associé 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.

C.1.2. OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR JACQUET ET AL. 2001 [71] est un protocole de routage proactif proposé pour les MANET. 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.

C.2 ROUTAGE RÉACTIF

C.2.1. DSR (Dynamic Source Routing)

Le protocole DSR JOHNSON & MALTZ 1996 [72] 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.

C.2.2. AODV (Ad hoc On demand Distance Vector routing)

Le protocole AODV PERKINS & ROYER 1999 [73] 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.

C.3 ROUTAGE HYBRIDE

C.3.1. ZRP (Zone Routing Protocol)

Le protocole ZRP HAAS 1997 [74] 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.

C.4 ROUTAGE GÉOGRAPHIQUE

C.4.1. DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)

DREAM BASAGNI ET AL. 1998 [75] 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.

C.4.2. GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR KARP & KUNG 2000 [76] 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 C.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 C.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.

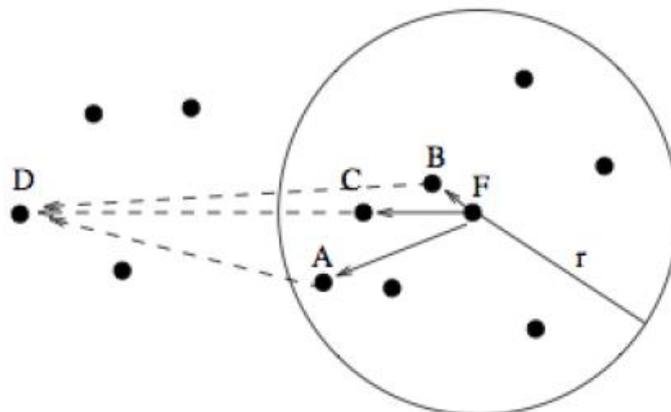


Figure C- 1 GPSR, Mode "Greedy Forwarding"

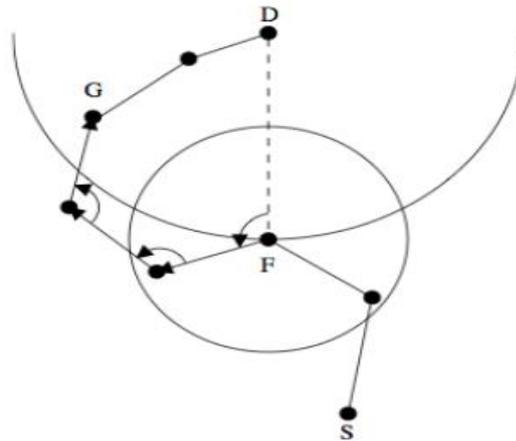


Figure C- 2 GPSR, Mode "Greedy Perimeter"

C.5 ROUTAGE HIÉRARCHIQUE

C.5.1. CGSR (Cluster-head Gateway Switch Routing)

Le protocole CGSR CHIANG ET AL. 1997 [77] 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 D

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 [78]. 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.

D.1 SOLUTIONS AU NIVEAU TRANSPORT

D.1.1. Fixed RTO

Cette solution a été proposée dans DYER & BOPPANA 2001 [79]. 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.

D.1.2. TCP DOOR

TCP DOOR (TCP Detection of Out-of-Order and Response) a été propose dans WANG & ZHANG 2002 [80]. 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 dés séquencement de l'arrivée des paquets et des acquittements. Un champ est ainsi ajouté aux paquets d'acquittement, afin de numéroter les acquittements dupliqués, et aux paquets de données, afin de numéroter séquentiellement tous les paquets émis, y compris les paquets retransmis. L'émetteur est le récepteur peuvent ainsi détecter une erreur. Si le récepteur détecte un dé-séquencement, 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.

D.2 SOLUTIONS AU NIVEAU LIAISON

D.2.1. Link RED

Link RED a été proposé dans FU ET AL. 2003 [81]. 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 La figure D.1. Cela permet de décarreler 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.

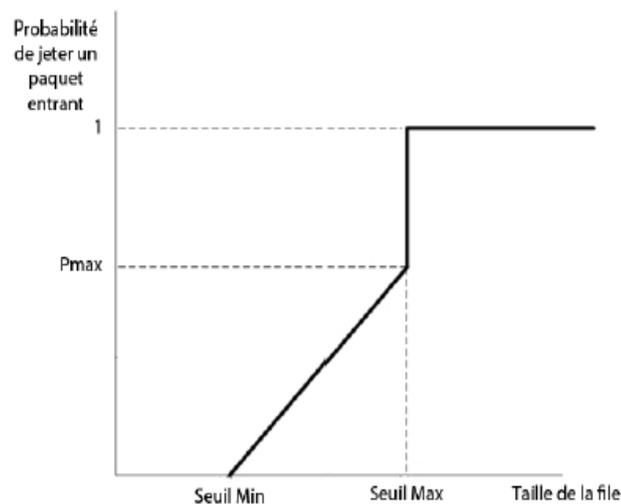


Figure D- 1 Fonctionnement de RED

D.2.2. Pacing

Cette solution a été proposée dans Franklin et al. 2007[82]. 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.

D.2.3. Solutions cross-layer

D.2.4. Split TCP

Split TCP a été proposé en 2002 dans KOPPARTY ET AL. 2002 [83]. 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.

D.2.5. ATCP

ATCP (Ad hoc TCP) a été proposé dans LIU & SINGH 2001 [84]. 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 E

LES PROBLÈMES DU NŒUD CACHÉ ET DU NŒUD EXPOSÉ

Le problème du nœud caché WARE ET AL. 2001 [85] est illustré dans la figure F.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 F.1. 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.

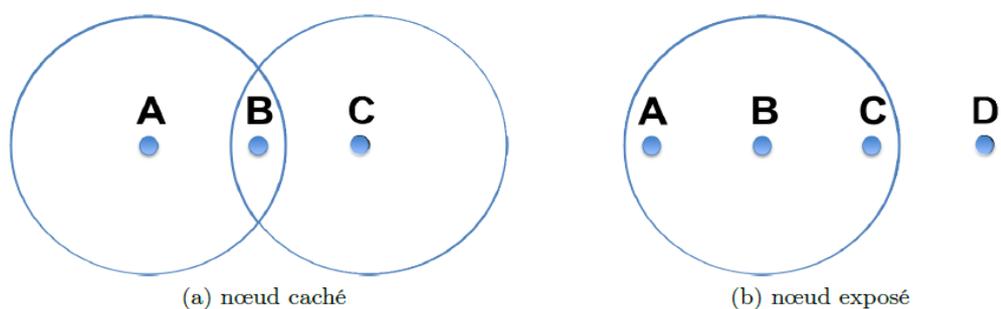


Figure F- 1 Les problèmes du nœud caché et du nœud exposé

REFERENCES

- [4] OACI 2000b OACI. Manuel des applications de la liaison de données aux services de la circulation aérienne. Doc 9694, 2000.
- [6] OACI 2002a OACI. Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems. Doc 9750, 2002.
- [7] SIGNORE & GIRARD 1998 T.L. Signore and M. Girard. The Aeronautical Telecommunication Network (ATN). In IEEE Military Communications Conference (MILCOM 98), 1998.
- [8] OACI 2002b OACI. Manual of Technical Provisions for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN). Doc 9705, 2002.
- [9] OACI 2001a OACI. Comprehensive Aeronautical Telecommunication Network (ATN) Manual. Doc 9739, 2001.
- [10] OACI 2010b OACI. Manual on the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using Internet Protocol Suite (IPS) Standards and Protocols. Doc 9896, 2010.
- [12] Eurocontrol 2010b Eurocontrol. Link 2000+ Programme : ATC Data Link Operational Guidance for LINK 2000+ Services. 2010.
- [13] COCR 2002 COCR. Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System. Eurocontrol/FAA, 2002.
- [14] 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.
- [18] JONES & DE LA CHAPELLE 2001 William H. Jones and Michael de La Chapelle. Connexion by Boeing - Broadband Satellite Communication System for Mobile Platforms. 2001.
- [30] IEEE 802.16. Website. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>.
- [31] IRIS. ESA (European Space Agency) Website. <http://telecom.esa.int/telecom/www/area/index.cfm, fareaid=56>.

- [32] 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.
- [33] JUBIN & TORNOW 1987 J. JUBIN AND D. TORNOW. The DARPA Packet Radio Network protocol. January 1987.
- [35] 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.
- [36] IEEE 802.15. Website. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>.
- [37] IEEE 802.11. Website. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>.
- [30] IEEE 802.16. Website. <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>.
- [38] POSTEL 1980 J. POSTEL. User Datagram Protocol. RFC 768 (Standard), August 1980.
- [39] POSTEL 1981 J. POSTEL. Transmission Control Protocol. RFC 793 (Standard), September 1981. Updated by RFCs 1122, 3168, 6093, 6528.
- [40] SAKHAEI & JAMALIPOUR 2006 E. SAKHAEI AND A. JAMALIPOUR. The Global In-Flight Internet. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 9, pages 1748 –1757, sept. 2006.
- [41] SANCHEZ & ANEJOS 2001 M. SANCHEZ AND P. MANZONI. ANEJOS. A java based simulator for ad-hoc networks. In Future Generation Computer Systems, 2001.
- [42] 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.
- [43] AMIRFEIZ 2006] Massimiliano Amirfeiz. ATENAA Project: Advanced Technologies for

- [44] SCHNELL & SCALISE 2007] M. Schnell and S. Scalise. NEWSKY: Concept for NEtWorking the SKY for Civil Aeronautical Communications. 2007. Networking in Aeronautical Applications. 2006.
- [45] SAKHAE ET AL. 2006a E. SAKHAE, 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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, October. 2009.

- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] SAKHAEI & JAMALIPOUR 2007 E. Sakhaei 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.
- [56] SAKHAEI ET AL. 2006b E. Sakhaei, 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.
- [57] 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.
- [58] [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.
- [59] 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.

- [60] 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.
- [61] JABBAR & STERBENZ 2009 ABDUL JABBAR AND JAMES P.G. STERBENZ. AeroRP: A Geolocation Assisted Aeronautical Routing Protocol for Highly Dynamic Telemetry Environments. In International Telemetry Conference (ITC 2009), 2009.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] MEDINA ET AL. 2011b D. MEDINA, F. HOFFMANN, F. ROSSETTO AND C.-H. ROKITANSKY. AGeographic Routing Strategy for North Atlantic In-Flight Internet Access Via Airborne Mesh Networking. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011.
- [65] MEDINA ET AL. 2011a D. MEDINA, F. HOFFMANN, F. ROSSETTO AND C. ROKITANSKY. NorthAtlantic Inflight Internet Connectivity via Airborne Mesh Networking. In IEEE Vehicular Technology Conference, pages 1 –5, sept. 2011.
- [66] MEDINA ET AL. 2010a D. MEDINA, F. HOFFMANN, F. ROSSETTO AND C.-H. ROKITANSKY. ACrosslayer Geographic Routing Algorithm for the Airborne Internet. In IEEE International Conference on Communications (ICC 2010), pages 1 –6, may 2010.

- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] GAO 2007 Jie Gao. Analysis of Aloha and Slotted Aloha. 2007.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.

- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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, juin 2001.
- [1] <http://www.att.com>
- [2] <http://www.arinc.com>
- [3] <http://www.icao.int>
- [5] <http://www.itu.int>
- [11] <http://www.iso.org>
- [15] <http://www.inmarsat.com>
- [16] <http://www.iridium.com>
- [19] http://www.arinc.com/products/inflight_entertainment/oi-onboard_internet.html
- [20] <http://www.mascorp.com>
- [21] <http://www.onair.aero>
- [22] <http://www.row44.com>
- [23] <http://www.aeromobile.net>
- [24] <http://www.aircell.com>

Références

- [25] <http://www.fcc.gov>
- [17] <http://www.faa.gov>
- [27] <http://www.thalesgroup.com/space>
- [28] <http://www.sesarju.eu>
- [29] <http://www.faa.gov/nextgen/>
- [34] <http://www.ietf.org>