



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *L'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT)*  
Discipline ou spécialité : *Aéronautique et Astronautique*

---

Présentée et soutenue par

**Na TAO**

Le 10 Juillet 2009

**Titre : *Etude des Performances et Optimisation d'un Réseau d'Accès par Satellite pour les Communications***

---

### JURY

*Prof. Francine KRIEF*  
*Prof. Pascal LORENZ*  
*Prof. Gilles ROUSSEL*  
*Dr. Christophe MACABIAU*  
*Dr. Alain PIROVANO*  
*Dr. José RADZIK*

---

**Ecole doctorale :** *Ecole Doctorale Aéronautique Astronautique (EDAA)*  
**Unité de recherche :** *Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), Laboratoire d'Etude et d'Optimisation des Architectures des Réseaux de Télécommunication (LEOPART)*  
**Directeurs de Thèse :** *Christophe MACABIAU, José RADZIK*  
**Encadrement :** *Alain PIROVANO, José RADZIK*



## Abstract

The rapid growth of air traffic needs a new communication infrastructure with increased bandwidth, high speed services and applications to satisfy expected air-ground communication requirements. Satellite communication systems play a significant role in this context, not only as a complement to terrestrial systems for Air Traffic Management (ATM) by offering global coverage but also as a promising solution to enrich In-Flight Entertainment (IFE) for passengers. DVB-S2/RCS technology is an attractive proposition to provide the cost-effective broadband services for both ATM and IFE, mainly because a large radio bandwidth is primarily allocated to aeronautical mobile communications in Ka-band, where the open standards DVB are implemented.

However, such system design with convergence of heterogeneous traffics involves two main challenges. Firstly, using Ka-band means the implementation of Fade Mitigation Techniques (FMT) in order to cope with deep fades caused by atmospheric attenuation. Otherwise, the waste of capacity would be excessively high in a constant link margin design. FMT adapt in real time the link budget to the propagation conditions, this adaptivity has an impact not only on physical layer but also on upper layers. An efficient resource management strategy with dynamic bandwidth allocation is required in this case, especially in DVB-RCS return link where FMT are not natives. Secondly, the proposed system must be able to multiplex the traffic flows with highly different characteristics and Quality of Service (QoS) expectations into a single link, the corresponding capacity management and QoS support seem with higher complexity.

In this paper, we present an adaptive system design using a single DVB-S2/RCS based satellite link to provide Internet access and mobile telephony (GSM/UMTS) for passengers and a high-reliability channel for ATM. Concerning the airborne terminal architecture, two approaches are investigated. The first one is in compliance with ETSI Broadband Satellite Multimedia (BSM) architecture and based on a layering paradigm. The conducted simulation experiments highlight the need of dynamic interactions and adaptations among the layers to achieve an overall performance optimization. We propose then an enhanced approach with the concentration of both resource allocation and QoS management at the same interface - adaptation layer. The idea comes from the success of the recent Generic Stream Encapsulation (GSE) protocol, which carries the network protocol packets over DVB-S2 forward link in a simple, flexible and efficient way, especially when used with Adaptive Coding and Modulation (ACM). Furthermore, GSE can be easily extended to use in our design for DVB-RCS return link thanks to a proper design of MF-TDMA structure in which the suitable FMT (ACM and Dynamic Rate Adaptation) are context-aware configured. With the combined use of GSE, service policy and the interactions between adaptation and access layers, incoming heterogeneous traffics can be dynamically scheduled, segmented and encapsulated at the same adaptation layer. Performance evaluation of two proposed approaches is derived by a network-level simulation model

developed using OPNET. Results prove the enhanced approach outperforms the first one leading to better resource utilization and satisfactory performance.

## Résumé

La croissance rapide du trafic aérien et les besoins en nouveaux services notamment pour les passagers imposent l'introduction de nouveaux moyens de communication pour les avions avec une bande passante globale fortement accrue. Les satellites sont appelés à jouer un rôle important dans ce contexte, non seulement en complément des systèmes terrestres pour les services « cockpit » (services ATM, Air Traffic Management) mais aussi pour les services « cabine » (In-Flight Entertainment). L'objectif de la thèse est d'étudier l'architecture d'un système satellite supportant l'ensemble de ces services, en se focalisant sur l'architecture du terminal embarqué à bord des aéronefs.

L'architecture retenue repose sur des liaisons DVB-S2/DVB-RCS normalisées par l'ETSI. Cette option permet d'utiliser efficacement l'importante bande passante disponible en bande Ka pour les services mobiles aéronautiques (allocation primaire) ou en bande Ku (allocation secondaire). Ces normes ont été conçues pour les applications multimédia (Broadband Satellite Multimedia).

Le défi est alors d'utiliser de telles liaisons satellite pour des services aux caractéristiques et besoins fortement hétérogènes. Par ailleurs, l'utilisation de la bande Ka n'est pas concevable sans l'activation de techniques de lutte contre les affaiblissements (FMT – Fade Mitigation Techniques). L'utilisation d'une marge statique conduit à une perte importante de capacité. Les techniques FMT reposent sur une évaluation dynamique du bilan de liaison et permettent une modification de la forme d'onde. Le système utilise ainsi la forme d'onde la plus efficace spectralement pour chaque terminal et maximise la capacité globale du système. Par contre, chaque terminal observe une modification de la ressource allouée au fil du temps.

L'objectif de la thèse est de concevoir une architecture au niveau terminal qui permette d'exploiter les liaisons DVB-S2/RCS afin de fournir les services passagers (Internet et téléphonie mobile de type GSM/UMTS) et un canal haute fiabilité pour les services aéronautiques. Deux approches ont été retenues. La première repose sur une application du modèle ETSI BSM (Broadband Satellite Multimedia) en couches séparant strictement les couches dépendantes satellite et les couches indépendantes satellite. Les simulations de cette architecture montrent que les liaisons ne peuvent être utilisées de façon efficace sans une interaction entre couches afin de tenir compte de l'évolution de la capacité disponible. La seconde approche consiste en la concentration de la gestion de la ressource et la gestion de la qualité de service dans la même

couche protocolaire. L'idée de départ est d'utiliser la méthode d'encapsulation générique Generic Stream Encapsulation (GSE). GSE a été conçu pour la projection des paquets de couches supérieures à l'intérieur des trames DVB-S2. GSE tient compte de la taille variable des trames DVB-S2 et introduit une capacité de multiplexage entre différents flux (identification de fragments). Sur cette base, une gestion de l'accès est introduite pour gérer la liaison DVB-RCS au format MF-TDMA. Nous introduisons ainsi une utilisation conjointe de GSE, d'une politique de service différenciée et de flux de signalisation inter-couches (« cross-layer »).

Les performances des deux approches sont étudiées à l'aide d'un modèle de simulation développé à l'aide du logiciel OPNET Modeler (simulations à événements discrets). Les résultats obtenus démontrent le meilleur comportement de la seconde architecture avec une meilleure utilisation de la ressource et des performances de transmission satisfaisant les objectifs.

## Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire d'Etude et d'Optimisation des Architectures des Réseaux de Télécommunication (LEOPART) de l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile). Je tiens tout à bord à remercier Farid ZIZI, directeur des études et de la recherche, de m'avoir accueillie avec beaucoup de gentillesse dans son établissement.

Je tiens à dire toute ma connaissance à Madame Francine KRIEF, professeur à l'ENSEIRB de Bordeaux, Pascal LORENZ, professeur à l'Université de Haute Alsace, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie Gilles ROUSSEL, professeur à l'Université de Marne-La-Vallée, d'avoir accepté de présider ce jury de thèse.

Merci également Christophe MACABIAU, directeur du laboratoire de traitement du signal de l'ENAC, d'avoir accepté d'être directeur de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude à mes deux directeurs et encadrants de thèse : Alain PIROVANO, directeur du LEOPART de l'ENAC et José RADZIK, professeur adjoint à l'ISAE, pour m'avoir proposé cette thèse et m'avoir accompagnée tout au long de ces trois années. Leurs aides, leurs encouragements et leurs disponibilités ont été déterminants pour la réalisation de cette thèse.

Je remercie l'ensemble du département EL de l'ENAC avec qui j'ai passé de merveilleux moments. Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui, à un moment ou à un autre, m'ont apporté leur aide et contribué à rendre mon séjour à l'ENAC très agréable.

Je dédie cette thèse à mes parents et à wentao.





# Table des matières

<b>I. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
I.1 Datalink.....	2
I.2 Services aux passagers et premières expérimentations.....	3
I.3 Convergence des communications aéronautiques sur un lien unique par satellite .....	4
I.4 Plan du mémoire.....	5
<b>II. SERVICE A BORD.....</b>	<b>7</b>
II.1 Services pour l’ATM .....	7
II.1.1 Historique.....	7
II.1.2 Définitions .....	8
II.1.3 Différents types de services de communication .....	9
II.1.4 Une étude prospective : le COCR .....	11
II.1.5 Performances requises.....	12
II.1.6 Service mobile aéronautique par satellite .....	15
II.2 Services aux passagers.....	17
II.2.1 Services pour téléphonie mobile .....	17
II.2.2 Services d’accès à Internet.....	18
II.2.3 Qualité de service requise.....	18
II.3 Modélisation des sources de trafic.....	19
II.3.1 Source de trafic cockpit.....	20
II.3.2 Source de trafic téléphonie mobile.....	25
II.3.3 Source de trafic Internet embarqué.....	31
<b>III. RESEAU D’ACCES PAR SATELLITE.....</b>	<b>35</b>
III.1 Ressources radioélectriques .....	35
III.1.1 Justification de l’utilisation de la bande Ka .....	35
III.1.2 Propagation en bande Ka .....	38
III.1.3 Techniques de compensation des affaiblissements.....	40
III.1.3.1 Contrôle de puissance.....	41
III.1.3.2 Adaptation de la forme d’onde .....	41
III.1.3.3 Diversité .....	42
III.2 Accès satellite : DVB-S2/DVB-RCS.....	43
III.2.1 Normes pour les accès satellite à haut débit .....	43
III.2.2 Système de référence .....	47
III.2.2.1 Lien aller DVB-S2 .....	49
III.2.2.2 Lien retour DVB-RCS.....	49

III.2.3	Couche physique DVB-RCS .....	51
III.2.4	Qualité de service et DVB-RCS .....	58
III.2.5	Mise en œuvre de l'algorithme DAMA .....	60
<b>IV.</b>	<b>ARCHITECTURE SYSTEME .....</b>	<b>63</b>
IV.1	Modèle OSI de l'ISO .....	63
IV.2	Services aéronautiques .....	64
IV.2.1	Architecture protocolaire dans l'ATN .....	64
IV.2.2	Introduction du satellite dans l'architecture ATN .....	66
IV.3	Services aux passagers .....	68
IV.3.1	Services de téléphonie mobile .....	68
IV.3.1.1	Réseau GSM .....	68
IV.3.1.2	Réseau UMTS .....	69
IV.3.1.3	Choix d'un point de coupure pour l'introduction de la liaison satellite .....	70
IV.3.2	Services d'accès Internet .....	73
IV.4	Convergence des trafics sur la liaison satellite .....	76
IV.4.1	Format de données DVB .....	76
IV.4.1.1	Lien aller DVB-S2 .....	76
IV.4.1.2	Lien retour DVB-RCS .....	78
IV.4.2	Méthode d'encapsulation .....	78
IV.4.2.1	Méthode d'encapsulation sur le flux de transport MPEG .....	78
IV.4.2.2	Méthode d'encapsulation sur le flux générique .....	80
<b>V.</b>	<b>ARCHITECTURE DU TERMINAL AVION : APPROCHE CLASSIQUE ET APPROCHE DYNAMIQUE .....</b>	<b>85</b>
V.1	Approche classique .....	85
V.1.1	Architecture BSM par ETSI .....	85
V.1.2	Projection de l'architecture BSM dans le cas du terminal avion .....	87
V.1.3	Mise en œuvre détaillée .....	89
V.1.3.1	Réseau ATN .....	89
V.1.3.2	Réseau GSM/UMTS .....	90
V.1.3.3	Réseau TCP/IP .....	90
V.1.4	Etude préliminaire de l'approche classique .....	93
V.1.5	Contrôle dynamique du flux IP .....	97
V.2	Etat de l'art des techniques « Cross-Layer » .....	102
V.2.1	Différentes catégories de « Cross-Layer » .....	103
V.2.2	Les architectures « Cross-Layer » .....	105
V.2.3	Techniques « Cross-Layer » dans les systèmes de communication par satellite .....	107
V.2.3.1	« Cross-Layer » pour l'optimisation de la gestion de ressources .....	107
V.2.3.2	« Cross-Layer » pour l'optimisation de performances .....	108

<b>VI. ARCHITECTURE DU TERMINAL AVION : APPROCHE DYNAMIQUE AVEC ENCAPSULATION GNERIQUE .....</b>	<b>111</b>
VI.1 Architecture retenue pour le terminal avion.....	111
VI.1.1 Choix des techniques « Cross-Layer » .....	111
VI.1.2 Les flux de signalisation « Cross-Layer » .....	113
VI.1.3 Mécanismes mis en œuvre à la couche d'adaptation.....	114
VI.1.4 Dimensionnement des files d'attente du Terminal Satellite.....	115
VI.2 Etude des performances.....	118
VI.2.1 Simulation avec un seul terminal et conditions de propagations fixes.....	118
VI.2.2 Simulation avec plusieurs terminaux et conditions de propagations fixes.....	122
VI.2.2.1 Configuration du scénario et trafic exogène.....	122
VI.2.2.2 Etude des performances en fonction de la charge .....	124
VI.2.2.3 Etude du fonctionnement du réseau chargé .....	127
VI.2.2.4 Performances d'accès pour un avion avec le seul trafic ATC/AOC .....	130
VI.2.3 Simulation avec plusieurs terminaux et conditions de propagations variables.....	132
 <b>CONCLUSION .....</b>	 <b>137</b>
 <b>REFERENCE .....</b>	 <b>143</b>
 <b>PUBLICATIONS.....</b>	 <b>149</b>
 <b>ANNEXES .....</b>	 <b>151</b>
Annexe A Recommandation COCR .....	151
Annexe B Performances de codage et de modulation du DVB-S2/RCS.....	157
Annexe C Bilan de liaison ciel clair.....	159
Annexe D Le logiciel de simulation OPNET .....	163
Annexe E Sources de trafic .....	167
Annexe E.1 Source de trafic cockpit ATS/AOC.....	167
Annexe E.2 Source de trafic téléphonies mobile à bord .....	170
Annexe E.2.1 Modèle N-sources ON/OFF.....	170
Annexe E.2.2 Modèle agrégé.....	171
Annexe E.3 Modèle de source Internet embarqué .....	173
Annexe F Modèles de simulation .....	177
Annexe F.1 Terminal avion (ST) .....	178
Annexe F.2 Gateway (NCC intégré) .....	182



## Liste des acronymes

<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>ACARS</b>	Aircraft Communication Addressing and Reporting System
<b>ACM</b>	Adaptive Coding and Modulation
<b>ACQ</b>	ACQuisition
<b>ADS-A</b>	Automatic Dependent Surveillance - Addressed
<b>ADS-B</b>	Automatic Dependent Surveillance - Broadcasted
<b>ADS-C</b>	Automatic Dependent Surveillance - Contract
<b>AES</b>	Airborne Earth Station
<b>AF</b>	Assured Forwarding
<b>AMSS</b>	Aeronautical Mobile Satellite Service
<b>AOA</b>	Autonomous Operations Area
<b>AOC</b>	Aeronautical Operational Control
<b>APC</b>	Aeronautical Passenger Communications
<b>APT</b>	AirPorT
<b>ATC</b>	Air Traffic Control
<b>ATM</b>	Air Traffic Management
<b>ATM'</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>ATN</b>	Aeronautical Telecommunication Network
<b>ATS</b>	Air Traffic Services
<b>AVBDC</b>	Absolute Volume Based Dynamic Capacity
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BGAN</b>	Broadband Global Area Network
<b>BoD</b>	Bandwidth on Demand
<b>bps</b>	bits per second
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>BSM</b>	Broadband Satellite Multimedia
<b>BSS</b>	Broadcasting Satellite Service
<b>BSS'</b>	Base Station Sub-system
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>CBB</b>	Connexion By Boeing
<b>CCM</b>	Constant Coding and Modulation
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CLNP</b>	ConnectionLess Network Protocol
<b>CNI</b>	Carrier to Noise and Interference ratio
<b>CNS</b>	Communication, Navigation, Surveillance
<b>COCR</b>	Communications Operating Concepts and Requirements
<b>COS</b>	Class of Service
<b>CPDLC</b>	Controller Pilot Data Link Communications
<b>CR</b>	Capacity Requests

<b>CRA</b>	Constant Rate Allocation
<b>CSC</b>	Common Signalling Channel
<b>DRA</b>	Dynamic Rate Adaptation
<b>DAMA</b>	Demand Assigned Multiple Access
<b>DVB-S2</b>	Digital Video Broadcast - Satellite 2nd generation
<b>DVB-RCS</b>	Digital Video Broadcast - Return Channel Satellite
<b>DOCSIS</b>	Data Over Cable Service Interface Specification
<b>DOCSIS-S</b>	Data Over Cable Service Interface Specification - Satellite
<b>EIRP</b>	Equivalent Isotropic Radiated Power
<b>ENR</b>	EN Route
<b>Es/NO</b>	Energy per symbol per Noise power spectral density
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>EUROCONTROL</b>	European Organization for the Safety of Air Navigation
<b>EWMA</b>	Exponentially Weighted Moving Average
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration
<b>FCA</b>	Free Capacity Assignment
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FL</b>	Flight Level (1 FL = 100 pieds)
<b>FMT</b>	Fade Mitigation Techniques
<b>FRS</b>	Future Radio System
<b>FSS</b>	Fixed Satellite Service
<b>GEO</b>	GEOstationary
<b>GES</b>	Ground Earth Station
<b>GSE</b>	Generic Stream Encapsulation
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications
<b>HF</b>	High Frequency (3MHz ~ 30MHz)
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization
<b>IFE</b>	In-Flight Entertainment
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IPoS</b>	Internet Protocol over Satellite
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>JT</b>	Jitter Tolerant
<b>Kbps</b>	kilo bits per second
<b>Km</b>	kilomètre
<b>Ksps</b>	kilo symbols per second
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>MAC</b>	Media Access Control

<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TCT</b>	Timeslot Composition Table
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TIA</b>	Telecommunications Industry Association
<b>TMA</b>	Terminal Maneuvering Area
<b>TRAU</b>	Transcoder and Rate Adaptation Unit
<b>TRF</b>	TRaFfic
<b>TRX</b>	Transmission/Reception
<b>ULE</b>	Unidirectional Lightweight Encapsulation
<b>ULPC</b>	UpLink Power Control
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>VBDC</b>	Volume Based Dynamic Capacity
<b>VDL mode 2</b>	VHF Digital Link – mode 2
<b>VHF</b>	Very High Frequency (30MHZ ~ 300MHz)
<b>VPN</b>	Virtual Private Network
<b>VR</b>	Variable Rate
<b>W-CDMA</b>	Wideband - Code Division Multiple Access
<b>WWW</b>	World Wide Web

## Liste des figures

Figure II-1 : Relation entre le service et l'application.....	9
Figure II-2 : Interface graphique de l'application CPDLC.....	10
Figure II-3 : Définition des phases dans le COCR.....	12
Figure II-4 : Définition du FRS (Futur Système Radio) dans le COCR.....	14
Figure II-5 : Différents canaux du system AMSS.....	15
Figure II-6 : Vue globale de la modélisation de source trafic cockpit.....	21
Figure II-7 : Profil de trafic cockpit (domaine TMA/ENR).....	23
Figure II-8 : Profil de trafic cockpit (domaine ORP).....	24
Figure II-9 : Modèle ON/OFF.....	26
Figure II-10 : Modèle N-sources ON/OFF.....	27
Figure II-11 : Trafic généré - N-sources ON/OFF.....	28
Figure II-12 : Processus de Poisson Modulé par une chaîne de Markov (MMPP).....	29
Figure II-13 : Exemple de la matrice des probabilités de transition.....	30
Figure II-14 : Trafic généré - source MMPP.....	31
Figure II-15 : Comportement TCP Reno - source TCP greedy.....	34
Figure III-1 : Scénario de référence (cas général).....	36
Figure III-2 : Exemple de série temporelle d'atténuation par la pluie en bande Ka.....	38
Figure III-3 : Scénario de référence (réseau d'accès DVB-S2/DVB-RCS).....	47
Figure III-4 : Méthode d'accès pour le lien retour DVB-RCS : MF-TDMA.....	50
Figure III-5 : Exemple de la répartition MF-TDMA.....	57
Figure IV-1 : Modèle OSI.....	64
Figure IV-2 : Pile protocolaire du système ATN (Exemple : VDL mode 2).....	66
Figure IV-3 : Introduction de la liaison DVB dans l'architecture ATN.....	67
Figure IV-4 : Structure du réseau GSM simplifiée.....	68
Figure IV-5 : Structure du réseau UMTS simplifiée.....	69
Figure IV-6 : Topologie GSM/UMTS par satellite.....	71
Figure IV-7 : Transmission sur l'interface Abis.....	72
Figure IV-8 : Structure de la trame TRAU (Transcoder/Rate Adaptor Unit).....	72
Figure IV-9 : Modèle TCP/IP.....	74
Figure IV-10 : Pile protocolaire du système IP via satellite.....	76
Figure IV-11 : Structure de flux de transport MPEG-TS.....	77
Figure IV-12 : Encapsulation MPE.....	79
Figure IV-13 : Structure de SNDU de l'encapsulation ULE (sans extension).....	80
Figure IV-14 : Encapsulation GSE.....	81
Figure IV-15 : Exemple de format de paquet GSE.....	82
Figure V-1 : Architecture protocolaire BSM.....	86



<b>MMS</b>	Multimedia Messaging Service
<b>MMPP</b>	Markov Modulated Poisson Process
<b>MF-TDMA</b>	Multi Frequency - Time Division Multiple Access
<b>MPE</b>	Multi Protocol Encapsulation
<b>MPEG</b>	Moving Picture Experts Group
<b>MPEG-TS</b>	MPEG - Transport Stream
<b>MSC</b>	Mobile Switching Center
<b>MSS</b>	Mobile Satellite Service
<b>MTU</b>	Maximum Transmission Unit
<b>NCC</b>	Network Control Center
<b>OPA</b>	Operational Performance Assessment
<b>ORP</b>	Oceanic, Remote, Polar
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>PC</b>	Power Control
<b>PEP</b>	Performance Enhancing Proxy
<b>PER</b>	Packet Error Rate
<b>PIAC</b>	Peak Instantaneous Aircraft Count
<b>PID</b>	Packet Identifier
<b>PSTN</b>	Public Switched Telephone Network
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RBDC</b>	Rate Based Dynamic Capacity
<b>RCP</b>	Required Communication Performance
<b>RCTP</b>	Required Communication Technical Performance
<b>RNC</b>	Radio Network Controller
<b>RT</b>	Real Time
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>SAC</b>	Satellite Access Control
<b>SARPs</b>	Standards and Recommended Practices
<b>SATCOM</b>	Satellite Communication
<b>SESAR</b>	Single European Sky ATM Research
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>SNAcP</b>	SubNetwork Access Protocol
<b>SNDCF</b>	SubNetwork Dependent Convergence Function
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>SOHO</b>	Small Office/Home Office
<b>ST</b>	Satellite Terminal
<b>SYNC</b>	SYNChronization
<b>TBTP</b>	Terminal Burst Time Plan

Figure V-2 : Cœur du système : Approche classique.....	88
Figure V-3 : Architecture du terminal avion (Approche classique).....	89
Figure V-4 : Format de paquet PDU CLNP.....	90
Figure V-5 : Mécanisme RED (Random Early Detection).....	91
Figure V-6 : Mise en œuvre détaillée de l'architecture de l'approche classique.....	93
Figure V-7 : Taux d'utilisation moyen de la ressource allouée - Approche classique.....	95
Figure V-8 : Courbes CDF des délais (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) - Approche classique.....	97
Figure V-9 : Mise en œuvre détaillée de l'architecture de l'approche dynamique.....	98
Figure V-10 : débit/débit moyen du seau percé - Approche dynamique.....	99
Figure V-11 : Comparaison de l'approche classique et dynamique - Taux moyen d'utilisation de la ressource allouée.....	100
Figure V-12 : Comparaison de l'approche classique et dynamique - Courbes CDF de délai IP.....	101
Figure V-13 : Courbes CDF des délais (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) - Approche dynamique.....	101
Figure V-14 : Différentes conceptions de « Cross-Layer » - Type 1.....	104
Figure V-15 : Différentes conceptions de « Cross-Layer » - Type 2, 3 et 4.....	105
Figure V-16 : Implémentations d'interactions « Cross-Layer ».....	107
Figure VI-1 : Architecture retenue pour le terminal avion.....	113
Figure VI-2 : Encapsulation GSE sur le lien retour DVB-RCS.....	114
Figure VI-3 : Modèle « bande équivalente » pour la source GSM.....	117
Figure VI-4 : Modèle « bande équivalente » GSM, taux de perte vs débit (taille de file en paramètre).....	117
Figure VI-5 : Courbes CDF des délais (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) - Approche dynamique avec GSE.....	119
Figure VI-6 : Comparaison des délais du trafic IP (IP-IP) entre les trois approches étudiées.....	120
Figure VI-7 : Comparaison des RTT mesurés (TCP-TCP) entre les trois approches étudiées.....	120
Figure VI-8 : Modèle de simulation N avions.....	123
Figure VI-9 : Modèle de simulation N avions, générations des requêtes de capacité.....	124
Figure VI-10 : Simulation N avions - Délais par services.....	126
Figure VI-11 : Simulation N avions - Débit moyen IP.....	127
Figure VI-12 : Simulation 60 avions - CDFs des délais par services.....	128
Figure VI-13 : Simulation 60 avions - CDFs du nombre de créneaux alloués.....	128
Figure VI-14 : Simulation 60 avions - Génération des requêtes de capacité en débit pour le service GSM.....	129
Figure VI-15 : Simulation 60 avions - CDF du délai dans le cas d'un trafic GSM seul.....	130
Figure VI-16 : Séquence d'échange DVB-RCS dans le cas d'un message ATC/AOC isolé.....	131
Figure VI-17 : Simulation 60 avions - Distribution (CDF) des délais pour trafic ATC/AOC seul.....	131
Figure VI-18 : Simulation 60 avions - Requêtes de capacité cumulées en entrée du NCC.....	132
Figure VI-19 : Exemple de fichier d'entrée du modèle de simulation.....	133
Figure VI-20 : Profil FMT pour la simulation.....	134
Figure VI-21 : Délais ATC/AOC et GSM avec modes FMT variables.....	135
Figure VI-22 : Délais IP avec modes FMT variables.....	135

Figure A- 1 : Modélisation hiérarchique dans l'environnement OPNET.....	164
Figure A- 2 : Vue globale du modèle de source de trafic cockpit. ....	167
Figure A- 3 : Modèle de source : trafic cockpit (domaine TMA&ENR). ....	168
Figure A- 4 : Modèle de source : trafic cockpit (domaine ORP).....	169
Figure A- 5 : Modèle de source : trafic GSM (N-sources ON/OFF). ....	170
Figure A- 6 : Modèle de source : trafic GSM (MMPP). ....	172
Figure A- 7 : Module 'TCP_greedy_client'. ....	173
Figure A- 8 : Module 'TCP_greedy_server'. ....	176
Figure A- 9 : Modèle du réseau. ....	177
Figure A- 10 : Nœud terminal satellite d'avion (ST). ....	178
Figure A- 11 : Module 'GSE_server'. ....	179
Figure A- 12 : Module 'MAC_serveur'. ....	180
Figure A- 13 : Nœud Gateway (NCC intégré).....	182
Figure A- 14 : Module 'DAMA_controller'. ....	183



## Liste des tableaux

Tableau II-1 : Définition des domaines d'espace aérien dans le COCR. ....	12
Tableau II-2 : Paramètres et leurs définitions du RCP. ....	13
Tableau II-3 : Exigences de performances les plus contraignantes définies dans le COCR. ....	14
Tableau II-4 : Exigences de performances pour les services aux passagers. ....	19
Tableau II-5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques services cockpit (Domaine TMA/ENR). ....	25
Tableau II-6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des services cockpit (Domaine ORP). ....	25
Tableau III-1 : Bandes de fréquence disponibles pour les services AMSS (Zone européenne). ....	37
Tableau III-2 : Calcul de l'atténuation par la pluie selon l'ITU-R P.618 (bande Ka). ....	39
Tableau III-3 : Comparaison des normes DVB-S2, DVB-RCS, IPoS et DOCSIS-S. ....	46
Tableau III-4 : Eb/N0 obtenus et les marges maximum offertes. ....	52
Tableau III-5 : Marges offertes par les techniques FMT. ....	52
Tableau III-6 : Modes FMT retenues. ....	53
Tableau III-7 : Dimensionnement de la super-trame MF-TDMA. ....	55
Tableau III-8 : Divers classes de requête de capacité. ....	59
Tableau III-9 : Mise en œuvre des requêtes de capacité. ....	61
Tableau IV-1 : Comparaison récapitulative des interfaces/composants des réseaux UMTS et GSM. ....	70
Tableau IV-2 : Caractéristiques d'une liaison voix sur l'interface Abis. ....	73
Tableau IV-3 : Types de paquets pendant l'encapsulation. ....	78
Tableau IV-4 : Fragmentation/Réassemblage Indicateurs de GSE. ....	82
Tableau V-1 : Volumes reçus en 1 heure - Approche classique. ....	94
Tableau V-2 : Taille moyenne des files d'attente dans le terminal avion - Approche classique. ....	96
Tableau V-3 : Comparaison de l'approche classique et dynamique - Volumes reçus en 1 heure. ....	99
Tableau V-4 : Taille moyenne des files d'attente dans le terminal avion - Approche dynamique. ....	100
Tableau VI-1 : Comparaison des trois approches - Volumes reçus en 1 heure. ....	119
Tableau VI-2 : Comparaison des trois approches - Volumes reçus en 1 heure (GSM/UMTS en veille). ....	121
Tableau VI-3 : Comparaison des trois approches - Taille moyenne des files d'attente. ....	122
Tableau VI-4 : Répartition de la ressource radioélectrique dans la simulation. ....	134
Tableau A- 1 : Performances requises des services ATS pour le FRS. ....	152
Tableau A- 2 : Performances requises des services AOC pour le FRS. ....	153
Tableau A- 3 : Hypothèse sur les paramètres de vol. ....	153
Tableau A- 4 : Caractéristiques des services ATS. ....	154
Tableau A- 5 : Caractéristiques des services AOC. ....	155
Tableau A- 6 : Performances de codage et de modulation du DVB-S2. [ETSI 302 307] ....	157

Tableau A- 7 : Performances de codage et de modulation du DVB-RCS. [BOL 04] .....	158
Tableau A- 8 : Bilan de liaison sur le lien retour DVB-RCS.....	162
Tableau A- 9 : Initialisation des paramètres TCP.....	174

# Chapitre I

## INTRODUCTION

Les communications aéronautiques connaissent actuellement une profonde mutation. D'une part, la croissance continue du trafic aérien impose l'introduction de moyens nouveaux pour la navigation aérienne. L'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) dans le cadre du comité spécial FANS (Future Air Navigation System) a défini le concept CNS/ATM (Communications, Navigation et Surveillance/Air Traffic Management). Pour la partie communications, CNS/ATM non seulement utilise de nouveaux moyens de communications (formes d'onde et techniques d'accès adaptées aux transmissions de données numériques, interconnexion par protocoles OSI) mais développe également de nouveaux services basés sur les liaisons de données. D'autre part, les compagnies aériennes souhaitent proposer à leurs passagers de nouveaux services liés à la connectivité aux réseaux terrestres : accès Internet, services de téléphonie mobile ... Dans ce contexte, les liaisons par satellite sont appelées à jouer un rôle majeur. Ces liaisons sont traditionnellement utilisées pour le contrôle aérien dans les domaines de vol où les liaisons terrestres ne sont pas disponibles (zones océaniques par exemple). Pour l'ensemble des nouveaux services aéronautiques, le satellite est un moyen efficace pour assurer la connectivité dans tous les domaines de vol.

L'objectif de la thèse présentée dans ce mémoire est d'identifier ces nouveaux besoins en matière de communication par satellite, de les quantifier en proposant notamment une modélisation des sources de trafic puis de proposer et de définir une architecture du système. Cette architecture vise principalement à fournir différents services à la fois pour le CNS/ATM et pour les passagers sur la base d'une liaison satellite unique en bande Ka (20/30 GHz). Une attention particulière a été portée sur la conception du terminal avion afin d'assurer la convergence des différents flux de trafic tout en satisfaisant les contraintes en matière de qualité de service.

## I.1 Datalink

Dans le concept du CNS/ATM, la liaison de données, appelée datalink, est une notion très importante car les services qu'elle offre permettent l'évolution rapide des communications aéronautiques. Le datalink modifie le contrôle de la circulation aérienne (ATC : Air Traffic Control) en introduisant un moyen complémentaire aux communications vocales qui sont essentiellement utilisées pour l'ATC. Par rapport aux communications vocales, les avantages du datalink sont :

- alléger la charge du travail de contrôle
- aider la localisation et la surveillance des avions
- améliorer le contrôle d'espace
- éviter les erreurs de procédure (malentendu, etc.).

Le concept du datalink a été introduit avec le système de communications entre avion et sol ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System, premier déploiement par ARINC en 1978). Ce système permet l'échange de messages entre l'avion et le sol par une liaison radio de très haute fréquence (VHF : Very High Fréquence) ou une liaison satellite. Dans les années 1980, l'OACI a défini un concept d'architecture de réseau de télécommunications aéronautiques plus robuste pour remplacer l'ACARS : ATN (Aeronautical Telecommunications Network). L'ATN est une partie essentielle dans le système CNS/ATM et fournit plusieurs services de liaison de données pour les communications aéronautiques [\[ANNEXE 10\]](#). Les détails de l'architecture ATN seront introduits dans le [chapitre IV](#).

Parmi plusieurs liaisons de données introduites dans l'ATN, SATCOM (SATellite COMmunication) représente un moyen de communication important. Une solution opérationnelle proposée par l'OACI pour le SATCOM est l'utilisation des satellites INMARSAT (INternational MARitime SATellite organization) et ses supports pour le service mobile aéronautique par satellite (AMSS : Aeronautical Mobile Satellite Service) avec pour principal atout une couverture quasi-mondiale. Des systèmes régionaux peuvent augmenter la capacité du système AMSS. Un exemple est donné par les deux satellites MTSAT (Multifonctional Transport Satellite) 1R et 2 au dessus de la zone Asie. D'autres systèmes devront être utilisés dans le futur afin de disposer d'une capacité globale suffisante.



## I.2 Services aux passagers et premières expérimentations

Les compagnies aériennes sont particulièrement intéressées par le développement des communications aéronautiques passagers (APC : Aeronautical Passenger Communications). Avec l'évolution rapide des technologies de communications terrestres, les divertissements classiques à bord (IFE : In-Flight Entertainment), principalement basés sur les audio/vidéo statiques, ne permettent plus de satisfaire la demande des passagers en services multimédia. Au cours de ces dernières années, plusieurs projets ont déjà montré l'intérêt et la faisabilité technique de l'accès à Internet et du service téléphonie mobile à bord des avions. Les solutions proposées sont principalement basées sur les communications par satellite.

Le premier système commercial par satellite pour les services APC est CCB (Connexion By Boeing) [\[CCB-1\]](#). Ce système a été développé par Boeing pour fournir l'accès à Internet haut débit aux passagers en cabine. Le débit proposé est de 5 Mbps en réception (lien aller) et 1 Mbps en émission (lien retour). Le système CCB opère en bande Ku (14,0-14,5 GHz pour le lien montant et 11,2-12,75 GHz pour le lien descendant). Le 17 août 2006, Boeing a annoncé l'abandon de ce service de communication haut débit à bord [\[CCB-2\]](#). Les raisons de cet échec relèvent principalement de l'exploitation commerciale plutôt que de la technique. Connexion By Boeing a démontré que l'utilisation de systèmes commerciaux par satellite pour les services APC est réalisable mais le coût d'utilisation final doit être maîtrisé. De plus en plus de projets continuent d'avancer sur les communications embarquées [\[AirCell\]](#) [\[OnAir\]](#) [\[MOWGLY\]](#).

L'OACI a autorisé le 19 juin 2007 l'introduction de systèmes de téléphonie mobile à bord des avions [\[ICAO 07\]](#). Un certain nombre de projets se sont mis en place pour fournir les services correspondants [\[ONAIR\]](#) [\[AeroMobile\]](#). Airbus est le premier constructeur aéronautique qui a reçu l'autorisation de l'Agence Européenne de Sécurité Aérienne (AESA) pour le GSM à bord afin de permettre d'envoyer/recevoir les appels/données/emails durant le vol. La société OnAir a été créée dans ce contexte ; OnAir est une filiale du constructeur aéronautique Airbus et du leader mondial d'applications pour le transport aérien SITA. Elle est aussi membre de l'association GSM et partenaire distribution d'INMARSAT pour les services SwiftBroadband. En général, les téléphones mobiles opèrent avec une puissance élevée quand ils recherchent un réseau à partir de l'avion. Ceci augmente également les risques d'interférence avec les fréquences des systèmes embarqués et les réseaux téléphoniques terrestres. Pour résoudre ce problème, OnAir propose d'utiliser une station de base sur chaque avion qui permet d'émettre et de recevoir des appels et

les connecter au réseau GSM via un lien satellite. Cette configuration permet aux téléphones mobiles de fonctionner à une puissance plus faible (de l'ordre du milliwatt).

### **I.3 Convergence des communications aéronautiques sur un lien unique par satellite**

Pour chacun des services de communication à bord de l'avion, il existe différents systèmes disponibles ou en cours d'étude. Jusqu'à présent, ces systèmes fonctionnent d'une manière indépendante avec des infrastructures propres installées à bord et au sol. Cependant, il est avantageux d'avoir un seul système qui permette d'intégrer les différents systèmes de communication et de répondre à toutes les exigences des services ATM [SESAR] [NEWSKY]. D'une part, la capacité et la disponibilité du système pour l'ATM peuvent être augmentées par la convergence de plusieurs moyens de communication ; d'autre part, en partageant entre différents agents, les coûts de certaines applications (ex : APC) peuvent être diminués pour les utilisateurs. Néanmoins, ce principe d'intégration implique que des applications sécurisées (ex : ATC, AOC) et non sécurisées (APC) soient transmises dans un même réseau.

Les systèmes de communication par satellite sont un élément très important dans ce concept d'intégration. Ils représentent non seulement un moyen complémentaire aux systèmes terrestres pour la gestion du trafic aérien en offrant une couverture globale, mais aussi une solution prometteuse pour enrichir les services IFE (APC) grâce à la capacité significative qu'ils peuvent offrir. Jusqu'à présent, l'OACI ne permet pas encore d'utiliser des systèmes APC pour la communication ATM en raison de la sécurité et de la diversité des exigences des services en termes de performances. Pourtant, plusieurs activités récentes ont déjà montré l'intérêt et la faisabilité préliminaire d'utiliser les systèmes commerciaux qui sont consacrés aux services APC pour les communications ATM [ANASTASIA] [RAD 06]. Cependant, le développement et l'implémentation du réseau global dédié à l'ATM et l'APC restent une perspective à long terme.

L'objectif des travaux menés lors de la thèse est de proposer un système de communication par satellite qui permette de fournir à la fois de nouveaux services pour les passagers (accès à Internet, téléphonie mobile) et un canal fiable pour les services aéronautiques CNS/ATM. L'enjeu principal de cette approche est la convergence de différents flux de trafic avec des caractéristiques et les exigences de performances hétérogènes dans un lien unique par satellite.

## **I.4 Plan du mémoire**

Le mémoire est organisé en six chapitres, dont cette introduction générale est le premier.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude des services proposés à bord de l'avion. L'objectif est d'identifier les différents flux de trafic et de les caractériser. Une première partie présente un historique rapide des liaisons de données pour les services aéronautiques puis expose la définition des performances requises par les services ATS (Air Traffic Service) et AOC (Airline Operational Control) utilisés pour la navigation aérienne. Une seconde partie décrit les services de téléphonie mobile et d'accès à Internet pour les passagers. Concernant les flux hétérogènes générés par les différents services, nous proposons la modélisation des sources de trafic et sa validation avec logiciel de simulation de réseaux OPNET Modeler.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques du réseau d'accès par satellite. L'utilisation d'une ressource radioélectrique de bande Ka (20/30GHz) est d'abord proposée. Compte tenu des contraintes de propagation imposées, un panorama des techniques FMT (Fade Mitigation Technique) qui permettent de compenser les affaiblissements est présenté. Une architecture d'accès satellite, dit de référence, basée sur les normes DVB-S2/DVB-RCS de l'ETSI est ensuite proposée et les propriétés des couches physique et d'accès sont analysées.

Le quatrième chapitre aborde la conception de l'architecture du système satellite devant assurer la convergence des différents réseaux. Pour ce faire, une étude de l'architecture protocolaire de chaque réseau (ATN, GSM/UMTS et TCP/IP) est d'abord présentée. Basée sur cette étude, l'adéquation des formats de données et des méthodes d'encapsulation spécifiques à la liaison satellite est analysée.

Le cinquième chapitre est consacré à la définition de l'architecture du terminal avion. Deux approches sont proposées et analysées. La première approche est basée sur l'architecture de référence BSM (Broadband Satellite Multimedia) faisant l'objet de plusieurs documents de l'ETSI. Le terminal avion et le réseau d'accès satellite DVB-S2/RCS sont modélisés à l'aide du logiciel OPNET Modeler. L'étude des performances met en évidence la nécessité d'une amélioration de l'utilisation de la ressource et de la gestion de son partage entre flux de trafic par la mise en œuvre d'une signalisation entre couches protocolaires (interaction de type « Cross-Layer »). Une première solution est proposée et analysée. Un état de l'art du concept et des techniques « Cross-

Layer » est ensuite présenté afin de nous permettre de définir une architecture finale pour le terminal avion.

Cette architecture finale pour le terminal avion est présentée et sa mise en œuvre est détaillée dans le sixième chapitre. Ainsi, une évaluation des performances de cette troisième version d'architecture est étudiée et permet de comparer cette version finale avec les deux approches précédentes. Un modèle de simulation plus complexe est utilisé pour étudier les performances du réseau avec une charge variable (nombre d'avions partageant la même ressource satellite). Ce modèle permet également d'observer le comportement du terminal avion dans le cas d'une évolution dynamique du bilan de liaison. Les performances obtenues répondent aux objectifs fixés : convergence des différents flux de trafic sur la même liaison avec un respect des exigences de qualité de service, adaptation aux variations de capacité sur la liaison satellite.

# Chapitre II

## SERVICE A BORD

L'objectif de ce chapitre est double : il est tout d'abord de définir d'une manière formelle les performances requises pour les services à bord, y compris les services ATS/AOC pour la gestion du trafic aérien (ATM) ainsi que les services IFE pour les passagers (APC) ; il est ensuite de caractériser les trafics associés aux services proposés et de modéliser les sources de trafic correspondantes avec le logiciel de simulation OPNET.

### II.1 Services pour l'ATM

#### II.1.1 Historique

Le contrôle aérien utilise des échanges de type phonie pour l'ensemble des procédures. Les compagnies aériennes ont cependant éprouvé le besoin d'échanges de données entre les avions et le sol afin d'automatiser certaines tâches de gestion (par exemple le suivi des phases de vol par la compagnie) et d'introduire de nouveaux services (principalement liés aux services météorologiques et à la maintenance avion). La société ARINC a défini à la fin des années 1970 le système ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System). La couverture du système a été rapidement augmentée par un accord entre ARINC et SITA permettant l'échange de messages par les stations sol des deux sociétés. Le système ACARS permet l'échange de messages entre l'avion et le sol par une liaison radio de très haute fréquence (VHF : Very High Fréquence) ou par satellite. Les messages sont de type telex, c'est-à-dire que l'information est codée sous forme d'une suite de caractères (délimitation par octets).

Le système ACARS s'est imposé comme un standard de fait pour la liaison de données. Cependant, le réseau ACARS présente plusieurs inconvénients : une capacité faible, une conception ne

permettant pas une interconnexion simple, des limitations dans les formats d'échange, une absence de procédures d'authentification et de sécurité. Dans les années 1980, l'OACI a défini un concept d'architecture de réseau de télécommunication robuste pour remplacer l'ACARS. Il s'agit du réseau de télécommunications aéronautiques ATN (Aeronautical Telecommunications Network). L'ATN est une partie essentielle dans le système CNS/ATM et destiné à fournir plusieurs services de liaison de données pour les communications aéronautiques [ANNEXE 10]. Les détails de l'architecture ATN seront introduits dans le [chapitre IV](#). La principale caractéristique de l'ATN est de reposer sur une architecture de type OSI (Open Systems Interconnection, norme ISO et ITU-T) ce qui permet d'augmenter de façon importante le domaine d'application. En particulier, l'ATN doit être utilisé pour le contrôle aérien ATC (Air Traffic Control).

L'ATN permet une intégration de tous types de liaisons de données : HF (High Frequency), VHF, radar secondaire Mode-S, satellite. SATCOM (SATellite COMmunication) représente un moyen de communication à long terme. Il permet une couverture globale des services et une meilleure performance de transmission grâce à sa capacité disponible. La solution opérationnelle proposée à l'heure actuelle par l'OACI pour le SATCOM est l'utilisation des satellites INMARSAT (INternational MARitime SATellite organization) et ses supports pour le service mobile aéronautique par satellite (AMSS : Aeronautical Mobile Satellite Service). INMARSAT [INMARSAT-1] a été créé en 1979 comme une organisation internationale pour fournir les communications mobiles dans la région maritime. Aujourd'hui, INMARSAT est devenu le fournisseur principal de communications mobile par satellite à la fois pour les réseaux terrestres et maritimes mais également pour l'ATN. Six types de terminaux aéronautiques associés à des classes de service sont proposés : Aéro-H, Aéro H+, Aéro-I, Aéro-L, Mini M Aero et Aero-C, collectivement appelés « services aéronautiques classiques ». Ces systèmes aéronautiques classiques appliquent les normes et pratiques recommandées par l'ICAO (SARPs : Standards and Recommended Practices) [ATN SARPs] et permettent des communications phonie ainsi que des échanges de données fiables et sécurisées. Cependant, le débit de données fournies par ces services classiques demeure faible (10,5 Kbps maximum). La capacité des satellites INMARSAT peut être augmentée localement par l'utilisation d'autres satellites (ex. MTSAT : Multifunctional Transport Satellites).

### II.1.2 Définitions

Avant de présenter les différents types de services dans cette partie, il est nécessaire de distinguer deux termes de base : le service et l'application.

- Le service correspond aux transactions qui s'appuient sur une ou plusieurs applications avec une mission opérationnelle spécifiquement définie. Par exemple : ATIS (Automatic Terminal Information Service) est un service automatique de diffusion qui permet aux pilotes de recevoir en continu des informations sur les aéroports les plus fréquentés.
- L'application correspond à l'ensemble des fonctions qui permettent et gèrent les transactions de communication nécessaires afin d'assurer les services. Par exemple : l'application CPDLC (Controller Pilot Data Link Communications) qui permet les échanges d'informations entre pilotes et contrôleurs.

Plus précisément, comme montré par la **Figure II-1**, le service représente une des réalisations des applications ; dans les applications, un certain nombre de messages sont retrouvés et permettent aux services d'opérer dans le domaine d'application **[DTI 00]**.

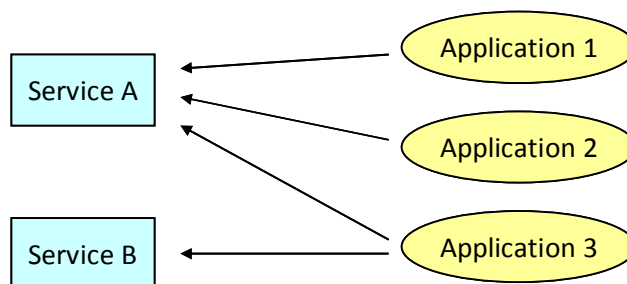


Figure II-1 : Relation entre le service et l'application.

### II.1.3 Différents types de services de communication

Les services de communication ATM se composent principalement de deux grandes catégories :

- **Les services ATS** (Air Traffic Services) **[ANNEXE 10]** sont des services qui servent au contrôle de la circulation aérienne (ATC : Air Traffic Control). Ils sont utilisés pour empêcher les abordages entre avions, éviter les collisions entre les avions sur l'aire de manœuvre de l'aéroport et les obstacles, etc. Le service ATIS que nous avons mentionné précédemment est un exemple de ce type de service.

Les services ATS peuvent être supportés par plusieurs applications. Les deux types d'application datalink introduits dans le système FANS qui permettent les services ATS sont :

**ADS-A**, également connu sous le nom de **ADS-C** (Automatic Dependant Surveillance - Addressed/Contract) est une application utilisée pour surveiller automatiquement la position réelle de l'avion par des communications point à point. Suite à des requêtes envoyées par les contrôleurs appelées les « contrats », plusieurs informations comme la position avion, les intentions de vol, etc. sont récupérées depuis les calculateurs bord et sont envoyées à intervalles réguliers vers le sol. Par contre, à cause des durées de mises à jour pour les informations, l'ADS-C est généralement utilisé dans le cas où le radar classique n'est pas disponible (ex : régions océaniques).

**CPDLC** est une application qui permet les communications entre les pilotes et les contrôleurs par un système de messagerie (voir la [Figure II-2](#)). Ces messages sont basés sur des textes courts, instantanés avec certaines de commandes (ex : monter ou descendre à tel niveau). Les messages sont codifiés et envoyés avec des procédures de bouclage qui assure l'envoi et réception des messages. L'utilisation du CPDLC permet de désencombrer les fréquences actuelles (ex : HF, VHF) pour les communications vocales.



Figure II-2 : Interface graphique de l'application CPDLC.



- **Les services AOC** (Aeronautical Operational Control) [ANNEXE 10] sont dédiés aux compagnies aériennes et sont nécessaires à l'exercice de l'autorité sur le commencement, la continuation, le déroutement ou l'achèvement du vol pour des raisons de sécurité, de régularité et d'efficacité. Par exemple : le service WXGRAPH (Graphical Weather Information) permet d'envoyer des informations de météo à l'avion, ces informations sont affichées sous forme de graphique.

#### II.1.4 Une étude prospective : le COCR

La définition et la normalisation des services opérationnels devant être assurés par l'ATN ne sont pas immédiates. En effet, d'une part, les services doivent être rendus de façon homogène au niveau régional ainsi que mondial. D'autre part, la tendance à reproduire les services vocaux par le datalink va conduire à une divergence entre les systèmes impliqués, ce qui entraîne une hétérogénéité dans l'implémentation. Récemment, l'organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne (EUROCONTROL) et l'administration de l'aviation civile aux Etats-Unis (FAA) ont proposé conjointement un guide appelé COCR (Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System) [COCR 2.0]. Ce guide est une référence technique qui identifie les services opérationnels et leurs exigences et sera appliquée pour évaluer les performances du futur système radio FRS (Future Radio System).

Dans le COCR, la définition des services opérationnels et leurs exigences de performances sont exprimées sur deux phases principales (voir Figure II-3). Dans la première phase (Phase 1), les communications vocales sont essentielles pour l'ATM et les communications des données s'appuient sur les services datalink existants ou émergents. A partir de 2020, la deuxième phase (Phase 2) représente une nouvelle façon d'utiliser les communications datalink : les transmissions de données seront le moyen principal pour l'ATM et un ensemble de nouveaux services datalink seront introduits pour remplacer ou compléter ceux de la Phase 1. Dans notre étude, nous nous concentrons sur les services datalink à moyen terme, c'est-à-dire à la Phase 1.

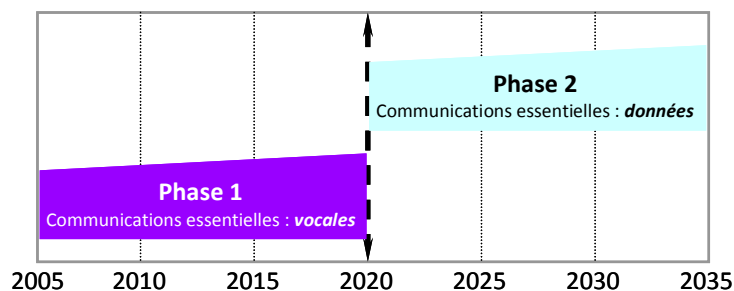


Figure II-3 : Définition des phases dans le COCR.

Les services opérationnels introduits dans le COCR sont particulièrement concentrés sur les communications de données. Pour chaque période (Phase 1 ou 2), un certain nombre de services ATC/AOC sont définis et activés par phase de vol. Cinq domaines d'espace aérien qui correspondent aux phases de vol sont spécifiés et résumés dans le **Tableau II-1** :

Domaine opérationnel	Définition dans le COCR
APT (AirPorT)	Zone cylindrique de 10 miles de diamètre et d'une hauteur ~5000 pieds dont la base est l'aéroport
TMA (Terminal Manoeuvring Area)	Zone de rayon 50 nautiques (Nm) dont le centre est l'aéroport, et sur une hauteur comprise entre 5000 pieds et FL245. Les zones de départ et d'arrivée sont considérées identiques dans le COCR (sauf pour le sens du vol)
ENR (EN Route)	Espace continental ou national qui entoure le domaine TMA sur une altitude de FL245 jusqu'à FL600.
ORP (Oceanic, Remote, Polar)	Espace comme le domaine ENR mais pour des régions non habitées (océans, pôles, etc.)
AOA (Autonomous Operations Area)	Nouveau domaine (Phase 2) associé à des opérations autonomes pour les aérodromes pouvant opérer sans ATC

Tableau II-1 : Définition des domaines d'espace aérien dans le COCR.

### II.1.5 Performances requises

Dans le domaine aéronautique, les procédures et les méthodes pour déterminer les exigences de performances d'un système ou d'un service sont appelées l'OPA (Operational Performance Assessment). Conforme aux **[RTCA-189]** et **[EUROCAE ED-78A]**, dans le COCR, l'OPA détermine les exigences de performances à partir du concept de type RCP (Required Communication Performance). Le type RCP est exprimé sous forme d'un ensemble de paramètres comme la disponibilité, l'intégrité, etc. pour qualifier les performances. Basé sur ce type, le RCP permet de déterminer le cadre opérationnel des performances de communication. Le RCP est défini

conformément aux besoins opérationnels et aux exigences de sécurité, il est indépendant de la technologie utilisée. Deux composants essentiels sont spécifiés concernant les exigences de performance : Performance Humaine et Performance Techniques de Communication Requise (RCTP: Required Communication Technical Performance). Dans cette thèse, nous ne considérons que la partie technique.

Comme mentionné précédemment, le type RCP est exprimé sous la forme d'un ensemble de paramètres pour qualifier les performances des transactions des communications, ces différents paramètres et leurs définitions sont montrés dans le **Tableau II-2 [EUROCAE ED-78A]** :

Paramètre		Définition
Durée maximale de la transaction	$ET_{RCP}$	La durée maximale d'une transaction après laquelle les parties homologues doivent passer à une autre procédure.
Durée de 95% des transactions	$TT_{95}$	Durée avant laquelle 95% des transactions sont terminées
Continuité	$C_{RCP}$	La probabilité que la transaction soit terminée avant sa durée maximale en supposant que le système de communication est disponible au début de la transaction
Disponibilité	$A_{RCP}$	La probabilité que le système de communication entre les deux parties soit en service lorsqu'il est sollicité
Disponibilité	$A_{provision}$	La probabilité que des communications avec tous les avions de la zone soient disponibles
Intégrité	$I_{RCP}$	Le pourcentage de transactions réalisées sans erreur non détectée

Tableau II-2 : Paramètres et leurs définitions du RCP.

Dans **[EUROCAE ED-78A]**, au lieu de définir un type de RC(T)P pour chaque transaction, la procédure est simplifiée par le regroupement des transactions en grandes catégories (ex : Planification, Stratégique, Tactique). Le type RC(T)P pour chaque catégorie représente un type global de RCP pour un espace aérien à partir de la transaction la plus contraignante à assurer.

Par contre, dans le COCR, pour avoir le type de RCTP plus précis, les performances requises sont définies par service pour un espace aérien spécifié. Cette définition est basée sur les exigences bout en bout du RCTP en tenant compte tous les segments du réseau global (ex : le réseau terrestre, le système terminal embarqué, etc.). Par ailleurs, en ce qui concerne le futur système radio (FRS), une frontière est introduite pour distinguer la partie FRS dans tous les composants du réseau global. En d'autres mots, cette borne introduite dans la pile de protocole de

communication est considérée comme une interface logique séparant le sous réseau radio FRS du reste du réseau. D'un point de vue physique, ces points de frontière sont situés dans le routeur sol et le routeur bord. Une illustration de cette frontière FRS dans les différentes architectures de réseaux est montrée dans la **Figure II-4**. Les détails d'architectures seront présentés dans le **chapitre IV**.

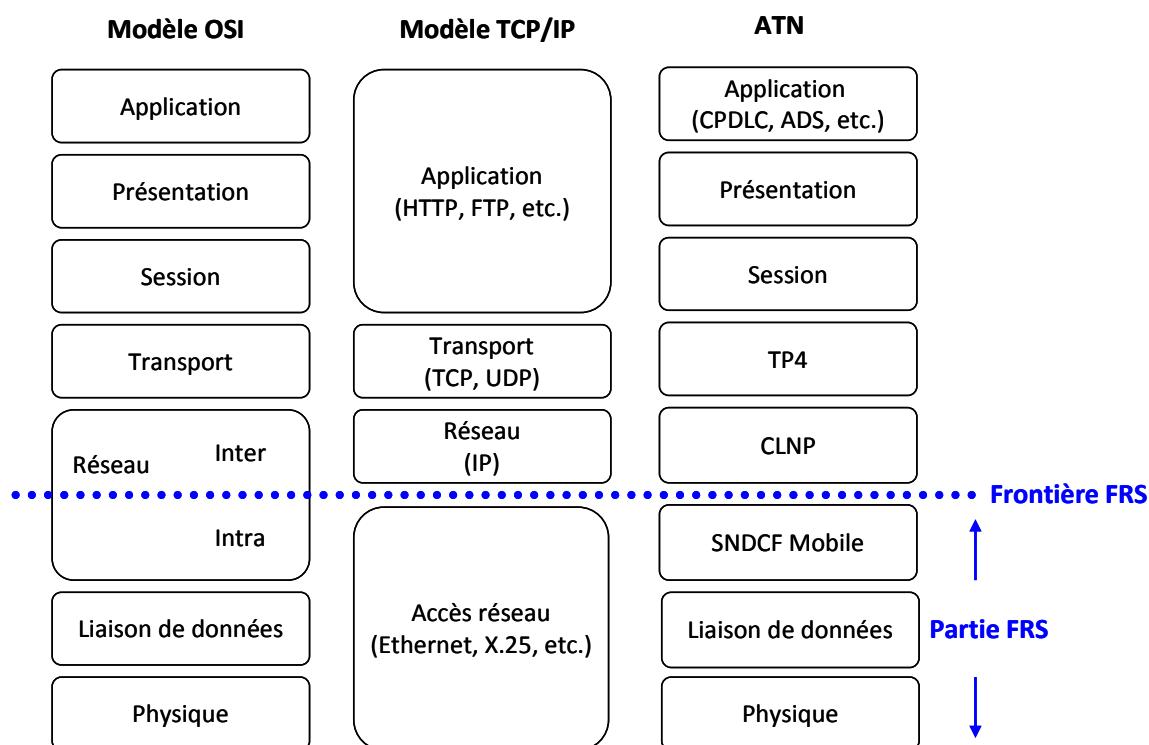


Figure II-4 : Définition du FRS (Futur Système Radio) dans le COCR.

Les performances requises pour les services ATS et AOC (partie FRS) sont définies selon une hypothèse du pourcentage de répartition du RCTP global. Les valeurs sont listées dans les **Tableau A- 1** et **Tableau A- 2** de l'annexe A et les exigences les plus contraignantes pour les communications air-sol point à point sont montrées dans le **Tableau II-3** :

Type de service	Phase	TT <sub>95</sub> – one way (seconde)			Intégrité	Disponibilité
		TMA	ENR	ORP		
ATS	1	3.8	3.8	26.5	5.0E-6	0.9995
	2	0.74	0.74	5.9	5.0E-10	0.9999999995
AOC	1+2	13.6	13.6	26.5	5.0E-10	0.9995

Tableau II-3 : Exigences de performances les plus contraignantes définies dans le COCR.

A l'évidence, les exigences de disponibilité ne peuvent être satisfaites avec un seul type de liaison (par exemple satellite), une combinaison de plusieurs liaisons est nécessaire (par exemple satellite et HF).

### II.1.6 Service mobile aéronautique par satellite

Au niveau opérationnel, l'OACI a produit des documents normatifs présentant les standards et pratiques recommandées (SARP : Standards and Recommended Practices) qui concernent tous les aspects techniques et opérationnels dans le domaine de l'aviation civile. En ce qui concerne les systèmes AMSS (Aeronautical Mobile Satellite Service) pour les communications aéronautiques par satellite (SATCOM), celles-ci sont présentées dans le volume III de l'annexe 10 du SARP [\[ANNEXE 10\]](#).

Le système AMSS comprend la station terrienne d'avion (AES : Airborne Earth Station), la station terrienne au sol (GES : Ground Earth Station) et le satellite géostationnaire. Dans la recommandation de l'annexe 10, plusieurs canaux physiques sont définis comme montrés dans la [Figure II-5](#). Les canaux P, T et R sont dédiés aux données et à la signalisation, les canaux C sont des canaux de type circuits utilisés pour la phonie.

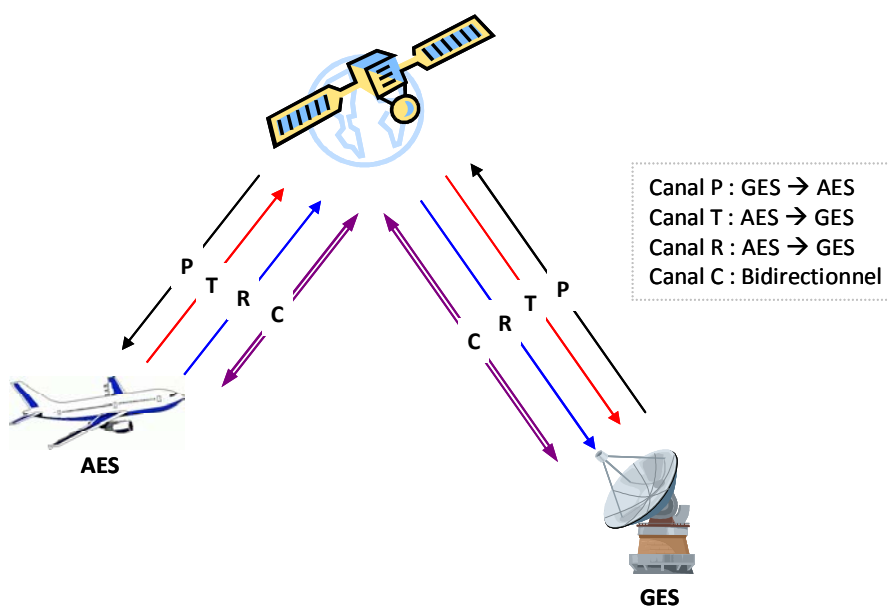


Figure II-5 : Différents canaux du system AMSS.

- **Canal P** : canal utilisé pour la liaison du sol vers l'avion entre le GES et tous les AES correspondants, servant à transmettre continuellement des données de signalisation et les données d'utilisateurs. Il est aussi utilisé pour fournir des informations aux autres canaux.
- **Canal R** : canal à accès aléatoire (Aloha discrétisé) utilisé pour la liaison du bord au sol et aussi pour les demandes du canal T.
- **Canal T** : canal à accès multiple par répartition dans le temps (TDMA : Time Division Multiple Access) en mode réservation, utilisé à partir de l'avion seulement pour transmettre du bord au sol les messages plus longs. La GES réceptrice réserve des créneaux de temps pour les transmissions demandées par les AES, selon la longueur du message. L'AES émettrice émet le message dans les créneaux de temps réservés, selon sa priorité.
- **Canal C** : canal bidirectionnel, généralement utilisé pour les communications vocales.

Basé sur ces différents canaux, les AES peuvent être classées en plusieurs niveaux selon les services fournis. Cette définition du niveau de l'AES est ensuite utilisée pour caractériser un système AMSS.

- **Niveau 1** : est capable de supporter les canaux uniques P, T et le canal R aux débits de 0,6 et 1,2 Kbps.
- **Niveau 2** : est capable de supporter les canaux uniques P, T, et le canal R aux débits de 0,6 et 10,5 Kbps.
- **Niveau 3** : est capable de supporter les services de niveau 2 plus un mode circuit du canal C à un débit de canal de 8,4 ou 21,0 Kbps.
- **Niveau 4** : est capable de supporter les services de niveau 3 plus l'exploitation d'opérations simultanées entre le canal C et les canaux R et T.

Normalement, même si les canaux de niveau 3 et 4 peuvent être employés pour la transmission de données, ils sont principalement utilisés pour les communications vocales.

Les normes SARP de l'OACI pour le service AMSS correspondent à l'état actuel des protocoles d'accès utilisés pour les satellites INMARSAT. La nécessité de pouvoir prendre en compte d'autres protocoles d'accès a conduit à la formation d'un groupe de travail NGSS (Next Generation Satellite Systems). Il est à noter que le système Iridium utilisant des satellites en orbites basses fait partie des alternatives prises en compte par l'OACI.

## II.2 Services aux passagers

Dans cette partie, nous nous intéressons aux services qui peuvent être fournis aux passagers pendant leur voyage. Conformément à ce qui est présenté dans le [chapitre I](#), le choix repose sur les deux types de services qui sont les plus souvent demandés : la téléphonie mobile et l'accès à Internet.

### II.2.1 Services pour téléphonie mobile

La téléphonie mobile a été introduite dans les années 80 pour sa première génération. Cette technique est basée sur la transmission radioélectrique dans une zone de quelques dizaines de kilomètres de rayon au maximum qui est gérée par un site cellulaire. Jusqu'à présent, l'évolution de la technologie des communications radio mobiles nous permet non seulement la communication vocale mais aussi des services supplémentaires, par exemple : la messagerie SMS (Short Message Service) pour le transfert des messages textuels courts ; la transmission des données par Internet ; la messagerie multimédia (MMS) pour l'échange des photos, d'audio et de vidéo ; etc.

La première génération de la téléphonie mobile est en mode analogique. Elle a été complètement remplacée en 1990 par la seconde génération (2G par la suite) qui est actuellement largement déployée au niveau mondial. En Europe, la norme 2G est connue sous le nom de GSM (Global System for Mobile Communications). Le GSM utilise une technologie TDMA (méthode d'accès par multiplexage à répartition temporelle). En d'autres mots, le TDMA permet à différents utilisateurs de partager une bande de fréquence à des moments différents. Par rapport à la première génération, les avantages de la 2G sont : le terminal est plus petit, la capacité est augmentée, la qualité de la voix est améliorée, la sécurité est mieux assurée. En général, la 2G est dédiée essentiellement aux services de base, c'est-à-dire le service vocal, des messages courts et la transmission de données avec un débit faible (9,6 Kbps maximum).

Pour répondre aux besoins de la transmission haut débit afin de permettre les services multimédia ainsi que l'accès à Internet, la troisième génération (3G par la suite) a été proposée. En Europe, la norme 3G utilisée s'appelle UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Elle est basée sur l'accès multiple de type W-CDMA (Wideband - Code Division Multiple Access) qui permet à plusieurs liaisons numériques de partager simultanément la même fréquence

porteuse. Grâce à cette technologie, le débit offert peut atteindre jusqu'à 2 Mbps (débit maximal, mais 384 Kbps en général) ce qui donne la possibilité d'enrichir les services offerts (MMS, Internet, etc.).

Dans le cas d'application qui nous intéresse, il paraît approprié de considérer les systèmes GSM (2G) et optionnellement les systèmes UMTS (3G). En effet, même si de nouvelles techniques avec des débits encore améliorés sont adoptées pour les futures générations de téléphonie mobile (exemple : LTE, Long Term Evolution), les utilisateurs GSM (UMTS inclus) seront majoritaires dans le monde au cours des dix prochaines années [3G Americas]. Sachant que jusqu'en 2008, la famille GSM compte environs trois milliards d'utilisateurs repartis dans 220 pays du monde (soit 88% des utilisateurs de téléphones portable), nous nous intéressons aux standards et services qui sont basés sur cette technique (2G et 3G) et les appelons la téléphonie mobile GSM/UMTS par la suite.

## **II.2.2 Services d'accès à Internet**

Aujourd'hui, l'Internet permet au public de communiquer sur un réseau informatique mondial et il est devenu un élément important pour la vie professionnelle et quotidienne. De plus, pour les compagnies aériennes, l'Internet haut débit à bord représente un marché à la croissance prometteuse à la condition que les tarifs soient abordables. Aussi, les services envisagés dépendent fortement des besoins de passagers et des coûts liés aux techniques proposées. Dans cette thèse, nous considérons deux principaux services qui sont les plus utilisés par les «internauts» : le courrier électronique (Email) et le World Wide Web (WWW).

## **II.2.3 Qualité de service requise**

Les exigences de performance des services multimédia sont définies par les différents groupes de normalisation comme ITU, ETSI et 3GPP. Dans ces recommandations, les paramètres utilisés pour évaluer les performances sont précisés. Les limites de ces critères sont exprimées d'une manière générique et indépendamment de la technique retenue.

Trois paramètres principaux sont généralement utilisés pour caractériser la qualité des services multimédia:



- **Délai** : représente le temps écoulé pour un service donné, entre l'envoi des informations par un émetteur et la réception par le(s) destinataire(s). Ce délai correspond au délai de transmission plus le délai de propagation le long du réseau et les délais introduits par les files d'attente dans les éléments intermédiaires (ex : Routeurs/Switches).
- **Gigue** : désigne la variation du délai de transfert de l'information. Elle est principalement due à l'acheminement des paquets dans les nœuds intermédiaires du réseau. Ce paramètre est souvent utilisé pour vérifier la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. Pour les services très exigeants en termes de gigue, on utilise parfois un buffer pour re-synchroniser les données.
- **Taux de perte** : correspond au pourcentage des paquets perdus durant leurs transmissions par rapport au nombre total des paquets envoyés par l'émetteur. Ces pertes sont le plus souvent causées par les congestions dans le réseau.

Les exigences de performance des services multimédia ainsi que la téléphonie mobile GSM/UMTS en fonction des trois critères mentionnés ci-dessus sont exposées dans le [Tableau II-4 \[ITU G.1010\]](#) :

Application		Performance Requite		
		Délai unilatéral	Gigue	Taux de perte
Téléphonie Mobile GSM	Communication vocale	< 150ms (préférable) < 400ms (limite)	< 1ms	< 3% (taux de perte de paquets)
	Email	< 4s	/	0
Internet	WWW	< 4s/page	/	0

Tableau II-4 : Exigences de performances pour les services aux passagers.

### II.3 Modélisation des sources de trafic

La modélisation des sources de trafic est une étape fondamentale pour évaluer la performance du système. Ces sources doivent permettre de générer des flux de paquets répondant à des caractéristiques précises. Dans cette partie, trois sources de trafic sont proposées. Concernant le trafic cockpit des services ATS/AOC, la modélisation repose sur les hypothèses introduites dans le COCR, il s'agit dans ce cas de modéliser une source par avion. Par contre pour les services GSM/UMTS et Internet cabine, les deux flux sont considérés comme des flux agrégés par avion :

effectivement pour l'un comme pour l'autre il est nécessaire de considérer que compte-tenu du nombre d'utilisateurs, plusieurs connexions sont ouvertes simultanément. Plusieurs paramètres de ces 3 modèles de source (par exemple : taille de message, nombre d'utilisateurs, etc.) pourront ensuite servir de paramètres d'entrée des simulations afin d'évaluer les performances globales du système dans différentes conditions.

### II.3.1 Source de trafic cockpit

Pour modéliser le flux de paquets ATS/AOC, nous adoptons le même principe que le COCR, qui est basé sur deux ensembles d'hypothèses :

- Hypothèses sur l'environnement et le mode d'opération : ils décrivent le mode d'utilisation des services dans le contexte opérationnel. Ces hypothèses sont : la fréquence d'utilisation de service, les caractéristiques moyennes des vols, etc. Par exemple, pour le service ACL (ATC clearance) qui permet l'envoi de la clairance par le contrôleur vers le pilote et de la requête par le pilote vers le contrôleur, dans le domaine opérationnel ENR, sa fréquence d'utilisation est 5 fois par domaine pour chaque avion.
- Hypothèses sur l'implémentation de service : il s'agit des hypothèses sur le mode de communication pour chaque service et de leurs caractéristiques d'implémentation. Ces hypothèses sont : le mode de communication (en point à point ou en diffusion), la quantité et la taille des messages, etc. Nous restons toujours sur l'exemple de service ACL qui fonctionne en point à point, en lien du bord au sol, 2 messages de 93 octets sont envoyés à chaque utilisation du service.

Les détails de ces hypothèses sont donnés dans la référence COCR. Un travail d'analyse est nécessaire afin d'extraire les informations pertinentes pour notre système. Ainsi, en ce qui concerne la communication par satellite, certaines adaptations et simplifications doivent être prises en compte (voir [Annexe A](#)). Le trafic cockpit concerne principalement les services qui sont les plus appropriés pour les transmissions par satellite. Ceci signifie que les communications AIR-AIR (par exemple : les échanges d'informations de navigation entre les avions en utilisant l'ADS-B) sont exclus dans cette étude. Le domaine APT n'est pas pris en compte car les services qui relèvent de ce domaine sont généralement plutôt supportés par une infrastructure terrestre (par ex : VHF, IEEE 802.16, etc.) pour des raisons économiques. Par ailleurs, le domaine AOA n'est pas non plus considéré car il n'est applicable que pour la Phase 2 ([Figure II-3](#)). Conformément à la

méthodologie recommandée dans le COCR, pour modéliser un fonctionnement à très forte charge, nous prenons l'hypothèse que le trafic cockpit (ATS/AOC) de données, par opposition à la voix, remplit pleinement sa capacité.

La source de trafic cockpit est ensuite modélisée sous forme de processus stochastiques, à l'aide du logiciel de simulation OPNET Modeler ([Annexe D](#)). Les paramètres d'entrées sont des extraits des hypothèses du COCR en tenant compte des simplifications mentionnées précédemment. Le trafic modélisé concerne au flux de communications point à point pour les services ATS/AOC dans les domaines TMA, ENR et ORP. Les services du domaine ORP et des domaines continentaux TMA/ENR sont étudiés séparément car leurs répartitions géographiques et les performances requises sont très différentes. De plus, cette source de trafic (montrée dans l'[Annexe E.1](#)) permet d'étudier collectivement ou individuellement les comportements des services ATS et AOC. La [Figure II-6](#) illustre le processus de conception qui nous permet d'obtenir le modèle retenu.

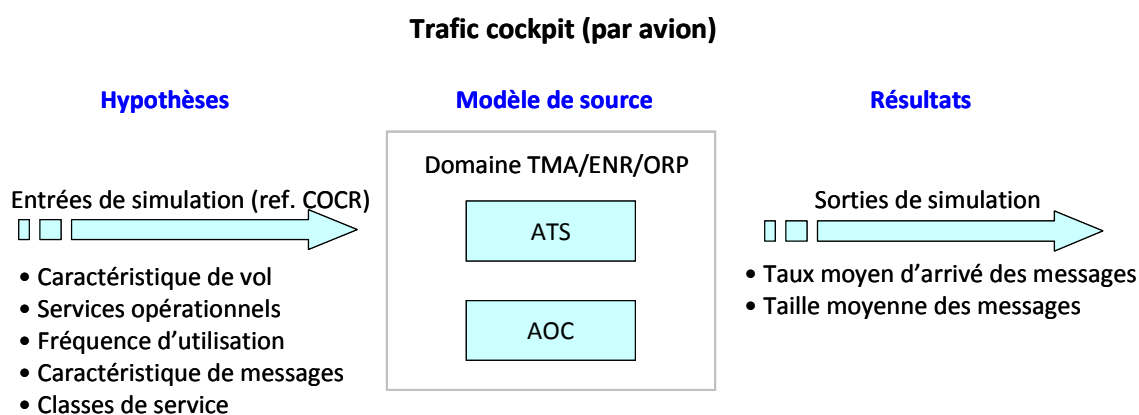
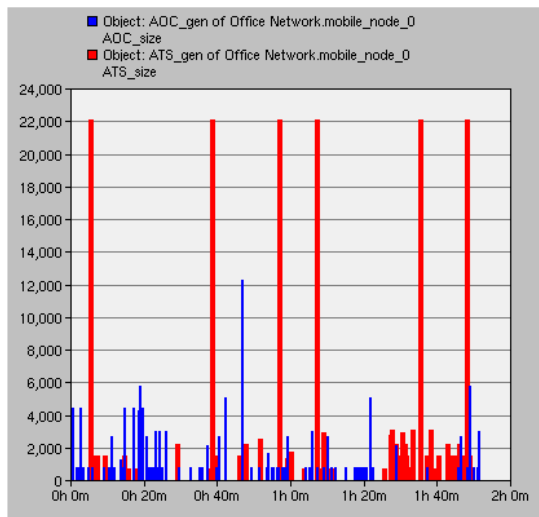
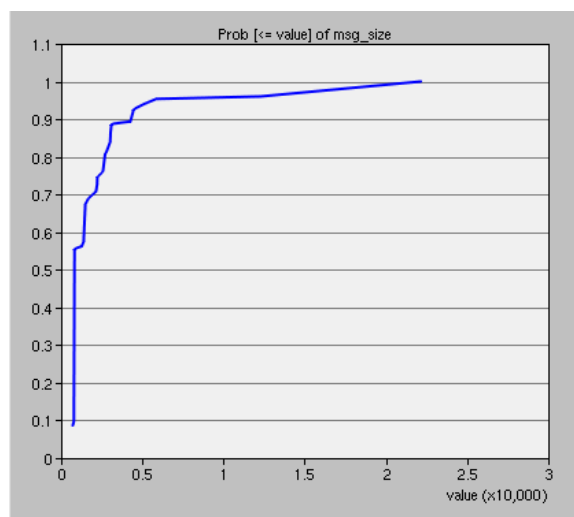


Figure II-6 : Vue globale de la modélisation de source trafic cockpit.

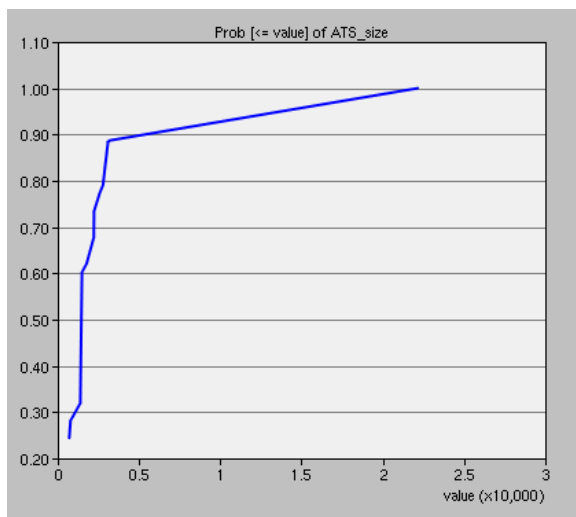
Deux profils de trafic cockpit sont capturés à partir de la simulation (sur le lien AIR-SOL : du bord au sol) et montrés dans les [Figure II-7](#) et [Figure II-8](#). Il s'agit des trafics correspondants respectivement aux domaines TMA/ENR et ORP. Dans les domaines TMA/ENR, nous définissons trois classes de service selon leurs  $TT_{95}$  demandé (COS0 : 3,8s, COS1 : 13,6s ; COS2 : 26,5s). Cependant, le choix reste très souple dans cette étude, ces trois classes peuvent être regroupées ou raffinées selon les besoins. Pour le trafic montré dans la [Figure II-8](#), une seule classe ( $TT_{95}$  : 26,5 s) de service est associée à la fois des services ATS et AOC dans le domaine ORP.



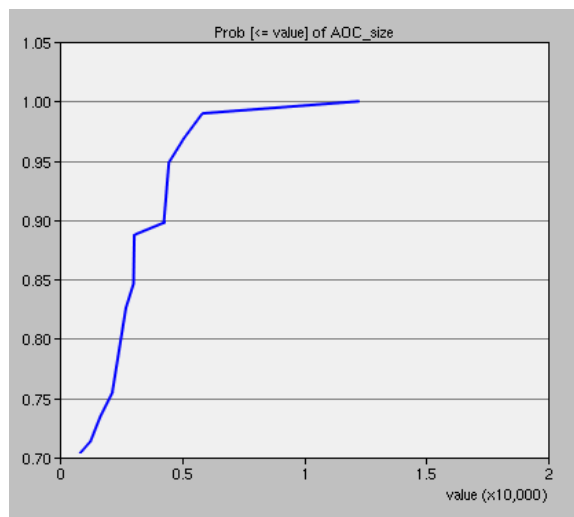
(a) : Profil de trafic (ATS/AOC).



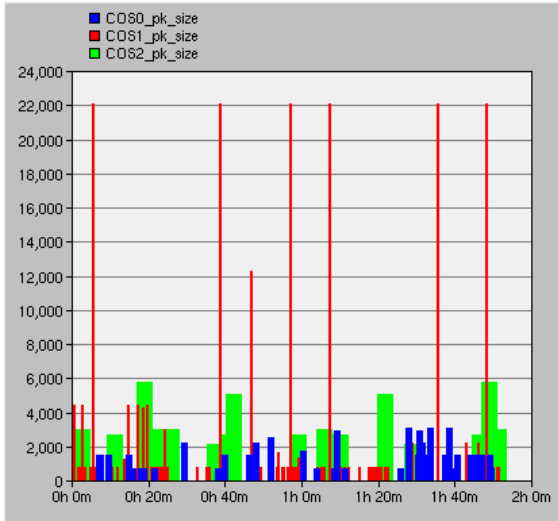
(b) : Densité de probabilité cumulée (ATS+AOC).



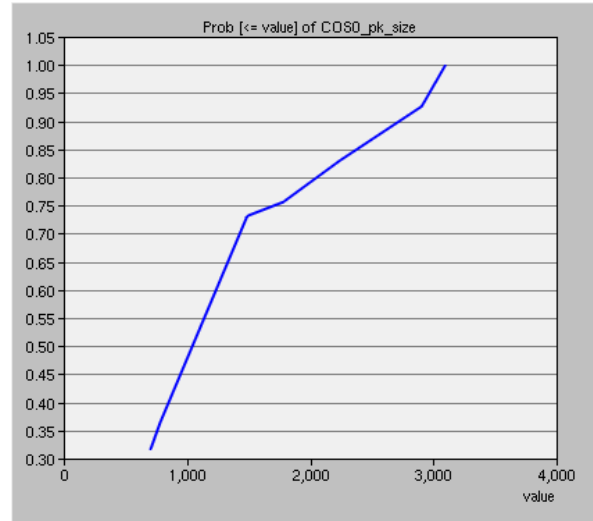
(c) : Densité de probabilité cumulée (ATS).



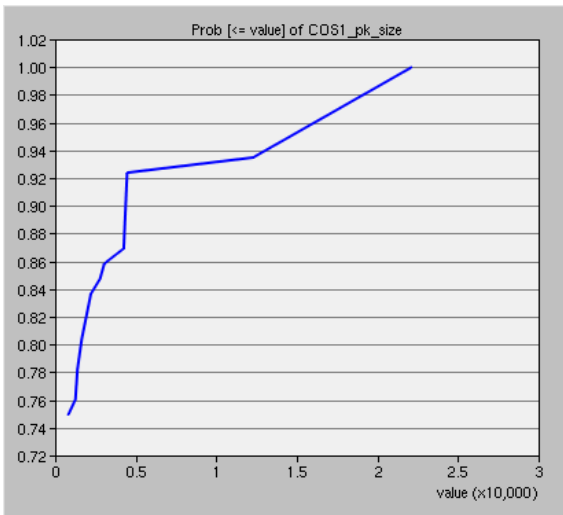
(d) : Densité de probabilité cumulée (AOC).



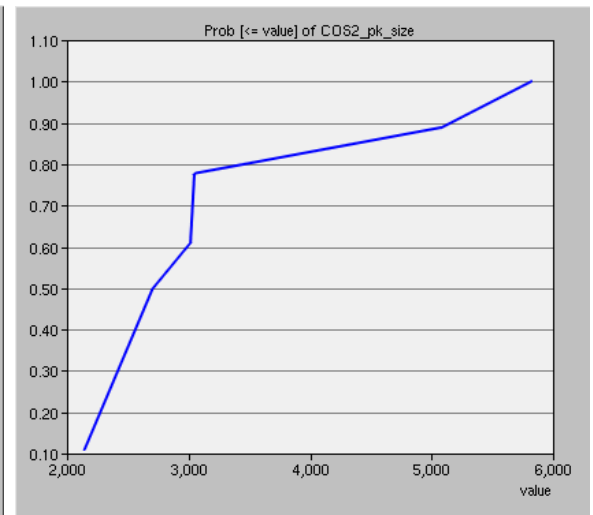
(e) : Profil de trafic (COS0/COS1/COS2).



(f) : Densité de probabilité cumulée (COS0).

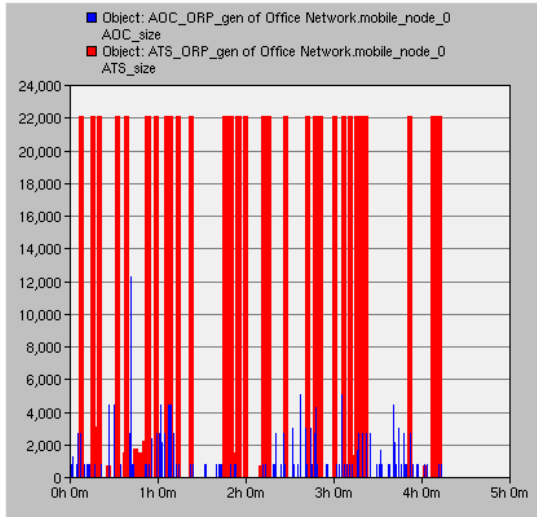


(g) : Densité de probabilité cumulée (COS1).

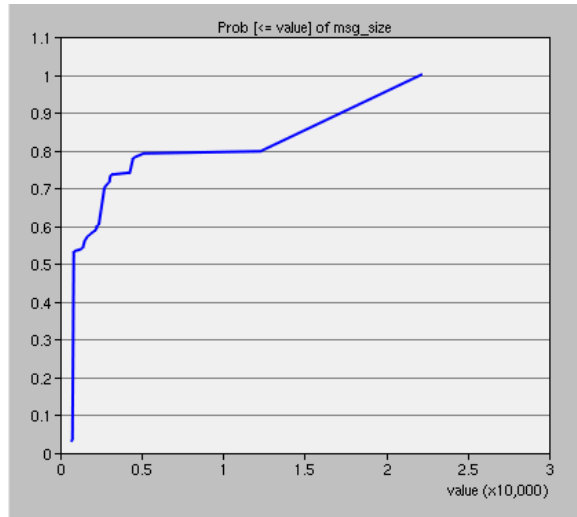


(h) : Densité de probabilité cumulée (COS2).

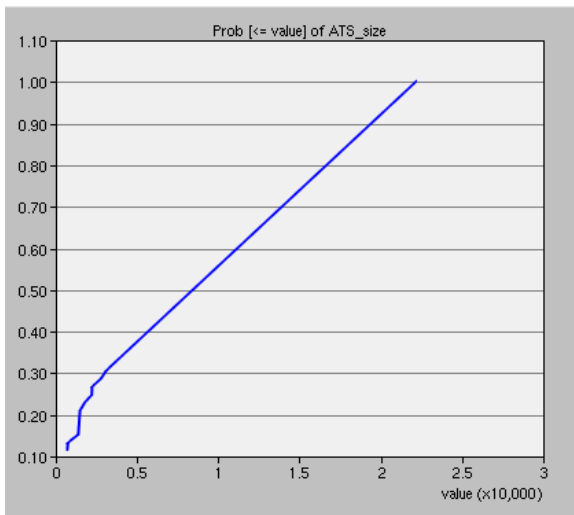
Figure II-7 : Profil de trafic cockpit (domaine TMA/ENR).



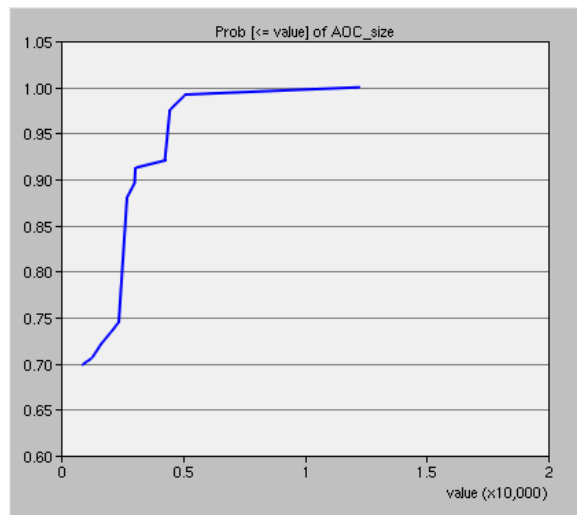
(a) : Profil de trafic (ATS/AOC).



(b) : Densité de probabilité cumulée (ATS+AOC).



(c) : Densité de probabilité cumulée (ATS).



(d) : Densité de probabilité cumulée (AOC).

Figure II-8 : Profil de trafic cockpit (domaine ORP).

Selon les résultats montrés ci-dessus, nous pouvons remarquer que le trafic cockpit est un trafic faible et sporadique (les paquets sont générés avec un rythme irrégulier). Ces propriétés rendent la conception du système plus difficile: d'une part, le système doit être capable de fournir des débits suffisamment élevés (débit crête) pour répondre aux besoins de tous les services opérationnels ; d'autre part ce même débit n'a pas besoin d'être garanti en continu compte-tenu de la sporadicité observée.

Les tableaux récapitulatifs ([Tableau II-5](#), [Tableau II-6](#)) présentés ci-dessous donnent les valeurs caractéristiques obtenues par simulation avec notre modèle pour le trafic cockpit.

Lien aller						
Caractéristiques	Global (ATS+AOC) (COS0/1/2)	ATS (COS0/1/2)	AOC (COS0/1/2)	COS0 (ATS+AOC)	COS1 (ATS+AOC)	COS2 (ATS+AOC)
Taille des paquets (min) (octets)	93	88	103	88	103	268
Taille des paquets (max) (octets)	2763	2763	1530	387	2763	727
Taille des paquets (moyenne) (octets)	306	487	209	188	337	418
Débit demandé (crête) (Kbps)	/	/	/	5.4	3.9	0.8

Tableau II-5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques services cockpit (Domaine TMA/ENR).

Lien retour						
Caractéristiques	Global (ATS+AOC) (COS0/1/2)	ATS (COS0/1/2)	AOC (COS0/1/2)	COS0 (ATS+AOC)	COS1 (ATS+AOC)	COS2 (ATS+AOC)
Taille des paquets (min)	88	88	103	/	/	88
Taille des paquets (max)	2763	2763	1530	/	/	2763
Taille des paquets (moyenne)	715	1968	198	/	/	715
Débit demandé (crête) (Kbps)	/	/	/	/	/	3.2

Tableau II-6 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des services cockpit (Domaine ORP).

### II.3.2 Source de trafic téléphonie mobile

Le trafic des services GSM/UMTS que nous considérons dans cette étude est principalement basé sur la transmission vocale. Dans cette section, deux approches pour modéliser la source de trafic téléphonie mobile sont étudiées : le modèle des sources individuelles et le modèle agrégé. Ces deux approches sont basées sur le modèle le plus populaire pour la modélisation de services orientés voix – le modèle ON/OFF [\[BRA 69\]](#).

Le modèle ON/OFF est le modèle de trafic le plus largement utilisé pour caractériser une source de voix. Il utilise un processus stochastique d'une chaîne de Markov à état discret qui permet de décrire la source à sens unique pour un appel. Cette chaîne de Markov est basée sur deux états (ou périodes) : l'état ON, représentant les temps de parole et l'état OFF correspondant aux silences. Les temps passés dans les états ON et OFF suivent une loi exponentielle décroissante de moyenne respective  $1 / \mu$  et  $1 / \lambda$ . Les cellules ou les paquets sont générés à un débit constant égal à R uniquement pendant les périodes ON.

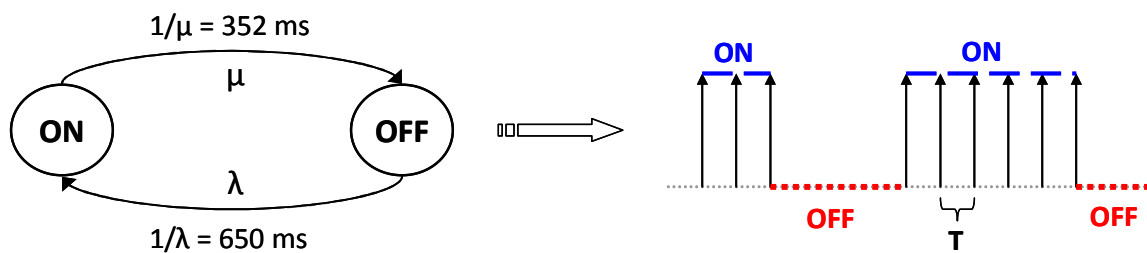


Figure II-9 : Modèle ON/OFF.

Le modèle ON/OFF montré dans la [Figure II-9](#) est caractérisé par les paramètres suivants :

- Période moyenne pour les états ON et OFF ( $1 / \mu$ ,  $1 / \lambda$ ) [[HAB 92](#)]

$$1 / \mu = 352 \text{ ms} ; 1 / \lambda = 650 \text{ ms}$$

- Taux d'arrivée des paquets pendant les périodes ON ( $1/T$ ) ; taille constante du paquet (L) et débit correspondant durant la période ON (R). Cependant, les valeurs de ces trois paramètres dépendent du réseau à étudier. Dans cette étude, nous supposons une configuration suivante (elle est détaillée dans le [chapitre IV](#))

$$1/T = 50 \text{ paquets/s} ; L = 40 \text{ octets} ; R = (1/T) * L = 16 \text{ Kbps}$$

De plus, concernant le modèle de trafic de téléphonie mobile, durant la conversation, pour coder le bruit de fond (appelé aussi le bruit de confort) et le reconstituer du côté récepteur sans que l'utilisateur s'aperçoive d'une coupure, un paquet est transmis toutes les 480 ms de la période OFF [[3GPP TS 26 103](#)].

Pour modéliser plusieurs connexions phonie ouvertes/fermées (selon un nombre d'utilisateurs), la technique retenue consiste à utiliser une agrégation de sources ON/OFF. Dans un premier temps, nous nous intéressons sur les caractéristiques d'un modèle N-sources ON/OFF. Nous appelons



« période active » le moment où une connexion est ouverte et « période idle » le moment où elle est fermée. Dans le modèle N-sources ON/OFF montré par la [Figure II-10](#), deux paramètres supplémentaires sont ajoutés [\[GRE 02\]](#).

- Le temps d'arrivée pour une connexion vocale : ce paramètre suit une loi exponentielle décroissante de moyenne  $1/\alpha$  (30 minutes).
- La durée moyenne de la connexion : ce paramètre suit une loi exponentielle décroissante de moyenne  $1/\beta$  (3 minutes).

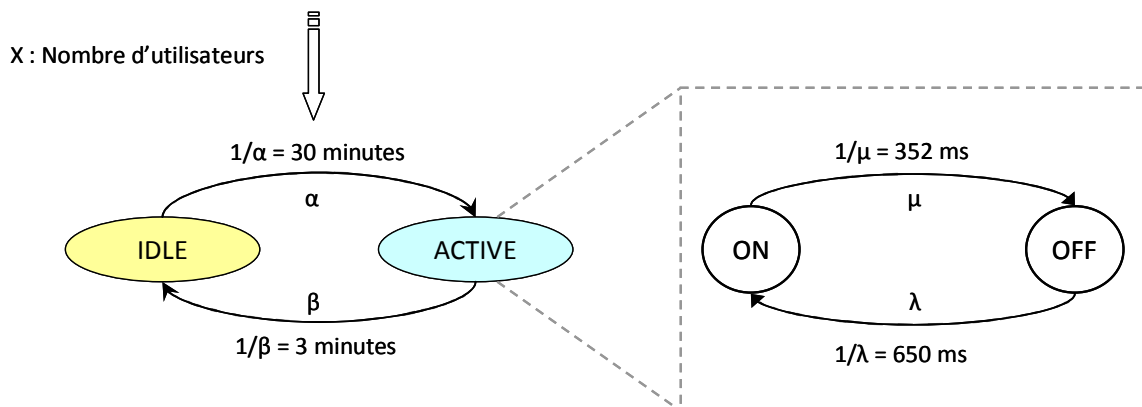
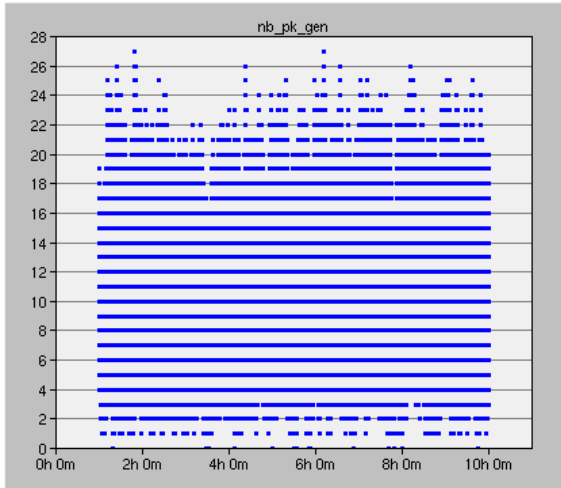
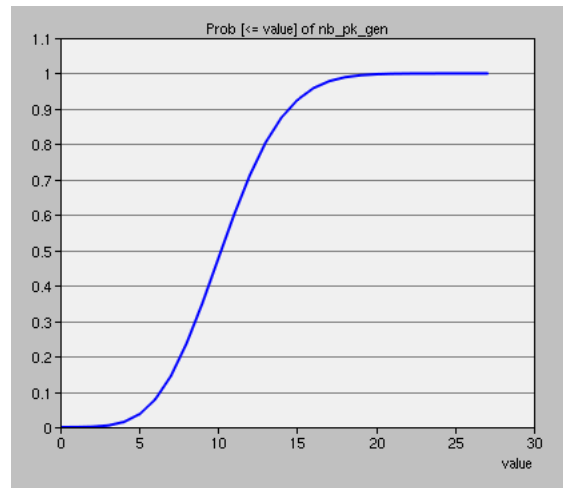


Figure II-10 : Modèle N-sources ON/OFF.

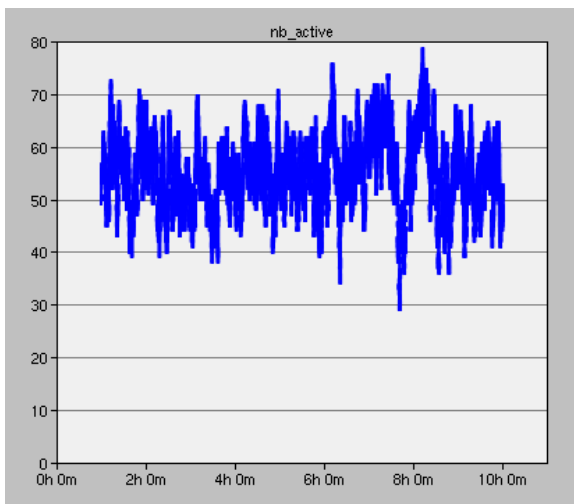
Avec ce modèle, nous modélisons ensuite, à l'aide du logiciel OPNET Modeler, un générateur de trafic (voir l'[Annexe E.2.1](#) pour plus de détails). Le trafic généré (30 Erlang) et ses caractéristiques sont montrés dans la [Figure II-11](#). La courbe (a) enregistre le nombre paquets générés toutes les 20ms, sa densité de probabilité cumulée est montrée dans (b). Nous nous intéressons également au nombre de chaînes activées à chaque moment (c). Le trafic obtenu représente donc 25% en moyenne de charge (d) pour la capacité disponible sur le canal (une bande passante de 1Mbps).



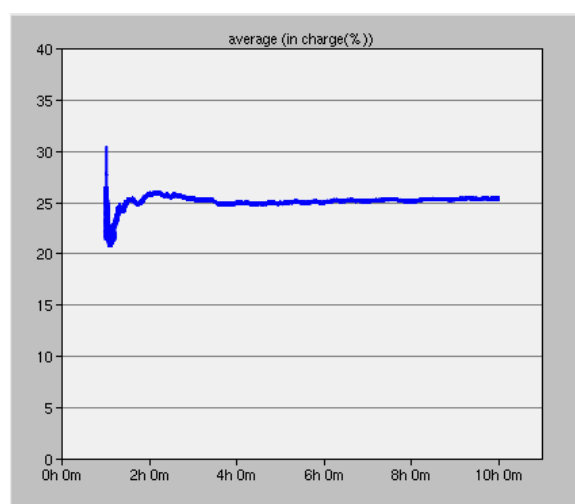
(a) : Trace (toutes les 20ms).



(b) : Densité de probabilité cumulée.



(c) : Nombre de chaînes actives.



(d) : Taux de charge du lien satellite (une bande passante de 1 Mbps).

Figure II-11 : Trafic généré - N-sources ON/OFF.

Cependant, ce générateur de trafic avec N-sources ON/OFF est un modèle très lourd (surtout pour une simulation avec un nombre important d'avions). Pour avoir une meilleure efficacité, nous décrivons dans un second temps le modèle agrégé. Ce modèle représente l'activité associée à une superposition de sources unitaires, le but est de trouver une approximation pour les sources multiples en respectant un bon compromis entre la précision et l'efficacité.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour décrire analytiquement l'agrégation de trafic ON/OFF [HEF 86] [HAS 06]. La seule base inchangée dans ces divers travaux est que l'agrégation de flux

ON/OFF peut être représentée par le flux MMPP (Markov Modulated Poisson Process). Ce modèle MMPP, qui est une extension du modèle ON/OFF, repose sur une chaîne de Markov à  $N$  états ( $N > 2$ ).

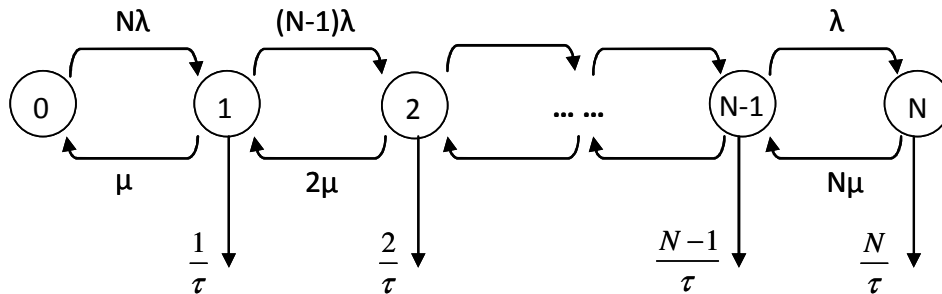


Figure II-12 : Processus de Poisson Modulé par une chaîne de Markov (MMPP).

La chaîne de Markov montrée dans la [Figure II-12](#) peut être définie en temps continu ou en temps discret. Pour le modèle en temps continu, un état correspond à un nombre de sources à l'état ON (pour le modèle ON/OFF classique, cela correspond à un débit car les paquets sont générés à un débit constant et uniquement pendant les périodes ON). A temps discret, c'est le nombre de paquets qui est représenté par un état de la chaîne de Markov. Dans notre cas, puisque les paquets ne sont pas seulement générés durant les périodes ON mais aussi pendant les périodes OFF pour coder le bruit de confort, le modèle MMPP en temps discret est plus approprié dans ce contexte et est retenu pour modéliser l'agrégation de flux téléphonie mobile.

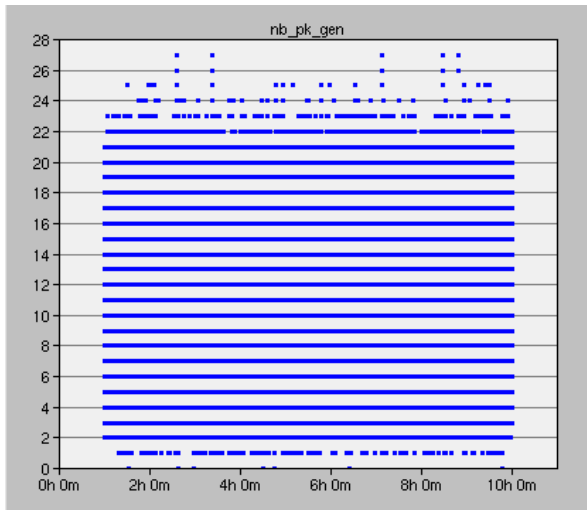
La modélisation repose sur le trafic obtenu par le générateur N-sources ON/OFF ([a](#) dans la [Figure II-11](#)), nous prenons un cycle d'échantillons de 10 heures de cette trace, ceux-ci enregistrent le nombre de paquets générés toutes les 20ms. Ensuite, nous utilisons un programme écrit en langage C pour analyser ces échantillons et définir une matrice des probabilités de transition. Cette matrice  $X$  par  $Y$  précise à chacune des intersections la probabilité d'avoir  $Y$  à un instant, lorsque à l'instant précédent il y en avait  $X$ . Le nombre d'échantillons utilisés pour définir les valeurs de cette matrice est suffisamment important pour que la matrice obtenue soit représentative ( $1.62 \times 10^6$  données sont analysées hors de période de démarrage). Un exemple de cette matrice est montré par la [Figure II-13](#). Elle fait apparaître :

- Les probabilités de transitions ascendantes
- Les probabilités de transitions descendantes
- Les probabilités de non transition

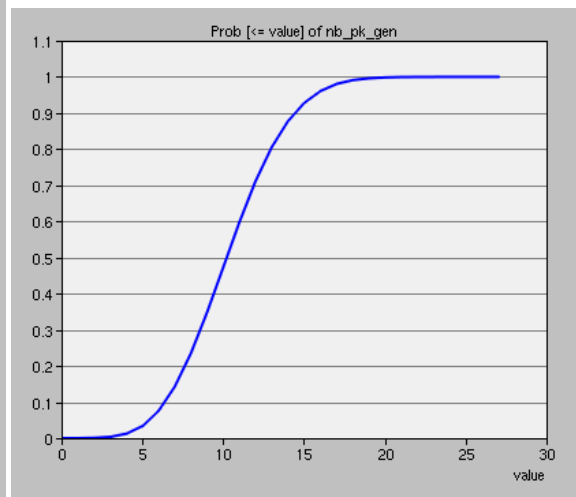
Nombre de paquet	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.83	0.16	0.01	0	0	0	0	0	0	0
1	0.08	0.78	0.13	0.01	0	0	0	0	0	0
2	0.01	0.15	0.72	0.12	0.01	0	0	0	0	0
3	0	0.02	0.21	0.66	0.1	0.01	0	0	0	0
4	0	0	0.04	0.25	0.61	0.09	0.01	0	0	0
5	0	0	0.01	0.06	0.28	0.56	0.08	0.01	0	0
6	0	0	0	0.01	0.08	0.31	0.52	0.08	0.01	0
7	0	0	0	0	0.01	0.1	0.35	0.47	0.07	0.01
8	0	0	0	0	0	0.05	0.13	0.34	0.42	0.05
9	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.6	0.2

Figure II-13 : Exemple de la matrice des probabilités de transition.

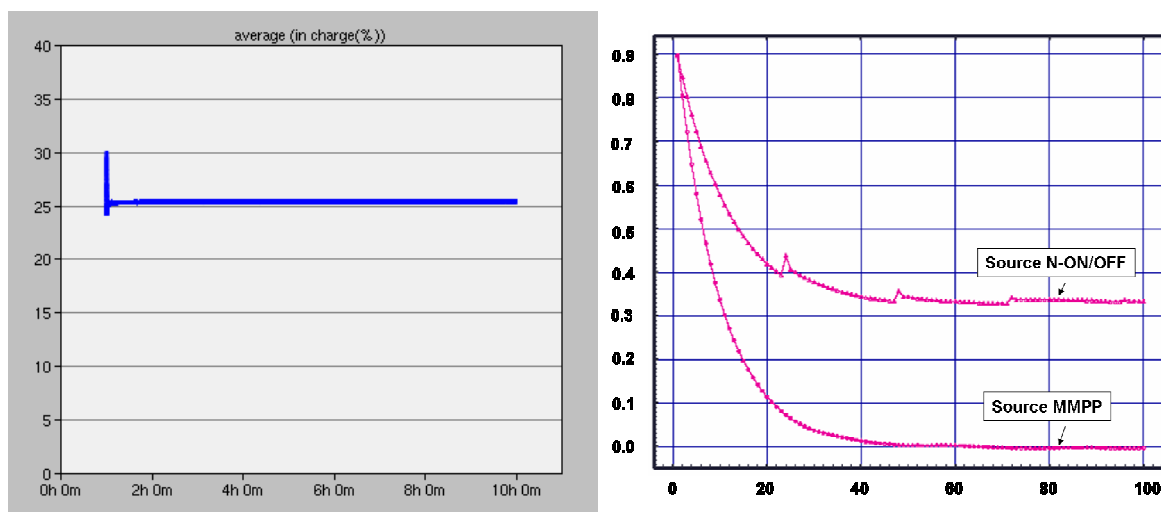
Puis en utilisant cette matrice de transition, une source agrégée est enfin modélisée pour générer le flux de téléphonie mobile (détaillée dans l'Annexe E.2.2). La courbe (a') de la Figure II-14 présente l'évolution du nombre de paquets générés toutes les 20ms. La densité de probabilité cumulée de cette trace ainsi que le taux moyen d'utilisation du lien satellite (1Mbps) sont montrées dans (b' et d'). En comparant avec les courbes b et d, nous remarquons que cette source MMPP représente une bonne approximation du trafic obtenu par les N-sources ON/OFF.



(a') : Trace de la source MMPP.



(b') : Densité de probabilité cumulée.



(d') : Taux de charge du lien satellite (une bande passante de 1 Mbps).

(1) : Courbes d'autocorrélation de la source N-ON/OFF et la source MMPP.

Figure II-14 : Trafic généré - source MMPP.

Nous avons étudié également la propriété d'auto-similarité de ces deux sources différentes (1 dans la Figure II-14). Les courbes d'autocorrélation font apparaître une décroissance polynomiale qui révèle une dépendance long terme pour le trafic généré par les N-sources ON/OFF ; et une décroissance exponentielle qui signifie une dépendance court terme pour la source agrégée MMPP. Cependant, cette différence n'impacte pas significativement les performances du système (la charge moyenne générée par les deux modèles reste la même), nous choisissons donc le modèle plus efficace en terme de simulation (MMPP) pour modéliser la source de trafic téléphonie mobile.

### II.3.3 Source de trafic Internet embarqué

Comme précisé dans la partie II.2.2, l'usage des services cabine pour les passagers dépend de plusieurs considérations et hypothèses. De plus, il n'y a pas de modèle simple et immédiat pour anticiper l'évolution du trafic à bord. Dans cette étude, au lieu de créer un modèle sophistiqué qui prend en compte toutes les hypothèses, nous proposons d'utiliser un ensemble de sources gloutonnes (« greedy ») représentant un trafic élastique qui s'adapte dynamiquement à la capacité disponible. Ces sources sont représentées par plusieurs connexions TCP « greedy ». Pour chaque connexion, à tout moment, la quantité de paquets envoyés par un émetteur sans avoir été acquittés est égale à la taille de sa fenêtre de congestion (cwnd : congestion window). Les

caractéristiques de chaque connexion TCP correspondent à une version Reno [RFC 2581] du protocole couramment utilisé dans l'Internet actuel. Reno est principalement basé sur trois algorithmes suivants :

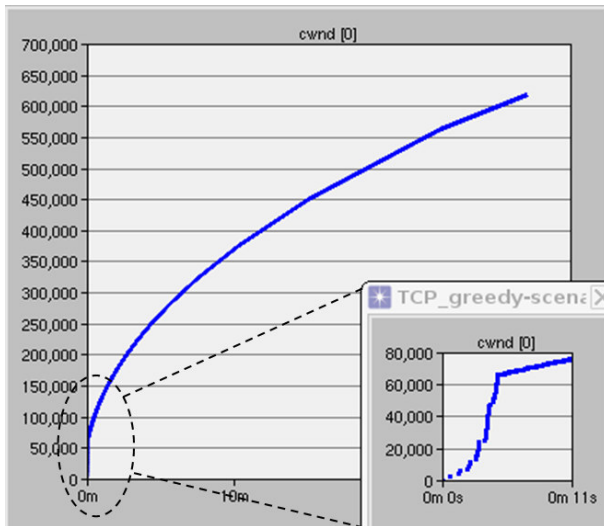
- Algorithme de démarrage lent - Slow-Start (SS)
- Algorithme d'évitement de congestion - Congestion Avoidance (CA)
- Algorithme de retransmission rapide et de récupération rapide - Fast Retransmit and Fast Recovery (FR-FR)

Le SS fonctionne soit au début de la connexion ou après l'expiration du délai de retransmission (RTO : Retransmission Time Out), en effectuant un accroissement exponentiel de la fenêtre de congestion (cwnd) pour chaque segment acquitté. Ensuite, lorsque cwnd atteint un certain seuil connu sous le nom ssthresh (slow-start threshold) ou après la phase FR-FR, TCP passe à la phase CA. L'algorithme CA permet un sondage plus prudent que SS sur la capacité disponible en augmentant linéairement la taille de la fenêtre de congestion.

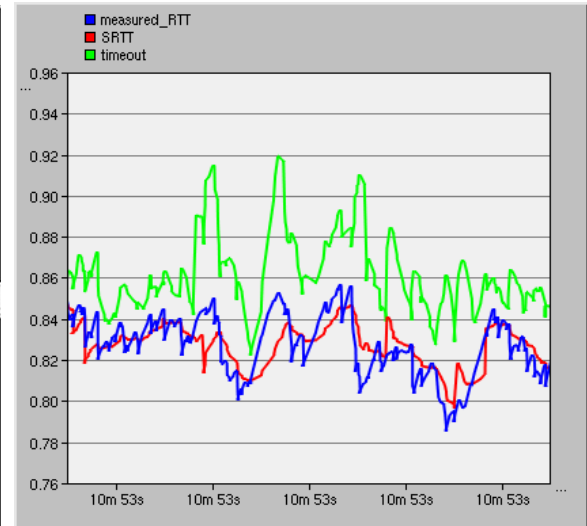
La perte de segment est gérée par TCP en utilisant un mécanisme de temporisateur de retransmission RTO. Si, à l'expiration du RTO, l'émetteur n'a pas reçu ACK pour un segment préalablement émis, TCP retransmet le segment perdu, ferme la fenêtre à 1 segment et recommence avec SS. RTO est calculé, à l'aide d'un algorithme [RFC 2988] [JAC 88], en fonction du délai aller-retour mesuré (RTT : Round Trip Time) i.e. la durée aller retour entre un émetteur et un récepteur. Si la perte est détectée par des acquittements (ACK) dupliqués (normalement 3), la fenêtre de congestion est divisée par 2, TCP retransmet le segment perdu et essaie de renvoyer des autres paquets perdus appartenant à la même fenêtre de congestion (FR-FR), CA est donc déclenché.

La source de trafic TCP greedy est modélisée à l'aide du logiciel de simulation OPNET Modeler (détaillée dans Annexe E.3). Le trafic généré par cette source dépend fortement de la politique de gestion de ressource satellite. Nous montrons ici (Figure II-15) le fonctionnement de la couche TCP. La courbe (a) montre la fenêtre de congestion pour une connexion normale (aucune perte) du TCP Reno, la taille de cette fenêtre est exprimée en octets. La relation entre le RTT mesuré, le RTT lissé et le RTO est présentée dans (b). Nous nous intéressons également à deux types de phénomènes de perte. Le premier type est une perte isolée, c'est-à-dire que la perte est provoquée d'un seul paquet. Dans ce cas (c), grâce aux ACK dupliqués, la perte est détectée, la

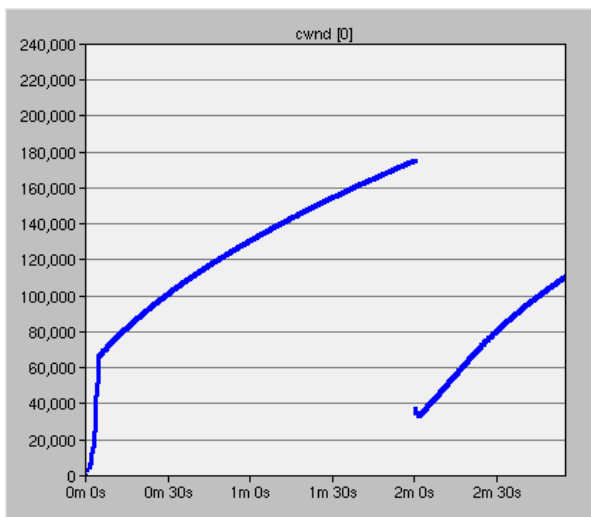
fenêtre de congestion est divisée par 2 et TCP retransmet le segment perdu et essaie de renvoyer les autres paquets perdus appartenant à la même fenêtre de congestion (FR-FR). CA est donc déclenché. Le deuxième type de perte concerne la coupure du lien (d), la cwnd est ramenée à sa valeur initiale (1 segment) et TCP se remet en mode SS. Le comportement (la taille cwnd et les numéros de séquence reçus par le récepteur) de plusieurs connexions TCP greedy (5 dans cet exemple) est montré dans (e).



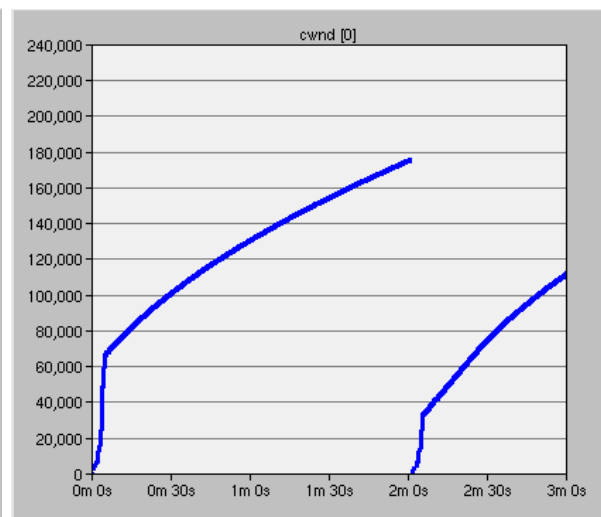
(a) : Fenêtre de congestion (cas normal).



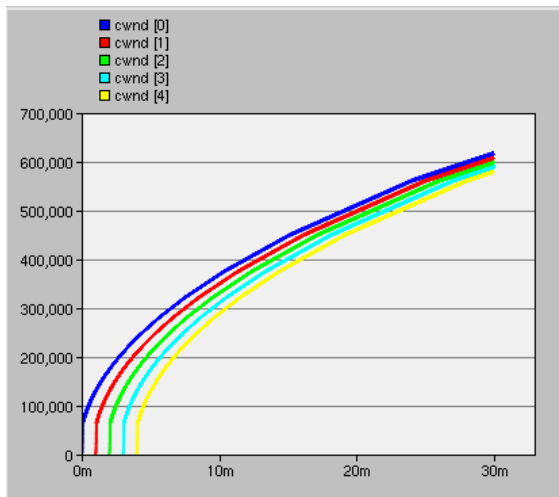
(b) : RTT mesuré, RTT lissé et RTO (seconde).



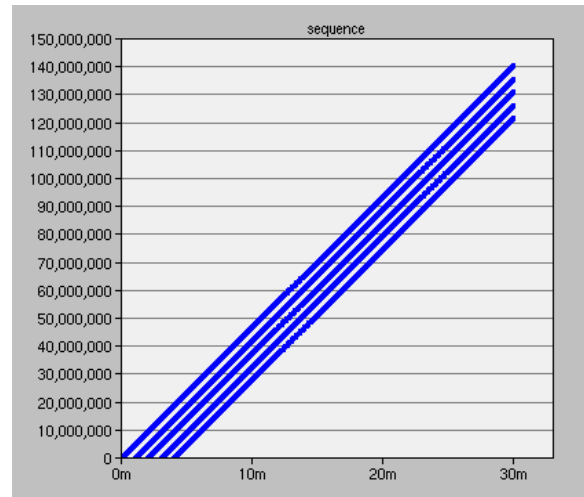
(c) : Fenêtre de congestion (perte isolée).



(d) : Fenêtre de congestion (une seconde coupure).



(e) : Fenêtres de congestion (5 connexions)



(f) : Les numéros de séquence reçus (octet).

Figure II-15 : Comportement TCP Reno - source TCP greedy.



# Chapitre III

## RESEAU D'ACCES PAR SATELLITE

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté plusieurs services cockpit ou cabine ainsi que leurs exigences en termes de performances. Le système de communication par satellite retenu doit répondre à ces besoins en performances. Nous nous intéressons donc dans ce chapitre à la partie réseau d'accès par satellite pour notre système. Tout d'abord, nous présentons l'estimation des ressources radioélectriques disponibles pour les services à bord. Ces ressources dépendent de l'attribution de fréquences, de l'efficacité spectrale de la modulation et du codage utilisé. Ensuite, un aperçu des différents types d'atténuations est exposé et un panorama des techniques pour compenser ces affaiblissements est présenté. Enfin, une architecture d'accès satellite, dit de référence, est proposée dans le cadre de l'étude et ses propriétés de couche physique sont détaillées.

### III.1 Ressources radioélectriques

#### III.1.1 Justification de l'utilisation de la bande Ka

L'allocation des fréquences radioélectriques est gérée par l'ITU (International Telecommunication Union), plus précisément par le secteur des radiocommunications (ITU-R) dans l'article 5 du Règlement des Radiocommunications. Cet article est révisé après chaque conférence mondiale des radiocommunications (WRC : World Radiocommunication Conference). La dernière mise à jour de l'article 5 a eu lieu lors de la conférence WRC en 2007 [\[ITU-A5 07\]](#).

Les bandes de fréquences sont attribuées pour les différents services d'après la division du monde en trois régions géographiques. Dans cette étude, nous nous concentrons sur l'allocation des fréquences pour les services MSS et FSS :

- **Service MSS** (Mobile Satellite Service) est un service de radiocommunication entre des stations terriennes mobiles et le satellite. Le service AMSS que nous avons présentés précédemment appartient à cette catégorie, dans ce cas, les stations terriennes mobiles sont installées à bord d'avions.
- **Service FSS** (Fixed Satellite Service) se réfère à un service par satellite, qui utilise les stations terriennes fixes.

Dans notre contexte, « User link » (entre l'avion et le satellite) correspond aux services MSS (AMSS) et « Feeder link » (entre la Gateway et le satellite) aux services FSS. Par ailleurs, pour les services MSS ou FSS, l'allocation des fréquences diffère selon le sens de liaison : la liaison montante (Earth-to-space) représente la voie vers le satellite et la liaison descendante (space-to-Earth) la voie depuis le satellite.

Une illustration du scénario de référence de cette étude (intégrant tous les termes généraux mentionnés précédemment) est donnée par la [Figure III-1](#).

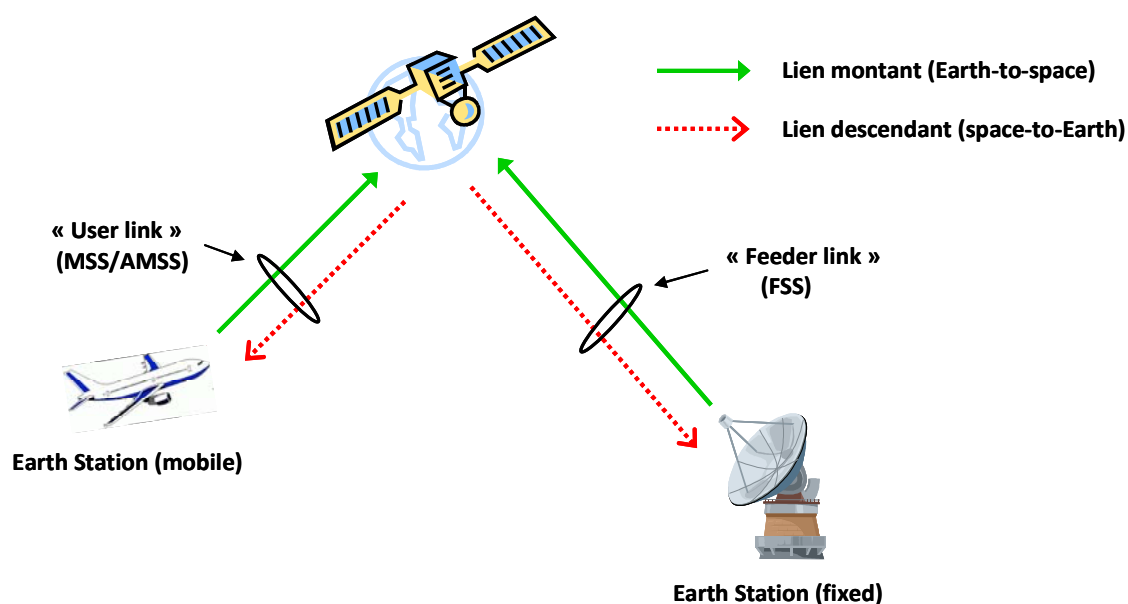


Figure III-1 : Scénario de référence (cas général).

Les bandes de fréquence allouées (zone européenne) [\[ITU-A5 07\]](#) sont résumées et montrées dans le [Tableau III-1](#) :

Bande	FSS (Fixed Satellite Service)		MSS (Mobile Satellite Service)	
	Lien montant	Lien descendant	Lien montant	Lien descendant
L			1610-1660,5 MHz 1668-1675 MHz	1518-1559 MHz (1613.8-1626.5)* allocation secondaire
S			1980-2010 MHz	2170-2200 MHz 2483-2500 MHz
C	5150-5250 MHz 5850-7075 MHz	3400-4200 MHz 4500-4800 MHz 6700-7075 MHz		
Ku	12.75-13.25 GHz 13.75-14.8 GHz 15.43-15.63 GHz 17.3-18.1 GHz	10.7 -11.7 GHz 12.5-12.75 GHz 17.7-18.1 GHz	(14,0-14,5 GHz)* allocation secondaire	
Ka	18.1-18.4 GHz 19.3-19.7 GHz 27.5-31 GHz	18.1-21.2 GHz	(29.5-29.9 GHz)* allocation secondaire 29.9-31 GHz	(19,7-20,1 GHz)* allocation secondaire 20.1 -21.2 GHz

Tableau III-1 : Bandes de fréquence disponibles pour les services AMSS (Zone européenne).

- **Bande L (1-2 GHz)** : bande utilisée actuellement par le système INMARSAT pour les services mobiles aéronautiques par satellite (AMSS). Le débit maximum fourni est égale 10,5 Kbps/canal pour les « services aéronautiques classiques » et 492 Kbps pour les services SwiftBroadband. Comme les bandes S (2-4 GHz) et C (4-8 GHz), l'utilisation de la bande L sur la zone Europe a déjà atteint la limite (saturation) pour introduire des nouveaux services.
- **Bande Ku (12-18 GHz)** : bande qui est principalement employée pour la radiodiffusion par satellite (BSS : Broadcasting Satellite Service), elle est aussi utilisée actuellement pour les systèmes d'accès Internet par satellite. Un exemple d'application de la bande Ku dans le domaine aéronautique est le système Connexion By Boeing dédié aux services pour les passagers. Cependant, dans cette bande, seulement 500MHz (en allocation secondaire) sont attribués au lien montant pour les services MSS. L'absence d'allocation sur le lien descendant pourrait être un problème en ce qui concerne la durabilité du service.
- **Bande Ka (26-40 GHz)** : le déploiement de la bande Ka pour les communications aéronautique par satellite est l'hypothèse retenue dans notre étude. Cette bande dispose d'une large bande passante attribuée en allocation primaire aux services MSS (AMSS). De plus, par rapport à la bande Ku, elle permet l'utilisation d'antennes plus petites pour un même débit ou bien, à taille équivalente, un débit plus élevé. Cependant, les signaux de cette bande sont beaucoup plus sensibles à l'atténuation atmosphérique et principalement, à la pluie. La période où

l'atténuation rend la bande de fréquence inutilisable pour la transmission est appelée « outage » (coupure), cet impact des conditions de propagation peut conduire à la réduction de la disponibilité des services de communication liés à cette bande.

### III.1.2 Propagation en bande Ka

Comme vu précédemment, avec l'utilisation de la bande de fréquences Ka, les phénomènes atmosphériques, liés à la propagation des ondes, deviennent très importantes et limitent fortement les performances du système. Ces atténuations, contribuant fortement à la dégradation des signaux satellitaires en bande Ka, sont provoquées par les gaz atmosphériques, les nuages et les précipitations. La pluie est le phénomène d'affaiblissement dominant dans les bandes de fréquence supérieure à 10 GHz (ex : Ku, Ka) provoquant des diminutions importantes de la qualité du signal. La **Figure III-2** montre un exemple de séries temporelles d'atténuation par la pluie en bande Ka (mesurées pour un point fixe au sol).

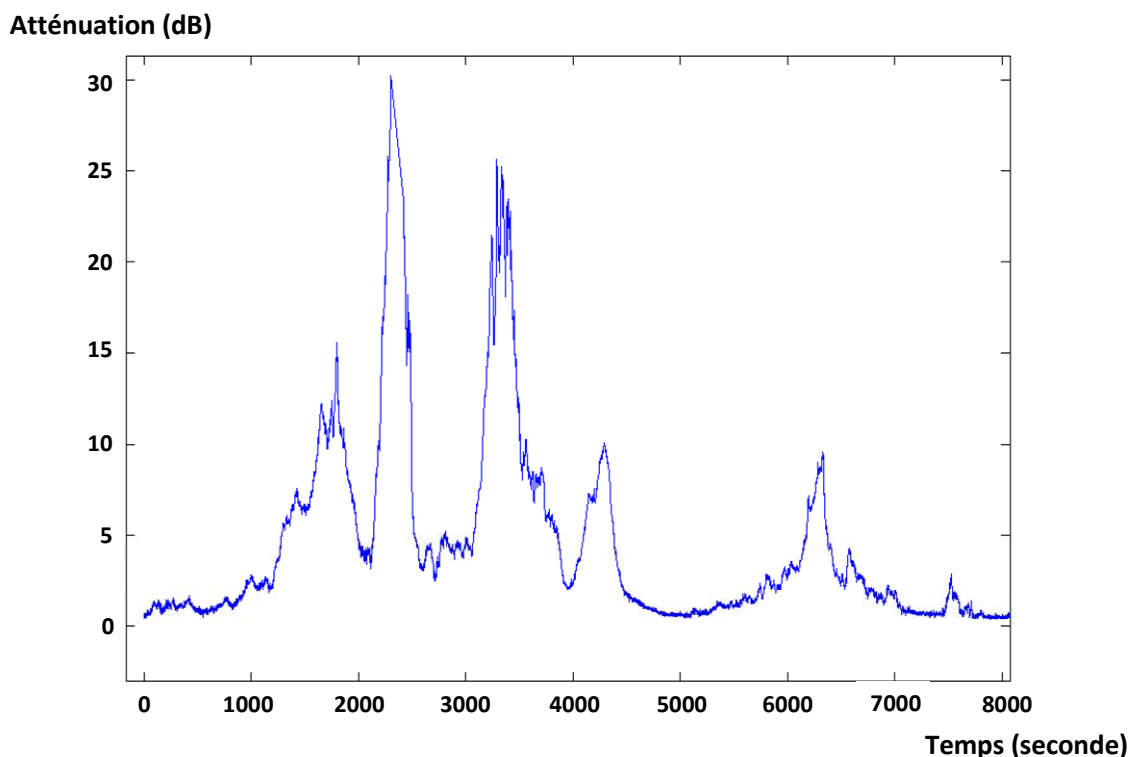


Figure III-2 : Exemple de série temporelle d'atténuation par la pluie en bande Ka.

L'atténuation par la pluie est variable dans le temps et dépend fortement de la position de station terrestre. Pour prédire cet effet, un modèle statistique recommandé par l'ITU [ITU-R P.618] peut être utilisé. Dans ce modèle, l'atténuation induite par les précipitations pour une station fixe au sol est estimée en fonction du pourcentage du temps (ex : 0,1% du temps) selon les zones climatiques par la pluie. Une application de cette méthode de prédiction est détaillée dans le **Tableau III-2**. Nous avons choisi plusieurs positions de stations, parmi lesquelles Cap Nordkinn, Pointe de Tarifa, Cap de la Roca et Oural représentent les quatre points extrêmes pour la zone géographique de l'Europe et Bari représente la position où il y a le plus fort taux de précipitation dans la zone climatiques de l'Europe [ITU-R P.837] [CAS 03]. Les résultats montrent que Bari représente le pire cas en Europe : la perte en puissance à cause des précipitations dépasse à 17.18 dB pendant 0.1% du temps sur une année moyenne.

Rain attenuation	Cap Nordkinn	Pointe de Tarifa	Cap de la Roca	Oural	Bari
Earth station latitude (N : +, S : -)	71.08	36.00	38.78	67.60	41.13
Elevation angle (°)	9.78	43.85	39.42	3.93	42.36
Frequency(GHz)	29.70	29.70	29.70	29.70	29.70
Rainfall rate 0,01(mm/hour)	30.00	42.00	42.00	22.00	60.00
hs: Height above mean sea level (km)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
hR: Effective rain height (km)	1.39	4.03	3.82	1.66	3.64
Ls: Slant-path length (km)	7.03	5.52	5.70	21.23	5.11
LG: Horizontal projection (km)	6.93	3.98	4.40	21.18	3.77
L0	22.32	18.64	18.64	25.16	14.23
Reduction factor	0.76	0.82	0.81	0.54	0.79
Specific attenuation (V) (dB/km)	5.00	7.00	7.00	3.50	10.00
Specific attenuation (H) (dB/km)	6.00	8.50	8.50	4.30	12.40
Specific attenuation (Mean) (dB/km)	5.50	7.75	7.75	3.90	11.20
Rain Attenuation 0,01 (dB)	29.50	35.26	35.71	44.96	45.20
Rain Attenuation 0,1 (dB)	11.21	13.40	13.57	17.09	<b>17.18</b>

Tableau III-2 : Calcul de l'atténuation par la pluie selon l'ITU-R P.618 (bande Ka).

Néanmoins, les prédictions montrées dans le **Tableau III-2** s'appliquent à des points de mesure fixes au sol. Dans le contexte de communications aéronautiques, l'altitude et le mouvement de l'avion doivent être pris en compte. Dans la recommandation [ITU-R P.682] pour les propagations

terre-espace de système AMSS, l'atténuation par la pluie pour un terminal avion (toujours sur un point fixe) est statiquement estimée à la base du modèle [ITU-R P.618] montré précédemment. Dans certaines phases de vol où l'altitude de l'avion est supérieure à l'altitude maximum pour la pluie (5 Km), l'atténuation par la pluie est évidemment nulle sur la liaison « user link » (ex : domaines ENR et ORP). De plus, sachant que les cellules de pluie ont un diamètre moyen de quelques kilomètres, l'occurrence de la perte maximale pour un avion sera moindre que pour un terminal fixe. Pourtant, il n'existe pas un modèle statistique aéronautique pour prédire l'atténuation d'un terminal avion, car il dépend des plusieurs facteurs (phase de vol, trajectoire, etc.) qui sont des configurations individuelles. Dans cette étude, le « pire cas » d'utilisation de système est toujours basé sur le point fixe au sol. Dans le cas réel, la disponibilité du système sera très certainement plus élevée.

### III.1.3 Techniques de compensation des affaiblissements

Comme montré dans la section précédente, la bande Ka souffre d'une dégradation du signal à cause de sa forte sensibilité aux phénomènes atmosphériques. Cette dégradation limite fortement les performances (ex : disponibilité) des services de communications par satellite. Habituellement, une marge fixe est introduite dans le bilan de liaison pour représenter le pire cas d'utilisation du système. L'idée de cette méthode est de dimensionner le système d'une façon statique et pessimiste pour une disponibilité requise par anticipation de la dégradation maximum. De fait, cette méthode n'est plus applicable pour les bandes Ku/Ka ou supérieures car les atténuations peuvent atteindre des valeurs bien plus importantes. Par exemple : une marge fixe de 5 dB est nécessaire en bande Ku et 17 dB en bande Ka pour assurer une disponibilité de 99.9% du temps (point de mesure fixe au sol : Bari) [ITU-R P.618]. D'un point de vue économique, un dimensionnement de système basé sur le bilan de liaison pire cas avec une grande marge statique conduit à une forte perte de performances, il en résulte un gaspillage de la ressource.

Afin d'équilibrer à la fois la disponibilité ainsi que les performances du système de communication par satellite, des techniques FMT (Fade Mitigation Techniques) sont appliquées. Ce sont des techniques de compensation des affaiblissements qui permettent d'adapter en temps réel la couche physique du système à l'état dynamique du canal de propagation [CAS 03]. Grâce à l'utilisation des FMTs, le dimensionnement nominal du système peut être configuré en prenant en compte la meilleure condition de propagation (ciel clair) puis la disponibilité du système est garantie en temps réel dans les différents cas de propagation en modifiant les paramètres de la

couche physique. Cependant, avec le déploiement des FMTs, une caractérisation plus approfondie de la dynamique du canal est nécessaire et un système adaptatif doit être défini pour prendre en compte ces effets dynamiques.

Il existe trois catégories de techniques FMT : le contrôle de puissance, l'adaptation de la forme d'onde et la diversité [\[PAN 04\]](#) [\[CHA 04\]](#).

### III.1.3.1 Contrôle de puissance

Le principe du contrôle de puissance (PC : Power Control) consiste à adapter le niveau de puissance de transmission aux conditions de propagation. Il peut être raffiné en 3 types :

- **Contrôle de puissance de la liaison montante** (ULPC : Up Link Power Control) : consiste à régler la puissance émise par l'émetteur. Dans le cas de l'utilisation de satellite transparent, l'ULPC permet de compenser des affaiblissements à la fois pour la liaison montante et descendante.
- **Contrôle de puissance de la liaison descendante** (DLPC : Down Link Power Control) : est réalisé par l'ajustement de la puissance du satellite. Cependant, cette méthode est très difficile à mettre en œuvre à cause des contraintes de la charge utile satellite. De plus, par rapport à l'ULPC, elle introduit une plus haut niveau d'interférence dans le bilan de liaison [\[CAS 03\]](#).
- **Mise en forme de faisceau étroit** (SBS : Spot Beam Shaping) : utilise une antenne active et permet d'adapter le gain de faisceau aux conditions de propagation. Comme le DLPC, l'interférence introduite par le SBS est relativement grande.

### III.1.3.2 Adaptation de la forme d'onde

Cette technique consiste à faire varier les paramètres de transmission comme la modulation (AM : Adaptive Modulation) ; le codage de canal (AC : Adaptive Coding) et le débit utile d'information (DRA : Dynamic Rate Adaptation) afin de s'adapter aux conditions de propagation.

Pour l'AC et l'AM, il existe un compromis entre l'efficacité spectrale et l'efficacité de puissance. Les modes plus spectralement efficaces sont utilisés dans les meilleures conditions de propagation. Dans ce cas, le rapport signal sur bruit (SNR) est relativement grand et permet à ces modes de fonctionner efficacement en assurant le taux d'erreur binaire requis (BER : Bit Error

Rate). Les modes moins spectralement efficaces (mais plus efficaces en puissance et permettant d'assurer le BER avec un faible SNR) sont appliqués quand il y a dégradation du signal.

Le DRA permet de garder le BER constant en modifiant le débit symbole de transmission : le débit nominal est utilisé en condition de ciel clair tandis que le débit est réduit selon le niveau d'atténuation. Cependant, cette technique n'est satisfaisante que pour les services qui sont tolérants aux réductions significatives de débit.

### III.1.3.3 Diversité

Le principe de la technique de diversité est d'éviter les affaiblissements par la redirection des transmissions. Elle consiste en l'utilisation des ressources qui sont dans les conditions de propagation plus favorables. Cependant, la diversité est une technique coûteuse parce que la redondance d'équipements est indispensable. Il existe 4 types de technique diversité :

- **Diversité de site** : consiste à diriger la liaison vers une autre station quand la liaison par défaut souffre d'un fort affaiblissement. En général, la distance entre cette station alternative et la station par défaut doit être plus large à une cellule pluie de convective (généralement quelques dizaines de kilomètres de distance).
- **Diversité en fréquence** : permet de changer la fréquence par défaut contre une fréquence plus basse moins sensible aux atténuations si cette dernière est disponible. Cependant, cette méthode introduit des complexités supplémentaires dans la gestion de ressources ainsi dans le fonctionnement de composants du réseau.
- **Diversité satellite** : consiste à rediriger la transmission vers un autre satellite lorsque la liaison par défaut est dégradée par une forte atténuation. La diversité satellite est plutôt pertinente pour une constellation LEO. Dans le cas d'une communication par GEO, les perturbations atmosphériques pour l'ensemble des satellites est la même et le gain introduit par cette méthode est faible.
- **Diversité dans le temps** : permet de retransmettre des données lorsque les conditions de propagation deviennent favorables. Cette solution n'est applicable que pour les services qui supportent un grand délai de transmission et des coupures du lien ; pour les services temporels ou orientés connexion, cette méthode n'est donc pas acceptable.



En général, l'utilisation d'une seule technique FMT ne suffit pas pour fournir une grande disponibilité du système en bande Ka. Une combinaison de différentes FMTs sera plus appropriée dans ce contexte. Dans notre étude pour les communications aéronautiques par satellite (plus particulièrement pour le « user link »), en tenant compte à la fois la faisabilité technique et le coût de déploiement, les FMTs les plus adéquates sont l'ULPC et l'adaptation de la forme d'onde.

## III.2 Accès satellite : DVB-S2/DVB-RCS

### III.2.1 Normes pour les accès satellite à haut débit

#### Normes ETSI (European Telecommunications Standards Institute) : famille DVB

Le projet DVB (Digital Video Broadcasting) a été introduit en 1993. L'objectif est de créer une plateforme européenne commune pour toutes les spécifications et les normes pour la diffusion de télévision numérique. Le système DVB permet de transmettre des données en utilisant plusieurs supports de diffusion : câble (C) ; satellite (S) ; transmission terrestre (T) ou son adaptation pour les récepteurs portables (H). Les normes correspondantes définissent les spécifications des niveaux liaison de données et physique du système diffusion. Dans cette étude, nous nous intéressons au type de diffusion par satellite.

La norme DVB-S [[ETSI 300 421](#)] est un standard ouvert dont la première version a été ratifiée en 1994. Elle est conçue pour les services unidirectionnels dans les bandes attribuées (en primaire ou secondaire) pour les services FSS ou BSS. Le système DVB-S utilise une modulation sur 4 phases (QPSK : Quadrature Phase Shift Keying) et une correction d'erreur directe "Convolutional / Reed-Solomon" qui permettent d'avoir une transmission efficace à faible rapport signal à bruit.

La norme DVB-S a ensuite évolué vers une solution bidirectionnelle pour satisfaire la demande croissante en services interactifs. La norme DVB-RCS (Return Channel via Satellite) [[ETSI 301 790](#)] a donc été approuvée en 2000 dans ce contexte. Le but est de fournir un canal de retour pour interagir avec le système DVB-S. La modulation utilisée dans DVB-RCS est identique au DVB-S (QPSK). De plus, DVB-RCS dispose de deux schémas de codage - Turbo codes et une concaténation de codes "Convolutional / Reed-Solomon" - qui permettent l'utilisation de technique AC (Adaptive Coding). Cependant, la marge maximum fournie (~4 dB) par l'adaptation de taux de codage ne suffit pas de compenser les dégradations rencontrées en bande Ka. Une

combinaison avec d'autres méthodes FMT (ex : AM, DRA, etc.) permet de concevoir un système adaptatif plus performant. Même si la norme DVB-RCS est destinée aux services fixes par satellite, elle peut être étendue pour l'application mobile pour les MSS [ETSI 101 790]. Cette extension mobile a commencé à être normalisée comme une option et sera introduite dans la prochaine version DVB-RCS (une version préliminaire a été publiée début 2009 [ETSI 301 790]’).

La deuxième génération de la norme DVB-S [ETSI 302 307] a été développée en 2003. Elle représente une amélioration : meilleure performance de transmission, plus de souplesse et une complexité moindre du récepteur. Cette amélioration est obtenue grâce aux technologies plus récentes en modulation (QPSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK) et codage canal (codes LDPC : Low Density Parity Check et BCH : Bose Chaudhuri Hocquenghem) qui permettent une gestion puissante de la correction d'erreur (FEC : Forward Error Correction). De plus, le système DVB-S2 profite de l'utilisation de modulation et codage adaptatif (ACM) dans le cas interactif (ex : accès Internet). Cette technique FMT permet d'optimiser les paramètres de transmission en fonction des conditions de propagation par une boucle de contrôle fermée en utilisant le lien retour satellitaire (ex : DVB-RCS) ou terrestre. Comme présenté dans la [partie III.1.3](#), l'utilisation des FMTs permet de reprendre la marge dite «de ciel clair», qui est généralement gaspillée dans les liaisons satellites en modulation et codage constant (CCM : Constant Coding and Modulation).

### **La norme TIA (Telecommunications Industry Association) : IPoS**

La norme "IP sur satellite" [TIA-1008] (Internet Protocol over Satellite : IPoS par la suite) est initialement publiée par TIA en 2003 et cette version a été co-publiée par l'ETSI dans [ETSI TS 102 354]. IPoS est une norme optimisée pour fournir des services à large bande par satellite. Le système IPoS permet d'offrir des services IP "toujours activé" (always on) par satellites géostationnaires aux utilisateurs résidentiels et les SOHO (Small Office/Home Office). Ces services IP peuvent être des services TCP/IP typiques ou IP multicast à valeur ajoutée (ex : e-learning). Le terminal IPoS pour le lien retour utilise une modulation OQPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying). Comme le DVB-RCS, la norme IPoS est compatible avec le lien aller qui est basé sur le DVB-S2.

### **Autres systèmes : DOCSIS-S**

La spécification DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) est une norme internationale qui définit les conditions d'interface de communications et de soutien d'opération

pour un système de données utilisant le système de télévision par câble. La première version de la norme DOCSIS est publiée en 1997 et la troisième version a été introduite en 2006 avec l'augmentation significative du débit de transmission et le support IPv6. La norme DOCSIS-S est une mise en œuvre de la norme ouverte DOCSIS dans le contexte satellite. En général, les couches protocolaires hautes sont compatibles avec le DOCSIS. La couche physique est basée sur les spécifications satellite. Toutefois, dans le contexte satellite, certaines adaptations doivent être spécifiquement prises en compte ; pour les canaux satellite, la bande passante est généralement plus faible, le taux d'erreur de transmission est plus élevé et le délai de transmission est plus long par rapport aux câbles.

Dans [\[SKI 05\]](#), une synthèse des comparaisons entre DVB-RCS, IPoS et DOCSIS-S est fournie. Les comparaisons sont basées sur différents critères et sont montrées par le [Tableau III-3](#) :

Comparaison	DVB-S2/DVB-RCS	DVB-S2/IPoS	DOCSIS-S
<b>Débit Maximum Typique</b>	Aller : 100 Mbps + Retour : 2 Mbps	Aller : 100 Mbps + Retour : 2 Mbps	Aller : 50/ (108) Mbps Retour : 1203/ (2046) Kbps
<b>Format des bursts</b>	Aller : MPEG-TS ou GS Retour : ATM ou MPEG	Aller : MPEG-TS ou GS Retour : Bursts variables	Aller : Flux MPEG-TS Retour : Trame Ethernet & En- tête
<b>Mode (Modulation &amp; Codage)</b>	Aller : QPSK/8PSK/16APSK/32APSK Plusieurs types de codage Retour : QPSK, *Extensions possibles (BPSK, 8PSK) Turbo C (1/3, 2/5, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 6/7), code convolutionnel ou code Reed-Solomon	Aller : QPSK/8PSK/16APSK/32APSK Plusieurs types de codage Retour : O-QPSK, Turbo C (1/3, 1/2, 2/3, 4/5), code convolutionnel ou code Reed-Solomon	Aller : 8PSK : Turbo code 1/2, (3/4), 5/6, (8/9) QPSK : Turbo code 1/2 (5/8), (3/4), (7/8) ou code Reed-Solomon Retour : QPSK : Turbo code 1/2, (3/4) en code Reed-Solomon en option
<b>Support ACM sur la voie retour</b>	OUI (Adaptation des formats de codage et de modulation) *Si les extensions : BPSK et 8PSK sont disponibles	OUI (Adaptation des formats de codage)	OUI (Adaptation des formats de modulation et de codage limités)
<b>Efficacité de la couche physique</b>	Aller : +++ Retour : ++	Aller : +++ Retour : +	Aller : + Retour : +
<b>Efficacité de la couche MAC sur la voie retour</b>	++	++	+
<b>Avantage</b>	Standard Ouvert Support de multi fournisseurs	Standard Ouvert Grande nombre de terminaux opérationnels Coût faible	Fonctionnement comme un 'Huge Ethernet', une seule valeur PID est nécessaire
<b>Inconvénient</b>	Coût plus élevé	Réservé que pour IP	Grand en-tête pour la transmission des petits paquets Pas de standardisation Seul fournisseur

Tableau III-3 : Comparaison des normes DVB-S2, DVB-RCS, IPoS et DOCSIS-S.

Comme montré dans le [Tableau III-3](#), grâce à sa richesse en modulation et codage qui permet de supporter parfaitement la technique ACM [\[ETSI 302 307\]](#), DVB-S2 offre de meilleures performances que les autres sur la voie aller. Pour la voie retour, même si dans la norme DVB-RCS, l'application de l'ACM n'est pas explicitement introduite, après le succès de DVB-S2, plusieurs travaux de recherche ont déjà montré l'intérêt et la faisabilité de mise en oeuvre de l'ACM dans le DVB-RCS [\[BOL 04\]](#). Cette application est basée sur le mode actuel (QPSK) qui est introduit dans la norme et son extension aux modes disponibles (BPSK et 8PSK) ; les taux de codage (Turbo codes) vont de 1/3 à 6/7. Les performances de codage et de modulation du DVB-S2/DVB-RCS sont montrées dans l'[Annexe B](#).

### III.2.2 Système de référence

Dans le contexte de notre étude de convergence des trafics cockpit/cabine sur la liaison satellite, la norme DVB-S2 est retenue comme spécification d'accès pour la voie aller (de la station terrestre aux avions : GES → AES) et la norme DVB-RCS pour la voie retour (des avions à la station terrestre : AES → GES). Basé sur cette approche, un scénario, dit de référence, qui présente le réseau d'accès satellite est montré par la [Figure III-3](#) :

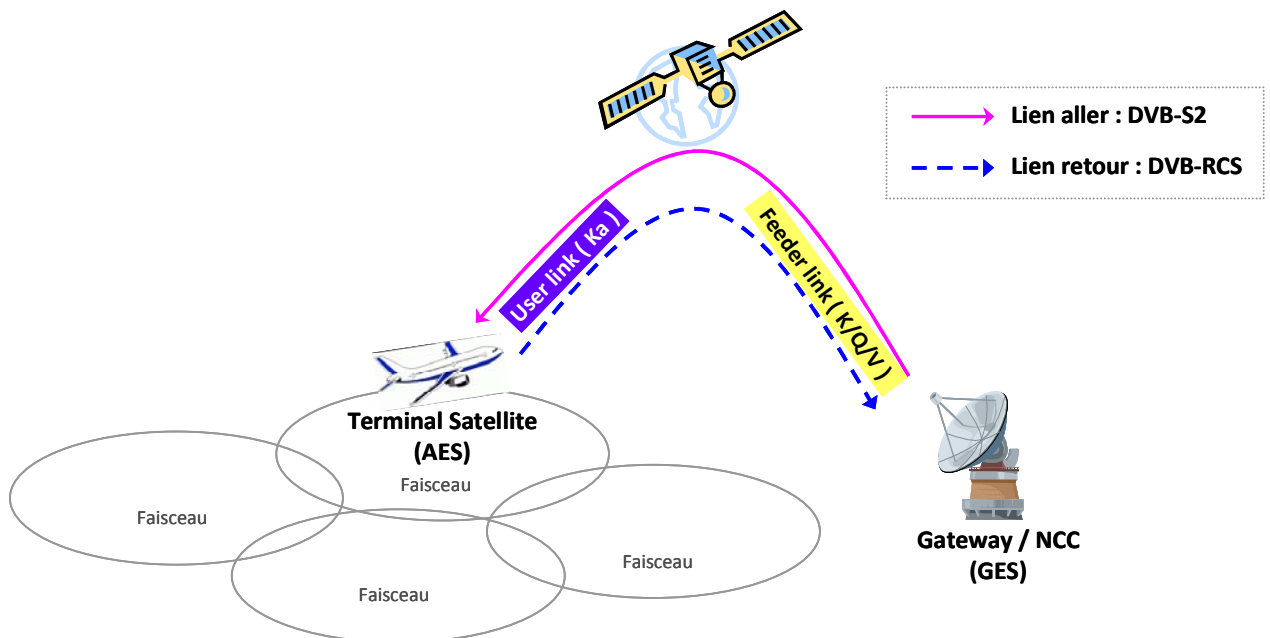


Figure III-3 : Scénario de référence (réseau d'accès DVB-S2/DVB-RCS).

Conformément à ce qui est présenté dans [\[ETSI 301 790\]](#), ce système de référence est constitué des composants suivants :

- **Terminal Satellite** (ST : Satellite Terminal) : représente le système embarqué dans notre contexte. Il peut être assimilé à l'AES dans le contexte du système AMSS.
- **Gateway** : centralise les trafics d'émission DVB-S2 et de réception DVB-RCS. Il permet au réseau d'accès satellite de s'interconnecter avec les réseaux terrestres.
- **Centre de contrôle du réseau** (NCC : Network Control Center) : prend en charge la gestion des ressources satellitaires.

De plus, dans cette étude pour les communications aéronautiques, certaines hypothèses sont introduites :

- **Couverture du satellite** : nous supposons dans cette étude un seul satellite géostationnaire multifaisceaux (multi-spots) capable de fournir une couverture globale pour toute l'Europe. Le dimensionnement des faisceaux satellite et les techniques de mobilité « Handover » entre faisceaux ne sont pas étudiés dans cette thèse.
- **Satellite transparent** : le satellite utilisé dans le système de référence est un satellite géostationnaire transparent (sans traitement à bord). L'utilisation de satellite régénératif peut être considérée comme une solution d'amélioration des performances, elle n'est pas considérée dans cette étude.
- **Topologie étoile** : du fait de l'utilisation d'un satellite transparent, la topologie du réseau est relativement simple : le réseau est en étoile avec une station terrestre comme concentrateur (Hub).
- **Co-localisation du NCC et Gateway** : pour simplifier l'architecture du système, le NCC et la Gateway sont combinés dans une seule station terrestre : « GW ». Cette unité combinée peut être également appelée GES dans le contexte AMSS. Dans le système de référence, nous considérons l'utilisation d'une seule GW.
- **Bandes de fréquence** : nous supposons que le « user link » opère dans la bande de fréquence Ka ; pour le « feeder link » plusieurs bandes de fréquence qui sont allouées pour les services FSS sont possibles : Ka, Q (30-50 GHz), V (46-56 GHz), etc.

### III.2.2.1 Lien aller DVB-S2

Dans le système de référence, le « feeder link » (lien ascendant DVB-S2) utilise un transpondeur de services FSS, ce transpondeur est ensuite partagé par de nombreux de terminaux sur le lien descendant DVB-S2. Compte-tenu des contraintes de l'antenne sur l'avion, le débit fourni sur le lien aller est limité (ex : environs 5 - 10 Mbps par transpondeur en bande Ku (EIRP : 48 dBW) [CBB-1]), mais comme chaque terminal est capable de recevoir plusieurs transpondeurs, ce débit peut facilement être multiplié. Puisqu'une seule GW est considérée dans le système, la méthode d'accès au canal satellite est donc simple : la GW envoie un ou plusieurs multiplex occupant toute la bande passante du transpondeur visé. Dans le cas de plusieurs GWs, la méthode d'accès s'appuie généralement sur un multiplexage par répartition en temps (TDM : Time Division Multiplexing) ou en fréquences (FDM : Fréquence Division Multiplexing).

Le partage de la ressource du lien aller DVB-S2 entre les STs est basé sur la méthode TDMA (Time Division Multiple Access) : la GW découpe la bande de passante pour plusieurs terminaux par une division temporelle. Avec l'utilisation de l'ACM, une séquence de trames TDM est émise par la GW dont le type de modulation et de codage (28 combinaisons sont disponibles dans la DVB-S2 avec un gain maximum de 18.4 dB) peut être modifié trame par trame afin de s'adapter dynamiquement au canal. La décision du mode ACM s'appuie sur un contrôle en boucle fermée par la voie retour DVB-RCS. Les informations de retour comprennent notamment des mesures de rapport signal sur bruit et interférence (CNI : Carrier to Noise and Interference ratio) et le ModCod (Modulation and Coding) le plus approprié pour le terminal. Selon ces informations, la GW prend la décision pour le changement de ModCod avec un mécanisme d'hystérésis (pour éviter les basculements excessifs entre deux ModCod adjacents) [RAD 07].

### III.2.2.2 Lien retour DVB-RCS

Le lien retour DVB-RCS est plus contraint que le lien aller DVB-S2 en termes de performances. Le bilan de liaison depuis le mobile vers la station terrienne est impacté par la limitation de la taille d'antenne et de la puissance d'émission. La bande passante d'un répéteur doit être partagée en plusieurs porteuses sur lesquelles plusieurs terminaux doivent pouvoir émettre. La technique d'accès est donc du type MF-TDMA (Multi Frequency – Time Division Multiple Access). Premièrement, un grand nombre de terminaux sont en contention de partage sur le même canal retour. Une méthode d'accès plus sophistiquée doit être utilisée pour éviter les collisions entre les

terminaux. Deuxièmement, l'utilisation des techniques FMT n'est pas native pour le lien retour DVB-RCS (seul le codage adaptatif AC est introduit dans la norme). Comme mentionné précédemment, l'utilisation d'une seule technique FMT ne permet pas de garantir la disponibilité demandée pour les différents services en bande Ka (particulièrement pour les services ATS/AOC qui ont de très fortes exigences de disponibilité). Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrons plus particulièrement sur ce lien retour DVB-RCS.

La méthode d'accès utilisée pour le lien retour DVB-RCS est MF-TDMA (Multi Frequency – Time Division Multiple Access). Cette méthode suppose une répartition en plusieurs fréquences distinctes, ces canaux fréquentiels sont subdivisés en trames ; chaque trame est partagée en intervalles temporels (burst) durant lesquels les terminaux peuvent transmettre des données ou de la signalisation (**Figure III-4**).

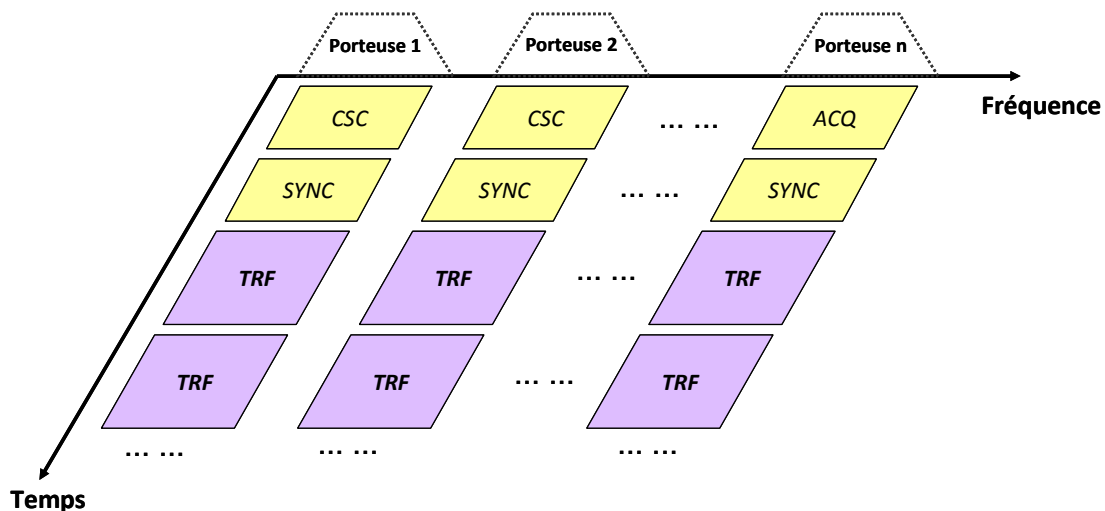


Figure III-4 : Méthode d'accès pour le lien retour DVB-RCS : MF-TDMA.

Il existe deux modes de partage MF-TDMA dans la norme DVB-RCS : MF-TDMA fixe et MF-TDMA dynamique.

- **MF-TDMA fixe** : la durée et la bande passante des time-slots successifs utilisés par un RCST sont fixées. Plusieurs paramètres sont définis dans la table de composition du time-slot (TCT : Timeslot Composition Table). Au cas où il y a des modifications des paramètres, elles ne seront appliquées que dans la prochaine nouvelle super-trame.
- **MF-TDMA dynamique** : mode plus complexe mais plus flexible. La durée et la bande de passante des time-slots successifs attribués à un RCST peuvent varier au sein d'une super-



trame. De plus, ce mode permet de changer le débit de transmission ainsi que le type de codage d'un burst à un autre, ce qui donne une plus grande flexibilité d'allocation. Dans cette étude, nous utilisons le mode MF-TDMA dynamique pour mettre en œuvre les techniques FMT.

Dans la norme DVB-RCS, quatre types de bursts sont définis :

- **CSC (Common Signalling Channel)** : permet aux STs de s'identifier auprès du centre de contrôle pendant la phase de Logon (premier accès au réseau).
- **ACQ (ACQuisition)** : permet la synchronisation de la couche physique (correction de la fréquence de l'émetteur) et la procédure de ranging (mesure fine de la distance mobile – satellite - station terrienne).
- **SYNC (SYNChronization)** : permet de maintenir la synchronisation de la couche d'accès et d'envoyer les informations de contrôle. Le burst SYNC peut être utilisé en mode « contention ».
- **TRF (TRaFfic)** : est utilisé pour transporter les données du ST au NCC. Les bursts de trafic sont basés soit sur des cellules ATM (Asynchronous transfer mode), soit sur des paquets MPEG2-TS (Moving Picture Experts Group 2 - Transport Stream) (voir la [partie IV.4.1.2](#)).

### III.2.3 Couche physique DVB-RCS

La première étape pour étudier les caractéristiques de la couche physique DVB-RCS du système proposé consiste à dimensionner le cas nominal, c'est-à-dire à déterminer la meilleure performance par porteuse qui permet une marge suffisamment grande pour introduire l'atténuation par la pluie. Pour cela, nous calculons le bilan de liaison ciel clair pour le lien retour en bande Ka. Cependant, certains paramètres sont inconnus car dépendant des configurations et des hypothèses du système. Au lieu de nous concentrer sur la précision du bilan de liaison, nous nous intéressons plus particulièrement à la conception typique du système. Les valeurs du bilan de liaison montré dans l'[Annexe C](#) représentent donc un cas général (les paramètres et leur valeurs s'inspirent principalement de l'exemple donné dans le guide ETSI [\[ETSI 101 790\]](#)). Quatre débits crêtes sont étudiés : 128 Kbps, 384 Kbps, 1 Mbps, 2 Mbps. Les rapports énergie sur bruit ( $E_b/N_0$ ) obtenus et les marges maximum possibles par l'ACM ([Annexe B](#)) sont résumés dans le [Tableau III-4](#) :

Débit binaire (Kbps)	Eb/NO obtenu (dB)	Mode	Es/NO requis (dB)	Marge maximum offerte (dB)	Débit symbole (Ksps)
128	8.4	8PSK 3/4	13.2	14.7	85
384	7.6	8PSK 2/3	11.5	13	256
1024	5.6	8PSK 1/2	8.7	10.2	683
2048	3.7	QPSK 1/2	4.5	6	2048

Tableau III-4 : Eb/NO obtenus et les marges maximum offertes.

Afin d'équilibrer la performance fournie et la marge maximum possible pour l'application ACM, le débit 1 Mbps est retenu dans cette étude comme le mode nominal utilisé lors des conditions idéales de propagation. Le mode correspondant est 8PSK 1/2 avec un débit symbole de 683 Ksps. Le mode le plus robuste est BPSK 1/3 avec le débit symbole réduit à 171 Ksps. Les marges offertes par les différentes techniques FMT sont montrées dans le **Tableau III-5**. 10,2 dB est fournie par l'ACM en modifiant le format de modulation et le codage du canal ; 6 dB est offert par le DRA en réduisant le débit du symbole (divisé par 4 :  $10\log_{10}(4) = 6\text{dB}$ ) ; nous supposons également que 3 dB de marge est possible par l'augmentation de la puissance d'émission (ULPC). La marge totale offerte est donc 19,2 dB ; la combinaison des techniques ACM+DRA+ULPC assure une disponibilité du système de 99,9% du temps.

Technique FMT	Marge offerte (dB)
ULPC	3
ACM	10,2
DRA	6
Total	19,2

Tableau III-5 : Marges offertes par les techniques FMT.

Comme la méthode d'accès aux ressources DVB-RCS est basée sur le MF-TDMA, la capacité de la ressource est donc dimensionnée pour ce mode. Dans la norme DVB-RCS, deux formats de paquet peuvent être utilisés comme conteneur de données (burst TRF) : ATM et MPEG. Dans cette étude, nous choisissons d'utiliser le MPEG plutôt que l'ATM pour des raisons telles qu'une meilleure protection contre les erreurs ou encore une efficacité accrue pour l'encapsulation de trafic IP.

Avant de dimensionner la capacité du lien retour, une hypothèse sur le choix des modes FMT est proposée. Nous utilisons 5 modes FMT pour adapter le système aux différentes conditions de propagation : mode 1, 2, 3, 4 sont choisis avec un débit symbole constant, les différentes

modulations et codages permettent une mise en œuvre de l'ACM. L'utilisation du débit symbole constant signifie que la bande passante d'une porteuse est constante. Dans ce cas, la gestion des modes est relativement simple : le mode d'une porteuse peut être modifié sans aucun changement du plan de fréquences (le DVB-RCS fournit la signalisation adéquate pour la reconfiguration du plan de fréquences). Mode 0 est le mode de secours qui utilise une forme d'onde plus robuste (BPSK 1/3) avec un débit symbole réduit. L'idée d'avoir ce mode est d'assurer une grande disponibilité pour les services ATM au cas où il y a une très forte atténuation. La synthèse de ces 5 modes FMT est montrée par le **Tableau III-6** :

Mode FMT	Modulation / Codage	Débit Symbole	Es/N0 Requis	Débit Binaire
0	BPSK 1/3	171 Ksps	-1,5 dB	56 Kbps
1	BPSK 1/3	683 Ksps	-1,5 dB	228 Kbps
2	QPSK 1/2	683 Ksps	4,5 dB	683 Kbps
3	QPSK 2/3	683 Ksps	6,9 dB	910 Kbps
4	8PSK 1/2	683 Ksps	8,7 dB	1024 Kbps

Tableau III-6 : Modes FMT retenues.

Basé sur les 5 modes FMT retenus et conformément au guide DVB-RCS [ETSI 101 790], nous étudions ensuite le dimensionnement de la capacité du lien retour DVB-RCS. La structure d'une super-trame MF-TDMA est définie de la façon suivante :

Tout d'abord, nous déterminons la structure et la durée de transmission d'une super-trame pour chaque mode FMT en supposant que :

- Un créneau TRF contient un paquet MPEG (modulé et codé) ainsi qu'un préambule de 48 symboles. Le paquet MPEG peut inclure un champ d'adaptation MPEG. Le champ d'adaptation MPEG permet de porter des signalisations SAC (Satellite Access Control) qui sont généralement utilisées pour les requêtes de capacité.
- Les créneaux de signalisation (mini-slot : CSC, ACQ et SYNC) sont placés en tête de chaque trame et occupent la durée d'un créneau TRF. Un mini-slot contient un préambule de 48 symboles et 16 octets de données.
- Le temps de garde correspond à une incertitude de 4 Km pour les créneaux TRF et 50 km pour les mini-slots.

Ensuite, nous proposons une seule structure de super-trame pour les 5 modes. L'alignement basé sur les structures initiales obtenues est donc nécessaire dans ce cas. Nous prenons la valeur maximale parmi les durées de super-frames initiales et réglons les tailles et le nombre de créneaux TRF/mini-slot pour chaque mode. La structure détaillée de cette super-trame ajustée est montrée dans le [Tableau III-7](#).

Mode FMT	Modulation et Codage		Débit symbole	Longueur du TRF	Temps de garde (mini-slot)	Distance incertitude (mini-slot)	Taille et durée de créneau sig (CSC+ACQ+SYNC)		Nombre de mini-slot dans un créneau sig	Longueur (mini-slot)	Temps de garde (TRF)	Distance incertitude (TRF)	Nombre de TRF	Durée	Signalling en-tête
			(Ksps)	(symbole)	(symbole)	(km)	(symbole)	(ms)		(symbole)	(symbole)	(km)		(ms)	100%
0	BPSK	1/3	171	4611	3	5.3	922	5.4	2	461	29	50.8	2	59.32	9.1%
1	BPSK	1/3	683	4928	10	4.4	1096	1.6	2	548	116	50.9	8	59.32	2.7%
2	QPSK	1/2	683	1643	10	4.4	1096	1.6	2	548	116	50.9	24	59.32	2.7%
3	QPSK	2/3	683	1232	10	4.4	1096	1.6	2	548	116	50.9	32	59.32	2.7%
4	8PSK	1/2	683	1095	10	4.4	1096	1.6	2	548	116	50.9	36	59.32	2.7%

Tableau III-7 : Dimensionnement de la super-trame MF-TDMA.



Nous supposons qu'un répéteur d'une largeur de bande de 25 MHz est utilisé dans notre système. Le nombre de porteuses par répéteur est donc

$$25 \text{ MHz} / (0.683 * (1+0.35)) \text{ MHz} \approx 25 \text{ porteuses}$$

0.683 Mhz correspond au débit symbole par porteuse, 0.35 est le facteur de débordement. La capacité disponible par répéteur (25 MHz) est

$$1.024 \text{ Mbps} \times 25 \text{ porteuses} = 25.6 \text{ Mbps}$$

Un exemple de la répartition MF-TDMA est montré dans la **Figure III-5**. La super-trame a une durée fixe de 59,32 ms. Pour chaque mode FMT, le nombre paquets TRF envoyés dans la durée d'une super-trame est différent des autres modes. Il faut remarquer que la définition de 5 modes FMT ne signifie pas que les 5 modes doivent être activés en même temps, le nombre de porteuses pour chaque mode FMT peut être modifié dynamiquement suivant les conditions de propagation. Un cas typique de répartition est aussi montré dans la **Figure III-5** : le terminal obtient un créneau temporel du mode BPSK 1/3 (171 Ksps) pour le trafic ATS/AOC et trois créneaux temporels du mode BPSK 1/3 (683 Ksps) pour le trafic GSM ou IP.

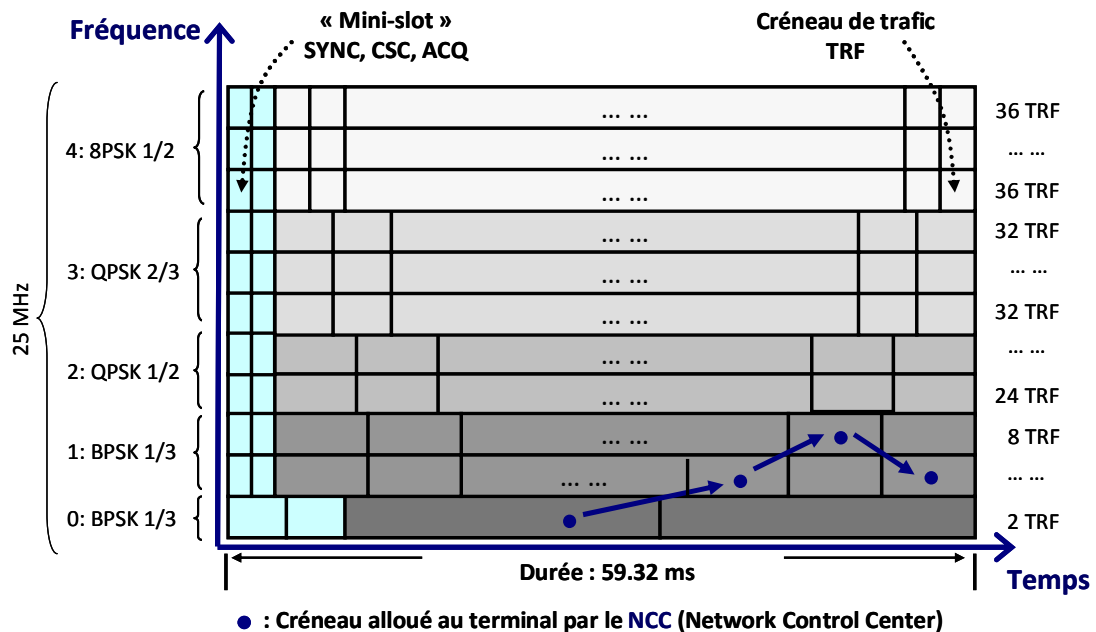


Figure III-5 : Exemple de la répartition MF-TDMA.

### III.2.4 Qualité de service et DVB-RCS

Le mécanisme principal au niveau d'accès avec lequel une architecture de QoS peut être mise en œuvre est le protocole DAMA (Demand Assigned Multiple Access). Le DAMA propose un accès aux ressources à la demande (BoD : Bandwidth on Demand), qui permet une utilisation plus efficace en présence de différentes classes de trafic. Il permet aux terminaux STs d'envoyer des demandes de capacités (CR : Capacity Requests) au centre de contrôle NCC. Dans ce cas, les créneaux temporels (TRF) pendant lesquels les données peuvent être transmises sur la voie retour DVB-RCS peuvent être réservés par les STs [NIV 06]. Il est à noter que dans le système DVB-RCS, l'accès à un créneau TRF est toujours conditionné par l'obtention d'une réservation, il n'y a pas d'accès aléatoire comme dans IPoS. Les requêtes CR sont calculées en fonction des besoins ponctuels et réels de chaque ST avec une définition de plusieurs classes d'allocation de capacité.

Dans la norme DVB-RCS [ETSI 301 790], 4 classes de CR ont été définies et permettent de mettre en œuvre de la QoS :

- **CRA (Continuous Rate Assignment)** : permet une allocation à débit constant, c'est-à-dire que le nombre de créneaux temporels réservés par un ST dans les trames DVB-RCS est fixé. Cette capacité fixe est allouée de façon permanente durant toute la connexion du ST sans demande de réservation. Aucune signalisation n'est nécessaire et le ST peut utiliser continuellement le débit alloué. En général, cette classe d'allocation représente une faible proportion de la capacité totale car elle ne permet pas l'utilisation efficace des ressources. Les créneaux éventuellement non consommés provoquent un gaspillage.
- **RBDC (Rate Based Dynamic Capacity)** : permet une allocation dynamique à débit variable. La gestion se fait par débit, ce débit doit être mis à jour régulièrement (chaque supertrame) par le terminal afin que le centre de contrôleur puisse suivre l'évolution de la source de trafic (unité : multiples de 2 Kbps). Un seuil max (RBDCmax) est prédéfini au moment de la connexion et permet de garantir la capacité pour cette classe d'allocation jusqu'à ce seuil. Au-delà du RBDCmax, les ressources sont allouées de manière « négociée » (attribuées si elles sont disponibles). Au cas où le ST n'utilise pas complètement sa ressource de type RBDC (débit demandé < RBDCmax), le reste peut être alloué aux autres STs qui ont des besoins. Cette classe d'allocation à la demande permet un partage efficace des ressources et d'offrir la QoS.



- **VBDC (Volume Based Dynamic Capacity) / AVBDC (Absolute - VBDC)** : permet une allocation de manière "best effort" (aucune garantie ne peut être fournie). La gestion se fait par volume (unité : paquet MPEG ou cellule ATM). Cette classe d'allocation est entièrement négociée et basée sur les données en attente dans le ST. La capacité allouée à cette classe dépend de la disponibilité de la ressource restante après l'allocation des classes CRA et RBDC. Pour le VBDC, les requêtes de capacité sont cumulatives ; pour l'AVBDC, une nouvelle requête remplace la précédente.
- **FCA (Free Capacity Assignment)** : permet une allocation sans demande lorsqu'il reste de la bande passante non utilisée. Cette capacité restante après le traitement des autres demandes (CRA, RBDC, (A)VBDC) est attribuée aux STs de manière équitable. Aucune garantie ne peut être fournie par cette allocation de ressource.

Le **Tableau III-8** suivant donne une synthèse sur les diverses classes d'accès aux ressources DVB-RCS :

Classe de requête de capacité	Priorité	Garantie	A la demande ou non
CRA	Haut	Oui	Non
RBDC	Moyen	Oui (jusqu'au RBDCmax)	Oui
VBDC/AVBDC	Faible	Non	Oui
FCA	Très Faible	Non	Non

Tableau III-8 : Divers classes de requête de capacité.

La norme DVB-RCS définit également des classes de trafic au niveau MAC qui peuvent être manipulées dans le ST par des files d'attentes distinctes :

- **RT (Real Time)** : pour les flux temps réel à fortes contraintes temporelles (ex : la VoIP, la vidéo conférence, etc.).
- **VR (Variable Rate)** : pour les flux à débit variable. Elle est décomposée en deux sous-classes : la classe VR-RT dédiées au trafic sensible à la gigue et la VR-JT dédiée au trafic tolérant à la gigue.
- **JT (Jitter Tolerant)** : pour le reste du trafic.

Des correspondances entre les requêtes de capacité et les classes de trafic sont recommandées suivant :

- CRA pour RT
- RBDC pour VR
- VBDC/AVBDC pour JT

Ces définitions offrent un moyen de différencier au niveau MAC des flux avec différentes exigences en termes de QoS et d'y répondre par classes de trafic.

### III.2.5 Mise en œuvre de l'algorithme DAMA

Comme montré précédemment, l'utilisation du DAMA permet un partage souple et efficace des ressources satellitaires en offrant différents niveaux de Qualité de Service. Pour le lien retour DVB-RCS, le protocole DAMA repose sur la méthode d'accès MF-TDMA qui partage la ressource en créneaux temporels (TRF) sur plusieurs fréquences. Le DAMA se déroule entre le contrôleur DAMA (NCC) et le terminal ST de manière suivante :

- Le contrôleur DAMA gère le partage de la capacité du lien retour entre plusieurs STs qui y accèdent.
- Le ST prend en charge l'utilisation de la ressource allouée par le DAMA contrôleur et génère les requêtes de capacité.

Tout d'abord, le ST calcule pendant un intervalle de temps fixe les requêtes de capacité (CR) selon l'état de ses filles d'attente au niveau MAC. Ces CR sont ensuite envoyées au contrôleur DAMA par des signalisations SAC ([partie III.2.3](#)). Sur la base de ces CR, le contrôleur DAMA permet d'allouer des ressources aux STs suivant l'ordre de priorité :

CRA > RBDC > (A)VBDC > FCA

Le contrôleur DAMA génère ensuite un plan d'allocation des ressources (TBTP : Terminal Burst Time Plan) décrivant la répartition des créneaux temporels de la super-trame MF-TDMA entre les STs et l'envoi en diffusion (signalisation broadcast). Une fois reçue la TBTP, le terminal ST attribue la capacité allouée aux divers flux en attente dans les filles MAC. Cette attribution peut être effectuée avec deux algorithmes : centralisé ou distribué.

- **Algorithme centralisé** : avec ce mécanisme, chaque classe CR est identifiée par un identifiant de canal (Channel\_ID). Le DAMA contrôleur gère l'allocation de créneaux TRF pour chaque canal et envoie le résultat par TBTP. En conséquence, chaque TRF alloué correspond à un terminal et un canal (classe d'allocation) spécifiés.
- **Algorithme distribué** : dans ce cas, sur la base des requêtes de capacité de chaque ST, le contrôleur DAMA détermine une capacité globale allouée pour tous les canaux (channel\_ID). La ressource allouée au ST est donc une capacité globale commune à tous les services. Cette capacité non différenciée peut être attribuée aux différents types de flux de manière souple en fonction de la politique de service prédéfinie et des objectifs de Qualité de Service.

Comme présenté dans le [chapitre II](#), les caractéristiques et les exigences en termes de QoS pour les trois classes des services à bord (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) sont hétérogènes. Pour les services ATS/AOC, le trafic est faible, sporadique et n'a pas besoin d'être garanti en continu pendant toute la durée de la connexion. De plus, les délais requis pour ce type de services sont moins restrictifs (3.8s pour la Phase 1 et 0.74s pour la Phase 2) par rapport aux autres services comme GSM/UMTS (0.15s préférable et 0.4s maximum). Dans ce cas, la classe VBDC est plus appropriée. Cependant, une très grande disponibilité est nécessaire pour les services ATS/AOC. Pour cette raison, nous proposons l'utilisation d'un canal exclusivement réservé pour tous les flux cockpit (Channel\_ID = 0). Pour les services de téléphonie mobile à fortes contraintes temporelles, compte-tenu les caractéristiques du trafic, le type RBDC est proposé (gestion par débit). Pour le trafic IP qui fonctionne d'une manière Best Effort (aucune qualité de service ne lui est garantie) dans notre contexte, le type VBDC (gestion par volume) est utilisé.

La mise en œuvre de l'algorithme DAMA avec différentes classes de services est donc résumée dans le [Tableau III-9](#) :

Service	Priorité	Channel_ID	Classe de CR
ATS/AOC	Haut	0	(A)VBDC
GSM/UMTS	Moyen	1	RBDC
IP	Bas	1	(A)VBDC

Tableau III-9 : Mise en œuvre des requêtes de capacité.

Pour avoir une utilisation efficace de la ressource dans le ST, nous adoptons l'algorithme distribué pour l'attribution des TRF alloués aux différents flux à bord. La ressource allouée au ST est donc

une capacité non différenciée par canal, elle est attribuée aux différents flux selon la politique de service définie pour répondre aux besoins de QoS. Une priorité supérieure est donnée aux services cockpit pour garantir la grande disponibilité. Le flux de téléphonie mobile a une priorité plus élevée que le flux IP pour respecter ses fortes contraintes temporelles. Grâce à cette configuration, les trois types de services à bord sont bien différenciés en respectant leurs performances demandées.

# Chapitre IV

## ARCHITECTURE SYSTEME

Le système proposé doit assurer la convergence de trois flux de trafic sur la liaison satellite : service aéronautique ATC/AOC, service de téléphonie mobile et accès Internet. Dans ce chapitre, nous présentons les différentes architectures protocolaires associées. Ensuite, une comparaison des architectures et une proposition pour la convergence des différents flux sur la liaison satellite sont présentées. Enfin, basée sur cette architecture de convergence, l'adéquation des formats de données et les méthodes d'encapsulations utilisables sur la liaison satellite sont analysées.

### IV.1 Modèle OSI de l'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 : International Organization for Standardization) a introduit un modèle d'interconnexion de système appelé OSI (Open Systems Interconnection) [\[ISO/IEC 7498\]](#). Le concept important du modèle OSI est l'organisation en couche : chaque couche représente un module indépendant qui contient un ensemble de fonctions et utilise les 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 sont montrées dans la [Figure IV-1](#) :

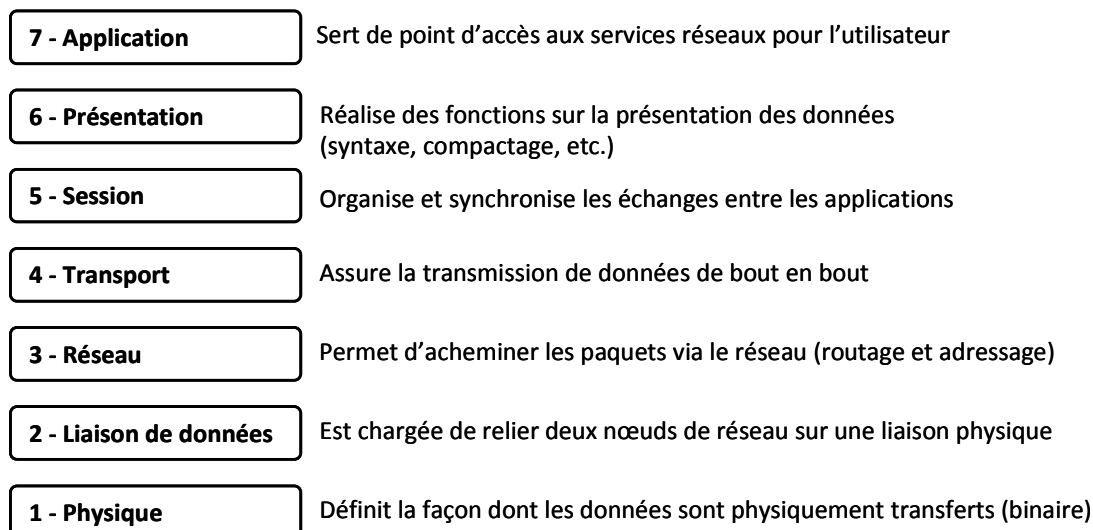


Figure IV-1 : Modèle OSI.

## IV.2 Services aéronautiques

### IV.2.1 Architecture protocolaire dans l'ATN

Grâce à sa conception, sa stabilité, sa normalisation et sa souplesse, le modèle OSI est largement considéré comme le modèle de réseau de référence. Ce modèle est utilisé comme base pour définir l'inter-réseau ATN ainsi que les protocoles utilisés dans chacune des couches. La définition du réseau ATN a pour but de permettre des échanges de données entre des avions et les systèmes de contrôle au sol avec des performances attendues pour le service ATM. La structure des protocoles utilisés ainsi que le format de données échangées sont spécifiés dans les documents SARPs [\[ATN SARPs\]](#) [\[CAMAL\]](#) par l'OACI.

Dans le réseau ATN, deux types de systèmes sont identifiés :

- **Système Final (ES : End System)** : est un système qui comprend 7 couches en pile protocolaire afin d'être capable de communiquer (directement ou indirectement) avec un autre ES pour fournir de bout en bout des services de communication pour les applications ATN.
- **Système Intermédiaire (IS : Intermediate System)** : appelé aussi le routeur ATN, est un équipement qui est basé sur les trois couches basses du modèle OSI et chargé de relier les différents types de sous réseaux afin de connecter les IS ou les ES au réseau et d'acheminer les paquets de données.

Le réseau ATN permet l'exploitation des différents sous réseaux de communication : avionique, sol-sol (fixe) et air-sol (mobile). Dans les SARPs ATN, les sous réseaux pour la communication air-sol sont HF, VHF, Mode S et Satellite [\[CAMAL\]](#) [\[ANNEXE 10\]](#) :

- **Liaison de données HF (HFDL : High Fréquence Data Link)** : fonctionne dans les hautes fréquences (HF : High Fréquence) du service mobile aéronautique (3-22 MHz). Il permet différents débits (0.3, 0.6, 1.2, 1.8 Kbps) en utilisant différentes modulations (2PSK, 4PSK, 8PSK).
- **Liaison numérique VHF (VDL : VHF Digital Link)** : fonctionne dans les très hautes fréquences du service mobile aéronautique (118-137 MHz) avec un espacement de 25 KHz. Il existe plusieurs modes VDL (1, 2, 3 et 4). La VDL mode 2 est déployée en Europe pour les communications ATS/AOC.
- **Liaison de données SSR mode S** : fonctionne à 1090 MHz dans le sens air-sol et à 1030 MHz le sol-air. Il s'agit d'une liaison radar secondaire à adressage sélectif désigné qui permet la surveillance et l'échange de données numériques en ayant recours à des interrogateurs et à des transpondeurs mode S de radar secondaire de surveillance (SSR).
- **Liaison par satellite (AMSS : Aeronautical Mobile Satellite Service)** : fonctionne actuellement dans les bandes de fréquence L du service mobile aéronautique (1550-1630.5 MHz) et permet de fournir la couverture mondiale (hors des régions polaires) en utilisant les satellites géostationnaires INMARSAT.

Un exemple de la pile protocolaire du réseau ATN est illustré dans la [Figure IV-2](#). Le sous réseau mobile de cette architecture est basé sur la liaison VDL mode 2. C'est une technologie orientée bit qui utilise la modulation D8PSK (Differentially encoded 8-Phase Shift Keying). La ressource radio est partagée en contention par la mise en œuvre de l'algorithme CSMA (Carrier Sense Multiple Access) p-persistent. Le débit fourni par la VDL mode 2 (31.5 Kbps) est 10 à 20 fois supérieur par rapport à la VHF ACARS (2,4 Kbps) utilisé jusque là. Les détails des protocoles VDL mode 2 (concernent les couches 1, 2 et une partie de la couche 3) peuvent être trouvés dans le volume III de l'annexe 10 de l'OACI [\[ANNEXE 10\]](#).

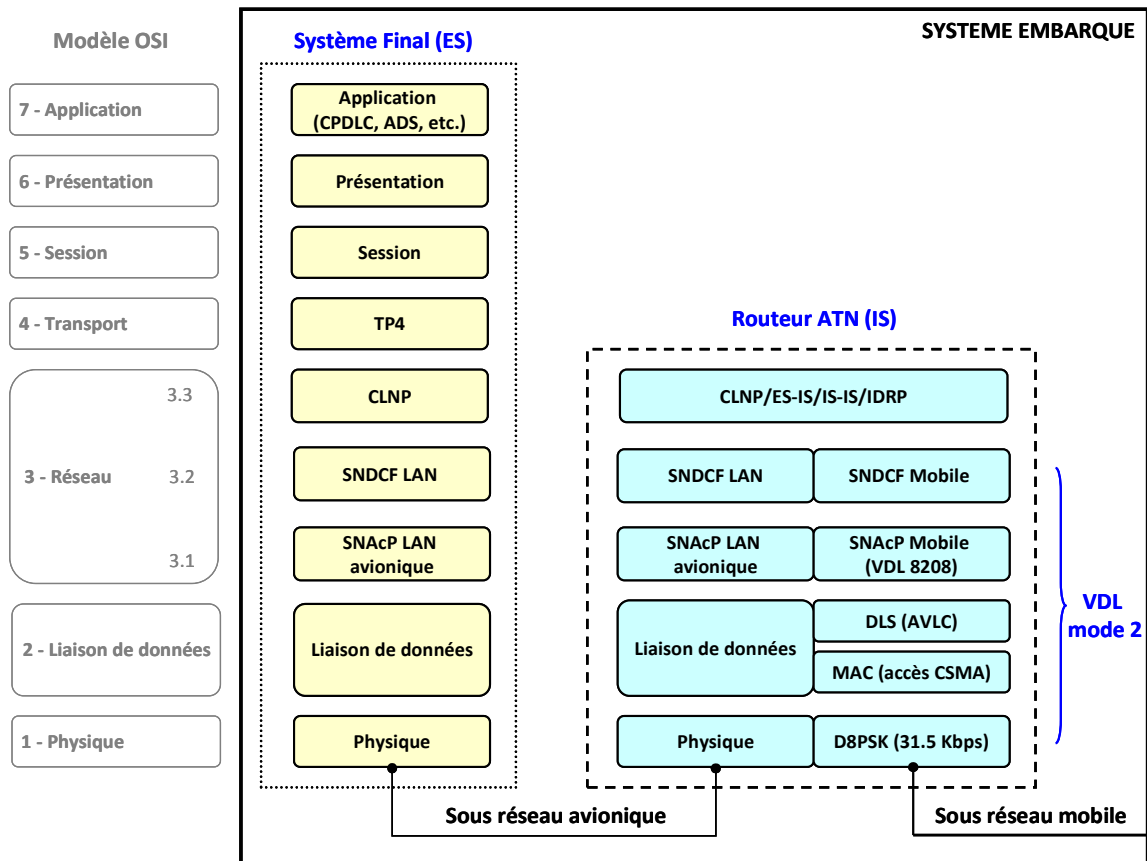


Figure IV-2 : Pile protocolaire du système ATN (Exemple : VDL mode 2).

### IV.2.2 Introduction du satellite dans l'architecture ATN

Dans le cas où le support physique est une nouvelle liaison par satellite, plus précisément quand l'IS à bord et l'IS au sol sont interconnectés par une nouvelle interface (DVB-S2/RCS dans notre étude), l'adaptation de ce nouveau sous réseau à l'ATN doit être prise en compte. Avec le même principe pour le sous réseau VDL mode 2 montré précédemment, l'adaptation est focalisée dans la couche réseau de l'ATN.

Conformément au modèle ISO, la couche réseau de l'ATN est raffinée en trois sous-couches (fonctions) :

- **Couche 3.3** - fonction de convergence indépendante des sous réseaux (SNICF : SubNetwork Independent Convergence Function) : est chargée de fournir les services de la couche réseau à l'utilisateur en masquant la diversité des sous réseaux. Le service fourni pour la transmission de paquets est en mode sans connexion (CLNP : ConnectionLess Network Protocol [ISO 8473])



dans cette couche, ce mode s'adapte facilement aux différents systèmes avec une connectivité universelle.

- **Couche 3.2** - fonction de convergence des sous réseaux (SNDCF : SubNetwork Dependent Convergence Function) : est responsable de relier la couche 3.1 et 3.3 en fournissant les services offerts par SNAcP à la couche SNICF. Elle est capable d'adapter et de convertir les paquets du SNICF pour qu'ils puissent être compatibles avec le sous réseau.
- **Couche 3.1** - fonction d'accès au sous réseau (SNAcP : SubNetwork Access Protocol) : est totalement dépendante du sous réseau. Elle gère l'accès au sous réseau et le routage.

En général, le système final d'un avion est connecté au routeur ATN à bord par un réseau local avionique. Dans notre étude sur l'introduction de liaison DVB dans l'ATN, nous nous focalisons sur le routeur ATN. Comme illustré dans la **Figure IV-3**, les couches 1 à 3.2 sont impliquées dans la mise en œuvre du sous réseau DVB.

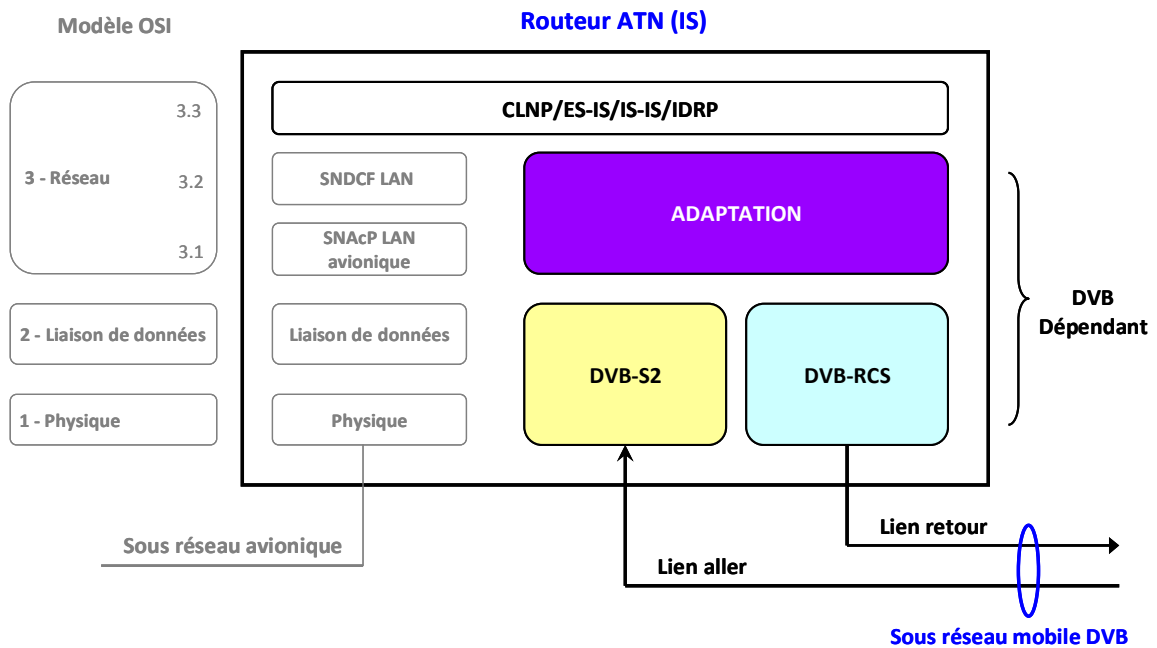


Figure IV-3 : Introduction de la liaison DVB dans l'architecture ATN.

## IV.3 Services aux passagers

### IV.3.1 Services de téléphonie mobile

Pour les services de téléphonie mobile, nous nous concentrons dans cette étude sur les technologies 2G et 3G (GSM/UMTS) qui offrent les services majoritaires dans le marché de téléphonie mobile actuelle ainsi pour les dix prochaines années.

#### IV.3.1.1 Réseau GSM

Typiquement, le réseau GSM est composé de trois sous-ensembles :

- **Sous-système radio BSS** (Base Station Sub-system) : assure et gère les transmissions radios
- **Sous-système réseau NSS** (Network Station Sub-system) : comprend l'ensemble des fonctions nécessaires de commutation et de routage
- **Sous-système opérationnel OSS** (Operating Sub-System) : permet à l'opérateur d'exploiter son réseau.

Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement à l'accès du réseau téléphonie mobile par la liaison satellite. La topologie du réseau GSM est simplifiée pour se concentrer uniquement sur les éléments traités dans cette thèse (voir la [Figure IV-4](#)).

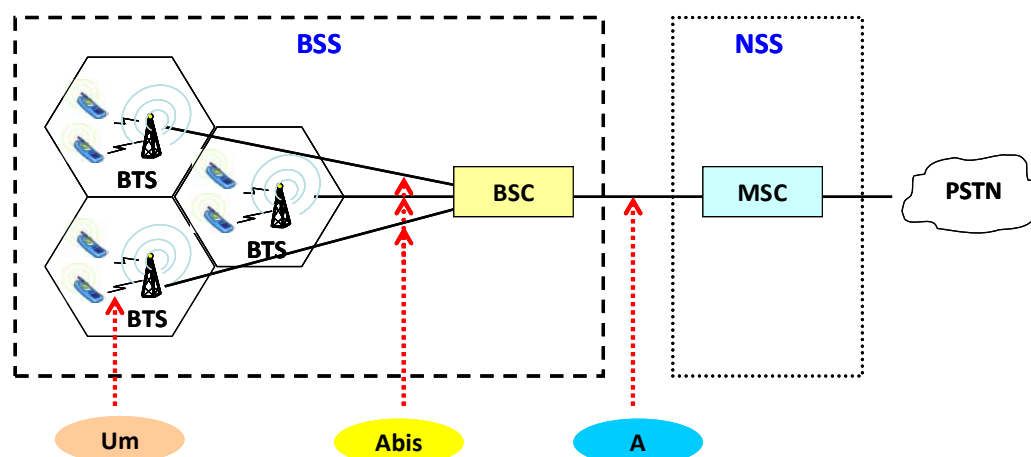


Figure IV-4 : Structure du réseau GSM simplifiée.

Les composants principaux de cette structure du réseau GSM sont :

- **BTS (Base Transceiver Station)** : permet de communiquer avec les mobiles sur l'interface radio (interface Um). Elle est comme un émetteur-récepteur central pour chaque zone cellule qui comprend un ou plusieurs TRX (Transmission/Reception), chaque TRX peut supporter 8 communications simultanées.
- **BSC (Base Station Controller)** : permet de contrôler un ensemble de BTS sur l'interface Abis. Il prend en charge l'allocation de la ressource radio et la décision de l'activation/désactivation d'un canal vers un mobile. Le BSC s'occupe aussi de la gestion du «handover» quand le mobile passe d'une BTS à l'autre.
- **MSC (Mobile Switching Center)** : est un commutateur téléphonique qui permet de gérer les appels. Il multiplexe les trafics en provenance de plusieurs BSC sur l'interface A et les relie au réseau téléphonique commuté public (PSTN : Public Switched Telephone Network).

### IV.3.1.2 Réseau UMTS

La topologie du réseau UMTS avec la simplification pour cette étude est montrée par la [Figure IV-5](#). Elle est composée de deux parties principales : le réseau d'accès (similaire au sous-système BSS dans le réseau GSM) et le réseau cœur. Comme un réseau GSM/GPRS, le réseau cœur de l'UMTS est composé de deux domaines : d'une part, le domaine de commutation de paquets (PS : Packet Switched) permet l'accès à Internet ; d'autre part, le domaine de commutation de circuits (CS : Circuit Switched), qui est très similaire à celui du NSS dans le réseau GSM est utilisé principalement pour la téléphonie.

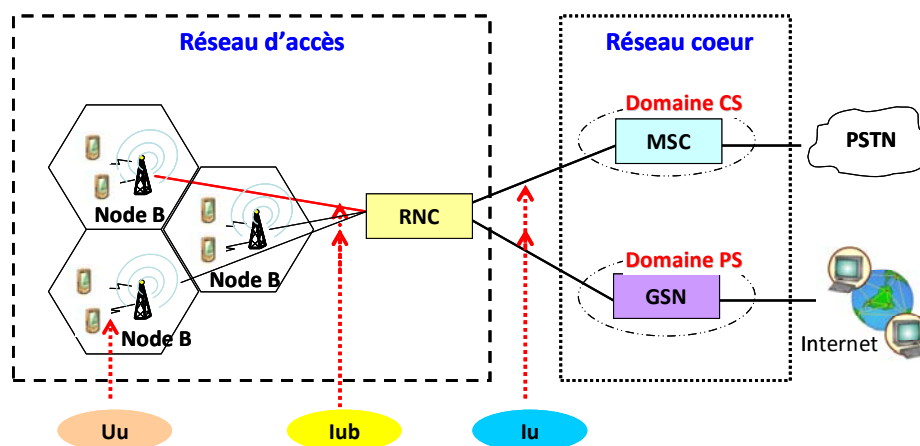


Figure IV-5 : Structure du réseau UMTS simplifiée.

Certains composants et interfaces UMTS jouent les rôles équivalents ou très similaires à ceux du réseau GSM. Au lieu de détailler ces composants/interfaces UMTS et ses fonctionnalités, nous présentons ici un récapitulatif basé sur les points communs/différents en comparant avec le réseau GSM (voir le [Tableau IV-1](#)).

Composant /Interface	Localisation	Fonctionnalité principale	Comparaison avec GSM
Node B (Nœud B)		Radio transmission et réception	Similaire à BTS Peut éventuellement être localisé avec un BTS existant
RNC (contrôleur de réseau radio / Radio Network Controller)		Point d'accès au réseau cœur, gestion d'un ensemble de Nœuds B	Similaire à BSC Point d'accès pour les services CS et PS
GSN (Nœud de support GPRS / GPRS Support Node)		Routeur et passerelle qui permet d'accéder au réseau Internet	Nouveau nœud
Interface Uu	Entre Mobile et Nœud B		Equivalent à l'interface Um
Interface Iub	Entre Nœud B et RNC		Equivalent à l'interface Abis
Interface Iu	Entre le réseau d'accès et le réseau cœur		Equivalent à l'interface A

Tableau IV-1 : Comparaison récapitulative des interfaces/composants des réseaux UMTS et GSM.

### IV.3.1.3 Choix d'un point de coupure pour l'introduction de la liaison satellite

Dans le contexte de la communication téléphonie mobile via satellite, le lien peut être utilisé pour chaque segment du réseau GSM/UMTS montré précédemment, c'est-à-dire, chaque interface peut être employée comme liaison satellite. Dans cette étude, nous adoptons l'interface Abis (pour le réseau GSM, Iub pour l'UMTS) comme un point de coupure pour l'introduction de la liaison satellite. La motivation de ce mode de coupure est basée sur les considérations suivantes :

- La voix transmise sur cette interface peut utiliser un format compressé, c'est-à-dire que la capacité nécessaire pour un appel est de 16 Kbps par rapport à celle de l'interface A qui est 64 Kbps. Ce débit faible est plus adapté au contexte de communication par satellite où la bande de passante est relativement contrainte.

- L'interface Abis porte un nombre de communications simultanées homogène avec la spécification de notre système. Les interfaces de type A correspondent à une agrégation de plusieurs multiplex temporels de voix traités par les commutateurs MSC. Par ailleurs, le choix de l'interface Abis comme un point d'accès satellite permet à l'opérateur de l'avion d'éviter le coût du déploiement des multiples éléments principaux du réseau.
- Enfin, la faisabilité de ce mode de coupure a été démontrée par des solutions déjà existantes (Gilat, Cisco...) [GILAT] [CISCO].

La topologie GSM/UMTS par satellite retenue dans cette étude est donc montrée par la **Figure IV-6** :

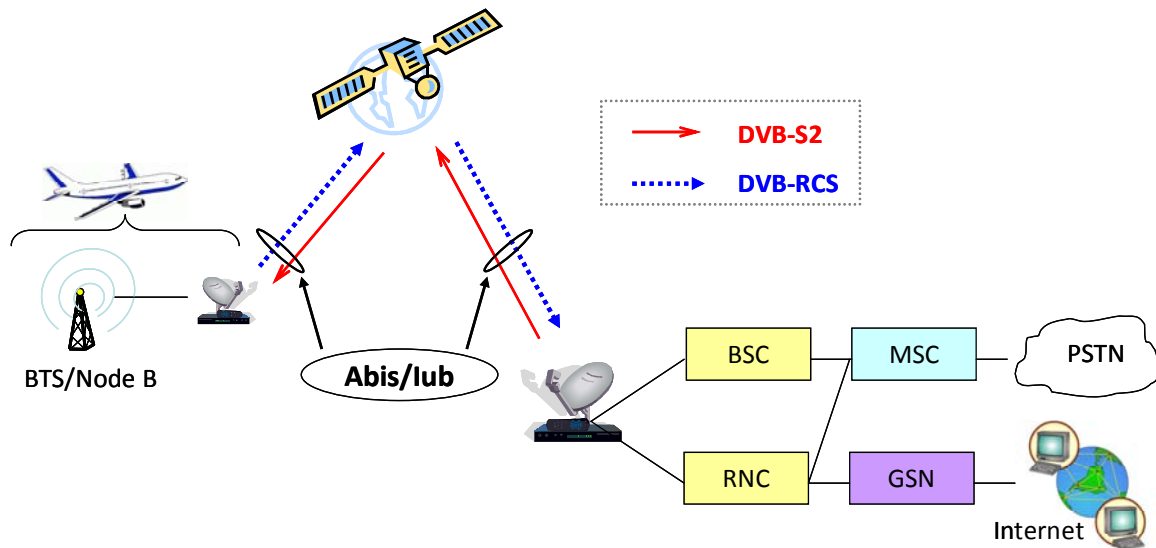


Figure IV-6 : Topologie GSM/UMTS par satellite.

Les spécifications de l'interface Abis et lub sont définies dans la norme 3GPP/ETSI [3GPP 01] [3GPP 02]. Etant donné que ces deux interfaces sont équivalentes, nous ne présenterons que l'interface Abis par la suite.

Comme spécifié dans [3GPP 03], l'accès physique entre la BTS et le BSC se fait par des liaisons numériques PCM (Pulse Code Modulation) de 2 Mbps avec une structure de 32 créneaux temporels de 64 Kbps (format E1). Chaque créneau temporel correspond à un canal utilisé sur l'interface radio. Pour adapter le signal radio (13 Kbps) à la liaison PCM (64 Kbps), l'unité de transcodage et d'adaptation de débit (TRAU : Transcoder and Rate Adaptation Unit) doit être utilisée. Dans cette étude, nous considérons que la TRAU est localisée à distance de la BTS pour

garder l'intérêt du signal compressé pour le lien satellite (Figure IV-7). Dans ce cas, le transcodeur TRAU est considéré comme une partie de la BSC, la transmission d'informations (voix/données, signalisations, synchronisations) est basée sur le multiplexage de sous-canaux de 16 Kbps (4 sous-canaux pour un canal de 64 Kbps) [3GPP 04].

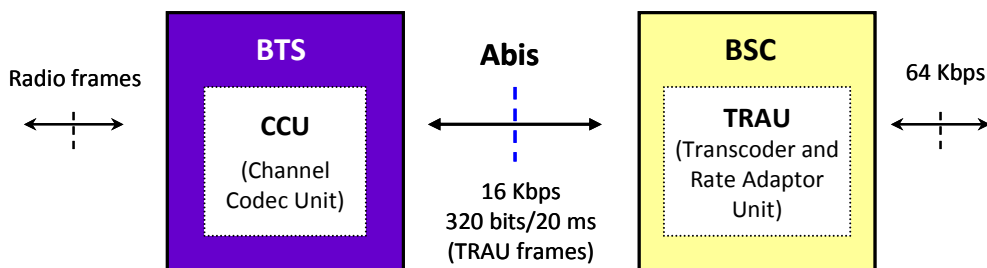


Figure IV-7 : Transmission sur l'interface Abis.

Pour chaque sous-canal, les informations sont transportées par des trames de taille fixe de 320 bits (appelées les trames TRAU) toutes les 20 ms, ce qui correspond à un débit de 16 Kbps. En effet, puisque l'unité de transcodage et d'adaptation de débit est positionnée à distance de la BTS, une partie de la trame TRAU est réservée et sert au contrôle entre la BTS et la TRAU/BSC. Un exemple de trame TRAU pour la transmission de voix est montré dans la Figure IV-8. Dans cet exemple, une charge d'environ 20% (60 bits pour les champs C, T et 0/1) est nécessaire dans une trame TRAU (320 bits) pour la signalisation et la synchronisation, le débit réel pour la transmission est donc bien 13 Kbps (conforme à une liaison radio pour la voix).

		Numéro de bit							
		1	2	3	4	5	6	7	8 (Bit)
Numéro d'octet	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	3	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
	4	1	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
	5	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	36	1	D214	D242	D243	D244	D245	D246	D247
	37	D248	D249	D250	D251	D252	D253	D254	D255
38	1	D256	D257	D258	D259	D260	C16	C17	
39 (Octet)	C18	C19	C20	C21	T1	T2	T3	T4	

**Bit C : Contrôle**  
**Bit D : Donnée**  
**Bit T : Alignement**  
**Reste : Synchronisation**

Figure IV-8 : Structure de la trame TRAU (Transcoder/Rate Adaptor Unit).

Durant la période du bruit de confort (activation par la voix sur la liaison radioélectrique), le mobile transmet une nouvelle trame toutes les 480 ms. Pendant ces 480 ms les trames TRAU "idle" sont envoyées sur l'interface Abis, c'est-à-dire, une trame TRAU "idle" toutes les 20 ms. Pour améliorer l'utilisation de la ressource satellite, il est nécessaire d'éviter les trames TRAU inutiles passées par le lien satellite. Les solutions proposées reposent souvent sur une logique de suppression des trames "idle" lors de la transmission vers le satellite et de restauration de ces trames lors de la réception [GILAT]. Les caractéristiques d'une voie phonie sur l'interface Abis sont résumées par le **Tableau IV-2** :

Etat	Durée Moyenne	Caractéristique
ON	352 ms	1 TRAU / 20 ms
OFF	650 ms	1 TRAU / 480 ms

Tableau IV-2 : Caractéristiques d'une liaison voix sur l'interface Abis.

### IV.3.2 Services d'accès Internet

Comme mentionné au début de ce chapitre, l'architecture générale d'un réseau est définie par l'ensemble des couches et les protocoles associés. Pour les services Internet, l'architecture de référence de réseaux est le modèle TCP/IP d'après le nom de deux protocoles majeurs : le protocole de transport TCP (Transmission Control Protocol) et le protocole réseau IP (Internet Protocol). Par rapport au modèle de référence OSI (en 7 couches), TCP/IP (en 4 couches) offre les avantages suivants :

- L'implémentation du TCP/IP est moins complexe
- La normalisation est plus libre
- La technologie TCP/IP est plus optimisée et efficace pour assurer l'interconnexion de systèmes hétérogènes
- TCP/IP est un modèle largement utilisé au niveau mondial

Le modèle TCP/IP illustré dans la **Figure IV-9** est basée sur le modèle de référence OSI mais adapté à l'implémentation de l'Internet.

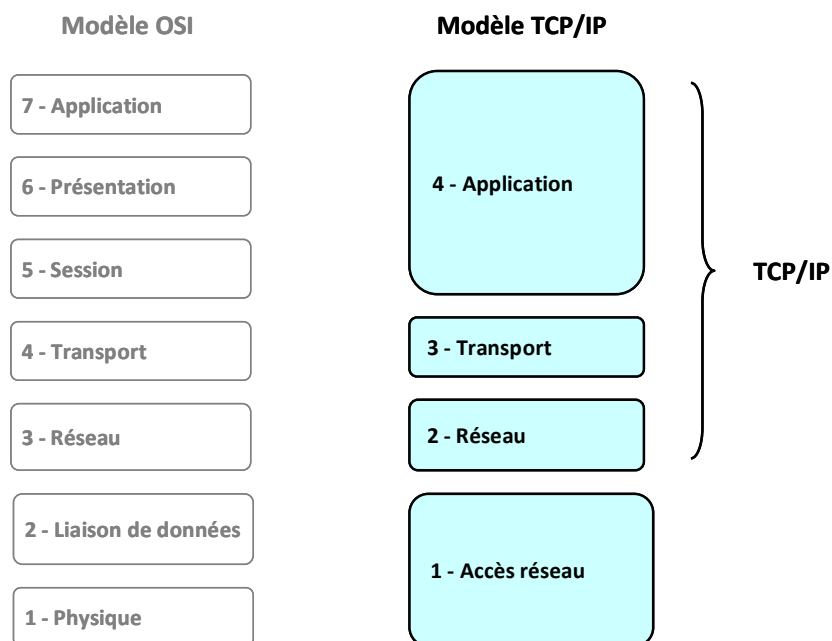


Figure IV-9 : Modèle TCP/IP.

- Dans le modèle TCP/IP, la couche Application qui se situe tout en haut du modèle TCP/IP correspond aux trois couches supérieures du modèle OSI : Application, Présentation et Session. Cette couche contient tous les protocoles de haut niveau, comme par exemple HTTP (HyperText Transfer Protocol), FTP (File Transfer Protocol) et SMTP (Simple Mail Transfer Protocol). Le choix du protocole de la couche Application définit quel protocole de Transport doit être utilisé. A la réception des données, les protocoles de Transport déterminent à quelle Application le paquet doit être délivré.
- La couche Transport du modèle TCP/IP joue le même rôle que celui de modèle OSI, c'est-à-dire, gérer les communications de bout en bout entre des entités. La couche Transport utilise deux protocoles principaux : TCP (Transmission Control Protocol) et UDP (User Datagram Protocol). TCP est un protocole fiable orienté connexion qui permet des transmissions de paquets sans erreurs. UDP est un protocole plus simple mais non fiable. UDP est souvent utilisé dans les cas où la rapidité de transmission est nécessaire et que la perte de données n'est pas trop gênante.
- La couche Réseau est la couche essentielle dans l'architecture TCP/IP, elle permet d'acheminer des paquets de données (appelés datagrammes) dans le réseau en mode non connecté.



- La couche accès réseau peut être considérée comme la «combinaison » des couches Physique et Liaison de données du modèle OSI. Cette couche sous-réseau correspond à l'infrastructure de communication limitée à la couche liaison de données (par exemple : LAN, satellite, etc.) et ne fait pas partie de TCP/IP.

Comme présenté dans la norme [\[ETSI 301 790\]](#), les systèmes DVB-S/RCS incluant IP peuvent utiliser plusieurs architectures protocolaires.

Pour la voie aller DVB-S2, trois architectures protocolaires sont possibles :

- IP sur l'encapsulation multi-protocole MPE (Multi Protocol Encapsulation) sur le flux de transport MPEG-2 (MPEG-TS : Transport Stream)
- IP sur la fonction de segmentation et réassemblage AAL5 (ATM Adaptation Layer 5) sur ATM sur MPEG-TS (méthode optionnelle)
- IP sur l'encapsulation GSE (Generic Stream Encapsulation) sur le flux générique (GS : Generic Stream) (méthode optionnelle pour les mobiles)

Pour la voie retour DVB-RCS, deux architectures sont possibles :

- IP sur AAL5 sur ATM
- IP sur MPE sur MPEG-TS (méthode optionnelle)

Une illustration de l'architecture IP via satellite basée sur la norme [\[ETSI 301 790\]](#) est décrite dans la [Figure IV-10](#).

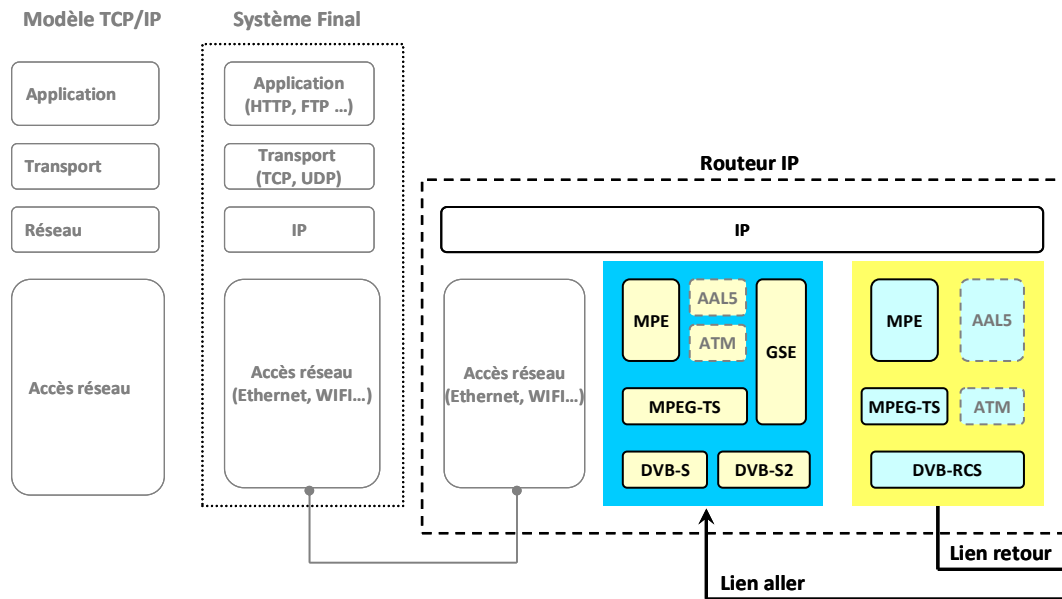


Figure IV-10 : Pile protocolaire du système IP via satellite.

## IV.4 Convergence des trafics sur la liaison satellite

Comme montré dans les parties précédentes, la fonction essentielle pour introduire la liaison satellite dans une architecture réseau est d'adapter les paquets de données (par exemple : CLNP, TRAU, IP...) au format de données DVB. Dans cette section, l'objectif est de faire converger les différents trafics sur la liaison satellite. Nous étudions d'abord les formats de données du lien aller DVB-S2 et retour DVB-RCS. Ensuite, nous présentons différentes méthodes pour encapsuler les paquets de la couche réseau dans le transport de données DVB.

### IV.4.1 Format de données DVB

#### IV.4.1.1 Lien aller DVB-S2

Pour le lien aller DVB-S2, le transport des données peut se faire à travers le flux de transport MPEG-TS [ETSI 301 192]. Plus précisément, les trafics sont multiplexés en encapsulant les paquets dans les trames MPEG de taille fixe (188 octets) dont la séquence forme un flux de transport MPEG-TS. La structure de MPEG-TS est illustrée dans la Figure IV-11 :

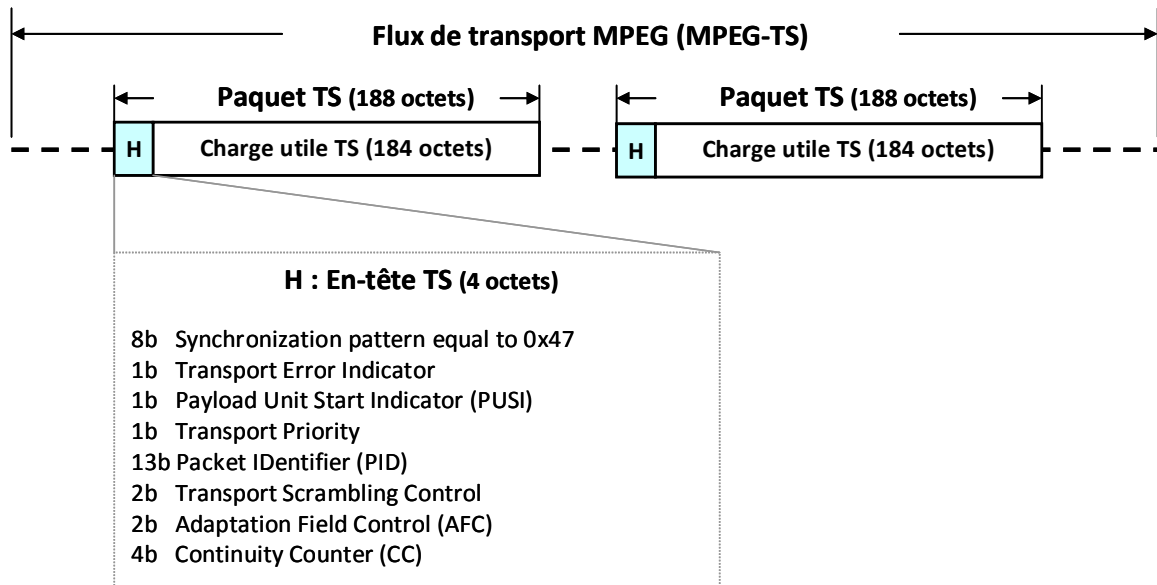


Figure IV-11 : Structure de flux de transport MPEG-TS.

Chaque paquet TS est constitué de 4 octets d'en-tête et 184 octets de charge utile. Le champ PID de 13 bits est utilisé dans l'en-tête pour identifier différents canaux logiques ou flux de signalisation (PID réservé) au sein d'un multiplex. Cette identification permet le premier filtrage des paquets à la réception. En utilisant la signalisation spécifique (c'est-à-dire en transportant des tableaux spéciaux associés avec les PIDs spécifiques), les équipements du réseau DVB peuvent être configurés de façon appropriée, afin qu'ils soient capables de transmettre les flux entrants sans ambiguïté (lecture de tables d'indirection successives). Toutefois, dans la mesure où les 13 bits du PID ne donnent accès qu'à 8192 valeurs, le nombre de canaux disponibles pour transporter les paquets et la signalisation est limité. Le PID ne sert donc pas à identifier les terminaux destinataires mais bien les services. Par exemple, dans le cas d'un service IPoS, la signalisation IPoS utilise le PID 0x0190 et les données (les datagrammes IP) le PID 0x012C. Chaque terminal doit réassembler les données transmises avec le PID du service et appliquer ensuite un filtrage sur adresse (soit adresse MAC fournie dans l'en-tête MPE, soit adresse IP dans le datagramme réassemblé).

Le flux générique (GS: Generic Streams) est un nouveau mode de transport supporté par la deuxième génération du lien aller DVB (DVB-S2). Ce format de transport n'a pas une structure spécifiée, c'est-à-dire que les paquets peuvent être transportés soit sur un flux continu (séquence de bits) soit sur un flux de paquets, sans les contraintes pour la taille du paquet et le délai de transmission.

#### IV.4.1.2 Lien retour DVB-RCS

Sur le lien retour, l'accès au canal satellite est en mode partagé entre plusieurs terminaux reposant sur la technique MF-TDMA. Comme présenté dans le [chapitre III](#), des bursts de trafic de la super-trame MF-TDMA sont basés soit sur des cellules ATM soit sur des paquets MPEG-TS et nous choisissons dans cette étude le format de paquet MPEG pour la voie retour DVB-RCS pour les raisons citées précédemment.

#### IV.4.2 Méthode d'encapsulation

Avant de présenter différentes méthodes d'encapsulation, nous distinguons tout d'abord les termes utilisés pour décrire le type de paquet traité à chaque niveau du réseau pendant l'encapsulation.

Nom	Niveau	Exemple
PDU (Protocol Data Units) ou Datagramme	Couche réseau	IP, CLNP
SNDU (SubNetwork Data Unit)	Couche d'adaptation	Paquet encapsulé MPE
Trame	Couche de liaison	ATM, MPEG

Tableau IV-3 : Types de paquets pendant l'encapsulation.

##### IV.4.2.1 Méthode d'encapsulation sur le flux de transport MPEG

Comme présenté dans [\[ETSI 101 202\]](#), il existe plusieurs façons d'encapsuler des données sur le MPEG-TS. Dans cette section, nous nous intéressons plus particulièrement aux deux méthodes courantes pour l'encapsulation des datagrammes IP (ou des autres paquets de la couche réseau) dans le support MPEG-TS DVB.

##### MPE (Multi Protocol Encapsulation)

L'encapsulation MPE a été proposée pour la première fois en 1996, elle est actuellement largement acceptée et est une méthode recommandée par l'ETSI pour transporter des datagrammes IP via DVB [\[ETSI 301 192\]](#). De plus, MPE peut être utilisée dans des applications au-delà du DVB, par exemple la norme américaine ATSC (Advanced Television Standards Committee).

MPE fournit un mécanisme d'encapsulation des paquets PDUs au dessus de MPEG-TS. Il peut être appliqué dans le cas de flux unicast (les datagrammes sont adressés à un récepteur unique) ; multicast (les datagrammes sont adressés à un groupe des récepteurs) et broadcast - diffusion (les datagrammes sont destinés à tous les récepteurs).

Les paquets PDUs sont encapsulés dans des sections DSM-CC (Digital Storage Media Command and Control) compatibles avec le format de section privée de MPEG en ajoutant un en-tête de 12 octets en début de la section et 4 octets de contrôle CRC (Cyclic Redundancy Check) à la fin. La longueur de la section est éventuellement ajustée par l'ajout de bourrage pour permettre une segmentation en un nombre entier de mots de 188 octets. Le principe de cette méthode d'encapsulation est illustré par la **Figure IV-12** :

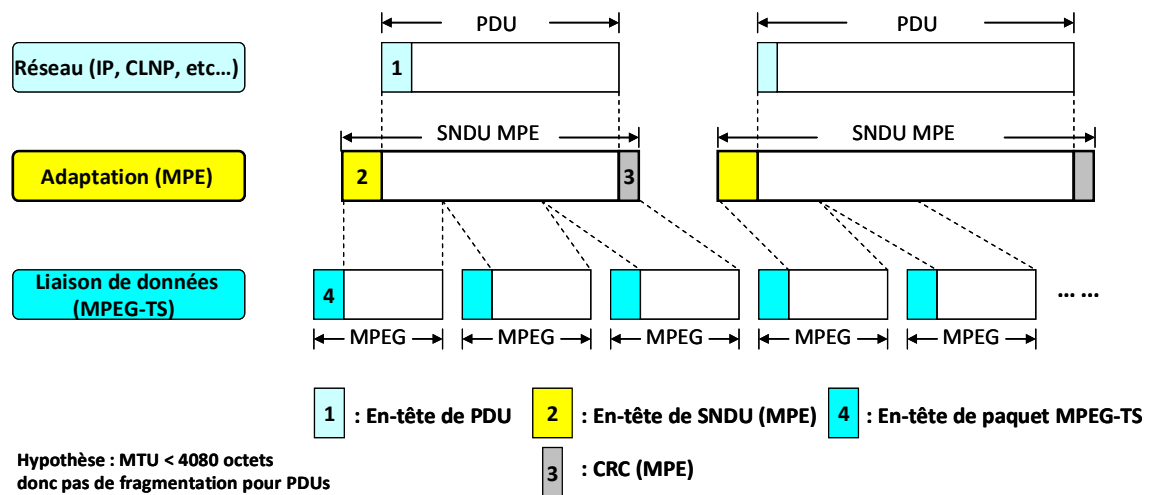


Figure IV-12 : Encapsulation MPE.

Dans l'en-tête SNDU de l'encapsulation MPE (2) dans la **Figure IV-12**, l'adresse MAC du destinataire (6 octets) est une partie importante de l'en-tête. Cependant, dans certains cas, cette adresse MAC peut paraître inutile et introduit donc un coût élevé surtout pour les PDUs de petite taille (par exemple en cas de filtrage sur adresse IP).

### ULE (Unidirectional Lightweight Encapsulation)

Une alternative à l'encapsulation MPE a été recommandée par l'IETF et s'appelle ULE (Unidirectional Lightweight Encapsulation (ULE) [RFC 4326](#)). Il s'agit d'une méthode de "data piping" [ETSI 101 202](#), c'est-à-dire que les PDUs sont directement encapsulés dans la charge

utile des paquets TS via SNDU. La méthode d'encapsulation ULE ne paraît pas très différente de celle de MPE : elle repose toujours sur l'encapsulation des PDUs dans des SNDUs du flux MPEG TS ; dans un SNDU encapsulé, on trouve toujours un en-tête et un CRC de 4 octets. Toutefois, l'ULE utilise un en-tête moins complexe que la solution MPE en réduisant le nombre d'octets et le nombre de champs que le récepteur doit analyser. La structure de paquets SNDU pour l'ULE est montrée dans la [Figure IV-13](#).

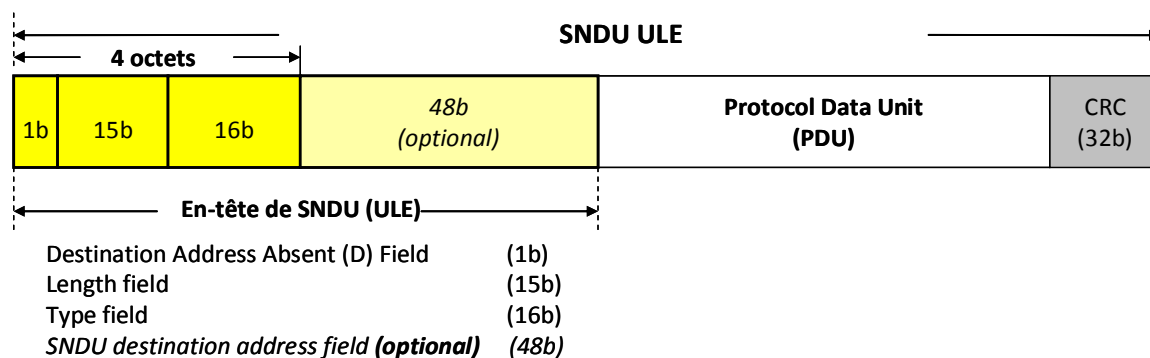


Figure IV-13 : Structure de SNDU de l'encapsulation ULE (sans extension).

Par rapport au MPE, la présence du champ d'adresse destination MAC dans l'en-tête ULE est optionnel et signifiée par l'indicateur "Destination Address Absent" (D=0 : Présence ; D=1 : Absence). Cette définition permet, dans certains cas, d'omettre le champ d'adresse qui est redondant et inutile afin de diminuer la taille d'en-tête, par exemple, pour les récepteurs qui sont capable d'utiliser une autre indentation (adresse destination IP). La présence de l'adresse destination MAC est alors inutile. Dans ce cas, le D est mis à 1 et 6 octets (optionnel) de l'adresse destination MAC sont ainsi économisés.

De plus, ULE supporte aussi l'extension d'en-tête [\[RFC 5136\]](#) (ce qui n'est pas indiqué dans la [Figure IV-13](#)). L'utilisation de l'extension d'en-tête permet d'ajouter des nouveaux champs de protocole à un PDU pour offrir une compatibilité avec les implémentations existantes. Toutefois, l'utilisation d'extension d'en-tête est dépendante du système.

#### IV.4.2.2 Méthode d'encapsulation sur le flux générique

##### GSE (Generic Stream Encapsulation)

Dans la seconde génération du DVB-S, une nouvelle méthode de transmission est proposée. Cette méthode générique (dénommée GS) permet de transporter directement des paquets de la couche réseau (PDUs) sur le lien satellite sans utiliser la couche liaison MPEG-TS. Un nouveau mécanisme d'encapsulation basé sur cette approche a été normalisé à la fin de l'année 2007, il s'appelle GSE (Generic Stream Encapsulation) [GSE 07]. Les caractéristiques principales de cette méthode d'encapsulation sont :

- permettre l'encapsulation pour plusieurs protocoles de la couche réseau (IP, Ethernet, ATM, etc.)
- être flexible pour appliquer les techniques FMT (ex : ACM) dans la deuxième génération du système DVB
- supporter plusieurs modes d'adressage : sans/avec l'adresse MAC (6 octets), adresse de 3 octets (ex : 1 octet group ID et 2 octets logon ID dans le DVB-RCS, serial number dans IPos)
- permettre le filtrage L3 (filtrage par l'adresse IP)
- proposer une mise en œuvre simple

Le principe de la méthode GSE est d'encapsuler les PDUs dans les paquets de la couche 2 (SNDU GSE) de taille variable qui peuvent être directement placés dans la charge utile 'Base Band Frame' (BB FRAME) de la couche physique :

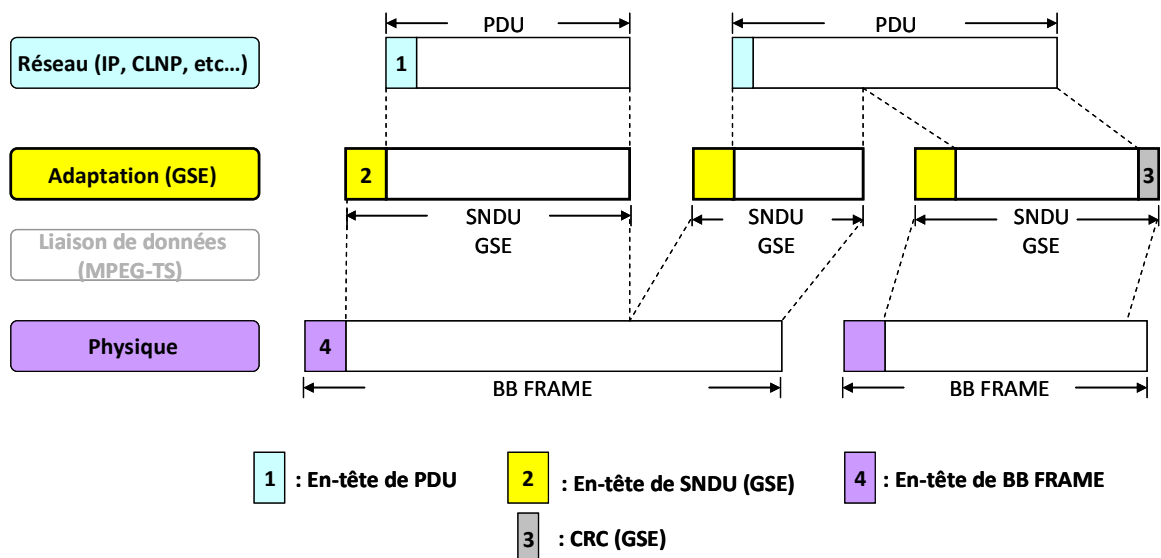


Figure IV-14 : Encapsulation GSE.

En général, le SNDU GSE est de taille variable, composé d'un en-tête GSE (minimum de 2 octets) suivi par un paquet entier ou un fragment de paquet PDU et 4 octets du contrôle d'intégrité CRC. Contrairement à méthode MPE ou ULE, le CRC n'est nécessaire que pour le dernier fragment d'un PDU fragmenté dans l'encapsulation GSE (contrôle du réassemblage). Le flux de paquets GSE est ensuite placé dans le champ de BBFRAME. Souvent, un BBFRAME peut porter un ou plusieurs (il s'agit donc d'un multiplexage) paquets GSE et la taille de BBFRAME peut être constante ou variable. Un exemple de format de SNDU GSE est montré dans la **Figure IV-15**.

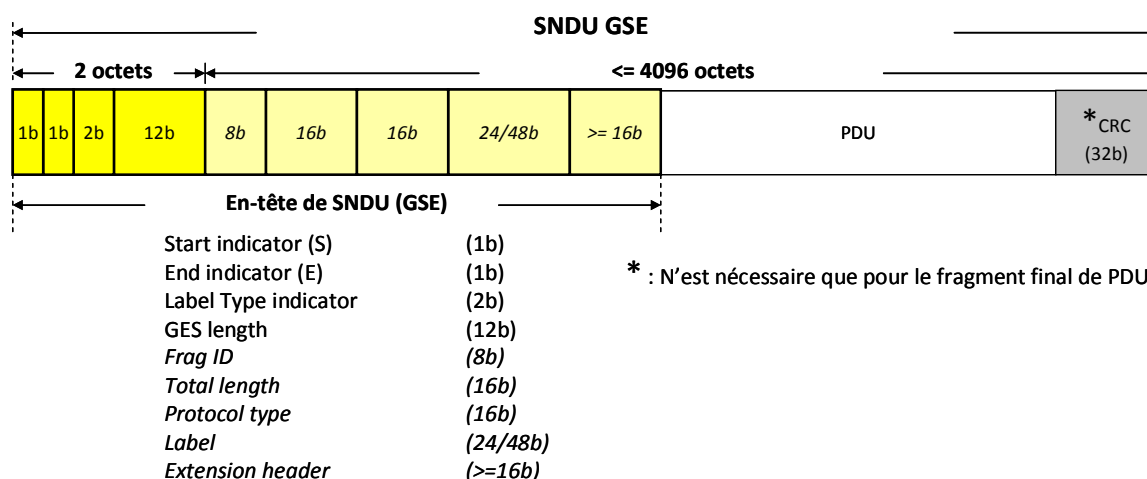


Figure IV-15 : Exemple de format de paquet GSE.

GSE est une méthode simple et efficace pour fragmenter/réassembler des paquets PDUs en utilisant la combinaison de trois indicateurs (flags) : 'S', 'E' et 'Frag ID' :

S (Start)	E (End)	Frag ID	Description
1	1	/	Le paquet GSE contient un paquet PDU entier
1	0	présent	Le paquet GSE contient le début d'un paquet PDU fragmenté Le champ 'Total length' est présent pour vérifier la taille totale de paquet PDU après le réassemblage au récepteur
0	1	présent	Le paquet GSE contient la fin d'un paquet PDU fragmenté
0	0	présent	Le paquet GSE contient un fragment PDU intermédiaire

Tableau IV-4 : Fragmentation/Réassemblage Indicateurs de GSE.

Tous les paquets GSE qui contiennent les fragments d'un même paquet PDU portent les 'frag ID' identiques et doivent être transmis dans l'ordre. Le récepteur commence la procédure de



réassemblage de paquet PDU s'il reçoit un paquet GSE (Début) avec  $S = 1$  et  $E = 0$ . Il crée un buffer qui permet de stocker le paquet PDU entier à réassembler avec la taille précisée dans le champ 'Total length' du paquet reçu (Début). Pour les paquets Intermédiaires ( $S = 0$  et  $E = 0$ ) qui portent les 'frag ID' identiques, le récepteur les place dans le buffer et vérifie si la taille totale du paquet réassemblé dépasse 'Total length' (dans ce cas, la procédure de réassemblage échoue et les paquets stockés dans le buffer sont détruits). Quand le paquet (Fin) avec  $S = 0$  et  $E = 1$  est reçu, le récepteur termine le réassemblage par la vérification de la taille totale du paquet réassemblé et du contrôle d'intégrité CRC.

Comme l'ULE, GSE peut utiliser une extension d'en-tête [RFC 5136] pour la transmission de nouveaux types de données, la concaténation des différents PDUs en un seul paquet GSE, etc.

GSE a été conçu pour la liaison DVB-S2, ce qui explique que la norme fasse référence aux trames BBFRAME typiques des liaisons DVB-S2 (Figure IV-14). Le principe de GSE est cependant suffisamment souple pour envisager une application sur d'autres supports.

Les performances des encapsulations MPE et ULE (surtout pour l'encapsulation de paquets IP sur MPEG-TS) ont déjà largement étudiés [HON 05] [XIL 06]. Grâce à la réduction d'en-tête en éliminant les champs inutiles pour la transmission des paquets IP via DVB, la méthode ULE offre plus de simplicité et de meilleures performances que la méthode MPE. Cependant, la comparaison entre GSE et ULE/MPE n'est pas directe. Le but de la méthode GSE est concentré sur la flexibilité de fragmentation et l'exploitation des mécanismes d'adaptation (ACM), plutôt que sur la minimisation d'en-tête. Les performances du système GSE dépendent fortement des caractéristiques de trafics, des politiques d'ordonnancement et de l'utilisation de l'ACM.



# Chapitre V

## ARCHITECTURE DU TERMINAL AVION : APPROCHE CLASSIQUE ET APPROCHE DYNAMIQUE

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la conception de l'architecture du terminal avion pour le lien retour DVB-RCS. Cette démarche commence par la définition d'une première version d'architecture dite classique et basée sur le modèle de référence BSM (Broadband Satellite Multimedia), en respectant le concept en couches et ses règles. Cependant, en effectuant plusieurs tests expérimentaux par simulations, nous remarquons qu'il existe une nécessité d'avoir des interactions entre des couches adjacentes ou non pour optimiser les performances du système. Ces techniques sont connues sous le nom de techniques « Cross-Layer ». Nous proposons ensuite un état de l'art des différentes techniques « Cross-Layer » permettant d'optimiser la gestion de ressources et les performances. Basé sur cet état de l'art et une analyse critique, nous proposons enfin une version optimisée pour l'architecture du terminal avion avec des interactions « Cross-Layer ».

### V.1 Approche classique

#### V.1.1 Architecture BSM par ETSI

Le groupe BSM (Broadband Satellite Multimedia) de l'ETSI a défini une architecture protocolaire de référence [ETSI 102 292] pour un réseau IP intégrant le lien satellite. Cette architecture BSM est montrée dans la [Figure V-1](#). Le concept de l'architecture BSM est la séparation entre les fonctions qui sont applicables à tous les systèmes par satellite (satellite indépendant ou SI) et les fonctions qui sont spécifiques à une technologie satellitaire (satellite dépendant ou SD).

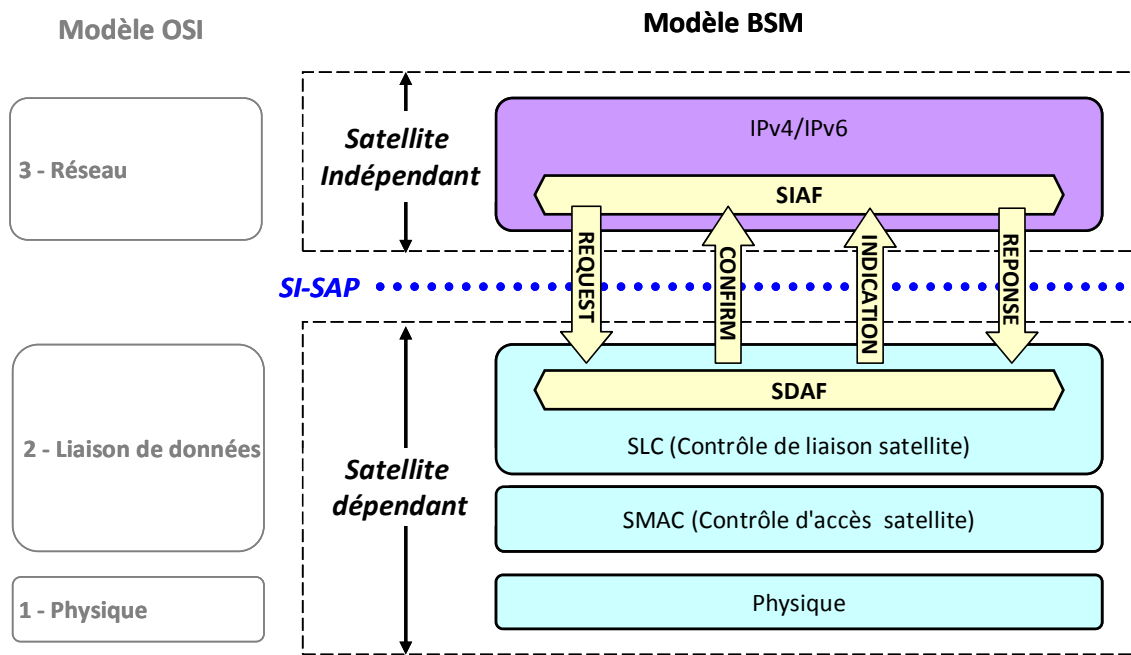


Figure V-1 : Architecture protocolaire BSM.

Dans l'architecture BSM, une interface commune entre les couches SI et SD est définie pour fournir essentiellement les mêmes services à toutes les familles de l'interface air pour les systèmes de communication par satellite (c'est-à-dire à toutes les couches SD). Cette interface est appelée SI-SAP (Satellite Indépendant - Service Access Point). Dans la spécification du SI-SAP [ETSI 102 357], deux fonctions d'adaptation sont définies :

- **SIAF** (Satellite Independent Adaptation Functions) : elle s'applique en bas de la couche 3 pour l'adaptation entre les protocoles de couche 3 et les services SI-SAP
- **SDAF** (Satellite Dependent Adaptation Functions) : elle opère en haut de la couche 2 pour l'adaptation entre les services SI-SAP et les services natifs offerts par le BSM

Les interactions entre les couches SD et SI sont basées sur les primitives de service SI-SAP. Ces primitives représentent, d'une manière abstraite, les échanges d'information et de contrôle entre les couches adjacentes (normalement entre SIAF et SDAF). Il existe quatre types de primitives SI\_SAP :

- **REQUEST** : utilisée quand la couche SI demande un service à la couche SD.

- **INDICATION** : utilisée par la couche SD pour envoyer la notification à la couche SI. Cette notification peut être liée à une 'REQUEST' ou juste une information sur les événements de la couche SD.
- **REPONSE** : permet à la couche SI de répondre à la primitive 'INDICATION' envoyée par la couche SD.
- **CONFIRM** : envoyée par la couche SD pour confirmer que l'activité demandée par l'ancienne primitive 'REQUEST' est terminée.

A l'interface SI-SAP, les trafics IP peuvent être différenciés en plusieurs files abstraites en utilisant des identifiants de file (QIDs : Queue IDentifiers). Les QIDs représentent les files disponibles dans les couches SD et permettent d'associer les files IP aux files SD en cachant les mises en œuvre des technologies satellitaires dépendantes. Chaque QID est caractérisé par une propriété qui définit la façon comment les paquets sont transférés dans le système BSM (par exemple : la priorité de traitement). Basé sur ces files, les couches SD sont chargées de calculer les requêtes de capacité et d'allouer la ressource satellite.

### V.1.2 Projection de l'architecture BSM dans le cas du terminal avion

L'architecture protocolaire BSM est dédiée uniquement aux services Internet, mais elle peut également être étendue aux autres réseaux, par exemple ATN, GSM/UMTS dans notre étude. Nous utilisons donc le modèle BSM comme référence pour étudier l'architecture du terminal avion.

Une première approche du terminal avion dite « classique » est d'abord proposée : elle respecte strictement le concept « en couches » et la séparation entre les couches « satellite indépendant » et les couches « satellite dépendant ». Cette approche est illustrée dans la [Figure V-2](#) :

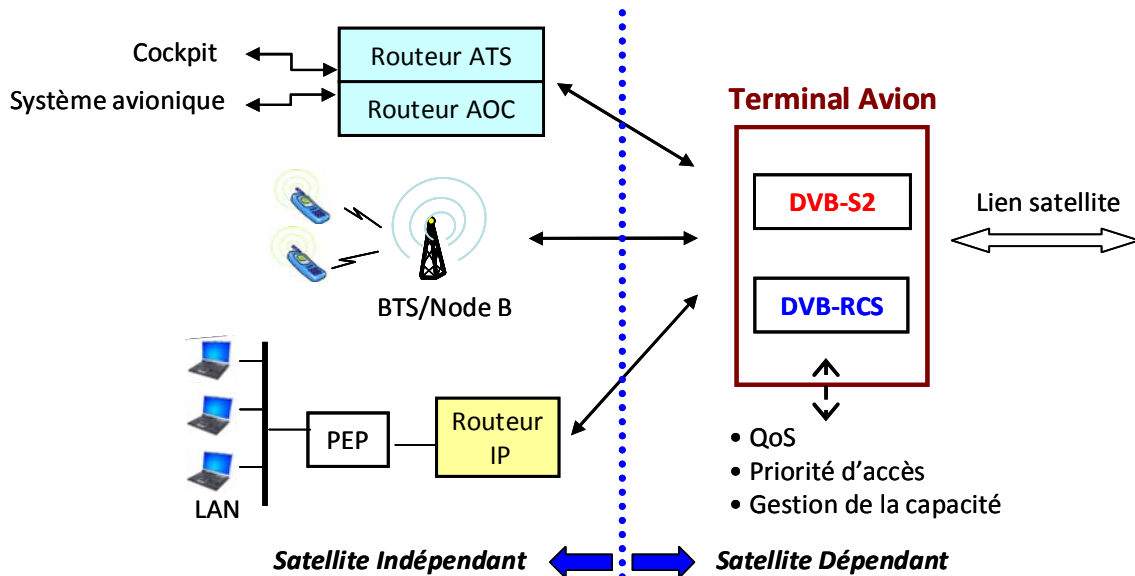


Figure V-2 : Cœur du système : Approche classique.

Dans cette première approche, les différents flux (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP), qui sont associées à leurs couches SI, convergent à l'interface SI-SAP. Pour différencier les flux entrants, trois files abstraites (QIDs) sont utilisées avec des priorités de traitement :

$$\text{ATS/AOC} > \text{GSM/UMTS} > \text{IP}$$

Dans les couches SD, les données sont segmentées/encapsulées en paquets MPEG. Ces paquets MPEG constituent la charge utile des créneaux TRF envoyés sur le lien DVB-RCS. Trois PID (Packet Identifier) sont nécessaires afin de permettre d'identifier les paquets des trois types de service.

Au niveau MAC, un serveur est mis en place et permet les deux fonctions suivantes :

- Calcul des requêtes de capacité
- Ordonnancement et contrôle d'accès au lien satellite

Comme indiqué dans la **Figure V-2**, dans cette approche classique, la gestion de la ressource, la QoS et la priorité d'accès sont toutes obtenues au niveau de la couche MAC. Autrement dit, les différents flux sont multiplexés dans la couche d'accès afin d'être transmis sur le lien unique DVB-RCS. L'architecture protocolaire de cette approche classique est détaillée dans la **Figure V-3** :

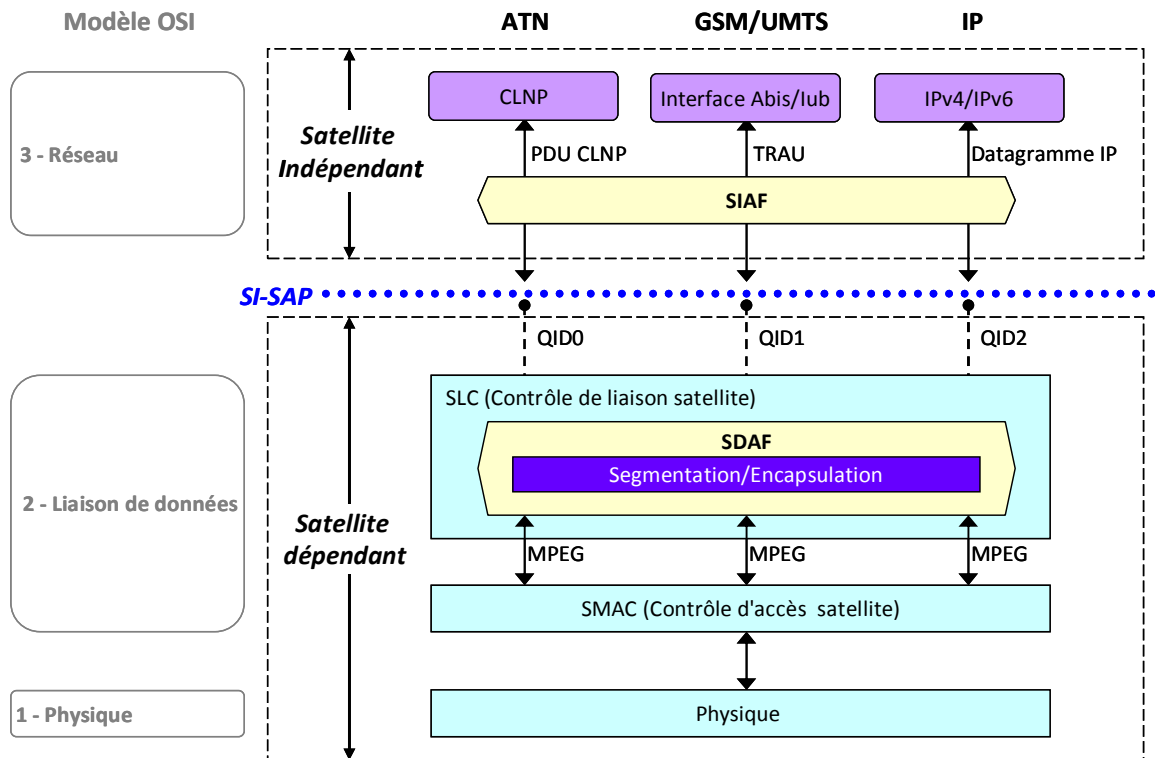


Figure V-3 : Architecture du terminal avion (Approche classique).

### V.1.3 Mise en œuvre détaillée

#### V.1.3.1 Réseau ATN

Comme présenté dans la [partie IV.2.2](#), la couche réseau de l'ATN utilise le protocole CLNP pour la transmission de données. Les paquets envoyés par le CLNP au sous réseau sont des PDUs CLNP [\[ISO 8473\]](#). Le format de paquet CLNP est montré dans la [Figure V-4](#). Ce format de paquet supporte des adresses (source et destination) de taille variable jusqu'au 20 octets de type NSAP (Network Service Access Point) [\[ISO 8348\]](#) pour le routage. L'adresse NSAP est une adresse à structure hiérarchique qui s'applique au niveau mondial et permet d'identifier les équipements terminaux (hosts) et intermédiaires (routeurs) dans les réseaux OSI. Dans l'approche classique, puisqu'un canal logique (PID) est réservé à chaque type de flux, le récepteur est capable de filtrer des paquets en utilisant la combinaison du PID et l'adresse NSAP (L3 filtrage). Dans ce cas, La présence de l'adresse destination MAC n'est plus utile. L'encapsulation ULE est la méthode retenue car, comme vu précédemment dans le [chapitre IV](#), elle génère des en-têtes de paquet

SNDU de taille moins importante que MPE : un en-tête de 8 octets suffit avec le champ D (Destination Address Absent field) = 1.

Network Layer Protocol Identifier				Length Indicator	
Version Protocol ID extension				Lifetime	
SP	MS	E/R	Type	Segment Length	
Checksum					
Destination Address Length Indicator					
Destination Address					
Source Address Length Indicator					
Source Address					
Data Unit Identifier		Segment Offset		Total Length	
Options					
DATA					

Figure V-4 : Format de paquet PDU CLNP.

### V.1.3.2 Réseau GSM/UMTS

Pour le réseau GSM/UMTS, comme détaillé dans la section [IV.3.1.3](#), nous avons choisi l'interface Abis/lub comme le point de coupure pour l'introduction de la liaison satellite. Le problème qui se pose est que l'interface Abis/lub est basée sur les structures E1 [\[HEI 98\]](#) ou ATM et aucune de ces structures ne permet d'intégrer le lien satellite DVB. Pour cette raison, nous proposons une encapsulation "ad-hoc" qui sert à encapsuler directement le flux de trafic (sous forme de trame TRAU) à la sortie du BTS dans les paquets MPEG. Compte-tenu de la charge utile d'un paquet MPEG (180 octets), le nombre maximum de trames TRAU (40 octets) pouvant être encapsulés dans un paquet MPEG est fixé à 4.

### V.1.3.3 Réseau TCP/IP

Pour le réseau TCP/IP, les PDUs envoyés aux couches SD sont sous forme de datagrammes IP. Comme pour les PDUs CLNP, l'en-tête IP supporte l'adresse (32 bits) qui permet d'identifier un équipement destinataire sur le réseau. Le filtrage L3 est réalisé en combinant le PID et l'adresse IP. Ici aussi, la méthode d'encapsulation ULE permet d'éviter la transmission de l'adresse MAC.



La capacité maximum qui peut être attribuée à un terminal avion est dépendante du bilan de liaison et présentée dans le [chapitre III](#) (1 Mbps dans notre exemple). On peut faire l'hypothèse que les flux IP qui excèdent cette limite génèrent une congestion au niveau MAC. De plus, les requêtes de capacité calculées à la base de cette file MAC congestionnée ne peuvent pas être représentatives.

Dans le routeur IP, une technique de « seau percé » (Leaky Bucket) est mise en place pour conditionner le flux IP. Ce contrôle d'admission statique permet d'obtenir un trafic ayant un débit constant  $R$  qui correspond à la ressource disponible au niveau MAC. Le principe de ce mécanisme est :

- débit de sortie constant (tant que le seau n'est pas vide)
- contenance maxi (si dépassement alors perte)
- sur un routeur, profondeur du seau = longueur de la file d'attente

En outre, un mécanisme de la gestion active de file d'attente RED (Random Early Detection) [\[FLO 93\]](#) est mise en œuvre au routeur IP. L'avantage de l'utilisation du RED est d'optimiser la gestion des files d'attente et d'éviter les congestions lorsque plusieurs connexions TCP sont en concurrence dans un routeur-goulet d'étranglement (IP routeur dans notre étude). De plus cette technique permet de lisser les pertes de datagrammes dans le temps plutôt que d'obtenir des pertes groupées sur congestion effective et gênant ainsi fortement les performances des couches hautes.

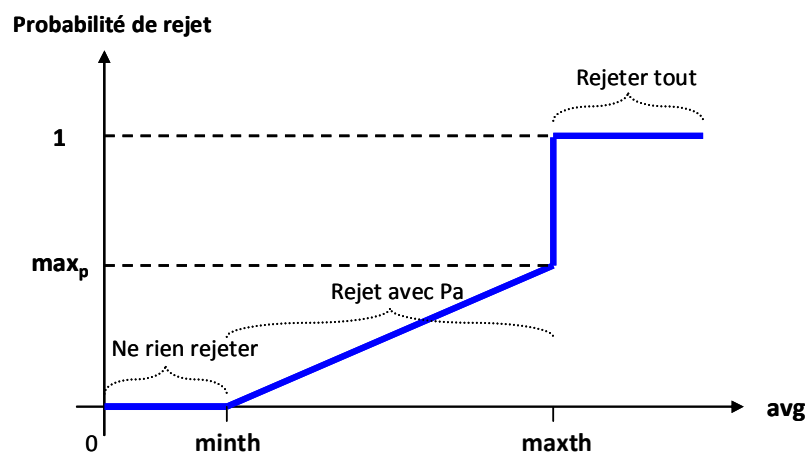


Figure V-5 : Mécanisme RED (Random Early Detection).

Le principe de l'algorithme RED (**Figure V-5**) est de détecter la congestion avant d'avoir une file d'attente bien remplie. Chaque fois qu'un paquet arrive dans la file d'attente, RED calcule la taille moyenne glissante à pondération exponentielle 'avg' (EWMA : Exponentially Weighted Moving Average) et la compare avec les deux seuils ('minth' et 'maxth'). Si 'avg' se trouve entre les deux seuils, le paquet sera détruit avec la probabilité calculée en fonction croissante de 'avg' ; si 'avg' dépasse le seuil maximum 'maxth', le paquet est rejeté. Les détails de l'algorithme RED est montrés par le pseudo-code ci-dessous :

Soit avg la taille moyenne de file d'attente  
Soit count le nombre de paquets depuis le dernier rejet  
Soit minth la valeur de seuil minimum (en paquet)  
Soit maxth la valeur de seuil maximum (en paquet)  
Soit wq la pondération pour calculer l'avg  
Soit q la taille réelle de file d'attente  
Soit Pa la probabilité de rejet

Initialisation :

avg  $\leftarrow$  0  
count  $\leftarrow$  -1

A l'arrivée de chaque paquet

Si la file n'est pas vide

avg  $\leftarrow$  (1-wq)\*avg + wq\*q

Sinon

m  $\leftarrow$  nombre de paquets générés pendant la période où la file est vide

avg  $\leftarrow$  (1-wq)<sup>m</sup> \* avg

Si minth  $\leq$  avg < maxth

count = count +1

Pb  $\leftarrow$  maxp (avg - minth) / (maxth - minth)

Pa  $\leftarrow$  Pb / (1 - count \* Pb)

Avec probabilité Pa

Rejeter le paquet

count  $\leftarrow$  0

Si avg  $\geq$  maxth

Rejeter le paquet

count  $\leftarrow$  0

Si avg < minth

count  $\leftarrow$  -1

Dans cette étude, les paramètres RED sont configurés avec les valeurs recommandées dans **[FLO 97]** :

- minth = 5 paquets
- maxth = 15 paquets

- $w_q = 0,002$
- $\max_p = 0,02$

La mise en œuvre détaillée de l'architecture dans le contexte de l'approche classique est illustrée dans la **Figure V-6** :

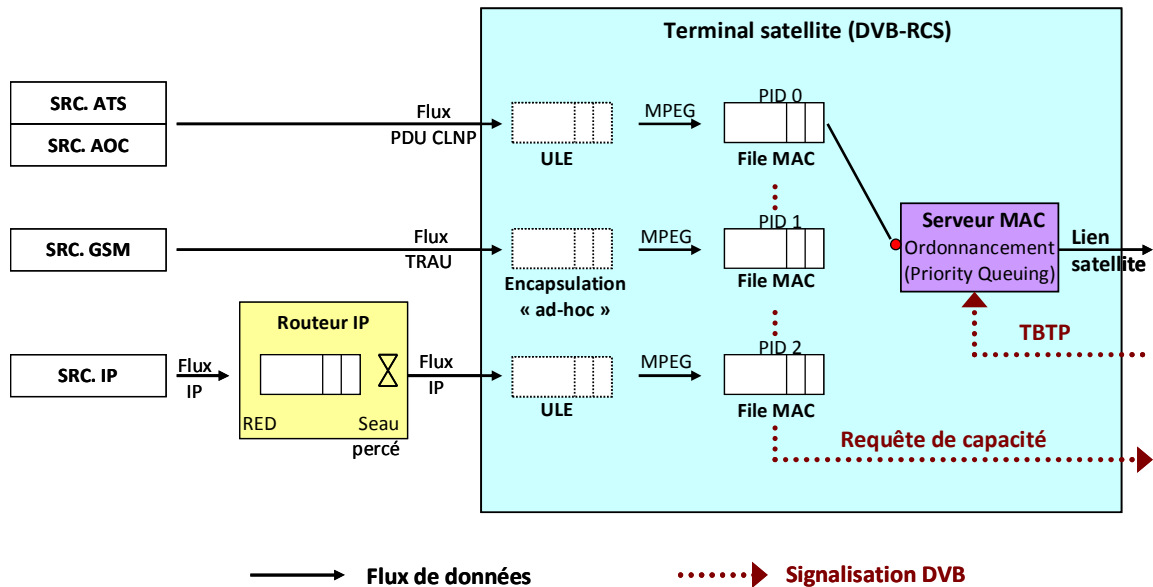


Figure V-6 : Mise en œuvre détaillée de l'architecture de l'approche classique.

#### V.1.4 Etude préliminaire de l'approche classique

Pour évaluer les performances du système de l'approche classique, un scénario de simulation est modélisé à l'aide du logiciel OPNET Modeler. En ce qui concerne le terminal avion du lien retour DVB-RCS, comme montré dans la **Figure V-6**, certaines simplifications et adaptations sont prises en compte.

D'abord, conformément à ce qui est présenté dans la partie **II.3**, nous supposons que les sources de trafic 'ATS/AOC', 'GSM/UMTS' représentent respectivement les flux des réseaux ATN et GSM/UMTS arrivant à l'interface SI-SAP. Pour les services IP, nous utilisons un ensemble de sources 'TCP greedy' modélisant un trafic élastique qui s'adapte dynamiquement à la capacité disponible et génère les segments TCP qui sont ensuite encapsulés dans des datagrammes IP.

Pour réduire la complexité du scénario et se concentrer sur le fonctionnement du terminal avion, la répartition des terminaux, le dimensionnement de la ressource satellitaire ainsi que la mise en œuvre de techniques FMT sont tous simplement interprétés par une seule variable de simulation :

nombre de paquets TRF alloués. Cette variable représente le résultat d'allocation TBTP envoyé au terminal par la GW (NCC) à chaque durée de super-trame. Cette simplification nous permet, d'alléger le modèle de simulation et donc de réduire les temps de calculs tout en obtenant un fonctionnement global du système représentatif.

Dans le premier essai, le nombre de créneaux TRF alloués à un terminal varie aléatoirement et uniformément de 24 à 36. Ceci correspond à un canal avec :

- débit minimum : 580 Kbps
- débit maximum : 870 Kbps
- débit moyen : 730 Kbps

Sachant que les sources de trafics ATS/AOC et GSM/UMTS génèrent des flux qui correspondent un débit moyen cumulé de 256 Kbps (sans compter la partie d'en-tête et l'encapsulation), le débit moyen disponible pour le flux IP ne sera pas supérieur à 474 Kbps. Cette remarque nous permet d'estimer une borne supérieure pour le flux IP. Nous choisissons ensuite d'étudier 3 débits différents pour configurer le seau percé mis en place au routeur IP : 384, 448, 512 Kbps.

Le **Tableau V-1** nous montre les volumes reçus en 1 heure pour les trois types de flux. Nous remarquons que grâce à la politique PQ (Priority Queuing), la modification du débit du seau percé IP n'a pas d'incidence pour les deux autres flux (ATS/AOC et GSM/UMTS) : l'augmentation du débit IP ne se fait pas aux dépens de ces deux flux qui sont prioritaires. Pour le flux IP, suite à l'augmentation du débit du « seau percé », les volumes IP reçus accroissent. Les taux d'utilisation (en moyen) de la ressource allouée (**Figure V-7**) nous montrent que pour la configuration à 512 Kbps, les trois types de flux remplissent pleinement la capacité allouée.

Débit du seau percé (R) (Kbps)	Volume ATS/AOC reçu (Kilo octets)	Volume GSM/UMTS reçu (Kilo octets)	Volume IP reçu (Kilo octets)	Volume Total Recu (Kilo octets)
384	60	76,984	162,630	239,674
448	60	77,058	189,645	266,763
512	60	77,225	194,748	272,033

Tableau V-1 : Volumes reçus en 1 heure - Approche classique.

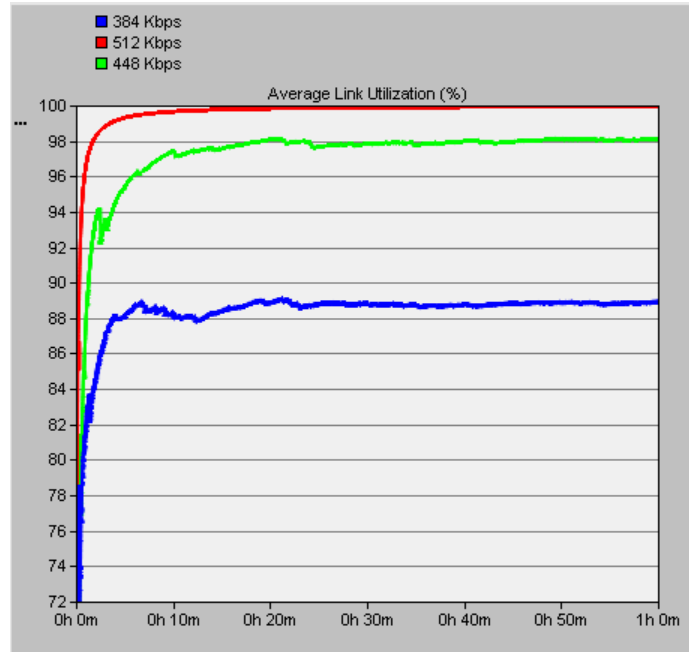


Figure V-7 : Taux d'utilisation moyen de la ressource allouée - Approche classique.

Nous nous intéressons également au taux d'occupation des files d'attente au niveau MAC et au fonctionnement du RED mis en place au routeur IP (**Tableau V-2**). Pour les flux ATS/AOC et GSM/UTMS, les tailles moyennes des files d'attente sont très petites, les délais d'attente correspondants sont donc très courts (moins de 50 ms dans ces exemples). Cependant, un problème apparaît dans la configuration du débit IP 512 Kbps : beaucoup de paquets sont stockés au niveau MAC, cette file d'attente 'énorme' introduit alors des délais très élevés (~5 seconds en moyenne) ce qui ne permet pas de garantir les performances des services IP. De plus, les requêtes de capacités calculées sur la base de cette file 'congestionnée' ne sont pas représentatives. Par ailleurs, nous pouvons remarquer que pour la file d'attente du routeur IP où le mécanisme RED est mis en place, sa taille moyenne glissante à pondération exponentielle est pratiquement nulle. C'est-à-dire qu'aucun paquet n'est rejeté au routeur IP, et que le RED ne permet pas d'éviter les congestions dans la couche MAC. Ceci s'explique par le fait que le débit de sortie de la file d'attente au niveau 3 étant relativement élevé, cette file ne stocke pratiquement pas et n'a donc pas lieu de mettre en œuvre le RED implémenté. Par contre la file aval (couche MAC) stocke anormalement un nombre important de paquet (en moyenne 1800).

Niveau de mesure	MAC	MAC	MAC	IP
Débit du seau percé ( $R$ ) (Kbps)	Taille de file ATS/AOC (paquet TRF)	Taille de file GSM/UMTS (paquet TRF)	Taille de file IP (paquet TRF)	Avg RED (paquet IP)
<b>384</b>	4	5	14	7
<b>448</b>	4	5	160	5
<b>512</b>	4	5	<b>1800</b>	<b>~0</b>

Tableau V-2 : Taille moyenne des files d'attente dans le terminal avion - Approche classique.

Nous voyons donc qu'il est difficile de paramétrer le débit du seau percé ( $R$ ) avec une valeur fixe et convenable. En cas de  $R$  trop faible, on obtient une sous utilisation de la capacité attribuée ; et en cas de  $R$  trop élevé, des problèmes de congestions ou du moins de « surstockage » sont mis en évidence au niveau MAC et génèrent un délai d'attente élevé. De plus, les requêtes de capacités calculées dans ce cas ne sont pas représentatives. Dans les exemples montrés précédemment, parmi les trois débits choisis pour configurer le seau percé,  $R = 448$  Kbps représente un bon compromis entre l'utilisation de ressource (98%) et le délai pour le flux IP. Par contre, ce débit n'est valide que dans ce scénario simplifié avec l'hypothèse sur la capacité allouée bien précise. Dans le cas réel, cette capacité allouée n'est pas connue, car elle dépend plusieurs facteurs comme la répartition de la bande du répéteur, les charges des terminaux, la mise en œuvre des techniques FMT, etc. et il est alors impossible d'évaluer la capacité effectivement disponible pour le flux IP.

Les courbes de densité de probabilité cumulées des délais de couche 3 à couche 3 pour les trois types de services sont montrées dans la [Figure V-8](#) ( $R = 448$  Kbps). Nous pouvons remarquer que conformément à la politique PQ (Priority Queuing) mise en oeuvre au niveau MAC, les trois types de services sont transmis avec l'ordre des priorités ATS/AOC > GSM > IP. De plus, les délais requis pour les services cockpit et la téléphonie mobile sont garantis. Pour les services IP, 95% des datagrammes sont transmis avec des délais de 2 secondes ou moins.

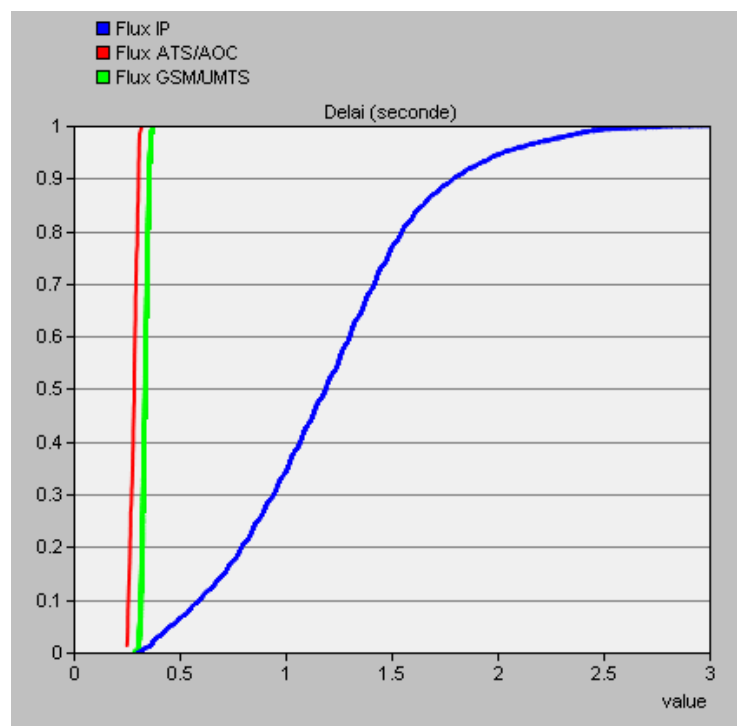


Figure V-8 : Courbes CDF des délais (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) - Approche classique.

Comme conclusion de ce premier scénario sur l'approche classique, nous soulignons que même si nous obtenons des résultats corrects connaissant la capacité disponible pour le flux IP (ce qui n'est pas vrai en réel), cette approche classique n'est pas adaptative. Afin de le démontrer, nous avons effectué une nouvelle simulation avec le même débit du « seau percé » de 448 Kbps mais en mettant le flux GSM/UMTS en veille. Comme prévu, le volume IP reçu reste le même. C'est-à-dire, même si la capacité disponible pour le flux IP est accrue, le service IP ne peut pas profiter de cette capacité supplémentaire à cause du contrôle statique. Le taux moyen d'utilisation du canal est dans ce cas relativement faible (68%).

### V.1.5 Contrôle dynamique du flux IP

Pour avoir une approche adaptative, nous proposons ensuite une nouvelle approche par la mise en place d'interactions entre le serveur MAC et le seau percé par un flux de signalisation (**Figure V-9**). Nous l'appelons dans la suite : approche dynamique. Chaque fois que le serveur MAC reçoit la table TBTP, il attribue les slots TRF au trois files de MAC correspondant aux trois flux selon leur priorité. Il utilise aussi ces informations pour estimer la capacité disponible pour le trafic IP. Pour éviter un contrôle du débit fluctuant trop rapidement, cette capacité correspond à un débit

moyen glissant à pondération exponentielle. Le résultat d'estimation est ensuite envoyé au contrôleur de débit du routeur IP par la signalisation et lui permet d'adapter la valeur  $R$  du « seau percé » pour conditionner le flux IP. Autrement dit, le débit de sortie du « seau percé » est dynamiquement piloté par le serveur MAC dans cette approche.

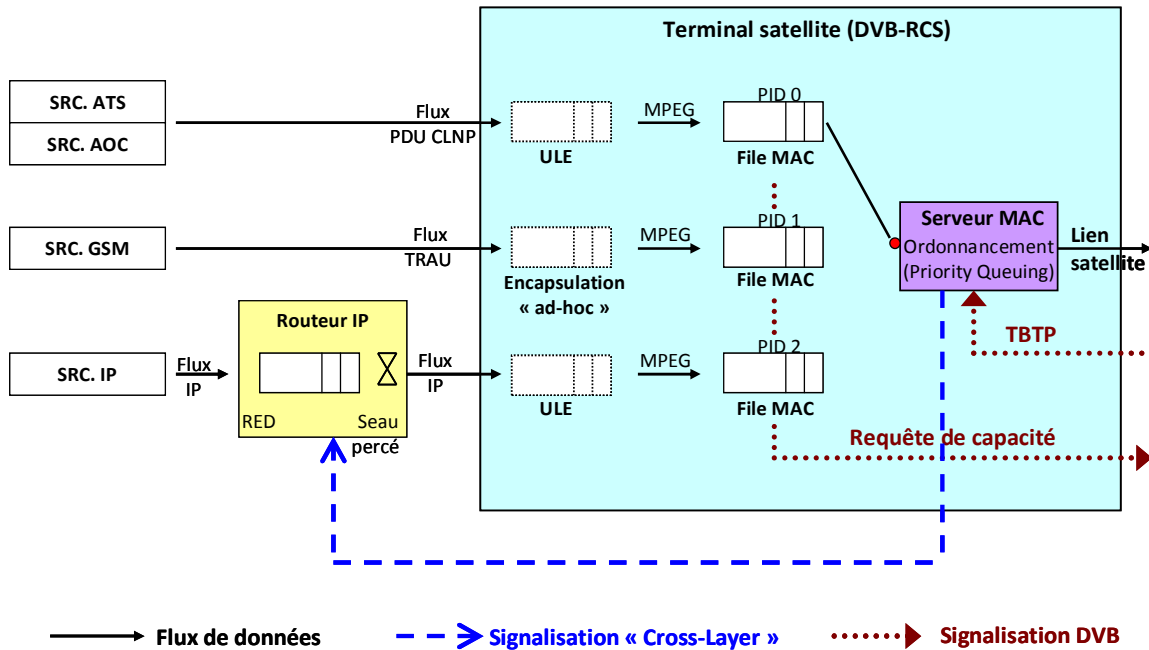


Figure V-9 : Mise en œuvre détaillée de l'architecture de l'approche dynamique.

Pour tester cette approche dynamique, nous utilisons la même configuration que l'approche classique. Le débit de sortie du routeur IP est donc dynamiquement piloté par le serveur MAC. Comme montré par la [Figure V-10](#), ce débit du seau percé est ajusté dynamiquement avec une moyenne de 448.6 Kbps. Nous remarquons que ce débit moyen obtenu est très proche que celui trouvé de façon empirique dans l'approche classique et qui offre les meilleures performances (448 Kbps). Nous comparons donc par la suite, les comportements et les performances de ces deux approches.



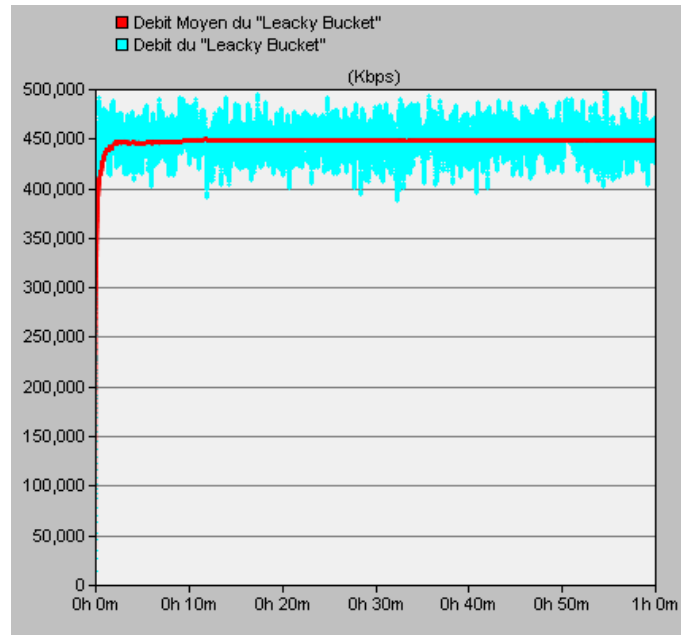
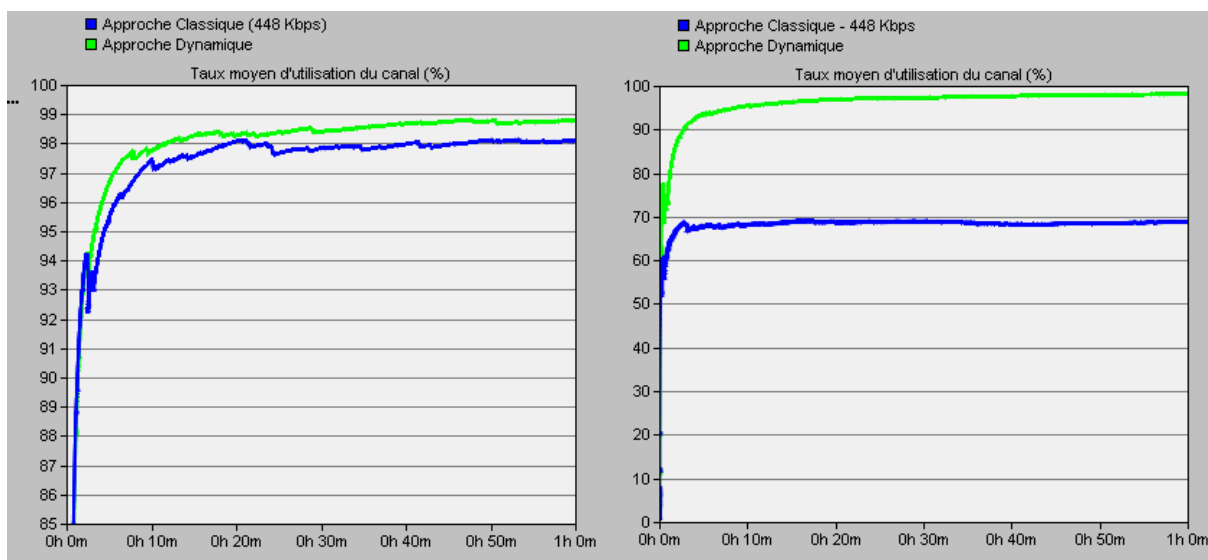


Figure V-10 : débit/débit moyen du seau percé - Approche dynamique.

En premier lieu, nous nous intéressons aux volumes reçus en 1 heure pour les trois types de flux. Nous remarquons que les deux approches offrent des performances similaires sur l'utilisation de la ressource (**Tableau V-3** et **Figure V-11 a**). Cependant, une nette amélioration est introduite dans l'approche dynamique quand le flux GSM/UMTS est mis en veille. Grâce au contrôle dynamique, le flux IP peut profiter entièrement la capacité ainsi 'libérée' par le flux GSM/UMTS. Le débit moyen de sortie du seau percé IP est environ 634.5 Kbps et le taux moyen d'utilisation du canal est toujours élevé (**Figure V-11 b**). Ceci est le résultat de l'utilisation de la signalisation de la couche MAC vers IP qui permet d'adapter le débit IP à la capacité disponible après avoir servi les flux ATC/AOC et GSM.

	Débit du seau percé (Kbps)	Volume ATC/AOC reçu (Kilo octets)	Volume GSM/UMTS reçu (Kilo octets)	Volume IP reçu (Kilo octets)	Volume Total reçu (Kilo octets)
GSM/UMTS active	Fixe : 448	60	77,058	189,645	266,763
	Dynamique (~448.6)	60	76,850	192,067	268,977
GSM/UMTS en veille	Fixe : 448	60	0	188,638	<b>188,698</b>
	Dynamique (~634.5)	60	0	272,969	273,029

Tableau V-3 : Comparaison de l'approche classique et dynamique - Volumes reçus en 1 heure.



(a) : GSM/UMTS active.

(b) : GSM/UMTS en veille.

Figure V-11 : Comparaison de l'approche classique et dynamique - Taux moyen d'utilisation de la ressource allouée.

Le remplissage des files d'attente au niveau MAC et le fonctionnement du RED mis en place dans le routeur IP sont également étudiés pour ce dernier scénario ([Tableau V-4](#)). La file MAC pour le flux IP est dans un état stationnaire avec une taille moyenne de 120 paquets au lieu de 160, soit plus 30%, pour contrôle statique du flux IP. Cette différence permet de diminuer le délai du trafic IP ([Figure V-12](#)).

Niveau de mesure	MAC	MAC	MAC	IP
Débit du seau percé (Kbps)	Taille de file ATS/AOC (paquet TRF)	Taille de file GSM/UMTS (paquet TRF)	Taille de file IP (paquet TRF)	Avg RED (paquet IP)
Fixe : 448	4	5	160	5
Dynamique	4	5	120	5.5

Tableau V-4 : Taille moyenne des files d'attente dans le terminal avion - Approche dynamique.

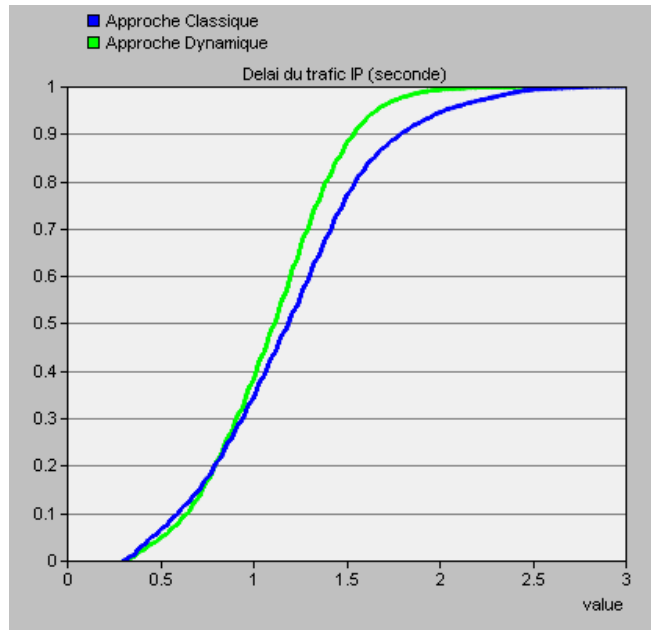


Figure V-12 : Comparaison de l'approche classique et dynamique - Courbes CDF de délai IP.

Les courbes de densité de probabilité cumulées des délais de trois types de services sont montrées dans la **Figure V-13**. Sensiblement identique à l'approche classique, les trois types de services sont transmis avec l'ordre des priorités ATS/AOC > GSM/UMTS > IP. Les délais requis pour les services cockpit et de téléphonie mobile sont garantis. 95% des datagrammes IP sont transmis avec les délais de 1,7 secondes ou moins.

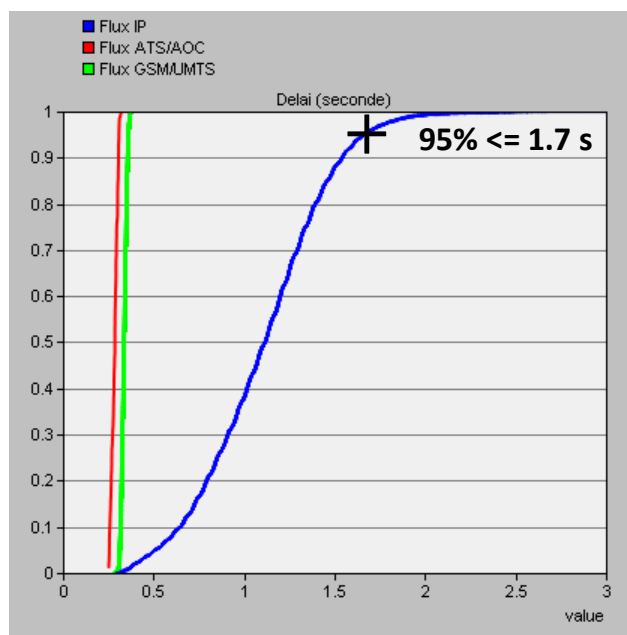


Figure V-13 : Courbes CDF des délais (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) - Approche dynamique.

Cependant, une nouvelle limite apparaît dans cette approche dynamique : comme le débit du seau percé est piloté par la couche MAC, ce débit ne représente que la capacité 'disponible' pour le flux IP. Nous remarquons que dans le cas où le débit du « seau percé » est mis à 0, parce qu'il n'y a plus rien à émettre ou que la capacité est réquisitionnée pour les flux prioritaires, alors il n'y a plus de datagramme IP dans la file d'attente MAC. Ceci est dû principalement à un défaut de cette approche avec pour conséquence une famine pour le service IP : comme il n'y a plus de datagrammes émis par la couche IP, la couche MAC n'en stocke pas et n'a donc plus de raison d'émettre des requêtes de capacité pour ce flux IP. Et les TBTP suivantes n'auront donc aucune raison de contenir des avis de créneaux alloués pour IP.

Il faudrait donc définir une approche permettant de fixer les requêtes de capacité en fonction de ce qui est effectivement stocké dans les couches plus hautes de l'architecture (notamment au niveau IP). Cependant, l'architecture de cette dernière approche dynamique est déjà complexe et s'en trouverait certainement encore alourdie. Nous proposons donc d'intégrer cette dernière problématique dans la dernière approche que nous exposons dans le [chapitre VI](#) et qui sera optimisée. Cette approche devra utiliser des techniques de communication inter-couches « cross-layer » afin de résoudre notamment le conflit entre contrôle de flux au niveau IP et gestion de la ressource radioélectrique par le DVB-RCS.

Une première optimisation de la couche protocolaire nous a donc amené à introduire la notion d'interdépendance entre couches protocolaires adjacentes ou non par des flux de signalisation. Ces techniques sont regroupées sous le nom de techniques « Cross-Layer ». Elles font actuellement l'objet de beaucoup d'études pour les gains performances qu'elles permettent d'offrir. Mais compte-tenu de leurs diversités, il nous paraît important de terminer ce chapitre par une présentation plus détaillée et un état de l'art des techniques « Cross-Layer ». Ceci est ensuite complété par un exposé des techniques « Cross-Layer » dans le cas particulier qui nous intéresse : les communications par satellite.

## V.2 Etat de l'art des techniques « Cross-Layer »

Comme présenté dans le chapitre précédent, les architectures OSI appliquée dans l'ATN ainsi que TCP/IP sont toutes deux basées sur un concept « en couches ». C'est-à-dire que chaque couche

réalise un ensemble de fonctions spécifiques en utilisant des services fournis par la couche inférieure et offrant des services à la couche supérieure. Les protocoles dans ces architectures sont conçus de façon indépendante les uns des autres. Les communications entre les couches non-adjacentes ne sont pas permises de façon à garantir la modularité de l'architecture. Cependant, cette approche stricte ne convient pas toujours notamment dans le contexte des réseaux sans fils qui imposent des contraintes particulières liées à la couche physique. Les inconvénients principaux sont suivants [GIO 07] :

- Les exigences de performances des services sont définies dans la couche applicative, mais cette définition ignore les considérations de performances globales qui dépendent généralement des couches basses.
- Les informations importantes peuvent être perdues pendant la conversion couche par couche.
- Les couches sont optimisées, mais on peut supposer que les communications entre elles peuvent éventuellement apporter des gains de performances

Pour optimiser les performances globales des systèmes de communication, l'approche « Cross-Layer » est donc de plus en plus souvent proposée. Dans [SRI 05], l'approche « Cross-Layer » est défini comme suit : elle est une conception des protocoles qui ne se conforme pas exactement à l'architecture de communication de référence. Plus précisément, le but de l'approche « Cross-Layer » est de fournir des interactions et/ou des adaptations entre couches différentes non nécessairement adjacentes afin d'améliorer les performances globales.

### V.2.1 Différentes catégories de « Cross-Layer »

Dans la littérature, il existe plusieurs façons de mettre en œuvre des techniques « Cross-Layer ». Un panorama des différents types de « Cross-Layer » est présenté dans [SRI 05] :

- Type 1 : introduire des nouvelles interfaces (Figure V-14)

Les nouvelles interfaces sont utilisées dans ce type de « Cross-Layer » pour partager des informations entre les couches. Ce type peut être encore raffiné en trois sous-classes selon la direction d'informations :

1. **Interface "Top-Down"** : permet aux couches hautes de configurer un paramètre d'une couche inférieure. Par exemple : la VoIP (voix sur IP) est une application qui est très

sensible au délai de transmission. Elle peut annoncer son exigence de délai à la couche de liaison afin que ce dernier puisse envoyer les paquets correspondants avec une priorité élevée.

2. **Interface "Bottom-Up"**: est proposée quand un protocole de haut niveau a besoin des informations des niveaux inférieurs. Elle permet une signalisation explicite d'une couche inférieure à une couche supérieure. Par exemple : cette interface ascendante est appropriée pour la mise en œuvre de l'ACM. Puisque dans ce cas, les informations peuvent être envoyées aux couches supérieures pour prendre en compte des adaptations dynamiques qui se sont déroulées en couches inférieures [SKI 07].
3. **Interfaces Boucle** : sont des interfaces bidirectionnelles qui permettent une collaboration entre deux couches.

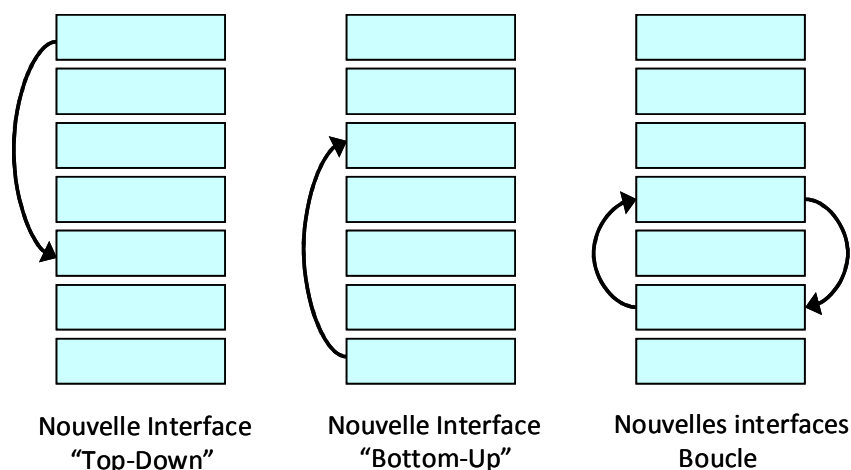


Figure V-14 : Différentes conceptions de « Cross-Layer » - Type 1.

- Type 2 : fusionner les couches adjacentes (**Figure V-15**)

Combiner plusieurs couches adjacentes dans une seule « super couche » est la deuxième catégorie de technique « Cross-Layer ». Elle permet à cette « super couche » de dialoguer directement avec les couches qui restent dans la pile protocolaire par des interfaces déjà existantes. Certains travaux ont déjà montré la tendance à ignorer la frontière entre des couches adjacentes (par exemple entre la couche physique et MAC). Cependant, il n'y a pas de proposition explicite pour cette méthode jusqu'à présent.

- Type 3 : préconfigurer les couches (**Figure V-15**)

Cette méthode permet d'optimiser les couches par des pré-configurations de comportements au début de la conception. C'est-à-dire, de concevoir une couche en prenant en considération les autres couches. Le problème qui se pose est qu'il est impossible de modifier une couche sans adaptation des autres couches qui lui sont associées.

- Type 4 : calibrer verticalement les couches (**Figure V-15**)

Le dernier type de « Cross-Layer » consiste à calibrer les paramètres en traversant plusieurs couches. Généralement, les performances d'une application peuvent être considérées comme une fonction dont les paramètres dépendent de toutes les couches inférieures. Les réglages conjoints permettent d'obtenir de meilleures performances qu'avec des réglages indépendants. Les paramètres peuvent être statiquement configurés en début de la conception avec une optimisation à l'esprit ; ils peuvent être aussi adaptés dynamiquement pendant les exécutions. Cependant, pour les réglages dynamiques, des « en-têtes » ou des fonctions supplémentaires sont indispensables pour assurer que les paramètres soient correctement mis à jour.

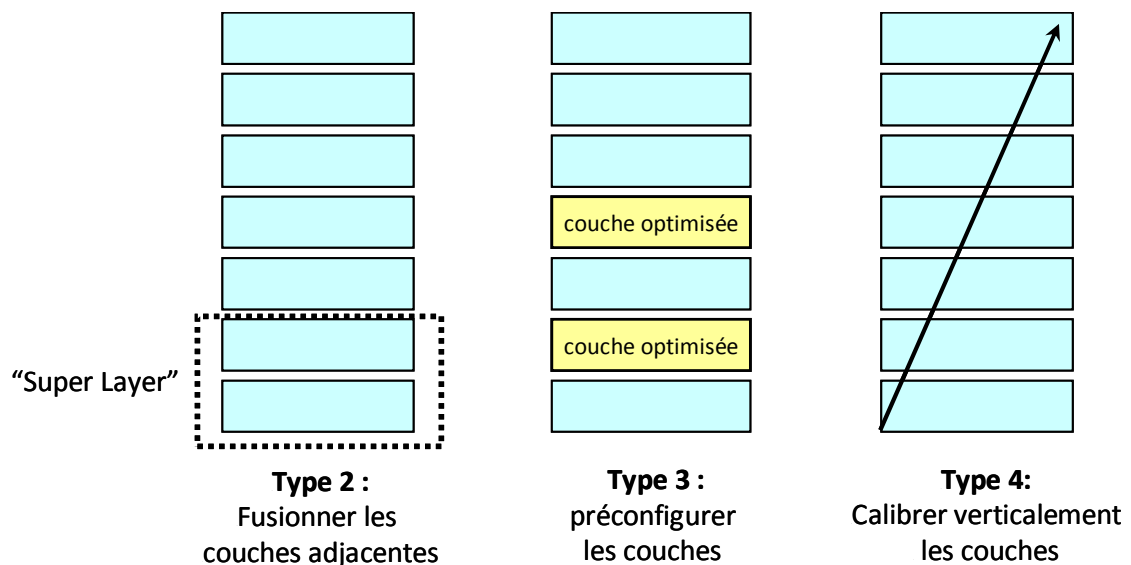


Figure V-15 : Différentes conceptions de « Cross-Layer » - Type 2, 3 et 4.

## V.2.2 Les architectures « Cross-Layer »

Dans la section précédente, nous avons présentés plusieurs types de techniques « Cross-Layer » pour l'optimisation globale des performances de système de communication. Dans la suite, nous

montrerons comment ces différentes conceptions de « Cross-Layer » sont mises en œuvre dans les différentes architectures (**Figure V-16**).

- Communications directes entre les couches

Cette implémentation permet aux couches de communiquer directement entre elles (conception de Type 1 ou Type 4 - dynamique). C'est-à-dire que les variables d'une couche peuvent être connues par les autres. Il existe plusieurs techniques qui permettent les communications directes entre les couches. Par exemple, utilisant des en-têtes de paquets pour transporter des informations « Cross-Layer » ; ou appliquant le protocole ICMP (Internet Control Message Protocol) en envoyant des messages ICMP du bas vers le haut uniquement quand la valeur d'un paramètre est modifiée ; etc. Cependant, les coûts supplémentaires (complexité, réduction du débit, etc.) sont inévitables pour cette implémentation.

- Communications via une base de données partagée

Dans cette architecture, les couches peuvent communiquer entre elles en partageant une base de données commune (on l'appelle aussi l'unité de la gestion des communications Cross-Layer). Cette méthode permet une compatibilité avec l'architecture de référence car aucune modification de protocole ne sera introduite. De plus, elle permet une évolution libre sur la politique de gestion des communications sans la modification des protocoles de couches. En général, cette base de donnée commune peut être considérée comme une nouvelle interface à travers la quelle les informations sont partagées (conception de Type 1). Cette méthode convient aussi à l'approche de Type 4. L'enjeu de cette implémentation est la conception des interactions dans une seule entité commune.

- Communications via un modèle complètement abstrait

La troisième architecture s'abstrait complètement de l'architecture de référence. Elle propose une nouvelle façon d'organiser les protocoles : en groupes, mais plus en couches. Cette architecture permet une grande flexibilité et une richesse d'interactions entre les groupes de protocoles. Par contre, cette approche viole complètement l'architecture de référence en couches et a besoin d'une mise en œuvre absolue.



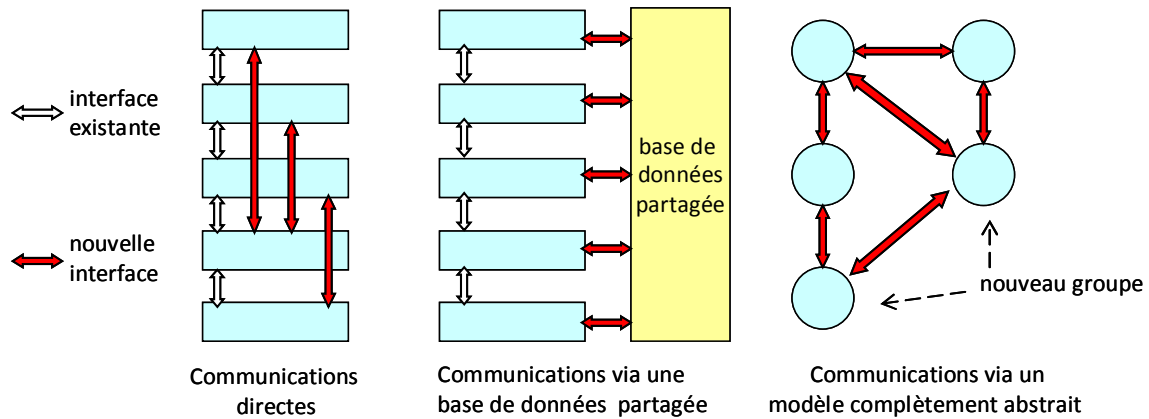


Figure V-16 : Implémentations d'interactions « Cross-Layer ».

### V.2.3 Techniques « Cross-Layer » dans les systèmes de communication par satellite

Dans cette section, un aperçu des différentes techniques « Cross-Layer » dans le contexte de réseaux de communication par satellite est présenté. Ces exemples nous permettent de comprendre plus concrètement les mises en œuvre des interactions « Cross-Layer » dans les différents systèmes et de trouver des idées personnelles pour l'optimisation du système étudié. Bien évidemment, dans cette partie, nous nous concentrons plus particulièrement sur les techniques pour la gestion des ressources et l'optimisation des performances. Des informations complémentaires sur ce sujet peuvent être trouvées dans la référence [GIO 07], ainsi que dans le "Special Issue" de la revue internationale des communications par satellite [IJSC 06].

#### V.2.3.1 « Cross-Layer » pour l'optimisation de la gestion de ressources

Concernant à l'optimisation de la gestion des ressources satellitaires, ce sont les couches dites « satellite dépendant » qui utilisent les techniques « Cross-Layer ».

Dans le cas où les techniques FMT (ACM, DRA, etc.) sont utilisées pour adapter en temps réel la couche physique du système à l'état dynamique du canal de propagation, la couche MAC doit prendre en compte ces changements au niveau physique pour le contrôle d'accès. Comme présentée dans la [partie III.2.3](#), les ressources satellitaires disponibles sur le lien retour DVB-RCS sont sous forme de trames MF-TDMA. Une boucle de contrôle est mise en œuvre entre les couches MAC et physique et permet d'adapter dynamiquement la structure MF-TDMA à la forme d'onde utilisée (AC : Adaptive Coding) [VAZ 08].

Dans [LUC 06] [CAN 08- 1], la gestion de ressource (particulièrement sur le lien aller DVB-S2) est optimisée par une méthode d'encapsulation flexible et des interactions entre la couche d'adaptation et MAC. Cette méthode d'encapsulation s'adapte bien à l'utilisation d'ACM dans DVB-S2 et ces travaux ont contribué partiellement à la définition du protocole GSE [GSE 07].

L'optimisation de l'allocation de la ressource pour les connexions TCP est aussi une problématique déjà largement étudiée dans la littérature. Le lien satellite est considéré comme le goulot d'étranglement partagé par plusieurs connexions TCP. Dans [CHI 06], les performances de TCP sont optimisées par la mise en correspondance des requêtes de capacité et de la taille de fenêtre de congestion du TCP. Une autre optimisation est proposée dans [PEN 06], elle sépare les connexions TCP (Split-TCP) par les PEPs (Performance Enhancement Proxies). L'avantage d'utiliser les PEPs est que la congestion TCP peut être gérée entre ces PEPs sans changer la configuration de l'utilisateur final. Une signalisation de la couche MAC à la couche TCP (PEP) est alors proposée pour notifier la congestion en mesurant le remplissage de la file MAC par l'algorithme RED.

### V.2.3.2 « Cross-Layer » pour l'optimisation de performances

Il est logique que l'optimisation de la gestion de ressource puisse améliorer les performances. Dans cette partie, nous nous ne concentrons que sur les techniques qui impactent directement les performances pour les utilisateurs (exprimées en délai, gigue, taux de perte, etc.). La plupart des travaux dans ce domaine s'intéressent notamment aux interactions entre les couches d'accès, réseau et physique.

Concernant à l'algorithme d'ordonnancement, [VIE 06] propose des interactions entre les couches physique, MAC et IP. Ces interactions permettent d'adapter, d'une manière équitable, la configuration de l'ordonnanceur aux conditions de propagation et de différencier les services pour garantir les besoins de performance. Dans [NAR 06], l'ordonnanceur au niveau IP peut continuer à garantir la QoS pour les services différenciés ou réservés grâce à l'utilisation des interactions entre la couche MAC et IP.

Au niveau du contrôle d'erreur, [CAN 08-2] propose deux mécanismes. Le premier partage des informations entre les deux couches (FEC de la couche physique et CRCs de la couche d'adaptation). Ce mécanisme permet de réduire la partie redondante de CRC afin de limiter la

proportion d'en-tête. Le deuxième consiste à corriger efficacement et précisément des erreurs de la couche basse selon l'en-tête de la couche supérieure.



# Chapitre VI

## ARCHITECTURE DU TERMINAL AVION : APPROCHE DYNAMIQUE AVEC ENCAPSULATION GÉNÉRIQUE

Dans le chapitre précédent, plusieurs expérimentations par simulation ont été menées afin de définir l'architecture du terminal avion. Nous avons montré la nécessité de mettre en œuvre un mécanisme « Cross-Layer » pour améliorer les performances. Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle architecture avec des flux de signalisations entre couches protocolaires pour optimiser les performances globales du système avec une nouvelle approche d'encapsulation dite générique. Sur la base de ce nouveau scénario, une nouvelle série de simulations est effectuée et les résultats permettant d'évaluer les performances du système sont analysés.

### VI.1 Architecture retenue pour le terminal avion

#### VI.1.1 Choix des techniques « Cross-Layer »

Comme montrés dans le [chapitre V](#), l'étude préliminaire des performances de l'approche classique puis sa version améliorée soulignent la nécessité d'avoir des interactions de type « Cross-Layer » pour l'optimisation globale du système. En s'appuyant sur l'état de l'art des techniques cross-layer proposé au chapitre précédent, nous choisissons une technique « Cross-Layer » pour l'architecture terminal avion dans notre système reposant sur les trois considérations suivantes :

- La mise en œuvre des techniques « Cross-Layer » doit être simple et efficace avec un minimum de violations du modèle OSI et des standards.
- L'utilisation des interactions « adjacentes » est préférable aux interactions « non-adjacentes ». Techniquement, les interactions entre les couches adjacentes peuvent être mises en œuvre

simplement par un ajout des primitives supplémentaires dans les interfaces déjà existantes. Par contre, une nouvelle interface ou des en-têtes additionnels sont nécessaires pour les interactions non-adjacentes.

- Les techniques « SD-based » sont préférables aux techniques « SI-based » (même si certaines variable des couches SI sont considérés comme les paramètres d'entrées). Conformément à la définition du modèle de référence BSM, les interactions « Cross-Layer » entre les couches SD ne servent qu'à l'optimisation de l'utilisation des technologies satellitaire. Ces interactions peuvent être considérées comme transparentes aux couches SI. Plus concrètement, dans l'architecture du terminal avion, si les interactions « Cross-Layer » ne sont focalisées que sur les couches au-dessous de la couche réseau, ceci signifie que nous pouvons avoir une grande liberté pour intégrer ces techniques « Cross-Layer » dans les technologies satellite DVB sans la modification des parties satellite indépendant (TCP/IP, ATN et GSM).

En prenant en compte ces considérations pour la mise en œuvre des techniques « Cross-Layer », nous proposons une nouvelle architecture pour le terminal avion. Dans cette architecture, la gestion de la ressource, la QoS et la priorité d'accès sont toutes concentrées vers une couche d'adaptation « multifonctions », qui est basée sur la méthode d'encapsulation GSE (nous l'appelons dans la suite couche d'adaptation GSE). Les motifs du choix de cette couche d'adaptation GSE comme point d'étude pour l'optimisation du système sont :

- GSE est la première méthode d'encapsulation qui est standardisée avec le concept du « Cross-Layer ».
- La mise en œuvre du protocole GSE est plus simple que le protocole MPE.
- Cette architecture est compatible avec la dernière version du standard DVB-RCS pour introduire l'application mobile.

Cette architecture finalement retenue est illustrée dans la [Figure VI-1](#) et nous l'appelons dans la suite - « architecture dynamique avec encapsulation générique ».

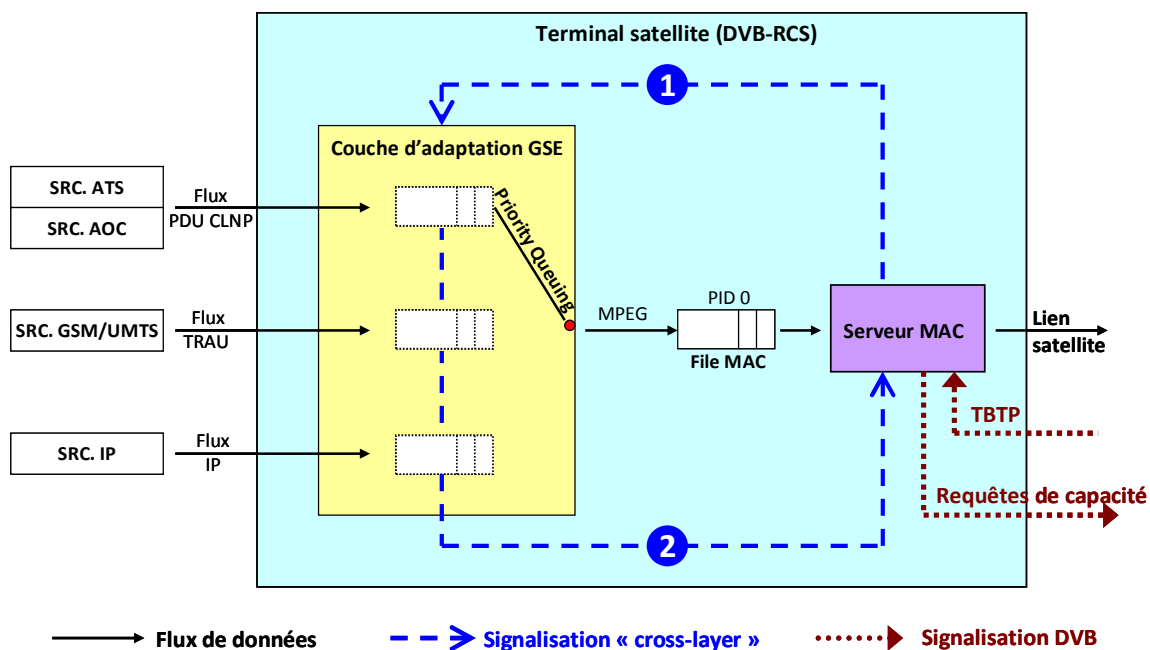


Figure VI-1 : Architecture retenue pour le terminal avion.

### VI.1.2 Les flux de signalisation « Cross-Layer »

Dans l'approche classique, les requêtes de capacité sont générées sur la base du débit ou du taux de remplissage des files MAC. Cependant, les résultats préliminaires de l'approche dynamique présentée au chapitre précédent ont déjà montrés des limites et des problèmes. Nous avons notamment souligné les difficultés pour obtenir une indication représentative permettant d'exprimer les requêtes de capacité. Toujours dans ce cas, les requêtes de capacité sont calculées non seulement en fonction des caractéristiques des trafics mais aussi de la politique de contrôle mise en place à la couche supérieure. Pour ces raisons, nous préférons utiliser dans la nouvelle approche des informations obtenues à l'entrée de la couche d'adaptation (débit de données, taille de file d'attente, etc.) pour générer les demandes de capacité.

Dans cette nouvelle approche, il existe deux signalisations « Cross-Layer » qui permettent le contrôle d'accès aux ressources satellitaires sur la voie de retour et la différenciation des services :

- Signalisation « **bottom-up** » de la couche MAC vers la couche d'adaptation GSE (1 dans la [Figure VI-1](#)) : le serveur MAC reçoit la TBTP envoyée par la Gateway/NCC. Il en déduit la capacité disponible et en informe le processus de contrôle mis en place au GSE.

- Signalisation « **top-down** » de la couche d'adaptation GSE vers la couche MAC (2 dans la **Figure VI-1**) : la couche d'adaptation GSE estime la capacité réelle nécessaire. Elle en informe le serveur MAC qui se charge de générer les requêtes de capacités.

### VI.1.3 Mécanismes mis en œuvre à la couche d'adaptation

Comme présenté dans le **chapitre III**, le paquet MPEG a été retenu dans notre système comme format de données pour le lien retour DVB-RCS. Basé sur ce format, nous avons proposé un dimensionnement de super-trame MF-TDMA qui prend en compte la mise en œuvre des techniques FMT. L'intérêt d'utiliser cette structure propre MF-TDMA est double : d'abord, elle permet d'appliquer les techniques FMT dans la couche Physique d'une façon transparente aux autres couches supérieures ; aussi, elle facilite l'adaptation de la méthode d'encapsulation GSE au lien retour DVB-RCS (qui n'est pas forcément en flux continu comme le DVB-S2). En effet, le lien retour DVB-RCS est considéré comme le flux de paquets MPEG où les données peuvent être transmises d'une façon générique avec l'encapsulation GSE. Comme présenté dans le **chapitre IV**, cette méthode d'encapsulation permet de multiplexer plusieurs PDUs dans un même paquet MPEG (**Figure VI-2**).

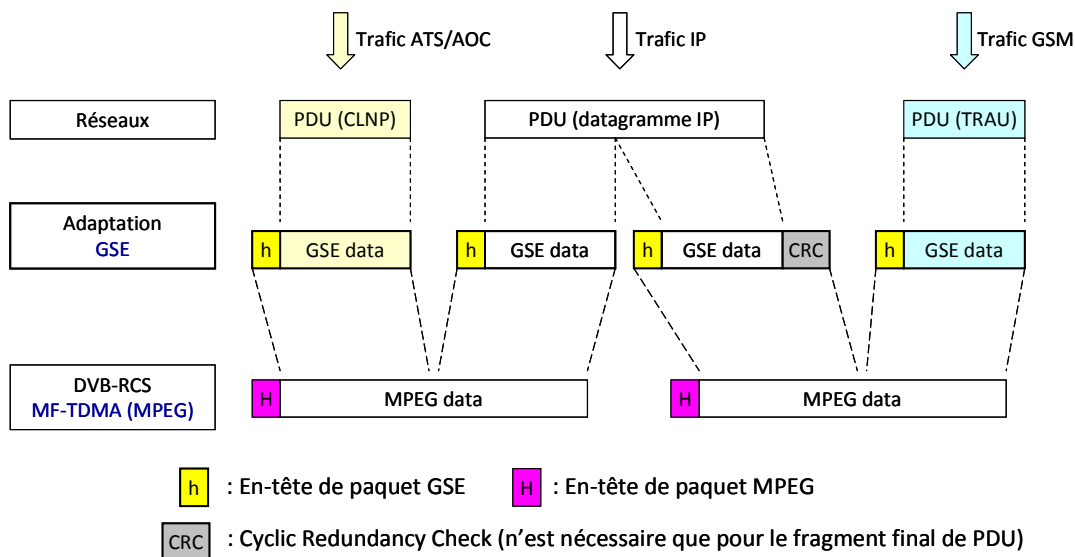


Figure VI-2 : Encapsulation GSE sur le lien retour DVB-RCS.

Le serveur MAC connaît la capacité totale allouée (sous forme de nombre de créneaux TRF) au terminal satellite quand il reçoit la signalisation TBTP envoyée par la Gateway/NCC. Il envoie immédiatement ce résultat de l'allocation à la couche d'adaptation GSE par une



signalisation « Cross-Layer ». Sur la base de cette information sur la capacité disponible, GSE est d'abord chargé de contrôler d'accès et d'ordonner les paquets vers la couche inférieure selon la priorité (flux ATS/AOC > flux TRAU > flux IP). Cette configuration de priorité est basée sur la considération, comme expliqué dans le [chapitre III](#), que le trafic des services aéronautiques ATM a besoin d'une grande disponibilité et le trafic GSM présente une forte contrainte de délai. Le trafic IP est transmis en mode Best Effort dans ce contexte, c'est-à-dire qu'aucune qualité de service ne lui est garantie.

Ensuite, les paquets ordonnancés sont encapsulés en paquets GSE puis placés dans des paquets MPEG (taille fixe de 188 octets) comme indiqué dans la [Figure VI-2](#) pour être envoyés. Grâce à l'utilisation de Frag ID (Identifiant du fragment), le filtrage au niveau réseau est possible à la GW. Dans ce cas, un PID est suffisant pour multiplexer les trois types de flux dans un seul canal logique auquel s'ajoute un PID supplémentaire pour la signalisation. Le nombre de terminaux avion peut être doublé par rapport à l'approche classique dans laquelle 4 PIDs sont nécessaires pour chaque terminal.

La couche d'adaptation GSE analyse le profil des flux de trafic entrant afin d'indiquer le débit ou le volume nécessaire pour chacun d'eux. Cela signifie que la couche MAC n'effectue qu'une mise en forme des requêtes de capacité afin de les rendre conforme au format DVB-RCS. Le flux ATS/AOC est géré par volume du fait de sa forte sporadicité. Il est associé à l'identifiant Channel ID 0. Le flux GSM est géré par débit et utilise l'identifiant Channel ID 1. Le trafic IP est géré par volume et utilise l'identifiant Channel ID 1. De cette façon, le centre de contrôle NCC dispose d'une connaissance des besoins pour chaque flux de façon distincte ce qui permet d'appliquer une politique de priorité au niveau de l'algorithme DAMA.

#### **VI.1.4 Dimensionnement des files d'attente du Terminal Satellite.**

La taille des files d'attente est un facteur important pour garantir la QoS et optimiser l'utilisation de la ressource du réseau. Les files d'attente sont essentielles pour absorber les rafales de trafics. Le sous dimensionnement d'une file d'attente engendre une sous utilisation de la ressource avec un grand taux de perte de paquets. Cependant, une file d'attente de taille plus grande introduit des délais d'attente plus importants. Dans certains cas, ces délais importants peuvent être critiques, notamment pour les flux à fortes contraintes temporelles (par exemple, le service

GSM/UMTS). C'est pour cela que les files d'attente doivent être dimensionnées avec un compromis entre le délai et le débit.

Dans l'architecture dynamique avec GSE, la gestion de la ressource et la qualité de service sont mises en place à la couche d'adaptation. Dans notre modèle, la file MAC est supposée avoir une taille suffisamment grande pour garantir qu'il n'y aura pas de rejet de paquet et vérifier qu'il n'y aura pas de congestion à ce niveau. Grâce au contrôle d'accès mis en place dans la couche d'adaptation, la taille de cette file MAC ne dépassera jamais le nombre maximum des créneaux TRF qui peuvent être transmis dans la durée d'une super-trame. Dans cette architecture, le dimensionnement des files d'attente à la couche d'adaptation GSE est déterminant.

Pour le flux ATS/AOC, une file d'attente de taille suffisamment grande est utilisée. Cette configuration permet d'avoir une grande disponibilité pour les services cockpit avec un mode de transmission «sans rejet».

Cependant, pour le flux GSM/UMTS, il est difficile de paramétrer la taille du buffer : premièrement, il est nécessaire d'avoir une file assez grande pour absorber les rafales du trafic. Comme montré dans la [partie II.3.2](#), le nombre maximum des TRAU générées pendant la durée d'une super-trame est  $(60/20) \times 28$ , soit 84 TRAU. Deuxièmement, cette file ne peut pas être trop grande, sinon, les délais requis ne peuvent pas être garantis. Comme indiqué dans le [chapitre II](#), le délai maximum admis pour le service GSM/UMTS est de 400 ms. Sachant que le délai de propagation du canal satellite est 250 ms et le délai maximum introduit par la file MAC est 60 ms (durée d'une super-trame), le délai maximum d'attente dans la couche d'adaptation ne doit pas dépasser à 90ms. Nous supposons que le trafic de type RBDC est garanti avec un débit de 256 Kbps, dans ce cas, la taille maximum du buffer est donc :

$$(\text{Délai maximum} * \text{Débit garantie}) / \text{Taille d'une trame TRAU}$$

$$(90\text{ms} * 256\text{kbps}) / 320\text{bits} = 72 \text{ TRAU}$$

Pour avoir un compromis entre le délai et le débit entre ces deux considérations, nous proposons d'utiliser une file d'attente relativement petite : 80 TRAU. Une analyse à l'aide d'un modèle de type « bande équivalente » permet de valider le choix de cette taille de file d'attente et d'estimer le débit de sortie nécessaire pour la source de trafic GSM/UMTS. Le trafic généré est envoyé dans une file d'attente de taille `ebw_max_queue_size`. Cette file sert les paquets entrant avec un débit

ebw\_rate. La gigue admise ebw\_jitter est liée aux deux paramètres précédents par l'équation :  $ebw\_jitter = ebw\_max\_queue\_size / ebw\_rate$ . Le principe de ce modèle est montré sur la figure suivante.

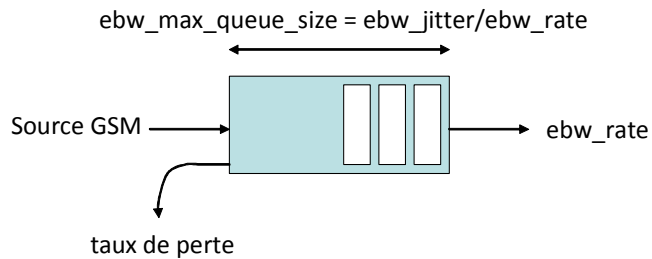


Figure VI-3 : Modèle « bande équivalente » pour la source GSM.

La simulation indique que pour un taux de perte admis de  $10^{-7}$  et une taille de file d'attente de 80 TRAU, le débit nécessaire est de 280 Kbps.

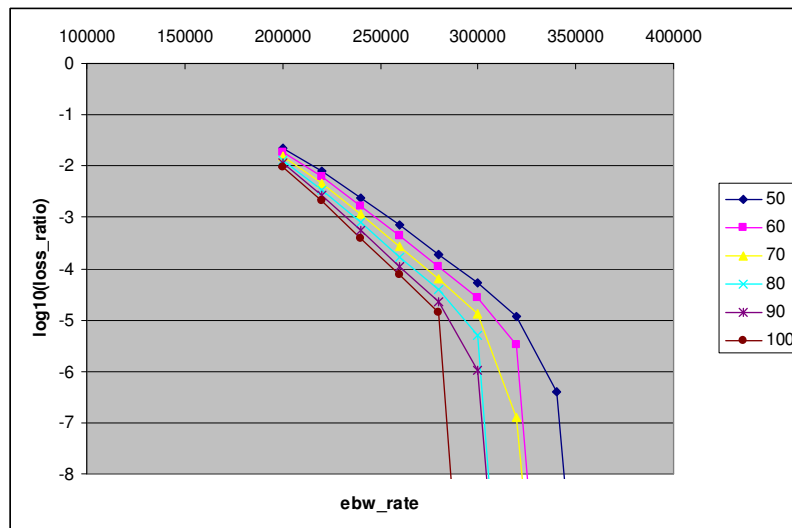


Figure VI-4 : Modèle « bande équivalente » GSM, taux de perte vs débit (taille de file en paramètre).

Pour le trafic IP, la file d'attente est dimensionnée par la mise en œuvre de l'algorithme RED. En effet, RED est un mécanisme de gestion de files d'attente qui permet de garder la taille moyenne de file dans un intervalle prévu. Cependant, cet intervalle doit être soigneusement configuré dans notre architecture car il est non seulement utilisé pour le contrôle de congestion, mais participe aussi au calcul de requêtes de capacité VBDC. Une file de taille trop petite introduit une sous utilisation du réseau (trop de paquets sont rejetés, moins de requêtes de capacité VBDC sont

envoyées) ; par contre, au cas où on utilise une file de taille trop grande, les délais d'attente sont plus importants. Nous choisissons donc d'utiliser les paramètres par défaut précisés dans [FLO 93].

## VI.2 Etude des performances

Pour évaluer les performances du système de l'approche dynamique avec encapsulation GSE et les comparer avec les résultats des deux architectures présentées dans le [chapitre V](#) (approche classique et approche dynamique), un scénario de simulation est proposé avec OPNET Modeler. Ce dernier modèle est détaillé dans l'[Annexe F](#).

### VI.2.1 Simulation avec un seul terminal et conditions de propagations fixes

Tout d'abord, nous effectuons des simulations avec la même configuration que les deux approches précédentes. C'est-à-dire, le nombre de créneaux TRF alloués à un terminal varie aléatoirement et suivant une loi uniforme de 24 à 36 créneaux.

Les volumes reçus en 1 heure pour les trois types de flux sont montrés dans le [Tableau VI-1](#). Nous remarquons que l'approche dynamique avec GSE offre de meilleures performances sur l'utilisation de la ressource (un gain d'environ 16% par rapport à l'approche dynamique). Cette optimisation est obtenue grâce à l'utilisation de GSE qui permet une encapsulation flexible adaptée à la capacité disponible. En effet, dans les deux approches précédentes, les PDU sont encapsulés et placés dans des paquets MPEG d'une façon « statique et indépendante ». Dans ce cas, le format de données DVB-RCS (MPEG avec la taille strictement fixée) est une contrainte importante pour l'utilisation de la ressource. Par exemple, pour le service ACL, 2 paquets de 93 octets sont générés à chaque utilisation du service. Dans les deux approches précédentes, 2 paquets MPEG (2x180 octets sont utiles) sont nécessaires, cela correspond à une capacité libre d'environ 50%. Cependant, cet espace libre ne peut pas être utilisé par les autres flux comme GSM/UMTS ou IP puisque le multiplexage n'est effectué qu'à la couche inférieure - MAC. Cet espace libre représente donc une perte de capacité. Au contraire, dans l'approche avec l'encapsulation GSE, les PDU sont encapsulés d'une façon « adaptive et générique ». Le multiplexage peut être effectué dans la couche d'adaptation, c'est-à-dire que plusieurs PDU peuvent se trouver dans un même paquet MPEG même si elles n'appartiennent pas au même flux. La contrainte introduite par la taille fixe des trames MPEG sera moins importante dans ce cas.

Nous prenons le même exemple pour le service ACL, 2 paquets MPEG sont toujours nécessaires, mais l'espace qui reste dans ces paquets MPEG peut être utilisé par les paquets des autres flux. Dans ce cas, nous pouvons par exemple multiplexer un segment de paquet ACL, une trame TRAU et un segment de datagramme IP, dans une seule trame MPEG.

Débit du seau percé (R) (Kbps)	Volume ATS/AOC reçu (Kilo octets)	Volume GSM/UMTS reçu (Kilo octets)	Volume IP reçu (Kilo octets)	Volume Total reçu (Kilo octets)
448	60	76,984	162,630	239,674
Dynamique	60	76,850	192,067	268,977
GSE	60	77,162	233,145	310,367

Tableau VI-1 : Comparaison des trois approches - Volumes reçus en 1 heure.

Les courbes de densité de probabilité cumulées des délais de couche 3 à couche 3 pour les trois types de services sont montrées dans la [Figure VI-5](#). Comme précédemment, grâce à la politique PQ mise en place à la couche d'adaptation GSE, les trois types de services peuvent être différenciés et transmis avec l'ordre des priorités ATS/AOC > GSM > IP. Les délais requis pour les services cockpit et de téléphonie mobile sont tous garantis. Par contre, par rapport aux deux approches précédentes, cette approche dynamique avec GSE permet des délais beaucoup plus courts pour les services IP : 95% des datagrammes sont transmis avec les délais de 750 ms ou moins ([Figure VI-6](#)). Cette amélioration peut être encore soulignée par l'affichage des courbes de densité de probabilité cumulées des RTT mesurés au niveau TCP ([Figure VI-7](#)).

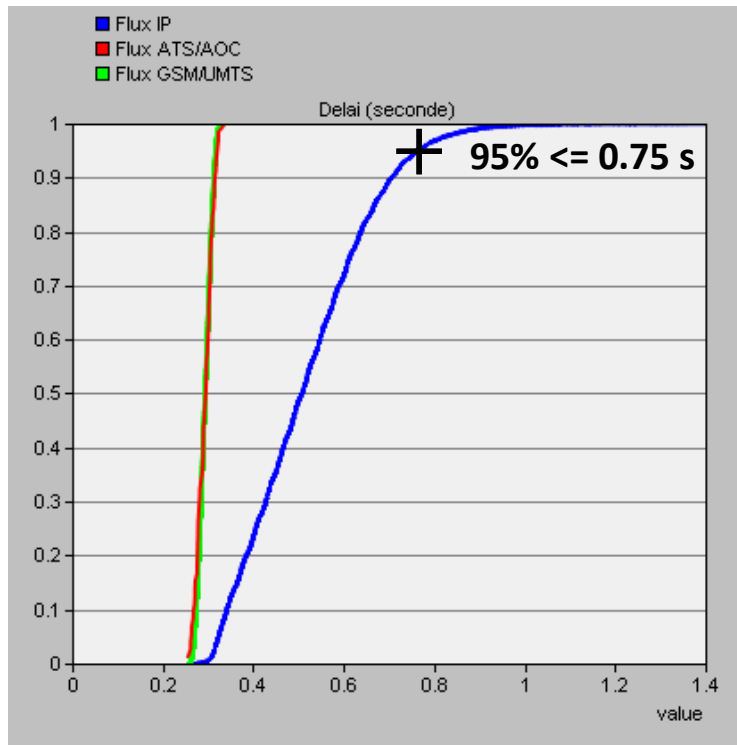


Figure VI-5 : Courbes CDF des délais (ATS/AOC, GSM/UMTS, IP) - Approche dynamique avec GSE.

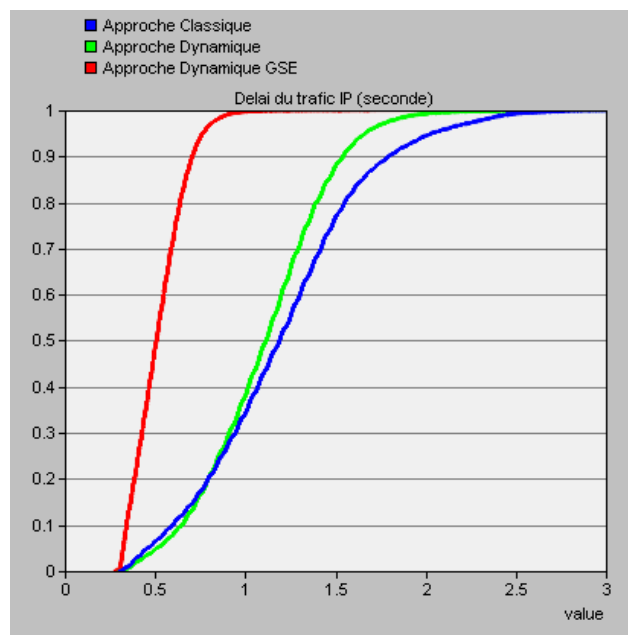


Figure VI-6 : Comparaison des délais du trafic IP (IP-IP) entre les trois approches étudiées.

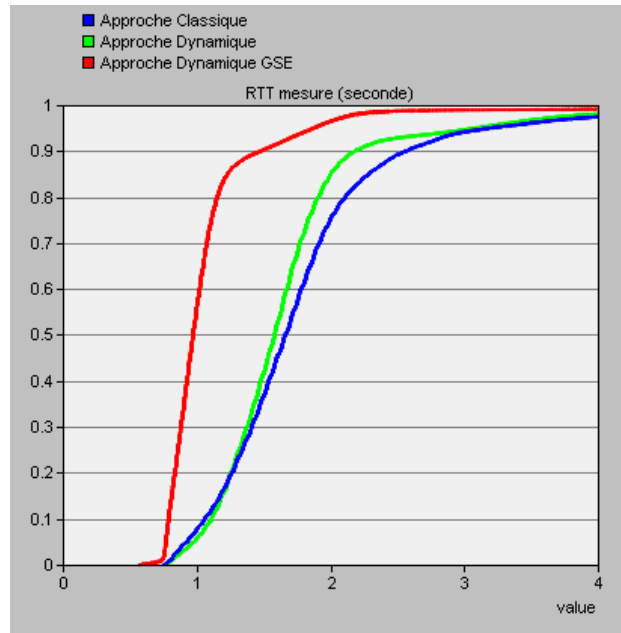


Figure VI-7 : Comparaison des RTT mesurés (TCP-TCP) entre les trois approches étudiées.

Une expérimentation supplémentaire est effectuée en mettant le flux GSM/UMTS en veille afin de vérifier le caractère adaptatif de cette dernière approche. Comme prévu, l’approche GSE permet au flux IP de s’adapter à la capacité disponible en l’occupant.

Débit du seau percé (R) (Kbps)	Volume ATS/AOC reçu (Kilo octets)	Volume GSM/UMTS reçu (Kilo octets)	Volume IP reçu (Kilo octets)	Volume Total Recu (Kilo octets)
448	60	0	188,638	188,698
Dynamique	60	0	272,969	273,029
GSE	60	0	310,940	311,000

Tableau VI-2 : Comparaison des trois approches - Volumes reçus en 1 heure (GSM/UMTS en veille).

De plus, par rapport à la première approche dynamique, cette nouvelle approche GSE permet une signalisation plus simple. En effet, dans l’approche dynamique que nous avons présentée dans le [chapitre V](#), la signalisation sert à mettre en correspondance la capacité disponible pour le flux IP et le débit du seau percé mis en place au routeur IP. Cette capacité est estimée par le serveur MAC en calculant le débit moyen disponible pour le flux IP. Pour éviter d’avoir des contrôles fluctuants, nous avons proposé de calculer le débit moyen glissant à pondération exponentielle EWMA. Evidemment, ce mode de calcul diminue la sensibilité du système. Par conséquent dans la première approche dynamique, la taille moyenne de la file MAC (flux IP) est égale à 120 MPEG

environ (**Tableau VI-3**). Dans l'approche dynamique avec GSE, le serveur MAC compte le nombre de créneaux TRF alloués au terminal et envoie cette information à la couche d'adaptation GSE. Aucune estimation ni calcul n'est nécessaire dans ce cas et la capacité disponible constitue une valeur précise et représentative. Pour la couche d'adaptation GSE, cette information peut être utilisée directement pour le contrôle d'accès et l'encapsulation. La taille moyenne de la file MAC (flux multiplexé) est donc moins importante dans ce cas : 15 MPEG (**Tableau VI-3**). Ainsi, comme cité précédemment, cette approche dynamique avec GSE permet des délais beaucoup plus petits pour les services IP sans altérer le niveau de qualité de service qui est toujours garanti pour les autres flux (ATS/AOC et GSM/UMTS).

Niveau de mesure	MAC	MAC	MAC	IP
Débit du seau percé (Kbps)	Taille de file ATS/AOC (paquet TRF)	Taille de file GSM/UMTS (paquet TRF)	Taille de file IP (paquet TRF)	Avg RED (paquet IP)
Fixe : 448	4	5	160	5
Dynamique	4	5	120	5.5

Niveau de mesure	GSE	GSE	GSE/IP	MAC
	Taille de file ATS/AOC (paquet CLNP)	Taille de file GSM/UMTS (paquet TRAU)	Avg RED (paquet IP)	Taille de file (paquet TRF)
GSE	0.5	17	9	15

Tableau VI-3 : Comparaison des trois approches - Taille moyenne des files d'attente.

## VI.2.2 Simulation avec plusieurs terminaux et conditions de propagations fixes

L'objectif des simulations suivantes est d'étudier le comportement du terminal avion dans un réseau chargé. En effet, en fonction du nombre d'avions devant se partager la même ressource radioélectrique, le comportement attendu de l'algorithme d'allocation de ressource DAMA du centre de contrôle NCC peut être différent de la simulation simplifiée retenue jusqu'alors.

### VI.2.2.1 Configuration du scénario et trafic exogène

Le modèle de simulation utilisé reprend les mêmes éléments que le modèle précédent. Un terminal avion est simulé avec une chaîne de lien retour complète : sources de trafic, couche



d'adaptation GSE, couche d'accès et nœud de transmission. La **Figure VI-8** rappelle cette configuration :

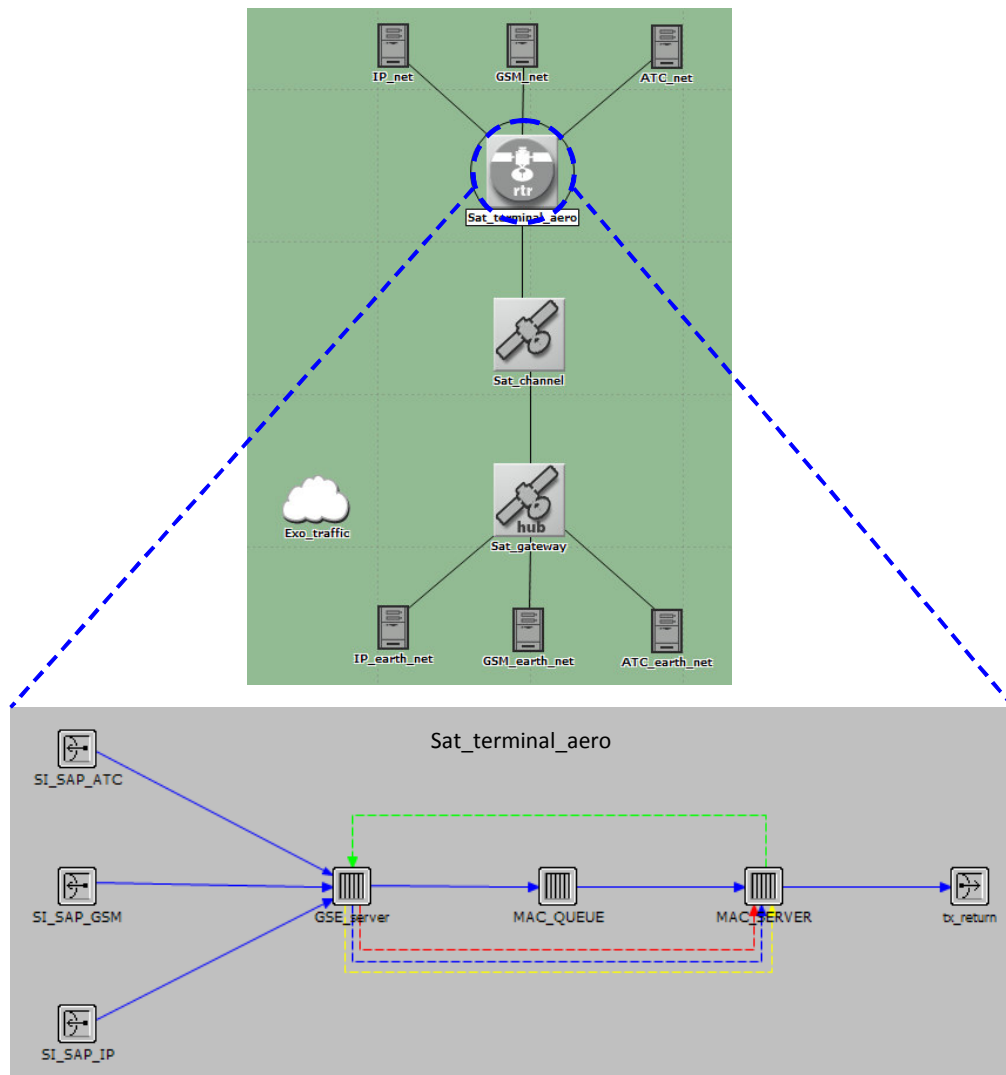


Figure VI-8 : Modèle de simulation N avions.

La station terrienne GW est également simulée avec les différentes couches protocolaires et la connexion aux serveurs d'application.

La principale difficulté vient de la simulation des autres avions partageant la même ressource radioélectrique que le terminal étudié. Une première solution serait d'instancier plusieurs fois le terminal avion. Ceci conduit à des simulations très difficiles à manipuler en raison du nombre d'événements générés, de la taille des fichiers de résultat et par conséquent du temps de simulation. Le choix a donc été fait de simuler les autres avions sous forme d'un trafic exogène.

Un nœud spécifique (Exo\_traffic sur la [Figure VI-8](#)) est introduit dans la simulation ; ce nœud génère les requêtes de capacité correspondant au trafic généré par (N-1) avions et envoie ces requêtes directement au nœud NCC, l'algorithme DAMA prend ainsi en compte le trafic généré par ces avions. Les requêtes du terminal avion complet sont extraites des messages SAC (Satellite Access Control) portés par les créneaux TRF ou SYNC de la liaison DVB-RCS. La [Figure VI-9](#) illustre le principe retenu :

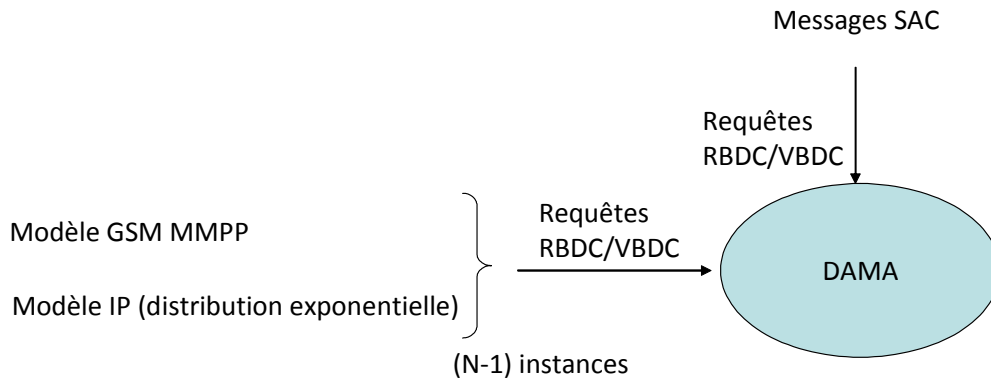
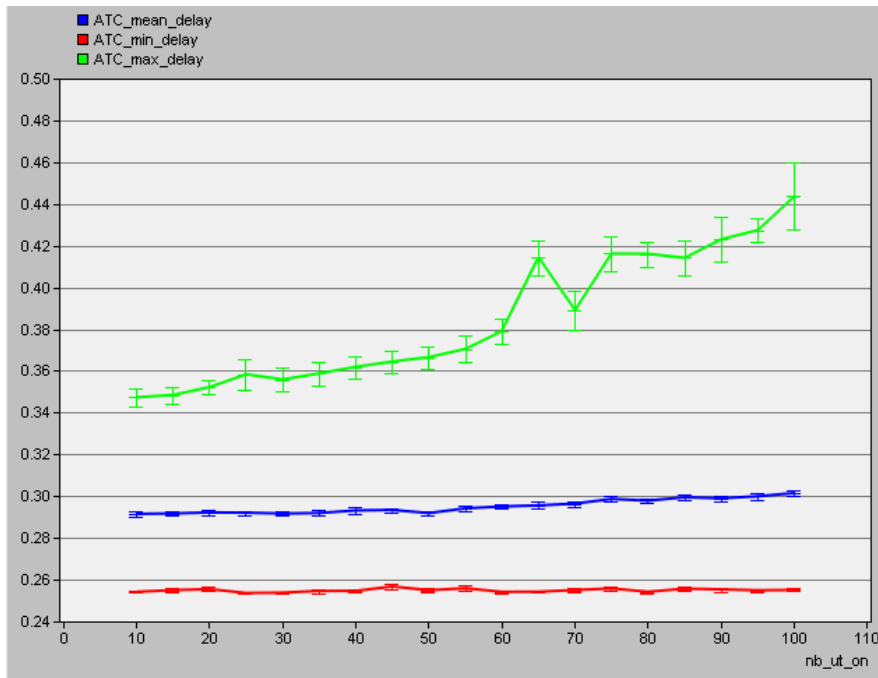


Figure VI-9 : Modèle de simulation N avions, générations des requêtes de capacité.

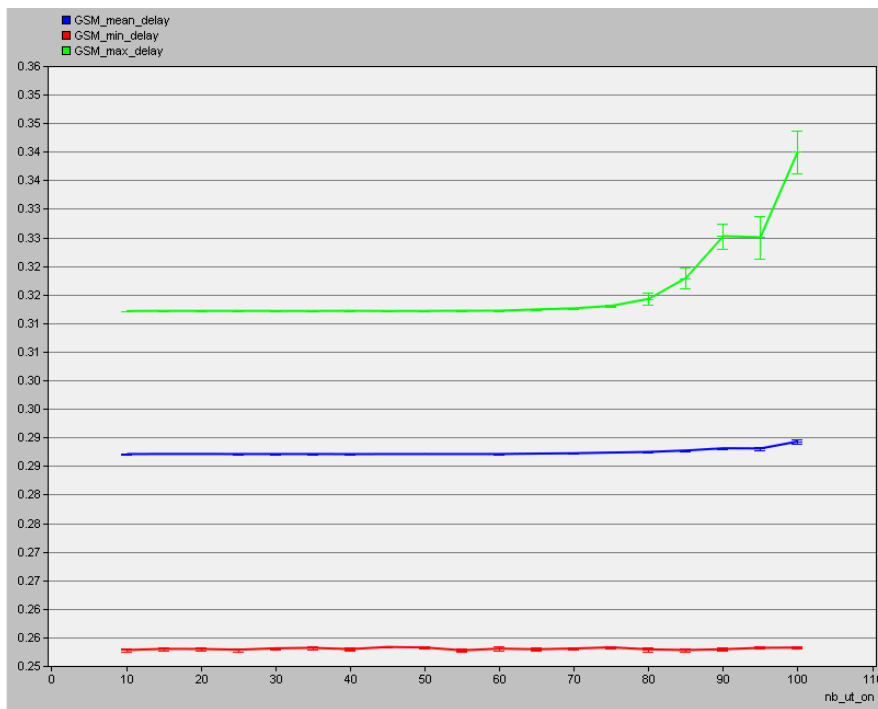
Le scénario comprend 12 porteuses en mode « ciel clair » (mode FMT spectralement le plus efficace). Ce chiffre est arbitraire et pris en cohérence avec le scénario suivant comportant 20 porteuses dont 8 dans les modes FMT plus robustes. La capacité du système mesuré en entrée de la couche MAC (donc hors overhead du DVB-RCS) est alors de 12.8 Mbps.

### VI.2.2.2 Etude des performances en fonction de la charge

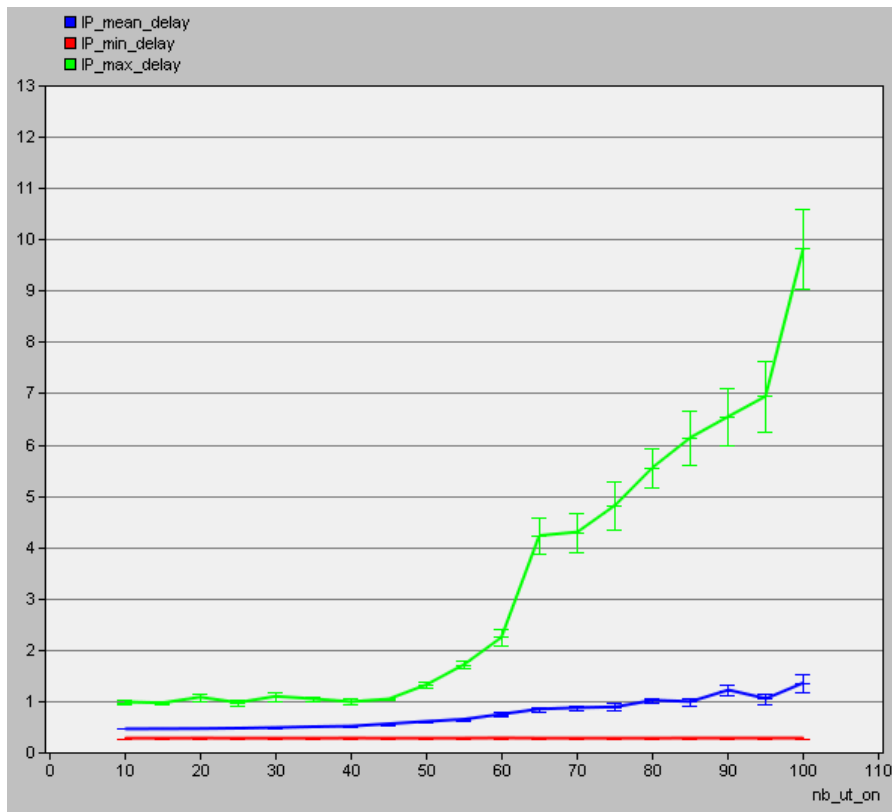
Le système est simulé avec un nombre d'avion variant de 10 à 100. Pour chaque configuration, 10 simulations avec une initialisation différente du générateur de nombre aléatoire sont lancées. Les résultats obtenus sont présentés sur la [Figure VI-10](#).



(a) Délais (min, max, moyen) pour le service ATC/AOC.



(b) Délais (min, max, moyen) pour le service GSM.



(c) Délais (min, max, moyen) pour le service IP

Figure VI-10 : Simulation N avions - Délais par services.

Le service ATC/AOC n'est pas affecté par l'augmentation du nombre d'avion dans le réseau au niveau du délai moyen. Le délai maximum augmente de façon limitée avec le nombre d'avion actif. La qualité de service pour le service ATC/AOC est donc assurée quelque soit le nombre d'avions dans le réseau. Ce phénomène est un effet de la priorité haute pour ce trafic que ce soit dans le terminal avion ou au niveau du centre de contrôle NCC.

La qualité du service GSM est impactée à partir de 80 avions. La gigue augmente alors de manière sensible. Il est surtout nécessaire de tenir compte du délai maximal observé (à 99%). En effet, bien que la liaison satellite utilise un format paquet (trames TRAU encapsulées par étapes successives jusqu'au créneau TRF), le réseau GSM reste synchrone et les trames TRAU doivent être resynchronisées avant traitement par la BSC. La limite de retard admis peut être fixée à 320 ms. Cette valeur avait été retenue comme objectif de performances des services de classe QoS 1 dans les réseaux ATM (Asynchronous Transfer Mode) utilisant une liaison satellite [ITU I.356].

Le service IP est visiblement la variable d'ajustement du système. Le retard maximal des datagrammes IP augmente assez vite au-delà de 50 avions. Surtout, la **Figure VI-11** montre que le débit moyen offert au trafic IP décroît rapidement.

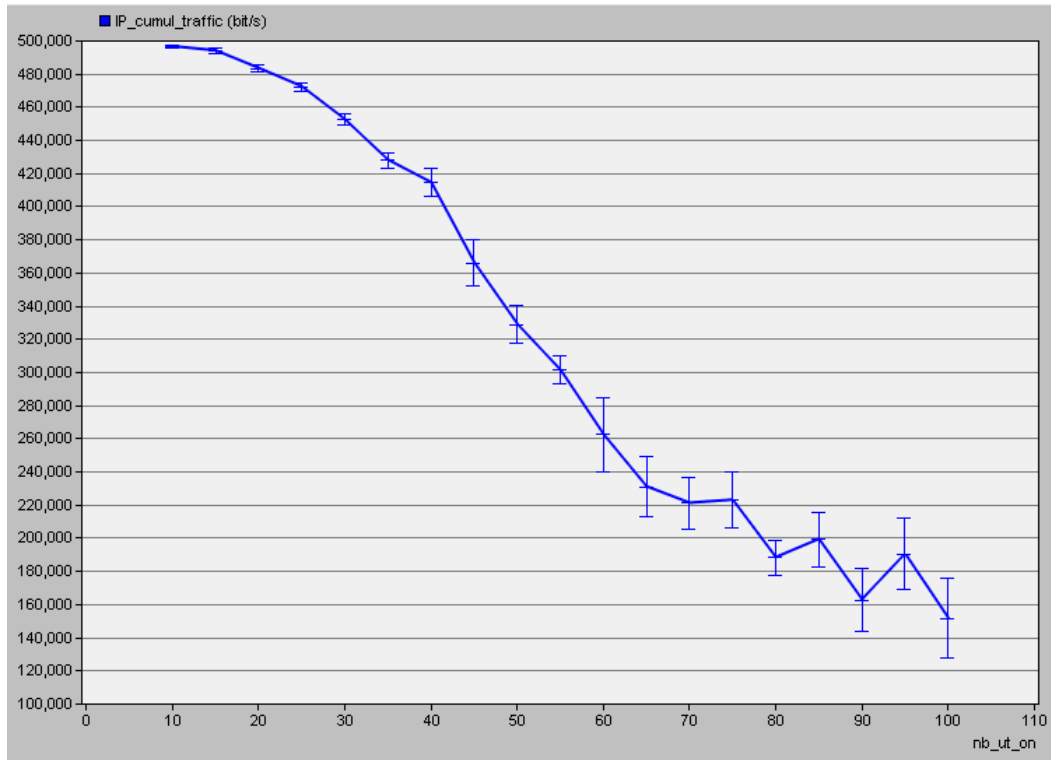


Figure VI-11 : Simulation N avions - Débit moyen IP.

### VI.2.2.3 Etude du fonctionnement du réseau chargé

Nous analysons dans cette partie le fonctionnement du réseau avec 60 avions. L'objectif est de préciser les conditions de fonctionnement des différents nœuds de communication et ainsi de mettre en évidence l'enchaînement des traitements.

La **Figure VI-12** présente la répartition des délais observés pour les trois services (CDF : Cumulative Distribution Function). Le comportement est similaire à celui obtenu avec les simulations utilisant le modèle DAMA simplifié (**Figure VI-5**).

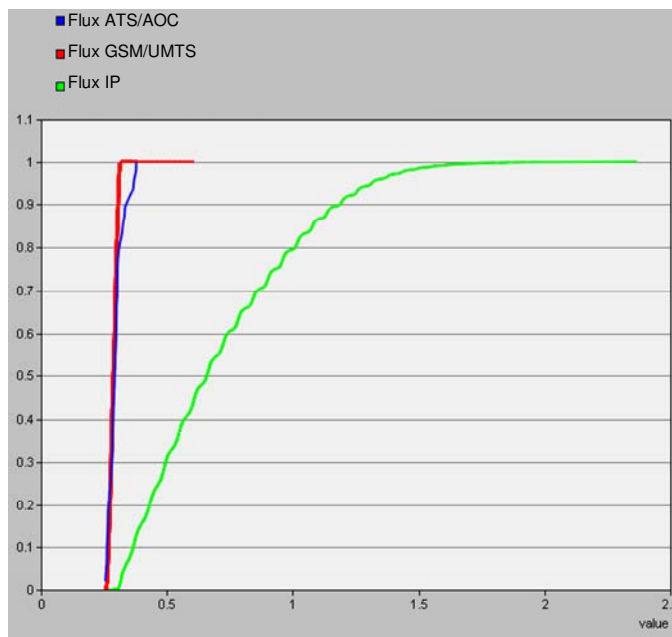


Figure VI-12 : Simulation 60 avions - CDFs des délais par services.

Il est intéressant de regarder de quelle façon se répartit l'allocation de ressource dans cette simulation chargée. La **Figure VI-13** présente la répartition du nombre de créneaux alloués au terminal étudié. L'hypothèse retenue pour les phases précédentes de l'étude, à savoir une loi uniforme entre deux bornes, apparaît comme une simplification raisonnable au vu du comptement observé avec le DAMA complet.

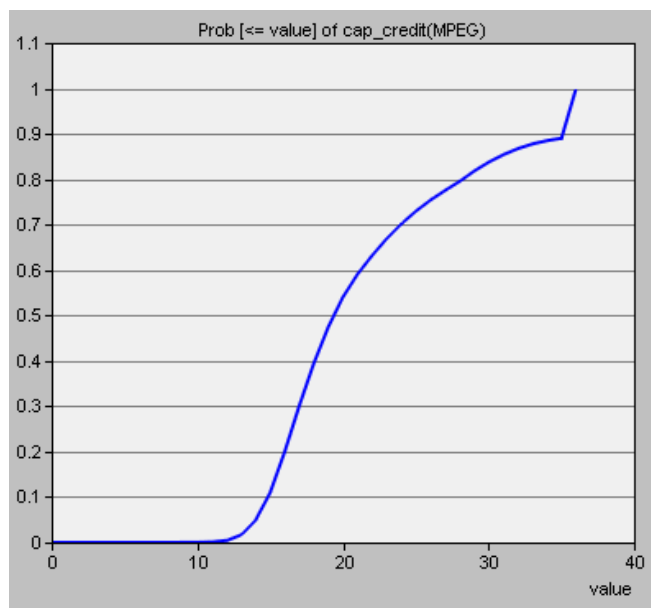


Figure VI-13 : Simulation 60 avions - CDFs du nombre de créneaux alloués.

La **Figure VI-14** présente la façon dont les requêtes en débit sont générées pour le service GSM. La difficulté principale vient de la différence d'échelle de temps entre la génération du trafic (les trames TRAU sont générées toutes les 20 ms) et la gestion DVB-RCS (supertrame de 59 ms). Par ailleurs, le temps de boucle pour la signalisation est long comparé à l'évolution du trafic (250 ms pour l'envoi de la requête, 59 ms pour le traitement et 250 ms pour le retour). La génération des requêtes repose donc sur une estimation lissée du débit (estimation par fenêtre glissante, courbe verte) puis les requêtes sont générées en tenant compte de ce débit lissé et de sa variance (courbe rouge). Il apparaît clairement que les besoins de la source de trafic temps réel sont sur-estimés, condition nécessaire pour que la gigue observée reste satisfaisante.

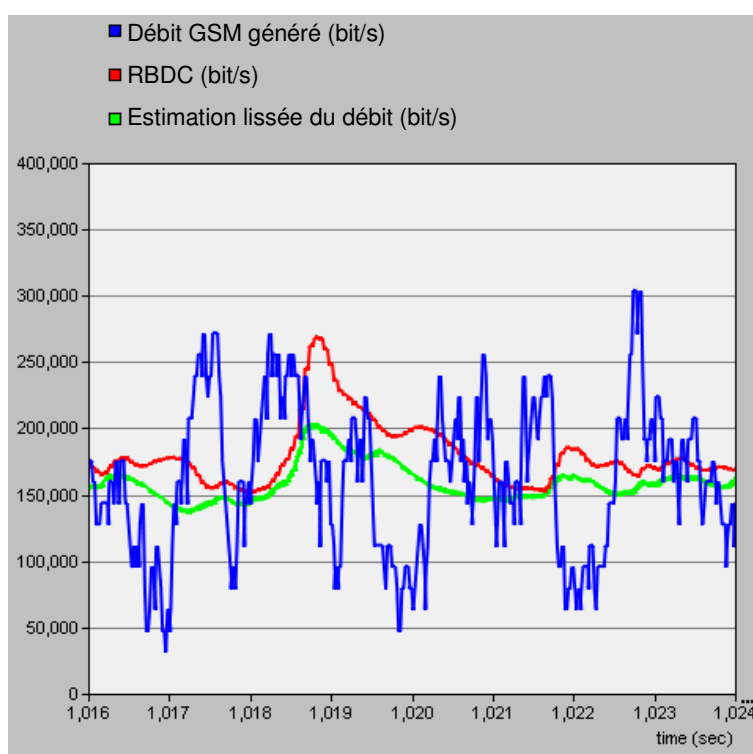


Figure VI-14 : Simulation 60 avions - Génération des requêtes de capacité en débit pour le service GSM.

La validité de ce principe de génération des requêtes de capacité en débit peut être vérifiée à l'aide d'une simulation où seul le trafic GSM est présent (pas de trafic IP). Ainsi, les transferts de capacité entre services GSM et IP sont supprimés. La **Figure VI-15** présente la répartition des délais dans ce cas. 99% des trames TRAU subissent un délai inférieur à la limite imposée de 320 ms.

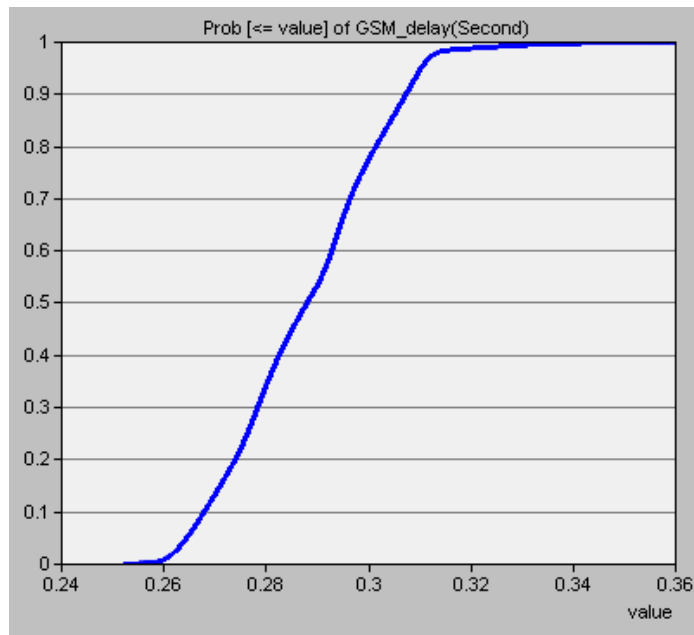


Figure VI-15 : Simulation 60 avions - CDF du délai dans le cas d'un trafic GSM seul.

#### VI.2.2.4 Performances d'accès pour un avion avec le seul trafic ATC/AOC

La simulation est ensuite utilisée pour simuler un réseau chargé (60 avions) dans le cas où seul le service ATC/AOC est activé à bord de l'avion observé. L'objectif est de vérifier que la gestion de la qualité de service mais également la méthode d'accès sur la liaison DVB-RCS permettent de maintenir les objectifs fixés pour le service ATC/AOC en dépit de sa forte sporadicité.

La [Figure VI-16](#) rappelle la séquence d'échange entre le terminal avion et le centre de contrôle dans le cas de la transmission de messages isolés. La procédure même de signalisation du DVB-RCS ne permet pas d'obtenir des retards inférieurs à 750ms dans ce cas.



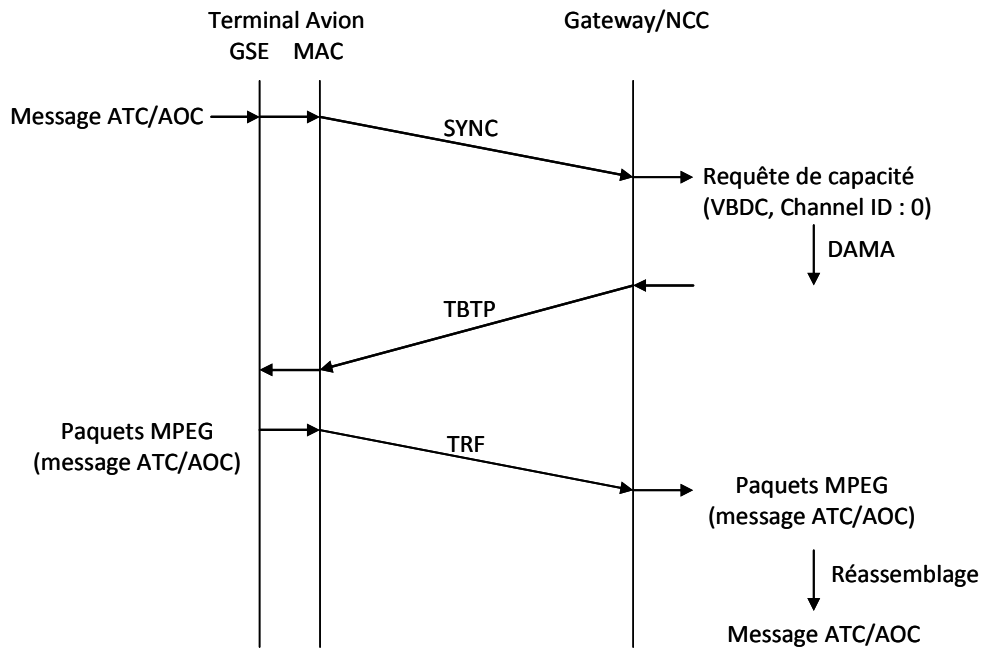


Figure VI-16 : Séquence d'échange DVB-RCS dans le cas d'un message ATC/AOC isolé.

La [Figure VI-17](#) présente la distribution des délais. La nécessité d'une première signalisation d'accès par créneau SYNC en début de rafale de trafic augmente sensiblement le temps d'accès, la distribution CDF montre que les retards observés sont supérieurs à 750 ms.

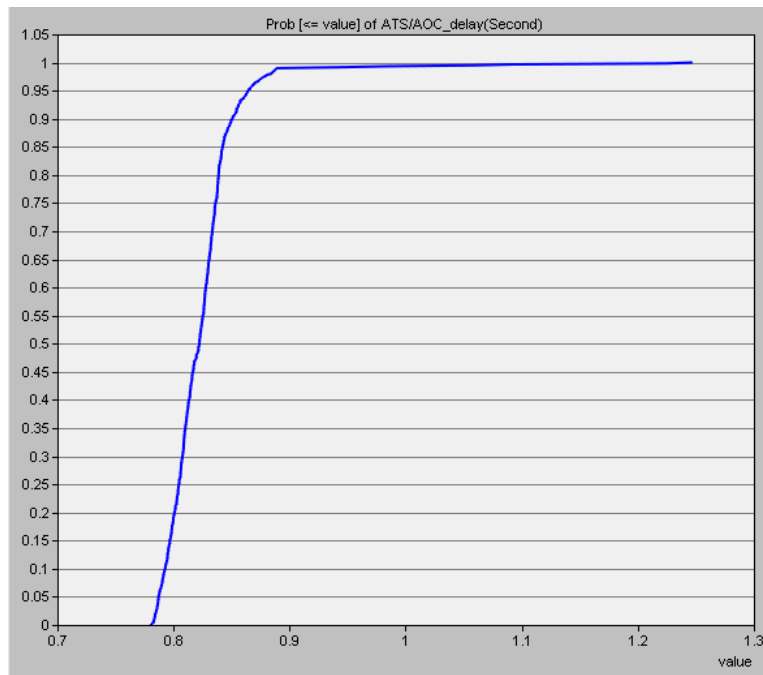


Figure VI-17 : Simulation 60 avions - Distribution (CDF) des délais pour trafic ATC/AOC seul.

La seule solution pour éviter ces temps d'accès serait une allocation de ressource fixe (CRA – Continuous Rate Allocation) qui irait à l'encontre de la recherche d'efficacité de la gestion de la ressource.

La **Figure VI-18** présente le cumul de toutes les requêtes traitées par l'algorithme DAMA dans le centre de contrôle NCC. Ce graphe confirme que la configuration de la simulation correspond à un scénario chargé.

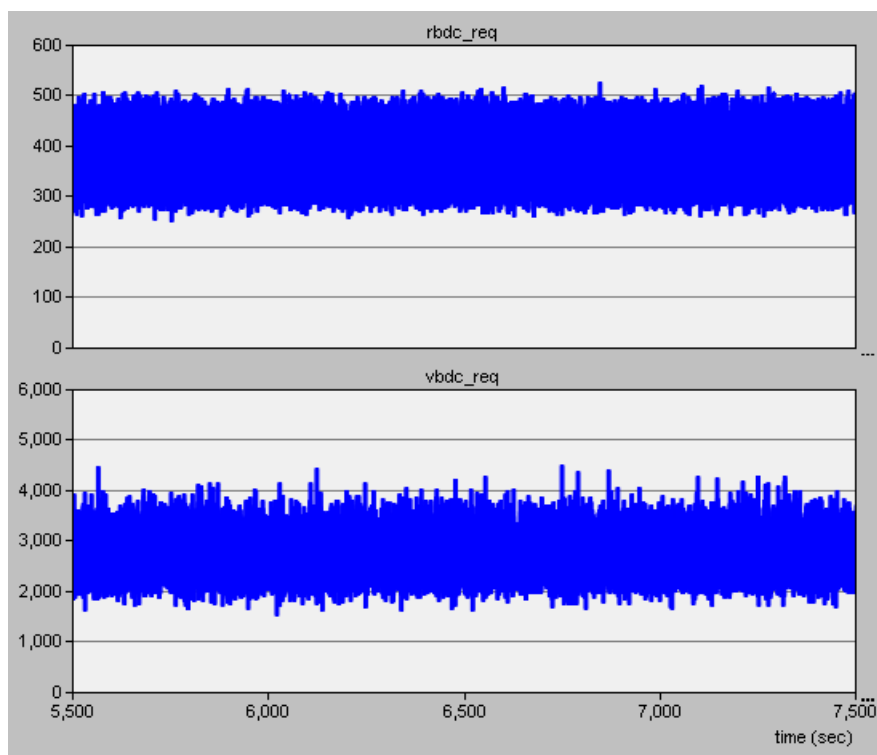


Figure VI-18 : Simulation 60 avions - Requêtes de capacité cumulées en entrée du NCC.

### VI.2.3 Simulation avec plusieurs terminaux et conditions de propagations variables

Afin de compléter notre étude, nous avons effectué des simulations intégrant plusieurs terminaux et des conditions de propagations variables. L'objectif est ici simplement de montrer que la conception du terminal avion est capable de prendre en compte les variations de capacité du lien satellite.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle accessible pour le canal de propagation aéronautique en bande Ka. Le canal de propagation en bande Ka a été étudié de façon approfondie par

l'ONERA dans le cas de stations terriennes ; les modèles correspondant fournissent des séries temporelles d'atténuation tenant compte de la conception de la boucle de décision FMT [CAS 04]. Ces fichiers peuvent être lus par le modèle de simulation OPNET. La Figure VI-19 nous donne un exemple pour ce type de fichier d'entrée. Comme attendu, nous voyons que les modes FMT suivent bien les conditions de propagation.

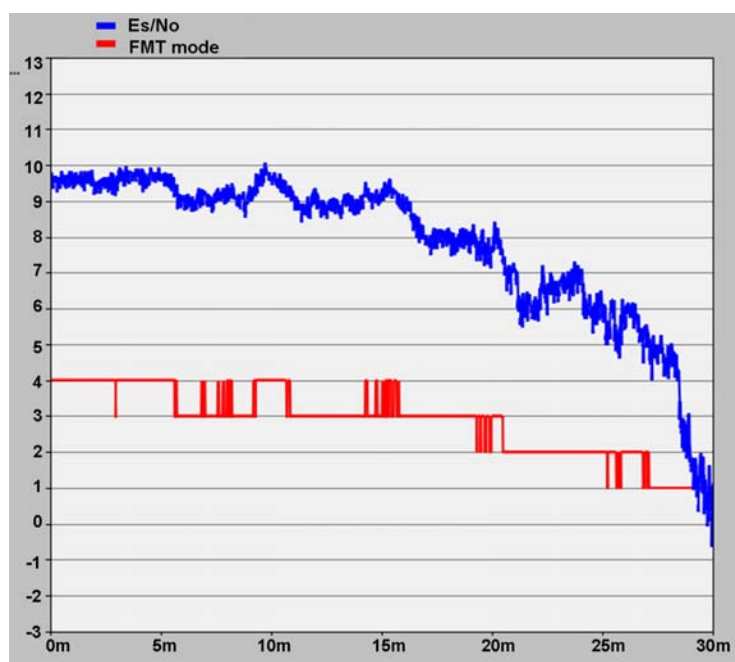


Figure VI-19 : Exemple de fichier d'entrée du modèle de simulation.

Dans notre cas, le comportement attendu de la liaison satellite est sensiblement différent que dans le cas d'un terminal fixe au sol :

- le mouvement de l'avion conduit le terminal à sortir de la zone d'atténuation due à la pluie, principale contribution à l'atténuation en bande Ka. Le mouvement horizontal permet de traverser rapidement les cellules de pluie dont le diamètre n'excède pas quelques kilomètres. Le mouvement vertical amène l'avion au-dessus de la couverture nuageuse.

- d'autres effets difficilement modélisables contribuent à modifier le bilan de liaison. Par exemple, l'évolution de l'avion à basse altitude impose des contraintes sur le pointage antenne et peut conduire à une réduction de la puissance rayonnée afin d'éviter d'interférer avec les satellites proches.

Il a donc été choisi d'utiliser un profil simplifié pour l'évolution des modes FMT avec une première pente faisant passer le terminal du mode 0 (le plus robuste et le moins spectralement efficace) au mode 4 (le moins robuste mais le plus efficace) sur une période de 14 minutes, puis une seconde pente du mode 4 au mode 0 pendant la dernière partie du vol (1 heure simulée au total). Ce profil FMT est présenté sur la **Figure VI-20**.

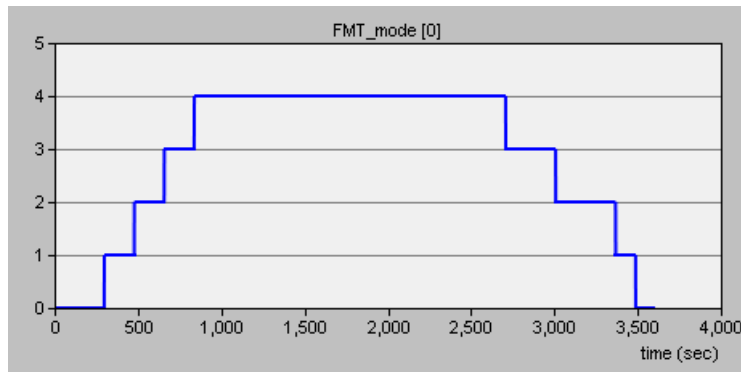


Figure VI-20 : Profil FMT pour la simulation.

Conformément à ce qui est présenté dans le **chapitre III**, la ressource radioélectrique correspond à un ensemble de porteuse dans un répéteur de 25 MHz (**Tableau VI-4**). La répartition par mode FMT est la suivante :

	Nombre de porteuse	Mode FMT associé	Nombre de TRF slots disponibles par porteuse
	2	0	2
	2	1	8
	2	2	24
	2	3	32
	12	4	36
Total	20	5 modes	636

Tableau VI-4 : Répartition de la ressource radioélectrique dans la simulation.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés sur les figures suivantes.

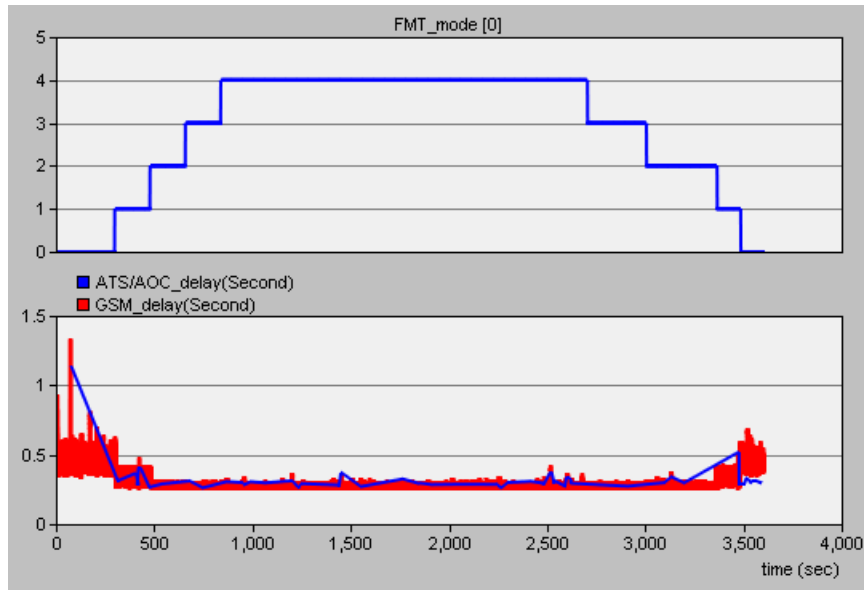


Figure VI-21 : Délais ATC/AOC et GSM avec modes FMT variables.

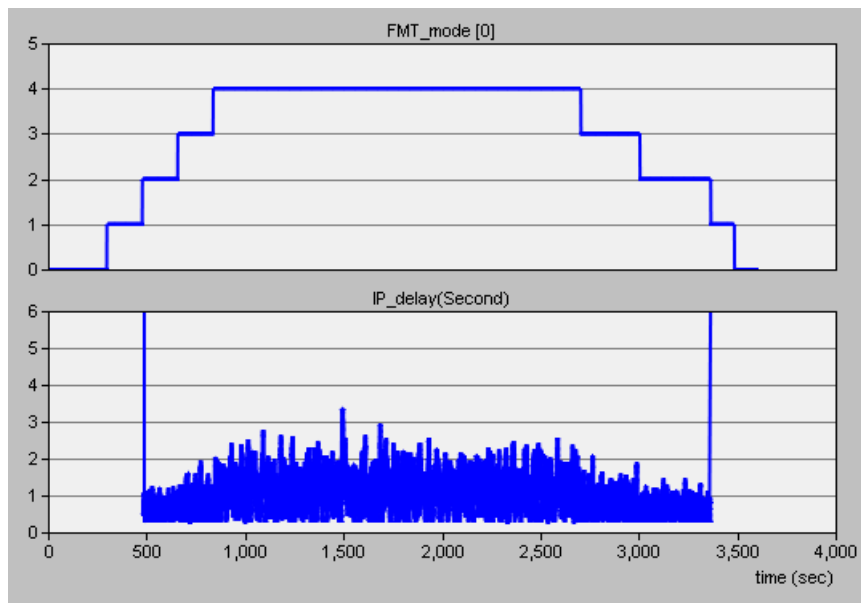


Figure VI-22 : Délais IP avec modes FMT variables.

Les courbes présentées sur les précédentes montrent que le terminal gère les priorités de trafic quelque soit le mode activé. La capacité de la liaison satellite est insuffisante sur les modes 0 et 1 pour assurer la transmission du trafic GSM. Le trafic IP ne peut être acheminé qu'à partir du mode 2.



## CONCLUSION

La thèse présentée dans ce mémoire trouve son origine dans les travaux menés à l'ENAC et l'ISAE sur les réseaux de communication aéronautiques. Ces dernières années, ce domaine connaît une évolution rapide pour la partie contrôle aérien et communications des compagnies aériennes avec le déploiement de nouvelles liaisons de données (par exemple VDL Mode 2). Par ailleurs, liés aux nouvelles habitudes en mobilité, une demande croissante est apparue pour des services offerts en cabine aux passagers. Dans le domaine des communications par satellite, la réponse à ces deux besoins passe actuellement par le déploiement de systèmes disjoints (par exemple INMARSAT et Connexion by Boeing). Il est apparu intéressant d'étudier les modalités de déploiement d'un système de communication par satellite unique assurant l'ensemble de ces services.

Dans notre scénario, la liaison satellite fournit un sous-réseau d'accès entre un terminal avion et l'infrastructure terrestre. Aussi, il est particulièrement important d'identifier de quelle façon ce sous-réseau s'intègre dans l'architecture globale. Notre proposition repose sur l'intégration de la liaison satellite dans trois réseaux :

- le réseau aéronautique ATN (Aeronautical Telecommunication Network). Ce réseau, basé sur une architecture OSI (structure en couches et protocoles associés), supporte l'ensemble des services aéronautiques ATC (Air Traffic Control) et AOC (Aeronautical Operational Communications).
- le réseau de téléphonie mobile GSM (Global System for Mobiles). Ce réseau est structuré avec une approche connexion qui impose par conséquent des contraintes fortes sur les formats de données et la synchronisation dans le réseau.
- le réseau Internet. Les protocoles utilisés sont alors ceux du modèle TCP/IP.

Les différents services présentent une forte hétérogénéité en terme de caractéristiques (volume et sporadicité notamment) mais aussi en terme de qualité de service requise (taux de perte, délais, et gigue). Nous avons mené l'étude sur deux axes : caractérisation des sources de trafic, tant du

point de vue ressources nécessaires que qualité de service, et définition des points de convergence possible entre ces trois réseaux fondamentalement hétérogènes.

### **Architecture du système**

Dans une première étape, nous nous sommes concentrés sur la caractérisation des services et l'identification des protocoles utilisés.

Dans le cas du réseau ATC/AOC, la caractérisation des services a été réalisée à l'aide d'une étude prospective menée par Eurocontrol et la FAA (Federal Aviation Administration) appelée COCR. Cette étude fournit une liste qui se veut exhaustive des services aéronautiques avec les performances attendues pour la transmission des informations. Il est nécessaire de synthétiser l'important volume de données contenu dans ce document pour extraire les services effectivement utilisables avec une liaison satellite et les domaines de vol associés. Ce travail est concrétisé par le développement d'un modèle de trafic.

Le réseau GSM a été choisi comme base pour le service de téléphonie mobile à bord de l'avion. En effet, en dépit des évolutions constantes des réseaux mobiles, le réseau GSM reste dominant au niveau mondial. Par ailleurs, l'utilisation de liaisons satellite à l'intérieur des réseaux GSM est validée par le déploiement de plusieurs solutions par réseaux VSAT. Notre proposition est caractérisée par l'utilisation d'un format paquet entre la station BTS à bord de l'avion et la station BSC au sol. Dans les réseaux GSM terrestres, l'interface Abis entre ces deux noeuds utilise un multiplex temporel (trame MIC). Cependant, les données issues des communications téléphoniques ainsi que la signalisation utilisent un format appelé TRAU (TRAnsciever Adaptation Unit). Ce format est présenté dans la partie IV du mémoire et a été retenu pour la transmission sur la liaison satellite. Il est cependant à noter qu'une resynchronisation de ces trames TRAU est nécessaire après le bond satellite ce qui impose un respect strict de la borne supérieure du délai de transmission.

Il est apparu naturel de considérer le réseau TCP/IP dans notre architecture. La demande des utilisateurs dans l'avion est de disposer d'un accès à Internet avec les services associés : courrier électronique, navigation Web ... Les satellites sont couramment utilisés pour fournir un accès de ce type et l'ETSI propose en particulier tout un ensemble de normes regroupées sous le terme BSM (Braodband Satellite Multimedia).



D'un point de vue définition du réseau d'accès satellite, la solution retenue repose sur les normes ETSI DVB-S2 ([lien aller](#)) et DVB-RCS ([lien retour](#)). Ces normes définissent à la fois la couche physique (formes d'onde) et la couche d'accès (canaux physiques et logiques). Par ailleurs, nous avons fait le choix de la bande Ka pour le dimensionnement des liaisons. Ce choix est motivé par la réglementation ITU et l'allocation de bandes de fréquence importantes pour les communications mobiles aéronautiques dans cette bande. Dans les réseaux de terminaux fixes, l'utilisation de la bande Ka va de pair avec l'activation de techniques FMT (Fade Mitigation Techniques). En effet, entre 20 et 30 GHz, les atténuations observées peuvent être importantes, la pluie étant la principale contribution. Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle de propagation aéronautique à ces fréquences, mais les conditions de propagation seront assurément très différentes du fait du mouvement de l'avion. Les FMT n'en sont pas moins un moyen indispensable pour adapter dynamiquement le bilan de liaison soit du fait de problèmes de propagation, soit du fait d'une modification des paramètres (pointage antenne, adaptation de la puissance rayonnée ...). Nous avons pris en compte ces FMT dans la définition du système avec une dynamique élevée. Ce résultat est obtenu par combinaison de la technique de contrôle de puissance de la liaison montante (ULPC), de l'adaptation de la forme d'onde (ACM : adaptation des formats de modulation et de codage) et de l'adaptation du débit (DRA).

### **Architecture du terminal avion**

L'étude de l'architecture du terminal avion est focalisée sur la liaison retour (avion vers station terrienne). En effet, cette liaison est la plus contraignante du point de vue de la méthode d'accès. L'évaluation des performances repose sur l'utilisation d'un logiciel de simulation à événements discrets (OPNET Modeler). La démarche est la suivante :

- étude des architectures protocolaires par simulation détaillée du terminal et utilisation d'un algorithme d'allocation de ressource (DAMA) simplifié dans la station terrienne. La capacité allouée au terminal est ainsi totalement maîtrisée (allocations moyenne, minimale, maximale) afin d'identifier les problèmes potentiels dans les couches d'accès elles-mêmes.
- analyse de l'architecture finalement retenue pour le terminal avion dans une simulation comportant en plus du terminal avion lui-même une simulation du trafic généré par les autres avions en concurrence sur la ressource radioélectrique disponible. L'algorithme d'allocation DAMA réagit alors aux requêtes de capacité provenant de tous les utilisateurs du réseau d'accès

et la capacité disponible pour le terminal peut varier rapidement. Cette simulation prend également en compte l'évolution des modes FMT.

L'ensemble des modèles ainsi développés nous ont permis de mettre en évidence la nécessité d'utiliser une pile protocolaire avec des interactions inter-couches ("cross-layer"). Nous avons finalement obtenu une architecture du terminal avion dite dynamique avec encapsulation générique. Cette nouvelle approche est basée sur l'utilisation de la technique récente GSE (Generic Stream Encapsulation) qui permet l'encapsulation flexible et efficace sur un canal dynamique. Dans notre système, avec l'utilisation de la signalisation « Cross-Layer », GSE permet d'ordonner et de multiplexer les différents types de flux d'une façon générique et adaptative. Les performances du système basé sur cette architecture finale ont été évaluées par simulations. Cette approche dynamique avec GSE offre les meilleures performances, notamment pour les services d'accès à Internet pour les passagers, tout en garantissant les performances requises pour les autres flux prioritaires (ATS/AOC et téléphonie mobile).

### **Futurs travaux et perspectives**

Plusieurs axes peuvent faire suite à cette thèse.

Nous avons présenté brièvement dans le [chapitre III](#) une version préliminaire de la mise à jour de la norme DVB-RCS qui a été publiée début 2009 [[ETSI 301 790](#)]. Les nouveautés dans cette version se concentrent plus particulièrement sur l'application du DVB-RCS dans le contexte de services mobiles par satellite. Nous avons justement étudié la compatibilité entre cette nouvelle version de norme et notre dernière solution avec l'encapsulation GSE. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour intégrer la nouvelle version de la norme DVB-RCS dans l'architecture proposée ainsi que dans le modèle de simulation.

De plus, deux axes d'études pourraient compléter notre étude :

- le premier axe concerne l'intégration du système dans l'avion. Parmi les équipements nécessaires, le plus critique est l'antenne. La nécessité d'une intégration dans le fuselage avion (trainée réduite) favorise la solution d'une antenne active. De nombreuses interrogations subsistent sur les performances de pointage et de formation du faisceau de telles antennes. Hors ces performances conditionnent à la fois le débit maximal disponible et la compatibilité du nouveau système avec les systèmes existants (interférences avec les satellites adjacents).

- par ailleurs, nos efforts ont portés sur la conception du terminal avion. Dans le cas où un tel système de communication par satellite serait déployé sur une majorité des avions commerciaux, le dimensionnement global du réseau deviendrait critique. Ainsi, il serait nécessaire d'évaluer le nombre de satellites pour une couverture européenne, le type de charges utiles (mono ou multi-faisceaux) et les méthodes de réutilisation de fréquence.



## REFERENCE

- [3GPP 01]** 3GPP TS 48.052 V.7.0.0: "Base Station Controller - Base Transceiver Station (BSC - BTS) interface; Interface principles". 2007 (ETSI TS 148.052 V.7.0.0)
- [3GPP 02]** 3GPP TS 25.426 V.7.1.0: "UTRAN Iur and Iub interface data transport & transport signalling for DCH data streams", 2006 (ETSI TS 125.426 V.7.1.0)
- [3GPP 03]** 3GPP TS 48.054 V.7.0.0: "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Base Station Controller - Base Transceiver Station (BSC - BTS) interface; Layer 1 structure of physical circuits", 2007 (ETSI TS 148.054 V.7.0.0)
- [3GPP 04]** 3GPP TS 48.060 V.7.0.0: "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); In-band control of remote transcoders and rate adaptors for full rate traffic channels", 2007 (ETSI TS 148.060 V.7.0.0)
- [3G Americas]** "GSM to 3G and Beyond", 3G Americas, 2008
- [AeroMobile]** <http://www.aeromobile.net/>
- [AirCell]** <http://www.aircell.com/>
- [ALO 97]** M. S. Alouini, et al. "Channel characterization and modeling for Ka-Band very small aperture terminals," Proc. IEEE, vol. 85, pp. 981–997, 1997
- [ANASTASIA]** <http://www.anastasia-fp6.org>
- [ANNEXE 10]** ICAO - International Standards and Recommended Practices: Aeronautical Telecommunications ANNEX 10 Volume III Part I: Digital Data Communication Systems; Part II Voice Communication Systems
- [ATN SARPs]** International Civil Aviation Organization, "Manual of technique provisions for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN)", Third edition, 2002
- [BOL 04]** A.I. Bolea-alamanac, "Conception et mise en œuvre de méthodes de compensation des effets du canal de propagation pour optimiser les ressources radio", thèse de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2004
- [BRA 69]** P. T. Brady, "A model for generating on-off speech patterns in two-way conversation," Bell Syst. Tech. J., vol. 48, no. 7, pp. 2445-2472, 1969.

- [CAMAL]** Aeronautical Telecommunication Network (ATN) Comprehensive ATN Manual (CAMAL), Final Editor's drafts of the ATN Guidance Material, 1999
- [CAN 08-1]** J. Cantillo, et al. "GSE: A Flexible, yet Efficient, Encapsulation for IP over DVB-S2 Continuous Generic Streams", International Journal of Satellite Communications and Networking, 2008
- [CAN 08-2]** J.Cantilo, "Codage multi-couches pour systèmes de communication par satellites", thèse, Telecom Paris, 2008
- [CAS 03]** L. Castanet, et al. "Interference and Fade Mitigation Techniques for Ka and Q/V Band Satellite Communication Systems," COST 272-280 Int'l.Wksp. Satellite Commun, 2003
- [CAS 04]** L. Castanet, et al. "Development and validation of time series synthesizers for Ka-band satellite communication systems", 10th Ka-band Utilisation Conference, October 2004, Vicenza (Italy)
- [CBB-1]** E.Laase, et al. "Connexion by BoeingSM – Global Broadband Satellite Services for Aircraft", PTC, 2003
- [CBB-2]** "Boeing to Discontinue Connexion by Boeing Service", Boeing news, 2006
- [CHA 04]** R. Chaggara, "Les Modulations à Phase Continue pour la Conception d'une Forme d'Onde Adaptative Application aux Futurs Systèmes Multimédia par Satellite en Bande Ka", thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 2004
- [CHI 06]** P. Chini, et al. "Dynamic resource allocation based on a TCP-MAC Cross-Layer approach for interactive satellite networks", International Journal of Satellite Communications and Networking, 2006
- [CISCO]** "Satellite Backhaul Optimization for GSM and UMTS with RAN Optimization Solution", <http://www.cisco.com>, 2005
- [COCR 2.0]** Communications Operating Concept and Requirements for the Future Radio System (COCR), EUROCONTROL/FAA Future Communications Study Operational Concepts and Requirements Team, Version 2.0, 2007
- [DTI 00]** "Services et applications de liaison de données", DSNA-DTI, revue technique 59, 2000
- [ETSI 101 202]** ETSI TR 101 202 V1.2.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for Data Broadcasting, 2003
- [ETSI 101 984]** ETSI TR 101 984 V1.2.1 Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Services and architectures, 2007

- 
- [ETSI 102 357] ETSI TR 102 353 V1.1.1 Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Guidelines for the Satellite Independent Service Access Point (SI-SAP), 2004
- [ETSI 101 790] “Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790”, 2006
- [ETSI 300 421] “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services”, 1997
- [ETSI 301 192] ETSI EN 301 192 V1.4.1 Digital Video Broadcasting (DVB); DVB specification for data broadcasting, 2004
- [ETSI 301 790] ETSI EN 301 790 V1.4.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems, 2005
- [ETSI 301 790]’ Draft ETSI EN 301 790 V1.5.1 Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems, 2009
- [ETSI 302 307] “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications”, 2006
- [EUROCAE ED-78A] EUROCAE WG 53, Guidelines for approval of the provision and use of air traffic services supported by data communications (ED-78A)
- [FLO 93] S. Floyd, et al. “Random early detection gateways for congestion avoidance”, IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993
- [FLO 97] S. Floyd, “RED: Discussions of Setting Parameters”, 1997
- [GIA 07] G. Giambene “Adaptive Resource Management in Satellite Networks: Optimization and Cross-Layer Design”, Springer-Verlag New York Inc., 2007
- [GILAT] “Gilat’s Sky-Abis Solution for GSM via satellite”, <http://www.gilatnetworks.com>, 2006
- [GON 06] J. Gonda, et al. “Joint U.S.-European Future Communications Operating Concept”, AIAA/IEEE 25th Digital Avionics System Conference, 2006
- [GRE 02] O. Grémillet et al. “Aggregate traffic modèles for satellite multimedia services”, 20th AIAA International Communication Satellite System Conference and Exhibit, 2002
- [GSE 07] ETSI TS 102 606 V1.1.1, “Digital Video Broadcasting (DVB); Generic Stream Encapsulation (GSE) Protocol”, 2007
-

- [HAB 92]** I.W.Habib et al. "Multimedia traffic characteristics in broadband networks", IEEE Communications Magazine, 1992
- [HAF 07]** F. Hafid Fazli, et al. "Capacity Dimensioning for Air Traffic Management (ATM) Services in a Spot Beam Satellite System", IWSSC '07 International Workshop on Satellite and Space Communications, 2007
- [HAS 06]** H. Hassan, et al. "Aggregate Traffic Modèles for VoIP Applications", Digital Telecommunications, ICdT '06., 2006
- [HEF 86]** H. Heffes, et al. "A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 4, Issue 6, 1986
- [HEI 98]** Gunnar Heine, "GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation", Artech House, 1998
- [HON 05]** T.C. Hong, et al. "A Comparison of IP Datagrams Transmission using MPE and ULE over Mpeg-2/DVB Networks", Fifth International Conference on Information, Communications and Signal Processing, 2005
- [ICAO 07]** ICAO - Aeronautical Communications Panel (ACP), 17th meeting of working group F, "Regulatory best practices on the use of mobile phone on-board the aircraft", 2007
- [INMARSAT-1]** <http://www.INMARSAT.com/>
- [INMARSAT-2]** "SwiftBroadband Capabilities to Support Aeronautical Safety Services, WP3: Airborne Architectures for SwiftBroadband Services", EUROCONTROL, 2006
- [ISO/IEC 7498]** Information Processing Systems - OSI Reference Model - The Basic Model, 1994
- [ITU-A5 07]** ITU Radio Regulations - Volume 1 (Article 5) international table of frequencies by ITU Region, 2007
- [ITU G.1010]** Transmission systems and media, digital systems and networks, quality of service and performance, End-user multimedia QoS categories, 2001
- [ITU I.356]** B-ISDN ATM layer cell transfer performance, 03/2000
- [ITU-R P.618]** "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems"
- [ITU-R P.682]** "Propagation data required for the design of earth-space aeronautical mobile telecommunication systems"



- 
- [ITU-R P.837] "Characteristics of precipitation for propagation modelling"
- [JAC 88] V. Jacobson et al. "Congestion avoidance and control", in Proc. SIGCOMM'88, 1988
- [JON 01] W.H. Jones, et al. "Connexion by BoeingSM-broadband Satellite Communication System for Mobile Platforms" IEEE MILCOM, 2001
- [KER 05] R.J Kerczewski, et al. "Communications, navigation and surveillance for improved oceanic air traffic operations", IEEE Aerospace Conference, 2005
- [LUC 06] O Lucke, et al. "MAC and encapsulation efficiency of satellite DVB using fade mitigation techniques", International Journal of Satellite Communications and Networking, 2006
- [MON 03] A.D. Monk, et al. "Calibration and RF test of Connexion by BoeingSM airborne phased" arrays, IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003
- [MOWGLY] <http://www.mowgly.org>
- [NAR 06] A. Narula-Tam, et al. "QOS considerations for future military satcom networks with link layer dynamic resource allocation", International, 2006
- [NEWSKY] <http://www.newsky-fp6.eu/>
- [NIV 06] F. Nivor, et al. "Amélioration de l'Allocation Dynamique de Ressource dans un Système Satellite DVBS/RCS", Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles CFIP, 2006
- [ONAIR] <http://www.onair.aero/>
- [PAN 04] A.D Panagopoulos, et al. "Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: propagation impairments and mitigation techniques", IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2004
- [PEN 06] F. Peng, et al. "Cross-Layer enhancement of TCP split-connections over satellites links", International Journal of Satellite Communications and Networking, 2006
- [RAD 06] J. Radzik, et al. "Satellite Access Performances Assessment and Optimization for In-Cabin Internet and ATC Traffic", 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2006
- [RAD 07] J. Radzik, et al. "Satellite system performance assessment for In-Flight Entertainment and Air Traffic Control", Space Communications journal, special issue on "Satellite Networks for Mobile Services", 2007
-

- [RFC 2581]** M. Allman et al. "TCP Congestion Control", 1999
- [RFC 2988]** V. Paxson et al. "Computing TCP's Retransmission Timer", 2000
- [RFC 4326]** G. Fairhurst, et al. "Unidirectional Lightweight Encapsulation (ULE) for Transmission of IP Datagrams over an MPEG-2 Transport Stream (TS)", 2005
- [RFC 5136]** G. Fairhurst, et al. "Extension Formats for Unidirectional Lightweight Encapsulation (ULE) and the Generic Stream Encapsulation (GSE)", 2008
- [RTCA-189]** RTCA Special Committee-189, ICAO Manual on Required Communications Performance (RCP Manual)
- [SESAR]** <http://www.sesar-consortium.aero>
- [SKI 05]** H. Skinnemoen, et al. "A comparative Study of DVB-RCS, IPOS and DOCSIS for satellite", 23rd AIAA&Ka Band Joint Conference, 2005
- [SRI 05]** V. Srivastava, et al. "Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead", IEEE Communications Magazine, 2005
- [TIA-1008]** "TIA standard: IP over Satellite (IPOS)", 2006
- [ETSI TS 102 354]** "Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Transparent Satellite Star - B (TSS-B); IP over Satellite (IPoS) Air Interface Specification", 2006
- [VIE 06]** F. Vieira, et al. "A tunable-fairness Cross-Layer scheduler for DVB-S2", International Journal of Satellite Communications and Networking, 2006
- [XIL 06]** G.Xilouris, et al. "Unidirectional Lightweight Encapsulation: Performance Evaluation and Application Perspectives", IEEE Transactions On Broadcasting, VOL. 52, NO. 3, 2006

## PUBLICATIONS

### **Revue Internationale**

José Radzik, Alain Pirovano, Na Tao, Michel Bousquet, "Satellite system performance assessment for In-Flight Entertainment and Air Traffic Control", The Space Communications journal, Special issue on "Satellite Networks for Mobile Services", 2007

### **Conférences Internationales**

José Radzik, Alain Pirovano, Na Tao, "Convergence of aeronautical communications on a single DVB-S2/RCS link", accepté, 27th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2009), 1-4 June, 2009, Edinburgh, UK

Na Tao, Michel Bousquet, Alain Pirovano, José Radzik, "DVB-S2/DVB-RCS satellite system performance assessment for IFE and ATN aeronautical communications", International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC2006), 14-15 September 2006, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Spain

José Radzik, Alain Pirovano, Na Tao, "DVB-S2/DVB-RCS satellite system design for in-cabin Internet and Aeronautical Telecommunication Network", Advanced Satellite Mobile Systems (ASMS) Conference 2006, Munich, Germany

José Radzik, Alain Pirovano, Na Tao, "Satellite Access Performances Assessment and Optimization for In- Cabin Internet and ATC Traffic", 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2006), 11 - 14 June 2006, San Diego, California



### Annexe A Recommandation COCR

Nous montrons dans cette annexe les différents éléments nécessaires pour étudier les caractéristiques du trafic ATS/AOC et la performance du système. Les hypothèses et les valeurs présentées sont basées sur la recommandation COCR [COCR 2.0] et concentrés sur la Phase 1 (jusqu'à 2020).

Tout d'abord, les performances requises pour les services ATS/AOC du futur système de radio (FRS) sont listées dans les [Tableau A- 1](#) et [Tableau A- 2](#). Ces exigences sont concentrées sur les communications air-sol point à point et définies en termes d'intégrité, de disponibilité et de TT95 (one-way). Ensuite, les hypothèses sur l'environnement et le mode d'opération des différents services ATS/AOC et leurs caractéristiques d'implémentation sont détaillés dans les [Tableau A- 3](#), [Tableau A- 4](#) et [Tableau A- 5](#). Ces hypothèses sont utilisées pour modéliser la source de trafic cockpit (présentés dans la [partie II.3.1](#)) et permettre l'étude du comportement et des performances globales du système étudié.

Service	TT <sub>95</sub> - one way (sec.)			Intégrité	Disponibilité
	TMA (Départ et Arrivée)	ENR	ORP		
ACL	3,8	3,8	26,5	5,00E-06	0,9965
ACM	3,8	3,8	26,5		
ARMAND	/	9,2	/		
C&P ACL	/	5,7	26,5		
D-ATIS (Arrivé)	4,7	4,7	/		
DLL	/	5,7	26,5		
D-ORIS	/	4,7	26,5		
D-OTIS	4,7	4,7	/		
D-RVR	4,7	4,7	/		
DSC	/	22,2	26,5		
D-SIG	9,2	/	/		
D-SIGMET	4,7	4,7	26,5		
D-TAXI	5,7	/	/		
FLIPCY	13,6	13,6	26,5		
FLIPINT	13,6	13,6	26,5		
ITP ACL	/	/	26,5		
M&S ACL	5,7	5,7	/		
PPD	13,6	13,6	26,5		

Tableau A- 1 : Performances requises des services ATS pour le FRS.

Service	TT <sub>95</sub> - one way (sec.)			Intégrité	Disponibilité
	TMA (Départ et Arrivée)	ENR	ORP		
AOCDLL	/	/	26,5	5,0 E-8	0,995
ENGINE	26,5	26,5	/	5,0 E-5	
FLTPLAN	/	13,6	26,5	5,0 E-8	
FLTSTAT	/	13,6	26,5	5,0 E-4	
FREETEXT	/	26,5	51,7	5,0 E-4	
FUEL	26,5	26,5	51,7	5,0 E-4	
GATES	/	13,6	/	5,0 E-4	
LOADSHT	13,6	/	/	5,0 E-8	
MAINTPR	/	13,6	26,5	5,0 E-5	
MAINTRT	/	26,5	51,7	5,0 E-5	
NOTAM	/	26,5	51,7	5,0 E-8	
POSRPT	26,5	26,5	51,7	5,0 E-5	
WXGRAPH	/	13,6	26,5	5,0 E-8	
WXRT	13,6	13,6	26,5	5,0 E-8	
WXTEXT	/	13,6	26,5	5,0 E-8	

Tableau A- 2 : Performances requises des services AOC pour le FRS.

Domaine opérationnel	Paramètre de vol	
	Nombre de secteurs	Durée (minute)
TMA_Départ	2	8
TMA_Arrivé	2	14
ENR	8	90
ORP	6	255

Tableau A- 3 : Hypothèse sur les paramètres de vol.

Service	Fréquence d'utilisation				Taille du message Quantité x Taille (Octet)	
	ENR	TMA	TMA	ORP	SOL-AIR	AIR-SOL
		Départ	Arrivée			
ACL	5	4	4	2	2 x93	2x93
ACM	8	2	2	6	1x126	1x88
ARMAND	1	0	0	0	1x260	1x88
C&P ACL	1	0	0	1	2x93	2x93
D-ATIS (Arrivé)	1	0	1	0	5x100	3x93
DLL	1	0	0	1	1x491	1x222
D-ORIS	1	0	0	1	9x478	3x93
D-OTIS	1	0	1	0	11x193	3x107
D-RVR	1	0	1	0	4x116	3x121
DSC	1	0	0	1	3x96	4x87
D-SIG	0	0	1	0	4x1340	3x129
D-SIGMET	1	0	1	1	4x130	3x129
D-TAXI	0	0	1	0	2x132	1x98
FLIPCY	1	1	0	1	1x105	1x173
FLIPINT	4	1	1	36	1x143	1x2763
ITP ACL	0	0	0	1	2x93	2x93
M&S ACL	1	0	1	0	2x93	2x93
PPD	1	1	1	1	1x105	1x277

Tableau A- 4 : Caractéristiques des services ATS.



Service	Fréquence d'utilisation				Taille du message Quantité x Taille (Octet)	
	ENR	TMA	TMA	ORP	SOL-AIR	AIR-SOL
		Départ	Arrivée			
AOCDLL	0	0	0	1	2x413	2x148
ENGINE	1	1	1	0	1x88	1x727
FLTPLAN	1	0	0	1	17x285	17x90
FLTSTAT	1	0	0	1	/	1x157
FREETEXT	2	0	0	2	1x377	1x377
FUEL	2	1	1	2	/	3x127
GATES	1	0	0	0	1x589	/
LOADSHT	0	0	1	0	2x913	2x93
MAINTPR	1	0	0	1	4x133	4x133
MAINTRT	2	0	0	2	5x88	5x127
NOTAM	2	0	0	2	3x265	2x134
POSRPT	6	1	1	17	1x88	1x338
WXGRAPH	5	0	0	7	6x4246	6x93
WXRT	60	8	14	88	/	1x103
WXTEXT	2	0	0	2	5x680	2x103

Tableau A- 5 : Caractéristiques des services AOC.



## Annexe B Performances de codage et de modulation du DVB-S2/RCS

Modulation	Codage	Efficacité Spectrale (Bits/Second/Hz)	Es/N0 Requis (dB)
QPSK	1/4	0,49	-2,35
	1/3	0,66	1,24
	2/5	0,79	-0,30
	1/2	0,99	1,00
	3/5	1,19	2,23
	2/3	1,32	3,10
	3/4	1,49	4,03
	4/5	1,59	4,68
	5/6	1,65	5,18
	8/9	1,77	6,20
9/10	1,79	6,42	
8PSK	3/5	1,78	5,50
	2/3	1,98	6,62
	3/4	2,23	7,91
	5/6	2,48	9,35
	8/9	2,65	10,69
	9/10	2,68	10,98
16APSK	2/3	2,64	8,97
	3/4	2,97	10,21
	4/5	3,17	11,03
	5/6	3,30	11,61
	8/9	3,52	12,89
	9/10	3,57	13,13
32APSK	3/4	3,70	12,73
	4/5	3,95	13,64
	5/6	4,12	14,28
	8/9	4,40	15,69
	9/10	4,45	16,05

Tableau A- 6 : Performances de codage et de modulation du DVB-S2. [ETSI 302 307]

Modulation	Codage	Efficacité Spectrale (Bits/Second/Hz)	Eb/NO Requis (dB)	Es/NO Requis (dB)
BPSK	1/3	0,33	2,9	-1,5
	2/5	0,40	3,1	-0,5
	1/2	0,50	3,5	1,0
	2/3	0,67	4,4	3,3
	3/4	0,75	5,2	4,7
	4/5	0,80	6	5,8
	6/7	0,86	6,7	6,9
QPSK	1/3	0,67	2,9	1,8
	2/5	0,8	3,1	2,9
	1/2	1,00	3,5	4,5
	2/3	1,33	4,4	6,9
	3/4	1,50	5,2	8,3
	4/5	1,60	6	9,5
	6/7	1,71	6,7	10,6
8PSK	1/3	1,00	4,34	5,2
	2/5	1,20	4,74	6,7
	1/2	1,50	5,54	8,7
	2/3	2,00	6,74	11,5
	3/4	2,25	7,74	13,2
	4/5	2,40	8,54	14,3
	6/7	2,57	9,84	16,0

Tableau A- 7 : Performances de codage et de modulation du DVB-RCS. [BOL 04]

## Annexe C Bilan de liaison ciel clair

Dans cette annexe, nous calculons le bilan de liaison ciel clair pour un terminal fixe (pire cas en Europe pour l'atténuation par la pluie). Ce calcul est basé sur une liaison de retour transparent DVB-RCS en utilisant la bande de fréquence Ka. Une marge statique de 2dB est ajoutée dans le bilan de liaison pour prendre en compte les effets imprévisibles (par exemple : la scintillation, etc.). Aucune technique FMT n'est introduite dans le calcul et les résultats obtenus dans le bilan de liaison constituent des cas nominaux.

Le calcul suit l'ordre de la liaison montante, descendante et globale. Pour le lien montant et descendant, la formule générale utilisée pour calculer le rapport signal sur bruit (C/No : Carrier on Noise) est la suivante:

$$\left(\frac{C}{No}\right) = PG \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \left(\frac{G}{T}\right) \left(\frac{1}{K}\right) \left(\frac{1}{L}\right)$$

Où

- **C/No** représente le rapport signal pour le lien montant : (C/No)Uplink ou descendant (C/No)Downlink
- **P** représente la puissance rayonnée par l'antenne isotrope en watts
- **G** est le gain d'antenne, il est obtenu en utilisant la formule

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$$

Où

**$\eta$**  est le rendement (où coefficient d'efficacité) d'antenne

**D** est le diamètre d'antenne

**$\lambda$**  est la longueur d'onde exprimée par  $c/f$ , c vitesse de la lumière

Le produit **PG** est la puissance isotrope rayonnée équivalente (exprimée en dBW) (PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente du satellite) ou EIRP en anglais

- $(\lambda/4\pi R)^2$  est la perte en espace libre due à la distance
- $G/T$  correspond au facteur de qualité de réception
- $K$  est la constante de Boltzmann dont  $1/K$  égale  $-228.6 \text{ dBWK}^{-1}\text{Hz}^{-1}$
- $L$  représente des pertes additionnelles (en ciel clair : pas de l'atténuation par la pluie)

Une fois  $(C/No)_{\text{Uplink}}$  et  $(C/No)_{\text{Downlink}}$  obtenus, le rapport signal sur bruit pour la liaison globale  $(C/No)_{\text{Total}}$  est déterminé par la formule suivante (hypothèse d'un satellite transparent) :

$$\left(\frac{C}{No}\right)_{\text{Total}} = \left(\frac{C}{No}\right)_{\text{Uplink}}^{-1} + \left(\frac{C}{No}\right)_{\text{Downlink}}^{-1}$$

Sachant que la relation entre le débit maximum possible de la connexion  $R_b$  à partir du rapport énergie sur bruit requis ( $E_b/No$ ) et le rapport signal sur bruit  $(C/No)_{\text{Total}}$  est montré par la formule suivante :

$$\left(\frac{C}{No}\right)_{\text{Total}} = \left(\frac{E_b}{No}\right) R_b$$

Le débit maximum dépend donc du choix de l' $E_b/No$  minimum.

Nous choisissons quatre débits crêtes (128 Kbps, 384 Kbps, 1 Mbps et 2 Mbps) pour comparer leurs  $E_b/No$  enfin de définir le cas nominal le plus approprié pour le système étudié.

## Caractéristiques du ST

Débit crête étudié (Kbps)	128.00	384.00	1024.00	2048.00
Facteur de Roll-off	0.35	0.35	0.35	0.35
Bande passante (MHz)	25	25	25	25
Fréquence (GHz)	29.70	29.70	29.70	29.70
Diamètre d'antenne (m)	0,8	0,8	0,8	0,8
Efficacité d'antenne	0,65	0,65	0,65	0,65
Puissance d'antenne (Watt)	1,0	1,0	1,0	1,0
Gain d'antenne (dBi)	46,04	46,04	46,04	46,04
PIRE (dBW)	45.00	45.00	45.00	45.00
Pertes de pointage (dB)	1.00	1.00	1.00	1.00
PIRE effective (dBW)	44.00	44.00	44.00	44.00

## Lien montant (Up-link)

Distance (km)	37606.58	37606.58	37606.58	37606.58
Perte de propagation (dB)	213.41	213.41	213.41	213.41
Atténuation atmosphérique (dB)	0.90	0.90	0.90	0.90
Atténuation par la pluie (dB)	0	0	0	0
Perte total (dB)	214.31	214.31	214.31	214.31
G/T du satellite	13.00	13.00	13.00	13.00
Constante de Boltzmann (dBW/K-Hz)	-228.60	-228.60	-228.60	-228.60
C/N <sub>0</sub> Uplink (dBHz)	71.29	71.29	71.29	71.29
E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> Up-link (dB)	20.22	15.45	11.19	8.18

## Caractéristique du Satellite

Fréquence (GHz)	18.50	18.50	18.50	18.50
PIRE (dBW)	50.00	50.00	50.00	50.00
OBO par porteuse (dB)	38.01	32.78	28.98	25.97
Total OBO (dB)	5.00	5.00	5.00	5.00
PIRE par porteuse (dBW)	11.76	16.99	20.79	23.80

## Lien descendant (Down-link)

Distance (m)	37606.58	37606.58	37606.58	37606.58
Perte propagation (dB)	209.30	209.30	209.30	209.30
Atténuation atmosphérique (dB)	0.60	0.60	0.60	0.60
Atténuation par la pluie (dB)	0.00	0.00	0.00	0.00
Perte total (dB)	209.90	209.90	209.90	209.90
Diamètre d'antenne - Gateway (m)	6.00	6.00	6.00	6.00
Efficacité d'antenne	0.55	0.55	0.55	0.55
Gain de l'antenne (dB)	58.71	58.71	58.71	58.71
Pertes de pointage (dB)	0.30	0.30	0.30	0.30
Pertes de couplage (dB)	0.50	0.50	0.50	0.50
G/T (dB/K)	35.12	35.12	35.12	35.12
constante de Boltzmann (dBW/K-Hz)	-228.60	-228.60	-228.60	-228.60
C/N <sub>0</sub> down-link (dBHz)	64.78	70.01	73.81	76.82
E <sub>b</sub> /N <sub>0</sub> down-link (dB)	13.71	14.17	13.71	13.71

## Liaison globale (Up-link+Down-link)

C/N <sub>0</sub> up-link (dBHz)	71.29	71.29	71.29	71.29
C/N <sub>0</sub> down-link (dBHz)	64.78	70.01	73.81	76.82
C/N <sub>0</sub> total (dBHz)	62.48	66.44	68.68	69.79
Perte d'implémentation (dB)	2.00	2.00	2.00	2.00
Dégradation BER (dB)	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>E<sub>b</sub>/N<sub>0</sub> total (dB)</b>	<b>8.41</b>	<b>7.60</b>	<b>5.57</b>	<b>3.68</b>

Tableau A- 8 : Bilan de liaison sur le lien retour DVB-RCS.



## Annexe D Le logiciel de simulation OPNET

### Simulation

La simulation des réseaux de télécommunication consiste à modéliser de façon conforme à la réalité le comportement des différents éléments constituant ces réseaux par des outils informatiques afin de récolter des données statistiques. Elle complète souvent la modélisation mathématique et permet de mieux étudier les détails de fonctionnement d'un système complexe.

### OPNET

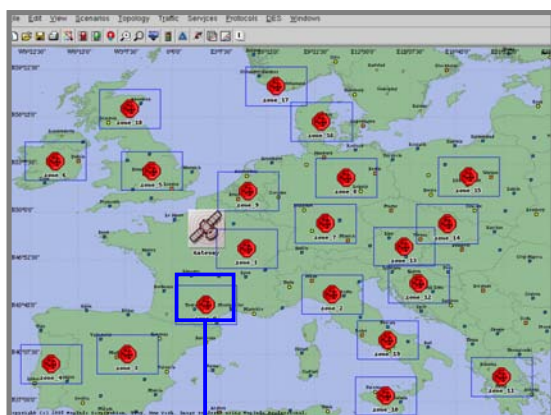
OPNET modeler, le premier produit et outil principal d'OPNET (OPTimum Network Engineering Tool), s'est actuellement imposé dans le monde de la recherche et développement pour la modélisation et la simulation de réseaux de télécommunication. OPNET Modeler est proposé par la société OPNET Technologies ([www.opnet.com](http://www.opnet.com)). Pour simplifier la présentation, nous l'appelons par la suite – OPNET.

OPNET est un logiciel basé sur une approche de modélisation orientée objet et une simulation à événement discrets. 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.

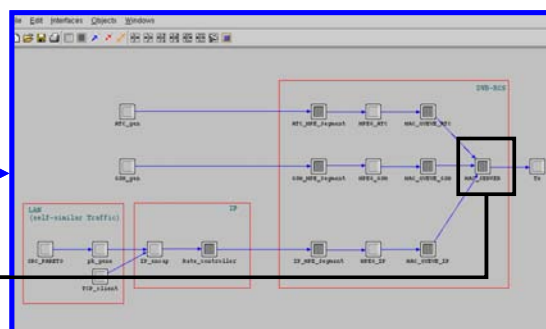
OPNET est basé sur des modélisations hiérarchiques, cette méthode correspond bien à la structure des réseaux actuels. Comme le montre la [Figure A- 1](#), Il dispose de trois niveaux hiérarchiques imbriqués : le plan de réseau, le plan de nœud et le plan de processus.



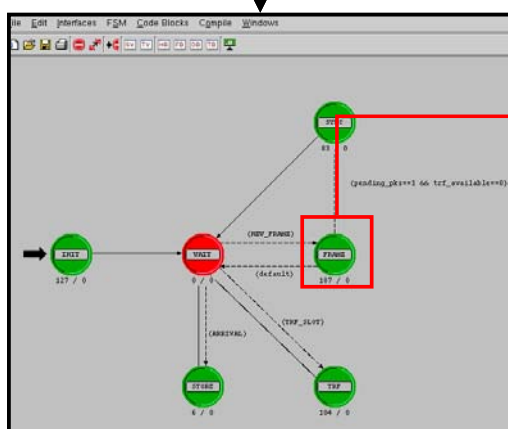
### Plan de réseau



### Plan de noeud



### Plan de processus



### Code

```

File Edit Options
1 |trf_allocated_cells=0;
2 |
3 |nb_cell_to_send_ATC=0;
4 |nb_cell_to_send_GSM=0;
5 |nb_cell_to_send_IP=0;
6 |nb_cell_to_send=0;
7 |
8 |canal_total=0;
9 |
10 |/* Schedule next frame interrupt */
11 |op_intrpt_schedule_self(op_sim_time()+frame_duration, -1);
12 |
13 |/* Check for queue sizes */
14 |total_queue_size=0;
15 |for (i=0; i<num_queues; i++)
16 |    total_queue_size+=queue_size[i][0];
17 |if (total_queue_size>0)
18 |    pending_pkts=1;
19 |else
20 |    pending_pkts=0;
21 |
22 |trf_allocated_cells=0;
23 |trf_available=0;
24 |
25 |if (total_queue_size>0)
26 |    {
27 |        /* Check for available TRF slots in TBTP */
28 |        index=(TBTP_index+TBTP_max_index-TBTP_index_offset)%TBTP_max_index;
29 |

```

Figure A- 1 : Modélisation hiérarchique dans l’environnement OPNET.

- Plan de réseau : 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 (routeurs, stations de travail, hub, etc.) qui sont appelés les nœuds et de liens entre eux. Les utilisateurs peuvent configurer le réseau en paramétrant les attributs associés aux nœuds et aux liens.

- Plan de nœud : 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.
- Plan de processus : permet de définir le rôle du module composant le nœud. Le comportement de module est spécifié au niveau de processus à l'aide de machine à états finis. Chaque état correspond 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 évènements 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 deuxième méthode.



## Annexe E Sources de trafic

Cette partie présente d'une manière détaillée les modèles de sources de trafic utilisés dans notre étude, conformément à ceux exposées dans le [chapitre II](#), trois sources de trafic sont étudiées : cockpit ATS/AOC, GSM à bord et Internet cabine.

### Annexe E.1 Source de trafic cockpit ATS/AOC

Comme le montre dans la [Figure A- 2](#), nous utilisons quatre modules différents pour décrire la source de trafic cockpit. Les modules à gauche génèrent le trafic des services ATS/AOC durant les phases TMA et ENR. Les modules à droite sont dédiés au trafic du domaine ORP. Cependant, ces quatre modules ne se sont pas exécutés en même temps, les activations des modules dépendent du type de trafic auquel nous nous intéressons : services ATS ou AOC ; domaine TMA/ENR ou ORP.



Figure A- 2 : Vue globale du modèle de source de trafic cockpit.

## Description des modules

- Les modules 'ATS\_TMA/ENR\_gen' et 'AOC\_TMA/ENR\_gen'

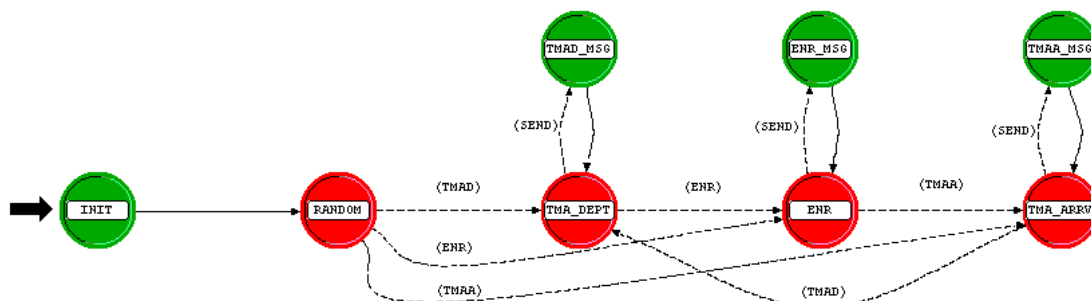


Figure A- 3 : Modèle de source : trafic cockpit (domaine TMA&ENR).

Le trafic généré par ces deux modules représente l'utilisation des services ATS/AOC dans les domaines opérationnels TMA et ENR. Les mécanismes de ces deux modules sont identiques et sont montrés par la Figure A- 3.

L'état '*INIT*' permet d'initialiser des différentes variables nécessaires au fonctionnement du module.

L'état '*RANDOM*' permet de choisir au hasard l'état (domaine) initial parmi les états '*TMA\_DEPT*', '*ENR*' et '*TMA\_ARRV*', c'est-à-dire, pour chaque avion, l'état de départ pour un instant donné est aléatoire.

Les états '*TMA\_DEPT*', '*ENR*' et '*TMA\_ARRV*' correspondent aux domaines opérationnels définis dans le COCR (départ TMA, ENR et arrivée TMA). Ces trois états ont des fonctionnements similaires. Un compteur de durée (Timer) est associé à chaque domaine, une fois la durée expirée, l'avion passe au prochain état suivant l'ordre : '*TMA\_DEPT*' → '*ENR*' → '*TMA\_ARRV*'; plusieurs services ATS (pour le module '*ATS\_TMA/ENR\_gen*') ou AOC (pour le module '*AOC\_TMA/ENR\_gen*') sont définis à chaque état. Selon une fréquence d'utilisation qui lui est associée, chaque service est activé en envoyant des interruptions uniformes (portent des informations comme le nombre et la taille de message et la classe de service) à l'état correspondant ('*TMRD\_MSG*' ou '*ENR\_MSG*' ou '*TMAA\_MSG*') pour la génération des messages.

Les états '*TMAD\_MSG*', '*ENR\_MSG*' et '*TMAA\_MSG*' sont déclenchés lors de la réception de l'interruption envoyée par l'état '*TMA\_DEPT*', '*ENR*' et '*TMA\_ARRIV*'. Basés sur les informations associées à cette interruption, les messages sont enfin générés.

- Les modules '*ATS\_ORP\_gen*' et '*AOC\_ORP\_gen*'

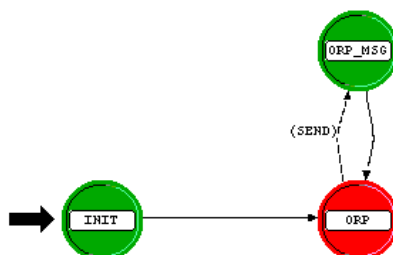


Figure A- 4 : Modèle de source : trafic cockpit (domaine ORP).

Ces deux modules permettent d'étudier indépendamment le trafic du domaine ORP. L'ORP peut être considéré comme un domaine 'particulier', car il s'agit de secteurs géographiques à l'extérieur de l'espace aérien domestique et ne constituent pas une phase indispensable pour tous les vols. En outre, puisque les exigences des services ORP ( $TT_{95}$  : 26,5 s) sont beaucoup moins restrictives par rapport aux services TMA/ENR ( $TT_{95}$  : 3.8 s) nous utilisons un modèle distinct qui désigne uniquement le trafic de services ORP.

Le fonctionnement des modèles '*ATS\_ORP\_gen*' et '*AOC\_ORP\_gen*' est décrit dans la **Figure A- 4**. Après l'initialisation des variables par l'état '*INIT*', l'état '*ORP*' permet d'activer plusieurs services ORP en lançant des interruptions à l'état correspondant '*ORP\_MAG*' qui est chargé de la génération des messages.

## Annexe E.2 Source de trafic téléphonies mobile à bord

Dans la [section II.2.1](#), nous avons étudié deux approches pour modéliser la source de trafic GSM : le modèle N-sources ON/OFF et la source agrégée. Dans la suite de cette annexe, nous présentons la modélisation de ces deux sources différentes.

### Annexe E.2.1 Modèle N-sources ON/OFF

Le modèle N-sources ON/OFF consiste à représenter plusieurs connexions phonie, c'est-à-dire, à décrire l'agrégation de sources ON/OFF selon un nombre d'utilisateurs. Comme exposé dans la [Figure A- 5](#), ce modèle est constitué de deux modules hiérarchiques : 'GSM\_gen\_père' et 'GSM\_gen\_fils'. Le module 'GSM\_gen\_père' (a) a une mission relativement simple qui crée des processus fils (le nombre de fils correspond au nombre d'utilisateurs) et nous ne détaillons dans la suite que le processus fils – 'GSM\_gen\_fils'.

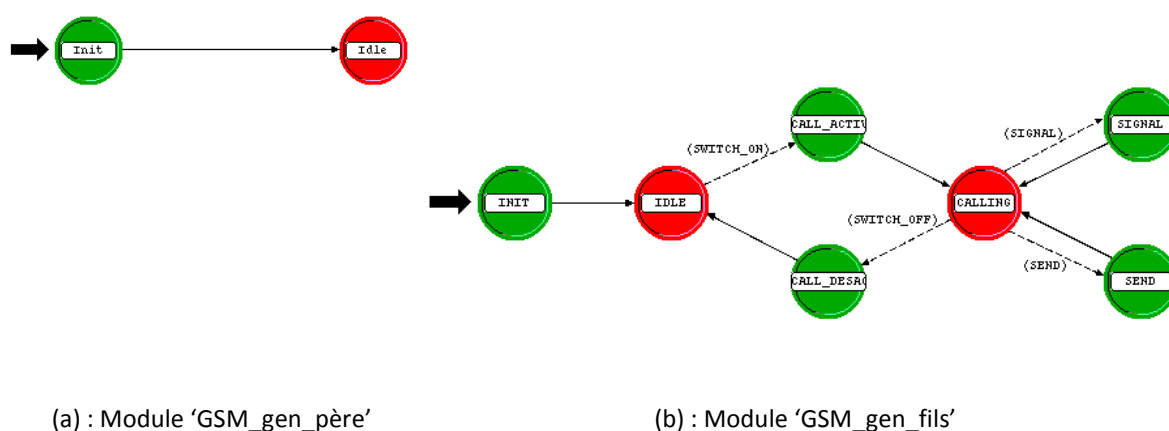


Figure A- 5 : Modèle de source : trafic GSM (N-sources ON/OFF).

- Description du module 'GSM\_gen\_fils'

Le fonctionnement du module 'GSM\_gen\_fils' est décrit par le graphe à état présenté dans (b). Ce module est constitué de 7 états essentiels :

L'état 'INIT' permet d'initialiser des variables et gérer l'interruption pour produire le premier appel. Nous supposons que dans un premier temps, tous les utilisateurs



commencent par l'état '*IDLE*', c'est-à-dire qu'aucun appel n'est activé en début. Le temps d'arrivée du premier appel est tiré aléatoirement entre 0 et le temps maximum de la durée *IDLE* (nous supposons 60 minutes).

L'état '*IDLE*' a une fonction tout simple qui attend l'activation d'un appel.

Les états '*CALL\_ACTIVE*' et '*CALL\_DEACTIVE*' permettent de gérer les périodes activé/désactivé pour un appel, les durées de ces périodes suivent une loi exponentielle décroissante de moyenne 3 minutes (pour '*CALL\_ACTIVE*') et 60 minutes (pour '*CALL\_DEACTIVE*').

L'état '*CALLING*' représente la voix phonie d'un appel qui est basée sur le modèle le plus populaire – ON/OFF. Cet état est 'non forcé', c'est-à-dire que dans l'état '*CALLING*', le processus exécute une partie de son code d'entrée (Enter Execs) et ensuite s'interrompt pour passer le relais au noyau de simulation ou à un autre module. Il redevient actif lorsqu'il est réveillé par des nouveaux événements.

L'état '*SIGNAL*' permet d'envoyer et gérer les interruptions pour définir les périodes ON/OFF. Il existe deux types d'interruption dans cet état. Le premier type gère la commutation entre ON et OFF : les temps passés dans les périodes ON et OFF suivent une loi exponentielle décroissante de moyenne respective 352 ms et 650 ms. Le deuxième est chargé d'activer l'état '*SEND*' pour générer des paquets correspondants.

L'état '*SEND*' est déclenché sur réception de l'interruption pilotée par '*SIGNAL*' et permet de générer des paquets avec un débit constant selon la période qui lui est associée (un paquet de taille 40 octets est généré toute les 20 ms pour la période ON et toutes les 480 ms pour la période OFF).

### **Annexe E.2.2 Modèle agrégé**

Par rapport au modèle N-sources ON/OFF, le modèle agrégé est beaucoup plus simple. Ce modèle est basé sur la trace générée par le modèle N-sources ON/OFF. Il est nécessaire de tenir compte en début de simulation de la période de démarrage durant laquelle le système n'est pas encore dans un état stationnaire. La source agrégée est donc basée sur la trace au-delà de cette période de démarrage (nous avons choisi une période assez longue comme la durée de démarrage : 1 heure). Cette trace enregistre le nombre de paquets générés toutes les 20 ms. Nous utilisons

ensuite un programme écrit en C d'analyser les données de la trace ( $1.62 \times 10^6$  sont analysées) et calculer la matrice des probabilités de transition. Basé sur cette matrice, une source agrégée (montrée par la [Figure A- 6](#)) est enfin modélisée pour générer les trames TRAU.

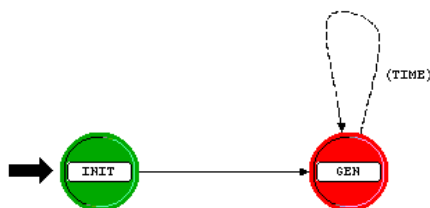


Figure A- 6 : Modèle de source : trafic GSM (MMPP).

- Description du module '*GSM\_gen\_MMPP*'

Le module est constitué de deux états :

L'état '*INIT*' permet d'initialiser les variables nécessaires pour le fonctionnement du processus. Cet état permet aussi de lire le fichier de la matrice des probabilités de transition (engendré par un programme écrit en C) et enfin planifier la première interruption pour générer les paquets.

L'état '*GEN*' est déclenché toute les 20 ms (l'horloge de BTS/Node B). A chaque déclenchement, une probabilité est générée aléatoirement entre 0 et 1. Selon cette probabilité et le nombre des paquets générés précédemment, le nombre des paquets à générer est déterminé en parcourant la matrice des probabilités de transition. D'après ce nombre, les paquets correspondants sont enfin produits.

### Annexe E.3 Modèle de source Internet embarqué

Nous proposons dans la [partie II.3.3](#), une source « greedy » pour décrire le trafic Internet, cette source est raffinée par plusieurs connexions TCP greedy. Pour chaque connexion, nous implémentons l'algorithme TCP - Reno. Nous supposons qu'il y a toujours suffisamment de paquets prêts à être envoyés et à tout moment, la quantité de paquets envoyés dans le réseau sans avoir été acquittés est égale à la taille de la fenêtre cwnd.

#### Description des modules

TCP fonctionne en mode connecté entre émetteur et récepteur (client/serveur). Du côté émetteurs, un module « père » qui s'appelle *'TCP\_client\_mgr'* est chargé de créer et gérer des processus fils *'TCP\_greedy\_client'*. Chaque processus fils (émetteur) est identifié par un numéro de port qui lui est attribué en début de la connexion et cette connexion reste ouverte tout au long de la vie de ce processus.

Le même mécanisme du côté récepteur, un module père *'TCP\_server\_mgr'* dont la tâche est de créer des processus fils *'TCP\_greedy\_server'* sur les demandes de connexion par des émetteurs ; il a aussi pour rôle de trier les segments qu'il a reçus et les distribuer aux différents ports destination (serveurs) correspondants.

- Le module *'TCP\_greedy\_client'*

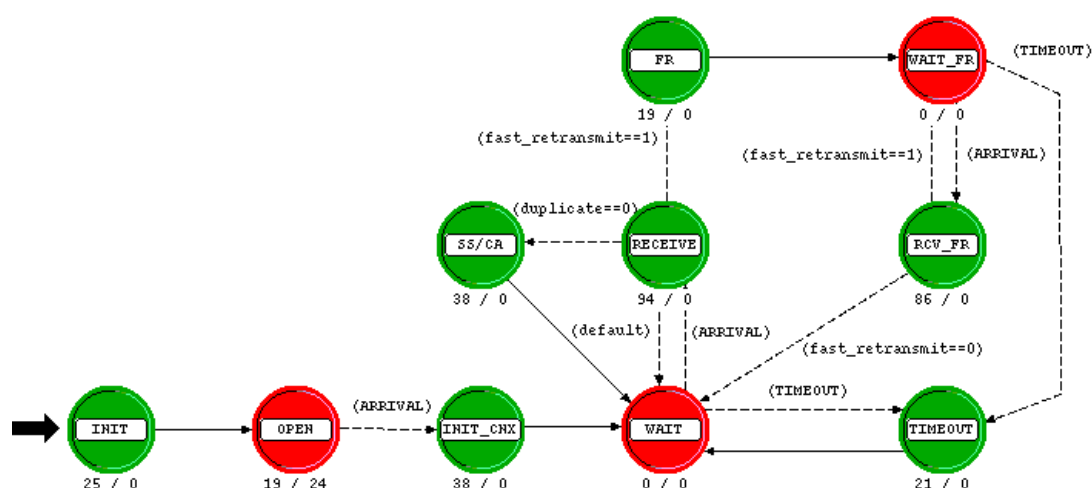


Figure A- 7 : Module *'TCP\_greedy\_client'*.

Le fonctionnement du module *'TCP\_greedy\_client'* est décrit dans [Figure A- 7](#). Il est basé sur 5 algorithmes essentiels qui correspondent au protocole Reno.

L'état *'INIT'* permet l'initialisation des différentes variables nécessaire au fonctionnement du module et l'identification du processus par le numéro de port.

L'état non forcé *'OPEN'* correspond à l'ouverture de la connexion TCP. Il envoie tout à bord le premier segment de synchronisation (SYN) à la destination (serveur). Ensuite il s'interrompt pour passer le relais au noyau de simulation et redevient actif lorsqu'il reçoit l'accusé de réception (ACK) avec la requête de synchronisation (SYN) de la part du serveur (interruption *'ARRIVAL'*). Avant de passer à l'état suivant *'INIT\_CNX'*, il répond au serveur par un ACK et à partir de là, la connexion est établie.

L'état *'INIT\_CNX'* permet d'initialiser la connexion établie en définissant les différents paramètres montrés dans le [Tableau A- 9 \[RFC 2581\] \[RFC 2988\]](#), et de commencer ensuite à envoyer le premier segment de données.

SMSS (Sender Maximum Segment Size) (octet)	1500
RMSS (Receiver Maximum Segment Size) (octet)	1500
RWND (Receiver Window) (octet)	$2^{16}$
Initial ssthresh (octet)	$2^{14}$
SRTT (Smooth Round Trip Time) (second)	10
A	1/8
B	1/4
Initial RTO (second)	20

Tableau A- 9 : Initialisation des paramètres TCP.

L'état non forcé *'WAIT'* correspond à un état d'attente d'un événement qui peut être de 2 types. L'événement *'ARRIVAL'* représente à l'arrivée d'un acquittement (ACK) de la part du serveur. L'événement *'TIMEOUT'* est déclenché une fois le délai de temporisation associée à chaque envoi est expiré.

Lorsque l'émetteur reçoit un ACK du serveur, il entre dans l'état *'RECEIVE'*, si l'émetteur reçoit 3 duplications du ACK, l'événement *'fast\_retransmit'* est déclenché, il passe à l'état *'FR'*; sinon il calcule la nouvelle valeur de RTO d'après l'algorithme Jacobson [\[JAC 88\]](#) montré ci-dessous et passe à l'état *'SS/CA'*.

$Err = RTT - SRTT$	SRTT : RTT lissé
$SRTT = SRTT + g \times Err$	Err : différence entre SRTT et nouvelle mesure
$D = D + h \times ( Err  - D)$	D : écart moyen du RTT
$RTO = SRTT + 4 \times D$	g : accroissement de la moyenne établie à 1/8 h : accroissement de la déviation établie à 1/4

L'état 'SS/CA' est chargé d'utiliser les différents algorithmes définis en fonction de la fenêtre de congestion (cwnd) et du seuil de slow-start (ssthresh). Si cwnd est moindre que ssthresh, slow-start est utilisé et cwnd croît exponentiellement. Par contre, si cwnd est plus grand ou égal à ssthresh l'algorithme congestion avoidance (CA) est utilisé. Dans les deux cas, les nouveaux segments sont envoyés et la temporisation est réenclenchée.

Le module passe à l'état 'FR', quand l'événement *'fast\_retransmit'* est déclenché. L'émetteur met ssthresh à la moitié de cwnd, réduit cwnd de moitié plus trois fois la taille du MSS et retransmet le dernier segment non acquitté, il ensuite passe à l'état non forcé 'IDLE' qui est en attente d'événement.

L'évènement 'ARRIVAL' qui représente l'arrivée d'un ACK permet de sortir de l'état 'IDLE'. Si l'ACK reçu est un acquittement dupliqué, l'émetteur incrémente cwnd d'un segment et transmet un nouveau segment si cette nouvelle cwnd le permet (Fast Recovery) ; si l'ACK concerne un nouvel acquittement (non dupliqué), on sort de la phase FR-FR en mettant *'fast\_retransmit'* à 0.

Lorsque le Timer RTO est expiré (quelque soit son état : 'WAIT' pour la phase SS ou CA, 'IDLE' pour la phase FR-FR), TCP passe à l'état 'TIMEOUT'. Dans cette phase, TCP réduit ssthresh à la moitié du cwnd courant et réduit cwnd à la taille d'un segment.

- Le module 'TCP\_greedy\_server'

Le rôle du serveur est relativement simple par rapport à celui de l'émetteur (voir [Figure A- 8](#)).

L'état 'INIT' permet d'initialiser les différentes variables nécessaires au fonctionnement du module, ensuite le serveur passe à l'état non forcé 'IDLE' qui correspond à un état d'attente d'un événement qui peut être de trois types.

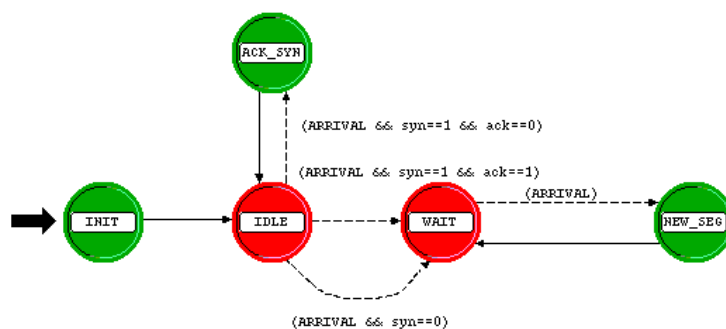


Figure A- 8 : Module 'TCP\_greedy\_server'.

Le premier type d'événement (*ARRIVAL && syn == 1 && ack == 0*) est déclenché lorsque la destination reçoit le premier segment de synchronisation (SYN) pour la demande de connexion. Dans ce cas, TCP tombe dans l'état 'ACK\_SYN' et envoie en retour un segment accusé de réception (ACK) avec la requête de synchronisation (SYN) et revient à l'état 'IDLE'.

Le deuxième type d'événement (*ARRIVAL && syn == 1 && ack == 1*) est déclenché à l'arrivée de ACK de la part du émetteur pour répondre la requête de synchronisation SYN.

Le troisième type d'événement (*ARRIVAL && syn == 0*) correspond à la réception d'un premier segment de donnée envoyé par l'émetteur lors de la connexion établie.

TCP passe à l'état non forcé 'WAIT' quels que soient les deux derniers types d'événement déclenchés. Il attend donc l'événement 'ARRIVAL' qui correspond à l'arrivée d'un segment. L'état 'NEW\_SEG' permet d'analyser le numéro de séquence du segment reçu et d'envoyer l'acquittement correspondant ACK à l'émetteur. Les ACK sont générés suivant la méthode introduite dans [\[RFC 2581\]](#).

## Annexe F Modèles de simulation

Dans cette partie, nous donnons une présentation détaillée sur le modèle et les méthodes utilisées dans le corps de cette thèse.

Comme illustré par la [Figure A- 9](#), le modèle du réseau retenu dans notre étude est basé sur deux types de nœuds :

- Terminal satellite (plusieurs terminaux sont regroupés dans une même zone géographique)
- GW (représente une combinaison du NCC et Gateway)

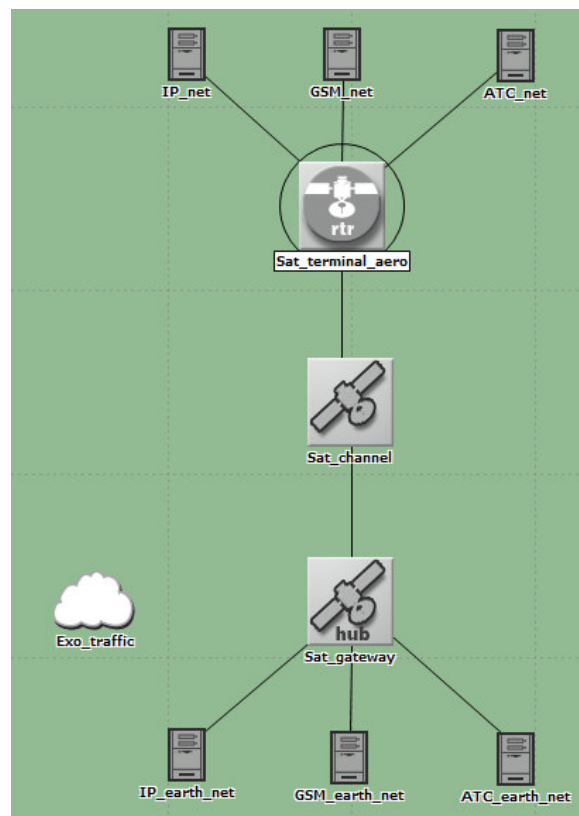


Figure A- 9 : Modèle du réseau.

## Annexe F.1 Terminal avion (ST)

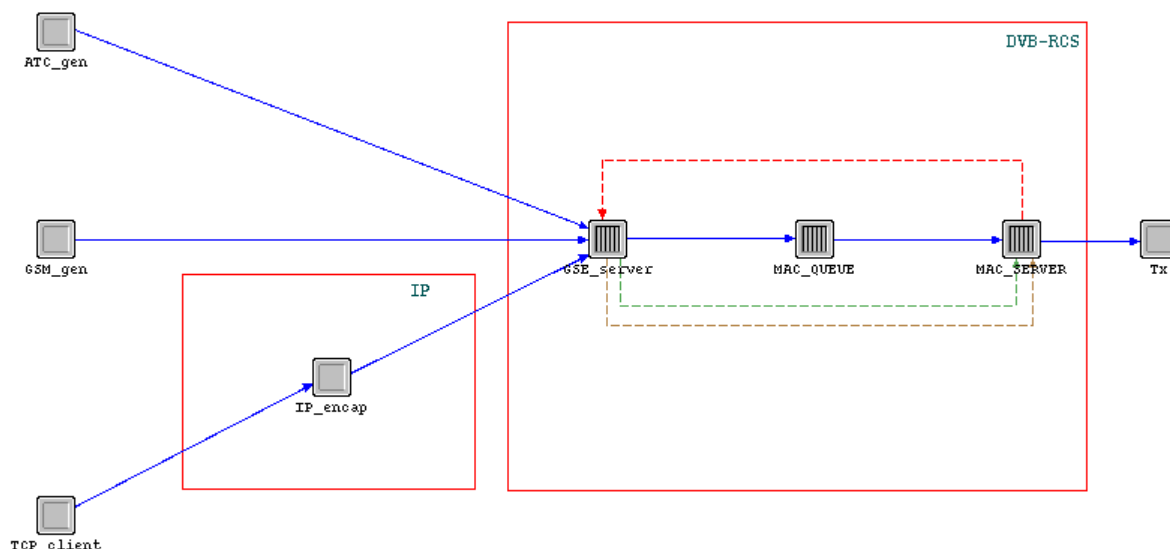


Figure A- 10 : Nœud terminal satellite d’avion (ST).

Comme montré par la [Figure A- 10](#), le nœud ST est constitué de 8 modules représentant une simplification du terminal avion. Cette simplification nous permet de nous concentrer sur les études de performances du réseau d’accès DVB-RCS sans entrer dans les détails des architectures du réseau (ATM, GSM, etc.).

- Les modules '*ATC\_gen*', '*GSM\_gen*' et '*TCP\_client*' sont conformes à ceux présentés dans l'ANNEXE E du mémoire qui représente les sources de trafic pour les services étudiés.
- Le module '*IP\_encap*' a un rôle relativement simple dans ce modèle simplifié. Il est chargé d'encapsuler les segments TCP dans les paquets IP et ensuite les acheminer à la couche suivante.
- Le module '*GSE\_server*' est un point essentiel pour cette étude, il représente la couche d'adaptation qui est en charge de la gestion de la qualité de service, l'encapsulation et les requêtes de capacité. Le diagramme d'état de transition de ce modèle est montré par la [Figure A- 11](#).



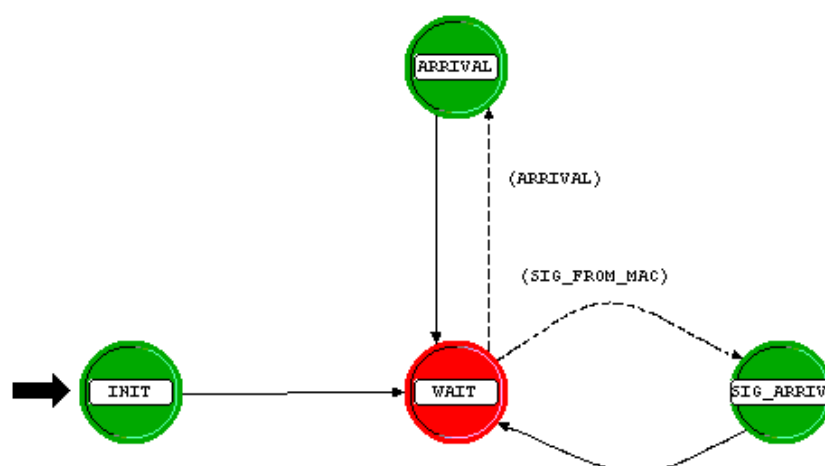


Figure A- 11 : Module 'GSE\_server'.

L'état '*INIT*' permet l'initialisation des différentes variables nécessaires au fonctionnement du module.

L'état non forcé '*WAIT*' correspond à un état d'attente d'un événement qui peut être de 2 types : l'événement '*ARRIVAL*' représente l'arrivée d'un/ou plusieurs paquets des modules source ; l'événement '*SIG\_FROM\_MAC*' correspond à la signalisation envoyée depuis la couche MAC.

Lorsque GSE reçoit un/ou plusieurs paquets, il passe de l'état '*WAIT*' à l'état '*ARRIVAL*'. Les paquets reçus sont placés dans les files d'attente correspondantes avant d'être encapsulés en paquets MPEG. L'algorithme RED est appliqué dans la file IP. Basées sur les mesures (débit moyen, la taille de file), les requêtes de capacité sont calculées pour chaque type de trafic et envoyées ensuite au '*MAC\_SERVER*' par une signalisation Cross-Layer. A chaque paquet arrivant à la couche d'adaptation, s'il s'agit d'un paquet ATS/AOC ou IP, une requête de capacité de type AVBDC est calculée basée sur le nombre de paquets en attente (dans les files ATS/AOC et IP) ; s'il s'agit d'une trame TRAU du GSM, une mesure de débit moyen d'arrivée de trame TRAU est mise à jour et la requête de capacité de type RBDC est alors calculée.

L'encapsulation se fait quand l'événement '*SIG\_FROM\_MAC*' est déclenché. Cet événement correspond à une allocation de ressource TBTP reçu au niveau MAC du ST et informé par une signalisation Cross-Layer à la couche GSE. GSE passe ensuite à l'état

'SIG\_ARRIVE'. Conformément au protocole d'encapsulation GSE et à la norme DVB-RCS, les unités de données de protocole (PDU : Protocol Data Unit) y compris les datagrammes IP, les trames TRAU ou les données de services ATS/AOC sont encapsulés/fragmentés dans un ou plusieurs paquets MPEG de taille fixe de 188 octets selon la capacité allouée au ST (exprimée en nombre de paquets MPEG). Suivant la ressource allouée, les trames MPEG encapsulés sont ensuite envoyés à la couche d'accès.

- Le module 'MAC\_QUEUE' est en charge de la réception des paquets MPEG envoyés par GSE et de la mise en attente dans une file d'attente.
- Le module 'MAC\_serveur' joue le rôle essentiel de recevoir le résultat d'allocation de ressource (TBTP) et transmettre des données et des requêtes de capacité via le lien satellite. Le fonctionnement du 'MAC\_serveur' est décrit par le graphe à état présenté dans la [Figure A-12](#) :

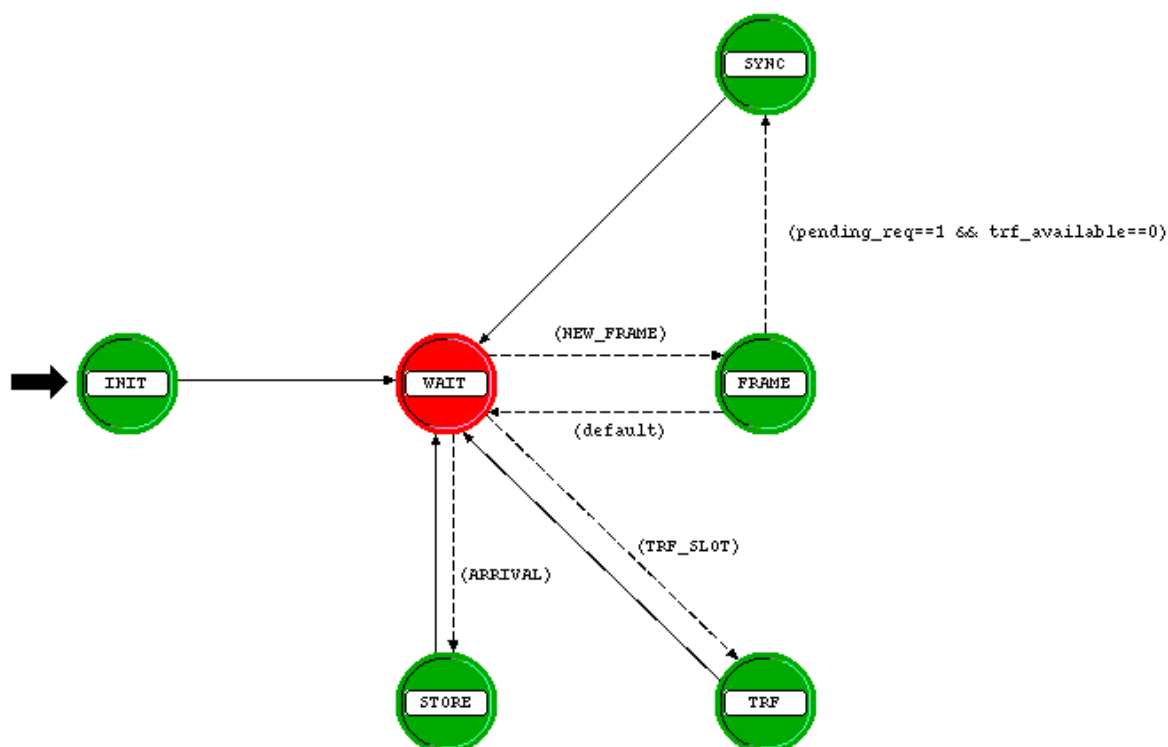


Figure A- 12 : Module 'MAC\_serveur'.

L'état *'INIT'* permet d'initialiser des différentes variables et de générer la première interruption pour recevoir le résultat de l'allocation de ressource. Ce résultat est envoyé de GW vers ST sous format TBTP toutes les 60ms (la durée d'une super-trame).

L'état *'FRAME'* est déclenché toutes les 60 ms. Il regarde tout d'abord le nombre de slots TRF alloués à ST et indiqué par la signalisation TBTP ; ensuite, selon cette capacité allouée il passe soit à l'état *'SYNC'* pour la synchronisation (quand il y a des données à envoyer et pas de capacité allouée), soit à l'état *'TRF'* pour envoyer les données.

L'état *'SYNC'* permet du ST d'envoyer les requêtes de capacité par le mini-slot (burst SYNC). Ce burst SYNC contient la configuration du champ SAC (requêtes de capacité) et est envoyé à la GW par la signalisation TCT en mode contention avec les autres STs.

L'état *'TRF'* est chargé d'envoyer les slots TRF selon la capacité allouée par la GW. La requête de capacité est configurée dans le message SAC suivant l'ordre de priorité RBDC > VBDC. Le message SAC est donc envoyé à la GW par la méthode MPAF (MPEG Adaptation Field Method). Cette méthode utilise directement le champ d'adaptation d'en-tête de paquet MPEG pour transporter la signalisation SAC.

- Le module *'Tx'* représente une transmission physique via satellite, conformément aux caractéristiques du lien satellite, tous les paquets sont envoyés avec un délai de propagation de 250 ms.

## Annexe F.2 Gateway (NCC intégré)

Au niveau de la réception, un seul nœud, 'Gateway', permet les connexions entre plusieurs STs et les destinataires de services (rôle Gateway) et la gestion des ressources (rôle NCC). Le comportement du Gateway est décrit par la **Figure A- 13** :

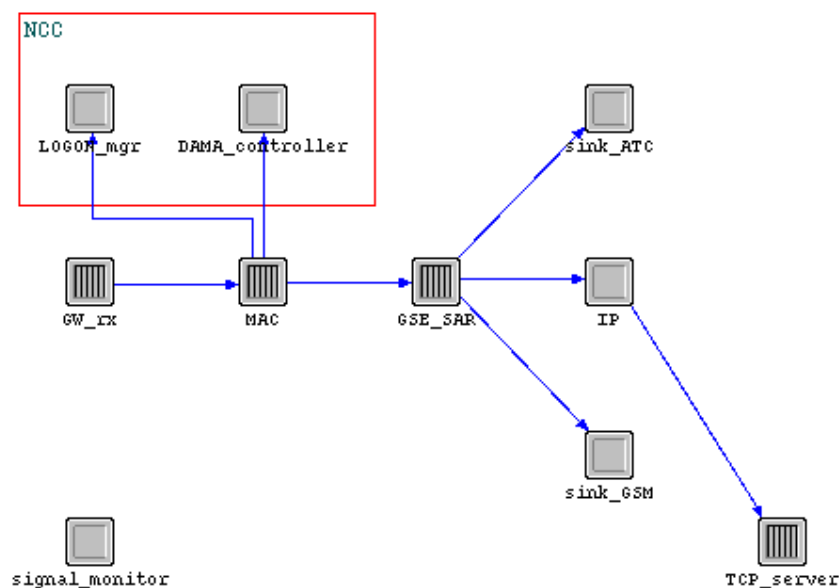


Figure A- 13 : Nœud Gateway (NCC intégré).

- Le module indépendant '*signal\_monitor*' est chargé d'importer les résultats de simulations extérieures. Ces séries temporelles synthétisées sont produites par la simulation de la boucle de décision FMT suivant les conditions de propagation. Au point de vue du Gateway, à chaque intervalle de temps, chaque ST correspond à un mode FMT spécifié (0 ~ 4).
- Le module '*GW\_rx*' s'occupe de la réception des paquets et de les envoyer au module '*MAC*'.
- Le module '*MAC*' permet d'analyser les différents bursts reçus est de les acheminer à la destination correspondante. Les bursts '*CSC*' constituent les signalisations pour la procédure Logon et sont envoyés au module '*LOGON\_mgr*'. Les bursts '*SYNC*' ne contient que les messages '*SAC*' pour que les requêtes de capacité soient expédiées directement au module '*DAMA\_controller*' pour la répartition des ressources. Les bursts TRF contiennent les données et éventuellement les messages SAC ; les données sont transmises au module supérieur '*GSE\_SAR*' et les messages SAC sont envoyés au '*DAMA\_controller*'.

- Le module '*LOGON\_mgr*' permet le contrôle l'accès des STs au réseau satellite et fournit tous les paramètres de connexion associés au STs au moment du logon.
- Le module '*DAMA\_controller*' joue un rôle essentiel – gérer les ressources du réseau satellite. Le graphe à état sur le fonctionnement du '*DAMA\_controller*' est montré par la **Figure A- 14** :

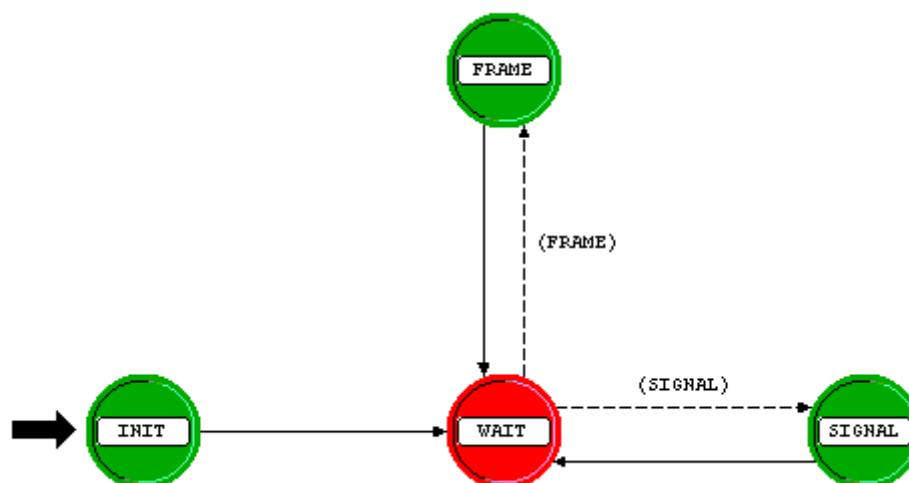


Figure A- 14 : Module '*DAMA\_controller*'.

L'état '*INIT*' permet d'initialiser les paramètres nécessaires au fonctionnement du module y compris les variables et les différentes tables pour les signalisations (FCT, TCT, TBTP, etc.). Cet état permet aussi de générer la première interruption '*FRAME*' pour la gestion des ressources.

Quand '*DAMA\_controller*' reçoit une signalisation envoyé par le ST (correspond à l'événement '*SIGNAL*'), il passe à l'état '*SIGNAL*'. Dans cet état, les requêtes de capacité pour chaque ST sont enregistrées et sont utilisées pour la répartition de la ressource.

Dans l'état '*FRAME*', la ressource est partagée entre plusieurs STs suivant l'ordre de priorité RBDC > VBDC. Le DAMA alloue d'abord les ressources aux ST qui demandent la capacité en mode RBDC (si la somme de demandes RBDC est supérieur que la capacité du lien satellite, la capacité est également répartie) ; ensuite les demandes VBDC sont traitées suivant la même politique.

- Le module '*GSE\_SAR*' permet de dé-multiplexer les données reçus et de les envoyer aux destinataires correspondants. Il permet de désencapsuler les paquets MPEG reçus et de les

segmenter (si le paquet encapsulé composé de plusieurs paquets PDUs) ou de les assembler (si le paquet encapsulé s'agit d'un/plusieurs fragments de paquets PDUs).

- Le module 'IP' permet de désencapsuler les datagrammes IP et d'envoyer les segments TCP au serveur TCP.
- Les modules 'sink\_ATC', 'sink\_GSM' et 'TCP\_serveur' représentent les puits pour les trois types de données reçues.