



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse
Discipline ou spécialité : Réseaux et Télécommunications

Présentée et soutenue par Emmanuel DUBOIS
Le 3 novembre 2008

Titre : Convergence dans les réseaux satellite

JURY

Pascal LORENZ	Professeur Université Haute-Alsace	Rapporteur
Walid DABBOUS	Directeur Recherche INRIA	Rapporteur
Fabrice VALOIS	Professeur Université Lyon, INRIA	Président
Cédric BAUDOIN	Ing. Recherche Thales Alenia Space	Membre, co-encadrant
Patrick GÉLARD	Ing. Recherche CNES	Invité
Thierry GAYRAUD	M.C Université Toulouse III, HDR	Membre
André-Luc BEYLOT	Professeur INP-ENSEEIH	Directeur de thèse
Emmanuel CHAPUT	M.C INP-ENSEEIH	Membre, co-encadrant

Ecole doctorale : Mathématiques Informatique et Télécommunications
Unité de recherche : IRIT
Directeur(s) de Thèse : André Luc Beylot

Remerciements

J'entame ces remerciements avec le soulagement d'avoir achevé et soutenu ma thèse. A la fin de cette période particulière, il convient de me retourner en arrière et de témoigner ma reconnaissance aux personnes qui m'ont soutenu pendant ce parcours. Ces remerciements marquent la fin de trois années de travail, en espérant que les contacts perdureront à cette étape doctorale avec de nombreuses personnes.

Tout d'abord, je remercie mes encadrants académiques André-Luc et Manu, qui n'ont d'académiques que le statut. Ils m'ont toujours soutenu du début à la fin et m'ont largement guidé dans mes choix d'orientation professionnel. Ils ont su me donner de précieux conseils pour avancer et ne pas abandonner dans les moments plus difficiles. Je les remercie énormément pour leur disponibilité et leur bonne humour ! Je n'oublierai jamais les bons moments passés en Corée, en Italie avec Manu, même si une conférence en chine avec eux aurait été encore mieux ! Je recommande à Manu de faire attention à ne pas manger trop de glaces pendant les conférences et André-Luc à ne pas finir comme le concierge de l'IRIT.

En second lieu, je remercie Cédric, encadrant industriel à Thales Alenia Space, pour son encadrement malgré un emploi du temps bien chargé. Il a toujours réussi à se dégager du temps, notamment pendant mes périodes à Thales Alenia Space qui furent à chaque fois efficace et déterminante pour l'avancement de la thèse. Je le remercie vraiment pour sa bonne humeur communicative qui contribue largement à la bonne ambiance de toute l'équipe de recherche de Thales. Je salue d'ailleurs Fabrice, Erwan, Mathieu, Katia, Zakariya et Isabelle pour leur accueil. La conférence ASMS'08 fut un très bon moment d'échanges en bonne compagnie.

S'il y a une structure à remercier, c'est bien le laboratoire TeSA. En effet, j'y ai passé la grande partie de ces trois ans, parfois la nuit et quelques week-ends. Je remercie l'ensemble des personnes pour l'ambiance sympathique autour des repas et de l'organisation du laboratoire : les secrétaires sans qui on ne pourrait rien faire : Marie-José, Sarah, Yamina ; les ingénieurs de TeSA : Will, David, Philippe, Hassan, Tayeb ; les autres doctorants : Emmanuel, Lucile, Ferdinand, Mariana, Xavier, Julien, Benjamin, Anchalee, Christophe, Tai. Je n'oublie pas l'incontournable Patrice et les longues conversations politiques et culturelles, sans oublier les doyens du laboratoire Francis et Bernard.

Le deuxième emplacement important de ma thèse fut incontestablement l'IRIT à côté de l'ENSEEIH, laboratoire de mes encadrants. Je salue toute l'équipe IRT et notamment Rahim et Alexandra que je remercie pour ces trois années d'échanges. Merci également à Corinne, Jean-Yves et Nathalie pour leur constante bonne humeur. J'ai également beaucoup apprécié tous les enseignements effectués à l'ENSEEIH et les personnes avec qui j'ai partagé cette expérience enrichissante de partage du savoir. Un spécial merci à Julou et Fred pour leur amitié et les nombreux restaurants découverts grâce à eux ! Les soirées ciné-resto et les jeux de rôles magnifiquement portés par Julien sont à chaque fois de très bons moments.

Je remercie les membres du jury de s'être déplacé pour juger de mon travail, notamment mon collègue actuel Patrick Gélard, le président du jury Fabrice Valois qui a répondu présent malgré une sollicitation tardive, Pascal Lorenz sans qui la thèse n'aurait pu être soutenue faute de rapporteur et Thierry Gayraud qui a eu de nombreuses interrogations intéressantes sur la thèse. Je remercie également Walid Dabbous d'avoir émis un avis favorable pour soutenir ma thèse.

Enfin, je remercie mes proches d'avoir eu à supporter ce travail de longue haleine de l'extérieur. J'ai été très touché qu'ils viennent nombreux à ma soutenance de thèse. Je profite de ces remerciements pour exprimer tout le bien que je pense d'eux au jour le jour et leur importance dans ma vie et dans mon cœur.

Table des matières

Remerciements	iii
Liste des acronymes	xiii
Introduction	1
1 Réseaux satellite GEO	3
1.1 Caractéristiques d'un lien satellite	5
1.1.1 LEO, MEO, GEO	5
1.1.2 Transparent/régénératif	6
1.1.3 Réseaux DVB	6
1.2 Voie aller DVB-S et DVB-S2	7
1.2.1 Vue générale	7
1.2.2 MPEG2	8
1.2.3 Signalisation PSI/SI	10
1.2.4 DVB-S et DVB-S2	11
1.2.5 Encapsulation de données	13
1.3 Voie retour DVB-RCS	14
1.3.1 Vue générale	14
1.3.2 Signalisation DVB-RCS	15
1.3.3 Étapes de fonctionnement de DVB-RCS	17
1.4 Évolution des satellites GEO	20
1.5 Conclusion	21
2 Les architectures de convergence	23
2.1 Panorama historique	24
2.1.1 Monde des opérateurs de télécommunications	24
2.1.2 Monde informatique	26
2.1.3 Monde opérateur vidéo	27
2.2 Convergence des communications	27
2.2.1 Définition de la convergence	27

2.2.2	Caractéristiques générales de convergence	29
2.2.2.1	Structure protocolaire	29
2.2.2.2	Simplicité	29
2.2.2.3	Topologie distribuée	30
2.2.2.4	Intéropérabilité	30
2.2.2.5	Interconnexion	31
2.2.2.6	Qualité de Service	31
2.2.2.7	Sécurité	31
2.2.2.8	Gestion	31
2.3	Solutions de convergence satellite	32
2.3.1	Convergence des architectures réseaux	32
2.3.1.1	Solution DVB	32
2.3.1.2	Solution ATM	35
2.3.1.3	Solution Ethernet	37
2.3.1.4	Solution tout IP	39
2.3.1.5	Solution MPLS - MultiProtocol Label Switching	41
2.3.2	Convergence fixe mobile	44
2.3.3	Convergence par les services	45
2.3.3.1	Approche DVB	46
2.3.3.2	Approche IP	46
2.3.3.3	Approche IMS	47
2.4	Conclusion	47
3	Solution MPLS : cas unidirectionnel	49
3.1	Architecture IP/MPLS générale	51
3.2	Télévision sur IP/MPLS par satellite unidirectionnel	52
3.2.1	Architecture de diffusion TV	52
3.2.1.1	Couches de service de télévision	54
3.2.1.2	Couches de convergence IP/MPLS	55
3.2.1.3	Couches d'accès satellite	57
3.2.2	Problématiques	57
3.2.2.1	Migration de la signalisation PSI/SI	58
3.2.2.2	Adressage du service télévisé	60
3.2.2.3	Confidentialité et sécurité des programmes	63
3.2.2.4	Synchronisation	63
3.2.2.5	Qualité de service et ordonnancement	64
3.2.3	Analyse du système	65
3.2.3.1	Migration depuis un système actuel	65
	Migration réseau :	65
	Migration des services :	66
3.2.3.2	Analyse quantitative	66

	Overhead :	66
	Signalisation :	67
	Services utilisateur :	67
3.3	Conclusion	68
4	Solution MPLS : cas bidirectionnel	69
4.1	Télévision sur IP/MPLS par satellite bidirectionnel	70
4.1.1	Problématiques liées à la voie retour	70
4.1.1.1	Organisation système	71
4.1.1.2	Organisation protocolaire issue de DVB-RCS	72
	Approche conservatrice de DVB-RCS :	73
	Approche d'intégration avec IP/MPLS :	73
4.1.2	Architecture IP/MPLS bidirectionnelle	77
4.1.2.1	Couches de communications satellites	77
4.1.2.2	Couches IP/MPLS	79
4.1.2.3	Service de télévision bidirectionnel	80
	Vote orienté fournisseur :	80
	Vote orienté Terminal :	81
4.1.3	Problématiques de l'architecture choisie	82
4.1.3.1	Adressage	83
	Identifiants IP/MPLS/GSE	83
	Identifiants DVB-RCS	83
4.1.3.2	Résolution d'adresse	84
4.1.3.3	Accès à la signalisation de la voie aller	84
4.1.3.4	Migration de la signalisation	85
4.1.3.5	Synchronisation	86
4.1.3.6	Sécurité et Confidentialité	86
4.1.3.7	Compatibilité unidirectionnelle/bidirectionnelle	88
4.2	Multi-services sur une architecture IP/MPLS satellite bidirectionnelle	88
4.2.1	Architecture satellite IP/MPLS triple play	89
4.2.2	Service de Téléphonie	91
4.3	Conclusion	92
5	Application au projet ULISS	95
5.1	Le projet ULISS	97
5.1.1	Organisation générale	98
5.1.2	Etapas de fonctionnement	100
5.2	Convergence IP/MPLS dans ULISS	103
5.2.1	Approche par encapsulation	103
5.2.2	Approche compatible DVB	104
5.2.3	Approche d'intégration avec les protocoles IP/MPLS	108

5.3 Conclusion et perspectives	110
Conclusion	111
Bibliographie	113

Liste des figures

1.1	Système DVB-S	7
1.2	Codage et multiplexage de programmes MPEG2	8
1.3	Format de la trame MPEG2-TS	10
1.4	Fonctionnement du système DVB-S2	12
1.5	En-tête GSE	14
1.6	Système DVB-RCS	15
1.7	Tramage MF-TDMA DVB-RCS	16
1.8	Fonctionnement de DVB-RCS	18
1.9	Architecture maillée type Amerhis	21
2.1	La convergence des réseaux par IP	28
2.2	Récapitulatif de l'architecture ATM	35
2.3	Architecture UETS	37
2.4	Entrée du réseau MPLS	41
2.5	Cœur du réseau MPLS	42
2.6	Sortie du réseau MPLS	42
2.7	Nomadisme et mobilité	44
3.1	Architecture IP/MPLS générale	51
3.2	Nouvelle architecture de diffusion vidéo	53
3.3	Description des étapes d'un transport de programmes télévisuels	61
3.4	Overhead en fonction du nombre de paquets MPEG2	66
4.1	Organisation système du satellite bidirectionnel envisagé	71
4.2	Approche conservatrice de DVB-RCS	74
4.3	Approche d'intégration avec IP/MPLS	75
4.4	Architecture du service de télévision sur une liaison satellite bidirectionnelle	78
4.5	Exemple de déroulement d'un service de télévision interactif orienté fournisseur	81

4.6	Exemple de déroulement d'un service de télévision interactif orienté terminal	82
4.7	Intégration de nouveaux services sur une architecture IP/MPLS	90
4.8	Session SIP de communication téléphonique VoIP	91
5.1	Vue d'ensemble du projet ULISS	96
5.2	Principe du Radio Burst Switching dans le projet ULISS	97
5.3	Organisation générale du système ULISS	98
5.4	Etapes de fonctionnement d'ULISS	102
5.5	Etapes de fonctionnement pour l'approche compatible de convergence .	107
5.6	Approche de convergence avec les protocoles IP/MPLS	109

Liste des tableaux

1.2	Signalisation SI de la voie retour	17
3.3	Correspondance avec la signalisation SI	58
3.5	Exemple de signalisation SDP pour le service télévisé	59
4.2	Correspondance des tables SI pour la voie retour	76
4.4	Évolution de la table TBTP	87
5.4	Couches protocolaires du système ULISS et leurs évolutions	105

Liste des acronymes

ACQ	ACQuisition.
ACM	Adaptive Coding & Modulation.
ATSC	Advanced Television Systems Committee.
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line.
ATM	Asynchronous Transfer Mode.
AAL	ATM Adaptation Layer.
AAL5	ATM Adaptation Layer 5.
BBFRAME	BaseBand Frame.
BCC	Beam Control Centre.
BOOTP	Bootstrap Protocol.
BAT	Bouquet Association Table.
B-ISDN	Broadband ISDN.
BHP	Burst Header Packet.
BTP	Burst Time Plan.
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales.
CBQ	Class Based Queuing.
CoS	Class of Service.
CSA	Common Scrambling Algorithm.
CSC	Common Signalling Channel.
CAT	Conditionnal Access Table.
CAC	Connection Admission Control.
C2P	Connection Control Protocol.
CR-LDP	ConstRaint based LDP.
CMT	Correction Message Table.
CSCT	CSC Table.

DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification.
DULM	Data Unit Labelling Method.
DAMA	Demand Assignment Multiple Access.
DRM	Digital Rights Management.
DVB	Digital Video Broadcast.
DVB-C	Digital Video Broadcast - Cable.
DVB-RCS	Digital Video Broadcast - Return Channel Satellite.
DVB-S	Digital Video Broadcast - Satellite.
DVB-T	Digital Video Broadcast - Terrestrial.
DVB-S2	Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation.
DLS	Down Link Signaling.
DVB-CA	DVB - Conditional Access.
DVB-H	DVB - Handheld.
DVB-SH	DVB - Satellite services to Handhelds.
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol.
EPG	Electronic Program Guide.
ES	Elementary Stream.
ESA	European Space Agency.
ETSI	European Telecommunications Standards Institute.
EIT	Event Information Table.
FMIP	Fast handover for Mobile IP.
FIFO	First In First Out.
FECFRAME	Forward Error Correction Frame.
FLS	Forward Link Signaling.
FEC	Forwarding Equivalence Class.
FCT	Frame Composition Table.
GMPLS	Generalized MPLS.
GSE	Generic Stream Encapsulation.
GEO	Geostationary Earth Orbit.
GSM	Global System for Mobile communications.
HTTP	HyperText Transport Protocol.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting.
ISDN	Integrated Services Digital Network.
ISO	International Organization for Standardization.
ITU	International Telecommunication Union.
ICMP	Internet Control Message Protocol.
IETF	Internet Engineering Task Force.
IGMP	Internet Group Management Protocol.
IP	Internet Protocol.
IPv4	IP - version 4.
IPv6	IP - version 6.
IMS	IP Multimedia Subsystem.
IPsec	IP Security.
IPTV	IP Television.
INT	IP/MAC Notification Table.
ISDB-S	ISDB - Satellite.
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization sector.
LDP	Label Distribution Protocol.
LER	Label Edge Routeur.
LIB	Label Information Base.
LSP	Label Switch Path.
LSR	Label Switch Router.
LLC	Link Layer Control.
LMP	Link Management Protocol.
LAN	Local Area Network.
LDPC	Low-Density Parity-Check.
LEO	Low Earth orbit.
MIB	Management Information Base.
MAC	Media Access Control.
MEO	Medium Earth orbit.
MPEG2	Moving Pictures Expert Group - Second Generation.
MPEG2-TS	MPEG2 - Transport Stream.
MPE	Multi-Protocol Encapsulation.

MPLS	Multi-Protocol Label Switching.
MHP	Multimedia Home Platform.
MF-TDMA	Multiple Frequency Time Division Multiple Access.
NAT	Network Address Translation.
NCR	Network Clock Reference.
NCC	Network Control Centre.
NIT	Network Information Table.
NTP	Network Time Protocol.
OBP	On-Board Processing.
OSI	Open Systems Interconnection.
OBS	Optical Burst Switching.
PES	Packet Elementary Stream.
PID	Packet IDentifier.
PLFRAME	Physical Level Frame.
PAT	Program association Table.
PCR	Program Clock Reference.
PMT	Program Map Table.
PSI	Program Specific Information.
PSTN	Public Switched Telephone Network.
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying.
QoS	Quality of Service.
RBS	Radio Burst Switching.
RMT	RCS Map Table.
RTP	Real-Time Transport Protocol.
RFC	Request For Comments.
RSVP	Resource ReSerVation Protocol.
RCST	Return Channel Satellite Terminal.
ROHC	RObust Header Compression.
RSVP-TE	RSVP - Traffic Engineering.
RST	Running Status Table.
RTC	Réseau Téléphonique Commuté.
RNIS	Réseaux Numériques à Intégration de Services.

SACT	SAC Table.
SAC	Satellite Access Control.
SNC	Satellite Network Controller.
SPT	Satellite Position Table.
SRTP	Secure RTP.
SDT	Service Description Table.
SI	Service Information.
SAP	Session Announcement Protocol.
SDP	Session Description Protocol.
SIP	Session Initiation Protocol.
SMTP	Simple Mail Transport Protocol.
SNMP	Simple Network Management Protocol.
ST	Stuffing Tables.
SCT	Superframe Composition Table.
SYNC	SYNChronisation.
SDH	Synchronous Digital Hierarchy.
TBTP	Terminal Burst Time Table.
TIM	Terminal Information Message.
3GPP	Third Generation Partnership Project.
TDT	Time and Data Table.
TDMA	Time Division Multiple Access.
TOT	Time Offset Table.
TCT	Time-slot Composition Table.
TTL	Time To Live.
TRF	Traffic.
TCP	Transport Control Protocol.
TDL	Transport Data Link.
T-MPLS	Transport MPLS.
TSDT	Transport Stream Description Table.
TOS	Type of Service.
ULISS	ULtra fast Internet Satellite Switching.
ULE	Unidirectional Lightweight Encapsulation.

UDLR	UniDirectional Link Routing.
URI	Uniform Resource Identifier.
UETS	Universal Ethernet Telecommunications Service.
ULS	Up Link Signaling.
UDP	User Datagram Protocol.
VSAT	Very Small Aperture Terminal.
VCI	Virtual Channel Identifier.
VPI	Virtual Path Identifier.
VPLS	Virtual Private LAN Service.
VPN	Virtual Private Network.
VoIP	Voice over IP.
WFQ	Weighted Fair Queuing.

Résumé

Les réseaux satellite ont été standardisés par le groupe **DVB** en se focalisant sur le service de télévision. Dans un contexte de convergence, notamment caractérisé par l'émergence des offres "triple play", les nouvelles architectures de télécommunication par satellite doivent être conçues de façon plus ouverte. Après une description du contexte des réseaux satellites **DVB**, nous recensons les solutions de convergence applicables à ces réseaux. Notre choix s'est porté sur les technologies convergentes **IP** et **MPLS** pour proposer une telle architecture de convergence. Pour en évaluer les qualités, plusieurs scénarios sont alors envisagés. Le premier se concentre sur le service historique de télévision avec un satellite transparent et unidirectionnel. Nous montrons que la solution **IP/MPLS** permet d'offrir le même service avec des performances similaires et surtout ajoute une structure protocolaire augmentant l'évolutivité. Les scénarios suivants s'occupent d'un service de télévision interactif avec voie retour et d'un service de voix sur **IP** et mettent en valeur la facilité de leur mise en œuvre. Le dernier scénario applique notre approche convergente **IP/MPLS** au projet de satellite régénératif hybride **ULISS**. Cela a permis de montrer la flexibilité de l'architecture et d'étendre les possibilités de services du projet.

Abstract

Satellite networks have been built by the **DVB** group and dedicated to digital television service. However, in the current service convergence trend, a future satellite network architecture has to be built in a less dedicated way to fit heterogeneous services. This work begins with a description of **DVB** satellite networks. Then, network convergence solutions are studied for the satellite context. **IP** and **MPLS** have then been chosen to build a satellite convergent architecture. Several scenarios are examined so as to evaluate this architecture. A first one deals with the historical television service in a unidirectional, transparent satellite context. We show the feasibility of such a scenario with similar performances and better protocol organisation which simplifies satellite evolution. The next scenarios concern an interactive television service with a return link and a voice over **IP** service. The ability of deploying new services in a simple manner is thus highlighted. The last scenario applies our convergent approach to the **ULISS** industrial project of a regenerative hybrid satellite. It shows the flexibility of our architecture and expand **ULISS** service capabilities.

Introduction

Les systèmes de communication par satellite ont longtemps eu des fonctionnements dédiés et souvent propriétaires. L'essor de la télévision par satellite a vu l'apparition de nombreux standards, d'abord analogiques puis numériques. Le standard le plus répandu s'appelle **DVB-S (Digital Video Broadcast - Satellite)** et repose sur la norme de compression **MPEG2 (Moving Pictures Expert Group - Second Generation)**. Les principes des réseaux satellite sont donc souvent très éloignés de standards de réseaux de télécommunication terrestres du fait de leur utilisation ciblée et de leurs caractéristiques intrinsèques.

Le futur de ces réseaux satellite de télévision se pose donc dans le contexte général de la convergence. En effet, les réseaux de télécommunication ne sont plus dédiés à la téléphonie, à l'échange de données ou encore à la télévision. De très nombreuses offres "triple play" intégrant tous ces services sur le même support se sont développées. Les utilisateurs souhaitent être joignables partout, tout le temps et avec n'importe quel terminal. Cette convergence des réseaux a été portée par le succès planétaire du réseau Internet animé par le protocole **IP (Internet Protocol)**. Utilisé d'abord pour des services d'échange de fichiers (mail, web), ce protocole a permis le développement d'applications multimédia qui concurrencent les services des opérateurs de télécommunications. **IP** est ainsi devenu l'interface incontournable des services, adoptée désormais par ces opérateurs dans leurs offres intégrées.

Cette thèse a pour objectif d'étudier cette convergence des moyens de communication dans le cadre des réseaux satellite de télévision. En effet, en raison d'une conception dédiée à la télévision, l'intégration de nouveaux services dans les réseaux satellite standards est complexe. Le développement des offres Internet par satellite pour connecter des lieux non couverts par les opérateurs terrestres montre l'utilité de proposer de nouvelles architectures de communication moins dépendantes du fonctionnement de la télévision. La thèse de J. Fasson [1] étudiait déjà les difficultés d'une telle évolution du fait des fortes différences entre **IP** et les fonctionnements **DVB** existants. Il concluait que, si de nombreuses solutions d'interconnexion existaient bien, il manquait "une architecture fédératrice et pérenne, apportant une solution entre les satellites actuels et futurs et intégrant différents services". Nous cherchons ici à répondre à ce besoin d'architecture convergente satellite.

Dans une première partie, nous détaillons alors les standards de télécommunication dans le monde satellite. Nous ne nous attachons pas aux techniques propriétaires qui, par nature, ne se prêtent pas à une convergence entre différents mondes et différents constructeurs.

Ensuite, nous nous penchons sur la notion de convergence et en particulier sur celle des architectures de réseaux qui apparaît comme plus importante. Après un panorama historique, des critères de convergence sont définies. Nous décrivons alors différentes solutions de convergence et leur applicabilité au système satellite. Leurs avantages et inconvénients sont analysés à partir des critères proposées. Le but est de comparer les différentes approches pour choisir une architecture de convergence par satellite acceptable. Notre choix se porte sur les technologies **IP** et **MPLS (Multi-Protocol Label Switching)** pour étudier cette convergence.

Une architecture globale fondée sur **IP** et **MPLS** est donc définie. L'étude exhaustive d'une architecture répondant à toutes les configurations s'avère inadaptée. Il est préférable de considérer un scénario élémentaire : le service de télévision unidirectionnel sur un satellite transparent. Il s'agit d'une part de valider notre solution dans ce cadre classique, et d'autre part de montrer qu'il est possible d'obtenir un service comparable avec des performances équivalentes.

Après avoir établi la faisabilité d'une telle solution pour le service historique, le chapitre suivant décrit un système de télévision interactif par satellite dans un mode bidirectionnel. Dans ce cadre, un scénario d'intégration de différents services est traité, en particulier pour un service de téléphonie sur **IP**. Notre travail trouve alors tout son sens. Nous montrons la capacité de notre solution à intégrer des services attractifs pour les utilisateurs.

Parmi les difficultés que l'on rencontre à l'heure actuelle avec les systèmes de communication par satellite, on peut citer l'absence de structuration en couches et un simple découpage fonctionnel. Cette technique convient parfaitement pour des systèmes mono-technologie, mono-service et mono-opérateur, mais pose des problèmes d'évolutivité et d'interopérabilité. Un des points forts de notre travail aura été proposer un découpage fonctionnel de la signalisation permettant ainsi de séparer la signalisation spécifique au système satellite de celle liée au service. Pour mettre en évidence tout l'intérêt de notre approche, nous nous sommes intéressés dans le dernier chapitre à l'application de l'architecture de convergence **IP/MPLS** dans un contexte industriel du projet de commutateur embarqué **ULISS (ULtra fast Internet Satellite Switching)**. Ce scénario dans un contexte de satellite régénératif montre la flexibilité de l'approche et l'intérêt d'un modèle de convergence pour le satellite.

Chapitre 1

Réseaux satellite GEO

1.1	Caractéristiques d'un lien satellite	5
1.1.1	LEO, MEO, GEO	5
1.1.2	Transparent/régénératif	6
1.1.3	Réseaux DVB	6
1.2	Voie aller DVB-S et DVB-S2	7
1.2.1	Vue générale	7
1.2.2	MPEG2	8
1.2.3	Signalisation PSI/SI	10
1.2.4	DVB-S et DVB-S2	11
1.2.5	Encapsulation de données	13
1.3	Voie retour DVB-RCS	14
1.3.1	Vue générale	14
1.3.2	Signalisation DVB-RCS	15
1.3.3	Étapes de fonctionnement de DVB-RCS	17
1.4	Évolution des satellites GEO	20
1.5	Conclusion	21

Les satellites ont été inventés avec l'idée qu'un point d'observation en très haute altitude pourrait servir à de nombreuses applications de télécommunication. Avant la conquête de l'espace, ce principe de relais d'ondes électromagnétiques a été assuré par des avions en haute altitude, des ballons ou même la Lune. L'écrivain Arthur C. Clarke avait décrit dès 1945 le principe d'un relais géostationnaire et montré qu'une couverture mondiale serait possible avec trois satellites "fixes" [2]. Plus tard, le premier satellite artificiel dans l'espace fut Spoutnik 1, lancé par les soviétiques en 1957. Après de nombreux essais, le premier satellite actif de communication fut Telstar et la première transmission télévisuelle par satellite eut lieu en 1962 [3]. En août 1964, le premier satellite fixe en orbite géostationnaire Syncom 3 permit véritablement d'assurer un service de télécommunication point à point pour des transferts sur longue distance.

Avec l'évolution des tailles des antennes et des technologies des satellites, les services en diffusion se sont ensuite largement imposés [4]. La multiplication des offres de télévision a poussé à l'adoption de standards de communication d'abord analogiques puis numériques. En Europe, le groupe **DVB (Digital Video Broadcast)** de l'**ETSI (European Telecommunications Standards Institute)** standardise le fonctionnement d'un service de télévision sur de nombreux supports : câble (**DVB-C**), hertzien (**DVB-T**) et satellite (**DVB-S**). Ce système se fonde sur le standard vidéo **MPEG2 (Moving Pictures Expert Group - Second Generation)** [5]. Un article de D. Wood, membre important du projet **DVB**, explique le contexte de ce projet de diffusion numérique et les choix effectués [6].

Concurrencé par des systèmes équivalents reposant également sur **MPEG2** comme le système **ATSC (Advanced Television Systems Committee)** [7] ou **ISDB-S (ISDB - Satellite)** [8]), cette norme s'est néanmoins imposée dans la plupart des pays comme le standard pour la télévision numérique par satellite. Un groupe de l'**IETF (Internet Engineering Task Force)**, organisme de standardisation de l'Internet, a même été créé pour étudier l'intégration du trafic **IP** sur des réseaux **DVB**. Les standards **DVB** forment donc l'architecture de communication de base des réseaux satellite domestiques existants. D'autres architectures ont été utilisées pour des services point à point de type **VSAT (Very Small Aperture Terminal)** ou pour échanger de grandes quantités d'informations entre deux continents. Ces services restent néanmoins beaucoup plus coûteux et moins répandus ; leur standardisation s'est donc moins imposée. C'est pourquoi nous nous concentrons sur le fonctionnement des architectures **DVB** par satellite, les plus courantes.

La première partie rappelle certains principes de base des réseaux satellite pour ensuite détailler le standard **DVB-S** et son évolution **DVB-S2** dans une deuxième partie. Enfin, le standard **DVB-RCS (Digital Video Broadcast - Return Channel Satellite)** permettant d'ajouter une interactivité au fonctionnement unidirectionnel classique est décrit. Les bons livres de vulgarisation d'Hervé Benoit sur le sujet témoignent du succès public de ces systèmes [9, 10, 11].

1.1 Caractéristiques d'un lien satellite

Les satellites de télécommunication transmettent donc des informations d'un point à l'autre de la Terre, notamment des programmes télévisés en diffusion mais aussi des communications téléphoniques ou de données. Un satellite est constitué d'une plateforme ("service module") assurant le maintien à poste dans l'espace et d'une charge utile ("payload") permettant de remplir la mission du satellite. Pour un satellite de télécommunication, elle est constituée de différents transpondeurs qui reçoivent, amplifient et retransmettent des signaux sur des fréquences différentes. Les satellites utilisent des bandes de fréquence particulières ; les plus communes sont les bandes C (3.7 - 4.2GHz), Ku (10.70 - 12.75GHz) ou plus récemment Ka (20 - 30 GHz).

Le médium satellite a donc des caractéristiques particulières :

- une grande couverture pouvant aller du tiers de la planète à 100 km pour les plus petits faisceaux ;
- une diffusion naturelle, qui a naturellement aidé à développer la télévision par satellite ou toute application de diffusion ;
- une accessibilité totale dans la zone de couverture, ce qui a permis de conserver cette technologie, non dépendante de facteurs terrestres (montagnes ou autres) ;
- un délai qui peut être important avec un temps de propagation plus grand que le temps d'émission (autour de 250 ms pour une orbite géostationnaire) ;
- peu d'infrastructures terrestres nécessaires ;
- un coût important du fait du satellite lui-même mais aussi des équipements de transmission et de gestion du satellite et du réseau ;
- une robustesse des composants et des systèmes ; il est trop dangereux d'envoyer des technologies non matures sur des satellites car elles doivent avoir une longue durée de vie en raison des coûts.

1.1.1 LEO, MEO, GEO

Les premiers satellites n'avaient pas une longue durée de vie, ni un temps d'utilisation très important ; il fallait, en effet, attendre qu'ils passent dans le champ de visée. Le lancement de satellites géostationnaires a permis de résoudre ce problème. Du fait de leurs caractéristiques assez différentes, les satellites ont été ainsi classés suivant la hauteur de leurs orbites :

1. Les satellites **GEO (Geostationary Earth Orbit)** ayant donc une trajectoire calée sur celle de la terre dans un plan voisin de celui de l'équateur. Ils évoluent à une altitude de 35 786 km liée à leur vitesse qui doit suivre celle de la terre.
2. Les satellites **MEO (Medium Earth orbit)** évoluent sur une orbite médiane autour de 10000 km.

3. Les satellites **LEO (Low Earth orbit)** représentent des satellites en orbite basse de plusieurs centaines de kilomètres autour de 1000 km.

Les satellites **GEO** sont les plus communs grâce à leur position relative fixe dans l'espace et ce malgré leur coût important, un délai important et une diffusion importante non adaptée à certaines applications. L'utilisation de plusieurs faisceaux (on parle de multi-faisceaux) réduisant la taille des zones de couverture et d'intelligence à bord sont des pistes permettant de compenser certains problèmes des satellites **GEOs**.

1.1.2 Transparent/régénératif

Au delà de la classification en fonction de l'altitude, on peut aussi s'intéresser à leur fonctionnement interne. Les satellites les plus simples sont qualifiés de transparents, c'est-à-dire que leur charge utile ne fait aucun travail sur le signal, excepté sa réception, son amplification et sa réémission. Le médium satellite est donc vu seulement comme un câble virtuel tiré entre deux zones au sol. Il n'y a pas de commutation, de routage ou de choix de faisceaux à bord. Un satellite avec intelligence embarquée est qualifié de régénératif car il doit décoder le signal reçu pour pouvoir effectuer un traitement et le réémettre vers la terre. On donne aussi le nom d'**OBP (On-Board Processing)** à la partie de traitement intelligent embarqué. Un satellite peut aussi avoir un fonctionnement hybride, ne régénérant qu'une partie du trafic comme la signalisation par exemple.

Ces différents satellites engendrent classiquement des topologies de réseaux différentes. En effet, avec un satellite transparent, une topologie en étoile ("star") est assez directe car les communications peuvent toujours repasser par le même centre de contrôle du réseau. Cela engendre un double bond pour faire communiquer deux clients par le satellite et un délai induit important mais un mode maillé reste possible. En revanche, un satellite régénératif permet de mettre en place plus facilement une topologie maillée ("mesh") grâce à l'**OBP** pouvant orienter les communications directement en un seul bond et réduisant d'autant le délai entre deux clients.

1.1.3 Réseaux DVB

Comme indiqué en introduction, nous nous concentrons maintenant sur le fonctionnement des réseaux satellite les plus communs reposant sur les standards **DVB**. L'application la plus importante est donc un service de télévision utilisant un lien satellite **GEO** transparent unidirectionnel en diffusion depuis un émetteur vers de nombreux terminaux (mode star). On appelle ce lien "la voie aller". Les programmes de télévision sont par exemple diffusés par la flotte Eutelsat (Hot-Bird, Atlantic Bird 3, W1,2,3, etc.) ou celle de la Société Européenne de Satellites (SES), Astra 1 et 2. Ce système global s'appelle donc **DVB-S** et repose sur la norme vidéo **MPEG2**. Il est aussi possible de transporter des données sur ce système. Son fonctionnement est décrit dans la partie suivante.

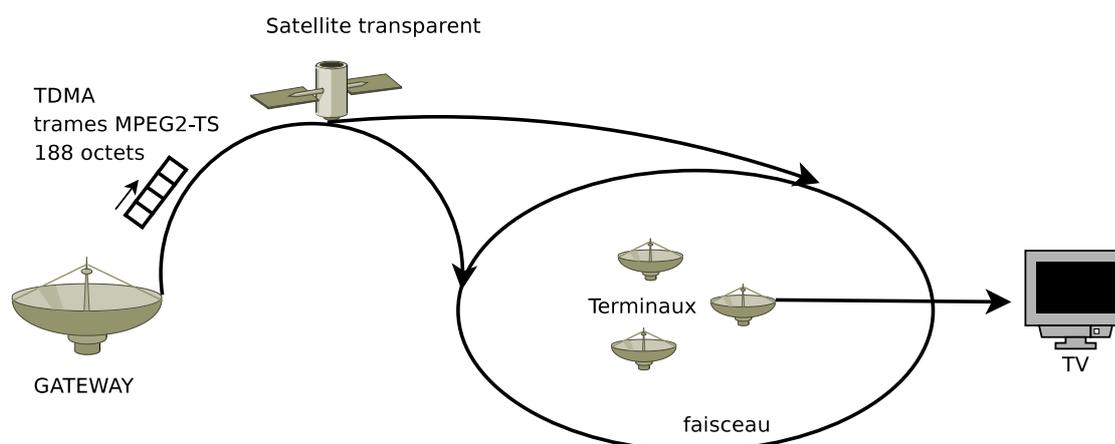


FIG. 1.1 – Système DVB-S

Avec le développement du satellite comme accès Internet notamment avec les offres **UDLR (UniDirectional Link Routing)**, une “voie retour” satellite a été définie pour permettre aux zones blanches des réseaux terrestres d’accéder à Internet. Ce système a pour nom **DVB-RCS** et son fonctionnement est également détaillé dans la suite.

Les évolutions et perspectives de ces réseaux **DVB** sont enfin décrits en conclusion.

1.2 Voie aller DVB-S et DVB-S2

1.2.1 Vue générale

Comme le montre la figure 1.1, un système de télévision classique DVB-S est donc composé de trois éléments : un émetteur nommé passerelle ou “gateway” diffuse des flux vidéos via un satellite transparent vers des terminaux récepteurs-décodeurs des programmes.

Le système repose sur le standard **MPEG2** pour coder les flux vidéos, les flux audio et d’autres informations (télétexte) et enfin pour les multiplexer dans un flux **MPEG2-TS (MPEG2 - Transport Stream)** composé de trames de 188 octets. Des informations de contrôle et de synchronisation sont également insérées (voir figure 1.2.2). La gateway code, module et envoie ces trames en **TDMA (Time Division Multiple Access)** vers le satellite qui répète le signal vers les terminaux. Ces terminaux accèdent à la signalisation de contrôle pour trouver la “carte” des programmes et décodent seulement les trames relatives à un programme visé.

Dans un premier temps, nous détaillons le système **MPEG2** pour ensuite détailler sa signalisation **PSI (Program Specific Information)** ainsi que la signalisation **SI (Service Information)** enrichie par le groupe **DVB**. Nous décrivons ensuite brièvement le

standard [DVB-S](#) lui-même qui concerne uniquement la couche physique de transmission et son amélioration le [DVB-S2](#). Nous détaillons ensuite l'encapsulation de données Internet dans de tels systèmes dédiés.

1.2.2 MPEG2

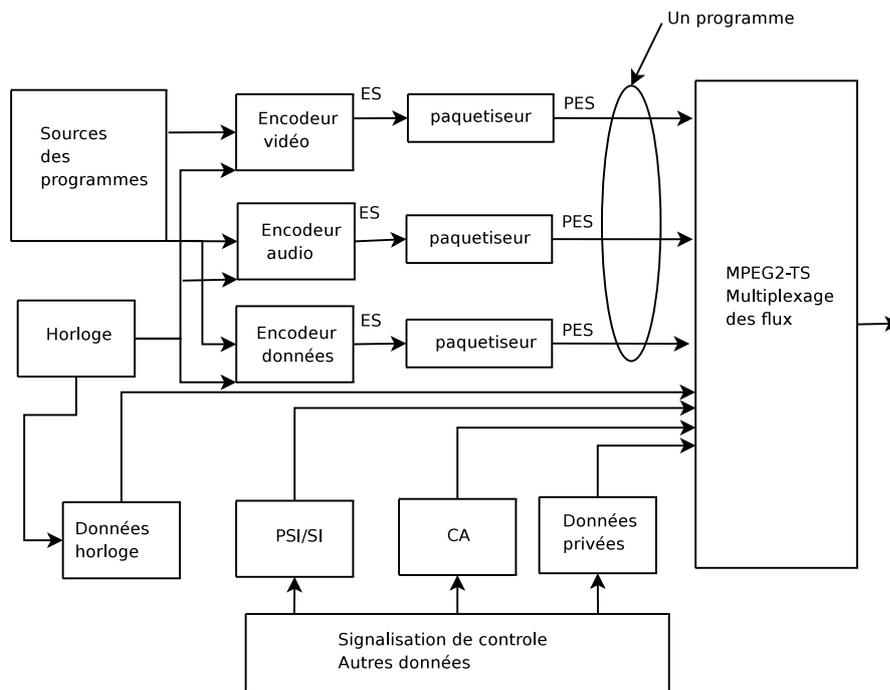


FIG. 1.2 – Codage et multiplexage de programmes [MPEG2](#)

MPEG2 est l'ensemble de normes de deuxième génération du Moving Picture Experts Group de l'ISO définissant la compression d'images animées et de sons et leur transport dans une structure ou "trame" commune. La figure 1.2.2 décrit cette chaîne de codage et de multiplexage.

D'abord, les sources analogiques vidéos et audios des programmes de télévision sont encodées à partir d'une horloge commune permettant de conserver la synchronisation du programme. Cet encodage spécifique pour la vidéo ou l'audio est décrit dans des normes [MPEG2](#) spécifiques [12, 13]. De nouveaux codages plus efficaces comme H264 [14] du standard MPEG4 ou des formats propriétaires peuvent également être utilisés. Ces différents encodages engendrent des flux élémentaires [ES \(Elementary Stream\)](#) qui sont ensuite découpés en [PES \(Packet Elementary Stream\)](#).

Le format des [PES](#) est assez complexe et a une structure qui dépend de la nature du flux transporté. Il comporte en particulier les champs suivants :

packet_start_code_prefix : Ce champ est une suite binaire invariable identifiant le début du PES.

stream_id : Ce champ permet de décrire la nature du flux et donne potentiellement un numéro de flux dans un programme.

PES_packet_length : Il représente la longueur du paquet sans l'en-tête.

La présence des champs optionnelles dépend de la nature du flux et des nombreux flags de l'en-tête. On retrouve par exemple des options d'embrouillage, d'estampillage temporel, de priorité, de synchronisation, de droit d'auteur, de débit du flux, de vitesse de mouvement, ...

Ces flux de données doivent donc être maintenant multiplexés en vue d'être envoyés. La norme [MPEG2 - Systèmes \[5\]](#) explique la création d'un train de données encapsulant un flux de diffusion. Elle définit deux moyens totalement différents : le flux de programme ou "Program Stream" et le flux de transport ou "Transport Stream". Le Program Stream est un mécanisme d'encapsulation permettant de stocker les flux sur support (par exemple bande magnétique, DVD, ...) et qui n'est pas adapté à la transmission. Le Transport Stream est un mécanisme visant la transmission sur des média potentiellement bruités. On peut considérer cette couche [MPEG2-TS](#) comme la structure de référence d'un système DVB-S.

Un flux [MPEG2-TS](#) est constitué de "paquets" de 188 octets avec un en-tête de 4 octets. Chaque paquet est identifié dans l'en-tête par un [PID \(Packet Identifier\)](#) qui indique le type de contenu en fonction de la signalisation [PSI/SI](#). A chaque programme contenant plusieurs flux [PES](#) identifiés par leur `stream_id` est associé un [PID](#). Suivant leurs tailles, les [PES](#) sont découpés en paquets adéquats de 184 octets en utilisant du bourrage pour compléter le dernier paquet grâce à un champ `adaptation_field` variable dans l'en-tête. Ce champ d'adaptation servira par la même occasion à transporter la référence d'horloge pour la synchronisation temporelle [PCR \(Program Clock Reference\)](#).

Format de la trame MPEG2-TS (fig. 1.3) :

sync_byte (8 bits) : il contient une valeur unique de synchronisation 0x47. Cette valeur ne devrait pas être utilisée dans d'autres champs pour aider à la synchronisation.

transport_error_indicator (1 bit) : il indique au moins une erreur dans le paquet.

payload_unit_start_indicator (1 bit) : il indique si un PES débute dans cette trame.

transport_priority (1 bit) : il indique le niveau de priorité de la trame.

PID (13 bits) : il représente l'élément clef de cette en-tête. Il caractérise le type de paquet et donc la façon de traiter les données encapsulées en rapport avec la signalisation [PSI/SI](#).

transport_scrambling_control (2 bits) : il indique si les données de la trame sont embrouillées ou non.

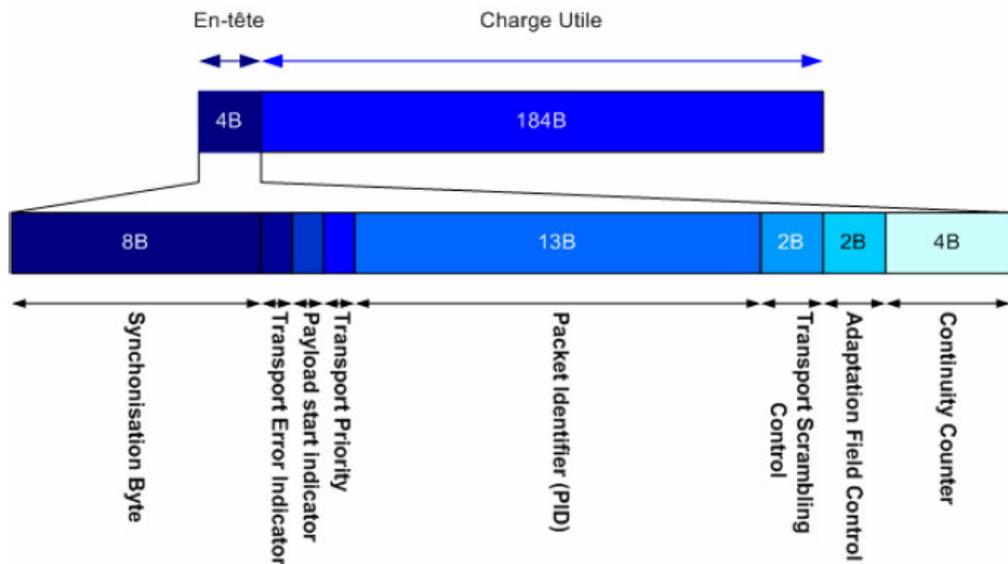


FIG. 1.3 – Format de la trame MPEG2-TS (src : [1])

adaptation_field_control (2 bits) : il indique la présence d’un champ additionnel dans l’en-tête et la présence de données à la suite.

continuity_counter (4 bits) : il représente un compteur incrémental de données pour chaque PID et permet notamment de savoir si des données sont dupliquées.

adaptation_field : si adaptation_field_control vaut ‘10’ ou ‘11’, on trouve un “adaptation_field” de taille variable

pointer_field : ce champ est présent pour le transport des tables PSI/SI afin d’indiquer l’emplacement de départ de la table.

1.2.3 Signalisation PSI/SI

Afin d’assurer le fonctionnement d’un tel système, des informations de contrôle sont nécessaires pour notamment attribuer aux PIDs le type de programme. Ce système de contrôle s’occupe également du contrôle d’accès, de la gestion du réseau et d’autres fonctions. Il utilise pour cela un ensemble de tables. La norme MPEG2 décrit uniquement les tables PSI : PAT, CAT, PMT, NIT. Elles ont été précisées et complétées par le groupe DVB par d’autres tables SI basées sur la même structure [15, 16].

Tables PSI/SI obligatoires :

Table NIT (Network Information Table) : Dans un système DVB, cette table est directement indiquée par un PID de ‘0x0010’. Elle donne des informations sur l’organisation du réseau physique. C’est la première table que l’on trouve dans un

système DVB. Elle permet de trouver la bonne fréquence du flux d'un terminal par exemple.

Table PAT (Program association Table) : Identifiée par un **PID** de '0x0000', elle liste les programmes présents ainsi que les **PIDs** des tables de description de programme (**PMT**) associés. Elle a donc un rôle d'index pour trouver d'autres tables décrivant le flux.

Table CAT (Conditionnal Access Table) : Identifiée par un **PID** de '0x0001', elle donne des informations sur les contrôles d'accès mis en place dans le multiplexe pour limiter l'accès aux programmes aux abonnés.

Tables PMT (Program Map Table) : On les trouve à partir de la table **PAT**. Une table **PMT** identifie et indique la localisation des flux associés à un service/programme. Elle définit donc la compréhension des données suivant leurs **PIDs**.

Table SDT (Service Description Table) : Elle liste les noms et paramètres associés à chaque service d'un multiplexe

Table EIT (Event Information Table) : Elle transmet des événements en cours ou à venir dans le multiplexe. Elle peut permettre de bâtir un guide électronique des programmes ou **EPG (Electronic Program Guide)**.

Table TDT (Time and Data Table) : Elle permet une remise à l'heure de l'horloge interne du terminal récepteur .

Tables PSI/SI optionnelles :

Table TSDT (Transport Stream Description Table) : Elle décrit le type de contenu du flux **MPEG2-TS**.

Table BAT (Bouquet Association Table) : Elle groupe les différents services/programmes en bouquet pour présentation à l'utilisateur.

Table RST (Running Status Table) : Cette table permet la mise à jour rapide d'un ou plusieurs événements.

Table TOT (Time Offset Table) : Elle indique le décalage horaire aux terminaux.

Table ST (Stuffing Tables) : Elle permet d'invalider des tables devenues inutiles.

Chacune de ces tables a un but particulier et contient des descripteurs définis dans la norme. Ces descripteurs peuvent être communs à différentes tables ; par exemple, un descripteur décrivant le nom d'un bouquet pourra être utilisé dans la **BAT** et la **SDT**. Les descripteurs sont des structures permettant de faire des liens entre les tables.

1.2.4 DVB-S et DVB-S2

Un flux **MPEG2-TS** doit être ensuite pris en charge par une couche physique dépendante du médium utilisé. Dans le cas de la voie aller du système satellite transparent

classique, le système physique est le DVB-S [17] qui, par abus de langage, désigne généralement tout le système. Le multiplexe **MPEG2-TS** est traité par toute une chaîne de transmission comportant brouillage, codage Reed-Salomon, entrelacement, code convolutif, poinçonnage, modulation **QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying)**. On arrive à un débit utile de 38Mb/s pour un transpondeur de 35 MHz.

Le standard de nouvelle génération **DVB-S2** est compatible avec l'ancien système **DVB-S** mais fait évoluer différents principes [18, 19]. Tout d'abord, **DVB-S2** profite d'un meilleur codage de type **LDPC (Low-Density Parity-Check)** combiné à plusieurs types de modulations (**QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK**). De plus, grâce au développement des voies retours, un fonctionnement adaptatif en mode **ACM (Adaptive Coding & Modulation)** est possible faisant évoluer ces paramètres de codage et de modulation suivant l'évolution du média satellite. Enfin, une nouvelle structure physique a été définie permettant de se passer de la structure **MPEG2-TS** grâce au mécanisme des **Generic Streams**.

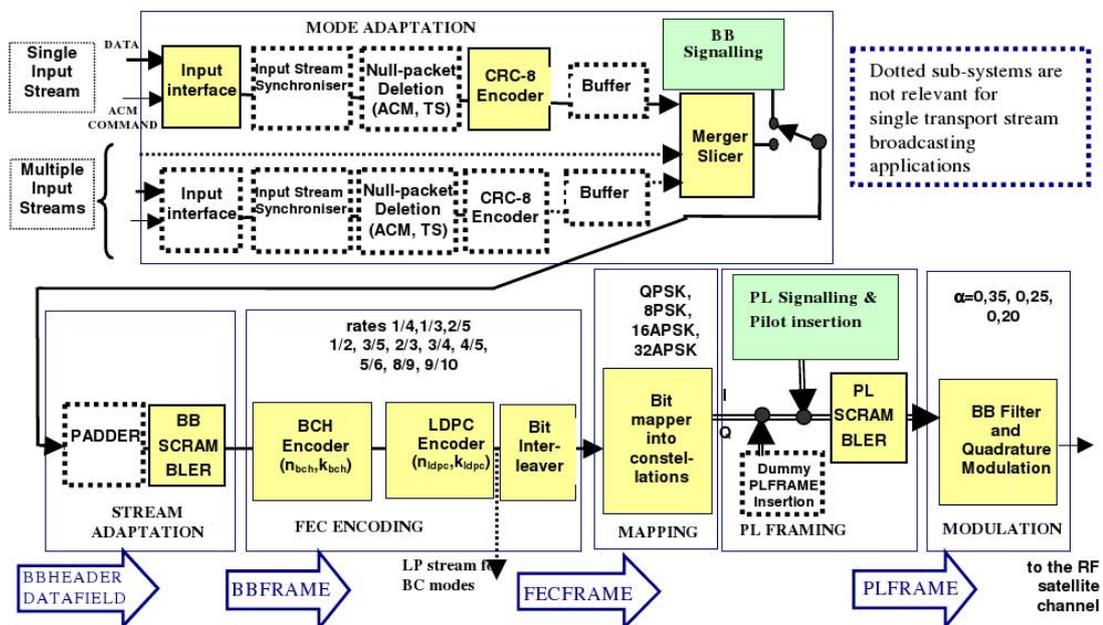


FIG. 1.4 – Fonctionnement du système **DVB-S2** (src : [18])

Comme le montre la figure 1.4, des **PLFRAME** constituent la trame physique de base du système **DVB-S2**. Elles encapsulent et codent des **FECFRAME (Forward Error Correction Frame)** suivant une modulation-codage (MODCOD) donnée dans l'en-tête de la **PLFRAME**. La **FECFRAME** peut avoir deux tailles fixes (64800 ou 16200 bits) suivant le paramétrage du système. Le MODCOD et la taille de la **FECFRAME** donnent la taille des données utiles d'une **BBFRAME** encapsulée et codée dans la **FECFRAME**. Contrairement à **DVB-S**, la couche physique peut ainsi être composée de conteneurs de

données de taille variable pour s'adapter aux conditions de réception. Si le MODCOD est fixe, on retrouve un système équivalent au **DVB-S**. Enfin, l'encapsulation de flux de différents types est rendue possible par l'en-tête de la **BBFRAME** (mécanisme "Generic Stream").

1.2.5 Encapsulation de données

Le groupe **DVB** a défini plusieurs méthodes pour transporter des données dans le multiplexe **MPEG2-TS** reposant sur l'encapsulation de données privées dans le standard **MPEG2**. La plus utilisée s'appelle **MPE (Multi-Protocol Encapsulation)** qui définit un format de couche liaison de données pour l'encapsulation de trafic de type **IP** par exemple [20, 21]. L'en-tête contient notamment l'adresse **MAC (Media Access Control)** de destination ainsi qu'un champ indiquant si la paquet contenu est un paquet **IP** ou **LLC**, l'encapsulation de paquets **IP** étant la plus utilisée. Des informations supplémentaires doivent être ajoutées dans la signalisation **SI** pour permettre de trouver les données MPE encapsulées. Un mécanisme complexe et évolutif reposant sur une table **INT (IP/MAC Notification Table)** permet de faire la correspondance entre les flux **IP** et les flux **MPEG2-TS (PID)**. Un mécanisme de résolution d'adresse peut ainsi être implanté.

Le groupe **IPDVB** de l'**IETF**, considérant cette encapsulation **MPE** peu efficace et complexe, a développé une autre méthode d'encapsulation appelée **ULE (Unidirectional Lightweight Encapsulation)**, permettant d'augmenter les performances [22, 23]. Cette méthode casse aussi la compatibilité avec certains mécanismes **MPEG2**. Les champs de l'en-tête sont limités à un champ de taille des données, un champ type de données, une adresse optionnelle et un code de correction. Les trames **ULE** sont découpées en morceaux et encapsulées directement dans **MPEG2-TS**.

Dans le cas d'un système **DVB-S2**, il est donc possible de se passer de **MPEG2-TS** par le mécanisme des Generic Streams. Une méthode d'encapsulation appelée **GSE (Generic Stream Encapsulation)** a été proposée par le groupe **DVB** et le groupe **IPDVB** [24]. Cette méthode repose sur de nombreux concepts d'**ULE** et permet de gérer la fragmentation et le réassemblage. La figure 1.5 montre les différents champs de l'en-tête **GSE** décrit ci-après (les champs grisés sont obligatoires) :

S (Start) : Ce champ indique la présence du début du paquet encapsulé dans cette trame.

E (End) : Ce champ indique de la même la présence de la fin du paquet encapsulé dans cette trame.

LT (Label Type) : Cet élément donne la présence, le type et la longueur du champ label.

Longueur GSE : Ce champ indique la longueur de la trame **GSE** à la suite.

Identifiant de fragmentation : Présent lorsque les champs **Start** et **End** ne sont pas positionnés, il donne le numéro de fragment du paquet encapsulé.

Longueur totale : Présent lorsque le champ Start est positionné (premier fragment), il indique la longueur totale du paquet encapsulé.

Type de protocole : Il indique le type de données encapsulées.

Label : Ce champ contient une adresse de 3 ou 6 octets suivant le champ Label Type.

Extensions : Ce champ permet d'ajouter certains mécanismes optionnels comme l'envoi de trames GSE de test.

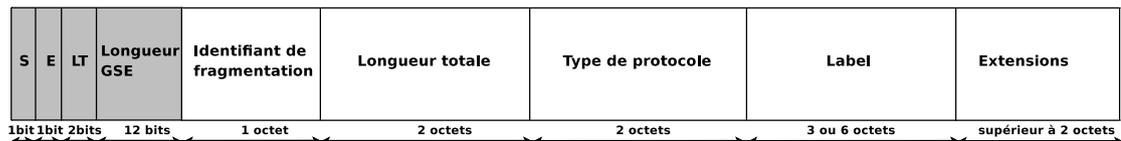


FIG. 1.5 – En-tête GSE (src : [24])

1.3 Voie retour DVB-RCS

Le système **DVB-S** classique est donc complètement adapté à de la diffusion. Néanmoins, un besoin d'interactivité est apparu avec la demande de connectivité à Internet nécessitant un lien bidirectionnel. Tout d'abord, la première solution a consisté à mettre en place une voie retour asymétrique par voie terrestre jusqu'à la gateway (solution **UDLR** standardisée par l'**IETF** [25]). Cette solution enlève néanmoins l'un des principaux avantages du satellite : l'indépendance d'emplacement par rapport au réseau. Pour permettre une vraie interactivité entièrement fondée sur le satellite, une voie retour DVB a été définie avec le standard **DVB-RCS (Digital Video Broadcast - Return Channel Satellite)** [26, 27].

Tout d'abord, une vue générale est décrite pour ensuite détailler la signalisation et finir par les étapes de fonctionnement d'un système RCS.

1.3.1 Vue générale

La norme **DVB-RCS** repose sur un système aller **DVB-S** qui lui confère de nombreuses informations de contrôle pour régler le système. Un des buts affichés est de permettre de créer des récepteurs appelés **RCST (Return Channel Satellite Terminal)** à un prix envisageable pour les abonnés. La figure 1.6 montre l'ajout d'une voie retour à un système **DVB-S**. Cette voie retour est fondée sur un autre transpondeur dédié qui peut se trouver aussi bien sur le même satellite que sur un autre satellite que celui utilisé pour la voie aller. Dans un système **DVB-RCS**, un centre de contrôle réseau ou **NCC (Network Control Centre)** souvent associé à la gateway est en charge de toute la signalisation opérateur.

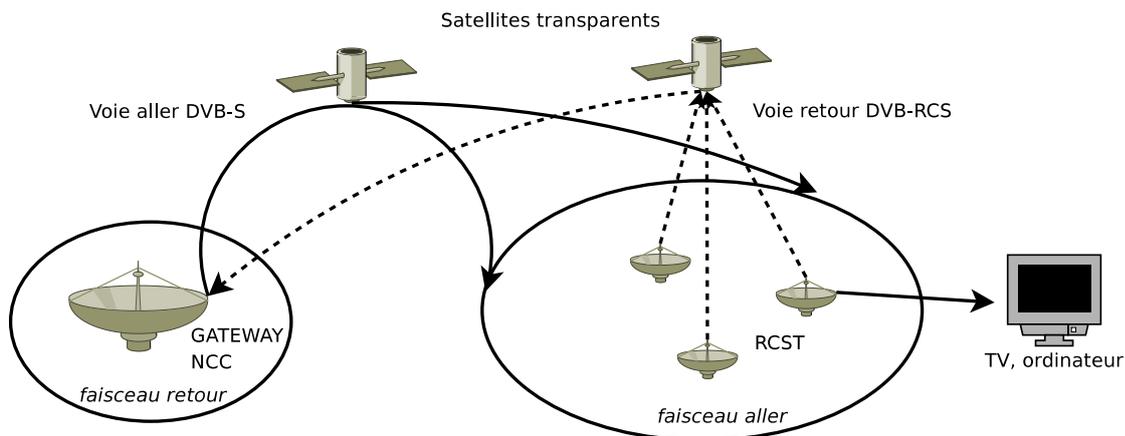


FIG. 1.6 – Système DVB-RCS

Les terminaux ou RCST ont donc maintenant une partie émission spécifique. L'émission des informations n'est plus constante mais repose sur le principe de "bursts" utilisant un découpage temporel et fréquentiel standardisé appelé **MF-TDMA (Multiple Frequency Time Division Multiple Access)**. En effet, il est difficile de savoir le nombre d'éléments qui émettront sur le support et il est également nécessaire de les synchroniser. Le fonctionnement de cette répartition est décrit plus loin et repose sur une signalisation aller **DVB-S** dans de nouvelles tables **SI** et sur une signalisation retour dans des bursts spécifiques. Un RCST est donc maintenant un véritable élément de réseau actif avec de nombreux identifiants associés.

Après synchronisation du système à partir de la signalisation, le transfert d'information se fait dans des bursts de données appelés **TRF (Traffic)**. Deux méthodes d'encapsulation de données sont possibles : **MPEG2-TS** ou **ATM (Asynchronous Transfer Mode)**. Dans le cas **MPEG2-TS**, du trafic **IP** est encapsulé grâce aux mécanismes **MPE** ou **ULE**. Dans le cas d'**ATM**, la couche d'adaptation **AAL5 (ATM Adaptation Layer 5)** classique est utilisée.

1.3.2 Signalisation DVB-RCS

Le fonctionnement de la voie retour **DVB-RCS** repose sur deux types de signalisation : celle de la voie aller dans des tables **SI** et celle de la voie retour.

Sur la voie aller, de nombreuses tables supplémentaires décrites dans le tableau 1.2 permettent le fonctionnement de **DVB-RCS**. A partir du fonctionnement existant d'indirection par les tables **NIT**, **PAT**, **PMT** et de la nouvelle table **RMT (RCS Map Table)**, un terminal trouve les tables **DVB-RCS** nécessaires au fonctionnement de sa voie retour. Un mécanisme d'horloge fondée sur la synchronisation classique **PCR** liée à **MPEG2** permet d'assurer la cadence d'émission temporelle. Cette synchronisation peut être cor-

rigée par la table **SPT** liée à la position du satellite et par la table **CMT**. Comme le montre la figure 1.7, le tramage **MF-TDMA** pour la voie retour est décrit par les tables **SCT** et **FCT** organisant ce tramage en supertrames, trames et intervalles de temps (timeslots). Un timeslot contient un burst de données. Le contenu de cet intervalle de temps est défini par la table **TCT** et par la table **TBTP** qui permet d'allouer les ressources aux différents terminaux. Enfin, une table **TIM** permet d'envoyer des messages de configuration aux terminaux.

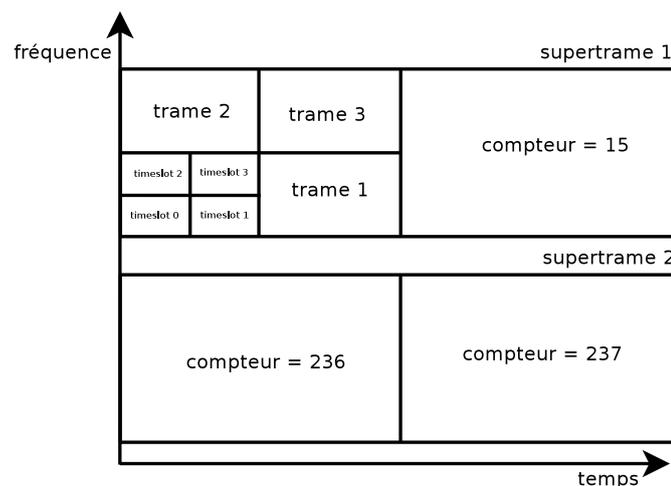


FIG. 1.7 – Tramage **MF-TDMA DVB-RCS**

Sur la voie retour, les intervalles de temps définis par ce tramage **MF-TDMA** correspondent à des bursts de différents types. Outre les bursts **TRF** transportant les données utiles, on trouve également des bursts de signalisation **CSC (Common Signalling Channel)**, **ACQ (ACQuisition)** et **SYNC (SYNChronisation)**. Le burst **CSC** peut contenir une demande de connexion liée à l'adresse **MAC** du terminal. L'accès au **CSC** se fait en Aloha en concurrence entre les terminaux. Les bursts **ACQ** et **SYNC** contiennent tous les deux des informations de synchronisation. Néanmoins, un burst **SYNC** peut "piggybacker" un champ **SAC (Satellite Access Control)** de requête de ressources. Une autre méthode moins performante appelée **DULM (Data Unit Labelling Method)** permet aussi de transporter des requêtes de ressources dans des canaux virtuels dans les données. La méthode d'allocation de ressources peut être fixe, gérée par la fonction **CAC (Connection Admission Control)** à la connexion des terminaux. Les ressources peuvent aussi être allouées dynamiquement à la demande grâce au champ **SAC** par une méthode **DAMA (Demand Assignment Multiple Access)**.

Forward Link Signalling (FLS)	
Nom	Fonction
SCT (Superframe Composition Table)	indique l'organisation en supertrames et trames de tout le réseau retour
FCT (Frame Composition Table)	indique le partitionnement des trames en slots temporels
TCT (Time-slot Composition Table)	indique les paramètres de chaque slot temporel
SPT (Satellite Position Table)	contient des informations d'éphéméride de correction des bursts
CMT (Correction Message Table)	indique aux RCST des corrections physiques à effectuer
TBTP (Terminal Burst Time Table)	assigne les slots temporels aux RCST
TIM (Terminal Information Message)	contient des messages de configuration
NCR (Network Clock Reference)	donne une horloge de référence pour la synchronisation retour à partir du mécanisme PCR
RMT (RCS Map Table)	donne l'emplacement des différentes tables de la voie retour (type NIT)

TAB. 1.2 – Signalisation SI de la voie retour

1.3.3 Étapes de fonctionnement de DVB-RCS

Comme le montre la figure 1.8, un terminal RCST va se synchroniser en plusieurs étapes pour faire fonctionner sa voie retour :

1. Procédure initiale de synchronisation :

- (a) **Synchronisation physique** : La signalisation aller nécessaire au fonctionnement de la voie retour est considérée comme un service DVB au même titre qu'un programme de télévision ou un flux Internet. Elle est donc référencée dans les tables NIT, PAT et PMT. A partir d'une fréquence de démarrage par défaut, un terminal va donc d'abord se synchroniser sur un flux MPEG2-TS.
- (b) **Localisation du lien aller** : Une étape de localisation de la signalisation de la voie retour s'initie alors. Il recherche dans la table NIT contenant l'organisation fréquentielle de la voie aller, l'emplacement de la table RMT donnant l'organisation des différentes voies retour possibles. Cela se fait dans la table NIT à partir d'un descripteur (linkage_descriptor) contenant un type adéquat (linkage_type=RCS Map Service). Ce descripteur dans la NIT donne aussi un identifiant de flux (TS_id). Un deuxième balayage de la table NIT per-

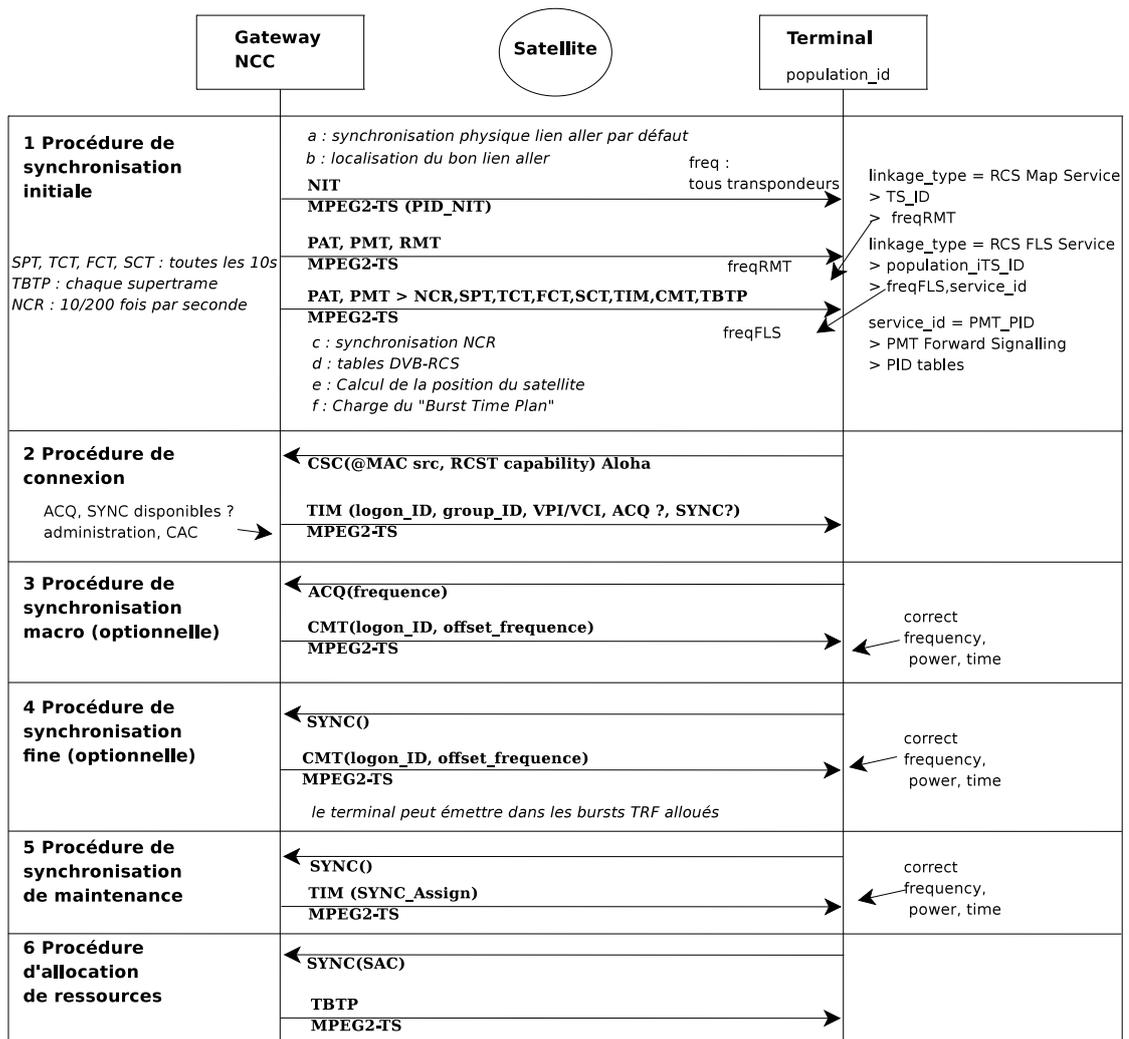


FIG. 1.8 – Fonctionnement de DVB-RCS

met de trouver la fréquence du flux contenant cette table **RMT** (à partir d'un satellite_delivery_system_descriptor). Le terminal peut maintenant se régler sur cette fréquence pour trouver la table **RMT**.

Sur ce nouveau flux, le terminal recherche l'identifiant **PID** de la table **RMT**. Pour le trouver, il consulte la table **PAT** contenant la liste des services sur ce flux et une table **PMT** contenant ce **PID** de la table **RMT** recherché. Le terminal scrute alors toutes les différentes sections de cette table à la recherche de son identifiant de population (population_id), paramètre fixé par l'opérateur à chaque terminal. A cet identifiant, un réseau d'interactivité est as-

socié (`interactive_network_id`) ainsi que l'identifiant de flux (`TS_id`) où se trouvent les différentes tables **DVB-RCS** de ce réseau. Dans un deuxième balayage de cette table **RMT**, le terminal trouve la nouvelle fréquence ainsi que des identifiants de satellite (`satellite_id`), de gateway (`gateway_id`), de **NCC** (`NCC_id`), de supertrame (`superframe_id`) et de service (`service_id`), paramètres servant au fonctionnement de la voie retour.

Le terminal **RCST** peut enfin se synchroniser sur le bon flux **MPEG2-TS** sur lequel il trouve l'horloge **NCR** (`PCR_PID`) et les différentes tables **SCT**, **FCT**, **TCT**, **SPT**, **TIM**, **CMT**, **TBTP** à partir du mécanisme classique de recherche de service par les tables **PAT** et **PMT** (utilisation du `service_id`).

- (c) **synchronisation NCR** : Après ces indirections successives jusqu'à la fréquence où se trouve la signalisation retour associée au terminal, ce dernier peut synchroniser son horloge retour grâce à la **NCR** en récupérant les informations sur le **PID** adéquat.
 - (d) **Tables DVB-RCS** : Le terminal charge aussi les différentes tables pour l'accès multiple (**SCT**, **TCT**, **FCT**) ainsi que la position du satellite par la table **SPT** et les anomalies potentielles du lien (message de diffusion dans la table **TIM**).
 - (e) **Calcul de la position du satellite** : Les informations de la table **SPT** permettent de corriger l'emplacement du satellite et de mieux se synchroniser.
 - (f) **Burst Time Plan (BTP)** : A partir des informations des tables **SCT** et **FCT**, le terminal connaît l'organisation temporelle et fréquentielle de la voie retour et peut enfin émettre. La table **TCT** donne les types des bursts du **BTP**.
2. **Procédure de connexion** : Le terminal peut donc maintenant repérer les bursts **CSC** de connexion accessibles en Aloha discrétisé et envoyer un burst de connexion vers le centre de contrôle **NCC**. Ce dernier s'occupe de vérifier si des bursts **SYNC** et **ACQ** sont libres. Il s'occupe aussi de formalités administratives et applique une éventuelle fonction **CAC**. Il renvoie ensuite au terminal un message **TIM** de confirmation de connexion contenant un identifiant de connexion (`logon_id`), un identifiant de groupe (`group_id`) et des identifiants (**VPI (Virtual Path Identifier)** et **VCI (Virtual Channel Identifier)**) pour la transmission **ATM** (ou un **PID** dans le cas **MPEG2**). Il renvoie aussi des descripteurs de synchronisation stipulant au terminal de se synchroniser grossièrement puis finement. Un descripteur de réseau peut aussi renvoyer l'adresse **IP** du terminal.
 3. **Procédure de synchronisation macro** : Après l'envoi par le terminal d'un burst **ACQ**, des corrections grossières de synchronisation peuvent être renvoyées au terminal par le centre **NCC** à partir de la table **CMT** utilisant l'identifiant du terminal `logon_id`.

4. **Procédure de synchronisation fine** : De même, après l’envoi d’un burst **SYNC**, des corrections de synchronisation plus fine peuvent être renvoyées au terminal par le centre **NCC**. Le terminal peut alors maintenant émettre dans les bursts de trafic **TRF** qui lui sont alloués par la table **TBTP**.
5. **Procédure de synchronisation de maintenance** : A intervalles réguliers, le terminal renvoie un message de synchronisation dans un burst **SYNC** à l’aide du mécanisme de synchronisation fine précédent.
6. **Procédure d’allocation de ressources** : Dans le cas d’une allocation de ressources de type **DAMA** dynamique, un terminal peut utiliser un champ **SAC** dans le burst **SYNC** de la procédure de synchronisation de maintenance (“piggybacking”). Le centre de contrôle **NCC** alloue les ressources demandées via la table **TBTP**.

Enfin, dans les bursts **TRF** de données alloués au terminal par la **TBTP**, les données **ATM** ou **MPEG2-TS** peuvent être convoyées.

1.4 Évolution des satellites GEO

Grâce aux caractéristiques uniques du satellite en termes de déploiement, il apparaît comme une solution potentielle pour des services de plus en plus nombreux. Il est aussi souvent utilisé en interconnexion ou en liaison de secours. Néanmoins, les systèmes **DVB** standards sont peu adaptés à des scénarios maillés.

Pour résoudre ces problèmes, les satellites de nouvelle génération se focalisent sur de l’intelligence à bord permettant une plus grande flexibilité et évitant de repasser par la gateway dans un double bond. Des projets comme Amerhis ou plus récemment **ULISS (Ultra fast Internet Satellite Switching)** montrent l’attrait de l’intelligence à bord pour augmenter les capacités des systèmes satellites. Le projet **DIPCAST** a par exemple étudié un projet de commutation **ATM** à bord [28]. De même, le projet **Domino 2** de l’**ESA (European Space Agency)** étudiait un système en bande Ka avec **ATM** comme technologie de commutation embarquée [29].

Une autre avancée technique des satellites de nouvelle génération est le multi-faisceau permettant à un satellite de gérer plusieurs spots de taille plus petite et donc de partager plus efficacement les ressources entre les différents utilisateurs.

Des spécifications de l’**ETSI** décrivent le fonctionnement d’un système régénératif permettant de faire un réseau maillé entre les terminaux (type Amerhis) [30, 31]; le satellite joue alors le rôle de commutateur **MPEG2**. Les terminaux émettent en **MPEG2** sur **DVB-RCS** vers le satellite qui commute ces bursts sur un lien **DVB-S** en descente (voir figure 1.9). La requête de connexion vers un autre terminal se fait par le protocole **C2P (Connection Control Protocol)** vers le centre **NCC** [32]. Le gestionnaire **NCC** peut ainsi allouer différents bursts vers la bonne destination via la table **TBTP**. Ces timeslots

seront orientés par le traitement à bord du satellite sur le bon faisceau contenant le terminal destinataire. Ces spécifications permettent de concilier le fonctionnement du système DVB en étoile classique (star) avec un système maillé (mesh). Un autre système de satellite régénératif est décrit dans le dernier chapitre consacré au projet [ULISS](#).

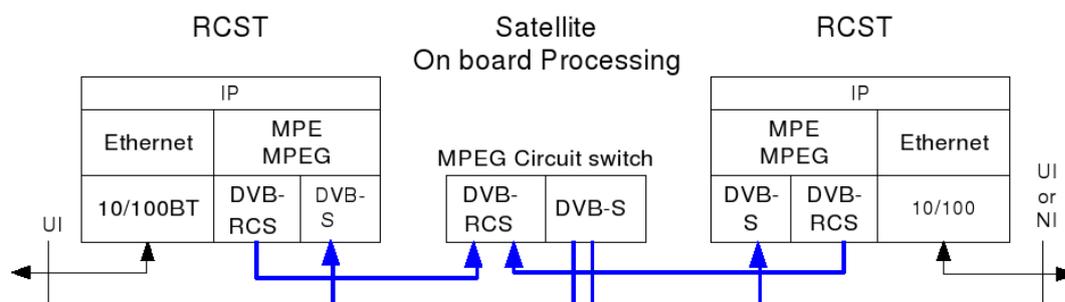


FIG. 1.9 – Architecture maillée type Amerhis

1.5 Conclusion

Dans cette partie, nous venons de décrire le fonctionnement des systèmes DVB existants en voie aller et voie retour, ainsi que l'évolution dans un cas régénératif. Dans le cadre de la convergence des réseaux existants, il apparaît que les systèmes DVB fondés sur la norme MPEG2 posent problème pour une intégration dans des systèmes réseaux terrestres.

En premier lieu, les architectures DVB découlent d'une architecture orientée vidéo en diffusion et montrent leurs lacunes pour l'encapsulation de données hétérogènes et pour des topologies de transmission plus symétriques. En effet, la notion de PID, par exemple, est loin de pouvoir régler un adressage complexe. De plus, la signalisation fondée sur les tables SI conserve une compatibilité avec MPEG2 qui rend son fonctionnement complexe.

Ensuite, l'ajout de DVB-RCS a ouvert de nombreuses possibilités pour le développement de services bidirectionnels. Néanmoins, le fonctionnement de la signalisation ajoute de la complexité aux tables existantes et l'architecture globale se retrouve avec une voie aller et une voie retour hétérogènes. Cette hétérogénéité est toutefois le lot de la plupart des réseaux d'accès. La structure protocolaire de DVB-RCS pose donc des problèmes pour l'interconnexion simple à des réseaux terrestres.

Les nouvelles architectures sur un satellite régénératif ne remettent pas en cause l'architecture globale. En effet, elles ont juste été modifiées pour prendre en charge un mode maillé à partir du protocole C2P. Dans ce cas, la compatibilité à MPEG2 complexifie le

fonctionnement de l'intelligence embarquée dans le satellite, notamment avec la nécessité de régénération des tables SI à bord (exemple Amerhis). Un commutateur [MPEG2](#) est un élément peu utilisé dans les réseaux terrestres, quand un satellite nécessite des technologies matures vu sa longévité.

Enfin, plus globalement, le monde des réseaux satellite a besoin d'une architecture convergente bien définie remettant en cause [MPEG2-TS](#) comme base de communication. Reprenant les idées du monde des télécommunications, les systèmes satellites existants ont souvent une approche plus en chaîne de transmission qu'en couches protocolaires. Une nouvelle architecture devrait bien séparer les différentes fonctions dans des niveaux protocolaires indépendants, gage de pérennité et d'évolutivité. La partie suivante fait donc le tour des architectures de convergence potentielles pour une évolution des réseaux par satellite.

Chapitre 2

Les architectures de convergence

2.1	Panorama historique	24
2.1.1	Monde des opérateurs de télécommunications	24
2.1.2	Monde informatique	26
2.1.3	Monde opérateur vidéo	27
2.2	Convergence des communications	27
2.2.1	Définition de la convergence	27
2.2.2	Caractéristiques générales de convergence	29
2.2.2.1	Structure protocolaire	29
2.2.2.2	Simplicité	29
2.2.2.3	Topologie distribuée	30
2.2.2.4	Intéropérabilité	30
2.2.2.5	Interconnexion	31
2.2.2.6	Qualité de Service	31
2.2.2.7	Sécurité	31
2.2.2.8	Gestion	31
2.3	Solutions de convergence satellite	32
2.3.1	Convergence des architectures réseaux	32
2.3.1.1	Solution DVB	32
2.3.1.2	Solution ATM	35
2.3.1.3	Solution Ethernet	37
2.3.1.4	Solution tout IP	39
2.3.1.5	Solution MPLS - MultiProtocol Label Switching	41
2.3.2	Convergence fixe mobile	44
2.3.3	Convergence par les services	45
2.3.3.1	Approche DVB	46
2.3.3.2	Approche IP	46
2.3.3.3	Approche IMS	47
2.4	Conclusion	47

Cette thèse porte sur la convergence dans les réseaux satellite. Il paraît donc essentiel de s'interroger sur cette notion de convergence et de dresser un panorama des différentes solutions existantes.

Généralement, un domaine de connaissance met un certain temps avant à converger sur des principes de base (exemple du courant alternatif). Au départ, l'objectif est très proche mais chaque pays, entreprise ou individu l'appréhende d'une façon différente. Il est nécessaire ensuite de converger vers un compromis entre les différentes parties lorsque vient le temps d'intéropérer et de réduire les coûts de production. Néanmoins, des raisons techniques, économiques et stratégiques font que ces convergences sont délicates.

Le monde des télécommunications et des réseaux est dans une phase de convergence importante et différents acteurs s'affrontent pour imposer leur solution. Le but de cette partie est d'exposer des solutions de convergence possibles en vue d'une application à des réseaux satellites.

La première partie fait tout d'abord un panorama de l'historique des réseaux de communication. Ensuite, nous dégagons plusieurs idées phares sur la convergence pour la construction d'architectures futures. Enfin, nous proposons différentes approches de convergence possibles pour le satellite dans l'état actuel des réseaux.

2.1 Panorama historique

Le besoin d'échange d'information entre les personnes a conduit au développement de divers moyens de communications avec des caractéristiques et des contraintes spécifiques à chaque service. Globalement, on peut dégager l'existence de trois mondes issus de ces services [33]. En premier lieu historiquement, nous décrivons le monde des opérateurs de télécommunications pour les services de téléphonie puis de transmission de données. Ensuite, le monde des réseaux informatiques a été porté par le développement exponentiel des capacités de traitement de l'information et par l'accroissement parallèle des capacités de transmission de l'information. Enfin, le monde des opérateurs vidéo pour le service de télévision s'est développé et est décrit plus précisément dans la partie précédente pour le médium satellite.

2.1.1 Monde des opérateurs de télécommunications

Les premiers services offerts par les opérateurs de télécommunications furent le télégraphe puis la téléphonie. Les premiers réseaux analogiques étaient purement dédiés et établissaient manuellement des circuits électriques entre les abonnés. Ces réseaux ont ensuite évolué en automatisant la création de ces circuits grâce à des commutateurs ou autocommutateurs téléphoniques.

Le besoin de transfert d'information autre que la voix est ensuite apparu et les opérateurs ont développés des réseaux de transport de données avec un système comme X.25 [34] se basant sur le modèle en couches OSI (Open Systems Interconnection) de l'ISO [35] (service Minitel en France par exemple).

Dans un premier souci de convergence, l'intégration des services sur le même support est venu par les réseaux RNIS (Réseaux Numériques à Intégration de Services) ou ISDN (Integrated Services Digital Network) au niveau du réseau utilisateur [36]. Sur le même support, des canaux sont réservés pour chaque service qui garde son fonctionnement dédié. Au niveau du réseau de l'opérateur, la révolution ATM ou B-ISDN (Broadband ISDN) fait adopter le transfert de paquets à la place de la commutation de circuits en intégrant véritablement les services sur les mêmes couches protocolaires [37, 38]. La synchronisation et le temps réel nécessaire à la téléphonie sont assurés grâce à l'utilisation de paquets de très petite taille, permettant de répondre à la problématique d'intégration des services de voix et de données aux caractéristiques très différentes.

Malgré les qualités d'ATM, le succès du "réseau de réseaux" Internet fondés sur la pile protocolaire TCP/IP oblige les opérateurs à le prendre en compte. IP est donc encapsulé dans ATM sans en utiliser toutes les possibilités. Les opérateurs perdent le contrôle de bout en bout des services et sont relégués à un rôle d'autoroutes de l'information sans contrôle sur les services Internet. La bataille entre les services existants des opérateurs et les services sur Internet est une clef de l'évolution des réseaux. Les opérateurs de télécommunications proposent des services "triple play" intégrés sur le même support. Avec le même abonnement, un accès Internet, téléphonique et télévisuel est possible.

En parallèle, les opérateurs de télécommunications ont développé des réseaux de téléphonie mobile. L'architecture GSM (Global System for Mobile communications) est une réussite mondiale, dédiée à la téléphonie et orientée opérateur. Avec l'avènement des évolutions 3G et des réseaux Wifi, les réseaux mobiles évoluent aussi vers une intégration des services autour d'IP.

Pour conclure, les réseaux d'opérateurs ont comme service de base la téléphonie mais ont dû évoluer vers des services multiples. Le service de base, la téléphonie, a de fortes contraintes, il faut un délai court et peu variable ainsi qu'une bonne synchronisation dans l'échange. En revanche, un taux de perte faible est acceptable ; il serait, de toute façon, trop long de corriger l'erreur de transmission par retransmission. Les réseaux des opérateurs de télécommunications doivent donc être synchrones pour répondre à ces caractéristiques. Ils ont un fonctionnement assez lourd et suivent des normes issues de l'ITU-T, de l'ETSI ou de l'ISO. Enfin, l'intelligence et la complexité se trouvent originellement dans le réseau avec des terminaux simples aux extrémités. Avec l'évolution convergente autour d'IP, les terminaux deviennent de plus en plus complexes se rapprochant du modèle des réseaux informatiques. Les réseaux d'opérateurs ont déjà beaucoup évolué dans le domaine de la convergence des services et des

supports mais il reste une marge importante d'évolution, notamment dans l'intégration des concepts issus du monde informatique.

2.1.2 Monde informatique

Les réseaux informatiques viennent de l'essor de l'électronique et du développement des ordinateurs. Le service de base est l'échange de données numériques de façon fiable et rapide. Les facteurs de fiabilité et de débit des réseaux sont donc prédominants par rapport au délai ou à la gigue. Les réseaux sont plus simples et orientés vers le transfert de paquets numériques. Les terminaux sont plus complexes que dans les réseaux opérateurs, capitalisant une grande part de l'intelligence de la communication.

Pour les réseaux informatiques, la notion de couche protocolaire est présente depuis les origines. Les couches de communications de bas niveau des réseaux locaux LAN (Local Area Network) sont issues de l'électronique et normalisées par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Les standards les plus utilisés sont Ethernet et Wifi [39, 40]. Ils sont respectivement les gagnants sans conteste pour les communications locales filaires et hertziennes sur les LAN. Ethernet a évolué énormément depuis ses débuts avec les commutateurs ethernet, le gigabit ethernet et même maintenant l'interconnexion à ce niveau.

Pour interconnecter tous ces réseaux informatiques hétérogènes, une architecture fût définie à partir d'expériences pour l'armée américaine autour du projet Arpanet. L'architecture TCP/IP de l'IETF s'impose rapidement dans les années 90 pour interconnecter tous les équipements informatiques par sa simplicité et sa adaptabilité [41]. Le protocole IP permet des services sans connexion au-dessus de tout type de protocoles sous-jacent. De plus, le fonctionnement de la standardisation à l'IETF est plus ouvert et moins lourd que celui à l'ISO ou à l'ITU. Le réseau des réseaux Internet se déploie sur cette base. De nombreuses communautés d'utilisateurs fleurissent et développent les services, des sociétés comme Google sont le résultat de cette démocratisation des réseaux. IP s'impose maintenant comme l'interface utilisateur unifiée du futur.

Originellement asynchrones, les réseaux informatiques sont maintenant confrontés à leur évolution vers d'autres services comme la voix ou la télévision. Le principe du surdimensionnement est de mise pour faire fonctionner les applications multimédias mais des principes de qualité de service comme ceux d'ATM permettraient d'optimiser l'utilisation de la bande passante et gagner en synchronisation. Pour gagner en sécurité et en qualité, la gestion et l'ingénierie de trafic des communications doivent évoluer et ne plus se cantonner sur les extrémités. La technique de relayage de labels MPLS est une proposition convergente de l'IETF qui a fait son chemin chez les opérateurs de télécommunications.

2.1.3 Monde opérateur vidéo

Les opérateurs vidéo ont mis en place des réseaux câblés, hertziens et satellites pour la diffusion d'images de télévision sur ces différents supports. Pour rentabiliser leurs équipements, les opérateurs utilisent une architecture de diffusion. De très nombreux utilisateurs peuvent donc accéder au même service sans impact sur le réseau.

Très longtemps analogiques, les années 1990 et 2000 voient arriver la numérisation des données vidéo. Elle est construite autour de la norme **MPEG2**. Les standards les plus utilisés dans le monde sont issus du groupe DVB sur lequel nous nous concentrons (voir chapitre 1). D'autres standards existent comme ceux issues de l'**ATSC** pour les USA ou **ISDB** pour le Japon [7, 8].

L'évolution de ces standards passe par l'intégration de nouveaux services avec une éventuelle voie retour. L'accès Internet devient un service potentiel remettant en cause l'architecture originelle orientée diffusion unidirectionnelle de canaux de télévision. La possibilité de la voie retour s'est imposée notamment avec le standard **UDLR** qui permet d'utiliser une ligne téléphonique pour le trafic issu de l'utilisateur. Des voies retour par câble comme **DOCSIS** ou **DVB-C** et satellite comme **DVB-RCS** font aussi leur apparition. L'évolution des couches de communications basses de ces standards issues de la norme **MPEG2** intervient également pour augmenter les débits en s'adaptant à la qualité instantanée du support. Globalement, l'aspect intégré entre le service de télévision et les couches de communications complique les évolutions. Dans ce contexte de convergence des services, le futur des architectures de communications des opérateurs vidéo se pose.

2.2 Convergence des communications

Compte tenu de ce contexte général des réseaux de télécommunications, se pose donc la question du futur des architectures de communications en général et le rôle du satellite en particulier. Les différents acteurs des réseaux semblent s'entendre sur un besoin de convergence des outils et des techniques de communication. En revanche, la forme et les critères de cette convergence restent largement ouverts. Cette partie s'attache à décrire ce que signifie cette notion de convergence et détaille ensuite les éléments importants pour une telle convergence à venir.

2.2.1 Définition de la convergence

Pour un but identique de transfert d'informations d'un point à un autre, les techniques de communications varient suivant des critères différents de services, de pays, d'objectifs, d'expériences ou encore de supports. La convergence est donc le moyen de gommer certaines de ces différences pour arriver à un fonctionnement compatible. Le but est de pouvoir accéder à un réseau de communication partout, à n'importe quel mo-

ment et avec n'importe quel terminal. Dans un contexte de mondialisation des échanges et d'intégration des services, le besoin d'échanger de façon plus simple sans avoir à changer d'appareil apparaît. La figure 2.1 donne un aperçu de la convergence des réseaux sous le prisme de la solution IP. Il apparaît que le protocole IP permet de mutualiser l'infrastructure réseau et également de regrouper différents services dans un terminal unifié.

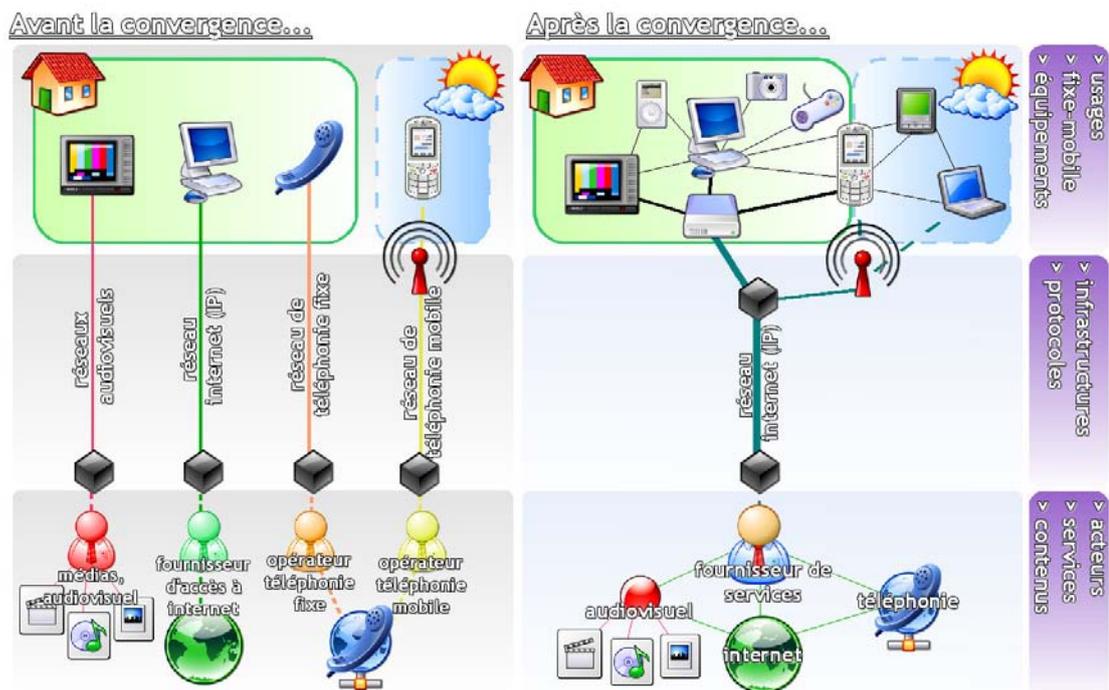


FIG. 2.1 – La convergence des réseaux par IP (source [42])

Dans ce monde des communications, les premières étapes importantes de la convergence sont la numérisation des informations et la communication par paquets. Nous les considérons comme acquises malgré de nombreux réseaux analogiques ou orientés circuits encore en vigueur. En effet, les convergences protocolaires reposent sur ces notions.

Du panorama historique précédent, nous pouvons maintenant dégager plusieurs idées phares pour le choix d'une architecture convergente parmi les différentes solutions existantes.

2.2.2 Caractéristiques générales de convergence

2.2.2.1 Structure protocolaire

Tout d'abord, une idée très importante est la notion de structure protocolaire des systèmes réseaux. Le standard d'interconnexion des systèmes ouverts **OSI** de l'**ISO** a modélisé cette notion d'abstraction via des couches protocolaires aux fonctions bien définies. Les différents plans de communications des modèles de réseaux opérateurs participent à cette répartition des fonctions pour répondre aux problèmes inter-couches. L'architecture **TCP/IP** permet de façon plus simple de séparer les services de la communication bas niveau par des couches d'abstraction homogènes. Tout cela permet d'avoir une organisation du réseau et concourt à la pérennité du système.

Certaines idées issues de ce travail de structuration protocolaire des différents modèles d'architectures de communication ressortent en résumé :

- Séparation des couches : La notion consistant à considérer différents niveaux de communications s'occupant de différentes fonctions est essentielle dans l'évolution des réseaux. En effet, cela permet de prendre en compte l'hétérogénéité des fonctionnements dans un modèle plus global. Par exemple, le fonctionnement d'une couche réseau et transport de type **TCP/IP** permet de développer des applications indépendamment des évolutions des communications physiques et particulières aux différents médias transporteurs.
- Séparation des plans : La notion de plan de communication permet de donner une autre dimension aux couches et permet de même une séparation des fonctionnalités. Les plans utilisés sont généralement le plan des données, le plan de contrôle ou de signalisation et le plan de gestion. Une approche en plans peut permettre de construire des fonctions difficilement implantables avec l'approche en couches. Par exemple, des mécanismes inter-couches (cross layer) permettant d'optimiser certains mécanismes transversaux peuvent s'appuyer sur le formalisme d'un plan de gestion pour éviter des violations de couches protocolaires, non désirables pour une pérennité des systèmes.

Pour résumer, le grand intérêt de la structuration protocolaire est donc l'indépendance et l'organisation des fonctionnements. Chaque élément peut être amélioré séparément et la solution globale est plus compréhensible. L'apprentissage de ces technologies en est d'autant facilitée.

2.2.2.2 Simplicité

Au vu de l'évolution des différents réseaux, une prime à la simplicité apparaît. Un exemple est le modèle **TCP/IP** qui a une approche simple et pragmatique ; en effet, ce modèle s'est développé rapidement grâce à sa simplicité d'accès. La mise au point des standards **RFC (Request For Comments)** relève d'une procédure plus simple, accessible

et souple que les standards [ETSI](#) ou les normes [ISO](#). De nombreuses communautés ont pu ainsi les utiliser facilement.

On peut souligner plusieurs caractéristiques qui conduisent à cette simplicité. D'abord, une large diffusion permet une large et rapide démocratisation. Ensuite, la structuration protocolaire concourt aussi grandement à cette simplicité, en organisant les fonctionnements. En fait, cette structure permet d'organiser la complexité générale du système. Enfin, cette approche de simplicité peut être le résultat d'un travail complexe de distanciation et de comparaison avec d'autres domaines. La notion de convergence cherche ainsi intrinsèquement à simplifier les fonctionnements en les rapprochant mais le parcours pour y arriver peut être complexe ; simplicité ne veut pas dire simpliste. Enfin, un protocole simple est plus facile à maintenir et à comprendre.

2.2.2.3 Topologie distribuée

Un autre concept important dans le futur des réseaux est la notion d'architecture distribuée. En effet, les topologies distribuées ont prouvé leur adéquation pour le passage à l'échelle au niveau des performances, de la sécurité, de la tolérance aux pannes ou de l'anonymat. On le voit dans l'exemple des systèmes pair à pair de téléchargement considérés comme très performants de tous ces points de vue. Les topologies maillées ou "mesh" sont amenées à se développer notamment dans le contexte satellite et il faudra répondre à ce besoin.

D'autre part, une topologie distribuée telle que celle d'Internet permet d'appréhender l'hétérogénéité des fonctionnements plus facilement. Cela oblige à considérer l'hétérogénéité comme paradigme plutôt que l'homogénéité. IP peut par exemple s'adapter à toutes les situations et garantit une topologie distribuée au niveau réseau. Cette notion distribuée oblige à considérer l'interopérabilité.

2.2.2.4 Intéropérabilité

L'interopérabilité est la possibilité de faire fonctionner des systèmes hétérogènes sur une base commune. En réseaux, l'interopérabilité peut reposer sur des standards qui sont un moyen de convergence fort. Deux produits ou systèmes sont intéropérables quand un ensemble suffisant des interfaces de fonctionnement sont définies et dans ces standards. L'interopérabilité est très importante dans de nombreux domaines où les produits sont construits par différents acteurs et doivent interagir. Vu la complexité et le nombre d'acteurs des systèmes de communication, elle est essentielle.

Un exemple est le [RTC \(Réseau Téléphonique Commuté\)](#) ou [PSTN \(Public Switched Telephone Network\)](#). Toutes les interfaces sont des normes gérées par l'[ITU-T](#). Il est ainsi possible de téléphoner sans s'occuper de la marque de téléphone de son correspondant ni des matériels utilisés par les différents opérateurs.

2.2.2.5 Interconnexion

Le principe d'interconnexion représente la capacité à pouvoir relier des réseaux différents et souvent hétérogènes. Cette caractéristique est très importante dans le cadre d'une convergence. En effet, il apparaît qu'il existe de nombreuses façons de communiquer en réseaux dépendantes de nombreux critères (pays, médium, services, ...) et qu'une convergence ne se fera pas uniquement par une homogénéisation des standards. Il faut conserver la possibilité de réseaux hétérogènes tout en permettant une interconnexion simple entre eux.

2.2.2.6 Qualité de Service

La **QoS (Quality of Service)** est une notion très importante dans les réseaux actuels. En effet, l'approche convergente par le protocole **IP** a un fonctionnement "best effort" et surdimensionne les ressources pour répondre à ce besoin en qualité de service des applications. Elle représente la prise en compte par le réseau ou les applications de critères comme la disponibilité, le débit, les délais de transmission, les taux de perte de paquets pour véhiculer un trafic donné.

Une prise en compte de cette **QoS** à un niveau global plutôt que de façon dédiée à un service est une gageure importante d'une convergence des réseaux.

2.2.2.7 Sécurité

La notion de sécurité dans les réseaux est de même primordiale et recouvre un grand nombre de fonctions : confidentialité, intégrité, disponibilité. Pour répondre à ces problématiques, des moyens d'authentification, de contrôle, de cryptage ou de surveillance peuvent être mis en place. De plus, la séparation des couches de communications permet de répondre aux différents problèmes de sécurité plus spécifiquement suivant le contexte (proche en proche ou bout en bout, service ou réseau). Globalement, la sécurité doit être prise en compte dans la conception même d'un système de convergence réseau.

2.2.2.8 Gestion

La gestion du réseau est aussi un élément très important pour l'évolution d'un réseau. Sans plan de gestion efficace et sécurisé permettant d'administrer le réseau, un déploiement de services est impossible. Un plan de gestion générique, performant et indépendant est donc un critère de qualité pour une convergence.

2.3 Solutions de convergence satellite

En vue de l'évolution des réseaux satellite, cette partie décrit différentes possibilités de solutions de convergence des réseaux de télécommunications. Ces solutions sont confrontées au monde satellite en vue d'étudier leur applicabilité à ces systèmes particuliers. Les solutions générales de convergence des réseaux de télécommunications sont séparées ici en trois types :

- **La convergence des architectures de réseaux** et de leur signalisation permet de gommer l'hétérogénéité des supports et de fournir des outils génériques aux couches hautes de communication.
- **La convergence fixe-mobile** permet de déplacer un terminal utilisateur vers n'importe quel réseau.
- **La convergence par les services** de bout en bout du fournisseur à l'utilisateur représente un fonctionnement intégrée dans les services eux-mêmes. Elle est essentielle pour le développement de services multi-opérateurs indépendants des différents supports.

Ces trois types de convergence peuvent interagir. La convergence des architectures réseaux et la convergence fixe mobile peuvent être imbriquées et vont directement influencer les possibilités de la convergence des services. En effet, l'adressage d'une architecture réseau pourra être conçu pour permettre une certaine mobilité et une architecture réseau proposant une certaine QoS pourra enrichir le fonctionnement d'un service. Nous séparons ces trois approches dans un souci de clarté et de compréhension de la convergence car elles répondent à des problématiques différentes. Nous nous concentrons surtout sur la convergence des architectures de réseaux car elle nous paraît plus importante et urgente, les autres convergences s'appuyant sur ses caractéristiques. Nous donnons néanmoins quelques idées prédominantes sur la convergence fixe-mobile et par les services.

2.3.1 Convergence des architectures réseaux

Cette partie se penche sur de possibles architectures de convergence des réseaux en considérant leur applicabilité au monde satellite.

2.3.1.1 Solution DVB

La première possibilité est la solution de convergence par MPEG2-TS liée à l'approche actuelle du groupe DVB. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, ce choix se fonde sur une technologie conçue pour le service de télévision. Au fur et à mesure des évolutions des besoins de cette architecture, l'encapsulation de données a été rendue possible au travers des mécanismes MPE puis ULE [20, 22]. L'architecture conçue au

départ pour un lien unidirectionnel a ensuite évolué pour prendre en compte une voie retour.

Techniquement, le système classique unidirectionnel repose sur un émetteur central (“gateway”) diffusant un flux continu de trames de 188 octets. Chaque trame contient un **PID** indiquant le type de flux. Un programme de télévision donné a un **PID** unique. Après avoir récupéré des tables de correspondance entre les programmes et les **PID** sur un flot identifié lui-même par un **PID** de signalisation particulier, un terminal client peut facilement lire le programme de télévision numérique demandé. Le système est donc simple pour cette application vidéo pour laquelle il a été conçu.

Pour répondre à un service de type Web au travers de cette architecture, les paquets **IP** à acheminer aux clients sont encapsulés dans une structure **MPE** ou **ULE** de niveau liaison de données avec des champs pour les adresses **MAC** et le type de protocole utilisé. Une correspondance entre les adresses **MAC** et les **PID** est nécessaire par un mécanisme statique ou des tables **INT**.

Dans le cadre d’une voie retour, les terminaux se partagent une ressource commune par un tramage **MF-TDMA** avec un mécanisme de requête dynamique de ressources (**DAMA**) régi par des tables de signalisation **MPEG2-TS** sur la voie aller, rendant ce fonctionnement dépendant des couches accès de la voie aller.

Cette architecture a encore évolué afin de prendre en compte des scénarios de réseaux maillés (“mesh”) par satellite permettant ainsi d’éviter un double bond pour des communications de terminal à terminal. Dans ce cadre, une architecture **MPEG2** a été développée dans un système appelé Amerhis envoyé dans un satellite Amazonas d’Hispatat [43, 44]. L’architecture de ce système a été unifiée et modifiée : la voie montante se fait en **DVB-RCS** et la voie descendante en **DVB-S**. Le satellite s’occupe du transfert entre les deux ainsi que de la génération des tables nécessaires au fonctionnement. Un autre système de commutation à bord fondé sur un commutateur temporel à bord est détaillé plus avant dans le chapitre 5.

Confrontons maintenant cette architecture aux différentes caractéristiques évoquées précédemment :

Structure protocolaire : Dans un contexte **DVB**, la séparation des couches n’est pas très claire. Le fonctionnement est intrinsèquement dépendant de **MPEG2-TS**. Il est difficile par exemple de faire évoluer **MPEG2-TS** indépendamment du service de télévision, rendant les couches basses très liées au service. La couche service n’est donc pas véritablement séparée de l’accès dans cette architecture.

Simplicité : D’un fonctionnement simple au départ, les standards **DVB** se sont complexifiés avec l’ajout de nombreuses évolutions rendant le système difficile à implanter. Dans les faits, peu de systèmes prennent en charge tous les mécanismes des normes **DVB**. On peut donc considérer que la convergence des services sur une architecture **DVB** est complexe.

Topologie distribuée : Fondée au départ sur une topologie naturelle en étoile, les be-

soins de communications pair à pair entre terminaux ont fait évoluer l'architecture vers une topologie plus équilibrée. Néanmoins, le fonctionnement en voie aller et voie retour est sous-jacent, ce qui induit souvent une topologie centralisée.

Intéropérabilité : Les systèmes **DVB** de télévision dédiés sont souvent intéropérables entre eux, excepté pour certains systèmes de sécurité fondé sur le système **DVB-CA (DVB - Conditional Access)** qui peuvent être propriétaires. L'intégration de services divers et le fonctionnement en voie retour engendrent une multiplicité de fonctions, limitant l'intéropérabilité, notamment pour l'encapsulation de trafic **IP** de façon non homogène.

Interconnexion : La capacité d'interconnexion des réseaux **DVB** est facile dans des réseaux hétérogènes basé sur **MPEG2** (support hertzien **DVB-T**, câble **DVB-C**, satellite **DVB-S**). Néanmoins, l'interconnexion avec des réseaux terrestres véritablement différents de type **ATM** ou **IP** reste complexe et peu adaptée. Les réseaux **DVB** n'ont pas été conçus comme un véritable outil d'interconnexion.

Sécurité : La sécurité des systèmes **DVB** est cantonnée dans le système **DVB-CA** permettant de crypter les communications. Le problème du système tient dans la protection de l'algorithme secret plutôt que dans un système de clef. Le seuil de protection était adapté pour un système de télévision payant, limitant l'intrusion mais il ne suffit pas pour des services plus confidentiels. Les mécanismes d'authentification sont prévus pour l'accès à la voie retour. Néanmoins, ces mécanismes ne sont pas construits dans une véritable structure protocolaire. Toutes les fonctionnalités sont regroupées dans les tables **MPEG2**. Il reste possible d'utiliser un cryptage des données de plus haut niveau.

QoS : La qualité de service existe bien pour les flux vidéos ainsi que pour la voie retour mais n'est pas considérée de façon générique pour n'importe quel service. En effet, un ordonnancement des différents services pourra être appliqué au niveau de la gateway pour répondre à cette problématique mais restera local au système satellite. Une qualité de service de bout en bout n'est pas gérée. De plus, cette qualité de service s'apparente à un mode circuit rendant difficile l'intégration de trafic sporadique sur ce type de réseau.

Gestion : Le plan de gestion existe aussi mais se retrouve, de la même façon, mélangé dans les tables de signalisation avec des fonctions de contrôle. Il est ainsi dépendant du réseau satellite, sans liaison possible avec d'autres réseaux hétérogènes.

En conclusion, on peut dire que l'architecture **DVB** répond parfaitement à son objectif premier de service dédié de télévision mais répond plus difficilement à d'autres besoins. La convergence par ce système n'est pas optimale ; en effet, les différentes fonctionnalités ne sont pas bien séparées et l'évolutivité du système s'en retrouve limitée. Son plus gros atout est le poids de l'existant poussant à rester compatible et à ne pas enlever la brique de base **MPEG2-TS** de ce système.

2.3.1.2 Solution ATM

Une autre solution de convergence issue des réseaux terrestres est le standard **ATM**, choix intégré dans le standard **DVB-RCS** comme couche de liaison par défaut.

À l'origine, **ATM** était censé être la technologie de convergence permettant le **B-ISDN** qui remplacerait le **RTC** existant. Les standards **ATM** proposent donc des définitions pour les couches de niveaux 1, 2 et 3 du modèle **OSI** classique en 7 couches [37]. Ils décrivent ainsi une architecture complète de communication de bout en bout réalisant la convergence entre un système synchrone de type **SDH (Synchronous Digital Hierarchy)** et un système paquet asynchrone grâce à l'envoi de petites cellules de données de 53 octets [38]. Ce découpage des différents services en petits paquets permet d'éviter qu'un paquet important gêne l'envoi de données synchrones de voix par exemple.

L'architecture d'un système **ATM** est orientée connexion. Pour transmettre des informations entre deux nœuds via un réseau **ATM**, il faut réserver un numéro de **VPI (Virtual Path Identifier)** et de **VCI (Virtual Channel Identifier)** identifiant le canal de communication entre les deux nœuds dans le réseau. La pile protocolaire de la figure 2.2 récapitule les différentes couches : les services sont encapsulés dans une couche d'adaptation **AAL (ATM Adaptation Layer)** donnant une interface commune aux couches supérieures et gérant la segmentation et le réassemblage des informations en cellules. Le transport de bout en bout se fait par ces cellules **ATM** commutées dans chaque nœud. Une couche physique adapte ces cellules **ATM** au support.

L'architecture **ATM** n'a pas eu le succès escompté en raison de la convergence de l'interface utilisateur vers la solution du monde **IP** et sert généralement de couche de liaison de données. Les réseaux **ATM** des opérateurs sont ainsi utilisés comme réseaux transporteurs du trafic **IP**. L'intégration entre le monde **IP** et **ATM** est faite par l'approche **MPLS** (voir plus loin).

Couches Supérieures	Fonctions des niveaux supérieurs Exemples : Applications de l'utilisateur, Protocoles IP, IPX, etc Processus Lan Emulation
Couche AAL	CS SAR Convergence Segmentation/ré-assemblage des flux d'information en cellules (48 octets de données)
Couche ATM	Contrôle générique de flux Génération/Retrait de l'en-tête de la cellule Multiplexage/Démultiplexage des cellules Translation du couple VPI/VCI
Couche Physique	TC PM Génération du checksum sur l'en-tête (HEC) Adaptation au support de transmission Synchronisation bit. Adaptation au média

FIG. 2.2 – Récapitulatif de l'architecture **ATM** (src : [45])

Dans le monde satellite, **ATM** a aussi été vu comme une bonne solution pour l'architecture réseau, utilisé notamment pour le fonctionnement par défaut de la voie retour [46]. De même, les performances **ATM** par satellite sont analysées dans le projet CATALYST [47]. Enfin, de nombreuses études analysent les systèmes **ATM** embarqués dans le satellite pour des réseaux maillés [48, 49, 50].

Comme précédemment, étudions les différentes caractéristiques.

Structure protocolaire : L'approche **ATM** issue de l'approche **OSI** et des réseaux des opérateurs est très organisée et la séparation des fonctionnalités est claire. L'intégration de différents services est prévue dès sa conception.

Simplicité : Le fonctionnement est donc bien organisé simplifiant l'implantation. Le nombre de normes et de possibilités en font néanmoins une architecture complexe à maîtriser, développée uniquement dans les réseaux opérateurs ayant les moyens de former le personnel à ce standard. Les plans de contrôle et de gestion sont notamment complexes. Avec l'approche **IP** dominante, de nombreux mécanismes sont redondants et alourdissent l'ensemble.

Topologie distribuée : La topologie des réseaux **ATM** est maillée permettant une distribution des fonctionnalités dans le réseau. Néanmoins, par son fonctionnement en mode connecté, la topologie n'est pas complètement distribuée, les communications passant toujours sur le circuit virtuel réservé. On se trouve dans un intermédiaire entre un réseau **IP** complètement distribué et un réseau centralisé fixe. En effet, les circuits peuvent être reroutés sur un autre chemin, reposant néanmoins sur un mécanisme plus lourd et complexe que dans une approche **IP**.

Interopérabilité : Pour ce qui est de l'interfonctionnement de systèmes **ATM**, l'interopérabilité est respectée grâce à des standards décrivant parfaitement les fonctionnements.

Interconnexion : L'interconnexion de réseaux hétérogènes est possible mais complexe. **IP** s'est révélé être un outil d'interopérabilité plus simple et l'a supplanté pour l'interface utilisateur de bout en bout.

Sécurité : La sécurité n'a pas été envisagée complètement dans les réseaux **ATM**, en raison de son déploiement dans les cœurs de réseaux moins sensibles. L'approche connectée peut permettre néanmoins de simplifier sa gestion par la négociation de paramètres à la connexion. L'organisation des différentes couches de communication facilite aussi son déploiement.

QoS : La Qualité de service est inhérente à l'architecture **ATM** avec les différentes classes **AAL** de transport. C'est un des premiers réseaux permettant l'intégration de services aussi différents que la voix synchrone et les données asynchrones.

Gestion : La gestion fait aussi partie intégrante des réseaux **ATM** orientés opérateurs.

L'approche **ATM** comme outil de convergence satellite est très intéressante et a été considérée dès les débuts des réseaux **ATM**. La voie retour **DVB-RCS** s'appuie

d'ailleurs sur ce standard par défaut, signe de l'influence de cette approche au moment de la standardisation. Cette approche est toujours valide et a permis de résoudre de nombreux problèmes d'intégration.

Néanmoins, **ATM** était vraisemblablement trop complexe en particulier en termes de signalisation et trop orienté opérateur pour s'imposer sur tous les systèmes. Les réseaux locaux ainsi que les réseaux informatiques ont propagé l'interface **IP** comme paradigme. L'adoption d'**IP** comme interface commune des services a relégué **ATM** dans les réseaux opérateurs. Une convergence entre **IP** et **ATM** est fournie par l'approche **MPLS**.

2.3.1.3 Solution Ethernet

Une autre approche existant dans les réseaux actuels est la convergence par Ethernet, le standard de communication unifié des réseaux locaux filaires. A la suite de nombreuses évolutions, le protocole Ethernet est sorti du cadre strict des **LANs**.

Une approche appelée **UETS (Universal Ethernet Telecommunications Service)** se propose ainsi de déployer l'approche Ethernet et son adresse **MAC** dans les réseaux opérateurs. L'adresse **MAC** sert à la commutation de bout en bout grâce à un bit indiquant le caractère locale ou universelle de l'adresse (bit U/L). L'approche est simple et compatible avec **IP**. Au lieu d'avoir des routeurs gérant mal les capacités de traitement au cœur des réseaux, le but est d'utiliser des commutateurs Ethernet pour simplifier l'architecture. Cette architecture est standardisée par l'**IEEE [51]** et J. M. Barroso a décrit cette architecture et ses intérêts dans plusieurs publications [52, 53, 54]. La figure 2.3 montre l'architecture **UETS** ; on voit que la couche **MAC 802.3** sert de référence pour différents types de trafic : encapsulation **IP** directe en mode best effort ou encapsulation **LLC (Link Layer Control)** en mode connecté.

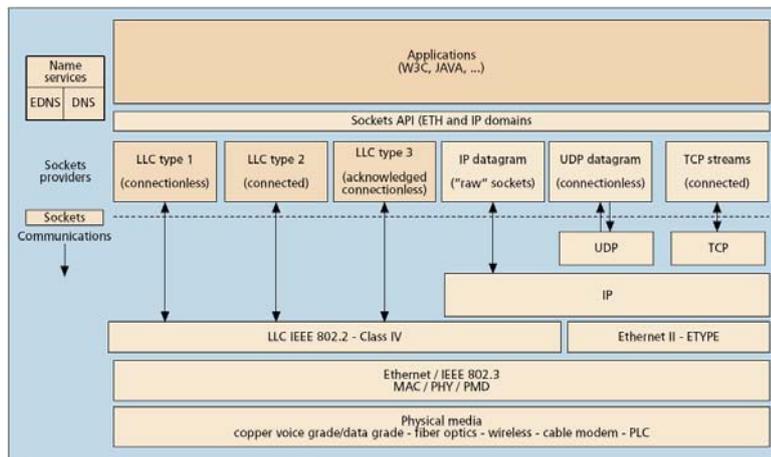


FIG. 2.3 – Architecture **UETS** (src : [52])

Dans le cadre du satellite, la littérature est très peu abondante voire inexistante sur

l'adoption d'Ethernet comme standard de convergence de base. Néanmoins, nous pouvons dégager les caractéristiques d'une telle opportunité :

Structure protocolaire : Chaque couche de communication et les fonctions associées sont bien délimitées. Les services sont abstraits par des couches de communications d'intégration au support.

Simplicité : L'approche est très simple en reprenant les paradigmes des réseaux locaux et en les étendant. On se retrouve avec une simplicité d'interconnexion et des équipements simples à développer, Ethernet étant déjà déployé partout. Cependant, l'intégration de services IP contraints comme la VoIP (Voice over IP) peut poser des problèmes pour une utilisation de bout en bout.

Topologie distribuée : Ethernet repose sur un réseau maillé où chaque client a une capacité de transmission égale. Un système pair à pair est complètement envisageable.

Interopérabilité : L'interopérabilité des systèmes Ethernet a été prouvée par la pratique ; néanmoins, l'ajout de fonctionnalités dans UETS peut compliquer cette interopérabilité.

Interconnexion : Cette approche part aussi d'un principe d'homogénéisation des réseaux par la technologie d'Ethernet comme pour ATM. A ce niveau, la gestion de protocoles hétérogènes n'est pas assurée comme avec IP. L'interconnexion se ferait par l'homogénéisation des fonctionnements.

Sécurité : La sécurité d'Ethernet était cantonnée à des réseaux locaux. L'usurpation d'adresse MAC avait, par exemple, un impact simplement local. L'élargissement du périmètre de cette adresse pose d'autres problèmes à prendre en compte. L'organisation des fonctions en couches peut toujours aider à la gestion de la sécurité.

QoS : La qualité de service est utilisée dans de nombreux commutateurs Ethernet ; elle repose souvent au départ sur une approche Diffserv et le champ TOS (Type of Service) d'IP au départ [55]. La qualité de service entre commutateurs Ethernet peut être échangée via le champ CoS ajouté au niveau d'un tag de la trame [56]. Son utilisation de bout en bout peut rester problématique et doit être étudiée plus avant (RSVP peut être envisagé).

Gestion : Le plan de gestion de ces réseaux repose la plupart du temps sur le système classique des réseaux IP : SNMP [57]. Ce point est aussi à développer pour la gestion de grands réseaux.

L'approche Ethernet est très intéressante du point de vue théorique pour simplifier la convergence des réseaux usagers ou d'entreprise avec les réseaux opérateurs et ainsi optimiser les couches protocolaires. De nombreux réseaux opérateurs commencent à utiliser cette approche pour leurs réseaux d'accès voire leurs réseaux métropolitains. Cette

approche gère néanmoins difficilement l'hétérogénéité des différents réseaux transporteurs. L'utilisation d'**UETS** de bout en bout au travers de nombreux réseaux semble difficilement pouvoir supplanter l'approche **IP**. L'approche reste à approfondir et des études supplémentaires sont nécessaires.

2.3.1.4 Solution tout IP

Le principe de cette approche tout **IP** est de simplifier drastiquement les couches basses en les cantonnant à du transport proche en proche (Ethernet pour les **LANs**) et de concentrer les fonctions réseaux dans **IP**. L'approche pousse à développer des tétrarouteurs ou pétarouteurs au cœur des réseaux opérateurs, la recherche étant très active pour optimiser et construire ce type d'équipement.

L'approche tout **IP** encapsule les services en paquets **IP** via les protocoles **IETF** classiques **TCP**, **UDP (User Datagram Protocol)** voire **RTP (Real-Time Transport Protocol)** [41, 58, 59, 60]. De plus, la qualité de service peut être gérée grâce au champ **TOS** dans une approche Diffserv [55]. L'approche Intserv rajoutant un mode connecté via le protocole **RSVP (Resource ReSerVation Protocol)** a prouvé son inefficacité pour le passage à l'échelle dans de grands réseaux [61, 62]. Les paquets **IP** sont donc les éléments de convergence du réseau dans cette approche et sont encapsulés dans des couches 2 hétérogènes adaptées aux différents supports de transmission.

Le choix peut aussi se faire sur la version 4 ou 6 du protocole **IP**. **IPv4** est le plus déployé et reste le protocole du réseau Internet mondial. **IPv6** garde la plupart des acquis d'**IPv4** en l'améliorant grâce notamment à des adresses plus longues, au routage hiérarchique, à la gestion de la mobilité, ou à l'autoconfiguration simplifiée. Il n'apporte néanmoins pas une révolution totale au paradigme **IP**. Les intérêts de la version 6 n'ont pas encore fait basculer l'Internet, par exemple.

Dans le cadre du satellite, cette approche a été considérée dans plusieurs projets et études. L'intégration d'**IP** sur la voie aller sur **MPEG2-TS** se fait normalement grâce au mécanisme **MPE** [20] ou **ULE** [22] plus efficace (voir le chapitre 1). Une étude montre que dans une approche orientée tout **IP**, il est plus efficace d'encapsuler directement dans **MPEG2-TS** les paquets **IP** [63], quitte à perdre la compatibilité avec les protocoles existants. Par ailleurs, le projet **SATSIX** se place dans ce travail de convergence par le protocole **IPv6** [64]. Ce projet cherche à montrer que les systèmes satellites peuvent offrir une solution simple et rapide pour déployer des services hétérogènes.

La problématique du tout **IP** dans un cadre de satellite régénératif a aussi été étudiée. Dans le cadre d'un programme militaire, Cisco a déjà développé une plate-forme **IP** embarquée pour augmenter la flexibilité du système de communications pour les forces au sol. Les procédures classiques d'un routeur **IP** ont été simplifiées pour répondre aux contraintes satellitaires [65]. Considérant les problèmes de **TCP** dans le contexte satellite, une étude a même considéré un proxy **TCP** embarqué [66]. Cette approche semble néanmoins loin d'être mise à bord d'un satellite.

Comme pour les autres approches, nous énumérons les différentes caractéristiques de convergence :

Structure protocolaire : L'approche tout **IP** abstrait bien les services des couches d'accès. De plus, les différentes fonctions sont bien séparées fonctionnellement, même si certaines entorses à l'indépendance entre les protocoles existent (**TCP/IP**). L'approche est moins structurée qu'une approche **ATM** par exemple.

Simplicité : L'approche tout **IP** est une approche pragmatique (comme Ethernet) et assez simple. Elle se propose de simplifier les couches accès à leur strict minimum pour concentrer les fonctions réseaux dans la couche **IP**. De plus, la standardisation **IETF** accélère l'accès aux standards dans un fonctionnement plus direct.

Topologie distribuée : Le choix de route étant fait à chaque nœud, une approche tout **IP** distribue complètement le trafic de façon très flexible. Les réseaux pairs à pairs fonctionnent parfaitement sur Internet prouvant le caractère distribué de l'architecture.

Intéropérabilité : **IP** est considéré comme le protocole permettant de faire intéropérer de très nombreux équipements. Il a de plus la qualité de ne pas avoir de prérequis sur les réseaux sous-jacents. L'intéropérabilité est donc très bonne avec un système tout **IP**.

Interconnexion : **IP** a prouvé être un bon outil d'interconnexion entre réseaux hétérogènes, notamment dans la création du "réseaux de réseaux" Internet.

Sécurité : La sécurité des protocoles de l'Internet, considérée comme faible au départ, a su évoluer fortement pour répondre aux différents besoins pratiques. De nombreuses approches existent comme les mécanismes **IPsec (IP Security)** permettant de crypter les communications au niveau **IP** [67].

QoS : La qualité de service est implantée dans les mécanismes Diffserv ayant prouvé leur capacité à prioriser des trafics. Néanmoins, l'ingénierie de trafic est moins développée que dans un système **ATM** par exemple.

Gestion : Le plan de gestion repose aussi sur le système classique des réseaux **IP** au travers du protocole **SNMP** [57]. **IP** étant un outil d'interconnexion, la gestion des grands réseaux d'opérateurs est ainsi mise en place à un niveau plus bas (par exemple **ATM**) pour chaque système autonome.

L'approche tout **IP** est un bon choix pour un système convergent car elle a le mérite de gérer l'hétérogénéité des supports comparativement à l'approche **ATM** ou Ethernet. Construit comme une couche "best effort" simple, elle a néanmoins des problèmes pour gérer une ingénierie de trafic. La qualité de service est de plus peu déployée au niveau **IP** ; elle doit s'appuyer sur des mécanismes sous-jacents. **IP** semble être devenu le choix incontournable pour l'interface utilisateur mais n'est pas encore l'outil unique de convergence des architectures des réseaux d'opérateurs.

2.3.1.5 Solution MPLS - MultiProtocol Label Switching

MPLS a été construit comme un compromis entre l'approche ATM et l'approche IP. Reprenant la structure de chemins virtuels d'ATM, la signalisation a été modifiée pour une approche IP. Les adresses IP servent directement pour le routage des chemins.

Plus qu'un protocole, MPLS est plus une technique de virtualisation générique des systèmes de transport opérateurs. Cette commutation multi protocolaire de labels réunit les techniques de commutation ATM ou Frame Relay autour d'un label générique. MPLS se situe entre le niveau 3 et le niveau 2 du modèle OSI et est standardisé par l'IETF [68].

Nous décrivons le fonctionnement d'un réseau MPLS classique à l'entrée du réseau (figure 2.4) au cœur (2.5) et à la sortie (2.6) [69].

Entrée du réseau MPLS :

1. Lorsqu'un paquet entre dans un nuage MPLS, il est pris en charge par un routeur de label d'entrée "ingress" appelé LER (Label Edge Router).
2. En fonction de la classe de trafic FEC (Forwarding Equivalence Class), le LER consulte la table de commutation.
3. Le label associé est ajouté au paquet (fonction PUSH).
4. le paquet est enfin transmis au nœud suivant.

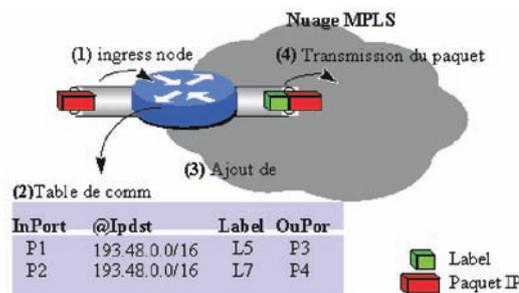


FIG. 2.4 – Entrée du réseau MPLS

Cœur du réseau MPLS :

1. Le paquet arrive alors sur un routeur commutateur de cœur appelé LSR (Label Switch Router).
2. A partir la table de commutation des labels LIB (Label Information Base), le routeur trouve le prochain label à appliquer.
3. Le LER effectue ensuite un échange des labels et une mise à jour du TTL (Time To Live) pour éviter les boucles (fonction SWAP).
4. Le paquet est envoyé vers le nœud suivant.

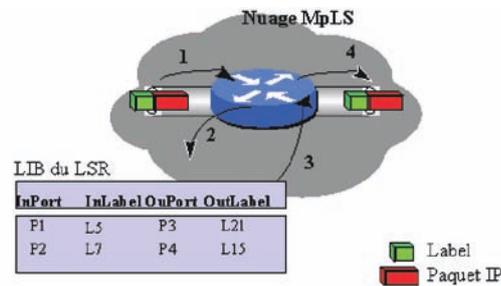


FIG. 2.5 – Cœur du réseau MPLS

Sortie du réseau MPLS :

1. Le paquet arrive sur un LER “egress” de sortie.
2. Le label est retiré du paquet (fonction POP). Le paquet a été transporté de façon transparente sur un réseau générique.

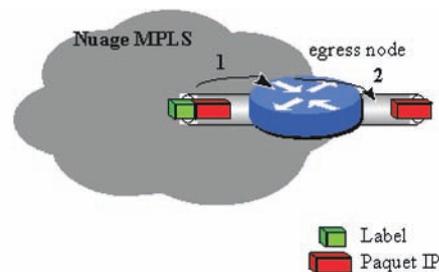


FIG. 2.6 – Sortie du réseau MPLS

La mise à jour des labels se fait via une signalisation de type LDP (Label Distribution Protocol) [70] ou son évolution CR-LDP (ConstRaint based LDP) [71]. Un autre protocole de signalisation RSVP-TE (RSVP - Traffic Engineering) fondé sur RSVP a vu le jour pour la réservation des chemins MPLS LSP (Label Switch Path) [72]. L'approche RSVP-TE est maintenant la solution la plus courante, il a été adopté par l'IETF en 2003 [73]. Une réservation de labels se fait par une demande de l'egress vers l'ingress de LSR en LSR avec des messages de demande de réservation (RESV). L'ingress confirme en retour la réservation par des messages de confirmation du chemin réservé à l'aller (PATH).

L'évolution de MPLS a aussi suivi celle des réseaux optiques et l'approche GMPLS (Generalized MPLS) a été définie en généralisant l'espace de commutation du label. GMPLS permet la commutation par longueur d'onde, par intervalle temporel ou par interface physique. Chacun de ces domaines peut être à son tour représenté par un label, unifiant le plan de contrôle de réservation de ces ressources [74].

Dans le cadre satellite, les études ne sont pas nombreuses. Une étude des débits de réseaux **MPLS** sur satellite **GEO** montre que les performances sont similaires à un réseau classique [75]. En revanche, **MPLS** a été utilisé dans un cadre **LEO** sur des constellations de satellites [76, 77].

Nous décrivons de même les caractéristiques de convergence :

Structure protocolaire : L'approche conjugue les intérêts d'**IP** et de **ATM**, permettant une double abstraction entre les couches hautes par **IP** et par les couches basses via la généralisation de commutation par label. La généralité est complètement assurée dans cette approche. En effet, la possibilité d'utilisation de protocoles de réservation de labels différents prouve bien l'indépendance des fonctions.

Simplicité : Le principe de généralisation de label permet une simplification de l'accès à des réseaux hétérogènes. Néanmoins, l'approche **MPLS** reste assez complexe dans ses possibilités et sa signalisation. Elle est peu déployée dans les réseaux d'accès pour cette raison. En revanche, un sous-ensemble de **MPLS** appelé **T-MPLS (Transport MPLS)** a été standardisé en vue de son utilisation dans les réseaux d'accès [78].

Topologie distribuée : La topologie ressemble à celle d'**ATM**. Si les différents éléments du réseau ne choisissent pas en toute indépendance la route des paquets, la topologie n'est pas non plus centralisée. Les fonctions peuvent être distribuées. L'utilisation de réseaux **MPLS** pour la création de **VPN (Virtual Private Network)** par la technique **VPLS (Virtual Private LAN Service)** montre sa flexibilité d'utilisation.

Interopérabilité : De même que le standard **IP**, **MPLS** a été conçu avec le souci de faire interopérer différents équipements et différents réseaux. En revanche, la complexité des différentes évolutions de **MPLS** et de sa signalisation fait que les réseaux **MPLS** ne sont pas toujours compatibles entre eux.

Interconnexion : L'interconnexion entre des réseaux hétérogènes est prévu dans sa conception même. Elle semble néanmoins plus complexe que dans une approche tout **IP**.

Sécurité : Conçu et implanté dans les réseaux des opérateurs, **MPLS** répond aux besoins de sécurité tout comme pour l'approche **ATM**. L'approche **MPLS** permet notamment d'apporter à l'approche **IP** la sécurité du mode connecté d'**ATM**. Le fait que de nombreux réseaux d'opérateurs ait adopté **MPLS** garantit sa robustesse.

QoS : **MPLS** a été de même conçu pour répondre aux problèmes d'ingénierie de trafic des couches **IP**. La qualité de service peut facilement être réservée par les protocoles de signalisation dans une approche Intserv pour des flux agrégés. Une approche de type Diffserv pourra ensuite être utilisée en parallèle dans chaque **LSP**.

Gestion : La gestion peut aussi s'appuyer sur **SNMP** [57]. Un protocole appelé **LMP** (**Link Management Protocol**) a été ajouté pour s'occuper dans le plan de gestion des réservations de chemins permanents ou encore vérifier la connectivité des liens physiques [79].

L'approche **MPLS** est un bon compromis entre une approche **ATM** répondant aux besoins du réseau satellite et l'approche tout **IP**, standard de fait de l'interface utilisateur. Elle souffre encore de problèmes de complexité ou de signalisation mais s'impose largement dans les réseaux opérateurs. Pour preuve, l'**ATM** Forum gérant les évolutions des standards **ATM** a été renommé **MPLS** forum. **MPLS** s'inscrit donc comme le digne héritier de cet effort important de convergence des services.

2.3.2 Convergence fixe mobile

La convergence fixe-mobile représente la possibilité pour un équipement de se connecter de façon homogène à un réseau fixe aussi bien qu'à un réseau mobile, malgré les caractéristiques différentes des deux réseaux. On appelle cette notion **ubiquité** qui recouvre deux notions (figure 2.7) : on peut séparer le **nomadisme** qui désigne la capacité pour l'utilisateur de se connecter depuis différents lieux sans maintenir de communication active pendant le déplacement et la **mobilité** qui permet de rester connecté pendant le déplacement. Le **nomadisme** est plus simple à prendre en charge que la **mobilité** qui impose aux réseaux des contraintes temporelles plus importantes.

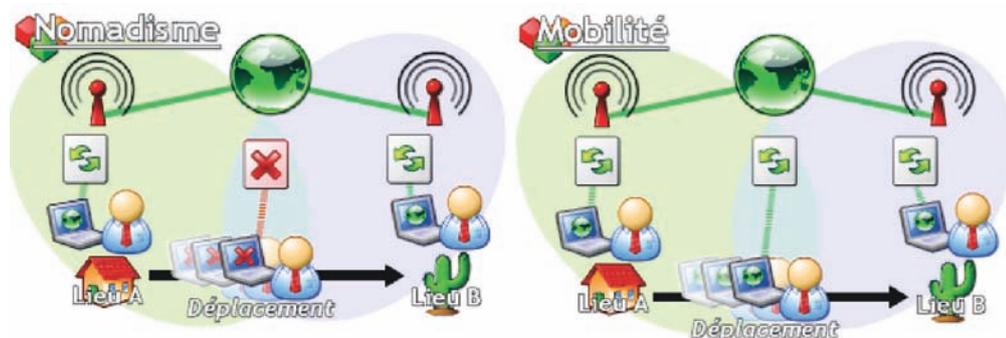


FIG. 2.7 – Nomadisme et mobilité (src : [42])

Le nomadisme ne pose pas de problèmes majeurs d'implantation ; on peut le considérer à deux niveaux :

- Au niveau des services, la convergence s'est déjà faite autour des services Web. L'**URI** (**Uniform Resource Identifier**) est devenue l'adresse indépendante du réseau. On peut se connecter de n'importe quel endroit à Internet pour accéder à ses mails ; le service est bien nomade.

- Au niveau réseau notamment en entreprise, le nomadisme passe par des réseaux privés virtuels (VPN) assurant un accès sécurisé depuis n'importe quel réseau à son entreprise. Tout se passe comme si on se trouvait physiquement dans l'entreprise avec deux niveaux d'adressage, celui du tunnel et celui du réseau privé créé au dessus.

La problématique de convergence de la mobilité se concentre dans le transfert automatique (handover) entre deux réseaux différents qui doit être assez rapide pour ne pas perdre la connexion. Pour l'application téléphonique par exemple, la norme GSM fonctionne parfaitement et garantit un temps minimal pour passer d'une cellule à une autre du réseau. Au contraire, dans le cadre d'un réseau Wifi non dédié à un service, le passage d'une cellule à une autre n'est pas conçu pour converger rapidement, bien qu'il puisse être assez rapide dans certains cas. On peut ainsi considérer la mobilité à deux niveaux :

- L'approche IEEE 802.21 définit un système de handover de niveau 2 indépendamment des médias. Il consiste à rajouter des primitives génériques dans chaque réseau permettant ainsi leur interopérabilité. L'approche semble néanmoins complexe à mettre en place [80].
- Une autre approche à un plus haut niveau est Mobile IP. Elle permet de conserver une adresse IP fixe quel que soit le réseau sous-jacent visité. Un nœud mobile détient son adresse fixe indépendante du réseau traversé et une adresse qui évolue suivant les réseaux traversés [81, 82]. Cette solution n'étant pas assez rapide pour assurer un suivi de connexion, des solutions pour accélérer les handovers ont été développées comme l'approche FMIP (Fast handover for Mobile IP) [83, 84].

Dans le monde satellite, un service de télévision mobile DVB-SH (DVB - Satellite services to Handhelds) entre des réseaux hétérogènes terrestre et satellite a été normalisé par l'ETSI à la suite du travail sur le standard de télévision mobile terrestre DVB-H [85] [86]. Le groupe DVB permet donc une mobilité pour un service dédié. Il ne gère pas néanmoins la convergence fixe mobile entre des standards hétérogènes. L'application d'un handover de type 802.21 est envisageable mais nécessite un effort conséquent d'adaptation.

Cette problématique de la convergence des systèmes fixes et mobiles est une thématique importante qu'il est nécessaire d'étudier dans un cadre globale de convergence. Néanmoins, notre travail ne s'est pas apesanti sur cet axe, considérant la convergence des architectures de réseaux un préalable plus important dans le cadre satellite.

2.3.3 Convergence par les services

La convergence des services représente le rapprochement des implantations des différents services autour d'un socle commun. En pratique, cela peut se caractériser par une signalisation commune aux différents services. Le but est d'avoir un fonctionnement intégré de différents services intégrés. Par exemple, une convergence des services peut

permettre d'avoir une tarification unique et un fonctionnement intégré pour un service de vidéoconférence enrichie de messagerie instantanée ou d'un tableau blanc interactif. Elle dépend évidemment des capacités des couches réseaux sous-jacentes. Plusieurs approches existent dans le monde des réseaux, décrivons les brièvement.

2.3.3.1 Approche DVB

L'approche **DVB** représente à son niveau une convergence des services dans un fonctionnement commun. Les tables de signalisation **SI** unifient l'accès aux différents services pour les terminaux utilisateurs. Dans un cadre de réseau uniquement **DVB**, il est possible de diffuser un programme vidéo sur différents types de réseaux : satellite, hertzien, câble. En revanche, cette approche se concentre sur le service de télévision et l'intégration d'autres services reste lourd.

2.3.3.2 Approche IP

Les protocoles du monde **IP** permettent une abstraction des services et donc une certaine convergence du fonctionnement des applications. Deux approches peuvent être différenciées :

Approche Internet Au niveau des acteurs de l'Internet, on trouve des services de voix comme Skype, de données avec le web **HTTP (HyperText Transport Protocol)** ou le mail **SMTP (Simple Mail Transport Protocol)**, ou de télévision sur un site comme YouTube. Dans ce cas, ces acteurs de services utilisent **IP** en mode "best effort" uniquement n'ayant pas de contrôle sur la **QoS** des données transportées. Ils se fondent sur le surdimensionnement des réseaux par les opérateurs.

Approche Opérateurs Les opérateurs historiques ont, quant à eux, la possibilité de prioriser les flux dans leur réseau pour rendre un service payant et plus efficace de **VoIP** ou de **IPTV (IP Television)**. Les nombreuses offres "triple play" se fondent sur ce modèle. Ils peuvent aussi offrir un service sur mesure pour interconnecter des réseaux d'entreprise.

Néanmoins, les services ont convergé du fait d'un socle **IP** commun mais il manque encore un réel fonctionnement commun des applications, malgré la notion d'**URI** permettant une certaine convergence de l'adressage indépendant des ressources. Les services sur **IP** sont donc très hétérogènes, chaque opérateur ou chaque acteur de l'Internet pouvant choisir entre de très nombreuses solutions pour les déployer.

Au niveau des réseaux satellites, le service de base du réseau est la télévision **DVB**. Avec l'arrivée du standard **DVB-RCS**, des offres d'accès à Internet se sont généralisées (Eutelsat par exemple). Néanmoins, l'intégration de services sur **IP** de type "triple play" est rare, le service de télévision n'ayant pas été déplacé au-dessus d'**IP**.

La tendance à la convergence des services par **IP** est une réalité dans beaucoup de réseaux mais les services historiques perdurent. **IP** semble bien incontournable pour la

convergence des services mais manque d'une approche intégrée nécessaire à un opérateur. IMS est une réponse à cette convergence des services.

2.3.3.3 Approche IMS

IMS (IP Multimedia Subsystem) est une réponse des opérateurs à l'intégration des services d'ores et déjà présente sur Internet. Elle permet par exemple d'intégrer les différents services dans une signalisation commune fondée sur SIP (Session Initiation Protocol) [87]. On peut considérer IMS comme une architecture évoluée de convergence des services permettant aux opérateurs de regrouper dans un fonctionnement uniforme leurs gestions des différents services. Comme son nom l'indique, il repose sur la convergence IP. L'architecture IMS a été définie par le consortium 3GPP (Third Generation Partnership Project) et standardisée par l'ETSI [88]. Un tutoriel de Gilles Bertrand donne plus de détails sur le fonctionnement et la bibliographie [89].

Au niveau satellite, l'approche IMS pourrait aider à la convergence des services avec d'autres réseaux hétérogènes tout en permettant une gestion unifiée et garantie par un opérateur unique. Une plate-forme IMS pour la gestion d'un service de télévision sur IP sur satellite a été testée et détaillée par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) [90]. Néanmoins, peu d'études d'intégration d'IMS sur le satellite existent. De nombreux points seraient intéressants à étudier dans ce cadre, notamment sur l'ajout du délai inhérent au satellite dans le fonctionnement d'IMS.

Au niveau de la convergence des services, l'approche IMS semble très prometteuse, réunissant l'approche des réseaux intelligents des réseaux d'opérateurs avec le monde IP. La question de son implantation réelle sera surtout un problème stratégique et économique entre les opérateurs traditionnels voulant récupérer la gestion des services et le monde Internet proposant déjà une très grande flexibilité de services.

2.4 Conclusion

Dans cette partie, après un rappel général de l'historique des réseaux de communication, la notion de convergence est définie avec plusieurs caractéristiques importantes. Trois types de convergence sont ensuite décrits et comparés en donnant les applications dans les systèmes satellite : la convergence par les architectures réseaux, la convergence fixe-mobile et la convergence des services.

Dans le cadre de notre étude sur la convergence dans les réseaux satellites, la problématique qui nous a paru la plus importante est la convergence par les architectures réseaux. En effet, les systèmes satellites majoritairement déployés sont des systèmes DVB-S par satellite GEO transparent avec des terminaux fixes. Il nous a donc paru intéressant de partir de cette base. Dans ce contexte, la question importante est donc comment intégrer des possibilités de convergence entre l'accès satellite et les services. Nous

nous concentrons donc dans la suite sur cette intégration intermédiaire. La convergence des services n'est ensuite pas dépendante du satellite et revêt donc moins d'importance dans notre étude. Enfin, la problématique de la convergence fixe-mobile est intéressante mais nécessiterait une étude à part entière. Nous nous cantonnons aux systèmes satellite non mobiles.

Pour décrire les problèmes d'une convergence des architectures réseaux satellite, il nous a paru intéressant de choisir une solution de convergence existante et de l'appliquer aux systèmes satellites actuels. Considérant les différentes solutions décrites précédemment, il nous est apparu que la solution **ATM** avait déjà été choisie pour la voie retour **DVB-RCS**. Partant de ce constat et sachant que l'approche **ATM** pose des problèmes d'intégration avec **IP**, il nous est apparu que la solution **MPLS** était une convergence de différentes méthodes et répondait bien aux problèmes d'hétérogénéités des couches d'accès. De plus, **MPLS** répond au besoin d'ingénierie de trafic inhérent aux réseaux satellites, habitués à ne pas perdre de ressources radio en surdimensionnant les liens. **MPLS** est aussi parfaitement couplé avec l'interface **IP** que l'on choisit pour la convergence des services sur satellite. La suite du travail consiste donc à étudier l'intégration de services **IP** sur une architecture réseau convergente **MPLS**.

Chapitre 3

MPLS comme solution de convergence satellite : cas unidirectionnel

3.1	Architecture IP/MPLS générale	51
3.2	Télévision sur IP/MPLS par satellite unidirectionnel	52
3.2.1	Architecture de diffusion TV	52
3.2.1.1	Couches de service de télévision	54
3.2.1.2	Couches de convergence IP/MPLS	55
3.2.1.3	Couches d'accès satellite	57
3.2.2	Problématiques	57
3.2.2.1	Migration de la signalisation PSI/SI	58
3.2.2.2	Adressage du service télévisé	60
3.2.2.3	Confidentialité et sécurité des programmes	63
3.2.2.4	Synchronisation	63
3.2.2.5	Qualité de service et ordonnancement	64
3.2.3	Analyse du système	65
3.2.3.1	Migration depuis un système actuel	65
	Migration réseau :	65
	Migration des services :	66
3.2.3.2	Analyse quantitative	66
	Overhead :	66
	Signalisation :	67
	Services utilisateur :	67
3.3	Conclusion	68

Comme décrit dans le chapitre 1, l'application phare du satellite demeure la télévision numérique en raison de la diffusion naturelle sur le support et du coût élevé du satellite qui doit être rentabilisé par un nombre important de clients. Les systèmes satellites les plus communs sont donc des satellites **GEO** transparents diffusant de la télévision par un système reposant sur les normes **MPEG2**. Ce système global s'appelle **DVB-S** ou **DVB-S2** pour la nouvelle norme.

De plus, le satellite devient un convoyeur de trafics plus divers comme des données Web. Il devient un moyen de couplage de réseaux multi trafics, notamment avec l'avènement d'une voie retour (**DVB-RCS**) et l'encapsulation de trafic Internet dans le système de télévision classique. Il apparaît donc clairement que le satellite doit être repensé en termes de convergence.

Cette convergence est précisément un thème de prédilection dans les réseaux actuels. Avec des évolutions comme la **VoIP (Voice over IP)**, la vidéo sur mobile ou les accès "triple play" voie-données-télévision, il apparaît que le monde des réseaux intègre et cherche à organiser cette convergence. Le chapitre 2 décrit les réseaux actuels et ce principe de convergence. Après avoir énoncé certaines caractéristiques de convergence, différents modèles de convergence ont été examinés.

La problématique qui nous a semblé importante pour le futur des réseaux satellites est la notion d'architecture réseau de convergence. La convergence des services ou la convergence fixe-mobile sont des points moins directement liés aux réseaux satellites classiques actuels. Pour étudier cette convergence d'architecture réseau satellite, le choix de **MPLS** a paru intéressant par sa flexibilité et son adoption dans les réseaux terrestres. **IP** est logiquement utilisé comme interface protocolaire pour les services.

Considérant cette construction architecturale orientée télévision du satellite et ces différents modèles de convergence possibles, le travail de cette thèse consiste à proposer des solutions d'évolution convergente crédibles aux réseaux satellites. Nous expliquons ci-après la démarche adoptée pour ce travail se déclinant sur les parties suivantes.

Démarche de l'étude :

Chapitre 3 : A partir du choix d'une solution de convergence, une architecture globale fondée sur **IP** et **MPLS** est ébauchée. Comme pour le choix d'un modèle de convergence, l'étude d'une architecture globale au travers de tous les scénarios possibles s'est avérée complexe. Cela nous a donc poussé à considérer des scénarios élémentaires. Le premier scénario détaille le fonctionnement d'un seul service sur une architecture unidirectionnelle. Le service ne pouvait être que la télévision, service historique le plus développé. Le but est donc de montrer qu'il est possible de définir un système **IPTV** équivalent sur une architecture convergente. Ce passage est en effet un verrou important à l'évolution du système **DVB**.

Chapitre 4 : Au delà du scénario du service de télévision dans un cas unidirectionnel, il convenait de montrer l'intérêt de notre démarche sur un ensemble de services. Pour cela, nous avons repris la démarche en ajoutant une voie retour à l'architec-

ture et étudié un service de télévision interactif puis d'autres services. La topologie a été conservée dans le schéma en étoile classique dans un cas transparent.

Chapitre 5 : Ce chapitre montre l'applicabilité de cette approche **MPLS** dans le projet industriel **ULISS** de commutateur à bord du satellite. Cette étude plus pragmatique nous permet de valider notre approche.

Le présent chapitre s'attache donc d'abord à décrire les principes généraux de l'architecture **IP/MPLS** choisie pour ensuite s'intéresser plus en détail au cas d'un service de télévision unidirectionnel.

3.1 Architecture IP/MPLS générale

Niveau services	Télévision (IPTV, MPEG2, SAP)	Téléphonie (VoIP, SIP)	Internet (HTTP, SMTP)	
Niveau réseau convergence	IP			
	MPLS			
Niveau accès satellite	GSE	MPE ou ULE		AAL5
		MPEG2		ATM
	DVB-S2		DVB-S	DVB-RCS

FIG. 3.1 – Architecture **IP/MPLS** générale

Dans le souci de virtualisation des services et d'organisation des différentes fonctions réseau, l'architecture générale **IP/MPLS** utilisée sépare trois principaux niveaux protocolaires (figure 3.1) :

Niveau accès satellite : Ce niveau s'occupe donc d'accéder directement au support de communication satellite. Ce niveau comporte une couche liaison de données sur une couche physique. La couche liaison de données transporte les paquets réseau dans des trames adaptées au média satellite. Les fonctions de cette couche peuvent être la délimitation des trames, la gestion de l'accès au support, l'adressage, la correction d'erreur, la réservation de ressources locales, la sécurité de l'accès, la gestion du support satellite. Une couche physique s'occupe d'envoyer ces trames d'information binaire sur le support de la façon la plus adaptée et la plus efficace. La figure 3.1 montre les différents protocoles d'accès satellite existants que nous avons évoqués dans le chapitre 1.

Niveau réseau : Le niveau réseau comporte une couche **MPLS** généralisant la façon d'accéder au support par le label. Cette couche est très liée au fonctionnement des couches accès de proche en proche ; le champ **VPI/VCI** d'**ATM** peut, par exemple, être réutilisé. Un label peut également représenter un élément physique comme une interface ou une fréquence. La couche réseau **IP** propose, quant à elle, une interface commune aux services et s'occupe de la communication et de l'adressage de bout en bout indépendant des réseaux sous-jacents (notamment en multicast).

Niveau services : Les différents services utilisent ainsi cette interface **IP** pour ne pas dépendre de la technologie des réseaux traversés. Comme expliqué dans le chapitre 2, nous ne nous préoccupons pas de la convergence des services. Néanmoins, il a fallu choisir un système de télévision sur **IP** pour illustrer les principes de l'architecture globale. La télévision sur **IP** ou **IPTV** peut donc, par exemple, se fonder sur une signalisation **SAP (Session Announcement Protocol)** et un transfert de paquets vidéos **MPEG2** sur **RTP** [91, 60, 92]. Un service de **VoIP** repose de plus en plus sur une signalisation **SIP** et un transport **RTP** d'échantillons de voix codée [87, 60]. Enfin, les services historiques du Web et du mail reposent sur les protocoles **HTTP** et **SMTP** [93, 94].

Pour déterminer si cette architecture est réaliste, il convient tout d'abord de se restreindre au système satellite le plus développé : le service de télévision sur un satellite transparent unidirectionnel. Est-il envisageable d'avoir un service de **IPTV** équivalent à la fois en termes de fonctionnalités et de performances ?

3.2 Service de télévision par satellite unidirectionnel sur une architecture IP/MPLS

Le but de cette section est donc de montrer la faisabilité d'un service de télévision convergent semblable à celui qui existe aujourd'hui. Le système satellite utilisé est géostationnaire, unidirectionnel, transparent. L'architecture **IP/MPLS** sur ce satellite est tout d'abord décrite, les principaux problèmes discutés, puis la faisabilité analysée.

3.2.1 Architecture de diffusion TV

L'innovation principale de notre solution réside donc dans l'ajout d'une couche d'abstraction au média et le passage du service de télévision au-dessus d'**IP**. On décrit ici l'architecture globale et les détails protocolaires et fonctionnels sont repris dans la partie suivante.

L'architecture est décrite par la figure 3.2. On considère un modèle simple de diffusion avec d'un côté un fournisseur de contenu et son encodeur **MPEG2** et de l'autre les

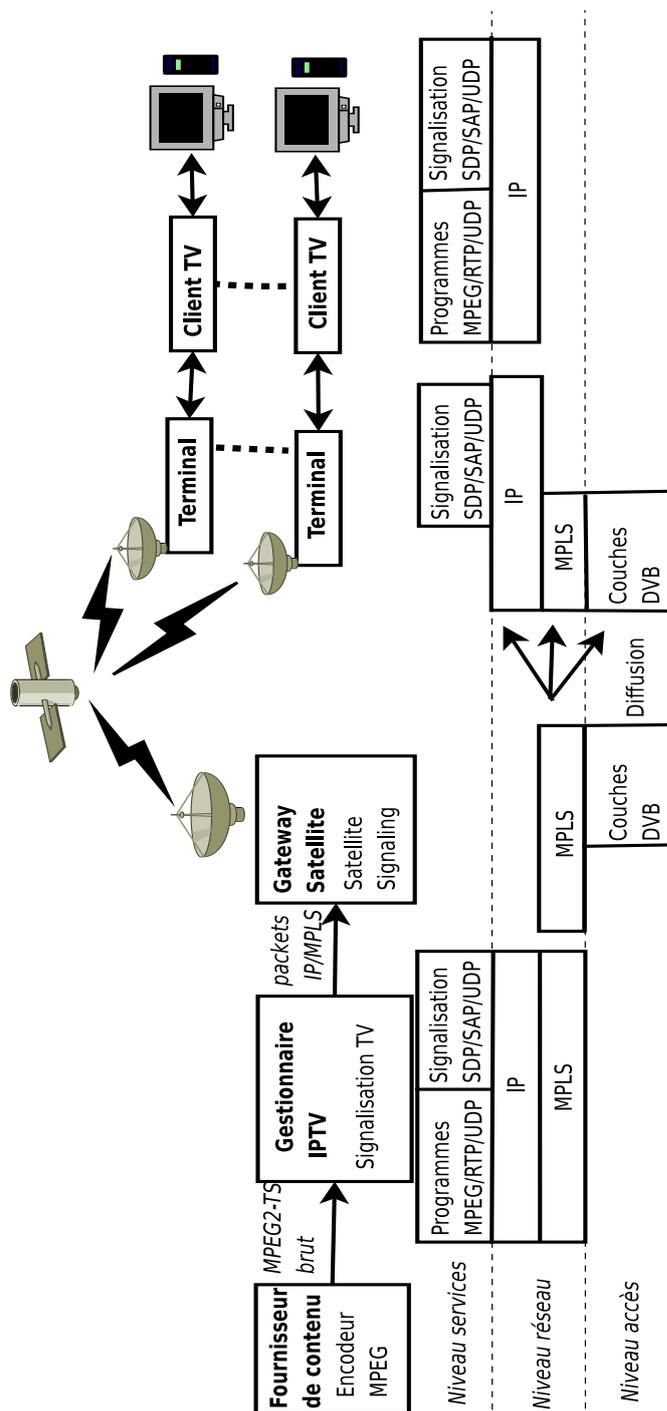


FIG. 3.2 – Nouvelle architecture de diffusion vidéo

clients de télévision et leurs décodeurs chez les abonnés. Le problème est de savoir comment organiser la transmission des programmes de télévision via un satellite classique transparent et unidirectionnel.

Nous considérons que les flux vidéos arrivent comme un flux **MPEG2-TS** dans le réseau opérateur par une liaison dédiée. Cela pourrait être également un réseau **MPLS** qui offrirait la possibilité de déporter facilement le fournisseur de contenu du système de distribution. Nous ne nous intéressons donc qu'au réseau de distribution. Nous considérons également un gestionnaire du service télévisé dont le rôle consiste à récupérer les différents flux et à les distribuer dans le réseau satellite au travers de la gateway. On considère de même que le gestionnaire et la gateway sont directement reliés mais il pourrait y avoir un réseau opérateur acheminant les flux entre les deux. Le gestionnaire de télévision pourrait ainsi faire la distribution de ces flux indépendamment des réseaux d'accès. On pourrait de plus considérer plusieurs gestionnaires de télévision dans une approche plus distribuée pour éviter d'avoir un seul équipement. Cela pourrait être intéressant dans un but de répartition de charge ou pour éviter la concentration de la gestion de tous les programmes sur un seul équipement. Enfin, chaque terminal récupère les flux de la gateway à la demande du client TV et lui transmet le flux demandé. Le client peut alors décompresser le flux pour l'afficher sur une télévision. Le client TV peut être dissocié du terminal. Par exemple, cela peut être un logiciel sur ordinateur connecté sur le même réseau privé que le terminal. On peut envisager un service multiposte dans une maison (exemple opérateur Free [95]).

Décrivons maintenant plus précisément chaque structure des 3 niveaux d'abstraction : la couche de service télévision, la couche de convergence **IP/MPLS** et la couche d'accès satellite.

3.2.1.1 Couches de service de télévision

Le service de télévision est donc placé au-dessus d'**IP** depuis le gestionnaire jusqu'au client de télévision. La signalisation et les flux sont générés par le gestionnaire de télévision. Le service de télévision numérique doit être conservé en l'état pour les clients. On réutilise donc une compression **MPEG2-TS** même s'il sera possible ensuite de passer à des encodages plus efficaces (MPEG4 codage H264 [14]). Sur **MPEG2-TS**, plusieurs caractéristiques sont définies. Les grands aspects des services rendus aux utilisateurs et aux diffuseurs du réseau télévisé sont :

- le visionnage de programmes vidéos avec sous-titres ou plusieurs pistes audio ;
- une gestion des bouquets de chaînes protégés ;
- le télétexte qui ajoute des informations textuelles aux programmes (actualités, météo, ...) ;
- les **EPG** qui sont des guides de programme électroniques ;
- **MHP (Multimedia Home Platform)** [96, 97] qui permet l'exécution d'applications distribuées en Java (des jeux par exemple) rajoutant une pseudo-interactivité ;

cette plate-forme middleware prend tout son intérêt avec une voie retour.

Le visionnage des programmes vidéos et la gestion des bouquets de chaînes protégés sont les points les plus importants sur lesquels nous nous concentrerons. Les systèmes des EPG et de MHP ne seront pas détaillés ici. Le télétexte ou les guides électroniques peuvent s'appuyer sur des travaux du groupe TV-Anytime [98] et MHP a été conçu de façon portable au-dessus d'un middleware Java et peut donc migrer facilement.

Notre but à ce niveau n'est pas de proposer un fonctionnement convergent des services de télévision. Nous nous fonderons sur les principes existants d'un service IPTV classique pour étudier les problèmes de l'architecture réseau. On détaille les différents plans fonctionnels du service :

Plan de données : Les programmes MPEG2 sont diffusés en multicast sur RTP/UDP. RTP permet de rajouter des informations d'ordre et de synchronisation et ainsi compléter le protocole UDP. En cas de programmes non publics sujets à abonnement, un système de cryptage doit être développé. Les fonctions de multiplexage des programmes télévisuels (anciennement transport stream) et de cryptage sont donc gérées dans ce plan.

Plans de contrôle et gestion : Les informations sur les programmes sont diffusées en multicast à tous les terminaux de télévision via le protocole SAP au-dessus d'UDP [91]. Les informations sur les programmes suivent le standard SDP (Session Description Protocol) [99]. Les fonctions d'identification des programmes, de conditions d'accès sont gérées ici (anciennement tables SI du système DVB). Les programmes télévisés sont, de même, regroupés en bouquet dans le plan de contrôle. Un plan de gestion du service de télévision devra être mis en place pour permettre la gestion des bouquets, des abonnements.

Le service de télévision s'appuie sur des couches inférieures dans le réseau opérateur pour acheminer les programmes à tous les terminaux avec une certaine QoS adaptée aux flux vidéos. IP et MPLS sont les couches permettant cela dans cette architecture.

3.2.1.2 Couches de convergence IP/MPLS

Le service est donc rendu complètement indépendant de l'accès satellite par IP/MPLS. Il est donc désormais plus simple à acheminer et à traiter dans un environnement hétérogène. Un pas important a été franchi vers la convergence.

Le protocole IP s'occupe du transport de bout en bout du gestionnaire TV au client TV. Au contraire, MPLS est lié au réseau opérateur et ne dépasse pas le terminal. C'est une couche intermédiaire gérant l'ingénierie de trafic de bout en bout dans le réseau opérateur. Des chemins MPLS (LSP) à la demande ou permanents peuvent être créés. Au niveau de ce réseau opérateur, on distingue un plan de données permettant de transporter les flux vidéos et un plan de contrôle et de gestion servant au fonctionnement de la couche.

Plan de données : Les flux vidéos et les informations associées sont transportés dans des paquets **IP**, eux mêmes tagués par **MPLS**. Les labels **MPLS** permettent de faire de la différenciation des flux et de leur associer une qualité de service. Des adresses **IP** multicast et port **UDP** permettent d'identifier les flux dans un contexte plus global et indépendant de l'accès. Le label **MPLS** est l'identification orientée opérateur, les adresses **IP** sont orientées utilisateur et multi-réseaux. Les flux **RTP** vidéos sont donc transportés dans des **LSP** multicast depuis le gestionnaire de télévision jusqu'aux terminaux. Sur la liaison proche en proche de la gateway vers les terminaux, un label représente donc un programme du gestionnaire. Le plan d'adressage global devra être mis en place par l'opérateur du réseau.

Plans de contrôle et de gestion : Le plan de contrôle à ce niveau doit distribuer les associations entre les labels et les adresses **IP** et des informations sémantiques sur les flux comme la **QoS** adaptée. Dans notre application d'acheminement des flux télévisés, plusieurs possibilités sont envisageables. La diffusion vidéo étant de type permanent, la signalisation pour la distribution des labels peut passer par voie de gestion via **SNMP** mettant à jour les informations des **MIB (Management Information Base)**. Une autre possibilité est de connecter les **LSP** vidéos grâce au protocole **RSVP-TE** modifié. Nous avons choisi cette dernière solution pour des raisons d'intégration plus simple dans un réseau **MPLS** plus large et de la problématique de reroutage rapide. Dans un contexte unidirectionnel, le fonctionnement de **RSVP-TE** devra être modifié. Les terminaux ne pouvant pas initier la réservation par un message **RESV**, seuls des messages **PATH** spécifiant le label et la **QoS** associée seront diffusés en aveugle sur les terminaux. La fréquence des messages **PATH** devra être adaptée pour assurer une bonne réception pour les terminaux. Les flux vidéos **MPLS** multicast seront donc mis en place par le plan de gestion du réseau **MPLS** comme des circuits virtuels permanents. Un protocole de routage multicast gérant la **QoS** doit être mis en place dans le réseau opérateur pour que les messages **RSVP-TE** trouvent leur chemin. D'autre part, **IP** comporte **ICMP (Internet Control Message Protocol)** et **IGMP (Internet Group Management Protocol)** comme plan de contrôle. Pour le réseau d'accès satellite, **ICMP** ne nous importe pas et il ne pourra pas fonctionner sans voie retour. **IGMP** qui s'occupe du multicast est utilisé pour gérer les souscriptions au groupe multicast entre le client TV et le terminal (voir la problématique sur l'adressage dans la section suivante).

Le dernier niveau important de cette architecture est le niveau accès satellite sur le réseau d'accès. Les autres protocoles d'accès entre le gestionnaire et la gateway ou entre le terminal et le client TV ne nous importent pas dans ce cadre satellite.

3.2.1.3 Couches d'accès satellite

A ce niveau, l'interface protocolaire supérieure est **MPLS** et les problématiques ne sont donc plus liées au service ou à la couche **IP**.

Plan de données : L'acheminement de proche en proche sur le réseau d'accès satellite depuis une gateway jusqu'aux terminaux peut utiliser différentes encapsulations. Nous retenons le nouveau standard **DVB-S2** car il permet de multiplexer différents types de trafic. Il permet de plus d'assurer la compatibilité avec un système **DVB-S/MPEG2-TS** classique tout en s'en désolidarisant. **DVB-S2** gère donc l'aspect transport physique satellite via des **BBFRAME** encapsulées dans des **PL-FRAME**. Evidemment, l'encapsulation classique dans **MPEG2-TS** est toujours possible grâce à **MPE** ou **ULE**, malgré la surcharge des couches qu'elle induit.

Une nouvelle couche d'encapsulation appelée **GSE** est utilisée comme couche 2 du modèle **OSI**, permettant de faire le lien entre **DVB-S2** et de multiples protocoles. Elle a une fonction d'adressage possible avec une adresse de destination. Dans le cas de la télévision, **GSE** diffuse à tous les terminaux sans adressage. L'encapsulateur **GSE** permet de fragmenter les paquets de niveau supérieur pour s'adapter à **DVB-S2**. Il s'occupe aussi d'un contrôle d'erreur sur le paquet.

Plan de signalisation et de gestion : Parallèlement, une signalisation pour la gestion de la transmission satellite est nécessaire. En effet, le lien entre les labels **MPLS** et les différentes fréquences ou positions satellite doit être transmis aux terminaux. Plusieurs approches peuvent être envisagées : une approche pourrait conserver certains mécanismes des tables transportées par **MPEG2** ; une approche plus cohérente avec **MPLS** considère les fréquences comme des labels **GMPLS**. D'autres informations comme la remise à l'heure des terminaux peuvent être transportées par **SNMP** ou **NTP (Network Time Protocol)**.

Ordonnanceur : Dans la gateway, une entité de gestion est obligatoire en vue de garantir l'accès concurrent au support et la réservation de ressources nécessaires. Cet ordonnanceur doit garantir la **QoS MPLS** sur le média et notamment les différentes contraintes de temps vidéo.

Plusieurs problématiques particulières méritent d'être étudiées plus en détail dans la partie suivante.

3.2.2 Problématiques

Cette partie se concentre sur les problématiques importantes du service télévision et de son acheminement dans un contexte satellite. Les points sont :

- la migration de la signalisation **PSI/SI** ;
- l'adressage et le multiplexage des programmes de la gateway jusqu'aux terminaux ;

- la confidentialité et sécurité des programmes ;
- la synchronisation obligatoire pour la vidéo en temps réel ;
- la qualité de service et sa mise en œuvre.

3.2.2.1 Migration de la signalisation PSI/SI

TABLES PSI/SI		Correspondance
Nom	Fonction	Protocole
PAT (Program Association Table)	indique les emplacements des “cartes” de chaque programme	SAP (Session Announcement Protocol)
PMT (Program Map Table)	indique les PID des flux d’un programme = carte d’un programme	SDP (Session Description Protocol)
CAT (Conditionnal Access Table)	indique les PID des paquets transportant les systèmes de contrôle d’accès	SDP
TDST (Transport Stream Description Table)	décrit le contenu du multiplexe	champ protocole GSE
NIT (Network Information Table)	transporte des informations sur l’organisation physique des réseaux	SNMP ou RSVP
SDT (Service Description Table)	liste les noms et paramètres associés à chaque service d’un multiplexe	SDP
EIT (Event Information Table)	transmission d’événements en cours ou à venir dans le multiplexe	SDP
TDT (Time and Data Table)	remise à l’heure de l’horloge interne du récepteur	SNMP/NTP
BAT (Bouquet Association Table)	groupe différents services en bouquet	SDP
RST (Running Status Table)	table transmise pour la mise à jour rapide d’un ou plusieurs événements	SDP
TOT (Time Offset Table)	indique le décalage horaire	SNMP
ST (Stuffing Tables)	permet d’invalider des tables devenues inutiles	none

TAB. 3.3 – Correspondance avec la signalisation SI

La signalisation dans le contexte **MPEG2-TS** est complètement regroupée dans les tables **PSI** et **SI**. Le tableau 3.3 montre une correspondance des différentes tables avec les protocoles de notre architecture. Il apparaît que se côtoient des informations de nature diverse. On peut ainsi décomposer les fonctionnalités en deux groupes :

Description de la session	
v=0	version du protocole
o=durand 2890844526 2890842807 IN IP4 126.16.64.4	origine : o=<nom> <id session> <version> <type réseau> <type d'adresse> <adresse>
s=Tele TESA	nom du programme
a=bouquet 10 Bouquet10	fonction étendue : numéro bouquet
t=2873397496 2873404696	temps d'activité de la session
Description des Médias	
c=IN IP4 224.2.17.12/127	information de la connexion Ipv4 @IP/TTL
m=audio 49170 RTP/AVP 14	média audio, port, transport, format du média (MPA)
m=video 51372 RTP/AVP 31	média vidéo, port, transport, format du média (MPV)

TAB. 3.5 – Exemple de signalisation SDP pour le service télévisé

- Les fonctionnalités des tables PAT, PMT, CAT, SDT, EIT, BAT, RST sont reproduites dans la signalisation du service télévisé qui sera transporté dans une session SDP indépendante du support.
- Les fonctionnalités des tables NIT, TDT, TOT sont reproduites dans la signalisation sur le lien satellite qui sera transporté par le biais des protocoles de gestion de type SNMP ou par une signalisation réseau de type RSVP-TE.

Signalisation du service télévisé : Le tableau 3.5 montre un exemple de signalisation SDP pour le service de télévision placé au-dessus d'IP. Pour chaque programme, un message de session SDP est généré et diffusé sur toutes les fréquences indiquant les différentes caractéristiques du programme. Ces messages reprennent les rôles des tables PAT, PMT pour l'adressage du service télévisé et le rôle de la table CAT pour les indications de sécurité des flux. Un champ ajouté peut regrouper les flux en bouquets comme dans la table BAT. Des champs appropriés peuvent répondre aux mêmes fonctionnalités que les tables d'information SDT, EIT, RST. On se retrouve bien avec un service de télévision indépendant des couches inférieures pouvant être transporté sur différents types de réseaux.

Signalisation satellite : Certaines informations transmises par le système de tables SI sont liées au système satellite lui-même. Elles ne sont transmises que sur le segment satellite et sont indépendantes des services. La table NIT transporte des informations sur les satellites utilisées en terme de positionnement ou de fréquence. Ces informations permettent de connaître l'emplacement des différents programmes et de changer de fréquence au besoin. Pour répondre aux mêmes attentes d'adressage, on se servira d'une approche MPLS et la signalisation de

fréquence et de positionnement de la table **NIT** sera transportée par **RSVP-TE**. L'approche est néanmoins différente car, dans notre solution, la couche accès ne voit que des labels indépendants des services supérieurs tandis que la table **NIT** est liée à des services vidéos. Certains aspects de ces tables comme la mise à jour de l'heure et du décalage horaire peuvent être faits par la gestion **SNMP**.

Observons maintenant plus précisément différents aspects du fonctionnement du système reposant sur cette nouvelle organisation de signalisation.

3.2.2.2 Adressage du service télévisé

Dans l'architecture décrite précédemment, un point important est de bien comprendre comment les programmes télévisés sont organisés au niveau de l'adressage. On reste dans le contexte de la figure 3.2. Les étapes d'adressage pour la diffusion d'un programme donné sont développées ici et illustrées dans la figure 3.3. On considère qu'un terminal se connecte sur une fréquence $freq0$ et souhaite recevoir un programme P1 sur une fréquence $freq1$. Les signalisations **SDP** et **RSVP-TE** sont transmises sur toutes les fréquences.

1. **Création du canal de signalisation du service télévisuel** : Tout d'abord, un canal pour la signalisation télévisuelle **SAP/SDP** est créé avec un label associé à ces types de flux. Cela permet de séparer et d'organiser ce trafic dans un **LSP** dédié. Pour ce faire, un message **SNMP** de configuration statique est envoyé sur toutes les fréquences avec une adresse multicast (@IPsig) connue et fixée par le plan de gestion dans les terminaux. Une autre possibilité serait de faire passer le trafic de signalisation comme un trafic **IP** classique best effort (label = 0) et éviterait cette réservation de label. L'important est que les terminaux aient accès aux données du canal de signalisation de télévision. Le terminal reçoit donc les informations de signalisation de télévision et peut faire un cache des programmes.
2. **Association labels fréquences** : On considère que le flux du programme P1 identifié par le label "labelP1" sera diffusé sur une fréquence $freq1$. Des messages **RSVP-TE** de création des tunnels fréquentiels point à point permettent de faire l'association entre les labels et les fréquences. De nouveaux objets **RSVP-TE** devront être définis pour cela. On peut considérer les différentes fréquences du satellite comme des canaux **GMPLS**. Les messages de signalisation permettent d'obtenir les informations nécessaires d'association des labels avec les fréquences. On peut associer de la même façon la position des satellites à des labels. Un terminal peut alors changer de fréquence de réception si le flux du label "labelP1" n'est pas sur la fréquence utilisée comme dans l'exemple. On considère à ce niveau le flux de façon générique et découplé de la notion de service de télévision utilisateur.
3. **Création d'un canal de diffusion des programmes aux terminaux** : On veut maintenant diffuser un programme P1 sur cette fréquence $freq1$. Pour cela, des

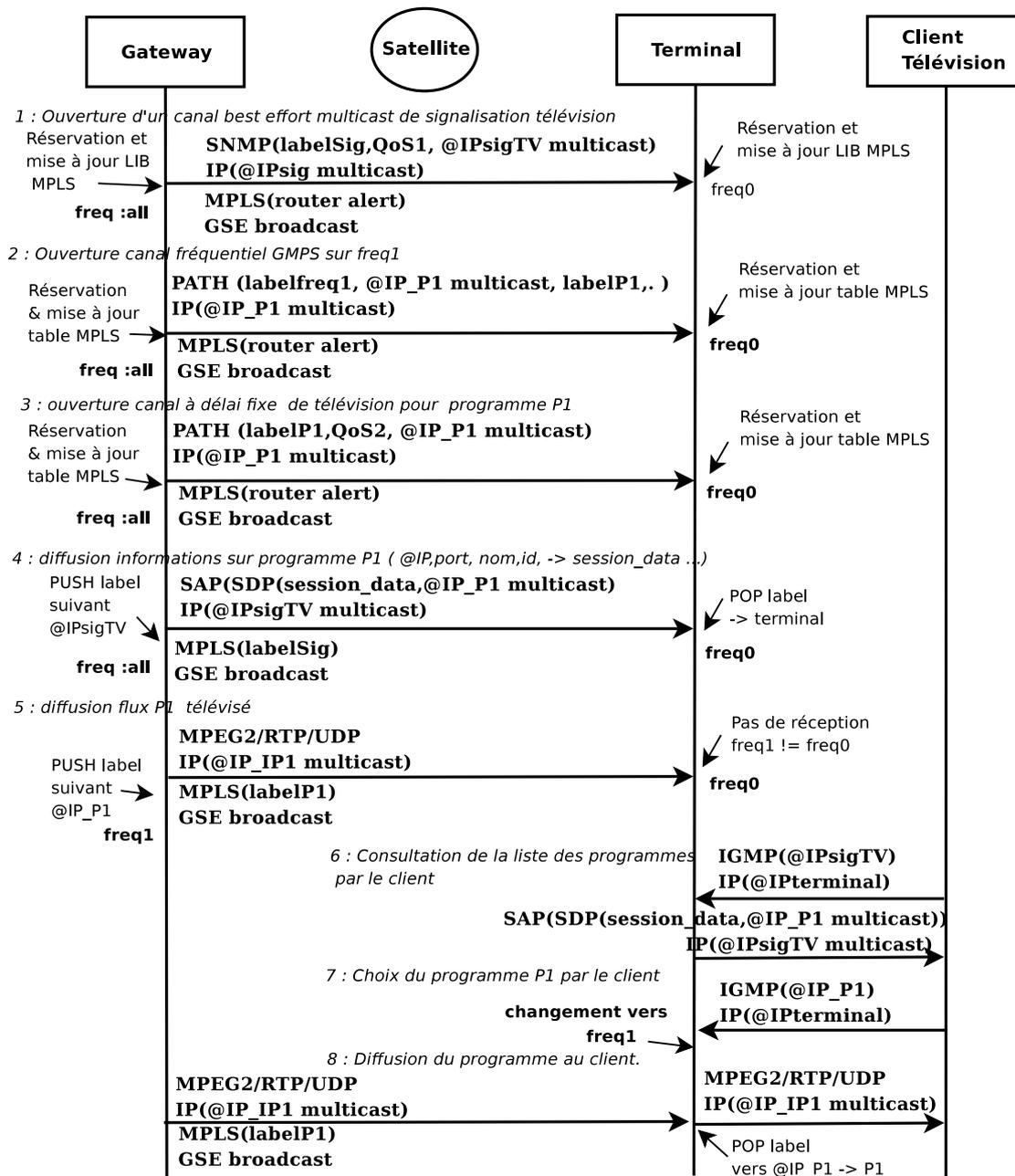


FIG. 3.3 – Description des étapes d’un transport de programmes télévisuels

messages **RSVP-TE** (ou **SNMP**) sont envoyés sur toutes les fréquences pour réserver les labels et la qualité de service adaptée aux programmes télévisés en terme de délai et de bande passante. Les terminaux sont alors aptes à recevoir les canaux **MPLS** diffusés. Néanmoins, le terminal ne désencapsule pas tous les messages dont le label a été réservé tant que le client n'a pas demandé le programme. En effet, il ne sert à rien de faire remonter tous les programmes au niveau **IP** s'ils ne sont pas regardés. Le filtrage se fait donc au niveau **MPLS**.

4. **Diffusion des informations sur le programme P1** : Les informations **SDP** transportées par **SAP** sont ensuite envoyées sur une adresse multicast fixe (@IPsigTV) configurée par le plan de gestion. Un message **SDP** transporte la description d'un programme avec notamment toutes les composantes vidéos, audios possibles et leurs adresses **IP** et ports respectifs. Le tableau 3.5 montre un exemple d'adressage de programme sur l'adressage IP_P1. Ces messages sont donc diffusés vers les terminaux sur toutes les fréquences à intervalles réguliers. Les terminaux peuvent ensuite mettre à jour leur table d'association des programmes en conséquence.
5. **Diffusion flux du programme P1** : Les données vidéos du programme, conformes à la signalisation **SDP**, sont diffusées dans le **LSP MPLS** réservé précédemment sur la fréquence freq1 associée. Le terminal considéré ne reçoit rien sur la fréquence freq0. Les terminaux sur la fréquence freq1 filtrent ce flux en ne faisant pas remonter le label tant que le programme n'est pas consulté.
6. **Consultation des programmes par le client** : Le client qui décide de voir un programme commence par notifier au terminal qu'il veut voir la signalisation du service télévisuel. Il s'abonne donc sur l'adresse **IP** multicast @IPsigTV. Il reçoit alors la liste des programmes existants (filtrés ou non) sous la forme de messages **SDP**. Le client est prêt à recevoir le programme sur l'adresse IP_P1.
7. **Choix du programme P1 par le client** : L'utilisateur décide de voir le programme P1. Le client envoie donc au terminal un message IGMP pour s'abonner à ce flux de télévision identifié par l'adresse @IP_P1.
8. **Diffusion du programme au client** : Le terminal récupère le label "labelP1" associé à l'adresse **IP** @IP_P1 du programme et regarde sur quelle fréquence ce label existe. Comme il trouve que le label demandé se trouve sur la fréquence freq1, il change de fréquence de synchronisation. Ce changement de fréquence peut occasionner un certain délai supplémentaire pour le choix entre deux programmes. Le terminal récupère alors le flux demandé en remontant les paquets **MPLS** avec le label "labelP1" et diffuse le programme vers le client. L'utilisateur peut regarder son programme de télévision.

3.2.2.3 Confidentialité et sécurité des programmes

La question de la sécurité se pose à plusieurs niveaux. Actuellement, **DVB-CA** s'occupe de la confidentialité des programmes grâce à un algorithme secret **CSA (Common Scrambling Algorithm)** et un accès conditionnel aux données cryptées grâce à des échanges de clefs. Dans notre cas, il faut séparer la sécurité au niveau satellite, au niveau service et au niveau contenu. Notre objectif n'est pas de définir une politique de sécurité mais plusieurs approches sont évoquées ci-dessous pour chaque niveau.

Niveau satellite : Dans un contexte **DVB-S**, la sécurité d'accès au satellite n'existe pas vraiment. Il est vrai que dans un contexte unidirectionnel de télévision, elle est peu utile car certains programmes sont diffusés de façon publique. Il vaudra mieux protéger les programmes à un niveau supérieur. Néanmoins, il serait possible de considérer un cryptage de niveau 2 pour des utilisations différentes du réseau satellite (**VPN** satellite par exemple).

Niveau Service : La sécurité sera assurée au niveau du service de télévision. Elle peut ne pas être utilisée. Des clefs de déchiffrement sont distribuées par avance aux abonnés dans les terminaux selon l'offre choisie. Ces clefs permettent de décrypter les clefs de chiffrement des programmes suivant l'abonnement. Les clefs de chiffrement de chaque programme sont diffusées dans les sessions **SDP** associées. Ce mécanisme est équivalent à **DVB-CA**. Le cryptage peut se faire à différents niveaux et suivant plusieurs méthodes comme **IPsec** ou **SRTP (Secure RTP)** selon les besoins.

Niveau Contenu : Un mécanisme de protection du contenu de type **DRM (Digital Rights Management)** pourra être mis en place suivant le type de conteneurs utilisé. Dans notre cas, nous restons sur une encapsulation du format **MPEG2-TS** mais des formats plus récents de type **MPEG4** proposent d'autres éléments de sécurité. Ces systèmes sont néanmoins peu intéropérables et contraignent souvent l'utilisation des données ainsi protégées.

Le but de cette partie est de souligner brièvement qu'une sécurité équivalente à l'existant est possible avec cette architecture et qu'il est même possible d'en concevoir d'autres. La séparation des couches permet également de remettre la sécurité au niveau nécessaire en fonction de l'utilisation du réseau. La réponse aux besoins de sécurité pourra être ainsi adaptée et réévaluée si nécessaire.

3.2.2.4 Synchronisation

Dans un premier temps, pour ce qui est du système satellite, il est nécessaire de coordonner les récepteurs terminaux avec les envois de la gateway. Cette synchronisation est assurée par plusieurs éléments. **DVB-S2** doit se synchroniser finement via des séquences pilote reconnaissables et des délimiteurs de trames. Un codage correcteur

d'erreur permet de limiter le nombre de pertes de paquets. Les couches basses doivent ainsi assurer un délai et une bande passante suffisante pour avoir peu de gigue et de perte.

Ensuite, pour garantir la synchronisation des programmes, un ordonnancement adéquat devra être mis en place suivant la **QoS MPLS** (voir partie correspondante).

Pour finir, la synchronisation plus fine et le reséquencement potentiel des messages sont assurés par **RTP**. Ce dernier ajoute une information pour rattraper quelques erreurs de délai en synchronisant finement certains paquets à l'aide d'estampilles temporelles. Cela est utile pour rattraper les retards engendrés par l'accès concurrent à un même média. Pour le transport de flux **MPEG2-TS**, chaque message **RTP** contiendra une information temporelle déduite de l'horloge de l'émetteur de programmes et prise dans le **PCR** du flux **MPEG2-TS** issu de l'encodeur [92]. Cette opération est effectuée par le gestionnaire de télévision. Par ailleurs, le reséquencement de **RTP** ne sera pas forcément utile dans le cas du satellite car il n'y a qu'une route empruntée.

3.2.2.5 Qualité de service et ordonnancement

Pour pouvoir regarder des programmes vidéos de façon confortable, **MPLS** associe à chaque label une qualité de service en termes de délai et de bande passante. Cette **QoS** doit être mise en œuvre dans chaque nœud et notamment dans la gateway pour ce qui nous intéresse.

Le débit et les délais de transit doivent être garantis par un ordonnanceur. Il est possible de réserver statiquement un débit et un délai en allouant des slots pour chaque programme dans le Generic Stream **DVB-S2**. C'est l'approche utilisée à l'heure actuelle. Elle permet de garantir la qualité de service mais fait perdre de la bande passante allouée inutilement. Un multiplexage statistique ordonné suivant la qualité de service de chaque flux est plus optimisé, bien que plus difficile à mettre en place. Il permettrait d'avoir plus de bande passante pour du trafic de données.

L'ordonnancement statistique dans le cas de la télévision peut se ramener à un problème déjà traité dans la littérature. En effet, dans ce cas, il n'y a pas de différenciation par utilisateur ; il est donc logique d'envoyer les flux suivant le pire cas du spot en allouant le bon ModCod **DVB-S2** suivant le bilan de liaison. De plus, il n'y a pas d'évolution possible du codage du canal sans voie retour notifiant des changements des caractéristiques du canal satellite. Il faut donc aussi se placer dans un pire cas pour diffuser à tout moment de façon convenable. On se retrouve donc avec un codage homogène au niveau **DVB-S2** choisi suivant le bilan de liaison satellite. Cela donne donc un flux de conteneurs de longueur fixe et de même codage à allouer. Le problème de l'ordonnancement revient donc à une allocation de paquets de taille variable sur un canal fixe. On peut voir l'accès **DVB-S2** comme un lien réseau sur lequel on envoie des paquets dans un ordre et un timing compatible avec la qualité de service à rendre.

Dans notre cas, nous avons des flux de télévision tagués par des labels avec une

qualité de service devant garantir un délai. Ces flux devront donc être traités de façon plus prioritaire que des flux de signalisation ou des données diverses. Les flux devront être classifiés suivant leurs labels MPLS et la QoS associée suivant un modèle CBQ (Class Based Queuing), qui répartit les capacités de transmission entre classes. Une classe de transmission sera liée typiquement aux labels des programmes vidéos. Il faut ensuite ordonnancer de façon adéquate les flux dans chaque classe de transmission ainsi organisée. Les algorithmes alors possibles sont FIFO (First In First Out) pour émettre les flux vidéos le plus vite possible et WFQ (Weighted Fair Queuing) pour les flux best effort de même niveau. Il faut ensuite faire en sorte que le débit total des flux vidéos soit inférieur à la bande passante disponible pour que des flux de priorité faible puissent quand même être émis.

3.2.3 Analyse du système

Après avoir décrit fonctionnellement le service d'IPTV, cette partie analyse en quoi cette approche est réaliste. Plusieurs points peuvent en effet être soulevés. Tout d'abord, la migration depuis le système actuel doit être étudiée car il est impensable de remplacer tout le système. Ensuite, une approche quantitative permettra d'évaluer l'impact en termes de performance de cette nouvelle architecture.

3.2.3.1 Migration depuis un système actuel

La migration peut être vue selon l'aspect réseau ou l'aspect service.

Migration réseau : Dans le cas d'un système DVB-S classique, l'encapsulation avec des trames GSE n'est pas possible et il est obligatoire de conserver MPEG2-TS. Dans ce cas, le plus simple est d'encapsuler MPLS dans MPEG2-TS via MPE ou ULE. Il faut donc revoir la qualité de service dans ce contexte et étudier comment le système MPEG2-TS et les données MPLS encapsulées peuvent cohabiter. On se retrouve néanmoins dans un cas similaire d'encapsulation de paquets MPE ou ULE de taille variable dans des trames MPEG2-TS de taille fixes (188 octets). Il faudra aussi régler l'association entre les PID au niveau MPEG2 et les adresses MAC au niveau MPE ou ULE.

Dans le cas d'un système DVB-S2, on peut encapsuler différents types de flux. MPEG2-TS et GSE peuvent ainsi coexister et la réservation de ressources entre les deux encapsulations reste à définir. Cela change potentiellement le comportement du canal DVB-S2 qui peut être bien plus complexe à ordonnancer.

Le moyen le plus simple est le cas d'un transpondeur non utilisé dédié à cette nouvelle architecture. Le partage des ressources et la migration se fait dans ce cas par multiplexage de fréquences.

Migration des services : La migration des services change les messages générés à partir des informations sur les médias et les bouquets et modifie donc les outils de gestion des programmes. La signalisation passe des tables **SI** à des messages **SDP**. Les deux systèmes de télévision peuvent également fonctionner et diffuser les programmes en parallèle. Pour l'utilisateur, il ne faudrait changer que le terminal ou son logiciel. Il est donc assez simple d'effectuer cette migration sans impact sur le service de télévision rendu à l'utilisateur.

3.2.3.2 Analyse quantitative

Overhead : Tout d'abord, l'empilement des couches dans un fonctionnement classique de diffusion de télévision rajoute des en-têtes : **RTP** (12 octets), **UDP** (8 octets), **IP** (20 octets), **MPLS** (4 octets), **GSE** (5+4 octets) font un total de 53 octets d'en-tête. Dans la partie utile des trames envoyées, **RTP** permet de concaténer plusieurs paquets **MPEG2-TS** de 188 octets. Considérant qu'il convient d'éviter la fragmentation, la taille maximale est définie à une valeur de 4 kilo-octets (4096 octets) par le protocole de niveau 2 **GSE**. Il est donc possible d'encapsuler 21 paquets MPEG2-TS au maximum.

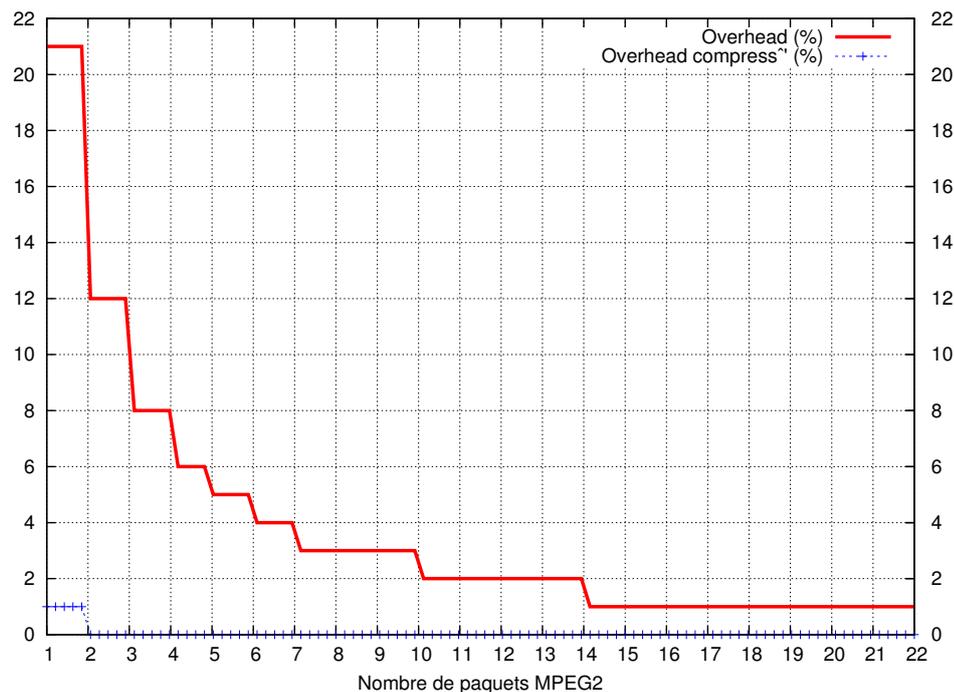


FIG. 3.4 – Overhead en fonction du nombre de paquets **MPEG2**

Comme illustré par la figure 3.4, on remarque que dans le cas de messages de 4 kilo-octets, la part d'overhead est de 1.3% (21 paquets encapsulés). Néanmoins, cette

concaténation peut engendrer un certain délai et une certaine gigue dans la diffusion des flux **MPEG2-TS**. Pour minimiser complètement ces retards et améliorer le travail de l'ordonnancement avec de plus petits paquets **GSE**, on peut choisir de n'encapsuler qu'un seul paquet **MPEG2-TS**. On obtient dans ce cas un overhead important de 23%.

Par ailleurs, l'overhead peut être aussi minimisé par une compression d'en-tête. Dans un cadre unidirectionnel (U-mode), le mécanisme **ROHC (ROBust Header Compression)** décrit par la RFC 3095 [100] permet de passer d'un en-tête **IPv6** de 60 octets à 2-3 octets (voir article [101]). Il peut être applicable à une pile **RTP/UDP/IPv4** de manière similaire. Même dans le cas d'un seul paquet **MPEG2** transporté, l'overhead redevient raisonnable (1-2%). En choisissant un nombre de paquets concaténés plus important, il est même possible de réduire complètement la lourdeur de l'architecture protocolaire proposée.

Le problème sera donc de choisir le bon nombre de paquets **MPEG2** à concaténer pour ne pas avoir trop de gigue et rester efficace. A priori, avec un mécanisme de compression, l'envoi de paquets **MPEG2** un par un minimise la gigue à l'arrivée et augmente l'entrelacement possible des trames par l'ordonnanceur (comme **ATM**).

Signalisation : La caractéristique la plus importante est cette séparation des couches services, réseaux et liaison de données permettant une plus grande flexibilité et évolutivité. Une complexification du service de télévision ou un changement de couche physique sera beaucoup plus facile à mettre en place. Cette caractéristique peut justifier à elle seule l'évolution de la signalisation. Par ailleurs, il est difficile d'estimer complètement l'impact de la signalisation de façon quantitative. En premier lieu, la taille de la signalisation reste marginale en comparaison avec les débits des flux vidéos. Une petite augmentation de celle-ci ne porte donc pas atteinte aux performances globales du système. De plus, le choix d'un multiplexage statistique des paquets permet de gagner en ressources et ainsi de minimiser l'impact du changement de signalisation. L'approche SigComp de compression de signalisation peut également être utilisée [102]. Par ailleurs, comme le montre l'exemple d'un message SDP en comparaison avec les tables SI, certains mécanismes inutiles hérités du standard MPEG2 peuvent être simplifiés par l'approche en couches choisie. On peut dire globalement que la charge de signalisation doit être similaire, voire meilleure si on optimise certains mécanismes.

Services utilisateur : L'utilisateur ne doit pas voir de différence entre le changements de programmes dans un flux **MPEG2-TS** et le changement de programmes entre des flux multicast **IP**. Le mécanisme reste le même : une récupération du flux demandé par le terminal, un envoi au client de télévision et un décodage. D'autre part, la qualité de visionnage doit aussi être similaire si l'ordonnancement est bien choisi, garantissant une bonne synchronisation du récepteur.

On peut conclure brièvement que les performances pures du système de **IPTV**

peuvent concurrencer un service de télévision classique dédié. Au delà des performances, le but essentiel était de montrer qu'il est possible de créer ce service de télévision sans trop de heurts sur la qualité du service. En revanche, la relative complexité protocolaire des différentes couches ajoutées est un faible prix au regard des nombreuses perspectives d'évolution qu'offre un tel système convergent.

3.3 Conclusion

Dans cette partie, nous venons de décrire une architecture de convergence satellite **IP/MPLS** en nous concentrant sur le service historique de télévision. Nous avons proposé une modification de l'implantation du service de télévision par satellite pour le rendre plus général et plus évolutif. De plus, en dépit de l'ajout de couches d'abstraction, nous avons montré que le service de télévision est parfaitement viable. Le travail montre ainsi qu'il est fonctionnellement possible de créer un service de télévision convergent sur satellite. Il apparaît que le système décrit conduit à un overhead légèrement plus important en raison de la plus grande genericité du système obtenu. De la même façon, la surcharge de la signalisation est un peu plus élevée en raison de l'ajout d'un certain nombre de fonctionnalités qui trouveront toute leur utilité quand il s'agira d'ajouter de nouveaux services. En outre, des techniques de compression d'en-tête et d'autres optimisations liées par exemple à l'ordonnancement peuvent être mises en place à peu de frais permettant d'obtenir des performances similaires aux solutions existantes dans un contexte beaucoup plus général. Ce service de télévision peut donc être conservé comme service de base de l'évolution du satellite : le maintien de son fonctionnement dans un environnement réseau plus général est réellement important. Les intérêts de cette approche se voient dans ses perspectives.

Tout d'abord, dans le présent chapitre, cette architecture a été intentionnellement limitée à la voie aller du satellite, ce qui limite grandement l'interactivité et le nombre de services possibles. Avec l'avènement d'une voie retour opérationnelle, il est possible d'aller plus loin et l'architecture décrite prend plus de sens.

De la même façon, l'évolution des satellites transparents vers des satellites régénératifs avec intelligence embarquée (**OBP**) révèle la souplesse de l'architecture **MPLS**. Il est possible d'appliquer les principes de **GMPLS** et de la commutation à plusieurs niveaux entre des faisceaux, des fréquences, des espaces de temps, . . . Il est ainsi possible de commuter plus facilement des communications unicast vers le bon faisceau, la bonne fréquence en gagnant des ressources.

C'est ce que nous allons montrer dans les chapitres suivants.

Chapitre 4

MPLS comme solution de convergence satellite : cas bidirectionnel

4.1	Télévision sur IP/MPLS par satellite bidirectionnel	70
4.1.1	Problématiques liées à la voie retour	70
4.1.1.1	Organisation système	71
4.1.1.2	Organisation protocolaire issue de DVB-RCS	72
	Approche conservatrice de DVB-RCS :	73
	Approche d'intégration avec IP/MPLS :	73
4.1.2	Architecture IP/MPLS bidirectionnelle	77
4.1.2.1	Couches de communications satellites	77
4.1.2.2	Couches IP/MPLS	79
4.1.2.3	Service de télévision bidirectionnel	80
	Vote orienté fournisseur :	80
	Vote orienté Terminal :	81
4.1.3	Problématiques de l'architecture choisie	82
4.1.3.1	Adressage	83
	Identifiants IP/MPLS/GSE	83
	Identifiants DVB-RCS	83
4.1.3.2	Résolution d'adresse	84
4.1.3.3	Accès à la signalisation de la voie aller	84
4.1.3.4	Migration de la signalisation	85
4.1.3.5	Synchronisation	86
4.1.3.6	Sécurité et Confidentialité	86
4.1.3.7	Compatibilité unidirectionnelle/bidirectionnelle	88
4.2	Multi-services sur une architecture IP/MPLS satellite bidirectionnelle	88
4.2.1	Architecture satellite IP/MPLS triple play	89
4.2.2	Service de Téléphonie	91
4.3	Conclusion	92

Les réseaux satellites ont été standardisés par le groupe **DVB** en se focalisant sur le service de télévision. Dans un contexte de convergence de services, une nouvelle architecture satellite doit être construite de façon moins dédiée à la télévision mais conserver ce service avec une qualité et des fonctionnalités équivalentes. Il est donc important de commencer par étudier l'évolution de ce service particulier dans une approche de convergence par satellite. Le chapitre précédent a étudié un exemple d'architecture convergente sur un satellite géostationnaire, transparent et unidirectionnel. Le but était de montrer la faisabilité d'un service de télévision avec notre architecture.

À partir de l'architecture déjà décrite, dans ce chapitre, nous allons étudier maintenant un système de télévision en ajoutant une interactivité à l'aide d'une voie retour satellite. On se retrouve ainsi dans le contexte d'un service de télévision interactif sur une architecture satellite **IP/MPLS** bidirectionnelle. Le satellite reste géostationnaire et transparent.

Ensuite, dans ce même contexte, l'intégration d'autres services sur cette architecture est discutée mettant en valeur l'utilité de l'approche convergente **MPLS**.

4.1 Service de télévision interactif par satellite bidirectionnel sur une architecture IP/MPLS convergente

Dans ce scénario, nous nous proposons donc de nous focaliser sur un service de télévision interactif fondé sur une voie retour. Une voie retour terrestre est envisageable grâce au mécanisme **UDLR** utilisé dans de nombreux réseaux [25, 103]. Ce mécanisme repose sur un tunnel au travers d'un réseau terrestre pour envoyer les paquets **IP** vers la gateway. Nous considérons dans ce travail uniquement le cas d'une voie retour satellite, avec comme objectif la possibilité de services "triple play" tout satellite. Cette voie retour de communication par satellite est donc décrite par le standard **DVB-RCS** sur lequel il paraît normal de s'appuyer (voir chapitre 1). La première partie montre les problématiques système et protocolaire liées à l'adjonction de cette voie retour et propose des solutions. Une deuxième partie s'attache ensuite à décrire un exemple d'architecture bidirectionnelle pour la télévision par satellite. Les différents niveaux de communication de l'accès aux services sont décrits. Ensuite, les principales problématiques apparaissant dans ce contexte sont détaillées et différentes solutions sont proposées à chaque fois.

4.1.1 Problématiques liées à la voie retour

L'ajout d'une voie retour satellite de type **DVB-RCS** à un système de télévision de type **DVB-S** ou **DVB-S2** pose tout d'abord des problèmes d'organisation du système. Ensuite, l'évolution protocolaire faite sur la voie aller dans le travail précédent implique des évolutions protocolaires sur le **DVB-RCS** que nous nous devons d'étudier.

4.1.1.1 Organisation système

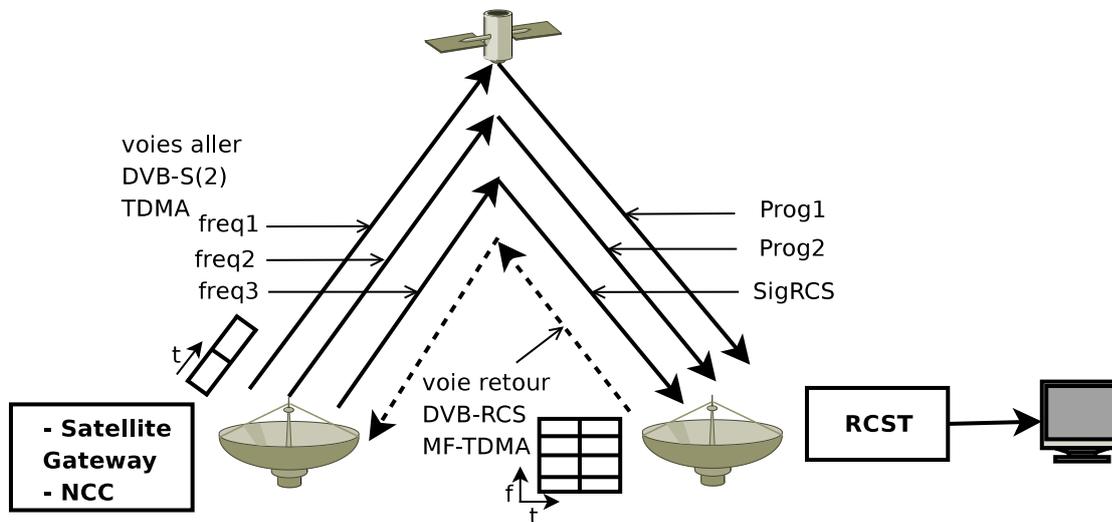


FIG. 4.1 – Organisation système du satellite bidirectionnel envisagé

Tout d’abord, pour faciliter l’étude, nous considérons un seul satellite géostationnaire transparent gérant les voies aller et la voie retour. Les deux sens de communication pourraient être décorrélés sur deux satellites sans changer le fonctionnement. Une passerelle satellite diffuse en TDMA vers de nombreux terminaux (RCST) sur plusieurs fréquences. Ces RCST se partagent en MF-TDMA une ressource temporelle et fréquentielle unique pour communiquer en retour vers la passerelle.

Comme le montre la figure 4.1, un terminal reçoit donc sur une fréquence particulière une signalisation lui permettant de faire fonctionner sa voie retour en termes de synchronisation et d’accès. Il doit donc rester synchronisé sur cette fréquence “freq3”. Dans un système convergent, le terminal va potentiellement potentiellement consulter sur une autre fréquence “freq1” un programme “prog1” de télévision, sous l’injonction d’un utilisateur. Ce changement de programmes va donc obliger à consulter deux fréquences en même temps : celle du programme demandé et celle de la signalisation de la voie retour. Le choix système de la configuration physique sur laquelle notre architecture se fonde est donc un problème important.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Une première solution consiste à se focaliser sur un seul système de réception ou “tuner” ce qui paraît le plus simple et le moins cher. Dans ce cas, lors d’une requête de l’utilisateur pour regarder un programme télévisé situé sur une autre fréquence de réception, il faut transférer les communications existantes ainsi que la signalisation pour la voie retour sur cette nouvelle fréquence. Le temps de chan-

gement de programme peut être très grand et le délai engendré sur les autres services également. Une importante signalisation va de même devoir être déployée pour gérer ce passage. La signalisation de voie retour devra en effet être envoyée sur toutes les fréquences ce qui peut surcharger inutilement le système. Elle peut aussi être émise suite à la requête de l'utilisateur. Cette solution engendre une complexité et un temps de passage d'un programme à l'autre important. On ne la retiendra pas pour notre architecture.

- Une autre solution consiste à avoir deux systèmes de réception. De nombreux systèmes existants ont déjà un double système pour lire un programme et en enregistrer un autre en même temps. La présence d'un second tuner peut donc être utilisée pour recevoir de la signalisation simultanément à un programme. Dans ce cas, un changement de programme se passe plus rapidement car un système de réception peut par exemple s'occuper du service de télévision tandis que l'autre peut continuer à recevoir d'autres données, la signalisation de voie retour et des données utilisateurs. Cette solution semble la plus intéressante dans notre cas malgré son coût plus élevé. En revanche, dans une approche de convergence, il serait dommage de dédier complètement une fréquence à la signalisation. Il faut garder la possibilité de pouvoir transférer sur une même fréquence la signalisation de voie retour, des programmes de télévision et potentiellement des données utilisateurs.
- Une dernière possibilité est d'avoir un multiplexe temporel **TDMA** de réception assez important pour contenir tous les programmes et tous les services, de sorte que les récepteurs n'aient pas besoin de changer de fréquence de réception. Le filtrage se ferait par l'allocation de slots temporels aux différents services ou par des tags. Cette solution est envisageable et simplifierait l'accès mais elle nécessite des contraintes technologiques différentes sur le satellite et les récepteurs. Nous ne considérons pas cette approche non plus, bien qu'elle soit plus simple sur le papier. Si la technologie évolue, cette solution pourra être facilement adoptée.

4.1.1.2 Organisation protocolaire issue de DVB-RCS

DVB-RCS est le standard décrivant le fonctionnement d'une voie de communication retour par satellite entre les terminaux des clients et une passerelle d'opérateur. Il semble logique de s'appuyer sur cette norme pour notre architecture de voie retour. Le fonctionnement de **DVB-RCS** est décrit dans le chapitre 1. Certains arguments nous poussent néanmoins à faire évoluer son fonctionnement dans le cadre de notre objectif de convergence.

L'architecture sur la voie aller du chapitre précédent repose sur une encapsulation **GSE** sur **DVB-S2** et se démarque de **MPEG2**. La signalisation de la voie aller qui mélangeait la signalisation du réseau et la signalisation du service télévision a été réorganisée. Sur le lien **DVB-RCS**, la signalisation repose sur un mécanisme **MPEG2-TS** quand l'ar-

chitecture voulue s'en affranchit. Il apparaît de plus qu'une partie de la signalisation est bien liée au fonctionnement physique du satellite alors qu'une partie est liée à la réservation de ressources ce qui peut faire double emploi avec un mécanisme **RSVP**. Le choix de migration de cette signalisation doit donc être étudié plus avant.

De plus, en considérant l'approche **MPLS**, certaines fonctions et couches de communication deviennent redondantes. La complexité de certains mécanismes de **DVB-RCS** et de sa signalisation peuvent aussi être revus pour une meilleure compréhension et évolutivité d'un système convergent.

Deux possibilités sont alors envisageables pour la construction d'une architecture de voie retour satellite au vu des problèmes évoqués. Nous décrivons tout d'abord une approche conservatrice de **DVB-RCS**, puis une approche d'intégration avec **IP/MPLS**.

Approche conservatrice de DVB-RCS : L'approche la plus directe consiste à se reposer sur une approche **DVB-RCS** existante en modifiant son fonctionnement. Dans ce cas, il faut faire évoluer la signalisation de la voie retour qui est véhiculée sur la voie aller. Comme le montre la figure 4.2, les mécanismes de synchronisation de la voie retour du terminal sont très proches du fonctionnement de **DVB-RCS**. La différence majeure consiste à déplacer la signalisation **DVB-RCS** de la voie aller au-dessus de la couche de convergence **MPLS** car il est logique que cette signalisation de voie retour soit indépendante de l'accès de la voie aller.

Au niveau de la localisation du service de signalisation de voie retour, on utilise le même mécanisme que dans le standard **DVB-RCS** grâce aux tables **NIT**, **PAT** et **PMT**. Une fois la signalisation retour repositionnée sur la voie aller, les mécanismes **DVB-RCS** se déroulent à l'identique, sauf l'allocation d'un "labelRCST" au terminal en lieu et place d'un champ **VPI/VCI**. En effet, l'encapsulation du trafic se fait selon **MPLS** sur **ATM** et le champ **VPI/VCI** d'**ATM** transporte donc un label sur la voie retour.

Cette méthode a le mérite de garder la compatibilité avec l'existant et de ne pas avoir à remodeler entièrement le fonctionnement de la voie retour. Néanmoins, elle fait perdre les avantages de l'approche **MPLS** car deux types de signalisation vont devoir cohabiter et le système est entravé par des fonctionnements qui nuisent à son évolutivité.

Approche d'intégration avec IP/MPLS : Cette nouvelle approche garde le principe de séparation des couches mis en place dans l'approche compatible grâce à l'architecture **MPLS**. Elle va néanmoins plus loin néanmoins en revoyant le fonctionnement de **DVB-RCS** dans une approche d'intégration avec les protocoles **IP/MPLS** existants.

Tout d'abord, le but est d'unifier autour d'**IP** et de **MPLS** le fonctionnement de la signalisation et de se passer totalement de **MPEG2-TS**. Au niveau de la voie aller, le tableau 4.2 montre la fonction des différentes tables et leur correspondance possible au-dessus d'**IP**. On propose un exemple d'évolution de l'allocation des ressources (table **TBTP**) un peu plus loin. L'objectif est de conserver les mêmes mécanismes que les

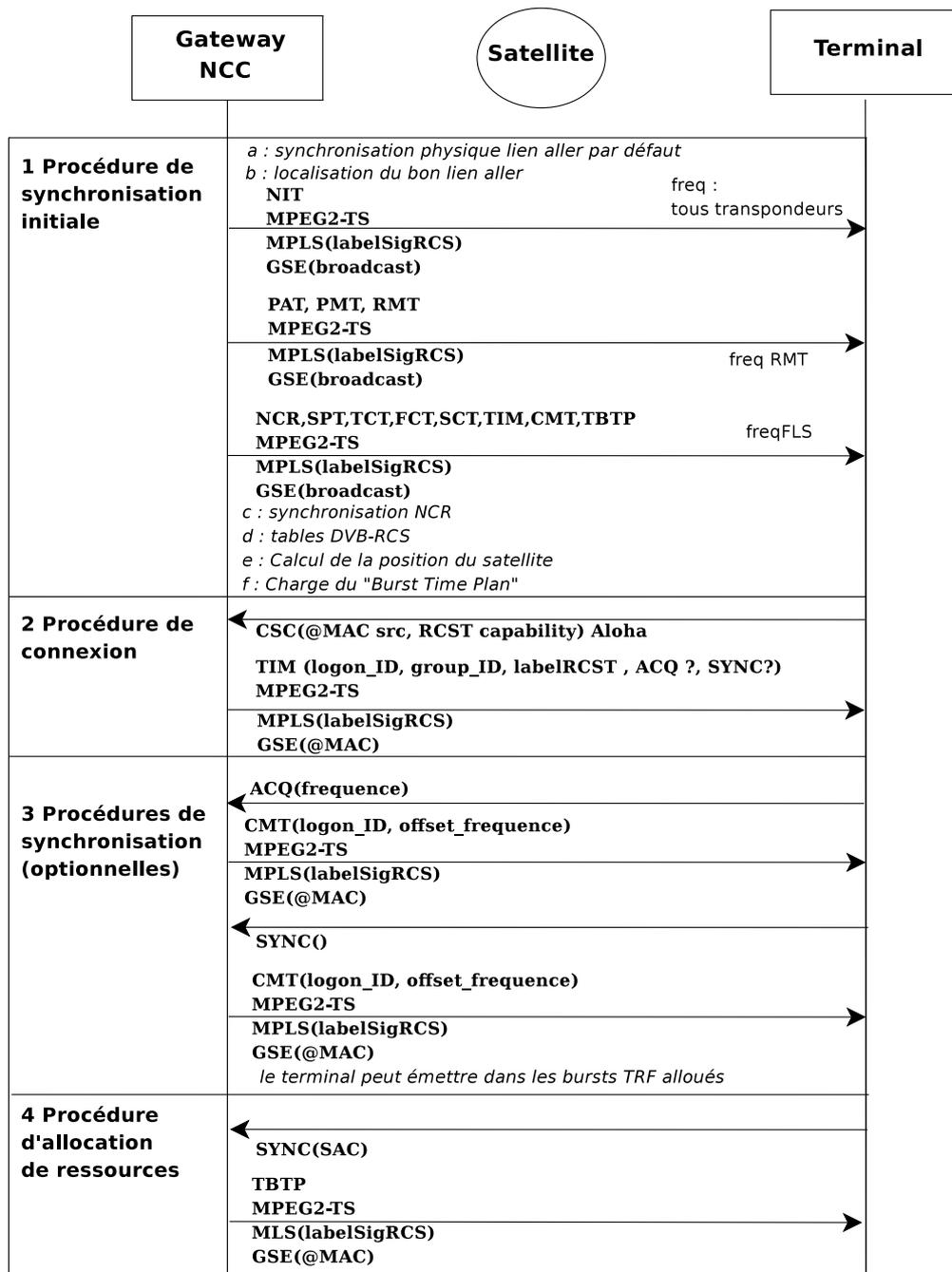


FIG. 4.2 – Approche conservatrice de DVB-RCS

tables SI existantes mais en se détachant de l'approche MPEG2-TS. Pour la signalisation

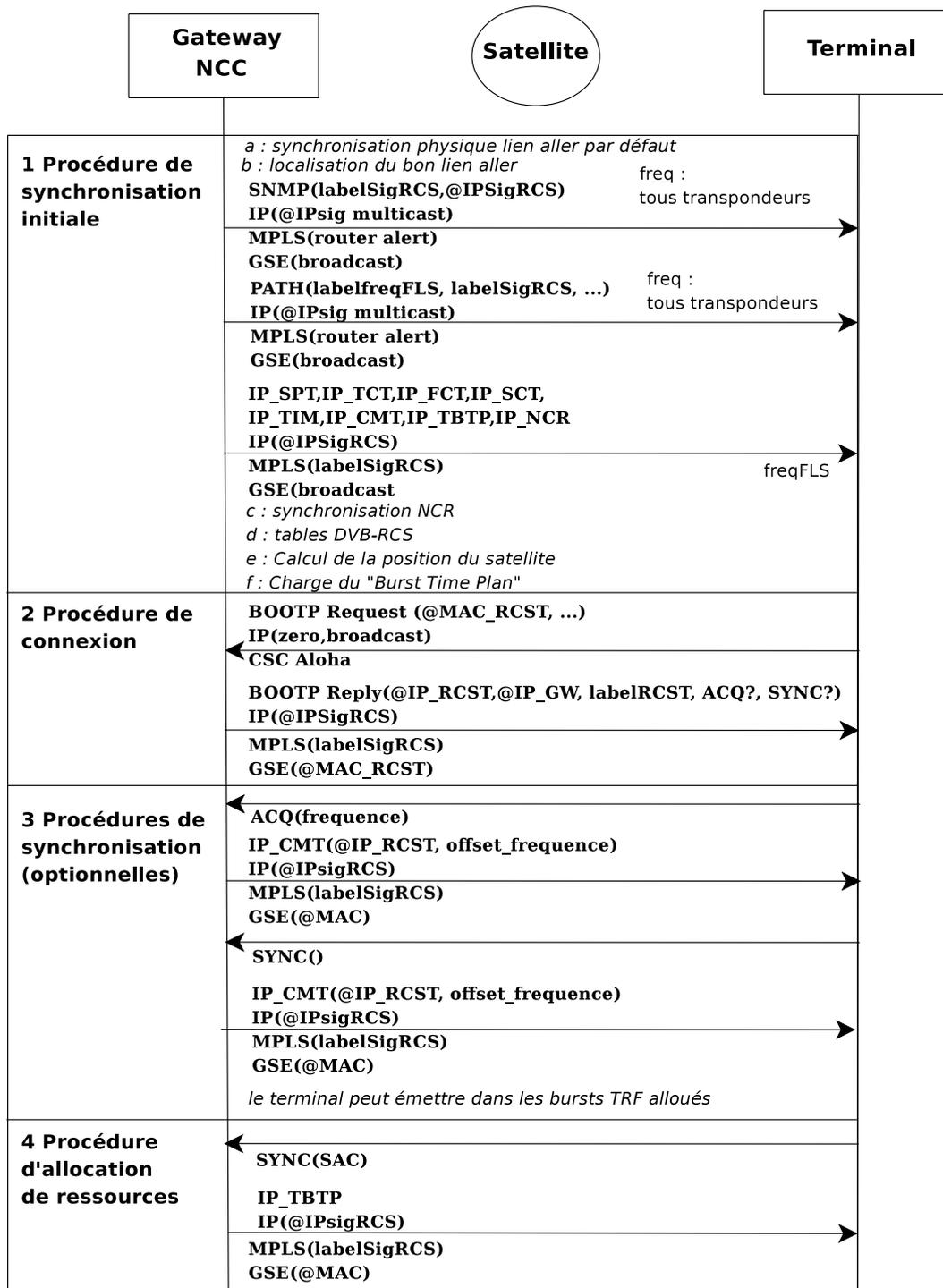


FIG. 4.3 – Approche d’intégration avec IP/MPLS

sur la voie retour, on garde naturellement les mécanismes de signalisation au-dessus de la voie retour (champ **CSC**, **SYNC**).

Forward Link Signalling (FLS)		Correspondance	
Nom	Fonction	Niveau	Protocole
SCT (Superframe Composition Table)	indique l'organisation en supertrames et trames de tout le réseau retour	physique	IP_SCT
FCT (Frame Composition Table)	indique le partitionnement des trames en slots temporels	physique	IP_FCT
TCT (Time-slot Composition Table)	indique les paramètres de chaque slot temporel	physique	IP_TCT
SPT (Satellite Position Table)	contient des informations d'éphéméride de correction des bursts	physique	IP_SPT
CMT (Correction Message Table)	indique aux RCST des corrections physiques à effectuer	physique	IP_CMT
TBTP (Terminal Burst Time Plan)	alloue les slots temporels aux RCST	accès	IP_TBTP
TIM (Terminal Information Message)	contient des messages de configuration	gestion	IP_TIM
PCR Insertion TS Packet - NCR (Network Clock Reference)	donne une horloge de référence pour la synchronisation retour	physique	IP_NCR

TAB. 4.2 – Correspondance des tables SI pour la voie retour

D'autre part, au niveau de la localisation du service de signalisation de voie retour, on utilise le mécanisme décrit dans le chapitre précédent pour trouver la fréquence d'un programme fondé sur **SNMP** et **RSVP**. La localisation se fait donc maintenant grâce à un label "labelSigRCS" sur une fréquence "freqFLS".

Enfin, le protocole **BOOTP (Bootstrap Protocol)** est utilisé pour se connecter au réseau en lieu et place de la requête de connexion dans le slot **CSC** [104]. Des évolutions telles que **DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)** peuvent être envisagées [105].

Les différentes étapes de synchronisation sont décrites ci-après et illustrées par la figure 4.3 :

1. **Procédure initiale de synchronisation** : Après la synchronisation de la voie aller, la recherche du service de voie retour se fait par une fréquence **GMPLS**, un label et une adresse **IP** multicast. Ensuite, le terminal peut recevoir sur ce label et cette adresse **IP** la nouvelle signalisation de voie retour. Grâce à cette signalisation, le terminal peut se synchroniser, récupérer différentes informations de gestion, calculer la position du satellite et recevoir le plan de communication. Les étapes sont les mêmes mais la signalisation est maintenant indépendante de la couche accès de la voie aller.
2. **Procédure de connexion** : Au lieu du mécanisme classique de connexion de

DVB-RCS, les bursts CSC servent à envoyer en Aloha [106] une requête du protocole BOOTP. La gateway renvoie l'adresse IP du RCST et son masque, l'adresse IP de la gateway et le label du RCST équivalent au VPI/VCI. On ajoute aussi des informations sur le besoin de synchronisation physique grossière et fine.

3. **Procédures de synchronisation** : Les mécanismes sont conservés en l'état en utilisant la nouvelle signalisation sur la voie aller pour la correction de la synchronisation (IP_CMT).
4. **Procédure d'allocation de ressources** : Le mécanisme DAMA est conservé mais le plan d'allocation de type TBTP se fait par un mécanisme au-dessus d'IP orienté label et non plus par logon_id.

Cette approche permet une intégration plus simple dans un réseau hétérogène et rend la gestion indépendante des technologies satellite. Le mécanisme pourrait être déployé sur d'autres types réseaux dans le cadre d'une gestion unifiée.

Nous choisissons de développer la dernière approche bien que cela casse la compatibilité avec les systèmes existants. L'approche est plus convergente avec d'autres types de réseaux et permet d'évoluer vers une gestion unique.

Nous nous reposons donc sur une voie aller avec double système de réception et sur l'approche d'intégration de DVB-RCS pour décrire une architecture satellite de communication bidirectionnelle dans la partie suivante. Nous proposons enfin des solutions détaillées pour différents problèmes à traiter.

4.1.2 Architecture IP/MPLS bidirectionnelle

Pour décrire cette architecture bidirectionnelle pour un service de télévision interactif, on repart de la même architecture que celle du chapitre précédent. Comme le montre la figure 4.4, un fournisseur de contenus envoie des programmes à un gestionnaire de télévision qui s'occupe de diffuser les programmes dans le réseau satellite via une gateway vers les RCSTs des utilisateurs. Nous nous contentons de montrer les différences par rapport au cas unidirectionnel. La première différence est donc l'ajout d'un lien retour, en pointillé sur la figure. De plus, une hypothèse importante est l'utilisation de deux systèmes de réception pour chaque terminal comme justifié dans la partie précédente.

Nous allons décrire chaque couche de communication globalement en nous focalisant sur les changements liés à l'ajout de la voie retour. Tout d'abord, nous traitons le fonctionnement des couches satellites de bas niveau, puis nous nous penchons sur les couches de convergence IP et MPLS et enfin sur le service de télévision interactif lui-même. Certains détails seront repris dans la partie suivante.

4.1.2.1 Couches de communications satellites

La topologie que nous avons considérée étant en étoile et donc dans un mode asymétrique, nous séparons la présentation des communications sur les deux voies : la voie

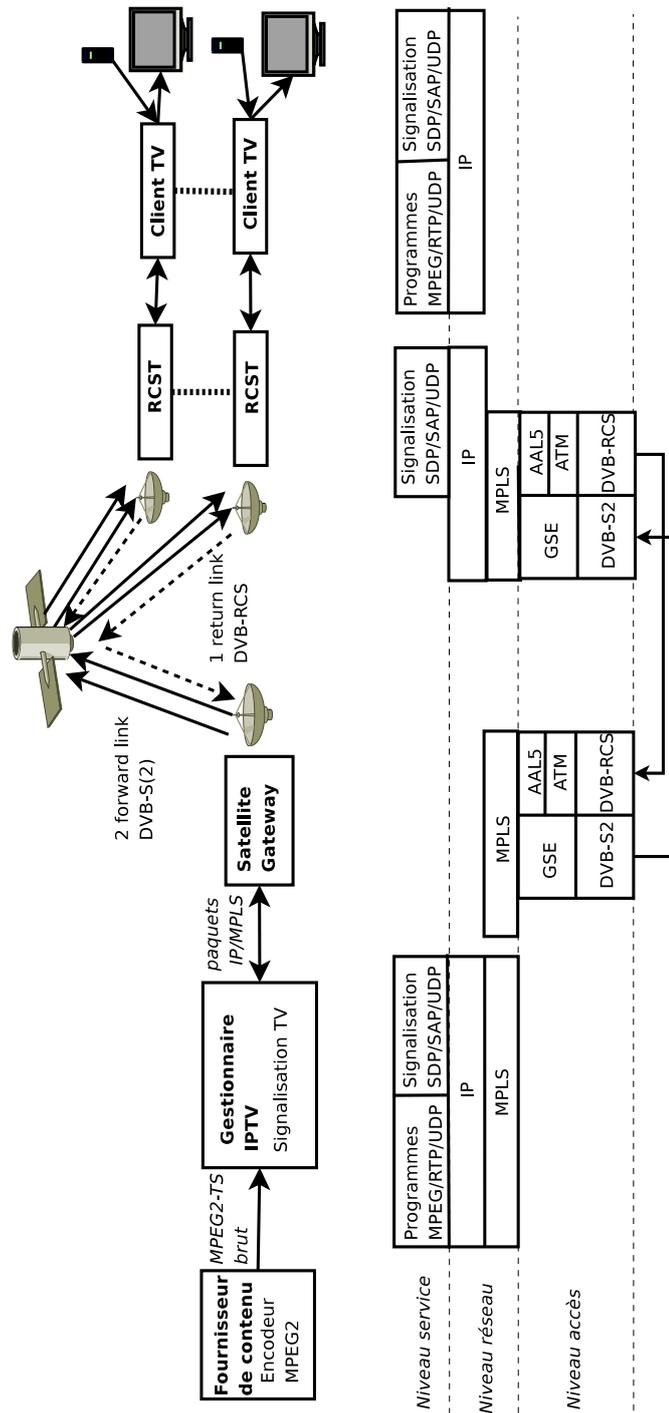


FIG. 4.4 – Architecture du service de télévision sur une liaison satellite bidirectionnelle

aller de la gateway aux terminaux et la voie retour des terminaux à la gateway.

Voie aller : L'architecture physique de la voie aller est décrite dans le chapitre 3 et repose sur **GSE** et **DVB-S2** pour le plan de données. Des messages **RSVP** et **SNMP** remplacent la signalisation réseau de la voie aller (par exemple la table **NIT**). Comme nous considérons deux systèmes de réception, nous avons deux couches **DVB-S2** agrégées dans un niveau **GSE** unique. On considère alors une seule adresse **MAC** par terminal. Le niveau de filtrage du **RCST** peut donc se faire sur les fréquences (label **GMPLS**), l'adresse **MAC** dans **GSE** ou l'adresse **IP**. La voie aller transporte la signalisation nécessaire au bon fonctionnement de la voie retour.

D'autre part, l'ajout de la voie retour permet au terminal de renvoyer des informations d'état du canal à la gateway qui peut adapter en conséquence les paramètres de la couche **DVB-S2** en fonction des conditions de réception (mode **ACM**).

Voie Retour : Le fonctionnement de la voie retour choisie est l'approche intégrée à **IP/MPLS**. La signalisation est donc modifiée en s'orientant vers un mécanisme semblable à **SNMP** au dessus d'**IP**. La connexion n'utilise plus de **logon_id** et **group_id** mais des labels et des adresses **IP** à la place. L'attribution de la ressource se fait selon les labels. Au niveau du plan de données, l'encapsulation se fait par **AAL5** et **ATM** comme dans la norme **DVB-RCS**. La différence est l'utilisation du champ **VPI/VCI** comme label. Cette couche gère la segmentation et réassemblage des cellules **ATM**. En outre, il n'y a pas d'encapsulation multi-protocole sur **ATM** : on choisit un seul protocole par label [107].

4.1.2.2 Couches IP/MPLS

On se retrouve maintenant avec deux voies aller permettant de faire passer du trafic en broadcast et en unicast (adresse **MAC** dans **GSE**) de la gateway vers les terminaux et une voie retour permettant à ces terminaux d'envoyer du trafic unicast vers la gateway. **MPLS** et **IP** sont donc utilisés dans un environnement de communication bidirectionnelle plus classique.

MPLS : En voie retour et en voie aller, des labels étiquettent les communications pour les associer à des chemins virtuels (**LSP**) auxquels différentes caractéristiques peuvent être adjointes. Par exemple, le label a été utilisé dans le service de télévision unidirectionnel pour séparer les différents canaux de télévision. On en garde le principe. Pour la voie retour, le premier label représente le terminal en lui-même et permet à la gateway de séparer les flux des terminaux et donc de réassembler les paquets d'après les cellules **ATM**. On peut associer plusieurs labels à un même terminal. Ce premier niveau de label est géré par une table **MPLS_TBTP** remaniée (voir partie suivante et table 4.4). On peut aussi utiliser un autre niveau de label et une signalisation **RSVP-TE** pour séparer différents types de trafic suivant

leurs propriétés bien que cela augmente l'overhead. A chaque LSP, on peut par exemple associer une qualité de service. Dans notre cas, la voie retour ne servira qu'en mode best effort et un seul niveau de label suffira donc par conséquent.

IP : Le protocole de l'Internet est désormais pleinement utilisé avec la voie retour. Pour le fonctionnement de la communication dans les deux sens, la pile IP doit être configurée avec une adresse IP qui est récupérée à la connexion du terminal (BOOTP). Une fois la pile IP fonctionnelle, il est possible de l'utiliser pour tout type de trafic. Les différentes signalisations IP peuvent maintenant être utilisées normalement en mode bidirectionnel. Néanmoins, certaines optimisations peuvent être faites dans cette topologie en étoile pour les messages IGMP et RSVP.

4.1.2.3 Service de télévision bidirectionnel

Le service de télévision repose sur le même fonctionnement que précédemment avec une signalisation SDP/SAP pour les informations sur les programmes, eux mêmes transportés par RTP/UDP sur IP.

Désormais, il est possible de réfléchir à l'évolution interactive du service de base passif grâce à ce lien retour. L'adjonction de l'interactivité dans un service de télévision constitue une dimension importante dans le contexte de la démocratisation d'Internet, des blogs et des podcasts. De plus en plus de personnes ont l'habitude de commenter, de critiquer ce qu'ils voient donc d'interagir avec un service. Offrir un tel service optionnel est donc un plus. L'interactivité ne consiste pas seulement à ajouter des informations au flux de programmes comme pour des applications telles que le télétexte ou les guides de programmes électroniques (EPG) qui n'ont pas besoin de voie retour. L'interactivité peut amener à un échange de messages entre l'utilisateur final et le fournisseur de contenus en vue d'un enrichissement du service de télévision.

Comme exemple, nous décrivons un service de vote électronique sur un programme. Nous tâchons de garder une compatibilité entre un mode unidirectionnel et bidirectionnel. Les figures 4.5 et 4.6 montrent deux tramage possibles des envois pour ce service.

Vote orienté fournisseur : Comme le montre la figure 4.5, un utilisateur regardant sur sa télévision un programme particulier peut appuyer sur un bouton de sa télécommande, ce qui génère un envoi d'une requête HTTP depuis un client de télévision (interne ou externe au terminal) au fournisseur directement. Ce fournisseur peut ensuite traiter cette requête de façon adaptée et stocker ou utiliser des informations d'une base de données. Il renvoie une réponse adaptée au client de télévision. Cette réponse peut être superposée au flux vidéo émis sur la télévision.

A partir de cette séquence, on peut décliner un service de vote comme suit :

- l'utilisateur appuie d'abord sur sa télécommande pour voir un menu (requête HTTP);

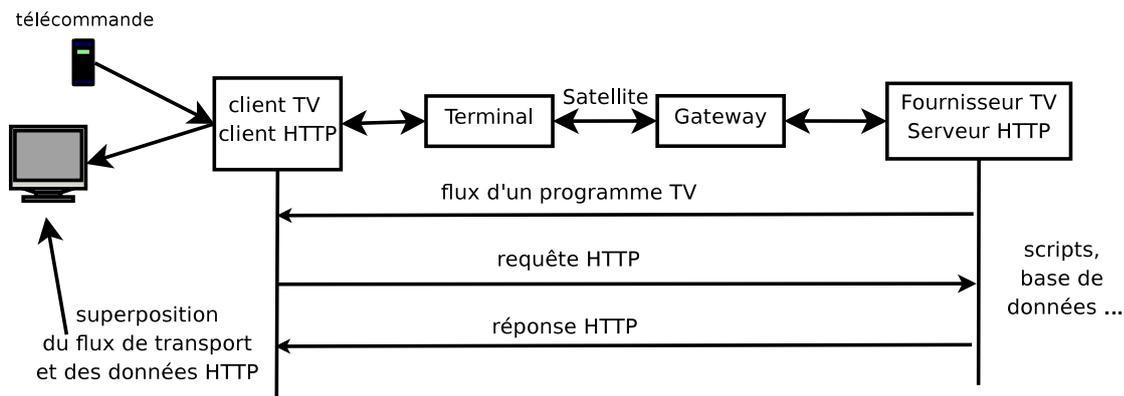


FIG. 4.5 – Exemple de déroulement d'un service de télévision interactif orienté fournisseur

- le serveur du fournisseur lui renvoie le menu général qui se superpose au programme courant (réponse **HTTP**) ;
- l'utilisateur demande maintenant le service de vote sur le programme en cours (requête **HTTP**) ;
- le serveur répond avec la page de vote ;
- l'utilisateur vote pour un des choix possibles ;
- le serveur enregistre ce vote dans ses bases et renvoie un message de confirmation ;

Cette méthode mélangeant la télévision et le web a le mérite d'être très flexible et permet tout type de services de la même façon que sur le web. Le problème qui subsiste est le délai inhérent au satellite qui va rendre la navigation lente. Il est possible que pour certains services cela n'incommoder pas trop l'utilisateur qui pourra attendre en regardant la télévision mais dans le cas de votes multiples et rapides, le mécanisme ne sera sûrement pas assez réactif. Un autre mécanisme orienté terminal est décrit maintenant.

Vote orienté Terminal : Comme le montre la figure 4.6, un mécanisme orienté terminal est également envisageable. Un utilisateur regardant sa télévision va maintenant interagir uniquement avec son terminal local faisant office de serveur **HTTP**. Le terminal dialoguera ensuite avec le fournisseur pour envoyer des informations en post-traitement.

Le service de vote peut alors se décliner de la façon suivante :

- l'utilisateur demande un menu général avec sa télécommande ;
- une requête **HTTP** est envoyée par le client de télévision au terminal ;
- la réponse **HTTP** est donnée par le terminal qui connaît déjà cette requête classique (on peut envisager la présence d'un cache) ;
- l'utilisateur demande maintenant le service de vote relatif au programme en cours ;

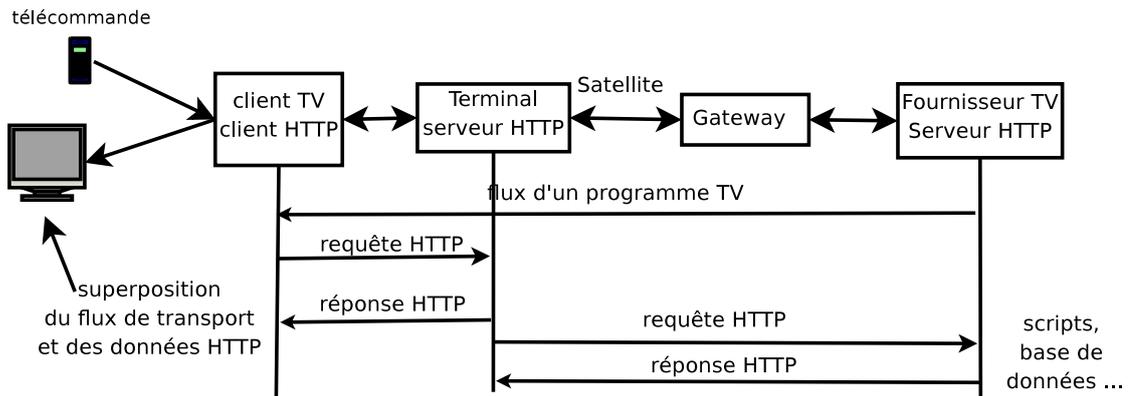


FIG. 4.6 – Exemple de déroulement d'un service de télévision interactif orienté terminal

- le terminal lui renvoie une page d'attente s'il n'a pas la page souhaitée et effectue une requête auprès du fournisseur pour l'obtenir. On pourrait également envisager que le terminal reçoive intégralement le service de vote et l'exécute localement (applet, script, ...) ;
- Une fois l'information récupérée depuis le fournisseur, le terminal renvoie au client la bonne information.
- L'utilisateur peut maintenant voter, le terminal envoie une confirmation de vote et fait suivre cette requête de vote en post-traitement vers le fournisseur ;

Ce mécanisme est très réactif contrairement au précédent et l'utilisateur obtient alors un confort de navigation accrue. En revanche, ce système induit une dépendance vis à vis du terminal, ce qui nécessite d'être lié au diffuseur pour le faire fonctionner. Ce système est moins flexible et moins indépendant du réseau sous-jacent. Sa mise en place est en outre plus complexe. Un fonctionnement hybride suivant les services peut aussi être envisagé.

4.1.3 Problématiques de l'architecture choisie

Nous allons maintenant détailler les points clés liés à l'architecture convergente [IP/MPLS](#) retenue. Nous ne nous attachons qu'à l'approche d'intégration [IP/MPLS](#) non conservatrice. Parmi ces points difficiles, nous pouvons citer :

- l'adressage ;
- la résolution d'adresse ;
- le mécanisme d'accès à la signalisation de la voie aller ;
- la migration de la signalisation avec l'exemple de l'allocation de ressources ([TBTP](#)) ;
- la synchronisation ;
- la sécurité ;

- la compatibilité unidirectionnelle bidirectionnelle ;

4.1.3.1 Adressage

L'adressage est modifié avec l'approche IP/MPLS sur GSE pour la voie aller et IP/MPLS sur ATM pour la voie retour. Certains identifiants d'adressage deviennent redondants et il convient de faire un tri en vue d'une migration de la signalisation. Nous décrivons tout d'abord les identifiants IP/MPLS/GSE qui sont maintenant à la base de la transmission et du filtrage et ensuite les identifiants utilisés dans DVB-RCS avec leur utilité et leur possible modification.

Identifiants IP/MPLS/GSE

- **adresse MAC** (48 bits) : L'adresse MAC est utilisée pour identifier les RCSTs en voie aller. Elle peut aussi servir dans notre cas à identifier un groupe restreint de RCSTs en multicast.
- **label MPLS** (20 bits) : le label MPLS est utilisé comme un identifiant générique de tunnel. Il encapsule les paquets sur la voie aller et sur la voie retour. On peut aussi empiler les labels pour hiérarchiser la communication.
- **adresse IP** (32 bits) : l'adresse IP identifie le terminal de bout en bout d'un réseau de façon indépendante du satellite.
- **port UDP** (16 bits) : le port UDP (source et destination) représente un service générique au dessus d'IP.

Identifiants DVB-RCS

- **population_id** (16 bits) : Il identifie le terminal satellite RCST avant le démarrage et permet de trouver l'identifiant de réseau interactif (*interactive_network_id*) associé au terminal. Il peut être remplacé par l'adresse MAC en changeant le mécanisme de recherche de signalisation de la voie aller mais induit un overhead important. Un label du même type peut être utilisé le cas échéant.
- **interactive_network_id** (16 bits) : Cet identifiant permet d'organiser en plusieurs réseaux d'interaction les RCSTs. Ce mécanisme peut être associé à un label.
- **superframe_id** (8 bits) : Il désigne une supertrame fréquentielle et temporel au niveau physique. Il est conservé en l'état mais peut être associé à un label GMPLS.
- **frame_id** (8 bits) : Il désigne une trame fréquentielle et temporelle physique. Il est aussi conservé en l'état mais peut être associé à un label GMPLS.
- **timeslot_id** (8 bits) : Il désigne un intervalle temporel physique. Le traitement est le même que pour les précédents.
- **satellite_id** (8 bits) : Il désigne un satellite en particulier, une adresse MAC ou une adresse IP pourra être utilisée.
- **NCC_id** (8 bits) : Il représente l'identifiant d'un NCC, une adresse IP pourra le remplacer.

- **gateway_id** (8 bits) : Il représente l’identifiant d’une passerelle. Une adresse **IP** pourra aussi le remplacer.
- **route_id** (16 bits) : Cet identifiant est utilisé dans un système et repère la route destination de descente du satellite. Un label peut avantageusement remplacer cet identifiant.
- **logon_id** (16 bits) : Il identifie le terminal et il est associé à la connexion. On n’utilise plus cet identifiant qui est remplacé par l’adresse **MAC** pour l’adressage du terminal et par un label pour le mécanisme d’allocation **TBTP**.
- **group_id** (8 bits) : Il permet d’adresser un ensemble de terminaux. Cette fonction n’est plus utilisée non plus. Elle est remplacée par des groupes multicast aux niveaux **MAC** et **IP**.
- **channel_id** (4 bits) : Cet identifiant permet de créer des canaux virtuels séparés depuis un terminal. Il est remplacé par les labels **MPLS**.

L’approche plus générique **IP/MPLS** peut donc permettre de simplifier les nombreux identifiants utilisés dans **DVB-RCS**.

4.1.3.2 Résolution d’adresse

Un des problèmes apparaissant est la résolution d’adresse entre les adresses **IP** et le niveau **MAC** sur la gateway. En effet, certains trafics sont unicast entre la gateway et chaque terminal. Il faut donc un mécanisme pour que la passerelle connaisse l’adresse **MAC** du destinataire. Le mécanisme le plus simple est une table statique. Comme la gateway attribue aussi les adresses, elle peut facilement connaître les adresses **MAC** de tous les **RCST**. Néanmoins, différents mécanismes sont commentés dans la **RFC 4947 [108]**. Au niveau de la voie retour, il n’y aura pas de problème car les communications sont forcément dirigées sur la gateway et aucun mécanisme d’adressage n’est nécessaire.

4.1.3.3 Accès à la signalisation de la voie aller

Le mécanisme d’accès à la signalisation de la voie aller se fait sans voie retour, puisque cette dernière est optionnelle. Le mécanisme se découpe en 3 phases et on donne une méthode “orientée label” pour le mettre en œuvre :

- Au début, un terminal est synchronisé avec n’importe quel transpondeur. Sur tous les transpondeurs, un message en diffusion donne la fréquence aller où l’on peut trouver une première signalisation générale de voie retour suivant un identifiant du terminal. Ces messages peuvent être envoyés par un mécanisme au dessus d’**UDP (SNMP, RSVP)** qui indique maintenant la fréquence, le label et l’adresse **IP** de la signalisation de voie retour générale.
- Une fois que l’on est positionné sur la nouvelle fréquence, on peut trouver la liste des identifiants des terminaux et leur réseau de voie retour associé par le même type de message au dessus d’**UDP**. Les identifiants des terminaux peuvent être

les adresses **MAC** ou un label associé à chaque terminal physique (équivalent `population_id`). Le réseau de voie retour peut être identifié par une fréquence aller de signalisation retour (label **GMPLS**) et un label particulier au-dessus.

- Le terminal peut maintenant obtenir sur cette dernière fréquence de signalisation, les différentes informations pour faire fonctionner la voie retour : horloge, tramage **MF-TDMA**, position du satellite.

4.1.3.4 Migration de la signalisation

La signalisation nécessaire au fonctionnement de la voie retour **DVB-RCS** se découpe en deux parties : celle sur la voie retour et celle sur la voie aller. Nous regardons pour ces deux parties les modifications possibles.

La signalisation sur la voie retour se trouve encapsulée dans différents bursts spécifiques : **CSC**, **SYNC**, **ACQ**. Il convient de séparer dans cette signalisation les différentes fonctions. Les bursts **SYNC** et **ACQ** sont conservés à l'identique pour la synchronisation physique de la communication. Le burst **CSC** permet une demande de connexion à la passerelle. Ce mécanisme peut être remplacé par le protocole réseau plus classique **BOOTP**. Enfin, un champ **SAC** dans le burst **SYNC** permet de faire des demandes de ressources et est conservé. Il pourra être complémentaire d'un mécanisme de réservation de ressources de bout en bout tel que celui de **RSVP**.

La deuxième partie de la signalisation **DVB-RCS** est constituée par des tables **SI** spécifiques sur la voie aller. Le mécanisme d'accès à cette signalisation **DVB-RCS** de la voie aller repose d'ailleurs aussi sur les mécanismes d'indirection entre les tables **SI** (cf. point précédent pour la migration de ce mécanisme). L'ensemble de ces tables est répertorié dans le tableau 4.2 avec le niveau protocolaire et les correspondances à construire. Il est important de modifier cette signalisation pour atteindre une indépendance avec le fonctionnement de la voie aller donc au dessus d'**IP**. On pourra ainsi faire évoluer les couches de bas niveau de la voie aller sans remettre en cause le fonctionnement de la voie retour. D'autre part, la migration de l'adressage permet de simplifier le contenu de ces tables.

Pour la migration de ces tables, plusieurs solutions sont possibles. Une utilisation du protocole **SNMP** serait par exemple un bon choix. Nous décrivons un exemple de modification des différentes informations d'une **TBTP** classique vers une **IP_TBTP**. Cet exercice pourrait être appliqué à toutes les tables de façon similaire. La table 4.4 donne donc un exemple de migration de cette table **TBTP** dans la nouvelle approche. Tous les en-têtes issus de **MPEG2-TS** sont enlevés car des mécanismes similaires existent dans les protocoles sous-jacents. On garde uniquement un numéro de version de la signalisation **IP_TBTP**. On conserve évidemment aussi la fonction de la table qui consiste à associer des blocs de slots de capacité retour aux terminaux. La différence ici est que l'on n'alloue plus les slots à un `logon_id`, un `group_id` ou un `channel_id` mais uniquement à un label qui peut représenter tout cela suivant son utilisation. On n'associe plus

directement des ressources à un terminal, à un groupe ou à un canal mais à des labels uniquement. La séparation entre les canaux, les terminaux, les réseaux interactifs se fait avec le mécanisme de label.

4.1.3.5 Synchronisation

Le mécanisme de synchronisation de la voie retour est important. La synchronisation est faite avec une précision de l'ordre de la nanoseconde. Cela nécessite un mécanisme très fin en voie aller.

Dans l'approche **DVB-S** et **DVB-RCS** classique, la synchronisation de la voie retour est donnée par le **NCC** via la **PCR (Program Clock Reference)** existant dans **MPEG2-TS**. On appelle cette horloge la **NCR (Network Clock Reference)**.

Dans une approche **DVB-S2** en voie aller, la voie descendante n'est pas aussi régulière qu'avec **DVB-S**. Les paquets **MPEG2-TS** sont potentiellement gigués avec des **BBFRAMEs** de tailles différentes et l'horloge est à son tour giguée. Un mécanisme de correction décrit dans la norme **DVB-S2** permet de calculer cette gigue et de faire fonctionner la synchronisation.

Le plus simple dans une approche d'indépendance des couches serait d'avoir un mécanisme de synchronisation de voie retour de type **NTP (Network Time Protocol)** [109]. La précision de **NTP** ne semble pas suffisante pour la voie retour. **NTP** n'a pas été conçu pour le réseau satellite avec des délais de propagation importants. Il faudrait trouver un mécanisme au dessus d'**IP** répondant à cette précision.

Une autre façon est de reprendre le même mécanisme que la **NCR** existante au dessus de **MPLS** en s'assurant que ce canal **MPLS** soit le moins gigué possible au niveau de la gateway en lui associant une qualité de service adéquate. Il faudrait dans ce cas étudier si on peut avoir une précision identique que les mécanismes existants.

4.1.3.6 Sécurité et Confidentialité

Même si ce travail ne se concentre pas sur la sécurité, ce point est important dans tout réseau d'opérateur. La diffusion sur la voie aller engendre des contraintes de sécurité importantes car tous les terminaux ont potentiellement accès à toutes les informations émises sur le support. L'ensemble des protocoles et mécanismes mis en œuvre devront être revus à travers ce prisme.

Parmi les points importants, on peut citer la confidentialité des données et notamment le cryptage des programmes. Comme indiqué dans le chapitre précédent, cette confidentialité des programmes peut être créée à différents niveaux protocolaires : accès, réseau, service. L'ajout d'une voie retour permet de créer une protection par clef publique et clef privée plus efficace et de renouveler ces clefs régulièrement (mécanismes **IPsec** par exemple).

DVB-RCS TBTP			MPLS_TBTP		
Syntax	bits	Fonction	Correspondance	Syntax	bits
Terminal_burst_time_plan(){				IP_Terminal_burst_time_plan(){	
table_id	8	identifiant de la table	port UDP	X	
section_syntax_indicator	1	doit être à "1"	X	X	
reserved_for_future_use	1	X	X	X	
reserved	2	X	X	X	
section_length	12	nombre de bits de la section	longueur UDP	X	
interactive_network_id	16	identifiant de réseau retour	label MPLS	X	16
reserved	2	X	X	X	
version_number	5	numéro de version de la table	IP_TBTP	version_number	5
current_next_indicator	1	applicabilité courante ou future	X	X	
section_number	8	numéro de section	IP	X	
last_section_number	8	dernier numéro de section	IP	X	
Group_ID	8	identifiant de service de groupe	adresse multicast	X	
Superframe_count	16	identifiant de superframe	IP_TBTP	Superframe_count	16
frame_loop_count	5+3	nombre de trames applicables	IP_TBTP	frame_loop_count	5+3
for (i=0 ;i<=frame_loop_count;i++) {				for (i=0 ;i<=frame_loop_count;i++) {	
frame_number	5+3	numéro de trame dans la supertrame	IP_TBTP	frame_number	5+3
BTP_loop_count	11+5	nombre de bloc de slots alloués	IP_TBTP	BTP_loop_count	11+5
for (j=0 ;j<= BTP_loop_count ;j++){				for (j=0 ;j<= BTP_loop_count ;j++){	
Logon_ID	16	identifiant du terminal	IP_TBTP	labelRCST+labelChannelID	20
Multiple_channels_flag	1	indique la présence d'un channel_ID	X	X	
Assignment_type	2	nature de l'assignement de slot	IP_TBTP	Assignment_type	2
VBDC_queue_empty_flag	1	état de la file NCC	IP_TBTP	VBDC_queue_empty_flag	1
Start_slot	11+1	numéro du slot de départ	IP_TBTP	Start_slot	11+1
If (Multiple_channels_flag)					
Channel_ID	4+4	numéro de canal supérieur	X	X	
Assignment_count}	8	nombre de slots alloués	IP_TBTP	Assignment_count}	8
}				}	
CRC_32	32	valeur du CRC	UDP CRC32	X	
}				}	
	148				68

TAB. 4.4 – Évolution de la table TBTP

4.1.3.7 Compatibilité unidirectionnelle/bidirectionnelle

La plupart des systèmes de télévision par satellite existants fonctionnent en mode unidirectionnel et continueront de fonctionner dans ce mode. Il convient donc d'avoir des fonctionnements compatibles avec les deux modes : un réseau de terminaux satellites unidirectionnels et bidirectionnels doit pouvoir être constitué avec une même gestion. Les services proposés ne seront évidemment pas les mêmes. Dans un des cas, le service de télévision sera classique et dans l'autre, il pourra être interactif.

Pour la consultation des programmes en eux-mêmes, on conserve le même fonctionnement pour les deux types de terminaux. Les terminaux bidirectionnels peuvent en plus faire fonctionner la voie retour en consultant la signalisation nécessaire et avoir accès à des services interactifs télévisuels associés aux différents programmes. Ces services ajoutés peuvent interagir sur le programme de télévision classique ou ajouter une surcouche au programme uniquement pour les terminaux interactifs. Par exemple, un service de vote en ligne peut avoir une incidence sur l'affichage d'un programme de tous les terminaux tandis qu'un service de messagerie instantanée sur un programme va sûrement avoir uniquement un impact sur les terminaux bidirectionnels.

Au niveau de l'architecture réseau, la compatibilité en mode unidirectionnel et bidirectionnel peut également se poser. En effet, le protocole [RSVP-TE](#) devra par exemple fonctionner dans les deux cas. Le protocole devra peut être évoluer pour prendre en compte ce mode unidirectionnel. De même, le protocole [IGMP](#) devra fonctionner dans les deux modes. A partir de ce mode en diffusion sur la voie aller et de cette topologie en étoile centrée sur la gateway, il apparaît de plus que ces protocoles n'ont pas toujours besoin d'utiliser la voie retour. Au niveau du fonctionnement et de l'adressage, il ne semble pas intéressant par exemple que les programmes soient demandés via [IGMP](#) sur la voie retour par le terminal dans la mesure où ils sont diffusés en broadcast contrairement à l'[ADSL](#). En outre, le temps de changement de programmes serait plus important. Au niveau de la synchronisation et de la qualité de service du service, les terminaux peuvent aussi rester en mode passif. L'architecture réseau peut donc être optimisée grâce à cette topologie particulière.

4.2 Multi-services sur une architecture IP/MPLS satellite bidirectionnelle

L'architecture [IP/MPLS](#) décrite pour les services de télévision a pour objectif principal de simplifier le développement d'offres "triple play". Cette partie cherche à montrer cette facilité fonctionnelle d'intégration de nouveaux services grâce à cette architecture.

Dans cette partie, nous revenons tout d'abord rapidement sur l'architecture globale [IP/MPLS](#) "triple play". Nous avons choisi d'illustrer son fonctionnement au travers du service de téléphonie ([VoIP](#)).

Nous décrivons ensuite seulement l'exemple de la voix sur IP (VoIP) et son intégration sur ce type d'architecture. En effet, le service de télévision a déjà été étudié et un accès au réseau mondial Internet ne pose pas de véritables problèmes d'intégration vue l'architecture choisie.

4.2.1 Architecture satellite IP/MPLS triple play

Le système étudié prend comme précédemment le cas d'un réseau d'accès satellite de type GEO transparent bidirectionnel. Les couches de communication de proche en proche sont donc issues des standards DVB. Comme expliqué dans les paragraphes précédents, nous considérons également pour chaque terminal deux voies aller en diffusion reposant sur le standard DVB-S ou DVB-S2 avec les mécanismes d'encapsulation MPE ou ULE sur MPEG2-TS pour DVB-S et GSE pour DVB-S2. Une voie retour utilise le standard DVB-RCS avec l'encapsulation AAL/ATM.

Ces couches de communication d'accès dépendantes du satellite sont abstraites par une couche MPLS. MPLS permet de gérer le réseau satellite de la même manière que le reste des réseaux terrestres. Un chemin LSP de bout en bout d'un gestionnaire de service aux terminaux satellites pourra être réservé et géré avec la même signalisation de type RSVP-TE. L'adressage IP sert pour la mise en place du chemin et repose sur des tables de routage mises à jour par des protocoles de routage unicast et multicast. MPLS complète ainsi les possibilités réseau du protocole IP.

Le protocole IP sert enfin comme interface commune aux services qui auront ainsi une base commune de fonctionnement. Comme le montre la figure 4.7, les différents gestionnaires de services peuvent accéder de la même manière au réseau de distribution générique vers les terminaux des utilisateurs.

Cette figure illustre l'intégration de différents services avec l'architecture IP/MPLS choisie. Un terminal a la possibilité d'accéder à un service "triple play" vidéo, voix, données via le même accès satellite. On se retrouve avec trois groupes bien séparés par l'architecture :

les fournisseurs de services qui proposent des prestations de manière uniforme sans s'occuper de problématiques réseaux ;

les réseaux d'interconnexion qui relient les fournisseurs de services aux utilisateurs. On peut séparer les cœurs de réseau MPLS et les réseaux d'accès ; dans notre cas, le réseau d'accès des utilisateurs est le réseau satellite. Néanmoins, les services pourraient être distribués de la même façon sur un réseau d'accès terrestre de type ADSL par exemple.

les utilisateurs des services qui accèdent par le même médium à de nombreux services intégrés.

Les différents services "triple play" sont le service de télévision, le service d'accès Internet ainsi qu'un service de téléphonie. Le service de télévision est largement décrit

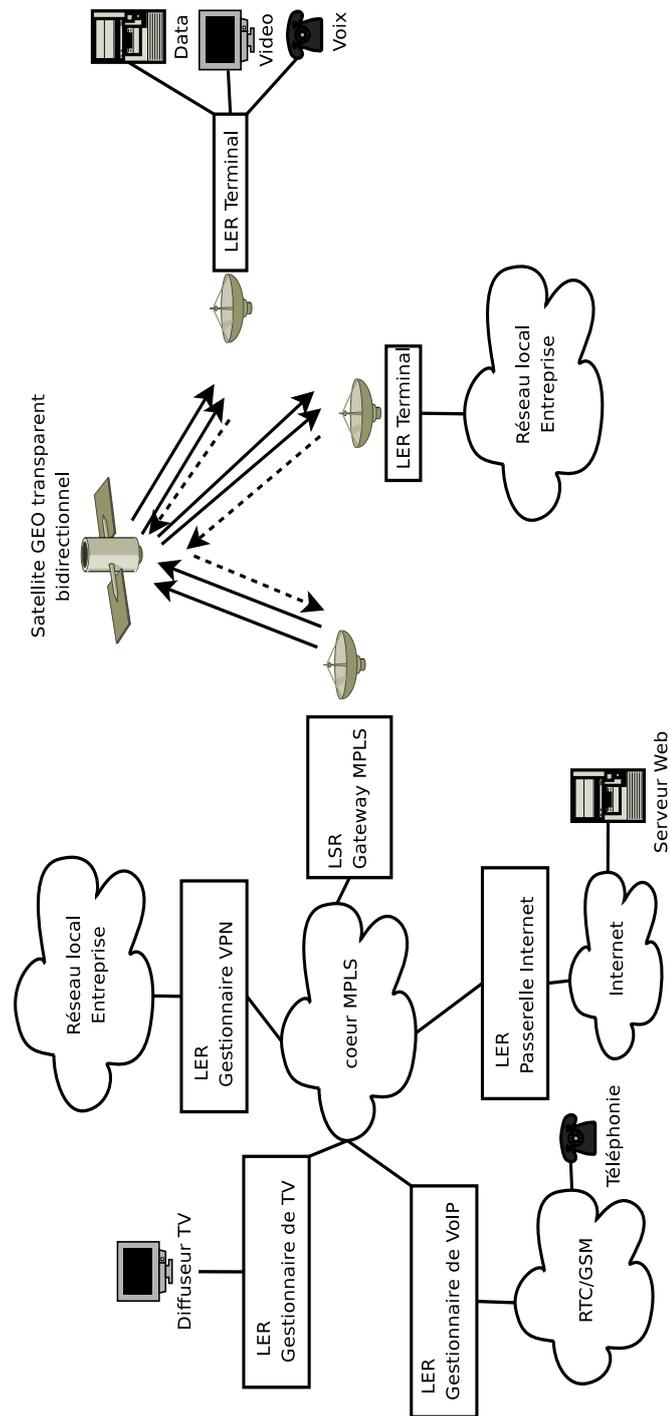


FIG. 4.7 – Intégration de nouveaux services sur une architecture IP/MPLS

dans les chapitres précédents. Le service d'accès Internet peut être mis en place sans véritables problèmes, les choix d'implantation dépendront de l'opérateur. Le trafic Internet peut par exemple suivre un LSP permanent entre les terminaux et les passerelles d'accès au service. Enfin, nous décrivons un service de voix sur IP comme exemple de service supplémentaire plus complexe. En plus de ces services classiques, il est possible de mettre en place facilement un service d'interconnexion de réseaux d'entreprises se servant des tunnels MPLS (exemple VPLS). Une implantation de ce type de services dépendra également de l'opérateur.

4.2.2 Service de Téléphonie

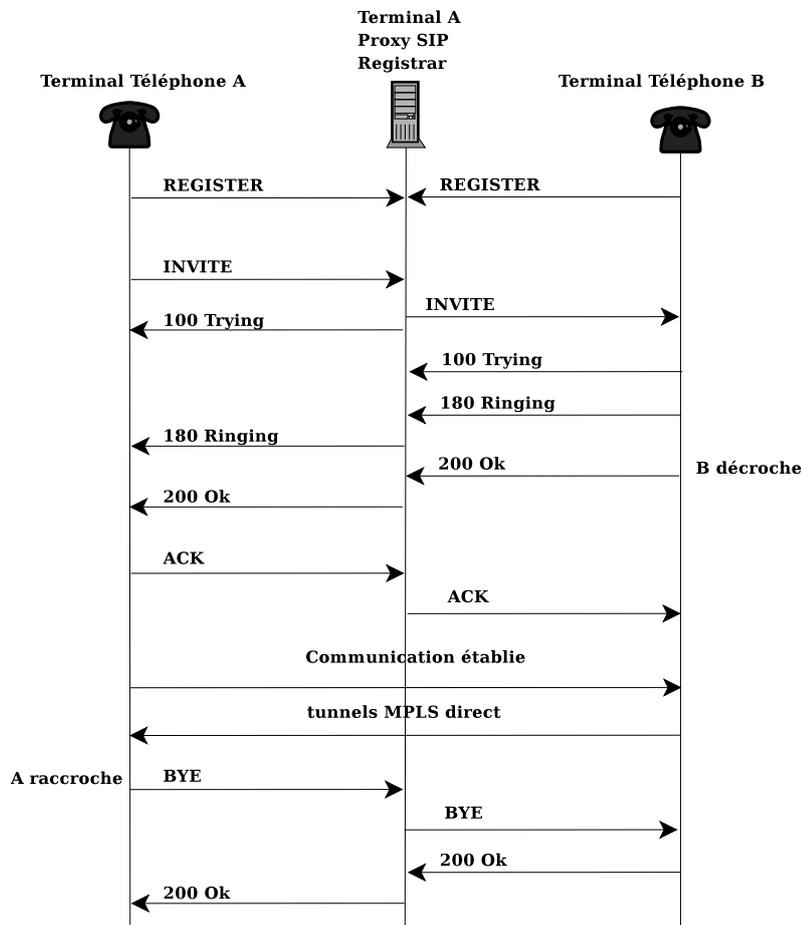


FIG. 4.8 – Session SIP de communication téléphonique VoIP

Vue l'architecture, on considère un système de voix sur IP (VoIP) pour gérer le service de téléphonie. Un gestionnaire de téléphonie s'occupe de ce service et les terminaux satellites s'y connectent via le réseau MPLS générique. On pourrait répartir le gestionnaire sur plusieurs plates-formes pour un passage à l'échelle. Il sert de serveur de base de données "registrar" pour le service de téléphonie. Il a également le rôle de passerelle vers un réseau RTC ou GSM. Enfin, c'est un proxy SIP pour les terminaux. On considère que le téléphone est directement relié aux terminaux qui jouent le rôle de client SIP avec une adresse IP publique. On ne considère pas les cas de NAT (Network Address Translation) et la gestion de plusieurs téléphones dans un réseau client.

Nous décrivons donc le fonctionnement d'une session de VoIP comme le montre la figure 4.8. Lorsqu'un terminal de VoIP A veut communiquer avec un autre, il utilise l'URI du destinataire et génère une requête de connexion (message INVITE). Le destinataire doit s'être au préalable enregistré (REGISTER) au gestionnaire. Le terminal VoIP interroge le gestionnaire via un chemin LSP de signalisation dédiée ou de façon routée directement. Le gestionnaire proxy SIP trouve le destinataire dans sa base de données de registrar et peut alors relayer le message INVITE vers l'adresse IP liée à l'URI récupérée. Le proxy indique qu'il essaye de se connecter (100 Trying) au terminal A. De même, le terminal renvoie l'état du processus de connexion : tout d'abord l'état d'essai (100 Trying) puis lorsque le téléphone B sonne (180 Ringing). Lorsque l'utilisateur décroche, un message de confirmation de connexion est envoyée (200 Ok) par le proxy. Le terminal A renvoie alors un acquittement (ACK) via le proxy également. En parallèle, un mécanisme de réservation RSVP-TE est enclenché par les terminaux LER A et B. A la confirmation, un LSP est donc créé entre les deux correspondants qui peuvent l'utiliser pour communiquer. Les terminaux SIP pourront par exemple limiter le nombre de connexions simultanées.

De nombreuses améliorations ou optimisations sont possibles pour développer une réelle offre de téléphonie sans modifier le réseau physique satellite. Au niveau des performances, les caractéristiques du lien satellite comme le délai important nécessitent de bien régler l'allocation des ressources, la stratégie de qualité de service ou le codage de la voix [110]. D'autre part, une approche d'intégration de la téléphonie avec d'autres services de type IMS pourrait être envisageable.

L'intérêt de l'approche MPLS est de généraliser la notion de tunnel pour l'ensemble des services. Le déploiement de la voie sur IP est ainsi simplifié et peut être déployé de bout en bout de réseaux hétérogènes sans difficultés.

4.3 Conclusion

Ce chapitre se concentre tout d'abord sur l'ajout d'une interactivité à un service de télévision par une voie retour DVB-RCS. Il analyse les problèmes d'intégration de cette voie retour dans l'approche IP/MPLS choisie. La possibilité d'intégration d'autres

services sur cette architecture est ensuite décrite, avec notamment l'exemple de la téléphonie.

Cette facilité à intégrer de nouveaux services montre l'utilité d'une structure protocolaire telle que celle proposée. En effet, les réseaux satellites ont des difficultés à percer et à concurrencer des offres [ADSL](#) en partie en raison de leur organisation historique orientée vers la télévision. Remettre une base architecturale plus générale et plus évolutive en séparant bien les différentes fonctions réseaux et services peut permettre de redonner du souffle au réseaux satellite. Le monde des réseaux de communication évoluant rapidement, la capacité d'adaptation et la flexibilité d'une architecture sont des atouts essentiels.

Le chapitre suivant se propose d'appliquer le principe de l'architecture [IP/MPLS](#) au projet industriel [ULISS](#) de satellite régénératif hybride. L'objectif est de confronter notre approche à d'autres topologies de réseaux, notamment dans le cas de réseaux maillés, ainsi qu'à un contexte industriel.

Chapitre 5

Application au projet ULISS

5.1	Le projet ULISS	97
5.1.1	Organisation générale	98
5.1.2	Etapas de fonctionnement	100
5.2	Convergence IP/MPLS dans ULISS	103
5.2.1	Approche par encapsulation	103
5.2.2	Approche compatible DVB	104
5.2.3	Approche d'intégration avec les protocoles IP/MPLS	108
5.3	Conclusion et perspectives	110

Les travaux précédents ont développé une architecture de convergence IP/MPLS appliquée à un système de télécommunications par satellite transparent. Dans un premier temps, les études portaient sur l'intégration fonctionnelle et architecturale de la télévision de type IPTV sur un canal satellite unidirectionnel. Les impacts d'une voie retour ont ensuite été étudiés de la même manière. Dans cette dernière partie de thèse, nous allons nous focaliser sur un contexte système plus précis : celui du projet ULISS (ULtra fast Internet Satellite Switching) qui utilise un satellite hybride mêlant une approche régénérative et transparente. Le projet ULISS définit notamment une nouvelle architecture de communication permettant le transfert direct de paquets entre terminaux. La topologie est donc maillée : les terminaux sont en point à point et communiquent directement en un seul bond. Les services d'une telle architecture sont donc différents que dans un mode diffusion d'une architecture classique transparente. Typiquement, ULISS pourra servir à interconnecter plusieurs réseaux entre eux, comme des réseaux privés d'entreprise (VPN). Nous allons donc tout d'abord présenter le fonctionnement du système ULISS et son architecture. Ensuite, nous présenterons l'application de notre démarche vers une convergence IP/MPLS et nous en étudierons les impacts sur le système.

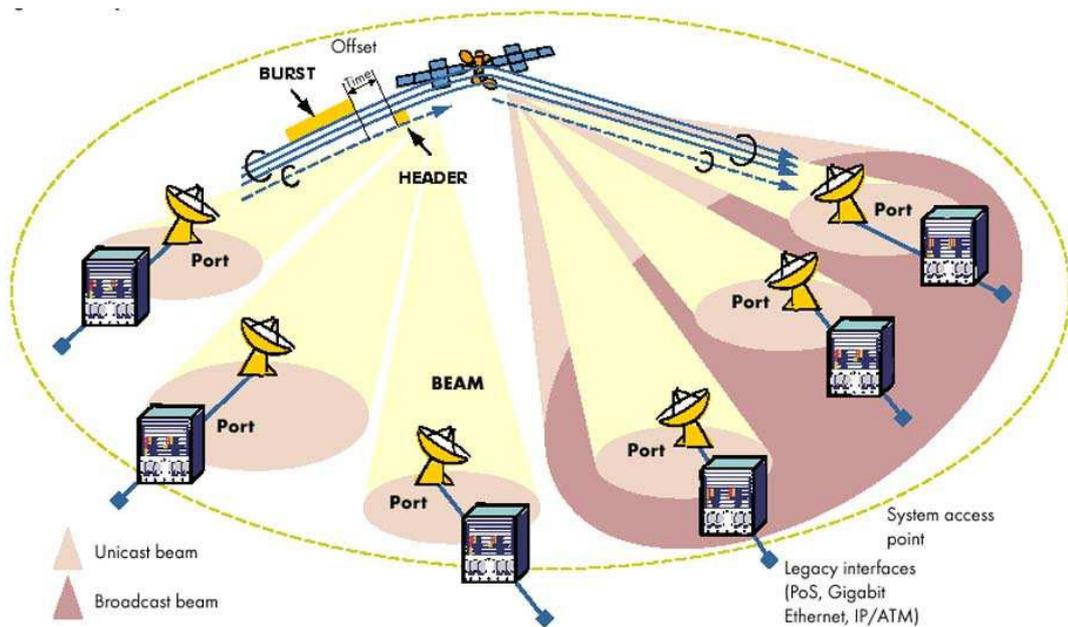


FIG. 5.1 – Vue d'ensemble du projet ULISS [111]

5.1 Le projet ULISS

ULISS est un projet commun entre l'ESA¹, Thales Alenia Space, le DLR², Alcatel-Lucent, le Lyrtech et TeSA [111]. La figure 5.1 montre une vue d'ensemble du projet. Le but de ce projet est de préparer les futures charges utiles satellite pour des services multimédias entre terminaux en bande Ka. Pour cela, quatre objectifs sont fixés :

- définir un scénario d'un système satellite (100 spots et plus de 20GHz de largeur de bande commutées) ;
- démontrer la faisabilité du commutateur embarqué et des technologies associées ;
- implanter le concept de commutation par bursts **RBS (Radio Burst Switching)** ;
- valider les performances dans un environnement **DVB-RCS** existant.

La nouveauté du système réside dans le concept de commutation par burst **RBS** issu du mécanisme **OBS (Optical Burst Switching)** des réseaux optiques qui permet de réduire le calcul à bord [112]. Le principe réside dans l'envoi en avance des en-têtes des paquets pour configurer la commutation de ces derniers (cf figure 5.2). Le commutateur hybride a ainsi une partie régénérative minimale analysant les en-têtes et configurant la partie transparente. Les performances générales du commutateur peuvent être ainsi augmentées sensiblement avec un impact limité sur le coût du système. Grâce à cette technique et à l'évolution de la puissance des processeurs actuels, l'architecture d'ULISS permet des communications **ATM** ou **MPEG2** sans passer par une gateway et ce sur de nombreux spots avec de très larges bandes [113, 114, 115, 116].

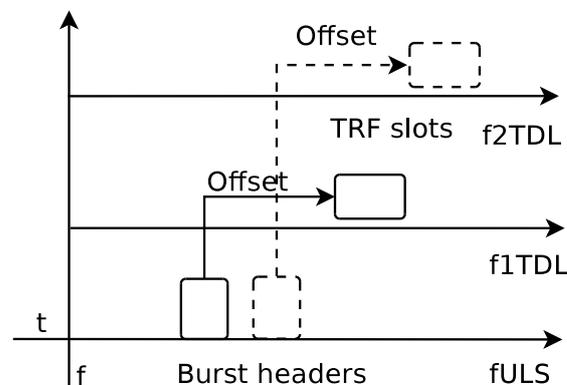


FIG. 5.2 – Principe du Radio Burst Switching dans le projet ULISS

Dans ce projet, nous nous intéressons plus particulièrement à l'architecture de communication définie autour de ce commutateur hybride. Nous regardons tout d'abord l'or-

¹European Space Agency

²Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt

ganisation générale de cette architecture ; nous décrivons ensuite les différentes étapes de fonctionnement.

5.1.1 Organisation générale

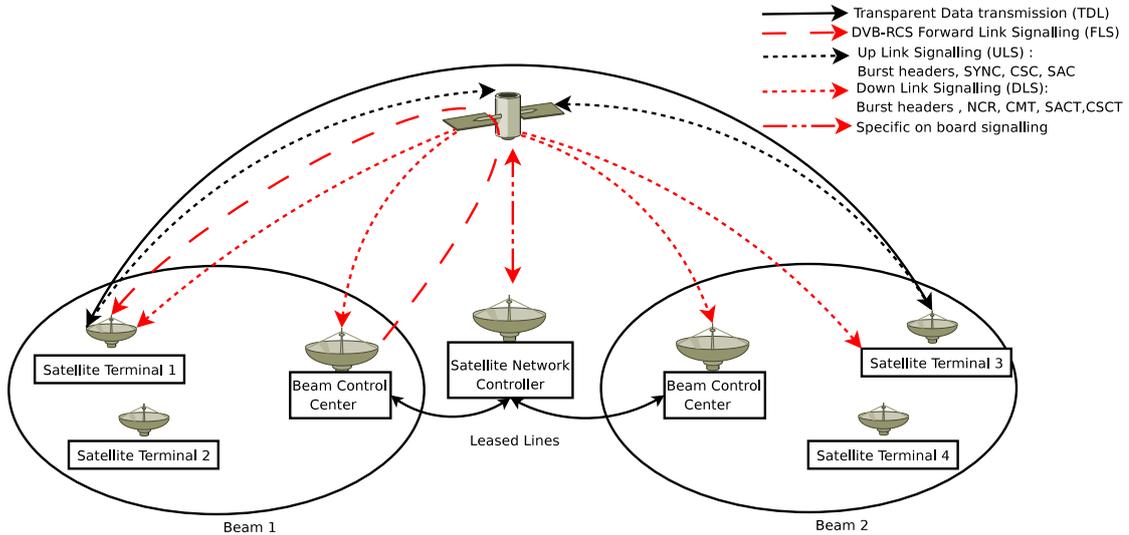


FIG. 5.3 – Organisation générale du système ULISS

Le fonctionnement général du projet ULISS est issu des standards DVB-S et DVB-RCS. En revanche, l'architecture ULISS est maintenant organisée autour d'une charge utile hybride, modifiant le fonctionnement classique sur les voies aller et retour. La principale nouveauté est donc le RBS, permettant d'alléger le fonctionnement de la charge utile. La figure 5.3 montre les différents éléments du réseau et les différentes voies de communications qui sont détaillées ci-après.

Éléments du réseau :

Satellite : Le satellite joue le rôle de commutateur temporel hybride RBS. Il est constitué d'une partie transparente avec une grille de commutation temporelle configurée via une partie régénérative gérant la signalisation. Chaque intervalle de temps sur une fréquence donnée est ainsi orienté dynamiquement vers un autre couple temps-fréquence sur un spot descendant particulier. Des redirections multicast vers plusieurs destinations sont aussi possibles.

BCC (Beam Control Centre) : Les fonctions du NCC de DVB-RCS sont maintenant réparties dans des BCCs dans une architecture distribuée. Ce fonctionnement répond en effet plus facilement à des problématiques de passage à l'échelle de la

signalisation. Un **BCC** se partage avec le satellite toute la signalisation de contrôle et de gestion d'un spot. Une caractéristique importante est qu'il se trouve dans le même spot de descente que les terminaux qu'il gère. En effet, la signalisation descendante du satellite vers le **BCC** et vers les terminaux est regroupée dans un même canal.

SNC (Satellite Network Controller) : Le contrôleur du réseau s'occupe de la gestion centrale du satellite. Il est relié par des liaisons terrestres dédiées aux différents **BCCs**. Les **BCC** lui délèguent certaines requêtes des terminaux. Il détermine de nombreux éléments du réseau comme la taille de la supertrame ou des intervalles de temps **MF-TDMA**. Il configure aussi la table de label et le commutateur à bord du satellite. La réservation des labels passe donc par lui via le **BCC**.

Terminal : C'est l'élément d'accès au système satellite chez l'utilisateur. En plus des capacités de réception **DVB-S** et d'émission **DVB-RCS** classiques, il reçoit des trames **DVB-RCS** provenant directement d'autres terminaux.

Nous décrivons maintenant chaque voie de communication dont les couches protocolaires sont reproduites dans le tableau 5.4.

Voies de communications :

TDL (Transport Data Link) : Ce canal transporte les données utilisateur et interconnecte directement les terminaux à travers le satellite. Les bursts de données émis par les terminaux sont aiguillés vers le bon destinataire grâce à des en-têtes **BHP (Burst Header Packet)** émis en avance sur une porteuse de signalisation montante **ULS** (voir plus loin). Un burst de données peut contenir 2 trames **MPEG2-TS** ou 7 cellules **ATM**. De plus, un **BHP** particulier est réservé pour la communication de contrôle avec le **BCC** du spot reposant sur le protocole **C2P (Connection Control Protocol)** [32]. Cette signalisation vers le **BCC** utilise le mécanisme **DULM (Data Unit Labelling Method)** issu du standard **DVB-RCS** pour s'affranchir du choix entre **MPEG2** et **ATM** (cf chapitre 1). Cette signalisation de plus haut niveau se trouve donc dans le canal **TDL** car elle est indépendante de l'accès **DVB**.

FLS (Forward Link Signaling) : Cette signalisation peut être émise sur des fréquences particulières ou non depuis le gestionnaire du spot **BCC** vers les terminaux. Elle peut être transmise en mode **DVB-S** pur sur des fréquences dédiées connues des terminaux ou via un canal de données avec un **BHP** réservé à cette signalisation. Elle contient la plupart des tables **DVB** permettant le fonctionnement **DVB-S** et **DVB-RCS** (**NIT, PAT, PMT, RMT, SPT, TCT, FCT, SCT, TBTP, TIM**), à l'exception de la signalisation de synchronisation (**CMT, NCR**) directement émise par le satellite via la signalisation sur le lien descendant (**DLS**).

ULS (Up Link Signaling) : Cette voie correspond à la signalisation montante des terminaux vers le satellite. Quelques fréquences lui sont réservées de façon adjacente aux canaux de données (**TDL**). En effet, les **BHP** permettant au satellite de mettre

en place sa trame de commutation sont émis sur ce lien. Les différents bursts de contrôle de la voie retour **DVB-RCS** (**CSC**, **SYNC**) sont aussi transmis sur ce lien vers la partie contrôle du satellite.

DLS (Down Link Signaling) : Ce lien transporte toute la signalisation du satellite vers les éléments au sol. Les entités de contrôle du satellite engendrent des informations de synchronisation vers les terminaux (**NCR**, table **CMT**), renvoient les **BHP** associés au tramage de descente et agrègent dans des tables **CSCT** et **SACT** la signalisation **CSC** et **SAC** émise par les terminaux vers le **BCC** associé.

Observons maintenant le fonctionnement du système étape par étape.

5.1.2 Etapes de fonctionnement

Pour mieux comprendre pas à pas le fonctionnement du système **ULISS**, nous décrivons chaque étape depuis la mise en route d'un terminal jusqu'à sa transmission de paquets vers un terminal situé dans un autre spot. Le séquencement de ces diverses étapes est résumé par la figure 5.4. Nous nous intéressons ici exclusivement au plan de contrôle et les messages sont donc échangés entre le terminal et le **BCC**. Le fonctionnement est proche de celui de **DVB-RCS** mais diffère par la place régénérative du satellite et par la gestion des **BHP**.

Procédure de synchronisation initiale : A l'image du fonctionnement de **DVB-RCS**, un terminal se connectant au réseau doit tout d'abord se synchroniser en réception sur une fréquence par défaut. Sur cette fréquence, un mécanisme d'indirection permet de trouver la fréquence de la signalisation **FLS** au travers des tables **NIT**, **PAT**, **PMT**, **RMT** à partir des identifiants de configuration par défaut du terminal (*population_id*). En plus de ce mécanisme classique **DVB**, la fréquence de la signalisation **DLS** est déduite de celle de la signalisation **FLS**. Si ce n'est pas possible, un mécanisme d'indirection à partir des tables **DVB** doit être mis en place. Grâce à ces deux voies de communication, la synchronisation de l'émission du terminal peut être mise en place. L'horloge **NCR** est directement envoyée par le satellite pour la synchronisation temporelle. Les tables **TCT**, **FCT**, **SCT**, **TBTP** donnent le plan **MF-TDMA** temporel et fréquentiel des bursts (**BTP**) sur la voie retour. La table **SPT** donne le positionnement du satellite pour corriger la synchronisation.

Procédure de connexion : Pour se connecter au système **ULISS**, le terminal envoie à la partie contrôle du satellite un burst classique **CSC** avec ses paramètres. Le satellite agrège toutes les requêtes du spot dans une table **CSCT** pour les transmettre sur un flux descendant de signalisation (**DLS**) vers le **BCC** du spot. Le satellite renvoie au terminal une confirmation de réception du burst, l'accès étant en Slotted Aloha et donc avec des collisions potentielles. Le **BCC** renvoie sur la signalisation de voie retour (**FLS**) un message **TIM** unicast d'acceptation de connexion

avec les identifiants et les informations de connexion : `logon_id`, `group_id`, emplacements des bursts `SYNC`, `PID` ou `VPI/VCI` de transmission et un label `BHP` de signalisation vers le `BCC`.

Procédure de synchronisation fine : L'horloge `NCR` étant directement gérée par le satellite, la procédure de synchronisation complémentaire devient plus simple : seule une procédure de synchronisation fine est conservée par rapport à `DVB-RCS`. Le burst `ACQ` n'est donc plus utilisé. La procédure de synchronisation fine est mise en œuvre grâce à un burst `SYNC` envoyé au satellite auquel ce dernier répond avec une table `CMT` dans la signalisation du lien descendant `DLS`. Cette procédure de correction fine est activée régulièrement au cours de la connexion pour garantir la qualité de l'émission. Dans ce burst, en plus des informations temporelles de synchronisation, un champ `SAC` de requête de ressources peut être "piggybacké".

Procédure de requête de label : Le terminal est maintenant synchronisé et reconnu par le réseau. Lorsqu'il veut communiquer avec un autre terminal dans un autre spot, il faut qu'il demande une valeur de label `BHP` représentant cette direction. Ce mécanisme se fait dans le canal de signalisation `DULM` sur le canal de données (`TDL`) avec le label `BHP` reçu dans la procédure de connexion ; le protocole `C2P` est donc utilisé. Le terminal envoie donc une requête de label au `BCC` qui le transmet au gestionnaire du satellite (`SNC`). Ce dernier vérifie si une connexion est possible et alloue des labels pour la communication. Il transmet ensuite la requête au terminal destinataire qui accepte la connexion et sauvegarde les labels d'émission et de réception. Ce terminal destinataire renvoie la confirmation `C2P` au premier terminal via son `BCC` et le `SNC`. Le premier terminal se met à jour avec ces labels contenus dans la réponse et peut maintenant transmettre directement vers le terminal destinataire via la partie transparente du satellite.

Procédure d'allocation de ressources : Avant de pouvoir transmettre sur la voie `TDL` des données dans des bursts de trafic `TRF`, il faut demander des ressources grâce au champ `SAC` dans le burst `SYNC`. La table `TBTP` renvoie le plan d'allocation des bursts de données en fonction des `logon_id` des terminaux. Une fois des bursts `TRF` réservés, il suffit d'y transmettre les informations utilisateurs ainsi qu'un entête de burst `BHP` contenant le label correspondant sur la voie `ULS` associée.

Ce fonctionnement reprend donc largement les bases des systèmes `DVB` mais permet déjà quelques évolutions :

- le principe de séparation des fonctions de synchronisation bas niveau vers le satellite repris des systèmes régénératifs `DVB`.
- une indépendance du fonctionnement à l'intérieur du plan de données qui ne manipule que des slots temporels grâce au mécanisme `RBS`.
- un début de simplification des fonctionnements (disparition de la macro-synchronisation).

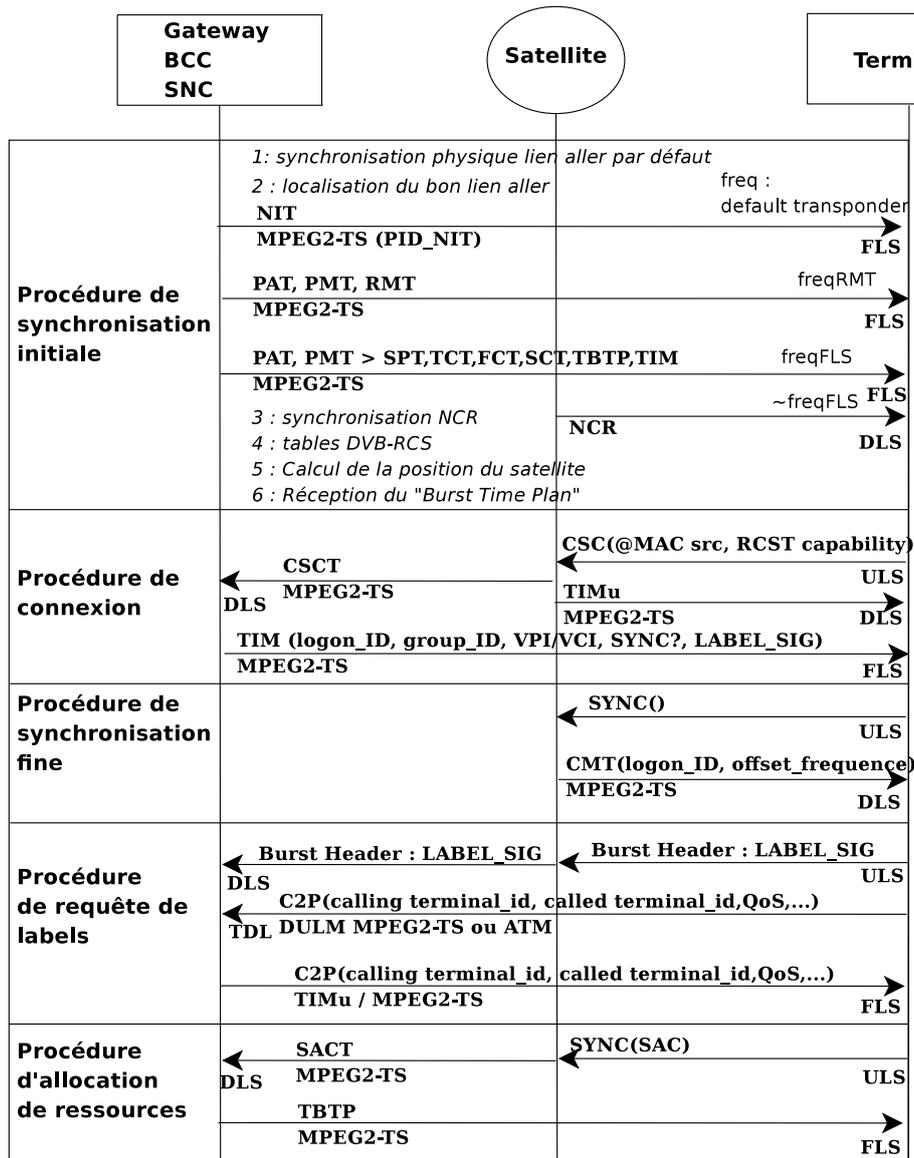


FIG. 5.4 – Etapes de fonctionnement d’ULISS

- la communication directe entre terminaux avec un fonctionnement hybride grâce au RBS.
- la dissémination des fonctions de gestion de réseaux dans une architecture plus distribuée (BCC, SNC).

Le système reste encore dans un fonctionnement DVB qui rend difficile une intégration forte avec d’autres types de réseaux. De la même façon, la découpe fonctionnelle et son implantation rend le système beaucoup trop dépendant de l’architecture satellite

sous-jacente. La question de la convergence d'un tel système pose le problème de son évolution vers d'autres fonctionnements. Dans une démarche cohérente avec celle déjà adoptée dans les chapitres précédents, nous allons maintenant proposer des évolutions possibles vers une architecture [IP/MPLS](#).

5.2 Convergence IP/MPLS dans ULISS

La problématique est ici aussi la convergence des réseaux avec l'ensemble des enjeux associés : virtualisation, simplicité, topologie distribuée, interopérabilité, QoS, gestion, sécurité. Les bénéfices majeurs sont surtout une intégration plus simple et efficace des services et l'évolutivité du système par la séparation des fonctions (cf chapitre 2).

Le choix de l'architecture [IP/MPLS](#) repose sur les mêmes arguments que dans les chapitres précédents. En outre, le label utilisé pour décrire une destination dans [ULISS](#) est en parfaite adéquation avec l'approche [MPLS](#). Cette propriété n'est pas surprenante dans la mesure où l'approche [RBS](#) est issue de l'approche [OBS](#) des réseaux optiques. Cela confirme l'intérêt d'utiliser [MPLS](#) en conjonction avec [IP](#) afin de profiter de la complémentarité de leurs fonctionnalités. L'approche connectée des tunnels LSP [MPLS](#) s'applique très bien aux tunnels dans [ULISS](#) ; [MPLS](#) prend ainsi tout son sens dans ce contexte.

Dans une démarche incrémentale, on peut dégager plusieurs approches d'évolution convergente de l'architecture [ULISS](#) vers [IP](#) et [MPLS](#). Tout d'abord, nous décrivons rapidement l'approche d'intégration par encapsulation la plus simple. Ensuite, nous suivons une approche compatible conservant les mécanismes existants mais en séparant les différentes couches. La dernière partie propose une approche d'intégration avec les protocoles [IP/MPLS](#) s'attachant moins à une compatibilité avec le contexte [DVB](#).

5.2.1 Approche par encapsulation

La première approche d'intégration de l'architecture [IP/MPLS](#) dans [ULISS](#) consiste à utiliser le système [ULISS](#) de façon transparente comme un réseau overlay. Le système [ULISS](#) serait alors considéré comme la couche accès encapsulant une couche réseau [IP](#) sur [MPLS](#). Les services pourraient être ainsi déployés sur [IP](#). Dans ce cas, sur le plan de données, on aurait une pile [IP/MPLS/ATM/DVB-ULISS](#). Sur le plan de la signalisation, des connexions RSVP de haut niveau devront se traduire au niveau du réseau satellite par une connexion [C2P](#) et des allocations de ressources par le champ [SAC](#), dupliquant les mécanismes.

Cette approche a le mérite d'être complètement indépendante du système satellite et permet d'intégrer deux architectures sans les modifier. C'est l'approche typique qu'utiliserait un opérateur terrestre utilisant le réseau satellite car il ne s'encombrerait pas à redéfinir les fonctionnements d'[ULISS](#). Dans notre cas, cette approche ne résout rien

car elle duplique les systèmes et ne permet aucune intégration des mécanismes protocolaires. L'évolution des protocoles **DVB** n'est en effet pas remise en cause dans cette approche, que l'on ne peut pas qualifier de véritable convergence. Nous n'étudions donc pas plus longuement cette approche, dont le principal intérêt est de poser le premier jalon de la logique d'intégration de deux architectures.

5.2.2 Approche compatible DVB

Une approche plus intéressante dans notre optique d'intégration est d'appliquer le modèle de convergence **IP/MPLS** tout en gardant l'essentiel des mécanismes **DVB**. L'essentiel est de séparer les différentes fonctions et les plans avec **MPLS** et **IP**. Dans le cas du mécanisme **RBS**, nous séparons les bursts de trafic dans le plan de données de la signalisation transportée dans les **BHP** comme cela est proposé dans les travaux sur les architectures optiques **OBS** [117]. Néanmoins, les deux trafics sont liés par un décalage temporel et on pourrait considérer le **BHP** comme un en-tête déporté sur la même pile protocolaire. Nous reprenons les différentes voies de communication définies dans **ULISS** en expliquant les changements (cf tableau 5.4) :

FLS : Le besoin de séparer la signalisation de l'accès induit ici une lourdeur de la pile protocolaire. Deux cas différents doivent être étudiés :

- Si **DVB-S** est utilisé, **MPLS** devra être encapsulé avec les mécanismes **MPE** ou **ULE** au dessus de **MPEG2-TS**. La pile protocolaire induite serait **FLS/MPEG2-TS/MPLS/MPE** ou **ULE/MPEG2-TS/DVB-S**. Comme la signalisation **FLS** est conservée à l'identique, il lui faut un flot **MPEG2-TS**. En virtualisant cette signalisation, on obtient une couche **MPEG2-TS** utilisée pour la signalisation et une couche pour l'accès. Pour le **MPEG2-TS** bas niveau, un **PID** par défaut sera réservé pour la signalisation **FLS** ainsi qu'un label **MPLS**. **MPE** ou **ULE** seront utilisés en broadcast.
- Si cette signalisation envoyée par le centre de contrôle **BCC** utilise le mécanisme **RBS** dans un fonctionnement **DVB-RCS-ULISS**, la pile protocolaire pourra être simplifiée. Dans ce cas, on aurait directement **FLS/MPEG2-TS/DVB-RCS-ULISS** avec dans le plan **ULS** un envoi de label **MPLS** dans les **BHP**. L'abstraction de la signalisation se fait par le choix du label **MPLS**. Ce cas permet de simplifier la lourdeur protocolaire et unifie l'accès entre les terminaux et le **BCC**.

TDL : Le mécanisme **RBS** permet déjà de séparer les couches. Le label contenu dans les **BHP** peut être assimilé à un label **MPLS**. Pour chaque burst de trafic, on se retrouve avec un premier niveau **MPLS**. Les bursts de données sont ensuite dimensionnés pour transporter 7 cellules **ATM** ou 2 trames **MPEG2**. On se retrouve donc avec deux cas :

Système ULISS									
Plan de données		Plan de la signalisation							
TDL		Label Reservation		FLS		DLS		ULS	
Services		C2P		NIT, PAT, PMT, RMT, SPT, FCT, TCT, SCT, TBTP, TIM		SACT, CSCT, CMT		NCR, BHP	BHP, CSC, SYNC
IP		DULM							
MPE/ULE	AAL5								
MPEG2-TS	ATM	MPEG2-TS	ATM	MPEG2-TS		MPEG2-TS			
DVB-RCS-ULISS		DVB-RCS-ULISS		DVB-RCS-ULISS	DVB-S	DVB-RCS-ULISS		DVB-RCS-ULISS	

Approche Compatible								
Plan de données		Plan de la signalisation						
TDL		Label Reservation		FLS		DLS		ULS
Services		RSVP		NIT, PAT, PMT, RMT, SPT, FCT, TCT, SCT, TBTP, TIM		SACT,CSCT, CMT		MPLS-BHP, CSC, SYNC
IP				MPEG2-TS		MPEG2-TS		NCR, MPLS-BHP
		MPLS						
MPE/ULE	AAL5	MPE/ULE	AAL5	MPE/ULE		MPE/ULE		
MPEG2-TS	ATM	MPEG2-TS	ATM	MPEG2-TS		MPEG2-TS		
DVB-RCS-ULISS-MPLS		DVB-RCS-ULISS-MPLS		DVB-RCS-ULISS	DVB-S	DVB-RCS-ULISS		DVB-RCS-ULISS

Approche d'intégration IP/MPLS								
Plan de données		Plan de la signalisation						
TDL		Label Reservation		FLS		DLS		ULS
Services		RSVP		SNMP, RSVP, IP_SPT, IP_FCT, IP_TCT, IP_SCT, IP_TBTP, IP_TIM		IP_SACT, IP_CSCT, IP_CMT		MPLS-BHP, BOOTP, CSC, SYNC
IP								NCR, MPLS-BHP
		MPLS						
MPE/ULE	AAL5	MPE/ULE	AAL5	MPE/ULE		MPE/ULE		
MPEG2-TS	ATM-MPLS	MPEG2-TS	ATM	MPEG2-TS		MPEG2-TS		
DVB-RCS-ULISS-MPLS		DVB-RCS-ULISS-MPLS		DVB-RCS-ULISS	DVB-S	DVB-RCS-ULISS		DVB-RCS-ULISS

TAB. 5.4 – Couches protocolaires du système ULISS et leurs évolutions

- Si **MPEG2-TS** est utilisé, le trafic **IP/MPLS** est encapsulé dans **MPE** ou **ULE**. Comme une couche **MPLS** est déjà présente, le trafic **IP** pourrait être directement encapsulé dans **MPE** ou **ULE**. Un deuxième niveau **MPLS** est aussi possible grâce à l'empilement de label. Dans ce dernier cas, une pile protocolaire serait donc **Services/IP/MPLS/MPE** ou **ULE/MPEG2-TS/DVB-RCS-ULISS-MPLS**.
- Le fonctionnement est plus simple avec la couche **ATM** qui est plus adaptée. En effet, le champ **VPI/VCI** peut être utilisé comme un deuxième label **MPLS**, malgré un certain viol des couches dans ce cas. La couche **AAL** fait l'adaptation avec **IP**. La pile résultante est **Services/IP/AAL/ATM-MPLS/DVB-RCS-ULISS-MPLS**.

ULS : Cette voie de signalisation montante contient deux types de signalisation : les **BHP**, en-têtes des bursts **TRF** et les bursts **CSC** et **SYNC** issus de la signalisation

classique **DVB-RCS**. Les **BHP** sont considérés comme des en-têtes **MPLS** contenant un label. Les bursts **CSC** et **SYNC** sont considérés comme de la signalisation au niveau accès et n'ont donc pas vocation à être abstraits sur **IP** et **MPLS**.

DLS : Cette voie de signalisation descendante émise par le satellite peut être séparée en deux types :

- Une partie de la signalisation est dépendante du temps et est donc très liée au fonctionnement de l'accès. On trouve l'horloge **NCR** et les **BHP**. La communication dépend complètement de leur synchronisation et donc on ne modifie par leur fonctionnement sur **MPEG2-TS**. Néanmoins, les en-têtes **BHP** sur la signalisation **DLS** ne sont pas forcément utiles et pourraient être remplacés par le deuxième niveau **MPLS** dans le plan de données.
- L'autre partie de la signalisation correspond à des tables générées ou agrégées à bord du satellite (**SACT**, **CSCT**, **CMT**). Cette signalisation n'est pas dépendante de l'accès et doit être abstraite au dessus de **MPLS** comme pour la **FLS**. La pile protocolaire résultante, forcément sur **MPEG2-TS** pour la première signalisation, est **SACT**, **CSCT**, **CMT/MPEG2-TS/MPLS/MPE** ou **ULE/MPEG2-TS**.

Nous nous intéressons maintenant aux étapes modifiées illustrées dans la figure 5.5. Cette figure ne montre pas les diverses couches accès envisageables.

Procédure de synchronisation initiale : Le fonctionnement est similaire avec la signalisation abstraite au dessus de **MPLS**. Le **NCR** est conservé au niveau accès. Des valeurs par défaut doivent être attribuées au label et au **PID** de **MPEG2-TS**.

Procédures de connexion, de synchronisation et d'allocation : De la même manière, cette approche compatible conserve les fonctionnements à l'identique en rajoutant la couche **MPLS** d'abstraction quand il y en a la possibilité.

Procédure de requête de label : Le mécanisme de requête de label d'**ULISS** par protocole **C2P** est indépendant des couches d'accès par les fonctions **DULM** et **RBS**. Il peut donc être changé sans impact sur l'architecture. Comme on réserve maintenant des labels **MPLS**, cela est plus simple d'unifier la signalisation de réservation de labels autour du protocole standard **RSVP-TE**.

Cette approche est une étape permettant :

- d'intégrer **MPLS** dans l'architecture **ULISS** ;
- de séparer la partie de la signalisation qui est indépendante de l'accès.

Dans cette approche, on conserve néanmoins des fonctionnements et des identifiants issus des deux architectures qui font double emploi. La signalisation n'est donc pas encore homogène. L'étape suivante consiste donc à casser la compatibilité avec les mécanismes **DVB** et à harmoniser la signalisation avec l'approche **IP/MPLS** plus répandue dans les réseaux terrestres.

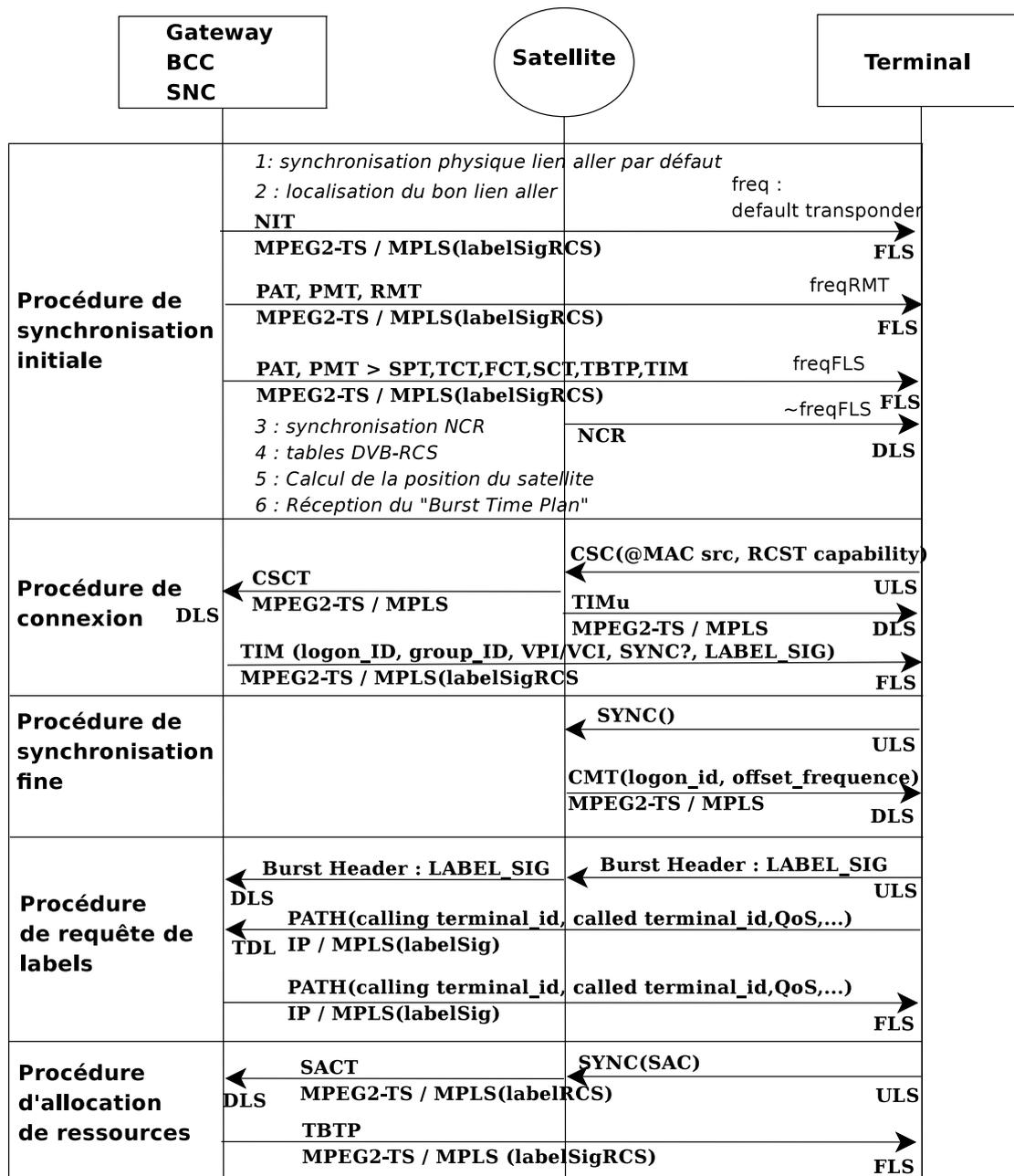


FIG. 5.5 – Etapes de fonctionnement pour l’approche compatible de convergence

5.2.3 Approche d'intégration avec les protocoles IP/MPLS

En allant plus loin dans le processus de convergence, la compatibilité avec les mécanismes **DVB** existants ne sera pas conservée. En revanche, grâce à cette couche de convergence, l'intégration dans un réseau plus global sera facilitée, de nouveaux services pourront être déployés sans changer le fonctionnement des couches basses et cet accès pourra être remodelé sans toucher aux services.

On remplace désormais les mécanismes **DVB** et **MPEG2** par des mécanismes **IP** et **MPLS** : le paradigme de la séparation des couches est conservé mais la signalisation est déplacée. Certaines parties de la signalisation sont reprises au travers de protocoles existants et d'autres parties doivent être redéfinies au dessus d'**IP**. On reprend l'approche développée dans le chapitre précédent pour la migration de la signalisation. Les différentes voies de communication sont conservées comme dans l'approche compatible. Le tableau 5.4 donne les différentes piles protocolaires. La différence majeure est l'utilisation d'**IP** pour le transport de la signalisation.

Nous décrivons de nouveau les différentes étapes de fonctionnement :

Procédure de synchronisation initiale : Les fonctions nécessaires sont les mêmes mais la signalisation est maintenant prise en charge par les protocoles **SNMP** et **RSVP-TE**. Lorsqu'un terminal se connecte au réseau, il se synchronise sur sa fréquence de départ et trouve la signalisation **SNMP** générale à partir du label **MPLS** dédié "router alert". Il trouve aussi des informations **RSVP-TE** concernant l'association des labels et des fréquences. A partir de son adresse **MAC** et d'autres informations de gestion, il trouve la signalisation de voie retour. Les anciens identifiants de **DVB** sont remplacés par des labels ou par l'adresse **MAC**. Les différentes tables sont appelés : **IP_SPT**, **IP_TCT**, **IP_FCT**, **IP_SCT**, **IP_TIM**, **IP_TBTP**. Le mécanisme de synchronisation **NCR** est conservé à l'identique au niveau physique.

Procédure de connexion : Le contenu des bursts **CSC** est maintenant modifié pour utiliser le protocole **BOOTP**. Une requête est envoyée avec l'adresse **MAC** du terminal au **BCC** via le satellite. Le message de confirmation **TIM** unicast est supprimé ainsi que le timer associé ; il pourrait être remplacé par un message **IP_CMT** de synchronisation. Le **BCC** renvoie la réponse **BOOTP** avec la configuration **IP** du terminal remplaçant les identifiants de connexion (**logon_id**, **group_id**). Des options au fonctionnement classique de **BOOTP** peuvent être envisagées. Le label **MPLS RBS** permettant de communiquer directement avec le **BCC** peut par exemple être inclus. Il pourrait être aussi ajouté dans la signalisation **SNMP** ou avoir une valeur par défaut.

Procédure de synchronisation fine : La synchronisation reste identique à l'exception de la table **CMT** implantée au dessus d'**IP** (**IP_CMT**).

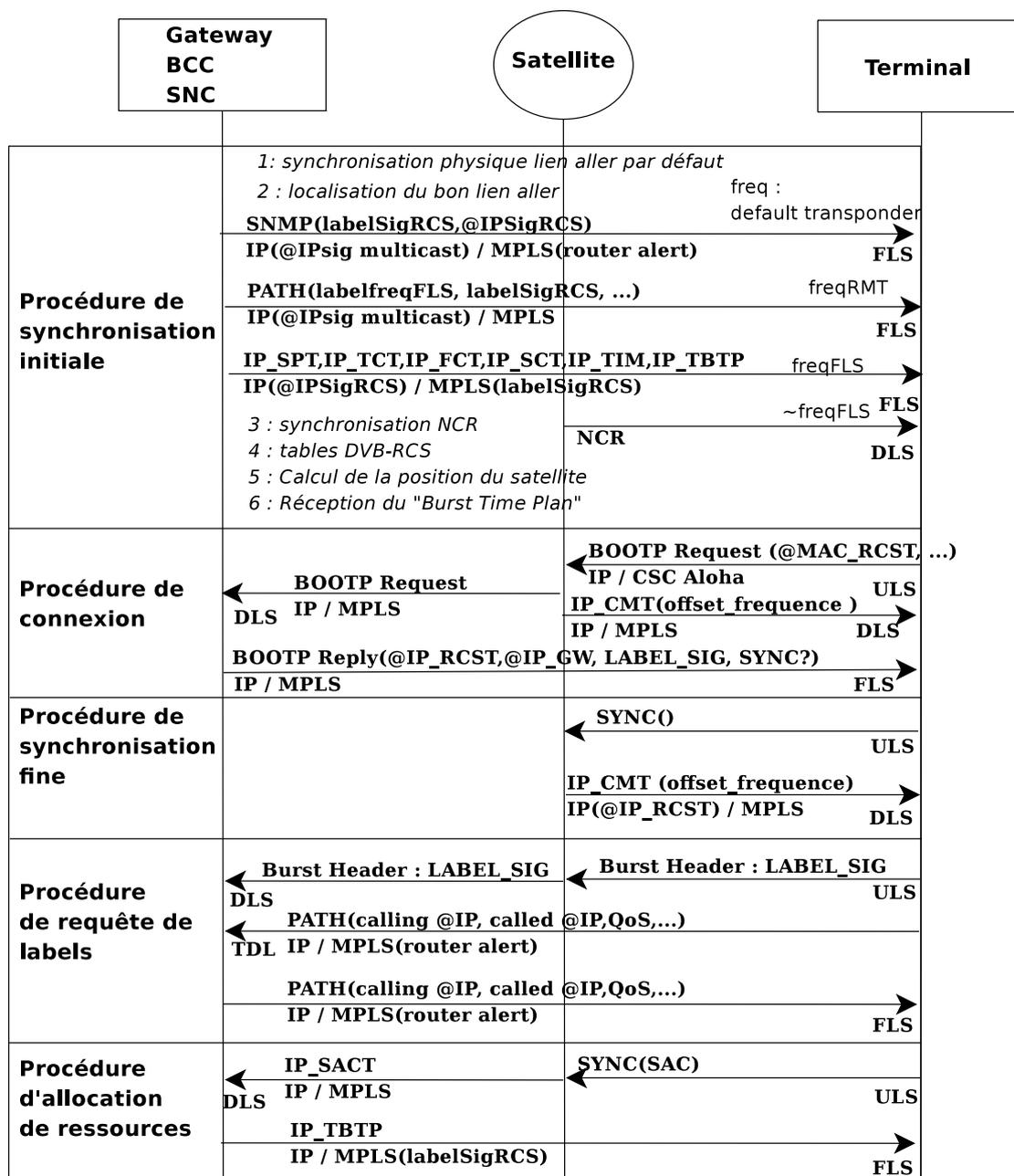


FIG. 5.6 – Approche de convergence avec les protocoles IP/MPLS

Procédure de requête de label : Cette fonction avait déjà été déplacée et utilise le protocole **RSVP-TE** en lieu et place de **C2P**.

Procédure d'allocation de ressources : La requête de ressources reste liée à l'accès

à l'intérieur du burst **SYNC**. Sur la voie **ULS**, le champ **SAC** est conservé mais modifié avec des identifiants **IP**. La partie contrôle du satellite agrège maintenant les requêtes au dessus d'**IP** dans un mécanisme **IP_SACT**. Le plan d'allocation des bursts est donné par la table **IP_TBTP**, migration de la table **TBTP**.

Cette approche permet d'aller plus loin dans la convergence en unifiant la signalisation dans une approche orientée vers **IP** et **MPLS**. Les anciens identifiants satellite ne sont plus utilisés.

5.3 Conclusion et perspectives

Ce travail sur le projet **ULISS** donne un exemple industriel de l'application d'un modèle de convergence à un système dédié satellite. Tous les intérêts de la convergence en termes de réutilisabilité et de pérennité s'appliquent comme décrit dans le chapitre 2.

En termes de performance, la migration vers l'approche convergente décrite est raisonnable dans le cas d'**ULISS**. En effet, l'overhead sur le plan de données est identique dans la mesure où le label **RBS** est réutilisé. En revanche, il y a un overhead sur la signalisation dû à l'empilement de couches. L'importance de cette surcharge d'en-têtes pour la signalisation peut être pondérée par les bénéfices induits par la convergence.

D'autre part, par rapport aux études précédentes avec un satellite transparent, nous nous retrouvons avec un commutateur temporel embarqué qui change complètement la topologie qui est alors maillée. Les services d'un tel système sont complètement différents de la télévision en diffusion et s'orientent plus vers des communications point à point entre terminaux comme de l'interconnexion de site par **VPN** ou de la vidéoconférence. Il paraît normal que dans cette optique le fonctionnement orienté télévision des couches protocolaires satellites évolue. L'utilisation de **MPEG2-TS** comme structure de communication de base reste néanmoins difficilement contournable car il est la base de nombreux fonctionnements d'**ULISS**.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de confronter l'approche **DVB-S2** en voie retour au système **ULISS**. Cette approche pourrait être utilisée pour des transferts importants entre deux terminaux avec un gain d'efficacité spectrale important. Il faudrait dans ce cadre revoir le tramage de la couche physique fondé sur **DVB-RCS**, avec notamment des problématiques autour de la synchronisation ou du partage des ressources (**BBFRAME**).

Une autre perspective est l'intégration des différentes couches d'accès autour du protocole **GSE**. La convergence des couches accès vers un modèle plus uniforme paraît intéressant ainsi que la remise en cause du fonctionnement voie aller et retour classique de **DVB**. **ULISS** va déjà dans cette direction et remet en cause certains paradigmes de l'architecture **DVB**.

Conclusion

Les nouveaux usages des réseaux de télécommunications se traduisent par la volonté des utilisateurs d'être connectés partout, n'importe quand et à partir de n'importe quel terminal. Cela implique un besoin de convergence dans les réseaux de communication rendant homogène l'accès à des services et des réseaux hétérogènes. Pour ne pas être marginalisés, les systèmes de communication par satellite doivent relever ce défi.

Ne nécessitant pas d'infrastructures terrestres lourdes et ayant une large couverture, le satellite est notamment considéré comme un élément important pour réduire la fracture numérique. En témoigne le développement d'offres fixes ou mobiles [DVB-RCS](#) ou [DVB-SH](#). Le succès du service de télévision a modelé et largement conditionné les architectures de communications sous-jacentes. Cela a, du même coup, complexifié la transmission de flux bidirectionnels et l'intégration dans les réseaux terrestres. Il paraît alors naturel de se poser la question de l'évolution convergente des réseaux satellite.

Un état de l'art général des systèmes de télécommunication par satellite nous a permis d'illustrer les problématiques de convergence liées aux standards [DVB](#).

Nous avons alors proposé des critères afin d'évaluer dans le contexte satellite les différentes solutions de convergence existantes. Nous avons également classifié les approches en trois types : convergence fixe-mobile, convergence par les services et convergence des architectures de réseaux. Cette dernière nous est apparue comme la plus fondamentale pour les systèmes de communication par satellite. La combinaison des technologies [IP](#) et [MPLS](#) est celle qui répondait le mieux aux besoins. La technologie [IP](#) s'est imposée comme l'interface unique des services ; elle est désormais incontournable. Elle présente néanmoins des lacunes qui sont bien compensées par [MPLS](#), conçu comme une technologie permettant de rapprocher les principes des réseaux opérateurs ([ATM](#) par exemple) avec les technologies [IP](#). Elle offre, en outre, des capacités d'ingénierie de trafic efficaces.

Plusieurs scénarios ont été étudiés pour valider notre approche. Tout d'abord, il paraissait fondamental de se concentrer sur le service historique de télévision. Nous avons montré que nous savions répondre aux besoins de ce service à l'aide de protocoles appropriés. La solution est à la fois satisfaisante fonctionnellement et en termes de performances. Notre contribution a consisté à mettre en place une structure protocolaire séparant les services des couches basses, tant pour le plan de données que pour le plan

de contrôle.

L'étape suivante consiste à enrichir les services. Nous avons ajouté un lien retour pour un scénario de télévision interactive. Les principales problématiques sont résolues, en particulier l'évolution des différents adressages, de la signalisation ou des mécanismes de synchronisation. Des exemples d'interactivité ont été traités et nous avons montré la simplicité de mise en œuvre de notre solution. Un nouveau scénario de téléphonie sur IP est alors proposé, démontrant la facilité d'intégration de différents services sur notre architecture. Bien évidemment, c'est dans le contexte de services classiques du monde Internet que notre solution prend tout son sens.

La dernière partie de notre travail se place dans le cadre du projet industriel **ULISS** de commutateur hybride embarqué. Ce dernier scénario est original dans la mesure où l'on est dans un contexte maillé avec un satellite régénératif. L'architecture **IP/MPLS** est alors appliquée pour montrer la flexibilité de notre approche. Notre proposition d'évolution de la signalisation d'**ULISS** dans un cadre **IP/MPLS** permet une ingénierie de trafic de bout en bout intégrée aux réseaux terrestres.

Cette thèse propose une approche transversale de la convergence dans les réseaux satellite. Elle a le mérite de clarifier les différentes problématiques. L'effort que nous avons porté, en particulier sur la signalisation, sur la séparation entre le système satellite et le service, constitue un travail pionnier.

Cette séparation protocolaire proposée va pouvoir naturellement faciliter l'évolution des services et des couches de communication satellite. En effet, il serait aisé de passer d'un service de télévision **MPEG2** à une compression **MPEG4** plus performante sans modifier la structure du réseau sous-jacent. De la même façon, un changement de codage ou de modulation satellite n'aurait pas d'impact direct sur les services. Nous proposons donc une meilleure organisation permettant une réduction des coûts.

Les perspectives dans le cadre de cette thèse repose tout d'abord sur l'optimisation et l'évaluation des mécanismes réseaux tels que l'allocation des ressources, l'ordonnement ou la synchronisation. L'ordonnement **GSE** dans un cadre **DVB-S2** adaptatif reste par exemple un problème ouvert. Les problématiques de sécurité ou de gestion réseau sont également des sujets de recherches importants.

Pour la convergence des architectures de réseaux, nous avons fait le choix des technologies **IP** et **MPLS** ; d'autres solutions de convergence de type tout **IP** sont envisageables notamment dans une approche **IPv6**. Cette approche tout **IP** pourrait ouvrir des perspectives différentes. Il serait également intéressant de comparer les deux approches, par exemple pour la gestion de la qualité de service ou pour la capacité à s'intégrer aux systèmes satellites existants.

Plus largement, la convergence par les services dans un cadre plus général que les seuls réseaux satellite et la convergence fixe-mobile constituent à elles seules des pistes d'études et de réflexion importantes.

Liste des communications

Conférences Internationales avec comité de lecture

- E. Dubois, C. Baudoin, C. Haardt, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*IP/MPLS Satellite Network Convergence in ULISS Project*”, 10th ESA International Workshop on Signal Processing for Space Communications (SPSC 2008), Rhodes, Grèce, 2008.
- E. Dubois, C. Baudoin, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*Interactive television service over an IP/MPLS convergent satellite architecture*”, Advanced Satellite Mobile Systems Conference, Bologne, 2008.
- T. Bchini, E. Dubois, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*QoS of TV Broadcast Traffic Over Convergent IP Solution for DVB-S*”, AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2008), San Diego, USA, 2008.
- E. Dubois, C. Baudoin, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*Television Services over an IP/MPLS Convergent Satellite System*”, AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2007), Seoul, Corée, 2007.

Séminaires nationaux

- E. Dubois, C. Baudoin, C. Haardt, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*Service de Télévision par satellite sur une architecture IP/MPLS convergente*”, Journées Rescom - RESCOM'08, Marne-La-Vallée, 07/02/2008-08/02/2008.
- E. Dubois, C. Baudoin, C. Haardt, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*Service de Télévision par satellite sur une architecture IP/MPLS convergente*”, Colloque des doctorants - EDIT'07, Toulouse, 24/05/2007-25/05/2007.
- E. Dubois, C. Baudoin, C. Haardt, E. Chaput, A.-L. Beylot. “*Convergence dans les systèmes de communication par satellite*”, 4ème Séminaire FÉRIA - Réseaux et Protocoles : Communications par satellite dans les Réseaux, Toulouse, 20/04/2007.

Bibliographie

- [1] J. FASSON : « Etude d'une architecture IP intégrant un lien satellite géostationnaire. ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, décembre 2004. 1, 10
- [2] A. C. CLARKE : « Extra terrestrial relays : can rocket stations give world wide radio coverage ? ». *Wireless World*, 51:305–308, octobre 1945. Site web : <http://lakdiva.org/clarke/1945ww/>. 4
- [3] NASA : « Nasa satellite communications », mai 2005. Site web : <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/commsat.html>. 4
- [4] H. W. THIBEDAU : « DTH History », 2000. Site web : http://www.satelliteretailers.com/dish_installation.html. 4
- [5] ISO/IEC : « Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information : Systems. ». ISO/IEC 13812-1, avril 1996. 4, 9
- [6] D. WOOD : « Satellites, science and success, the dvb story. ». *EBU Technical Review*, 20(S2):4–11, 1995. 4
- [7] ATSC : « ATSC direct-to-home satellite broadcast standard ». A/81, juillet 2003. 4, 27
- [8] ITU-T : « Transmission system for advanced multimedia services provided by integrated services digital broadcasting in a broadcasting-satellite channel ». BO.1408-1, avril 2002. 4, 27
- [9] H. BENOIT : « Digital television : MPEG-1, MPEG-2 and principles of the DVB system. ». John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1997. 4
- [10] H. BENOIT : « La télévision par satellite, analogique et numérique ». Dunod, 2005. 4
- [11] H. BENOIT : « La télévision numérique, satellite, câble, TNT, ADSL ». Dunod, 2006. 4
- [12] ISO/IEC : « Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information : Vidéo. ». ISO/IEC 13812-2. 8
- [13] ISO/IEC : « Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information : Audio. ». ISO/IEC 13812-3. 8

- [14] ISO/IEC : « Technologies de l'information – Codage des objets audiovisuels – Partie 10 : codage visuel avancé ». ISO/CEI 14496-10, 2005. 8, 54
- [15] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : Specification for Service Information (SI) in DVB systems. ». EN 300 468 v1.6.1, novembre 2004. 10
- [16] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : Guidelines on implementation and usage of Service Information (SI). ». ETSI TR 101 211 V1.6.1, 2004. 10
- [17] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services. ». ETSI EN 300 421 V1.1.2, 1997. 12
- [18] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications. ». EN 302 307 v1.1.1, mars 2005. 12
- [19] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : User guidelines for the second generation system for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) ». EN 102 376 v1.1.1, février 2005. 12
- [20] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : DVB specification for data broadcasting. ». EN 301 192 v1.4.1, novembre 2004. 13, 32, 39
- [21] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : A guideline for data broadcasting. ». TR 101 202 v1.2.1, janvier 1999. 13
- [22] G. FAIRHURST et B. COLLINI-NOCKER : « Unidirectional Lightweight Encapsulation (ULE) for transmission of IP datagrams over an MPEG-2 Transport Stream. ». IETF RFC 4326, décembre 2005. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc4326.txt>. 13, 32, 39
- [23] G. FAIRHURST et A. MATTHEWS : « A comparison of IP transmission using MPE and a new lightweight encapsulation ». *In Proc. IEEE Seminar on IP Over Satellite - The next Generation : MPLS, VPN and DRM Delivered Services*, pages 106–120, juin 2003. 13
- [24] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) ; Generic Stream Encapsulation (GSE) protocol ». TS 102 606 v1.1.1, octobre 2007. 13, 14
- [25] E. DUROS, W. DABBOUS, H. IZUMIYAMA, N. FUJII et Y. ZHANG : « A link-layer tunneling mechanism for unidirectional links. ». IETF RFC 3077, mars 2001. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3077.txt>. 14, 70
- [26] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : Interaction channel for satellite distribution systems. ». EN 301 790 v1.3.1, 2003. 14

- [27] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) : Interaction channel for satellite distribution systems ; Guidelines for the use of EN 301 790. ». EN 101 790 v1.21, janvier 2003. 14
- [28] J. FASSON, E. CHAPUT et C. FRABOUL : « IP multicast architectures over next-generation GEO satellites ». *In Proc. VTC 2004-Spring Vehicular Technology Conference 2004 IEEE 59th*, volume 5, pages 2826–2830 Vol.5, 2004. 20
- [29] ESA : « Development of GEO Ka-band multimedia system (Domino 2) ». <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=2194>, 2003. 20
- [30] ETSI : « Satellite Earth Stations and Systems (SES) ; Broadband Satellite Multimedia (BSM) ; Regenerative Satellite Mesh - B (RSM-B) ; DVB-S/DVB-RCS family for regenerative satellites ; Part 1 : system overview ». TS 102 429-1 v1.1.1, octobre 2006. 20
- [31] ETSI : « Satellite Earth Stations and Systems (SES) ; Broadband Satellite Multimedia (BSM) ; Regenerative Satellite Mesh - B (RSM-B) ; DVB-S/DVB-RCS family for regenerative satellites ; Part 1 : General description ». TS 102 188-1 v1.1.2, juillet 2004. 20
- [32] ETSI : « Satellite Earth Stations and Systems (SES) ; Broadband Satellite Multimedia (BSM) ; Regenerative Satellite Mesh - B (RSM-B) ; DVB-S/DVB-RCS family for regenerative satellites ; Part 3 : Connection Control Protocol ». TS 102 429-3 v1.1.1, octobre 2006. 20, 99
- [33] G. PUJOLLE : « Les réseaux édition 2005. ». Eyrolles, septembre 2004. 24
- [34] ITU-T : « Interface between Data Terminal Equipment (DTE) and Data Circuit-terminating Equipment (DCE) for terminals operating in the packet mode and connected to public data networks by dedicated circuit ». ITU-T X25, octobre 1996. 25
- [35] ISO/IEC : « Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model : the basic model ». ISO/IEC 7498-1, 1994. 25
- [36] ITU-T : « Integrated services digital networks (ISDNs) ». ITU-T I.120, mars 1993. 25
- [37] ITU-T : « B-ISDN general network aspects ». ITU-T I.311, août 1996. 25, 35
- [38] ITU-T : « B-ISDN ATM layer specification ». ITU-T I.361, février 1999. 25, 35
- [39] IEEE : « Standards 802.3 ». IEEE Std 802.3. Site web : <http://standards.ieee.org/getieee802/802.3.html>. 26
- [40] IEEE : « Standards 802.11 ». IEEE Std 802.11. Site web : <http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>. 26

- [41] J. POSTEL : « Internet protocol, DARPA internet program protocol specification ». IETF RFC 791, septembre 1981. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt>. 26, 39
- [42] B. VAUTRIN et S. L. DÛ : « Les réseaux : demain ». Groupe Aménagement Numérique des Territoires - CETE de l'Ouest. Site web : http://www.ant.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Le_point_sur_-_Reseaux_demain_cle0dc111.pdf. 28, 44
- [43] ESA : « Interactive broadband DVB-RCS/S OBP communication system (AMERHIS) ». <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=7923>. 33
- [44] HISPASAT : « Amerhis, a multimedia revolution ». <http://www.hispasat.com/Detail.aspx?sectionsId=20&lang=en>. 33
- [45] « Le modèle ATM ». <http://www.oleola.org/reseaux/atm/atm-1-2.php>. 35
- [46] IEEE : « IEE Colloquium on ATM over Satellite ». In *Proc. IEE Colloquium on ATM Over Satellite (Digest No : 1996/224)*, pages –, 1996. 36
- [47] P. KOMISARCZUK, M. HADJITHEODOSIOU, F. COAKLEY et C. SMYTHE : « B-ISDN implementation via satellite : the CATALYST project ». In *Proc. Tenth UK Teletraffic Symposium, 10th. Performance Engineering in Telecommunications Network*, pages 11/1–11/6, 1993. 36
- [48] R. MANKARIOUS : « A full mesh Asynchronous Transfer Mode (ATM) satellite communications network ». In *IEEE Military Communications Conference MILCOM '95, Conference Record*, volume 1, pages 11–15 vol.1, 1995. 36
- [49] I. MERTZANIS, G. SFIKAS, R. TAFAZOLLI et B. EVANS : « Protocol architectures for satellite ATM broadband networks ». *IEEE Communications Magazine*, 37(3):46–54, 1999. 36
- [50] C.-K. TOH et V. LI : « Satellite ATM network architectures : an overview ». *IEEE Network*, 12(5):61–71, 1998. 36
- [51] IEEE : « Ethernet in the first mile ». IEEE Std 802.3ah, juin 2004. 37
- [52] J. M. BARROSO : « From computer networks to the computer on net ». *IEEE Communications Magazine / Global Communications Newsletter*, pages 2–4, octobre 2005. 37
- [53] J. M. BARROSO : « Universal Ethernet Telecommunications Service : Towards a new layer 2 based Internet ». *Exploiting the Knowledge Economy, IOS Press*, pages 1615–1622, octobre 2006. 37
- [54] J. M. BARROSO et G. I. FERNANDEZ : « Ethernet Fabric Routing (UETS/EFR) - A hierarchical, scalable and secure ultrahigh speed switching architecture ». In *Proc. 25th IEEE International Conference on Computer Communications INFOCOM 2006*, pages 1–5, 2006. 37

- [55] S. BLAKE, D. BLACK, M. CARLSON, E. DAVIES, Z. WANG et W. WEISS : « An architecture for differentiated services ». IETF RFC 2475, décembre 1998. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2475.txt>. 38, 39
- [56] IEEE : « Virtual bridged local area networks ». IEEE Std 802.1Q, 2005. Site web : <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.1Q-2005.pdf>. 38
- [57] D. HARRINGTON, R. PRESUHN et B. WIJNEN : « An architecture for describing Simple Network Management Protocol (SNMP) management frameworks ». IETF RFC 3411, décembre 2002. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3411.txt>. 38, 40, 44
- [58] J. POSTEL : « Transmission Control Protocol ». IETF RFC 793, septembre 1981. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>. 39
- [59] J. POSTEL : « User Datagram Protocol ». IETF RFC 768, août 1980. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc768.txt>. 39
- [60] H. SCHULZRINNE, S. CASNER, R. FREDERICK et V. JACOBSON : « RTP : A Transport Protocol for Real-time applications ». IETF RFC 1889, janvier 1996. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc1889.txt>. 39, 52
- [61] R. BRADEN, D. CLARK et S. SHENKER : « Integrated services in the internet architecture : an overview ». IETF RFC 1633, juin 1994. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt>. 39
- [62] R. BRADEN, L. ZHANG, S. BERSON, S. HERZOG et S. JAMIN : « Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – version 1 functional specification. ». IETF RFC 2205, septembre 1997. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt>. 39
- [63] H. FOLLSCHER : « A new approach to IP-based transmission of audio and video content via DVB-networks. ». *In European Information Society Technologies (IST) Mobile & Wireless Communications Summit*, juin 2005. 39
- [64] « Satsix project web site ». <http://www.ist-satsix.org/>. 39
- [65] CISCO : « Next generation global services : enabling new capabilities and behaviors », 2006. Site web : http://www.cisco.com/web/strategy/docs/gov/NGGS_Space_Overview_3_30_06.pdf. 39
- [66] M. LUGLIO, M. SANADIDI, M. GERLA et J. STEPANEK : « On-board satellite "split TCP" proxy ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(2): 362–370, février 2004. 39
- [67] S. KENT et K. SEO : « Security architecture for the internet protocol ». IETF RFC 4301, décembre 2005. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc4301.txt>. 40
- [68] E. ROSEN, A. VISWANATHAN et R. CALLON : « MultiProtocol Label Switching architecture. ». IETF RFC 3031, janvier 2001. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3031.txt>. 41

- [69] B. BENDUDUH et J. M. FOURCADE : « Mpls ». Rapport technique, FrameIP, 2001. Site web : <http://www.frameip.com/mps/>. 41
- [70] L. ANDERSSON, P. DOOLAN, N. FELDMAN, A. FREDETTE et B. THOMAS : « LDP specification ». IETF RFC 3036, janvier 2001. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3036.txt>. 42
- [71] B. JAMOSSI, L. ANDERSSON, R. CALLON, R. DANTU, L. WU, P. DOOLAN, T. WORSTER, N. FELDMAN, A. FREDETTE, M. GIRISH, E. GRAY, J. HEINANNEN, T. KILTY et A. MALIS : « Constraint-based LSP setup using LDP ». IETF RFC 3212, janvier 2002. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3212.txt>. 42
- [72] D. AWDUCHE, L. BERGER, D. GAN, T. LI, V. SRINIVASAN et G. SWALLOW : « RSVP-TE : Extensions to RSVP for LSP tunnels. ». IETF RFC 3209, décembre 2001. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3209.txt>. 42
- [73] L. ANDERSSON et G. SWALLOW : « The Multiprotocol Label Switching (MPLS) working group decision on MPLS signaling protocols. ». IETF RFC 3468, février 2003. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3468.txt>. 42
- [74] E. MANNIE : « Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture. ». IETF RFC 3945, octobre 2004. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3945.txt>. 42
- [75] P. TRUCHLY et M. URBANOVIC : « MPLS throughput over GEO satellites ». *In Proc. th International Symposium ELMAR-2006 focused on Multimedia Signal Processing and Communications*, pages 305–308, juin 2006. 43
- [76] A. DONNER, M. BERIOLI et M. WERNER : « MPLS-based satellite constellation networks ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(3):438–448, avril 2004. 43
- [77] L. WOOD : « Internetworking with satellite constellations. ». Thèse de doctorat, University of Surrey, juin 2001. Site web : <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/PhD-thesis/wood-phd-thesis.pdf>. 43
- [78] ITU-T : « Architecture of Transport MPLS (T-MPLS) layer network ». G.8110.1/Y.1370.1, novembre 2006. 43
- [79] J. LANG : « Link Management Protocol (LMP) ». IETF RFC 4204, octobre 2005. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc4204.txt>. 44
- [80] IEEE : « Media independent handover services ». IEEE Draft Std 802.21, mai 2005. 45
- [81] C. PERKINS : « IP mobility support for IPv4 ». IETF RFC 3344, août 2002. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3344.txt>. 45
- [82] D. JOHNSON, C. PERKINS et J. ARKKO : « Mobility support in IPv6 ». IETF RFC 3775, juin 2004. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt>. 45

- [83] R. KOODLI : « Fast handovers for mobile IPv6 ». IETF RFC 4068, juillet 2005. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc4068.txt>. 45
- [84] R. KOODLI et C. PERKINS : « Mobile IPv4 fast handovers ». IETF RFC 4988, octobre 2007. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc4988.txt>. 45
- [85] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) ; Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H) ». EN 302 304 V1.1.1, novembre 2004. 45
- [86] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) ; Framing Structure, channel coding and modulation for Satellite Services to Handheld devices (SH) below 3 GHz ». EN 302 583 V1.1.1, mars 2008. 45
- [87] J. ROSENBERG, H. SCHULZRINNE, G. CAMARILLO, A. JOHNSTON, J. P. R. SPARKS, M. HANDLEY et E. SCHOOLER : « SIP : Session Initiation Protocol ». IETF RFC 3261, juin 2002. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt>. 47, 52
- [88] ETSI : « Telecommunications and Internet converged Services and Protocols for Advanced Networking (TISPAN) ; IP Multimedia Subsystem (IMS) ; Functional architecture ». ES 282 007 V2.0.0, mai 2008. 47
- [89] G. BERTRAND : « The IP Multimedia Subsystem in Next Generation Networks ». Rapport technique, ENST Bretagne, mai 2007. 47
- [90] T. AHMED, I. DJAMA, A. NAFAA, P. GÉLARD, C. DONNY et M. JÉRÔME : « Towards efficient IPTV multicast support over satellite networks using an IMS-based architecture ». *In Proc of. The 57th Annual IEEE Broadcast Symposium*, Washington, D.C., USA, octobre 2007. 47
- [91] M. HANDLEY, C. PERKINS et E. WHELAN : « SAP : Session Announcement Protocol ». IETF RFC 2974, octobre 2000. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2974.txt>. 52, 55
- [92] D. HOFFMAN, G. FERNANDO, V. GOYAL et M. CIVANLAR : « RTP payload format for MPEG1/MPEG2 video. ». IETF RFC 2250, janvier 1998. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2250.txt>. 52, 64
- [93] R. FIELDING, J. GETTYS, J. MOGUL, H. FRYSTYK, L. MASINTER, P. LEACH et T. BERNERS-LEE : « HyperText Transfer Protocol – HTTP/1.1 ». IETF RFC 2616, juin 1999. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2616.txt>. 52
- [94] J. KLENSIN : « Simple mail transfer protocol ». IETF RFC 2821, avril 2001. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2821.txt>. 52
- [95] « Multiposte Free : chacun sa TV ! ». <http://www.free.fr/adsl/pages/television/multiposte.html>, 2008. 54
- [96] ETSI : « Digital Video Broadcasting (DVB) ; Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.0.3 ». TS 101 812 V1.3.2 (2006-08), août 2006. 54

- [97] « Site web MHP ». <http://www.mhp.org/>. 54
- [98] « Site web TV-Anytime ». <http://www.tv-anytime.org/>. 55
- [99] M. HANDLEY, V. JACOBSON et C. PERKINS : « SDP : Session Description Protocol ». IETF RFC 4566, juillet 2006. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2327.txt>. 55
- [100] C. BORMANN, C. BURMEISTER, M. DEGERMARK, H. FUKUSHIMA, H. HANNU, L.-E. JONSSON, R. HAKENBERG, T. KOREN, K. LE, Z. LIU, A. MARTENSSON, A. MIYAZAKI, K. SVANBRO, T. WIEBKE, T. YOSHIMURA et H. ZHENG : « RObust Header Compression (ROHC) : framework and four profiles : RTP, UDP, ESP, and uncompressed. ». IETF RFC 3095, juillet 2001. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3095.txt>. 67
- [101] H. W. LI, J. HONG et P. HONG : « Performance analysis of ROHC U-mode in wireless links. ». *IEE Proceedings Communications*, 151:549–551, 2004. 67
- [102] R. PRICE, C. BORMANN, J. CHRISTOFFERSSON, H. HANNU, Z. LIU et J. ROSENBERG : « Signaling Compression (SigComp) ». IETF RFC 3320, janvier 2003. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc3320.txt>. 67
- [103] UDCAST : « Comment assurer l'intégration complète des liens de diffusion dans l'internet. ». UDLR white paper V1, décembre 2001. 70
- [104] B. CROFT et J. GILMORE : « Bootstrap Protocol (BOOTP) ». IETF RFC951, septembre 1985. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc951.txt>. 76
- [105] R. DROMS : « Dynamic Host Configuration Protocol ». IETF RFC 2531, mars 1997. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc2531.txt>. 76
- [106] N. ABRAMSON : « The aloha system—another alternative for computer communication ». *In Proceedings of Fall Joint Computer Conference, AFIPS Conference*, volume 37, pages 281–285, 1970. 77
- [107] E. DECKER, P. LANGILLE, A. RIJSINGHANI et K. MCCLOGHRIE : « Multi-protocol encapsulation over ATM adaptation layer 5. ». IETF RFC 1483, juillet 1993. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc1493.txt>. 79
- [108] G. FAIRHURST et M.-J. MONTPETIT : « Address resolution mechanisms for IP datagrams over MPEG-2 networks ». IETF RFC 4947, juillet 2007. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc4947.txt>. 84
- [109] D. L. MILLS : « Network Time Protocol (version 3) : specification, implementation and analysis ». IETF RFC 1305, mars 1992. Site web : <http://www.ietf.org/rfc/rfc1305.txt>. 86
- [110] N. JEGHAM, S. LOHIER, G. ROUSSEL et A.-L. BEYLOT : « Performance of Voice over IP in DVB-RCS and iDirect satellite networks ». *In AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), San Diego, 10/06/08-12/06/08*, page (electronic medium), 2008. 92

- [111] ESA : « ULISS web site ». <http://telecom.esa.int/telecom/www/object/index.cfm?fobjectid=20327>. 96, 97
- [112] L. XU, H. PERROS et G. ROUSKAS : « Techniques for optical packet switching and optical burst switching ». *IEEE Communications Magazine*, 39:136–142, janvier 2001. 97
- [113] O. HERRERO et X. MAUFRROID : « Innovative hybrid optical/digital ultra-fast packet-switched processor for meshed satellite networks ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(2):250–260, 2004. 97
- [114] C. HAARDT et D. VERCHÈRE : « Radio burst switching for satellite communication, an alternative to traditional switching payloads ». Rapport technique, Alcatel Strategy/Technology White Paper, octobre 2002. Site web : http://www.alcatel.com/doctypes/articlepaperlibrary/pdf/WP/T0210-Radio_burst-EN.pdf. 97
- [115] C. HAARDT et N. COURVILLE : « Internet switching by satellite : An ultra fast processor with radio burst switching. ». *In Proceedings of the First Symposium on potentially Disruptive Technologies and theirs Impact in Space Program*, Marseille, France, juillet 2005. 97
- [116] C. HAARDT et N. COURVILLE : « Internet by satellite : a flexible processor with radio burst switching ». *In Satellite and Space Communications, 2006 International Workshop on*, pages 58–62, septembre 2006. 97
- [117] F. FARAHMAND, J. JUE, V. VOKKARANE, J. J. P. C. RODRIGUES et M. M. FREIRE : « A layered architecture for supporting optical burst switching ». *In AICT-SAPIR-ELETE '05 : Proceedings of the Advanced Industrial Conference on Telecommunications/Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference/E-Learning on Telecommunications Workshop*, pages 213–218, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society. 104

Convergence dans les réseaux satellite

Résumé : Les réseaux satellite ont été standardisés par le groupe **DVB** en se focalisant sur le service de télévision. Dans un contexte de convergence, notamment caractérisé par l'émergence des offres "triple play", les nouvelles architectures de télécommunication par satellite doivent être conçues de façon plus ouverte. Après une description du contexte des réseaux satellites **DVB**, nous recensons les solutions de convergence applicables à ces réseaux. Notre choix s'est porté sur les technologies convergentes **IP** et **MPLS** pour proposer une telle architecture de convergence. Pour en évaluer les qualités, plusieurs scénarios sont alors envisagés. Le premier se concentre sur le service historique de télévision avec un satellite transparent et unidirectionnel. Nous montrons que la solution **IP/MPLS** permet d'offrir le même service avec des performances similaires et surtout ajoute une structure protocolaire augmentant l'évolutivité. Les scénarios suivants s'occupent d'un service de télévision interactif avec voie retour et d'un service de voix sur **IP** et mettent en valeur la facilité de leur mise en œuvre. Le dernier scénario applique notre approche convergente **IP/MPLS** au projet de satellite régénératif hybride **ULISS**. Cela a permis de montrer la flexibilité de l'architecture et d'étendre les possibilités de services du projet.

Mots Clés : Convergence, MPLS, satellite, IP, DVB, télévision

Convergence in satellite networks

Abstract : Satellite networks have been built by the **DVB** group and dedicated to digital television service. However, in the current service convergence trend, a future satellite network architecture has to be built in a less dedicated way to fit heterogeneous services. This work begins with a description of **DVB** satellite networks. Then, network convergence solutions are studied for the satellite context. **IP** and **MPLS** have then been chosen to build a satellite convergent architecture. Several scenarios are examined so as to evaluate this architecture. A first one deals with the historical television service in a unidirectional, transparent satellite context. We show the feasibility of such a scenario with similar performances and better protocol organisation which simplifies satellite evolution. The next scenarios concern an interactive television service with a return link and a voice over **IP** service. The ability of deploying new services in a simple manner is thus highlighted. The last scenario applies our convergent approach to the **ULISS** industrial project of a regenerative hybrid satellite. It shows the flexibility of our architecture and expand **ULISS** service capabilities.

Keywords : Convergence, MPLS, satellite, IP, DVB, television
