

# ÉTUDE D'UNE ARCHITECTURE IP INTÉGRANT UN LIEN SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE

*Thèse pour le doctorat en Réseaux et Télécommunications de  
l'Institut National Polytechnique de Toulouse*

*par :*  
**M Julien Fasson**

*Soutenue le 15 décembre 2004 devant le jury composé de*

M. <i>Gérard Maral</i>	Président du jury
M. <i>Christian Fraboul</i>	Directeur de thèse
M. <i>Walid Dabbous</i>	Rapporteur
M. <i>Samir Tohmé</i>	Rapporteur
M. <i>Emmanuel Chaput</i>	Membre, co-encadrant
M. <i>Stéphane Combes</i>	Membre
M. <i>Giovanni Giambene</i>	Membre invité



## Remerciements

L'une des étapes incontournables de ce type de travail réside dans les remerciements. Bien sûr la crainte d'oublier quelqu'un est là, mais je vais tout de même essayer de me lancer. Toutefois, j'espère que personne ne se sentira offusqué d'avoir été omis et j'espère que l'émotion d'avoir terminé ce travail justifiera quelques oublis si il y en a.

Bien sûr je commencerai par remercier les différents membres de mon jury. J'ai été très touché que M. Samir Tohmé accepte de relire mon manuscrit malgré ses soucis de santé, et je tiens profondément à le remercier pour son intérêt et ses différents commentaires sur mon travail. Mes pensées vont aussi à M. Walid Dabbous qui a éclairé d'un point de vue nouveau mon travail. Je remercie profondément M. Giovanni Giambene d'avoir pu participer à la soutenance. Enfin un grand merci à M. Gérard Maral qui m'a fait l'honneur d'assumer la fonction de président de jury de ma thèse avec élégance.

J'ai vraiment apprécié les différents apports d'Alcatel à mon travail, d'une part par DIPCAST où j'en profite pour remercier les différents acteurs du projet, et en particulier Céline Bénassy-Foch, et d'autre part, par mon contact récent avec Stéphane Combes qui a été un lecteur attentif de mon travail et a su mettre l'accent sur certaines perspectives notamment lors de la soutenance.

Je n'oublierai pas de dire toute ma gratitude à mes deux encadrants, en commençant par mon directeur de thèse, Christian Fraboul, qui m'a accompagné lors de ce travail et au-delà. Il s'est investi dans cette recherche malgré de nombreuses difficultés, ouvrant sans cesse le débat pour ne pas se perdre dans des points techniques qui n'avaient pas leur place ici.

Je souhaite vivement remercier Emmanuel Chaput. Il a co-encadré ce travail en apportant sa vision du monde protocolaire, notamment avec IP. Mais, plus que le co-encadrant de ce travail, il a été un tuteur pour le travail de recherche comme d'enseignement, un ami et un compagnon de voyage, toujours présent aux conférences, dans les moments de *stress* et de doutes.

Je remercierai aussi tous les membres de l'équipe de recherche IRT, et en particulier André-Luc Beylot, le plus jeune professeur de notre laboratoire qui sait faire des merveilles avec quelques files d'attente, mais qui aurait pu faire aussi une très bonne carrière en tant que concierge du 17 bis.

Je m'arrêterai pour saluer tous les membres du laboratoire TESA qui ont su créer une ambiance propice à ce travail. Je ne citerai pas tous les noms, mais uniquement celui de Sylvie, éternelle protectrice du thésard égaré ; celle qui sait « comment il faut faire » et qui a toujours su nous faire sourire.

Le bureau 5 est un endroit où j'ai passé un grand nombre d'heures cette dernière année, et je n'oublie pas ses figures emblématiques : Farid, Hussein, et Sakouna.

Je voulais, avant de terminer, remercier les trois amis qui m'ont épaulé au cours de cette thèse. Merci à Flo avec qui j'ai partagé le bureau pendant presque quatre ans, en commençant par la même école, puis le même DEA et enfin la thèse dans le même laboratoire. Merci à Djé, mon solide appui tout au long de ce travail, tu as su trouver les actions comme les mots justes pour m'amener à présenter ce travail aujourd'hui. Et enfin toute mon amitié à Fabrice, qui a partagé un grand nombre de soirées studieuses au laboratoire jusqu'à deux heures du matin, avec qui je mangeais les week-ends au boulot. C'est certainement grâce à toi que j'ai réussi à finir ce travail dans les temps.

Merci à toi maman, et toi Hélène qui avaient relu ce travail.

*REMERCIEMENTS*

---

Merci à tous mes amis : Anne, Jeff, Olivier, Titi, Alexandre, ... et incontestablement le plus grand psychanalyste de tous les temps et mon ami de toujours, Charles.

Enfin à ceux de ma famille qui ont cru en moi.

Bien sûr si ce travail est avant tout le mien, je crois qu'il est le résultat de la collaboration de tous ces êtres, alchimie lente et discrète de trois années au sein du laboratoire TésA, à présent terminé comme nous le connaissions.

## Liste des acronymes

AAL5	ATM Adaptation Layer 5
ACQ	ACQuisition burst
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AIT	Application Information Table
AMR	Adaptative Multi Rate
AR	Address Resolution
ARP	Address Resolution Protocol
ARPA	Advanced Research Projects Agency
ATM	Asynchronous Transfer Mode
ATSC	Advanced Television Systems Committee
BAT	Bouquet Association Table
BER	Bit Error Rate
BSM	Broadband Satellite Multimedia
CAC	Connection Admission Control
CAT	Conditional Access Table
CBR	Constant Bit Rate
CDN	Content Delivery Network
CGMP	Cisco Group Management Protocol
CMT	Correction Map Table
CRA	Continuous Rate Assignment
CSC	Common Signalling Channel burst
Cwnd	Congestion WINDow
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DIPCAST	Dvb pour l'IP multiCAST
DS	DiffServ
DSL	Digital Subscriber Line
DSM-CC	Digital Storage Media Command and Control
DULM	Data Unit Labelling Method
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-C	DVB for Cable
DVB-CA	DVB Common Access
DVB-CI	DVB Common Interface
DVB-CSA	DVB Common Scrambling Algorhythm
DVB-RCS	DVB Return Channel for Satellite
DVB-S	DVB for Satellite
DVB-SI	DVB System Information
DVB-T	DVB for Terrestrial
DVB-X	DVB for mobile
EIT	Event Information Table
EPG	Electronic Program Guide
ES	Elementary Stream
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FAI	Fournisseur d'Accès Internet
FCA	Free Capacity Assignment
FCT	Frame Composition Table
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correcting

FLS	Forward Link Signalling
FSI	Fournisseur de Services Internet
FTP	File Transfer Protocol
GEO	Geostationary Earth Orbit
GES	Gateway Earth Station
HDTV	High Definition TeleVision
HEO	High Earth Orbit
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol
IAP	Internet Access Provider
IBIS	Integrated Broadcast Interactive System
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Management Protocol
IN	Interactive Network
INT	IP/MAC Notification Table
IP	Internet Protocol
IPsec	IP security protocol
IRD	Integrated Receiver Decoder
ISP	Internet Service Provider
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit
MAC	Medium Access Control
MARS	Multicast Address Resolution Server
MCDDD	Multi-Carrier Demultiplexer Demodulator Decoder
MEO	Medium Earth Orbit
MF-TDMA	Multiple Frequencies Time Division Multiple Access
MHP	Multimedia Home Platform
MMT	Multicast Map Table
MNMC	Mission and Network Management Centre
MPE	Multi Protocol Encapsulation
MPEG	Motion Pictures Experts Group
MTU	Maximum Transfer Unit
NCC	Network Control Centre
NIT	Network Information Table
NNI	Network-Network Interface
NVoD	Near Video on Demand
OBP	On-Board-Processing
OBPC	On-Board-Processing Controller
P2P	Peer-to-Peer
PAT	Program Association Table
PC	Personal Computer
PCR	Program Clock Reference
PDU	Protocol Data Unit
PEP	Performance Enhancement Proxy
PES	Packetized Elementary Stream
PID	Packet Identifier
PIM-SM	Protocol Independent Multicast – Sparse Mode
PLR	Packet Loss Rate
PMT	Program Map Table
PoP	Point of Presence
PPP	Point to Point Protocol
PS	Program Stream

---

PSI	Program Specific Information
PSTN	Public Switched Telephonic Network
PUSI	Payload Unit Start Indicator
QoS	Quality of Service
RBDC	Rate-Based Dynamic Allocation
RCST	Return Channel Satellite Terminal
RMT	Rcs Map Table
RNIS	Réseau Numérique à Intégration de Services
RNRT	Réseau National de Recherches en Télécommunications
ROHC	RObust Header Compression
RST	Running Status Event
RSVP	Resource reSerVation Protocol
RTC	Réseau Téléphonique Commuté
RTO	Retransmission Time Out
RTP	Real Time Protocol
RTT	Round Trip Time
QEF	Quasi Error Free
SAC	Satellite Access Control
SACK	Selective ACKnowledgment
SCR	Source Clock Reference
SCT	Superframe Composition Table
SDT	Service Description Date
SMAP	Satellite Multicast Adaptation Protocol
SNDU	SubNetwork Data Unit
SPT	Satellite Position Table
STC	Source Time Clock
SYNC	SYNChronisation burst
TBTP	Terminal Burst Time Plan
TCP	Transmission Control Protocol
TCT	Time slot Composition Table
TDMA	Time Division Multiple Access
TDT	Time and Date Table
TIM	Terminal Information Message
TM/TC	TeleMetry/TeleCommand
ToS	Type of Service
TS	Transport Stream
UDLR	UniDirectional Link Routing
UDP-Lite	Lightweight User Data Protocol
UES	User Earth Station
ULE	Ultra Lightweight Encapsulation
UMTS	Universal Mobile Telephone Service
UNI	User-Network Interface
VBDC	Volume Based Dynamic Capacity
VCi	Virtual Channel Identifier
VLAN	Virtual Local Area Network
VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over IP
VPi	Virtual Path Identifier
VPN	Virtual Private Network
VSAT	Very Small Aperture Terminal
WAP	Wireless Application Protocol





## Liste des figures

Figure 2.1 Deux types de multiplexage pour MPEG-2 .....	26
Figure 2.2 DVB-S et ses concurrents dans le monde .....	27
Figure 2.3 Piles de protocoles du DVB-S comme support des flux MPEG-2.....	28
Figure 2.4 Détail d'un paquet MPEG-2 TS et de son en-tête.....	28
Figure 2.5 Encapsulation d'un PES dans des paquets MPEG-2 TS via <i>data-streaming</i> .....	29
Figure 2.6 Aperçu de la chaîne de codage du DVB-S.....	30
Figure 2.7 Représentation des quatre tables de service PSI .....	31
Figure 2.8 Représentation des tables de service SI .....	32
Figure 2.9 Schéma d'un « guide de programme » .....	33
Figure 2.10 Architecture DVB-S/DVB-RCS .....	34
Figure 2.11 Deux encapsulations proposées pour le DVB-RCS .....	35
Figure 2.12 Aperçu de la chaîne de codage du DVB-RCS .....	35
Figure 2.13 Segmentation de la bande allouée à la voie retour en <i>superframes</i> , <i>trames</i> et <i>time-slots</i> .....	38
Figure 3.1 Cinq méthodes de multiplexage de données dans la couche MPEG-2 TS.....	41
Figure 3.2 Exemple d'encapsulation d'un datagramme par <i>data-piping</i> .....	42
Figure 3.3 Exemple d'encapsulation d'un datagramme par <i>data-streaming</i> .....	42
Figure 3.4 Exemple d'encapsulation d'un datagramme par MPE.....	43
Figure 3.5 Insertion du champ pointeur dans le champ d'adaptation MPEG-2 TS.....	44
Figure 3.6 Comparaison des tailles des données une fois encapsulées avec MPE et Ethernet.....	45
Figure 3.7 Champs obligatoires de l'en-tête d'une section datagramme (12 octets).....	45
Figure 3.8 Découpage de l'adresse MAC destination dans les champs <i>Deviced_Id</i> de la section.....	46
Figure 3.9 Architecture classique IP sur DVB-S comme accès à Internet .....	47
Figure 3.10 Couches protocolaires entre une <i>gateway</i> et un terminal mettant en jeu un lien retour terrestre .....	48
Figure 3.11 Exemple de localisation d'un flux IP/MAC avec la table INT .....	49
Figure 3.12 Architecture IP sur DVB-S/DVB-RCS comme accès à Internet .....	53
Figure 3.13 Double bond entre deux RCST sur un système GEO transparent.....	53
Figure 3.14 Encapsulation d'un datagramme unicast IPv4 via la méthode ULE .....	55
Figure 3.15 En-tête obligatoire et optionnel utilisé par la solution ULE.....	55
Figure 3.16 Deux encapsulations d'un datagramme IP via la méthode ULE.....	56
Figure 3.17 Comparaison entre l'encapsulation ULE et MPE .....	56
Figure 3.18 Couverture d'un satellite multi-spots.....	58
Figure 3.19 Élimination du double bond entre deux RCSTs sur un satellite intégrant un OBP.....	59
Figure 3.20 Contours du système DIPCAST – segment sol et air .....	60
Figure 3.21 Architecture IP sur DVB bidirectionnelle.....	61
Figure 3.22 Couche protocolaires du système régénératif DIPCAST.....	62
Figure 3.23 Schéma de l'OBP du système DIPCAST .....	63
Figure 3.24 En-tête d'une cellule UNI et d'une cellule NNI.....	64
Figure 3.25 Traitement sol d'un datagramme multicast avant émission .....	66
Figure 3.26 Borne supérieure sur le débit aller en fonction du débit de la voie retour .....	69
Figure 3.27 Principe de <i>spoofing</i> TCP – utilisation de <i>proxies</i> .....	72
Figure 4.1 Cinq architectures de VoD sur un système satellite géostationnaire.....	78
Figure 4.2 Diagrammes d'activité caractéristiques de la topologie 1.....	79
Figure 4.3 Diagrammes d'activité caractéristiques de la topologie 2.....	81
Figure 4.4 Diagrammes d'activité caractéristiques de la topologie 4.....	82
Figure 4.5 Cinq architectures d'accès Internet via un système satellite géostationnaire.....	85
Figure 4.6 Évolution du débit en fonction du nombre d'utilisateurs pour la topologie 2.....	86

Figure 4.7 Évolution du temps de transfert sur un lien satellite unidirectionnel et bidirectionnel .....	87
Figure 4.8 Quatre topologies d'interconnexion via un système satellite géostationnaire.....	90
Figure 4.9 Structure de la charge utile hybride.....	97
Figure 4.10 Émission de deux <i>gateways</i> vers le système hybride.....	98
Figure 4.11 Émission de RCSTs situées dans des spots différents vers le système hybride .....	99
Figure 4.12 Vision d'ensemble des différentes entités spécifique à l'architecture hybride .....	100
Figure 4.13 Les couches protocolaires de l'architecture hybride dans le plan utilisateur .....	103
Figure 4.14 Distinction pour le multicast entre un système avec et sans réplication à bord .....	106
Figure 4.15 Exemple de relation entre l'aiguillage de niveau 3 et les couches inférieures pour une RCST .....	107
Figure 4.16 <i>Mapping</i> d'une adresse IP multicast sur une adresse MAC.....	109
Figure 4.17 Topologie d'étude du traitement des flux IP sur l'architecture hybride.....	114
Figure 4.18 Organisation des différents flux sur le lien montant en provenance de A et de F.....	115
Figure 4.19 Organisation des différents flux sur le spot 2 descendant en provenance de A et de F .....	115
Figure 4.20 Organisation des différents flux régénératifs sur le spot 2 descendant en provenance de A et de F dans le cadre d'une commutation MAC à bord.....	116
Figure 4.21 Exemple d'intégration de services dans une architecture hybride .....	118
Figure 5.1 Modélisation des pertes de paquet selon une chaîne de Markov à deux états.....	123
Figure 5.2 Comparaison de l'encapsulation MPE et ULE sur le lien montant DVB-S dans le système hybride	129
Figure 5.3 Comparaison de l'encapsulation ATM et ULE sur le lien montant DVB-RCS dans le système hybride .....	131
Figure 5.4 Comparaison de l'encapsulation ATM et ULE sur le lien descendant DVB-S dans le système hybride .....	132
Figure 5.5 Part moyenne de débit utile en fonction de la taille moyenne des segments TCP véhiculé sur le système hybride .....	133
Figure 5.6 Taille d'une table INT en fonction du nombre de flux IP traités .....	135
Figure 5.7 Évolution du poids de la signalisation SI en fonction du nombre de clients simultanés.....	137
Figure 5.8 Scénario de comparaison entre un accès Internet via une connexion terrestre et le même service via un système satellite unidirectionnel .....	146
Figure 5.9 Observation du délai d'un transfert FTP en fonction de la technologie d'accès à Internet.....	147
Figure 5.10 Exemple de pertes en rafale pour un PLR de $10^{-3}$ avec le modèle de Gilbert.....	149
Figure 5.11 Évolution du nombre de pages http consultées en un quart d'heure en fonction de la taille moyenne de ces pages.....	150
Figure 5.12 Comparaison de l'évolution du délai requis pour télécharger un fichier via FTP en fonction du débit offert par le lien retour pour un lien aller de 512 Kb/s.....	151
Figure 5.13 Diagramme simplifié d'une communication HTTP.....	153
Figure 5.14 Utilisation du monofaisceau et du multifaisceaux pour la voie aller DVB-S .....	154
Figure 5.15 Scénario de comparaison entre un accès Internet via une connexion terrestre et le même service via un système satellite bidirectionnel .....	156
Figure 5.16 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps .....	157
Figure 5.17 Profil de pertes au cours de la simulation sur la voie aller et retour .....	158
Figure 5.18 Évolutions du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps de simulation avec limitation à 80 Kb/s et 100 Kb/s du débit de type <i>upload</i> .....	159
Figure 5.19 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps avec un <i>buffer</i> d'émission de 50 KB et de 100 KB.....	160
Figure 5.20 Évolution du débit moyen applicatif sur 5000 s en fonction de la taille des <i>buffers</i> d'émission .....	161
Figure 5.21 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps avec une politique de <i>Deficient Round Robin</i> sur le <i>buffer</i> d'émission de 150 KB .....	162
Figure 5.22 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps avec une politique de <i>Fair Queueing</i> sur le <i>buffer</i> d'émission de 150 KB .....	162
Figure 5.23 Aperçu de l'évolution de la file d'attente d'émission dans le cas DRR et FQ.....	163
Figure 5.24 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps et de la MSS du lien retour. ....	163

---

Figure 5.25 Évolution du débit moyen sur 5000 s en fonction de la taille des <i>buffers</i> d'émission pour un lien retour terrestre de 28.8 Kb/s et une MSS de 476 et 1460 B .....	164
Figure 5.26 Observation du comportement de TCP Tahoe et Reno sur un lien satellite face à une perte ponctuelle .....	166
Figure 5.27 Observation du comportement de TCP Tahoe et Reno sur un lien satellite face à des pertes en rafales.....	167
Figure 5.28 Observation du comportement de TCP NewReno sur un lien satellite face à des pertes en rafales.	168
Figure 5.29 Comparaison entre l'utilisation une connexion sans PEP et une connexion avec PEP sur un lien satellite unidirectionnel 1 Mb/s avec lien retour terrestre de 9.6 Kb/s .....	170
Figure 5.30 Topologie étoilée et maillée.....	175
Figure 5.31 Comparaison du temps de transfert FTP entre une topologie <i>star</i> et <i>mesh</i> sans perte .....	176
Figure 5.32 Comparaison de l'évolution du débit applicatif maximum en fonction du PLR pour une architecture étoilée et une architecture maillée.....	176
Figure 5.33 Évolution du débit moyenné sur une seconde au cours du temps pour une topologie de type <i>star</i> et <i>mesh</i> .....	177



## Liste des tableaux

Tableau I.	Table embarquée de correspondance entre IN, VP et Spots cibles	65
Tableau II.	Les différents besoins des trois services étudiés	91
Tableau III.	Délai d'aller retour d'une requête de type ARP sur un système hybride	109
Tableau IV.	Exemple de table de correspondance d'un RCST	110
Tableau V.	Dépendance entre les requêtes VoD pour un média et le mode du système	117
Tableau VI.	Tables SI consultées pour avoir accès au PID d'un flux IP	134
Tableau VII.	ÉVALUATION du poids de la signalisation pour un flux IP	136
Tableau VIII.	Composition d'une supertrame	139
Tableau IX.	L'influence de la répartition bord/sol sur la réactivité du système	143
Tableau X.	Comparaison du débit moyen observé sur un transfert FTP en fonction de la durée d'observation – Modèle d'erreur uniformément répartie	148
Tableau XI.	Comparaison du débit moyen observé sur un transfert FTP en fonction de la durée d'observation – Modèle d'erreur à deux états	148
Tableau XII	Gain du multifaisceaux pour la voie aller en mode unipoint	155
Tableau XIII	Segment maximal transféré au bout de 2000 s	166
Tableau XIV	Débit moyen observé sur 200 s en fonction du type d'amélioration apporté par le PEP	169



## Glossaire

### **Canal logique :**

Il s'agit de l'ensemble des paquets MPEG-2 TS partageant le même PID sur un multiplexe donné. Ces paquets constituent un même programme (émissions, films, etc. ...).

### **Digital Video Broadcasting :**

Il s'agit de la norme de télévision numérique européenne. Cette norme est largement déployée même aux États-Unis, et elle connaît un succès incontestable, notamment sur les supports câbles et satellites.

### **DVB-RCS :**

Le DVB Return Channel for Satellite est le standard DVB qui définit la voie retour pour satellite. Couplé au DVB-S, il permet d'interconnecter un réseau intégralement par une connexion satellite.

### **DVB-S :**

Le DVB for Satellite est une norme de diffusion de donnée, à l'origine multimédia, par satellite. Elle est construite autour des principes de diffusion unidirectionnelle.

### **DVB-SI :**

Il s'agit de la norme qui gère la signalisation des flux DVB. En plus des tables définies dans la norme MPEG-2 (tables PSI), elle ajoute un certain nombre de tables nommées SI.

### **GES :**

La Gateway Earth Station est une entité fortement émettrice d'un système satellite. Elle émet généralement en DVB-S, mais peut aussi émettre en DVB-RCS. Dans ce cadre, il s'agit le plus souvent d'une gateway multi-porteuses.

### **MPE :**

Le MultiProtocol Encapsulation est, comme son nom le signale, un protocole d'encapsulation de données génériques dans les paquets MPEG-2 TS en utilisant le DSM-CC. C'est le protocole recommandé par la norme DVB. Cependant il présente un certain nombre de limites.

### **MPEG-2 TS :**

La couche MPEG-2 TS est utilisée comme niveau liaison par la norme DVB-S. Cette couche est définie par la norme ISO MPEG-2, et est considérée dans le cadre de cette norme comme un niveau transport, assurant le transport des flux applicatifs MPEG-2 (vidéo, audio, synchronisation et données supplémentaires). Les conteneurs de ce niveau sont nommés les paquets MPEG-2 TS, et sont fixés à 180 B. La notion de flux MPEG-2 TS est souvent utilisée pour deux choses différentes : soit le flux de paquets MPEG-2 TS référant à un flux vidéo et audio commun (on parle de canal logique, ou plus rarement de flux logique puisque les paquets partagent le même PID), soit le flux de paquets MPEG-2 TS une fois multiplexé, celui-ci est formé de plusieurs flux et constitue un multiplexe, ou transpondeur.

### **On-Board-Processing :**

Encore appelé intelligence embarquée, l'OBP propose d'intégrer un certain nombre de fonctionnalités à bord, comme le multiplexage des flux descendants, la génération de signalisation, la commutation bord, et même une gestion de la QoS à bord dans le cadre de commutation paquet. À terme, le routage à bord semble envisageable.

### **PID :**

Un PID est un identifiant d'un canal logique. Associé aux systèmes des tables d'informations, il permet de repérer les différents flux, et d'indiquer aux décodeurs sur quels canaux récupérés les programmes.

### **RCST :**

Les terminaux de type RCST sont définis par la norme DVB-RCS. Il s'agit de terminaux capable d'émettre en DVB-RCS, et donc offrant une voie retour satellite.

### **Satellite géostationnaire :**

Un satellite en orbite à 35900 km de la Terre est appelé satellite géostationnaire puisqu'il a une durée de révolution égale à la période de rotation de la Terre (23h 56min), lui garantissant une position fixe en vis-à-vis d'un lieu donné.

**Satellite multi-spots :**

Les techniques *multi-spots* (ou multifaisceaux) proposent de découper la couverture du satellite en plusieurs zones, via l'utilisation de plusieurs faisceaux. Les satellites commerciaux actuels sont généralement multifaisceaux. L'interconnexion entre les faisceaux peut être réalisée de différentes manières, en utilisant des techniques physiques, ou en utilisant un OBP. L'utilisation d'une intelligence bord permettant la commutation permet une plus grande flexibilité du système. Les satellites actuels ne font que peu d'interconnexion de *spots*.

**Système transparent :**

Un satellite géostationnaire dit transparent ne met en place aucune fonctionnalité d'un niveau autre que physique. La plupart du temps un tel système se contente de répéter les signaux vers la Terre, en les amplifiant. Un tel système est parfois nommé *hub* spatial ou répéteur.

**ULE :**

Ce protocole se propose de remplacer le protocole MPE en offrant une interface plus simple, plus légère et plus ouverte.





## Table des matières

<b>1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE</b>	<b>20</b>
1.1. LA TRANSMISSION DE DONNÉES	20
1.2. LE SATELLITE, UN OUTIL DE COMMUNICATION	20
1.3. UNE COEXISTENCE PROBLÉMATIQUE	21
1.4. LE PLAN DE L'ÉTUDE	22
<b>2. DVB COMME NORME DE COMMUNICATION SPATIALE</b>	<b>24</b>
2.1. LA NORME DVB	24
2.1.1. <i>Historique du DVB</i>	24
2.1.2. <i>Standards DVB</i>	25
2.1.3. <i>MPEG-2</i>	25
2.2. LA NORME DVB-S	27
2.2.1. <i>Pile de protocoles DVB-S</i>	27
2.2.2. <i>MPEG-2 TS</i>	28
2.2.3. <i>Chaîne de transmission</i>	30
2.2.4. <i>Méthode d'accès</i>	30
2.3. LES TABLES DE SERVICE	31
2.3.1. <i>Tables PSI</i>	31
2.3.2. <i>Tables SI</i>	32
2.3.3. <i>Exemple de structure d'un programme</i>	33
2.4. LA NORME DVB-RCS	33
2.4.1. <i>Mise en œuvre du DVB-RCS</i>	34
2.4.2. <i>Pile de protocoles</i>	34
2.4.3. <i>Chaîne de transmission</i>	35
2.4.4. <i>Méthode d'accès</i>	36
2.5. CONCLUSION	38
<b>3. LE SATELLITE COMME SUPPORT D'IP</b>	<b>40</b>
3.1. L'ÉTAT DE L'ART ET LES OBSTACLES À L'IMPLANTATION D'IP SUR SATELLITE	40
3.2. LE DVB-S COMME SUPPORT D'IP	41
3.2.1. <i>Étude de l'encapsulation IP</i>	41
3.2.2. <i>Architecture d'étude</i>	46
3.2.3. <i>Limites des architectures classiques</i>	50
3.2.4. <i>Conclusions sur l'architecture classique</i>	52
3.3. LE DVB-RCS COMME SUPPORT D'IP	52
3.3.1. <i>DVB-RCS comme seul support d'IP</i>	52
3.3.2. <i>DVB-RCS comme complément au DVB-S</i>	52
3.3.3. <i>Persistance de limites</i>	53
3.4. DE NOUVELLES TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES AU SERVICE D'IP SUR SATELLITE	54
3.4.1. <i>Techniques de résolutions d'adresses et d'encapsulations : ULE</i>	54
3.4.2. <i>Les techniques de multifaisceaux</i>	58
3.4.3. <i>L'intelligence embarquée</i>	59
3.4.4. <i>Exemple d'architecture intégrant intelligence bord et multifaisceaux</i>	60
3.5. UN PROBLÈME PROTOCOLAIRE : TCP SUR SATELLITE	67
3.5.1. <i>TCP standard et les limites de son utilisation sur satellite</i>	67
3.5.2. <i>TCP et ses adaptations au support satellite</i>	70
3.5.3. <i>Conclusion sur le problème de la couche transport TCP</i>	72
3.6. CONCLUSION	73
<b>4. PROPOSITION D'UNE ARCHITECTURE HYBRIDE</b>	<b>74</b>
4.1. LES BESOINS DES SERVICES	74
4.1.1. <i>Vidéo à la demande</i>	75
4.1.2. <i>Accès Internet</i>	84
4.1.3. <i>Interconnexion de réseaux distants</i>	88
4.1.4. <i>Conclusion et ouverture à d'autres services</i>	90

4.2.	LES OBJECTIFS D'UNE ARCHITECTURE	91
4.2.1.	<i>Adaptation aux trafics actuels</i>	91
4.2.2.	<i>Optimisation du système satellite</i>	92
4.2.3.	<i>Adaptation aux trafics futurs</i>	92
4.3.	L'ARCHITECTURE HYBRIDE	93
4.3.1.	<i>Description de la charge utile hybride</i>	93
4.3.2.	<i>Description des autres entités du système hybride</i>	99
4.3.3.	<i>Description de l'architecture protocolaire</i>	102
4.4.	CONCLUSION	116
<b>5.</b>	<b>EVALUATION DE L'ARCHITECTURE HYBRIDE</b>	<b>120</b>
5.1.	LE NIVEAU PHYSIQUE ET SON INFLUENCE SUR LE SYSTÈME	121
5.1.1.	<i>Diffusion du médium satellite</i>	122
5.1.2.	<i>Délai d'un bond satellite</i>	122
5.1.3.	<i>Pertes sur le support physique</i>	122
5.2.	LE NIVEAU LIAISON	124
5.2.1.	<i>Le temps d'accès au support</i>	125
5.2.2.	<i>Étude et comparaison de l'encapsulation</i>	126
5.2.3.	<i>Étude du poids des messages de signalisation</i>	134
5.2.4.	<i>Étude du temps de réponse du système en fonction de la répartition bord/sol des fonctionnalités du NCC</i>	140
5.2.5.	<i>Conclusion sur la signalisation de l'architecture hybride</i>	143
5.3.	LE NIVEAU RÉSEAU	143
5.3.1.	<i>IP et son économie</i>	144
5.3.2.	<i>Conclusion sur le niveau 3</i>	144
5.4.	L'ACCÈS INTERNET	144
5.4.1.	<i>Représentation du trafic Internet</i>	145
5.4.2.	<i>Accès Internet standard</i>	145
5.4.3.	<i>Accès Internet évolué</i>	156
5.4.4.	<i>Intégration d'optimisations dans l'architecture hybride</i>	165
5.4.5.	<i>Conclusion sur l'accès Internet</i>	170
5.5.	LA VIDÉO À LA DEMANDE	171
5.5.1.	<i>Comparaison entre multi-spots et mono-spot</i>	171
5.5.2.	<i>Influence du lien retour</i>	174
5.5.3.	<i>Conclusion sur la Vidéo à la Demande</i>	174
5.6.	L'INTERCONNEXION DE RÉSEAUX PRIVÉS	174
5.6.1.	<i>Performances du multiplexage embarqué</i>	174
5.6.2.	<i>Intérêt du multi-spots pour l'interconnexion</i>	177
5.6.3.	<i>Conclusion sur le service d'interconnexion</i>	177
5.7.	CONCLUSION SUR CETTE ÉVALUATION	178
<b>6.</b>	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>180</b>

# 1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Ce travail se situe à la frontière de deux mondes distincts, aux vocabulaires différents et aux méthodes spécifiques. Les problèmes traités par cette étude reposent en grande partie sur l'évolution disjointe de ces deux domaines, responsable des difficultés de leur intégration au sens large du terme.

Ce premier chapitre propose d'introduire cette problématique, posant le contexte de cette étude. La première section retrace l'émergence d'IP comme le support incontournable de la transmission de données à une large échelle. La deuxième section introduit le domaine des satellites, et plus précisément les satellites de type GEO. La problématique est soulevée par une la confrontation de ces deux domaines dans une troisième section. Nous présentons dans une dernière section le plan de cette étude.

## 1.1. *La transmission de données*

Après son apparition dans le projet ARPANet, IP est vite devenu un standard mondial. Entre 1990 et 2000, le réseau Internet a connu un véritable succès, si bien qu'aujourd'hui, en septembre 2004, on estime à 23.23 millions le nombre d'internautes en France<sup>1</sup>.

Cette émergence d'IP a clairement montré que les solutions molothiques proposant une architecture de bout en bout (ATM par exemple) n'étaient pas adaptées à une large diffusion et dissémination, en particulier pour des raisons évidentes de coût d'infrastructure. En revanche, IP ne suppose presque rien des réseaux sur lequel il est déployé, interconnectant et fédérant des réseaux disparates de manière transparente pour l'utilisateur. Grâce à cette capacité, les applications se sont développées autour d'IP (plus particulièrement de la pile TCP/IP), le réseau s'est naturellement étendu, et les applications ont finalement proliférées, passant du simple *mail*, aux serveurs FTP, aux *chats*, aux multimédias, au *Peer-to-Peer*, entérinant le succès d'IP à un tel point qu'il semble aujourd'hui indétrônable.

IP est donc devenu la référence, disséminant le savoir à grande vitesse et portant l'ère du numérique. Mais cette évolution ne saurait s'arrêter là. La « pensée IP » détrône peu à peu les supports dédiés. Qu'il s'agisse du téléphone, de la télévision, des jeux, ou encore des livres, IP a créé une véritable révolution dans nos habitudes. Ainsi le *triple play*, offre de service d'accès Internet couplé à la Voix sur IP (VoIP) et à la télévision, se développe rapidement grâce à la prolifération de l'ADSL, se posant en dangereux concurrent de la téléphonie traditionnelle, de la télévision analogique et numérique par ondes terrestres, câble ou satellite.

IP offre donc un fort pouvoir intégrateur, idée que le RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Services) proposait déjà il y a près de 20 ans [1], mais qui n'a pu être mise en oeuvre à une large échelle.

## 1.2. *Le satellite, un outil de communication*

Qu'il soit créé pour surveiller, pour calculer, pour observer, le satellite reste un outil de communication parce qu'il doit transmettre les informations qu'il collecte. De là, le pas permettant de le transformer en un relais spatial de communication a vite été franchi en 1962

---

<sup>1</sup> Source médiamétrie, [www.mediametrie.fr](http://www.mediametrie.fr).

avec Telstar 1 ou encore Relay [2]. Ces satellites défilant à basse altitude ont vite démontré avec la diffusion de quelques émissions de télévisions, mais aussi avec des relais téléphoniques entre États-unis, Grande-Bretagne et France, les apports des satellites pour les télécommunications.

Pendant le mode défilant est peu approprié à la retransmission télévisée. C'est en 1965, avec Early Bird que naît un réseau commercial de télécommunications par satellites géostationnaires, Intelsat, proposant la diffusion de 36 programmes simultanés [3].

Parmi les quatre types de satellite (LEO, MEO, HEO et GEO), seul les GEOs offrent un relais fixe par rapport à un point de la Terre<sup>1</sup>, proposant une couverture pouvant atteindre un tiers du globe<sup>2</sup>. La télévision numérique trouve alors un support de choix dans de tels satellites : à la fin des années 90, le MPEG-2 [4] révolutionne le monde de l'image et ouvre l'horizon de la télévision numérique. Le satellite connaît alors un véritable succès en temps que support privilégié de ce service.

### 1.3. Une coexistence problématique

Parmi les différents types de satellite, les GEOs offrent de meilleures perspectives quant à la diffusion de données à une large échelle, apparaissant alors comme un support de choix à l'intégration de divers services. Or, les diverses tentatives d'intégration (ATM, RNIS, ...) ont prouvé la difficulté de l'enjeu, alors que le phénomène Internet a montré qu'une grande capacité d'adaptation était un atout majeur. Véhiculer des flux IP est donc incontournable.

La grande diversité du monde des télécommunications spatiale propose des satellites géostationnaires très spécifiques à chaque constructeur comme à chaque service, posant un véritable problème à l'intégration d'IP sur ces systèmes. Dans ce cadre, la norme DVB semble appelée à être un élément important. De plus en plus répandue, cette norme est en passe de devenir un standard mondial, proposant une base commune pour les systèmes satellites et visant avec les instances de normalisation comme l'ETSI à un interfaçage commun.

En parallèle, les possibilités offertes par les GEOs (et plus généralement les réseaux sans fil) n'ont pas échappé au monde IP. Ainsi l'IETF, l'organisme de normalisation d'IP, travaille à l'intégration de ces systèmes dans les réseaux IP.

La convergence de ces deux initiatives reste encore à venir, promettant des solutions quant à la normalisation d'un interfaçage entre les deux mondes. Actuellement toutefois, les solutions classiques intégrant IP sur satellite présentent des limites (gaspillage de ressources, double bond, voie retour, comportement de TCP, etc...). En réponse, des nouvelles technologies apparaissent (intelligence embarquée, *multi-spots*, etc...) ainsi que des solutions protocolaires.

Il apparaît alors clairement au travers de ces diverses propositions que tous les verrous technologiques devraient pouvoir être levés et les solutions correspondantes normalisées. Se pose alors la question de leur intégration dans une architecture globale opérationnelle qui soit à la fois pérenne et capable de supporter les évolutions technologiques.

Les problèmes au cœur de cette nouvelle étape vers une cohabitation profitable des deux mondes sont donc :

- l'intégration d'IP aussi efficace que possible sur un système satellite ;
- l'intégration homogène et cohérente de différents services ;

---

<sup>1</sup> En orbite circulaire à 35900 km de la Terre, le satellite géostationnaire a une durée de révolution égale à la période de rotation de la Terre (23h 56min), lui garantissant une position fixe en vis-à-vis d'un lieu donné.

<sup>2</sup> La couverture d'un système géostationnaire est une valeur théorique : les zones polaires ne sont pas couvertes par un tel satellite

- l'utilisation et la pertinence des nouvelles technologies dans un cadre IP.

Ces questions sont au centre de la problématique de notre étude que nous nous proposons de détailler dans les premières parties de ce mémoire, en nous reposant sur une approche synthétique du satellite comme support d'IP, pour ensuite définir, une architecture globale capable d'intégrer différents services et technologies.

#### ***1.4. Le plan de l'étude***

Le deuxième chapitre de ce mémoire proposera une présentation de la norme DVB, et particulièrement du DVB-S, DVB-RCS et DVB-SI, et de leur lien étroit avec la norme MPEG-2.

A la lumière de cette analyse, le chapitre 3 se focalisera sur l'utilisation du satellite géostationnaire comme support d'IP. Après avoir étudié les solutions classiques, et souligné leurs défauts, nous verrons comment ces limites peuvent être levée à l'aide de nouvelles technologies et d'adaptations protocolaires. Afin de comprendre quels impacts peuvent avoir ces différents éléments sur un système satellite orienté IP, nous étudierons l'intégration d'un brasseur ATM sur un satellite multi-faisceaux. Mais nous observerons que ces solutions posent des questions la viabilité et la justification de tels systèmes.

Dans le chapitre 4, nous proposons de répondre à ces questions qui proviennent d'un véritable besoin architectural. Nous étudierons dans un premier temps différents services (la vidéo à la demande, l'accès Internet et l'interconnexion de réseaux privés) dans l'optique d'une intégration sur un système satellite. Nous verrons alors leurs différents besoins qui nous amèneront à la définition des objectifs d'une architecture. Sur cette base une proposition sera détaillée reposant d'une part sur l'intégration de deux charges utiles à bord d'un même système, et d'autre part sur la mise en œuvre d'IP comme entité fédératrice, aboutissant à l'intégration des différents services précités.

L'étape suivante, à laquelle sera consacrée le chapitre 5, sera l'évaluation du concept d'architecture hybride en s'attachant à montrer sa pertinence et son adéquation à une grande diversité de services. Cette étude reposera sur les différentes couches de l'architecture, du niveau physique au niveau applicatif. Cette partie montrera comment l'architecture hybride peut offrir les trois services proposés en leur faisant profiter de sa flexibilité sans pour autant induire une signalisation plus lourde.

Enfin le chapitre 6 conclura ce travail, et dégagera des perspectives ultérieures de recherche.



## 2.DVB COMME NORME DE COMMUNICATION SPATIALE

Le satellite est un domaine fortement hétérogène. Les GEOs ont été, en effet, un médium de communication depuis plus de 40 ans, et chaque système a été conçu plus ou moins indépendamment des autres, souvent avec des protocoles privés ou des adaptations propriétaires de mécanismes existants. L'étude du satellite est alors souvent forcée à rester soit générale, soit spécifique à un type de système (une étude de cas). Toutefois, l'arrivée du standard MPEG-2 [4] proposant une compression réaliste pour la transmission d'un flux vidéo numérique, change la donne en offrant la capacité de distribuer la télévision digitale avec un débit raisonnable. Une nature diffusante, une très large couverture et une grande capacité font vite des GEOs un support de choix pour la télévision numérique. Dans ce cadre, un standard de communication émerge en Europe. Étroitement lié au transport de flux MPEG-2, le Digital Video Broadcasting (DVB) [5] profite de la large démocratisation de la télévision numérique et se positionne comme un standard très ouvert et largement répandu.

Le DVB-S (DVB for Satellite) devient rapidement le standard pour la télévision par satellite, avec un seul véritable concurrent, le standard américain HDTV (High Definition TeleVision) adopté par l'ATSC [6] (Advanced Television Systems Committee). Ce standard est similaire au standard européen sur de nombreux points. La norme DVB est utilisée dans la plupart des satellites géostationnaires actuel, commerciaux comme projet. Pour cette raison elle est le support choisi pour nos travaux. Nous proposons donc ici d'étudier plus en détail ses principes comme son fonctionnement. Cette étude permettra de comprendre mieux comment cette norme, avant tout créée pour véhiculer des flux multimédia, peut être utilisée pour des flux de natures différentes et plus particulièrement des datagrammes.

Cette partie présente donc les différents standards DVB liés au satellite. Cette étude, après avoir abordé les principes du standard (MPEG-2), propose d'analyser le standard DVB-S (DVB for Satellite), puis la signalisation avec le DVB-SI (DVB System Information) et enfin le DVB-RCS (DVB Return Channel for Satellite)

### ***2.1. La norme DVB***

La norme DVB est une norme récente, issue de la norme MPEG-2. L'historique de sa création est brièvement abordé ici. Nous présenterons aussi les différents standards regroupés sous le sigle DVB et enfin la norme MPEG-2, essentielle à la compréhension du DVB.

#### **2.1.1. Historique du DVB**

Le groupe DVB (Digital Video Broadcasting) apparaît entre 1993 et 1996 en même temps que la première publication de la norme MPEG-2 [4]. Initiative européenne, le groupe DVB trouve son origine avec l'ELG (European Launching Group) lancé en 1991.

Les standards DVB sont publiés depuis janvier 1995 par l'Union Européenne de Radiodiffusion, et présente les techniques basiques pour l'implantation de la transmission TV numérique en Europe, Asie, Australie et de nombreux autres pays. Le seul concurrent semble être le standard américain HDTV, lui-même reposant sur la technologie MPEG-2, mais incompatible en partie avec le DVB. Aujourd'hui le groupe DVB est un véritable consortium regroupant plus de 300 membres et ses normes sont téléchargeables gratuitement sur le site ETSI (European



Telecommunications Standards Institute). Un nouveau standard, le DVB-S2 est d'ailleurs dans sa phase de test, et grâce à ses performances au niveau codage, il devrait pouvoir remplacer prochainement le DVB-S.

Le DVB est une initiative en réponse au problème de la télévision analogique : la normalisation. En effet les standards de télévision analogique (PAL, SECAM, D2-MAC...) ne sont pas uniformes et présentent des problèmes d'incompatibilité entre eux [7]. Le succès du DVB n'a pu donc être complet sans une impulsion assez forte des organismes européens pour inciter toute la chaîne des acteurs, de la conception à la production, à entrer dans le consortium. A l'heure actuelle la norme DVB est bien implantée dans le monde entier, notamment en ce qui concerne sa version pour le satellite. La concurrence reste élevée pour des média tels que le câble ou les ondes terrestres [5].

Si le DVB doit son succès en grande partie à celui de la compression MPEG-2 et de l'initiative européenne dont il est le fruit ; son adaptabilité est un élément fondamental de son succès actuel comme à venir. En effet, le système DVB a été conçu dans un but large et intelligent, adaptable à différents moyens de transmissions dans la mesure où il n'impose pas de restrictions sur le matériel utilisé. Le DVB a été créé pour être en mesure de transmettre la vidéo comme l'audio, mais aussi les EPG (Electronic Program Guides), les télétextes, et dispose même de moyens pour transmettre des données en mode paquet (datagramme).

Ce côté ouvert du DVB est un des éléments qui intéressent actuellement les différents projets européens et asiatiques, et c'est ce qui nous a amené à l'étude de ce standard.

### 2.1.2. Standards DVB

Le DVB est une norme complexe qui régit en premier lieu la transmission de télévision numérique par câble, onde terrestre, ou satellite. Les standards DVB sont nombreux et divisibles en différentes catégories :

- Les standards de transmission qui traitent de l'implémentation du transport des ES (Elementary Streams) MPEG-2 sur différents supports. Les trois principaux standards de ce domaine sont le DVB-S (Satellite), le DVB-C (Câble) et le DVB-T (Terrestre). D'autres standards sont en projet comme le DVB-X (ad hoc, encore nommé DVB-H, ou DVB-M) qui doit aboutir à des offres commerciales pour mobiles (télévision sur téléphones cellulaires, vidéo à la demande...) couplées au DVB-T en 2006 [8] [9].
- Les standards d'interaction qui s'occupent des voies retours et des connexions (DVB-DATA). On trouve tous les standards DVB-RC\* (DVB - Return Channel for \*) comme par exemple le DVB-RCS (DVB – Return Channel for Satellite) qui normalise la voie retour via satellite. On trouve aussi le support des applications telles que le télétexte (DVB-TXT) ou le sous-titrage (DVB-SUB) et enfin un standard fondamental le DVB-SI (DVB – System Information) qui régit la signalisation des différents programmes présents dans le flux DVB, en utilisant des tables de signalisation.
- Les standards d'interfaçage et de codage avec notamment le DVB-CI (DVB Common Interface) utilisant l'accès conditionnel (DVB Conditional Access) couramment crypté avec le DVB-CSA (DVB Common Scrambling Algorithm).

### 2.1.3. MPEG-2

Le MPEG-2 est la base de la norme DVB. Avant tout connu comme norme de compression, le standard regroupe aussi des méthodes de multiplexage particulières reposant sur le découpage des flux élémentaires (ES Elementary Stream) en PES (Packetised Elementary Stream) [4]. Le multiplexage MPEG-2 est donc abordé ici puisque ces informations sont indispensables à la compréhension des normes DVB.

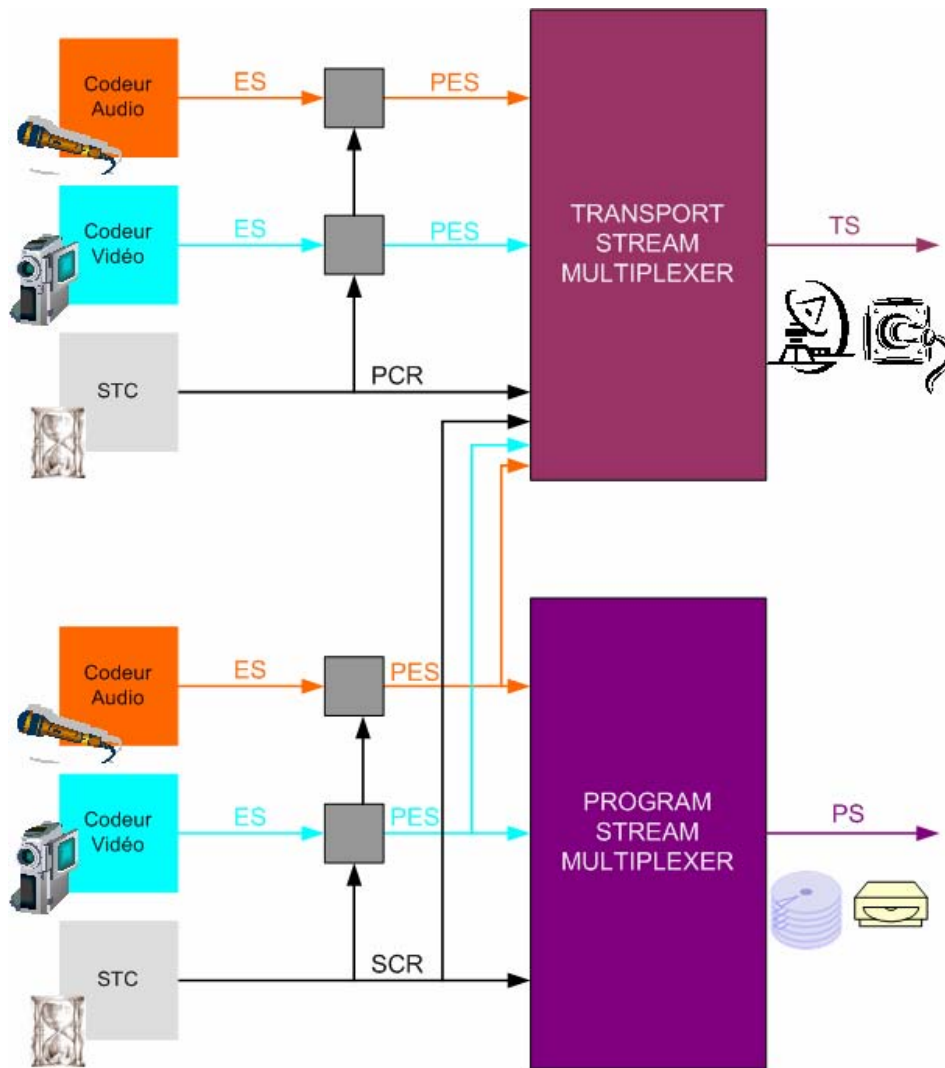


Figure 2.1 Deux types de multiplexage pour MPEG-2

Dans la figure ci-dessus (Figure 2.1) le MPEG-2 propose deux méthodes différentes pour multiplexer les PES en fonction de l'application, formant deux types de flux distincts. Le Program Stream (PS) est formé à partir d'un unique programme regroupant plusieurs PES (vidéo, audio et données privées). Constitué de paquets relativement longs (2048 octets par exemple), le PS est utilisé pour la transmission sur un canal présentant un taux d'erreurs faibles (Quasi Error Free). Il est utilisé pour le stockage des média sur disque dur, CD, et DVD. De son côté, le Transport Stream (TS) peut mélanger différents programmes. De plus il est le flux utilisé pour transporter les données multimédia sur différents supports qui sous-entendent un risque d'erreur non négligeable (câbles, ondes terrestres, satellites, ...). Le flux TS utilise alors des paquets de petite taille (fixée à 188 octets) pour l'efficacité des codes correcteurs.

Le TS est donc le flux qui nous intéresse plus particulièrement ici. Reprenant la figure ci-dessus plus en détail, l'élaboration du TS s'effectue en plusieurs étapes :

- Les flux vidéo et audio sont compressés séparément, donnant en sortie de chaque codeur un flux constant appelé ES.
- Une fois compressés, les flux vidéo et audio (deux ES distincts) sont découpés en PES en utilisant la même base de temps (Source Time Clock), pour un même programme ;
- Les PES sont ensuite multiplexés dans des paquets MPEG-2 TS, composant le Transport Stream, via une méthode nommée *data-streaming*. Un paquet MPEG-2 TS ne

peut par cette méthode contenir qu'un seul morceau de PES. Du bourrage est donc utilisé dans ce cas pour remplir les paquets MPEG-2 TS à 188 octets.

## 2.2. La norme DVB-S

DVB-S est le standard de transmission de la télévision numérique via satellite géostationnaire. Ce standard regroupe des informations sur les protocoles utilisés pour multiplexer les données en se basant sur le standard MPEG-2 (cf. partie précédente), des méthodes d'accès et enfin des informations sur le codage canal ainsi que sur la modulation du signal. Il s'agit d'un standard ouvert dont la première publication remonte à 1993, alors que la dernière version de ce standard date de 2004. La norme DVB-S a donc su s'enrichir tout au long de cette dernière décennie devenant un standard mondial comme le montre cette carte (Figure 2.2).

Cette partie propose l'étude de cette norme en insistant particulièrement sur le niveau liaison (dit aussi niveau accès dans le monde satellite) afin de comprendre son fonctionnement et son interaction éventuelle avec des couches plus hautes.

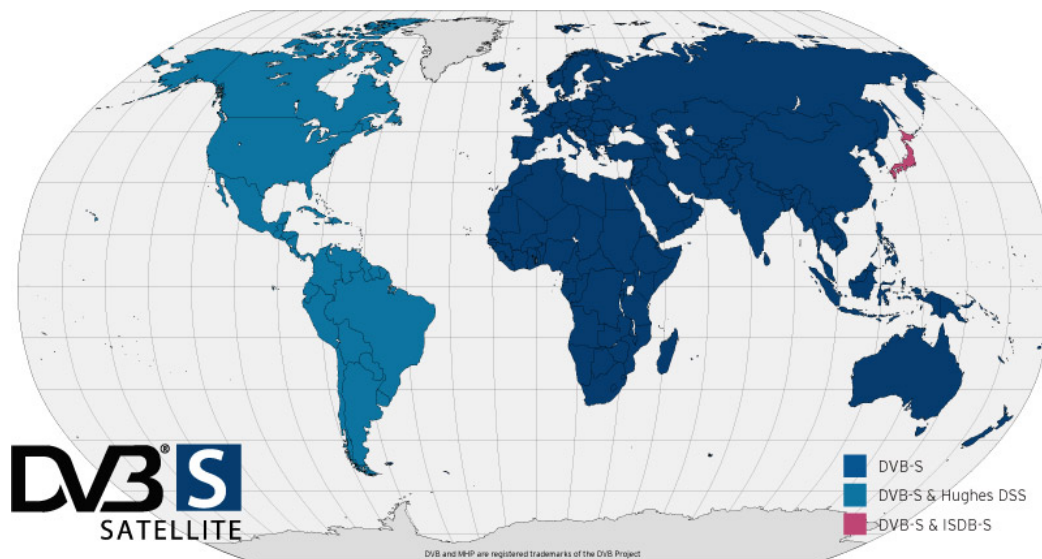


Figure 2.2 DVB-S et ses concurrents dans le monde<sup>1</sup>

### 2.2.1. Pile de protocoles DVB-S

La pile de protocoles du DVB-S s'appuie majoritairement sur la norme MPEG-2. La figure suivante (Figure 2.3) propose un aperçu de cette pile de protocoles dans le plan utilisateur d'une part, et dans le plan de contrôle/gestion d'autre part [10] [11]. Ces deux piles montrent la différence de traitement entre les flux MPEG-2 et la signalisation de ces derniers. En effet, les flux MPEG-2 suivent le traitement observé précédemment, le *data-streaming* encapsule des PES dans les paquets MPEG-2 TS de charge utile de 184 octets (auxquels il faut ajouter 4 octet d'en-tête), tandis que les tables de signalisation suivent un processus à part : Les tables MPEG-2 et DVB-S, organisées dans la norme DVB-SI, sont multiplexées dans des sections MPE (MultiProtocol Encapsulation), qui sont elles-mêmes encapsulées dans les paquets MPEG-2 TS et multiplexées avec les paquets MPEG-2 TS contenant les flux MPEG-2. Le *data-streaming* dans le plan utilisateur et le *Multi Protocol Encapsulation* dans le plan de contrôle diffèrent à la fois sur la méthode d'insertion dans les paquets MPEG-2 TS, et sur la gestion du bourrage, puisque MPE

<sup>1</sup> Source [www.DVB.org](http://www.DVB.org)

peut autoriser l'encapsulation de deux sections différentes dans un même paquet MPEG-2 TS<sup>1</sup>, tandis que le *data-streaming* utilise toujours le bourrage pour compléter un paquet MPEG-2-TS

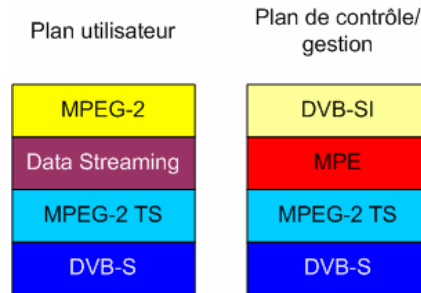


Figure 2.3 Piles de protocoles du DVB-S comme support des flux MPEG-2

### 2.2.2. MPEG-2 TS

Conformément à la norme, la couche MPEG-2 TS possède plusieurs points d'accès (nous en avons déjà évoqué deux : le protocole MPE et le *data-streaming*). Nous analyserons différentes méthodes d'encapsulation dans la partie 3. Cette partie se concentre sur le *data-streaming*, le protocole du plan utilisateur qui multiplexe les PES dans le flux de paquets MPEG-2 TS.

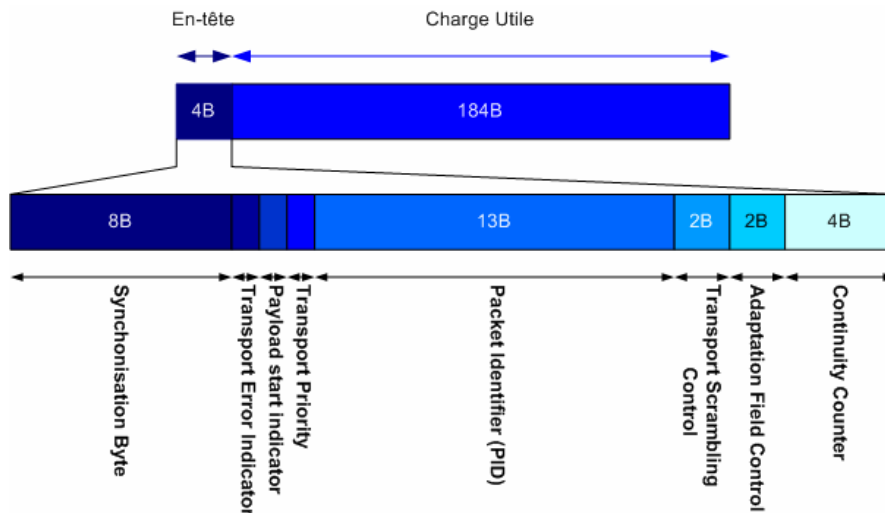


Figure 2.4 Détail d'un paquet MPEG-2 TS et de son en-tête

Les paquets MPEG2-TS (Figure 2.4) sont de courts paquets de taille fixe, 188 octets. Le paquet a un en-tête de 4 octets et une charge utile de 184 octets. Toutefois l'en-tête du paquet peut être augmenté grâce à des champs optionnels, diminuant du même coup la charge utile du paquet. La figure ci-dessus détaille le paquet MPEG-2 TS et son en-tête standard de 4 octets [4] [5] [7] [11]. Les champs de l'en-tête MPEG-2 TS sont par ordre d'apparition :

- Synchronisation byte : l'octet de synchronisation qui prend pour valeur 0100 0111 (0x47) et permet ainsi de détecter le début d'un nouveau paquet.
- Transport\_error\_indicator : l'indicateur d'erreur de transport, 1 bit, indique la présence d'au moins un bit incorrect et irrécupérable dans le paquet MPEG-2 TS. Ce bit peut-être mis à un par un autre protocole que la couche MPEG-TS, indiquant une erreur rencontrée dans la chaîne de transmission.

<sup>1</sup> Cette méthode est nommée *section-packing*.

- **Payload\_unit\_start\_indicator** : le PUSI (1 bit) indique si le début d'un PES est présent dans ce paquet. Plus généralement, son utilisation est indiquée pour savoir si le début d'une donnée encapsulée par MPEG-TS est présent dans ce paquet. Pour les tables PSI par exemple, sa présence indique que le premier octet de charge utile est un pointeur sur le début de la nouvelle table.
- **Transport\_priority** : il s'agit d'un *flag* de 1 bit. Lorsqu'il est activé, le paquet a une priorité plus grande que tout autre paquet de même PID. Un mécanisme de QoS peut se baser sur ce bit pour donner une plus grande priorité aux paquets concernés.
- **PID** : composé de 13 bits, il le canal logique, c'est-à-dire un numéro de flux. Certains PID sont réservés (cf. partie 2.3).
- **Transport\_Scrambling\_Control** : champ de 2 bits indiquant le type de cryptage utilisé pour la charge utile du flux de transport. Ce champ ne doit pas être crypté. Dans le cas d'un paquet nul, c'est-à-dire un paquet où il n'y a que du bourrage, ce champ prend la valeur 00.
- **Adaptation\_Field\_Control** : ce champ (2 bits) permet de savoir si un en-tête optionnel, nommé champ d'adaptation, suit l'en-tête standard :
  - 00 : réservé pour des utilisations futures,
  - 01 : pas de champ d'adaptation, seulement des données,
  - 10 : seulement un champ d'adaptation, pas de données,
  - 11 : champ d'adaptation suivi de données.
- **Continuity\_Counter** : le compteur de continuité est constitué de 4 bits, ce champ est incrémenté de un à chaque nouveau MPEG-TS de même PID. Lorsqu'il arrive au maximum, il repasse à 0.

L'encapsulation d'un flux de PES se fait en utilisant le *data-streaming* comme illustré dans la figure ci-dessous (Figure 2.5). Dans le *data-streaming*, le PUSI n'est pas utilisé et on comble le paquet MPEG-2 TS avec du bourrage. Ainsi dans un même paquet il ne peut y avoir qu'un élément d'un unique PES. Le PID des paquets sera le même pour un PES donné ainsi que pour le même flux de PES, c'est-à-dire l'ES original.

Le bourrage utilisé en DVB est considéré comme un champ d'adaptation. L'*adaptation field control* est donc fixé à 11, et un champ d'adaptation est inséré indiquant la taille du champ suivie des octets de bourrage, permettant ainsi de retrouver facilement le début des données (Figure 2.5).

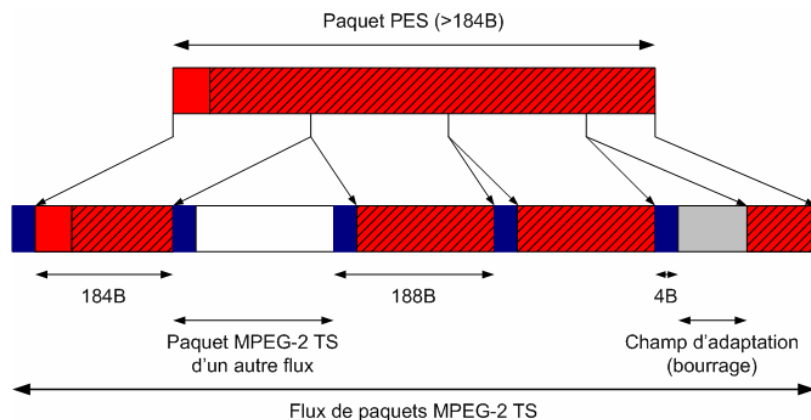


Figure 2.5 Encapsulation d'un PES dans des paquets MPEG-2 TS via *data-streaming*

### 2.2.3. Chaîne de transmission

Une fois le flux MPEG-2 TS créé, celui-ci est traité pour être émis vers le satellite par la couche DVB-S. Ce niveau est en constante évolution suite aux nombreux progrès technologiques tels que les turbo-codes ou l'apparition du DVB-S 2.

Si l'on reste sur les dernières normes DVB-S, les flux MPEG-2 TS sont traités par la chaîne de codage suivante (Figure 2.6). L'objectif de ce document n'étant en aucune manière de rentrer dans le détail de ce niveau, cette partie se contente de retracer les étapes principales du codage physique [7] [12] :

- Le brouillage : aussi appelé dispersion d'énergie, il permet d'éviter une trop longue succession de 1 ou de 0 qui aurait comme impact la création d'une raie à forte énergie. Le signal est multiplié par la sortie d'un générateur pseudo aléatoire.
- Le codage Reed-Solomon : ce codage rajoute un code de 16 octets à la fin du paquet MPEG-2 TS, permettant de corriger au maximum 8 octets défectueux.
- L'entrelacement : ce mélange des données permet d'éviter les suites consécutives d'erreurs, plus difficiles à corriger, en entrelaçant les octets de plusieurs paquets.
- Le code convolutif : code en treillis, il ajoute de la redondance au signal à raison de 2 bits pour 1 (décodage Viterbi).
- Le poinçonnage : il permet d'améliorer le rendement du code convolutif en éliminant certains bits (on parle de Forward Error Code pour ce rendement).
- La modulation QPSK : elle permet de moduler le signal sans faire de modulation d'amplitude puisque le signal est très bruité par le travail en saturation des transpondeurs.

Le débit symbole de la chaîne de transmission est de  $27,5 \cdot 10^6$  symboles par seconde, pour un transpondeur de 35 MHz, d'où un débit utile de 38 Mbit/s pour un FEC de  $\frac{3}{4}$ .

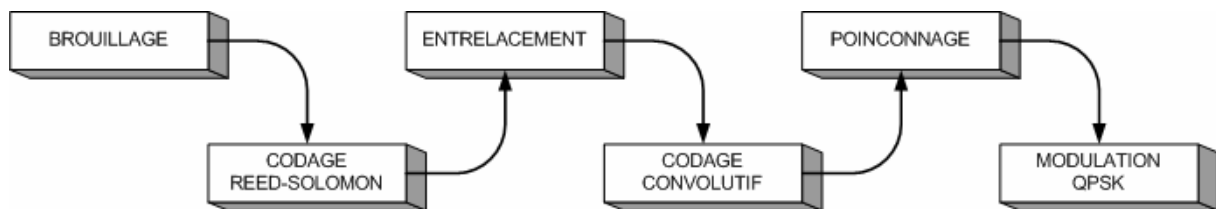


Figure 2.6 Aperçu de la chaîne de codage du DVB-S

### 2.2.4. Méthode d'accès

Équipées de transpondeurs, les stations qui ont accès au système satellite sont couramment nommées des *gateways*. Celles-ci sont peu nombreuses, souvent réduites à une seule entité par système. Toutefois plusieurs *gateways* peuvent se partager le système. Les méthodes d'accès, dans ces cas, restent pour le plus souvent des solutions propriétaires, reposant souvent sur une division fréquentielle de la bande passante, voire temporelle pour des systèmes avec intelligence à bord.

Les *gateways* émettent à débit constant et permanent, le bourrage étant donc communément utilisé en cas de nécessité. Les émetteurs DVB-S mettent en œuvre une technologie pointue et ont donc un coût élevé, tandis que les récepteurs DVB-S sont peu coûteux, fruit d'une technique rodée. En effet, le succès de la télévision numérique a grandement contribué au développement des IRD (Integrated Receiver Decoder) et ce à moindre coût.

### 2.3. Les tables de service

Pour gérer l'émission et la réception des différents flux et programmes véhiculés par le satellite, des tables de signalisation sont nécessaires. Ces tables sont nommées tables de service et sont définies dans plusieurs standards :

- La norme ISO MPEG-2 [4] définit les tables PSI (Program Specific Information) qui décrivent les différents éléments présents dans un flux MPEG-2 TS.
- La norme DVB-SI (DVB System Information) [13] propose des tables spécifiques au système DVB. Les tables SI sont un complément d'information aux tables PSI, indiquant aux terminaux les différents services offerts par le système.
- D'autres tables sont envisagées par les normes DVB. Les normes interactives telles que DVB-RCS ajoutent une signalisation pour gérer la voie retour (capacité et accès).

Cette étude se focalise uniquement sur les tables de services MPEG-2 et DVB-SI, pour pouvoir au final caractériser la méthode de détection des différents programmes par un terminal.

#### 2.3.1. Tables PSI

Les tables PSI sont de quatre types différents (Figure 2.7) et véhiculent l'information minimale qui permet aux terminaux d'identifier et d'accéder aux différents flux d'un multiplexe. Ces tables ont pour la plupart un PID fixe et portent uniquement sur le multiplexe dans lequel elles sont véhiculées.

La table PAT (Program Association Table) indique pour chaque service du multiplexe le PID de sa table PMT (Program Map Table). De plus celui-ci doit aussi renseigner sur le PID de la table NIT (Network Information Table) (ce dernier étant souvent fixé à 10). Cette table, unique par multiplexe, est créée par l'entité de gestion du système satellite.

La table CAT (Conditional Access Table) contient des informations de type privé, et donc spécifiques au système, sur l'accès au système. En particulier cette table indique les flux EMM (Entitlement Management Message) contenant une autorisation d'accès au service pour les terminaux.

La table PMT (Program Map Table) détient les informations sur un unique programme c'est-à-dire tous les PIDs des ES constituant le programme ainsi que la localisation du PCR (Program Clock Reference) de ce service.

La table NIT (Network Information Table) fait partie du standard MPEG-2 mais son contenu, sa syntaxe et son caractère obligatoire ont été introduits par la norme DVB-SI. Cette table fournit des informations sur l'organisation physique des multiplexes et TS d'un réseau donné ainsi que des informations sur le réseau courant (`table_id = 0x40`) ou sur un autre réseau (`table_id = 0x41`). Ces informations de type privé sont par exemple le nombre de transpondeurs, les coordonnées de l'orbite du satellite, *etc...*

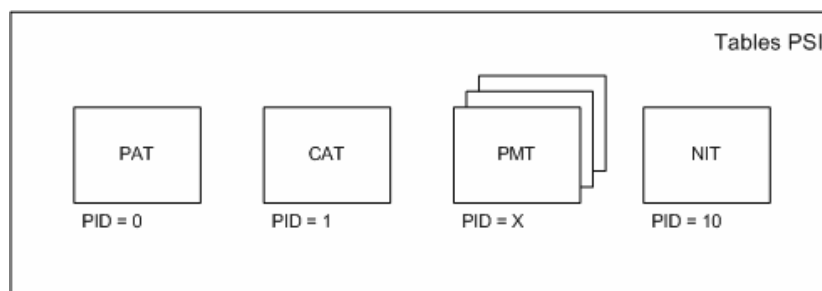


Figure 2.7 Représentation des quatre tables de service PSI

### 2.3.2. Tables SI

Ces tables ont été spécialement ajoutées par la norme DVB pour traiter un certain nombre d'informations supplémentaires. Ces tables sont divisées en deux types : des tables obligatoires d'une part, et des tables optionnelles d'autre part. Nous présentons brièvement ici ces tables (pour plus d'informations se référer au standard ETSI EN 300 468 [13]) :

- Les tables obligatoires, mise à part la table NIT décrite ci-dessus, sont :
  - la table SDT (Service Description Table) décrivant les services présents dans le système,
  - la table EIT (Event Information Table) décrivant le service courant sur le multiplexe ainsi que le service à venir (heure de départ, durée, ...),
  - la table TDT (Time and Date Table) fournissant l'heure et la date courante aux IRDs.
- Les tables optionnelles regroupent de nouvelles tables ainsi que des extensions des tables précédentes :
  - l'extension de la table NIT à des réseaux autres que celui courant,
  - la table BAT (Bouquet Association Table) identifiant les différents services d'un même bouquet,
  - l'extension de la table SDT à des réseaux autres que celui courant,
  - les extensions de la table EIT à des réseaux autres que celui courant, et l'introduction d'un planning complet des différents services à venir,
  - la table RST (Running Status Table) informant de l'état d'une diffusion (cette table est plutôt diffusée au début et à la fin de l'émission),
  - la table TOT (Time Offset Table) donnant le décalage entre le temps local et le temps de référence du système,
  - la table ST (Stuffing Table) utilisée pour remplacer et invalider une section.

Cette présentation n'est pas exhaustive, d'autant plus que la norme autorise l'utilisation de tables privées. Les tables privées permettent la mise en œuvre de nouvelles techniques au risque toutefois de perdre en interopérabilité. Pour combler ce problème, la norme DVB essaie d'incorporer les tables d'intérêt général dans ses mises à jour, comme notamment la table INT [14] que nous étudierons plus tard, dans la partie 3.

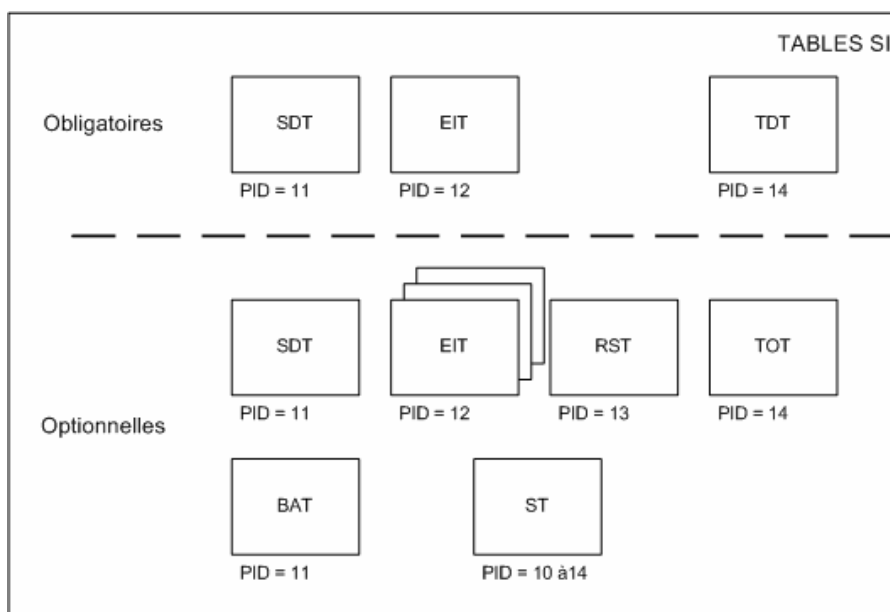


Figure 2.8 Représentation des tables de service SI



### 2.3.3. Exemple de structure d'un programme

Ces tables peuvent être émises par l'entité de contrôle et de gestion du système, mais aussi par les fournisseurs de services (PMT par exemple). La plupart de ces tables, à l'exception des tables RST, sont émises périodiquement afin que les IRDs puissent décoder et accéder aux programmes qui les intéressent.

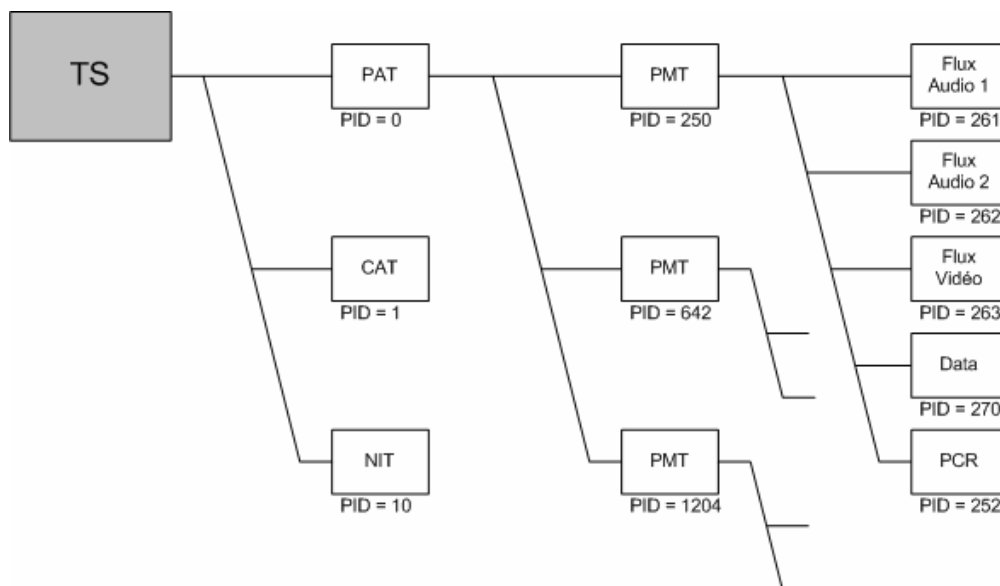


Figure 2.9 Schéma d'un « guide de programme »

Pour pouvoir décoder un programme, le jeu des tables PSI peut être suffisant (Figure 2.9). En effet, une fois la gestion des bouquets et du réseau effectuée, et la table SDT consultée pour connaître la liste des services proposés, la table PAT est consultée par l'IRD pour connaître le PID de la table PMT correspondant au programme choisi. La table PMT permet de trouver et de décoder les différents ES constituant le programme.

Il peut arriver d'ailleurs que dans un même programme on retrouve différents flux (par exemple audio) qui correspondent à des choix utilisateurs comme la langue, le sous-titrage, *etc.* ...

## 2.4. La norme DVB-RCS

La norme DVB-S présente un certain nombre d'avantages : une grande capacité, un débit constant ou encore une parfaite adéquation à la télévision. Toutefois l'arrivée sur le marché de nouveaux types de services permettant un véritable choix voire même un dialogue avec l'utilisateur final, demande à ce dernier de pouvoir transmettre des données. Or cette interactivité n'est pas prévue par DVB-S. Plusieurs solutions ont été proposées comme l'utilisation d'un lien terrestre pour se charger des requêtes de l'utilisateur. Ce type de techniques fondée sur un lien retour dissymétrique, est nommé UDLR (UniDirectionnal Link Routing) [15], et propose une solution, dans le cas où une connexion terrestre est possible. Toutefois un standard DVB considère la possibilité d'un lien retour satellite interactif, le standard DVB-RCS (DVB Return Channel for Satellite) [16].

Le DVB-RCS est un standard interactif répondant au besoin d'un lien retour notamment pour la télé interactive. Cette norme n'est donc pas spécifique à un type de données multimédia contrairement au DVB-S, puisqu'il s'agit de données des utilisateurs finals dépendants de l'application (achats, jeux, *chats*, requêtes diverses...).

La norme DVB-RCS a été spécialement créée pour un canal interactif. Elle allège le coût de la liaison proposant un lien retour satellite aux utilisateurs sans que cela ne monopolise les

ressources inutilement, ce qui n'est pas le cas avec le DVB-S qui émet un flux constant de données et provoque du bourrage en absence de données à émettre. La norme DVB-RCS est présentée comme un apport au DVB-S, et c'est l'une des raisons pour lesquelles les deux normes sont souvent confondues, puisqu'elles fonctionnent en étroite corrélation. Il est donc naturel de la présenter ici en l'incorporant à une architecture DVB-S, comme le préconise la norme.

### 2.4.1. Mise en œuvre du DVB-RCS

La norme prévoit pour un système DVB-S la possibilité d'interagir avec un système DVB-RCS. Ce système peut être supporté par deux satellites différents (Figure 2.10), ou un seul satellite intégrant les deux technologies. Le système DVB-RCS est intégralement dépendant des flux aller DVB-S qui contiennent les différentes informations pour régler le système (accès, signalisation et synchronisation des terminaux).

La méthode envisagée par la norme permet donc de rester dans le cadre DVB-S actuel tout en apportant une marge interactive à différentes applications. Les avantages des deux technologies sont ainsi réunis en un seul système, avec toutefois une nuance : même si le coût technologique d'un transpondeur DVB-RCS est moins lourd qu'un émetteur DVB-S, notamment avec les VSAT, les coûts matériels, d'installation comme de location de la bande passante restent élevés. Dans la norme, ces terminaux sont nommés les RCST (Return Channel Satellite Terminal).

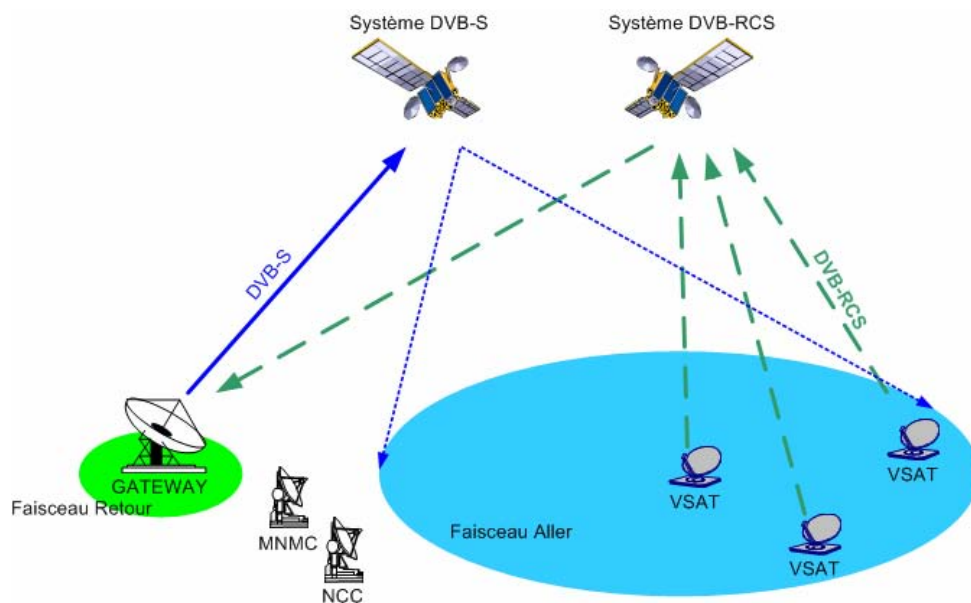


Figure 2.10 Architecture DVB-S/DVB-RCS

Dans la figure ci-dessus, on remarque plusieurs entités de gestion du système : le NCC (Network Control Centre) et le NMNC (Mission and Network Management Centre). Ces entités sont chargées de gérer le système, de s'occuper de l'accès au système ainsi que d'une grande partie de la signalisation. Ces fonctionnalités peuvent être intégrées dans une *gateway*. Les flux DVB-S transportent la signalisation DVB-RCS. Celle-ci est diffusée sur tout le faisceau DVB-S, et les terminaux peuvent ainsi se synchroniser et émettre leurs données vers la *gateway*, via un faisceau descendant restreint.

### 2.4.2. Pile de protocoles

Le DVB-RCS contrairement au DVB-S n'est pas fondé sur l'émission d'un flux constant mais sur l'émission de *bursts* utilisant un découpage spécifique en temps et fréquence (cf. partie 2.4.4). Peu dépendant du type de données à véhiculer, le DVB-RCS propose deux méthodes

d'encapsulation : une méthode utilisant les cellules ATM et une autre reposant sur les paquets MPEG-2 TS. Comme le montre la figure suivante (Figure 2.11), la pile de protocoles mise en jeu pour l'encapsulation d'une donnée de type standard (ici un datagramme IP) diffère avec la méthode choisie.

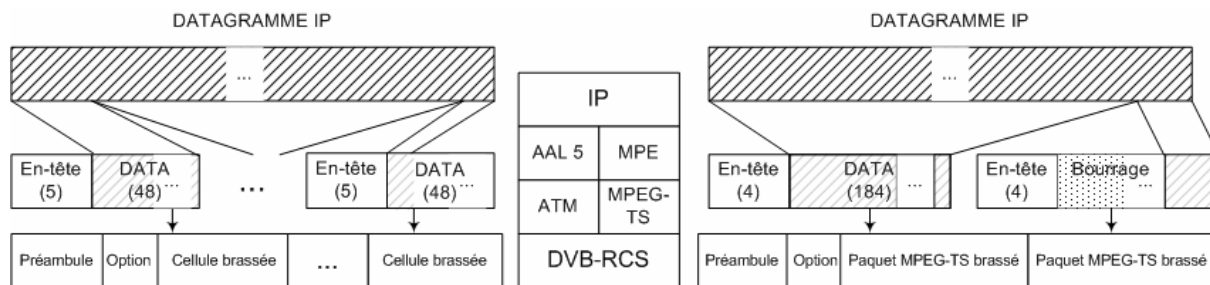


Figure 2.11 Deux encapsulations proposées pour le DVB-RCS

Comme on peut le constater ces deux méthodes diffèrent uniquement au niveau 2 :

- L'encapsulation dans des cellules ATM est gérée par la couche d'adaptation AAL5 (ATM Adaptation Layer 5), qui est adaptée à l'encapsulation de datagrammes. Cette technique est décrite par la norme comme devant être obligatoirement supportée par tout système utilisant la technologie DVB-RCS.
- L'encapsulation en paquet MPEG-2 TS utilise la méthode des sections utilisée pour encapsuler les tables SI et PSI : le protocole MPE (MultiProtocol Encapsulation). Cette méthode est optionnelle d'après la norme de 2003 [16].

Dans ces deux cas, le niveau physique reste le même : le DVB-RCS. Les données une fois encapsulées en cellules ou paquets, sont regroupées en un *burst* (1, 2 ou 4 cellules généralement) puis sont brassées pour disperser l'énergie. Un préambule est ensuite appliqué au paquet en fonction des différents codages (cf. partie 2.4.3). On notera enfin la présence d'un champ optionnel, qui est notamment utilisé par la méthode d'accès SAC (Satellite Access Control).

### 2.4.3. Chaîne de transmission

Contrairement à la chaîne de transmission DVB-S, la norme DVB-RCS propose d'utiliser les turbo-codes comme option [16]. En effet, comme l'illustre la figure ci-dessous (Figure 2.12), après le codage CRC, on peut, soit suivre un traitement identique à la chaîne de transmission classique du DVB-S (cf. 2.2.3), soit remplacer la chaîne codage Reed-Solomon, entrelacement et codage convolutif par du turbo-code [17].

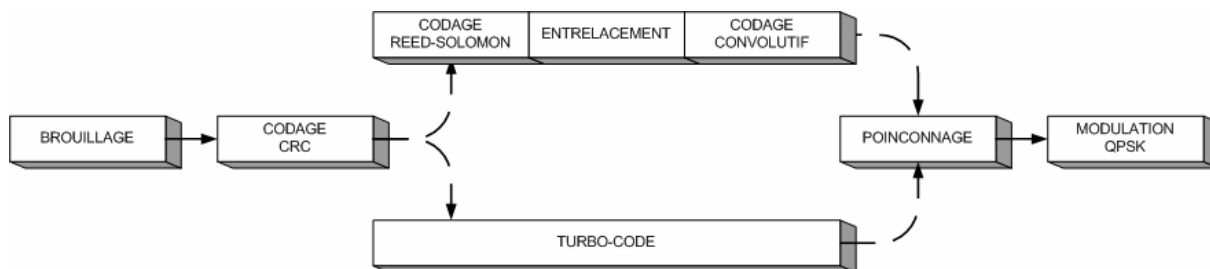


Figure 2.12 Aperçu de la chaîne de codage du DVB-RCS

Il faut toutefois noter que la tendance générale est à l'utilisation des turbo-codes dans le DVB-RCS. Ces codes plus complexes que le codage convolutif en treillis, sont aussi beaucoup plus performants [18].

#### 2.4.4. Méthode d'accès

La méthode d'accès du système DVB-RCS est plus complexe que celle du DVB-S, puisque le DVB-S n'a pas vocation à partager sa bande passante entre beaucoup de *gateways*. En effet, il faut rappeler que le DVB-RCS a une vocation d'interactivité, et doit permettre ainsi à un grand nombre de terminaux d'avoir accès au système. Un partage des ressources fixe et constant n'est donc pas viable.

Pour cela, chaque terminal envoie des messages au NCC (Network Control Centre) permettant de fixer et de garantir certains aspects de la qualité du service (débit, gigue, temps de transfert.....etc.)

Dans cette partie nous proposons un aperçu des messages DVB-RCS, de la signalisation spécifique et des différentes méthodes d'accès qui prennent appui sur ces derniers.

##### 2.4.4.1. La signalisation sur la voie aller

La gestion du réseau interactif est en grande partie prise en charge par le lien aller DVB-S, la signalisation FLS (Forward Link Signalling). Cette signalisation est fondée sur trois points :

- de nouvelles tables SI,
- des messages spécifiques appelés TIM (Terminal Information Message),
- les informations PCR (Program Clock Reference), déjà utilisées dans de DVB-S.

Ces messages sont tous encapsulés en utilisant le *section-packing* utilisé pour les tables SI en DVB-S. La plupart sont d'ailleurs générés par le NCC et insérés au niveau de la *gateway*, comme peut l'être une table PAT.

Les nouvelles tables SI sont :

- CMT (Correction Map Table) : Cette table permet aux terminaux de corriger leurs temps, fréquences et puissances pour leurs prochaines émissions. Elle est calculée par le NCC, ou par le système bord dans le cadre d'une intelligence embarquée.
- FCT (Frame Composition Table) : cette table définit le nombre et le type de *time slots* contenus dans une trame. Elle est émise par le NCC.
- RMT (Rcs Map Table) : cette table indique au terminal comment se positionner sur le multiplexe descendant de son fournisseur d'accès au réseau. Cette table est émise par l'opérateur satellite, et son PID est indiqué par la table NIT.
- SCT (Supertrame Composition Table) : cette table découpe la capacité du satellite en *supertrames*, indiquant l'heure de démarrage, la fréquence centrale, la durée ainsi que le nombre de trames qui la composent. Cette table est émise par le NCC et son PID est renseigné dans la table PMT.
- SPT (Satellite Position Table) : Cette table est transmise sur chacun des multiplexes et indique la position du (ou des) satellite(s). Cette table est sous la responsabilité de l'opérateur satellite.
- TBTP (Terminal Burst Time Plan) : cette table attribue les différents *time slots* aux différents terminaux, en faisant la relation entre les numéros des *time slots* et les identifiants logiques des terminaux. Cette table est émise par le NCC et est indispensable pour qu'un terminal puisse utiliser les *time slots* qui lui sont attribués. Le TBTP informe donc les terminaux de la capacité réelle qui leur est allouée.
- TCT (Time slot Composition Table) : cette table décrit le type de *burst* contenu dans chaque *time slot* (CSC, ACQ, SYNC ou TRF), le taux de codage, *etc...* Cette table fixe aussi le préambule ; elle est émise par le NCC.

Les messages TIM ne sont pas vraiment des tables de signalisation dans la mesure où il s'agit de messages privés envoyés vers un groupe ou un seul terminal par un organisme de contrôle du système. Ces messages peuvent contenir des informations diverses, comme la réponse d'un NCC à une demande d'ouverture de connexion, les identifiants d'un terminal, des attributions de *time-slots* pour un court temps, des informations sur le réseau...

Pour éviter une dérive des fréquences, et donc des collisions, les messages PCR sont générés, permettant l'asservissement des oscillateurs des terminaux. Ces messages sont diffusés avec une périodicité de 5 à 100 ms et leur PID est indiqué dans la table PMT.

#### 2.4.4.2. La signalisation sur la voie retour

La signalisation sur la voie retour est effectuée via des *bursts*. En effet nous avons vu précédemment (cf. partie 2.4.2) que les données étaient envoyées sous forme de *bursts*, appelés *bursts* de trafic (TRF). Toutefois, d'autres *bursts* sont utilisés par la technologie DVB-RCS :

- Le *burst* CSC (Common Signalling Channel) : ce *burst* permet aux terminaux de s'identifier durant la phase de login. Il comporte des champs tels que l'adresse MAC du terminal (IEEE 802.11) ou bien les capacités du terminal ;
- Le *burst* ACQ (ACQuisition) : il sert à la synchronisation ;
- Le *burst* SYNC (SYNChronisation) : ce *burst* est utilisé pour maintenir la synchronisation et envoyer des informations de contrôle tant que le terminal est connecté. Ce *burst* contient un champ SAC (Satellite Access Control).

A partir de ces messages, la signalisation sur la voie retour peut être gérée selon deux méthodes :

- la méthode SAC (Satellite Access Control) qui utilise le champ optionnel des *bursts* de trafic et les *bursts* SYNC et utilise les *slots* SYNC comme un canal à contention pour les requêtes d'allocation,
- la méthode DULM (Data Unit Labelling Method) qui crée des circuits virtuels.

#### 2.4.4.3. Le partage de la ressource

Le mode d'accès TDMA (Time Division Multiple Access), utilisé parfois pour la voie aller (dans le cadre d'une charge utile régénérative), pose problème sur la voie retour. En effet, pour la voie aller, il y a le plus souvent une seule *gateway* qui se contente de découper sa bande allouée entre différents groupes d'utilisateurs, tandis que dans le cadre de la voie retour, un grand nombre de terminaux veulent se partager le même canal. Aussi le TDMA ne suffit pas à éviter les collisions entre les différents *bursts* des terminaux actifs.

Le mode d'accès utilisé pour la voie retour est alors le mode MF-TDMA qui utilise un découpage de la bande allouée en *supertrames*. A chaque groupe de terminaux une *supertrame* est allouée et celle-ci est elle-même découpée en trames. Chaque trame est constituée d'un ensemble de *time-slots*, chacun dédié à la transmission d'un *burst* précis. La figure suivante (Figure 2.13) présente ce découpage.

Il existe deux types de partage MF-TDMA de la bande passante : un mode statique et un mode dynamique. La méthode statique utilise des *time-slots* de même durée et de codage identique. Il suffit alors des informations sur un seul *time-slot* pour que le terminal puisse émettre, donc d'un seul message TIM. Cette technique réduit grandement les temps d'attente d'émission sur le média et les messages à envoyer (notamment les TCI). Plus complexe, la méthode dynamique se construit sur des *time-slots* de taille variable, permettant une meilleure flexibilité, et donnant à la NCC la possibilité d'attribuer plus ou moins de grands *time-slots*, en fonction de l'allure du trafic. Toutefois cette méthode demande plus de calculs de la part de la NCC (elle doit transmettre les informations de chaque *time-slot*), ce qui risque de dégrader le temps d'accès au support.

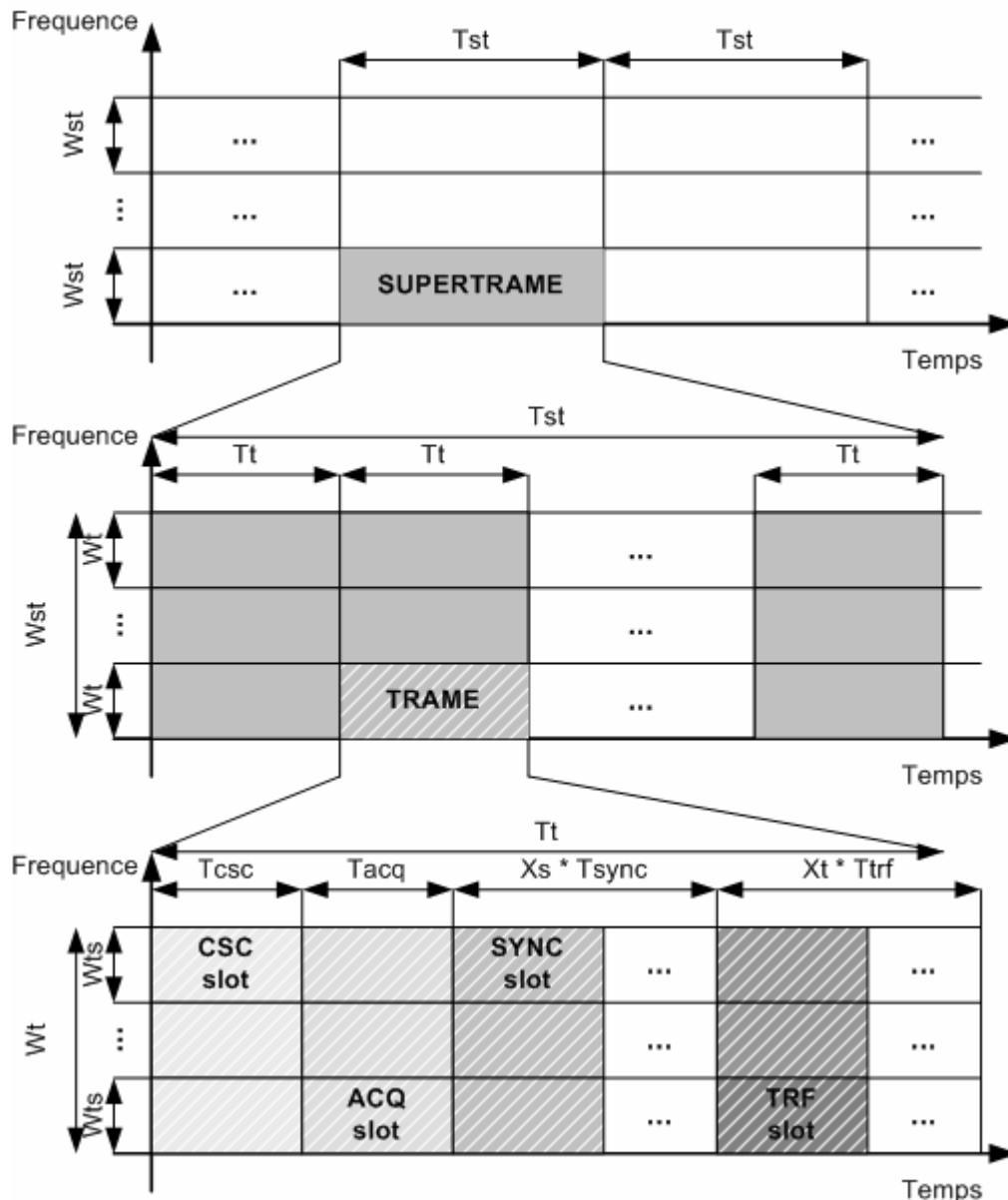


Figure 2.13 Segmentation de la bande allouée à la voie retour en *superframes*, *trames* et *time-slots*

La méthode d'allocation de ressources peut être de plusieurs types. Nous en présentons deux ici. L'accès au support peut être fixé pour toute la durée d'une communication, allouant à un terminal ou à un groupe d'utilisateurs une partie fixe de la bande passante. Les méthodes de ce type sont souvent gérées par la fonction CAC (Connection Admission Control). La bande passante pour une communication peut aussi être attribuée dynamiquement, permettant ainsi de s'adapter au trafic, et d'optimiser l'utilisation de la capacité satellite. Ces méthodes, appelées DAMA (Demand Assignment Multiple Access), sont toutefois plus complexes à mettre en œuvre et introduisent un temps d'accès au support variable et complexe à modéliser.

## 2.5. Conclusion

Ce chapitre offre une vision d'ensemble de la norme DVB et de sa mise en œuvre dans le cadre satellite. C'est pour cette raison qu'il est relativement court.

Il s'agissait ici de familiariser le lecteur avec les systèmes satellite DVB pour pouvoir aborder ensuite pleinement le déploiement d'IP dans ce contexte. Le niveau de détail a donc été

porté en priorité sur les aspects de niveau 2, à savoir l'accès et l'encapsulation sur lesquels nous allons revenir plus en détail dans la partie suivante.

## 3. LE SATELLITE COMME SUPPORT D'IP

Après la présentation de la norme DVB-S, largement utilisée actuellement, un axe central de peut être abordé : le satellite comme support d'IP.

L'utilisation du satellite comme support d'IP date du début des années 90 : plusieurs études ont été menées en utilisant la technologie ATM [19] [20]. ATM a ainsi laissé sa marque dans les réseaux satellites, mais ce n'est pas pour autant un frein pour le support d'IP. Toutefois les solutions actuelles ne sont qu'en partie satisfaisantes, ouvrant la voie à la recherche sur le domaine, notamment avec les perspectives offertes par la norme DVB. Ces dernières années (2003-2004) ont vu un grand nombre de projets donner de nouveaux éléments, et les années à venir (2005-2006) devraient voir l'aboutissement de beaucoup de projets orchestrés par l'ESA, le CNES ou encore ALCATEL.

Cette partie propose une étude du satellite géostationnaire comme support d'IP. Après un aperçu dans la section 3.1 des techniques passées (années 90) et de leurs inconvénients, l'attention est portée sur le DVB-S et son adéquation au support d'IP (section 3.2). Les points forts de cette technique tout comme ses défauts sont soulignés. Si le standard DVB-RCS apporte quelques réponses à ces difficultés, notamment en terme d'interactivité, des problèmes persistent comme nous pourrons le remarquer avec la section 3.3. Dans un quatrième temps, le cœur de la problématique de notre travail est traité avec la nouvelle donne proposée par les perspectives actuelles du satellite GEO comme support d'IP (section 3.4). Toutefois, au-delà des problèmes technologiques et des différentes solutions, un autre problème fondamental réside dans l'adéquation du satellite au protocole TCP (Transmission Control Protocol). Nous observerons ces problèmes comme les solutions dans la section 3.5, avant de conclure cette partie sur un besoin architectural que nous proposerons d'aborder par la suite (section 3.6).

### ***3.1. L'état de l'art et les obstacles à l'implantation d'IP sur Satellite***

IP sur satellite, ou plus généralement le transfert de données sur satellite, est un axe de recherche qui a pris de l'ampleur dans les années 90. À cette époque, le satellite privilégie les solutions ATM. Avec l'essor prévu alors pour cette technologie, le satellite est envisagé pour interconnecter des réseaux et l'ATM est choisi dans le début des années 90 comme support d'intégration des services haut débit sur satellite [21]. Plusieurs projets [22] sont alors organisés autour de cette thématique avec COMSAT et la NASA aux USA, les programmes COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research), RACE (Research and technology development in Advanced Communications technologies in Europe) et ACTS (Advanced Communication Technologies and Services) en Europe [21]. Ces programmes proposent un grand nombre de solutions, interconnectant des réseaux ATM par satellite mais aussi utilisant ATM comme support d'IP sur satellite.

Les VSAT (Very Small Aperture Terminal) [23] jouent alors un rôle fondamental, car quelle que soit la technologie physique utilisée, les VSAT offrent une interconnexion bidirectionnelle avec les utilisateurs finals. Un VSAT est un terminal lié à un GEO muni d'une petite antenne (1.2 m à 2.8 m de diamètre). Compte tenu de son prix souvent élevé (même en location), le VSAT est, la plupart du temps, utilisé comme tête de pont d'un réseau (interconnexion agences bancaires,



VPN, etc...). Cette technologie est apparue dans les années 70, et a pris son envol entre 1998 et 1999 avec un développement de près de 400% (de 60000 installations à 300000).

Cependant, la spécificité et la nature propriétaire de ces systèmes conduisent à un milieu hétérogène où les comparaisons approfondies deviennent délicates. Ces problèmes de standardisation [24] conduisent à des solutions au cas par cas et entraînent alors un problème de coût technologique : les équipements étant spécifiques, leur coût est rédhibitoire, freinant ainsi l'expansion d'une solution par rapport à une autre [25]. Si ces technologies ont su trouver parfois leur place, notamment dans le cadre de l'interconnexion commerciale, l'hétérogénéité des protocoles reste un obstacle majeur, surtout au niveau du coût et de l'adaptabilité des systèmes aux technologies à venir : satellite avec routage, IPv6, etc... De plus les méthodes d'accès des systèmes de type VSAT sont de type ALOHA, limitant fortement la bande passante utile pour les utilisateurs (64 Kb/s) [26].

Dans ce cadre, le développement massif des satellites DVB propose une solution partielle à ce problème, avec un standard uniforme au moins au niveau 1 et une marge d'adaptabilité élevée. Les méthodes d'accès dans les systèmes DVB-RCS posent toutefois problème, conduisant à plusieurs recherches dans le domaine.

### 3.2. Le DVB-S comme support d'IP

Le DVB-S a été conçu avec la possibilité de véhiculer des données autres que des flux multimédia. Cette notion ouverte de la norme ainsi que sa large diffusion dans le monde satellite (cf. 2.2) font d'elle un support de choix pour l'IP. D'ailleurs, un grand nombre de projets a étudié et étudie encore cette hypothèse [27][28][29][30], et des offres commerciales tout public commencent timidement leur entrée depuis les années 2000 en Europe [31].

Cette partie s'attarde sur la façon dont le DVB-S peut être utilisé pour véhiculer des datagrammes, afin de souligner les différentes techniques utilisées et ainsi de pouvoir mieux comprendre les points qui restent encore problématiques.

#### 3.2.1. Étude de l'encapsulation IP

Lorsqu'un datagramme IP doit être acheminé via un système satellite, une entité de niveau 3 doit être présente en bordure du système pour formater et multiplexer le datagramme dans le trafic satellite, le trafic MPEG-2 TS. Cette partie aborde donc les différentes méthodes envisagées par la norme DVB pour encapsuler et ensuite multiplexer des données dans un flux MPEG-2 TS.

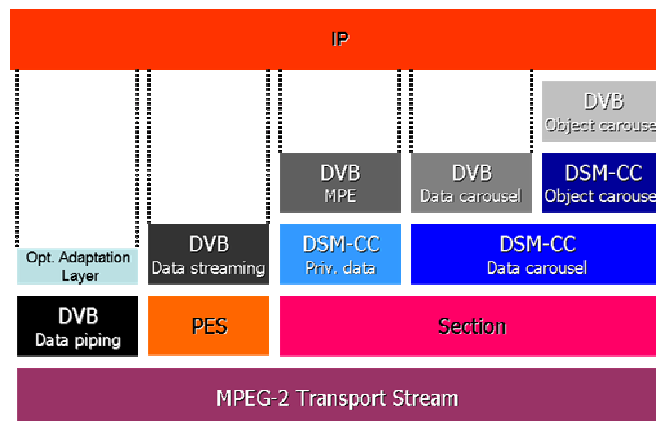


Figure 3.1 Cinq méthodes de multiplexage de données dans la couche MPEG-2 TS

La norme DVB prévoit six méthodes d'encapsulation [32]. Parmi elles, la méthode privée laisse l'initiative totale sur le choix d'encapsulation et d'implantation à condition que les datagrammes soient au final encapsulés dans les paquets MPEG-2 TS. Toutefois, ce type de

méthode peut s'inscrire dans une démarche de normalisation seulement si elle est envisagée pour un système global comme par exemple dans le cadre des travaux du groupe IP sur DVB [33]. Une méthode spécifique à un système donné ne présente aucun intérêt si elle n'est pas réutilisable, et contraint le système à rester en marge des autres, sans la possibilité d'une interconnexion directe.

Les cinq autres méthodes proposées par la norme DVB sont illustrées dans la figure ci-dessus (Figure 3.1), et sont détaillées dans les parties suivantes, en insistant sur l'encapsulation recommandée par la norme, la méthode MPE (Multi Protocol Encapsulation).

### 3.2.1.1. Le data-piping

Le *data-piping* est souvent proche de la méthode privée, puisque sa seule contrainte est l'encapsulation des données comme s'il s'agissait de PES. Le reste (découpage, réassemblage...) reste à la discrétion du développeur. Comme l'illustre la figure suivante (Figure 3.2), le *data-piping* reproduit l'encapsulation des PES dans le flux MPEG-2 TS, et utilise notamment le bourrage vu précédemment. Pour le reste, à savoir l'en-tête, un code correcteur ou encore le réassemblage, la méthode reste de type privé. Cette technique est souvent employée pour l'encapsulation d'IP (les propositions du groupe IP sur DVB sont de ce type [33]). On la considère le plus souvent comme la méthode privée (présentée précédemment), et donc son nom est généralisé à toutes les techniques privées, incluant alors une encapsulation possible sans bourrage.

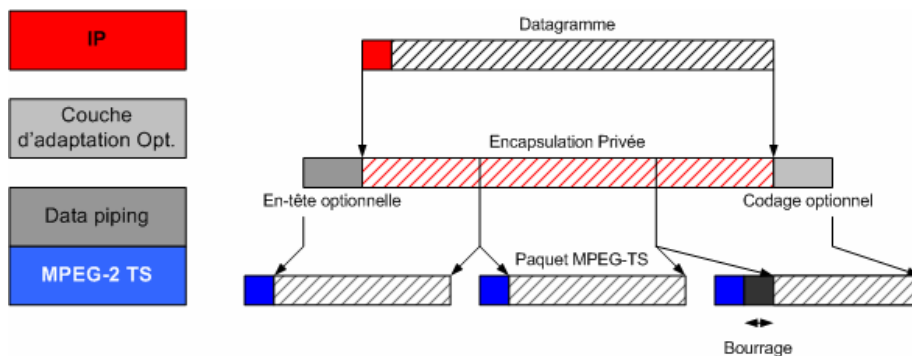


Figure 3.2 Exemple d'encapsulation d'un datagramme par *data-piping*

### 3.2.1.2. Le data-streaming

Le *data-streaming* considère les données comme un flux continu, comparable à un flux vidéo ou audio. Ainsi ce flux de données est segmenté en PES et ensuite encapsulé comme tout PES dans les paquets MPEG-2 TS. Cette encapsulation peut être faite de manière synchrone, synchronisée à d'autres PES (en utilisant le PCR) ou asynchrone (ce qui est le cas de données Internet). Ce mécanisme est illustré ci-dessous (Figure 3.3) mais est peu adapté au transport de flux IP, dans la mesure où les datagrammes forment rarement un flux continu de données.

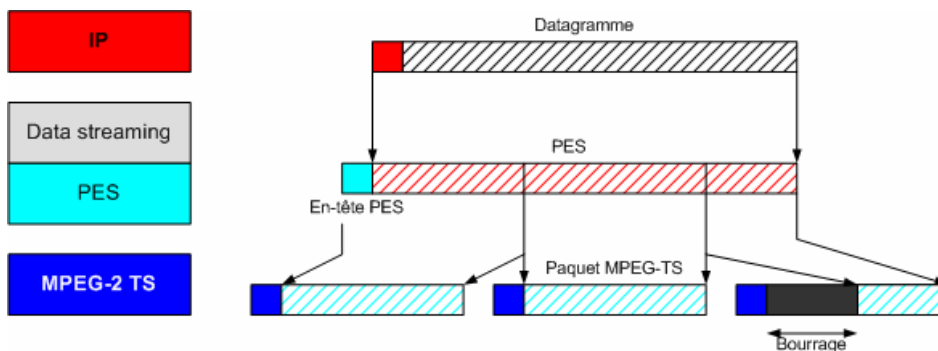


Figure 3.3 Exemple d'encapsulation d'un datagramme par *data-streaming*

### 3.2.1.3. Le data-carousel et l'object-carousel

Le *data-carousel* et l'*object-carousel* sont des techniques d'encapsulation et de multiplexage très proches. La couche *data-carousel* utilise un *buffer* pour stocker les données à émettre. Ces données sont ensuite vidées cycliquement (peu importe leur type). Cette transmission périodique est utilisée notamment dans la transmission des tables de programmes, les EPG. Le *data-carousel* utilise les mêmes techniques que MPE pour l'encapsulation (le DSM-CC). Toutefois, les sections utilisées sont de taille fixe.

L'*object-carousel* est très semblable au *data-carousel*. Reposant sur le DSM-CC, il est utilisé pour envoyer de manière cyclique des données liées à des services. Ces données peuvent être liées au temps grâce au *stream event*.

### 3.2.1.4. Le Multi Protocol Encapsulation (MPE)

Parmi les différentes méthodes d'encapsulation proposées par le DVB, MPE est celle que la norme retient et recommande pour les flux IP [11] [14]. MPE est la méthode utilisée par MPEG-2 et DVB pour encapsuler les tables de services. Ce protocole s'appuie sur le DSM-CC (Digital Storage Media Command and Control) pour opérer. Cette utilisation est définie dans la partie 6 de la norme MPEG-2 [4] et met en place une connexion client/serveur. MPE utilise cette extension de MPEG-2 pour encapsuler les datagrammes IP en émulant un LAN.

Le datagramme IP, une fois à la *gateway*, est traité par le niveau IP de celle-ci. Envoyé au niveau MPE, il est alors encapsulé dans une section privée appelée une section datagramme (ou section adressable dans la norme ATSC). La section a une taille variable avec une MTU de 4080 octets. Cette opération est illustrée dans la figure suivante (Figure 3.4). On peut noter que la couche MPE ne fait pas la fragmentation de la donnée, et c'est le niveau réseau qui doit fragmenter le datagramme IP si la taille de ce dernier est supérieure à la MTU d'une section. MPE ajoute un en-tête de 12 octets à chaque fragment de datagramme. Cet en-tête est appelé un *pointer-field*. Enfin un CRC de 4 octets est apposé à la fin de la section. Il faut toutefois remarquer que l'en-tête peut aussi contenir des champs optionnels et notamment le champ LLC-SNAP conforme à la norme ISO/IEEE pour les LAN/MAN. Cet ajout de 8 octets supplémentaires alourdit certes l'*overhead* du paquet, mais permet de faire directement du bridge Ethernet, en encapsulant des trames Ethernet. Dans un cadre IP classique, cette option n'est pas nécessaire.

Une fois sous forme de sections, les fragments sont encapsulés et multiplexés dans des paquets MPEG-2 TS. Cela peut être fait avec ou sans bourrage. Le mode sans bourrage est plus couramment nommé l'option *section-packing*.

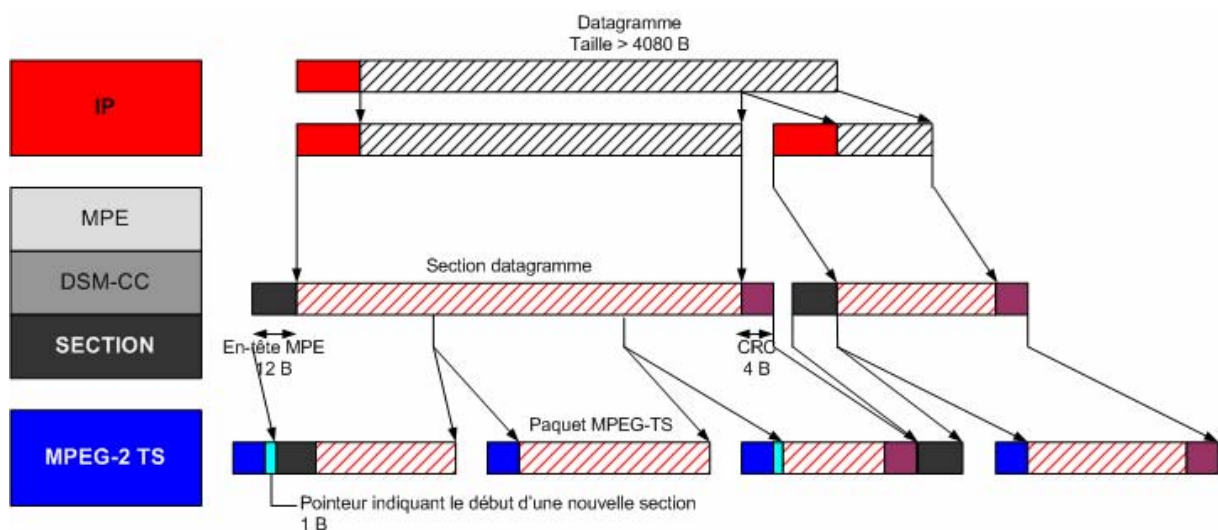


Figure 3.4 Exemple d'encapsulation d'un datagramme par MPE

L'introduction du pointeur de 1 octet pour renseigner sur le début de la prochaine section utilise le champ PUSI de l'en-tête obligatoire MPE (Figure 3.7). Ce *flag*, s'il est utilisé en accord avec la norme indique la présence d'un champ optionnel suivant l'en-tête. Nommé *adaptation-field*, ce champ est composé ici de 4 octets supplémentaires, dont 1 octet (le dernier) est le champ pointeur, indiquant le début de la nouvelle section (Figure 3.5). Toutefois parmi ces quatre octets optionnels, seul le champ pointeur est rigoureusement nécessaire. Ainsi, il est envisageable, en contournant légèrement la norme MPEG-2 TS, d'implanter uniquement l'ajout d'un unique octet, le champ pointeur, et ainsi de changer la signification du champ PUSI. Dans le cadre de cette modification, le flag PUSI indique la présence directe d'un unique pointeur juste après l'en-tête obligatoire MPEG-2 TS. Cette utilisation rend toutefois incompatible le champ PUSI avec un champ d'adaptation classique. Cette solution n'est donc pas totalement conforme à la norme, mais apporte un allègement à l'encapsulation.

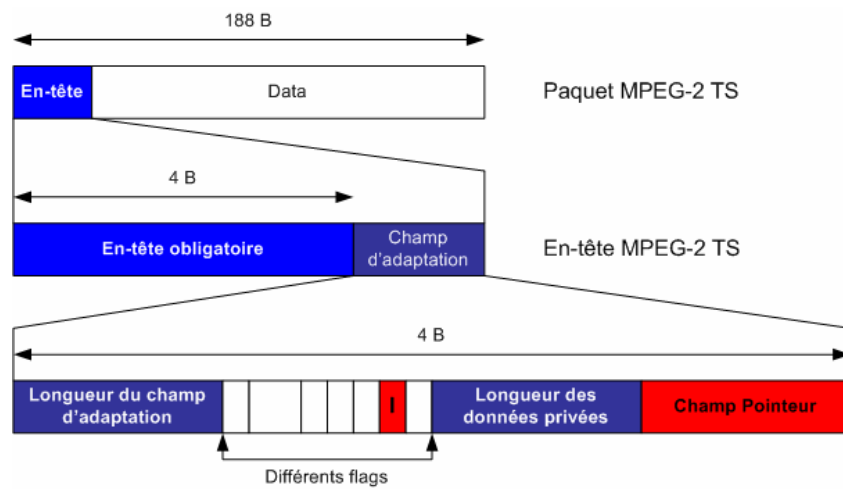


Figure 3.5 Insertion du champ pointeur dans le champ d'adaptation MPEG-2 TS

L'encapsulation avec bourrage économise ce pointeur associé au début d'une nouvelle section (et les 3 autres octets de champ optionnel supplémentaire dans le cas d'une implantation rigoureuse). Cependant, le gain peut s'avérer faible s'il est comparé aux octets perdus par le bourrage. Le *section-packing* propose un rendement équivalent à une encapsulation classique IP sur Ethernet, comme le montre le graphique suivant (Figure 3.6).

En effet si l'on note  $s$  la taille du datagramme en octets et  $T_E(s)$  la taille de la trame Ethernet en octets encapsulant ce datagramme. Puisque la taille minimale d'une trame Ethernet est de 72 octets, on obtient la formule suivante (1), avec 22 octets d'en-tête et 4 octets de CRC (IEEE 802.3) :

$$(1) \quad T_E(s) = \max(72, s + 26)$$

De même lorsqu'il s'agit de la taille MPEG-2 TS générée par le même datagramme de taille  $s$ , l'on trouve trois valeurs possibles :  $T_{MB}$  qui est la taille avec bourrage (2),  $T_{MP}$  la taille avec *section-packing* (3), et  $T_{MPA}$  la taille avec *section-packing* réduite à un seul octet supplémentaire (4).  $T_{MB}$  est obtenu en calculant le nombre de paquets MPEG-2 TS requis pour contenir le datagramme. Comme il y a du bourrage, c'est un nombre entier, donc une partie entière supérieure qui est obtenue. Pour le *section-packing*, il faut prendre en compte le pointeur, mais seulement une fraction du dernier paquet est utilisée pour la donnée. Il faut noter que ces calculs sont effectués dans un cadre où les données arrivent à un rythme suffisant pour permettre d'éviter le bourrage dans le cadre du *section-packing*.

$$(2) \quad T_{MB}(s) = \lceil (s+16)/184 \rceil \cdot 188$$

$$(3) \quad T_{MP}(s) = ((s+16+4)/184) \cdot 188$$

$$(4) \quad T_{MPA}(s) = ((s+16+1)/184) \cdot 188$$

On obtient en faisant les rapports  $T_{MB}$  sur  $T_E$ ,  $T_{MP}$  sur  $T_E$  et  $T_{MPA}$  sur  $T_E$  la courbe ci-dessous (Figure 3.6). Cette courbe montre alors les bonnes performances du *section-packing* avec MPE, permettant d'obtenir un rendement voisin d'une encapsulation Ethernet.

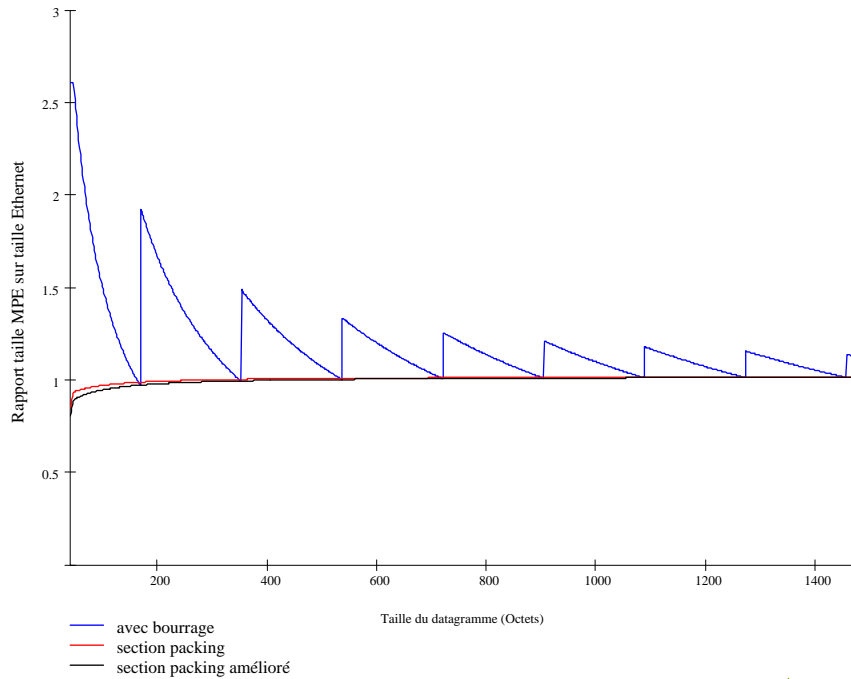


Figure 3.6 Comparaison des tailles des données une fois encapsulées avec MPE et Ethernet

Pour terminer l'étude de MPE, son en-tête, appelé le *pointer-field*, est décrit ici. Cet en-tête est composé des champs obligatoires suivants (Figure 3.7) [4] [6] :

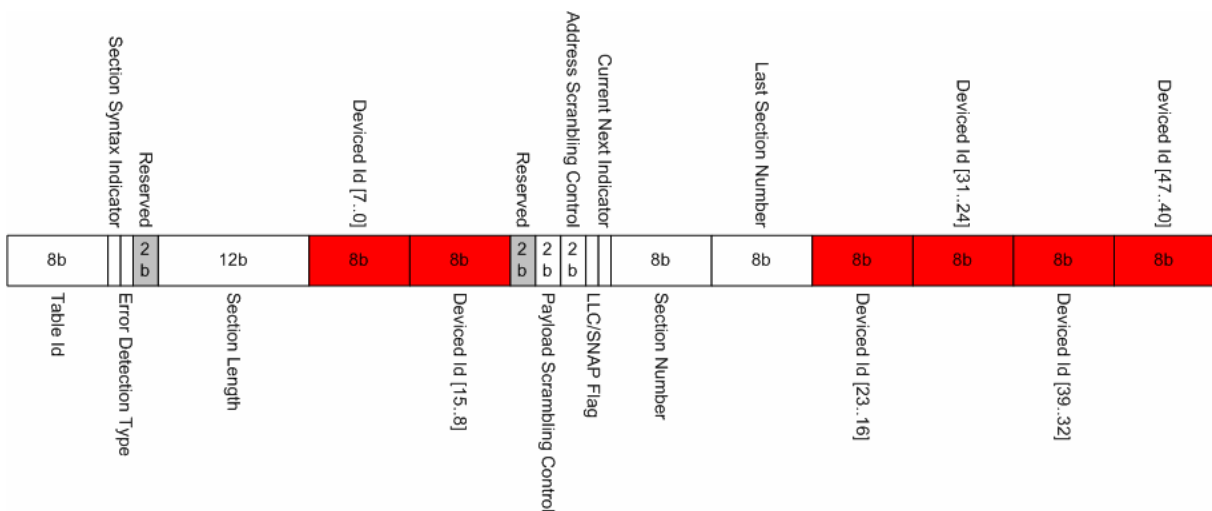


Figure 3.7 Champs obligatoires de l'en-tête d'une section datagramme (12 octets)

- Table\_Id : ce champ d'un octet prend la valeur 0x3F, désignant ainsi une section datagramme.
- Section\_Syntax\_Indicator : cet indicateur est fixé à zéro (selon l'annexe A de [11])
- Error\_Detection\_Type : ce drapeau d'un bit mis à la valeur '1' indique l'utilisation du *checksum*, la valeur '0' indiquant l'utilisation d'un CRC\_32.
- Reserved : ce champ de 2 bits est fixé à '11' et est réservé à des utilisations futures.
- Section\_Length : il s'agit de la taille de la section codée sur 12 bits.
- Device\_Id : ce champ est composé de 48 bits divisés en 6 parties de 8 bits chacune. Il s'agit de l'adresse du destinataire. C'est une adresse MAC conforme à la norme ISO/IEEE et celle-ci est réordonnée selon la figure (Figure 3.8).
- Payload\_Scrambling\_Control : ce champ de 2 bits définit le mode de cryptage de la charge utile de la section. La méthode de cryptage utilisée est de type privé.
- Address\_Scrambling\_Control : ce champ de 2 bits définit le mode de cryptage du device\_Id de cette section. La méthode de cryptage utilisée est de type privé.
- LLCSNAP\_Flag : cet indicateur de 1 bit, indique s'il est fixé à '1', que la charge utile transporte un datagramme encapsulé avec LLC/SNAP. Cet en-tête optionnel est placé sur 8 octets supplémentaires juste après le device\_Id [47..40].
- Current\_Next\_Indicator : ce bit est fixé à '1' pour les sections adressables DSM-CC.
- Section\_Number : ce champ d'un octet correspond au numéro de la section, incrémenté de un à chaque nouvelle section d'un même flux.
- Last\_Section : ce champ d'un octet correspond au numéro de la dernière section, c'est-à-dire le numéro le plus grand pour une section de cette table.

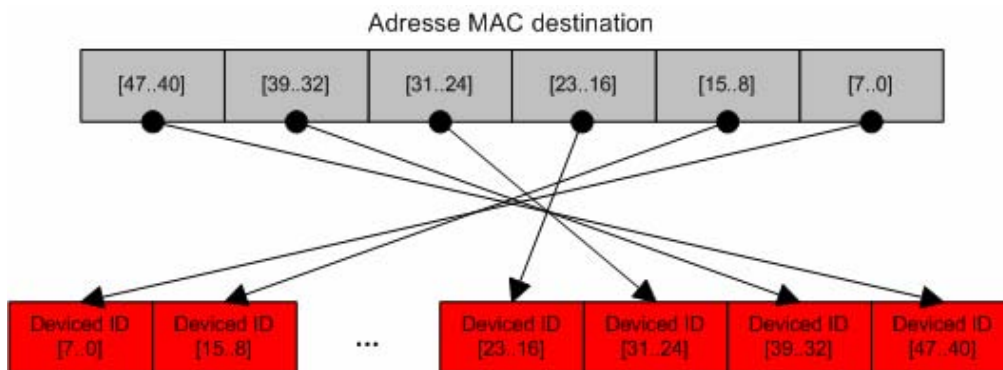


Figure 3.8 Découpage de l'adresse MAC destination dans les champs Device\_Id de la section

Ces techniques décrites, leur utilisation va être observée, à travers un exemple.

### 3.2.2. Architecture d'étude

Cette partie propose une vision d'ensemble des systèmes DVB-S comme support d'IP. Cette architecture d'étude est un cas classique d'IP sur DVB-S.

#### 3.2.2.1. Une vision d'ensemble de l'architecture

Cette structure satellite classique s'appuie sur une liaison DVB-S unidirectionnelle. Le lien DVB-S inonde les terminaux du système via un satellite monofaisceau et transparent (sans intelligence à bord). Le satellite est donc assimilable à un *hub* spatial qui répète et amplifie le signal vers le sol dans une couverture équivalente à 1/3 à 1/4 de la surface du globe.

Si le lien aller utilise le DVB-S, dans la plupart des cas, il n'est pas envisageable que la voie retour repose sur cette même technologie. En effet, d'une part le coût d'une *gateway* par utilisateur, ou même par regroupement d'abonnés, reste prohibitif, et d'autre part le système DVB-S ne peut fonctionner pour un grand nombre de *gateways*. Le lien retour doit utiliser une autre technologie, et le plus simple apparaît comme un retour terrestre. L'accès Internet via satellite est donc traditionnellement accompagné d'une voie de retour terrestre fondée sur la technologie en place, le RTC (Réseau Téléphonique Commuté). C'est pour ce type de configuration asymétrique que le protocole UDLR a été créé [15]. La figure suivante présente alors cette architecture (Figure 3.9) dans le cadre d'un service d'accès à Internet, et nous reviendrons plus en détail dans la partie suivante sur les piles de protocoles mises en jeu.

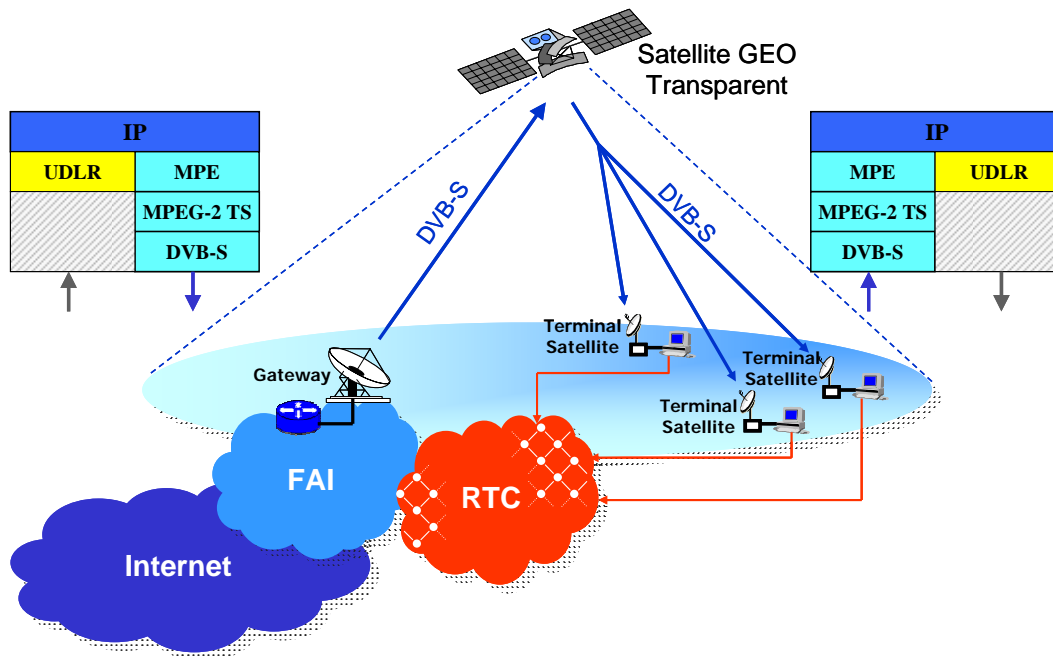


Figure 3.9 Architecture classique IP sur DVB-S comme accès à Internet

Ce type d'architecture est adapté aux applications diffusées et quasi unidirectionnelles comme le *caching*, le *pushing*, ou la VoD.

Un tel système est généralement contrôlé et géré par un NCC (Network Control Centre) et un MNMC (Mission and Network Management Centre). Ces éléments ne sont toutefois pas représentés sur la figure ci-dessus, et peuvent être incorporés à une *gateway*.

Ce système fonctionne en bande Ku avec un C/N de 6.9 dB [34]. Les terminaux sont équipés de petites paraboles (60 cm de diamètre) et la *gateway* dispose d'une antenne de quelques mètres de diamètre (3 à 6 mètres). A l'émission on dispose d'un débit utile par canal de 38 Mbits/s pour un FEC de  $\frac{3}{4}$ . Une *gateway* peut ainsi être équipée de plusieurs transpondeurs et émettre ainsi à plus fort débit sur différents canaux. Toutefois, il faut noter qu'un équipement uniquement dédié au transport de datagrammes n'est pas courant, et l'offre IP doit le plus souvent partager la bande passante avec d'autres services tels que la télévision numérique, les radios ou les services de NVoD (Near Video on Demand) directes sur DVB.

### 3.2.2.2. Les couches protocolaires

Les couches protocolaires mises en œuvre se retrouvent dans la *gateway* et les terminaux, puisque l'un émet en DVB-S et l'autre reçoit. La figure suivante (Figure 3.10) présente la mise en œuvre de l'UDLR sur cette architecture via une connexion PPP sur RTC comme voie retour.

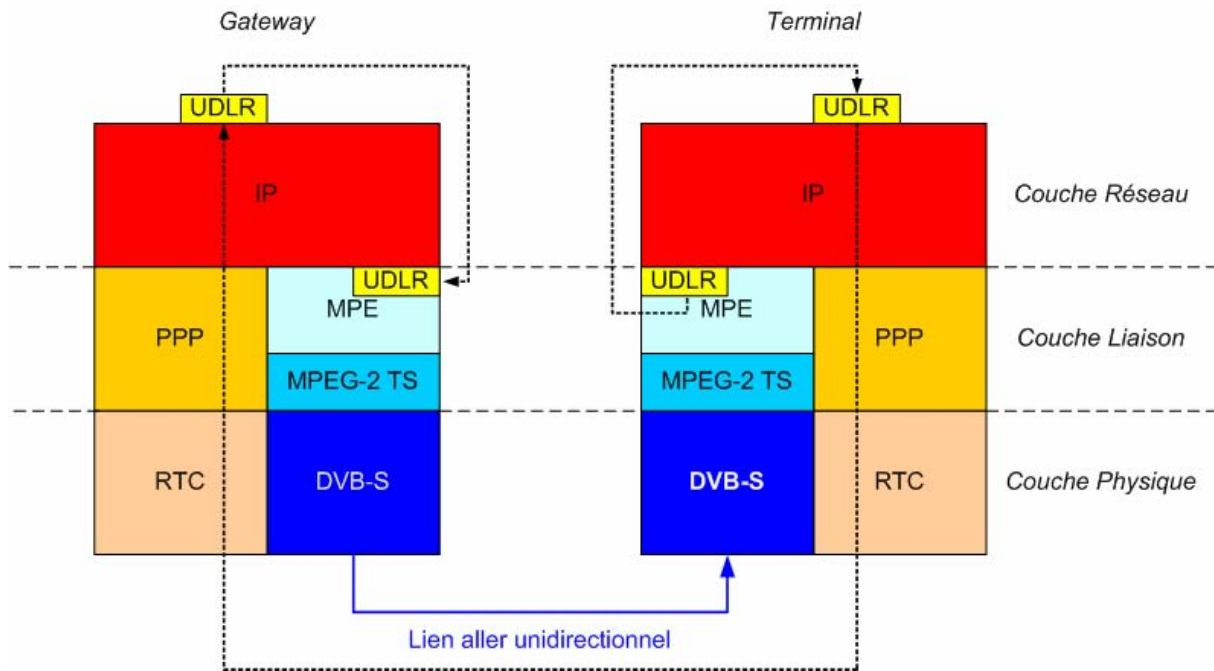


Figure 3.10 Couches protocolaires entre une *gateway* et un terminal mettant en jeu un lien retour terrestre

L'illustration propose un aperçu des différents niveaux de protocoles qui entrent en jeu dans une communication entre une *gateway* (ou un agent routeur du FAI) et le terminal utilisateur connecté au système DVB-S. Le protocole UDLR n'intervient ici que sur le lien retour : les datagrammes à destination de l'interface air sont traités par la couche IP comme si cette interface était bidirectionnelle. C'est la couche UDLR qui intercepte le datagramme et l'encapsule via GRE (Generic Routing Encapsulation) dans un nouveau datagramme, émis cette fois-ci sur l'interface du réseau terrestre. A la réception du datagramme, le traitement est effectué jusqu'au niveau IP. Le protocole GRE restitue le datagramme original au niveau 3 comme s'il provenait de la couche MPE. Si cette solution rajoute tout de même de l'overhead en encapsulant des datagrammes dans des datagrammes, elle a l'énorme mérite d'être transparente pour l'utilisateur et donc le niveau transport et applicatif.

### 3.2.2.3. La signalisation du trafic

La signalisation du trafic IP n'est pas une mince affaire et soulève un grand nombre de problèmes, questions que se posent en commun industriels et chercheurs dans un groupe de travail de l'IETF, IP sur DVB [33]. En effet la résolution d'adresse (AR), élément clef de la signalisation du trafic IP sur satellite n'est pas une tâche aisée puisqu'elle n'est ni réglementée ni associée à une couche protocolaire. Pourtant, il est certain qu'il faut faire le lien entre l'adresse IPv4 (IPv6), l'adresse MAC utilisée dans MPE et le PID des paquets MPEG-2 TS.

Dans ce cadre un certain nombre de méthodes ont vu le jour [35] : des méthodes statiques privées ou des méthodes dynamiques comme la méthode MMT (Multicast Map Table) que nous avons utilisée dans DIPCAST [28], ou encore la méthode AIT (Application Information Table) utilisée dans MHP (Multimedia Home Platform) [36].

Les méthodes statiques présentent une solution simple mais coûteuse pour le niveau 3. Ces solutions de type privé proposent d'utiliser un seul PID pour contenir tout le trafic IP. Aussi, toutes les données sont contenues dans le même TS et le filtrage doit être fait au niveau IP ou MPE (ou équivalent). Cela implique donc que toutes les stations intéressées par le trafic IP doivent écouter et recevoir cet unique TS.



Les méthodes dynamiques utilisent la signalisation SI, des tables privées ou des protocoles spécifiques. Ces tables permettent ainsi d'indiquer le PID correspondant à une adresse IP ou un groupe d'adresses IP. La norme DVB propose une solution générale utilisant cette méthode par le biais de la table INT (IP/MAC Notification Table) [14]. Cette solution n'est en rien obligatoire et a été proposée après le protocole MPE. Tout comme la méthode MPE est recommandée par la norme, la signalisation via les tables INT est aussi conseillée.

La solution INT propose un mécanisme pour véhiculer les localisations dans un réseau DVB des différents flux contenant des datagrammes (ou des trames Ethernet). Elle s'appuie sur trois notions principales :

- La plateforme IP/MAC (IP/MAC platform) : identifiée par son *platform\_id*, elle regroupe des flux IP/MAC et/ou des récepteurs. Il s'agit d'un espace d'adressage sans conflit qui peut cohabiter avec d'autres plateformes sur le même multiplex comme être présent sur différents multiplexes.
- Le flux IP/MAC (IP/MAC stream) : il s'agit du flux encapsulé qui doit être signalé sur le multiplexe. Ce flux peut contenir une adresse IP et/ou une adresse MAC.
- L'identifiant de plateforme (Platform\_id) : il identifie de manière unique une plateforme et son attribution est centralisée par le projet DVB.

Si cette méthode est utilisée, cela est notifié préférentiellement dans la table NIT (la table BAT peut aussi faire l'affaire). Le descripteur utilisé permet d'accéder au programme correspondant aux informations de la plateforme IP/MAC (table PMT) via la table PAT. La table PMT localise la table INT. En fonction de l'adresse cherchée, la table INT indique un numéro de service qui permet de trouver dans la table PAT, le PID de la table PMT correspondante, et enfin le flux IP/MAC. Cette procédure est illustrée dans la figure ci-dessous par un schéma récapitulatif du processus d'interrogation des différentes tables (Figure 3.11).

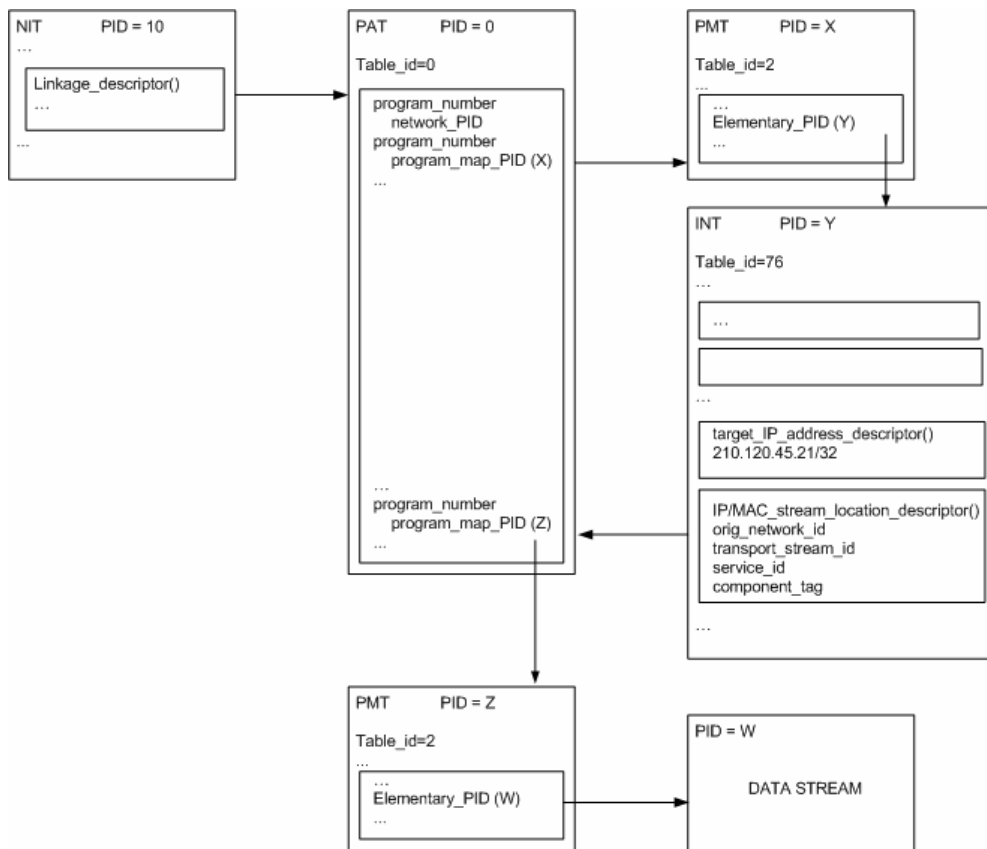


Figure 3.11 Exemple de localisation d'un flux IP/MAC avec la table INT

Les tables INT supportent les sous-réseaux, les adresses IPv4, IPv6, MAC ainsi que les adresses *multicast* de type (\*, G) comme (S, G)<sup>1</sup>. Ces tables permettent la gestion d'un réseau FAI, de la sécurité des flux, de l'identification, *etc...* (cf. norme ETSI EN 301 192 [14])

La méthode INT propose donc un jeu de descripteurs pour gérer l'IP sur un réseau DVB. Toutefois cette méthode ne donne pas de pistes quand à l'attribution des PID en fonction des adresses IP, ni sur la résolution d'adresse au niveau MAC. Ce mécanisme s'inscrit donc bien dans la démarche du DVB : proposer un standard ouvert. Cependant, la brèche est ouverte aux solutions propriétaires tant que des questions majeures subsistent : la réservation des PIDs est-elle statique ou dynamique ? Y a-t-il une translation entre PIDs et adresses IP ? Où déclarer les PIDs disponibles ? Comment gérer les nouveaux abonnés ?

### 3.2.3. Limites des architectures classiques

L'architecture classique fait l'objet de la partie précédente : elle utilise un lien satellite unidirectionnel DVB-S qui inonde les terminaux et se présente comme atout pour les services largement unidirectionnels et diffusés. Pour cette raison, la télévision numérique sur satellite est un succès. Néanmoins elle risque d'être abandonnée lentement, face aux satellites de nouvelle génération, et avec motifs. Des techniques privées, des protocoles lourds, un problème de voie retour ; ce type de structure présente des limites, non négligeables dans un contexte IP où l'accès à Internet par ce système classique n'a pas su percer. Cette partie propose d'étudier les raisons de ce semi échec, c'est-à-dire les limites des architectures classiques.

#### 3.2.3.1. L'encapsulation MPEG-2 TS et ses inadéquations

Un des points les plus débattus actuellement est l'encapsulation des datagrammes dans les paquets MPEG-2 TS. La méthode privilégiée par la norme, MPE, ne contente pas tous les acteurs du monde satellite. Dans ce cadre, le remplacement de cette méthode controversée est l'objectif premier du groupe de travail de l'IETF, IP sur DVB [33]. Deux solutions ont été envisagées : une désormais obsolète, Simple Encapsulation for transmission of IP datagrams [37] et ULE (Ultra Lightweight Encapsulation) [38], sur laquelle nous reviendrons plus tard. Une question se pose alors : qu'est-ce qui justifie cette réelle volonté de remplacer MPE ?

La comparaison entre l'encapsulation MPE et l'encapsulation Ethernet montre que le bourrage n'est pas une bonne solution. L'option *section-packing* permet toutefois de réduire le fossé entre les deux encapsulations et de parvenir à un ratio proche de 1 (Figure 3.6). Cependant le cas d'un *section-packing* total est idéal, car selon le rythme des applications, les différentes congestions et les passages dans des divers réseaux, il n'est pas toujours possible de compléter un paquet MPEG-2 TS. Il faut alors faire un choix entre attendre ou émettre avec du bourrage [39]. L'encapsulation MPE reste cependant peu lourde en terme de poids d'en-tête et de CRC, mais c'est son efficacité qui est surtout en question. MPE semble ne pas vraiment être adapté au trafic IP, et son en-tête pourrait être mieux utilisé, en évitant les options trop nombreuses qui augmentent inévitablement le temps de traitement des stations terrestres. En effet, il n'est pas optimisé, puisqu'il contient des éléments non nécessaires à la réception du datagramme [40].

MPE, s'il convient à de l'IPv4 et peut transporter des trames Ethernet (avec un impact non négligeable sur l'*overhead*), n'est pas pour autant un protocole ouvert et flexible. Le protocole n'est pas adapté à de l'IPv6 tout comme à la gestion de QoS. Il n'est pas prêt pour de la compression d'en-tête IP, et n'offre pas une bonne adéquation avec l'IP *multicast*, si bien que des solutions proposent des encapsulations privées pour contourner le problème [41], ouvrant vers les satellites de nouvelle génération.

---

<sup>1</sup> Cette notation correspond à des adresses multicast de type adresse de groupes (\*,G) ou adresse source et adresse groupe (S,G).

En ce qui concerne la signalisation du flux, MPE ne met rien en place, et celle-ci doit être gérée à part, comme par exemple avec les tables INT (cf. partie 3.2.2.3). Ce problème est certainement un défaut majeur des méthodes proposées : aucune n'effectue le travail d'encapsulation et de signalisation de bout en bout, souffrant alors de redondances et de lourdeurs inévitables. La translation entre adresses IP, PID et adresses MAC reste à ce jour une question ouverte, et même si le travail du groupe IP sur DVB semble s'orienter vers une proposition, il reste encore sous forme d'esquisses [35]. Le problème d'encapsulation laisse donc une brèche ouverte aux faiblesses de normalisation du monde satellite, incitant la multiplicité des méthodes privées et propriétaires.

### 3.2.3.2. *La voie retour et ses difficultés*

Un autre problème, tout aussi important, est la question de la voie retour. En effet, nous avons vu préalablement que les *gateways* DVB-S ne pouvaient être utilisées pour la voie retour puisque d'une part leur coût est rédhibitoire et d'autre part la technologie DVB-S et ses méthodes d'accès ne peuvent supporter un grand nombre de *gateways*. Or l'un des intérêts majeurs du satellite est son déploiement aisé qui ne requiert quasiment aucune infrastructure terrestre. Cette position est confortable car elle permet au satellite de se placer seul sur un marché où la concurrence terrestre n'existe pas (déserts, bateaux, avions, plates-formes...) ou difficilement (villages, montagnes, mobiles, trains, ...). Mais le problème du lien retour coupe toute interactivité possible.

L'UDLR et les solutions de ce type permettent d'offrir à l'utilisateur cette interaction recherchée au prix d'une infrastructure terrestre. Ces terminaux sont pour la plupart équipés d'un retour RTC classique à 28.8 Kbits/s (modem 56k) [42], puisque la présence d'une ligne ADSL rend l'utilisation d'un lien satellite obsolète dans le cadre d'un accès Internet (les prix compétitifs des accès ADSL et plus généralement des technologies terrestres comparées aux technologies satellites ne peuvent pas permettre une concurrence directe du satellite avec le terrestre). Toutefois si cette méthode peut paraître une bonne solution, elle est coûteuse pour un avantage restreint. La nécessité d'un lien retour terrestre prive d'une part le système satellite des clients des zones isolées où les infrastructures terrestres ne sont pas déployées (question de coût ou d'impossibilité physique). D'autre part cette asymétrie extrême entre lien satellite et modem 56k n'est pas adaptée aux développements massifs des applications à tendance plus symétrique sur Internet (*chat*, *peer-to-peer*, jeux vidéos, etc...). Avec un lien retour terrestre, le satellite perd son accessibilité et donc une grande partie de ses clients potentiels.

### 3.2.3.3. *Les limites des satellites GEO transparents*

Les satellites géostationnaires de type transparent ont de nombreux avantages, et proposent une adéquation réelle à la diffusion de la télévision numérique. Toutefois, leurs adéquations aux besoins d'IP restent partielles.

Dans l'architecture classique proposée précédemment (3.2.2), le satellite transparent influe considérablement sur l'utilisation de la bande passante utile. En effet lors d'une transaction *unicast*, comme dans le cas d'un accès Internet, un datagramme envoyé sur le système à destination d'un unique terminal sera reçu (au moins au niveau DVB) par tous les autres terminaux, et consommera la bande passante des autres terminaux, qui ne pourront pas recevoir leurs données dans cette même plage. Il s'agit bien là d'un gaspillage de ressources, provenant de la nature diffusante intrinsèque du média satellite ; un avantage premier qui peut vite devenir nuisible pour fournir un accès Internet à des milliers d'utilisateurs.

La nature du faisceau du satellite peut être changée pour devenir plus étroite, toutefois le satellite perdrait son intérêt d'interconnexion en un seul bond par une réduction de sa couverture comparativement au délai important qu'il engendre.

### 3.2.4. Conclusions sur l'architecture classique

L'architecture présentée dans cette partie est appelée architecture classique car elle dérive directement des systèmes DVB actuels utilisés pour la diffusion de la télévision numérique. D'ailleurs une telle architecture pourrait être réalisée sur un satellite qui diffuse déjà de la télévision, proposant le support d'IP comme un service supplémentaire. Cette architecture présente un certain nombre d'avantages, de limites et d'inconnues, et son intérêt n'est certainement pas à contester. Pour ces différentes raisons tout comme son importance historique, nous avons choisi de l'utiliser comme témoin pour la suite de nos travaux. Elle servira alors de référence et de comparatif, permettant de montrer en quoi elle peut être suffisante dans certains cas, tout comme en quoi de nouveaux systèmes sont nécessaires.

## 3.3. *Le DVB-RCS comme support d'IP*

L'un des problèmes fondamentaux du DVB-S est son manque d'interactivité, entraînant l'utilisation d'une voie retour pénalisante pour le développement d'IP. Le DVB-RCS est la réponse du groupe DVB au défaut d'interactivité du DVB-S. Moins gourmande en ressource et bande passante, la technologie DVB-RCS se couple aux VSATs pour donner des transpondeurs à prix raisonnables, comparés aux *gateways* DVB-S. Cette partie étudie deux approches distinctes : l'utilisation du standard DVB-RCS comme seul support d'accès au satellite, et le DVB-RCS comme voie retour du DVB-S, conformément à la norme. Cette partie conclut alors sur les problèmes qui restent à résoudre malgré l'apport du DVB-RCS.

### 3.3.1. DVB-RCS comme seul support d'IP

Une solution fondée uniquement sur le standard DVB-RCS est délicate. En effet la norme DVB-RCS [16] prévoit que la synchronisation et la gestion du système DVB-RCS soit orchestrée par le flux aller DVB-S. Sans ce flux aller, le système DVB-RCS sur un système GEO transparent ne peut être réalisé de manière entièrement conforme à la norme.

Il est toutefois possible de réaliser une telle architecture quand la signalisation est générée par une autre entité du système. Une possibilité a d'ailleurs été envisagée dans le cadre d'un projet RNRT auquel nous avons participé, DIPCAST (DVB pour l'IP multiCAST) [28], utilisant le satellite pour générer la signalisation et la synchronisation adéquate. Cependant cette technique dépasse le cadre de cette présentation par son utilisation de l'intelligence embarquée et nous l'observerons plus tard dans la section 3.4.4.

Le DVB-RCS seul ne semble pas une solution viable sur un satellite purement transparent. De plus, même lorsqu'il y a une intelligence à bord, c'est le satellite qui émet en DVB-S. Par conséquent le système DVB-RCS cohabite toujours avec un système DVB-S sur lequel sa signalisation repose.

### 3.3.2. DVB-RCS comme complément au DVB-S

Cette architecture envisagée par la norme permet d'utiliser le DVB-RCS comme palliatif au problème de lien retour du DVB-S. Ainsi des zones totalement isolées comme une plateforme pétrolière ou un refuge de montagne peuvent accéder au système sans aucune connexion terrestre. L'utilisation du DVB-RCS reste strictement identique à celle proposée dans la partie 2.4, puisqu'il a été conçu pour véhiculer des données telles que les datagrammes IP. Dans la figure ci-dessous (Figure 3.12), une architecture utilisant le DVB-S et le DVB-RCS comme support à de l'IP est proposée. Cette structure met en place un accès Internet via le couplage DVB-S voie aller et DVB-RCS voie retour. Contrairement à l'architecture proposée dans la partie 2.4, celle-ci est supportée par un unique satellite. En effet l'intégration du DVB-S et du DVB-RCS sur un même satellite est possible et a même été choisie dans le cadre du projet DIPCAST, pour le système dit transparente [43].

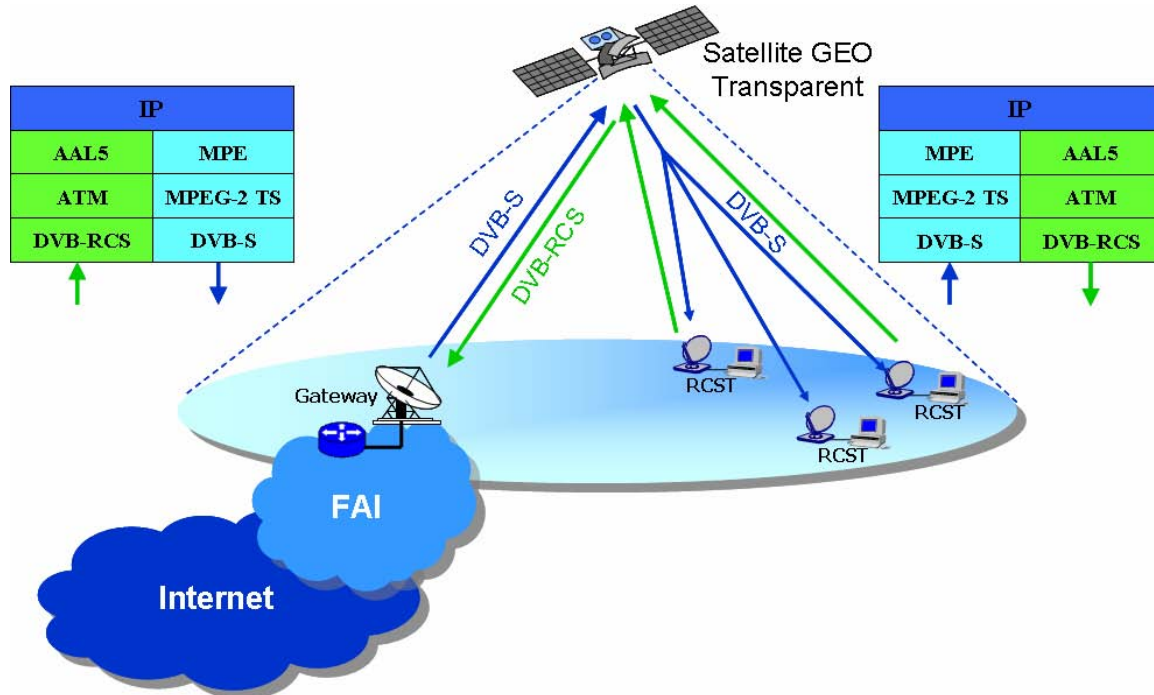


Figure 3.12 Architecture IP sur DVB-S/DVB-RCS comme accès à Internet

Un tel système permet d'offrir un meilleur débit retour comparé à un lien modem classique RTC, supportant mieux les applications plus symétriques. De plus, même pour un accès plus classique, le lien retour satellite est parfois plus adapté. En effet pour un gros transfert de données d'un serveur vers l'utilisateur, la mise en œuvre de TCP peut induire une congestion des acquittements, diminuant le débit aller [42]. Un retour satellite peut donc avoir un intérêt, même dans le cadre d'un service classique d'accès Internet, comme nous pourrions d'ailleurs le constater par la suite.

### 3.3.3. Persistance de limites

Cette partie montre l'apport du DVB-RCS, tout comme la nécessité de le coupler au DVB-S. Le DVB-RCS se pose comme une solution incontournable pour un système totalement satellite, indépendant d'infrastructures terrestres et facilement déployable. Toutefois le DVB-RCS n'est pas la solution miracle à toutes les limites des systèmes classiques.

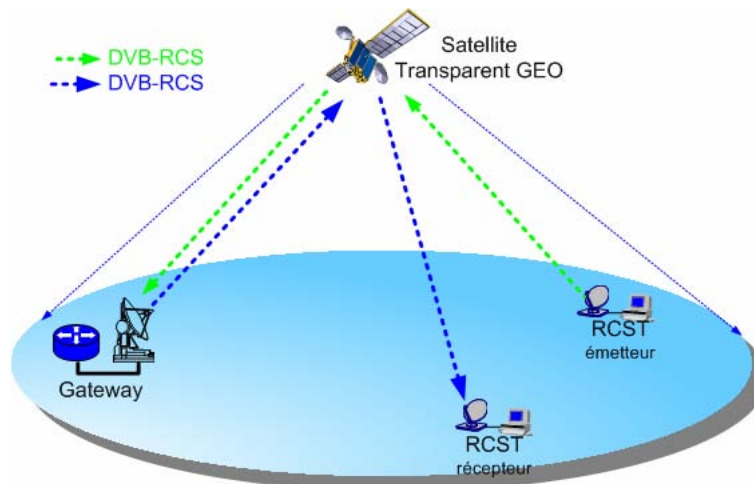


Figure 3.13 Double bond entre deux RCST sur un système GEO transparent

Le DVB-RCS n'apporte au DVB-S que la notion d'interactivité. Les problèmes d'encapsulation, de signalisation, de gaspillage de ressources et de standardisation subsistent. Les solutions restent malgré tout spécifiques aux systèmes mis en place comme c'est par exemple le cas avec DIPCAST, et un changement dans le système satellite utilisé implique des changements parfois drastiques sur les couches protocolaires et la signalisation.

Enfin les solutions DVB-RCS si elles sont moins chères que les *gateways*, impliquent un coût d'équipement pour l'utilisateur final bien plus important que pour une connexion terrestre classique. Pour pouvoir produire des RCST à moindre coût, une synergie doit être créée à partir d'une uniformisation forte et ouverte (comme c'est le cas avec l'initiative de SATLABS [44]) couplée à une offre réelle de services attrayants. Le DVB-RCS soulève notamment un autre problème : le double bond. En effet, comme le souligne la figure ci-dessus (Figure 3.13), pour que la communication puisse avoir lieu entre deux RCSTs un passage par la *gateway* est nécessaire. Les RCST ne sont capables de recevoir que le flux DVB-S, la technologie à mettre en oeuvre étant trop complexe et donc coûteuse.

### **3.4. De nouvelles techniques et technologies au service d'IP sur satellite**

La nécessité de coupler les technologies semble le point central d'une réalisation plus adaptée au trafic IP. Toutefois le DVB-RCS seul ne peut suffire à combler les limites des architectures classiques, d'autant plus qu'il amène ses propres limites (double bond).

Dans cette partie, nous proposons d'étudier des techniques et technologies qui permettent d'améliorer l'intégration d'IP sur satellite. L'encapsulation ULE est ainsi proposée comme alternative à MPE. Puis l'intelligence embarquée ainsi que les techniques multifaisceaux sont abordées pour enfin être intégrée dans une solution envisagée dans le projet DIPCAST.

Ces différents éléments permettront de dégager une problématique qui guidera la suite de notre travail : la nécessité d'une architecture capable de faire le lien entre système classique et système régénératif, entre applications actuelles et services à venir.

#### **3.4.1. Techniques de résolutions d'adresses et d'encapsulations : ULE**

La méthode MPE a différents défauts comme nous l'avons souligné dans la partie 3.2.3.1. Dans ce cadre un certain nombre de solutions propriétaires ont vu le jour utilisant comme base d'encapsulation la méthode du *data-piping* [41]. IP sur DVB, groupe de travail de l'IETF, œuvre pour la normalisation d'un nouveau protocole reposant sur le *data-piping* et adapté à la couche MPEG-2 TS / DVB : ULE (Ultra Lightweight Encapsulation) [38].

##### **3.4.1.1. Les principes de l'encapsulation ULE**

Au niveau d'IP, ULE doit permettre d'assurer l'*unicast*, le *broadcast* comme le *multicast* IPv4, l'*unicast* et le *multicast* IPv6 ou encore la compression d'en-têtes [45] [46]. Le protocole ULE permet aussi de véhiculer directement d'autres PDUs (Protocol Data unit) comme les trames Ethernet, permettant ainsi la mise en place d'un pont Ethernet via le satellite.

La méthode ULE repose sur l'encapsulation des PDUs dans des SNDUs (SubNetwork Data Unit). Comme pour MPE, la SNDU est encapsulé dans le flux MPEG-2 TS. Ce mécanisme utilise alors l'indicateur PUSI pour renseigner sur la présence d'un début de SNDU dans le paquet. Lorsque le PUSI prend la valeur 1, un pointeur de 1 octet suit l'en-tête MPEG-2 TS, indiquant le début d'une nouvelle SNDU. Si plusieurs SNDU peuvent ainsi se retrouver dans un même paquet MPEG-2 TS, du bourrage peut aussi être utilisé quand il n'y a pas de SNDU

d'origine identique à transmettre c'est-à-dire utilisant le même PID. La figure suivante présente l'encapsulation d'un datagramme *unicast* IPv4 en utilisant le protocole ULE (Figure 3.14).

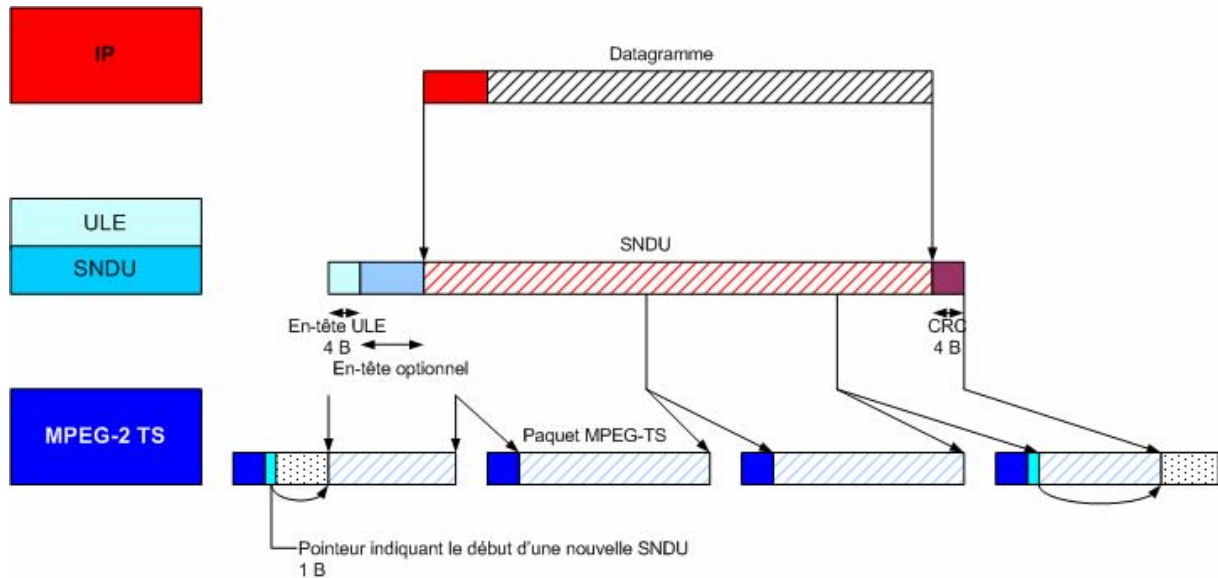


Figure 3.14 Encapsulation d'un datagramme unicast IPv4 via la méthode ULE

Cette encapsulation ne semble pas si différente que cela de la méthode MPE à première vue. Comme MPE on trouve un en-tête, un en-tête optionnel et un CRC. Comme MPE, une forme de *section packing* est utilisé. Toutefois l'en-tête d'une SNDU a un champ obligatoire de 4 octets comparé au *pointer-field* de 12 octets d'une section datagramme. La solution ULE propose un en-tête moins complexe que la solution MPE, avec une option pour l'adresse MAC destinataire, qui rend l'en-tête beaucoup plus court si celui-ci n'est pas nécessaire.

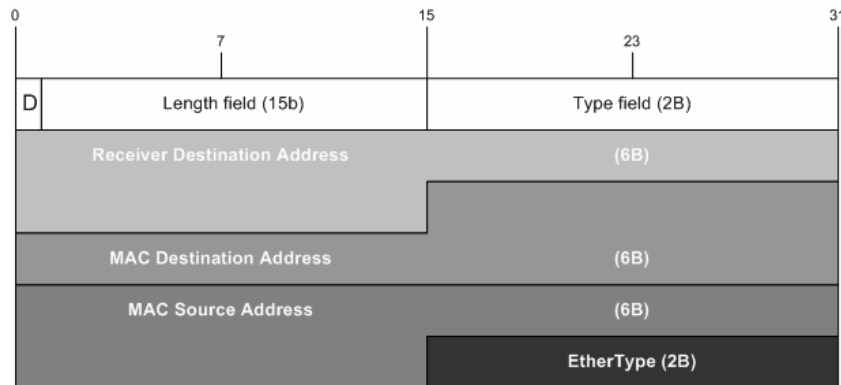


Figure 3.15 En-tête obligatoire et optionnel utilisé par la solution ULE

La figure ci-dessus (Figure 3.15) propose un aperçu de l'en-tête ULE, montrant ces trois champs obligatoires et quelques champs optionnels utilisables. Les champs obligatoires sont :

- D (Destination Address Present) : ce champ prend la valeur 0 pour indiquer qu'il y a un champ optionnel *Receiver Destination Address*.
- Length field : codé sur 15 bits, ce champ indique la longueur en octet de la SNDU, comptée à partir du premier bit suivant le champ type, jusqu'au CRC inclus.
- Type field : le champ de type est codé sur 2 octets. Il propose deux types possibles ; les valeurs de 0 à 1535 sont utilisées pour des types réservés du système ULE tandis que les valeurs au dessus de 1536 correspondent au type Ethernet IEEE.

Les champs optionnels sont plus spécifiques, on notera toutefois le champ *Receiver Destination Address* qui est présent dans le paquet quand D est fixé à 1. Cette adresse est un NPA (Network Point Attachment) qui identifie sur 6 octets le (ou les) récepteurs. Elle est similaire au standard IEEE LAN/MAN et peut être une adresse *unicast*, *multicast* ou même une adresse de *broadcast* (0xFF:FF:FF:FF:FF:FF). Les autres champs optionnels de la SNDU peuvent être utilisés pour faire notamment du pont Ethernet. L'en-tête présenté dans la figure ci-dessus est d'ailleurs un bon exemple d'encapsulation d'une trame Ethernet par la méthode ULE. Comme dans le cadre IP, le champ *Receiver Destination Address* peut être occulté dans certaines conditions.

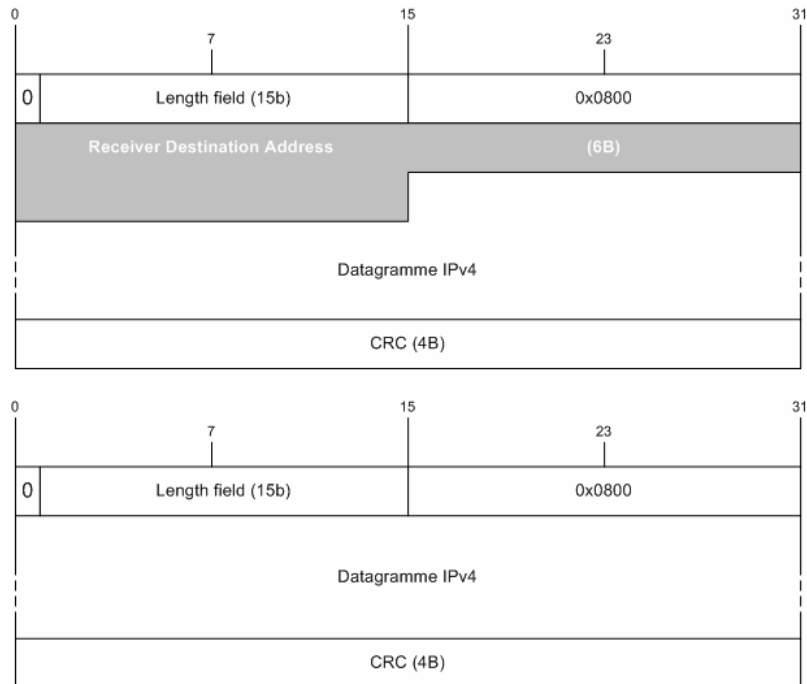


Figure 3.16 Deux encapsulations d'un datagramme IP via la méthode ULE

Pour l'encapsulation d'un datagramme IPv4 (Figure 3.16), les champs obligatoires et le champ optionnel *Receiver Destination Address* sont suffisants, donnant un *overhead* total de 12 octets contre 16 octets pour MPE. Cependant, si le système est capable de filtrer au niveau PID correctement et a une capacité de filtrage IP suffisante, ce champ optionnel n'est pas obligatoire, donnant un *overhead* de 8 contre 16 (Figure 3.16).

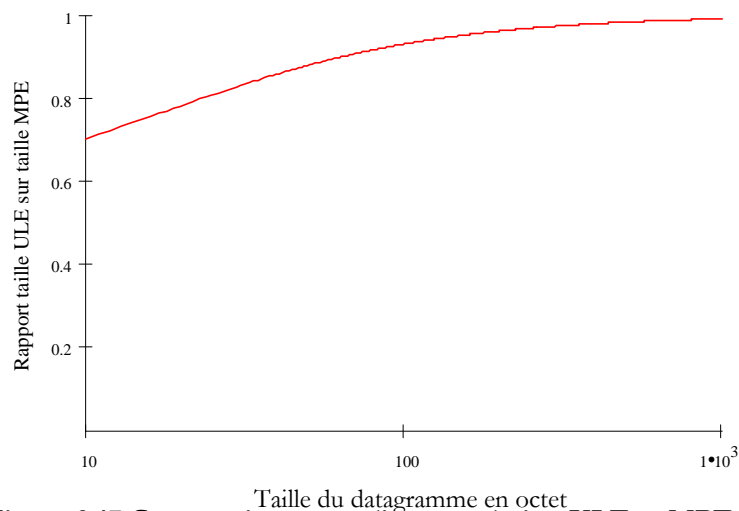


Figure 3.17 Comparaison entre l'encapsulation ULE et MPE



### 3.4.1.2. Les avantages de la méthode ULE

L'encapsulation ULE semble alors apporter une réduction de complexité et d'*overhead* comparé à la méthode MPE. Si l'on veut comparer l'encapsulation MPE et ULE, l'équation (4) donne  $T_{MPA}(s)$ , la taille de données de niveau 2 nécessaires à l'encapsulation d'un datagramme de  $s$  octets. Soit  $T_U(s)$  cette taille pour une encapsulation via ULE en version la plus légère (5).

$$(5) \quad T_U(s) = \left( \frac{s+8+1}{184} \right) \cdot 188$$

On représente le rapport entre  $T_U(s)$  et  $T_{MPA}(s)$  via la figure ci-dessus (Figure 3.17), donnant un aperçu de l'efficacité de ULE comparée à MPE. On remarque que plus les datagrammes sont de petites tailles, plus le gain entre ULE et MPE est plus important.

Le protocole ULE a fait ainsi l'objet d'une étude approfondie dont le rapport final a été récemment rendu public [47]. Ce rapport conclut sur un gain d'efficacité d'ULE par rapport à MPE, de 10 à 15%, pour des trafics importants. De plus la grande flexibilité d'ULE lui permet d'être adapté à de nouveaux protocoles, sans avoir de modifications fondamentales à apporter, grâce notamment à son champ type et ses options sur mesure.

Aussi les premières implantations réelles de la solution ULE apparaissent (Thales, GCS GmbH, ECC, ...) et l'on trouve même des IRDs intégrant cette solution [48].

### 3.4.1.3. Les objectifs d'une résolution d'adresse standardisée

En ce qui concerne une méthode de résolution d'adresse complète et uniformisée, aucune solution n'a encore vraiment abouti. En effet pour pouvoir rendre la signalisation des flux privés et notamment IP uniforme, la résolution d'adresse doit proposer une solution capable d'encapsuler les PDUs de manière simple et efficace, de faire le lien entre le canal logique TS et une adresse IP, et de permettre la mise en place de QoS.

Avec ULE, un certain nombre d'objectifs sont atteints : d'une part l'*overhead* est réduit, et d'autre part la méthode permet d'éviter les champs inutiles via un système d'options facilitant le traitement par les stations et offrant une encapsulation à un grand nombre de protocoles.

Toutefois, l'encapsulation n'est pas suffisante lorsqu'il s'agit de compatibilité, de gestion des flux (gestion du délai, de la gigue...), d'interopérabilité, de facteur d'échelle, *etc.*... Pour cela, il faut une couche protocolaire complète proposant une interaction totale entre la couche MPEG-2 TS (et donc les canaux logiques) et la couche supérieure, ici IP [49]. Le protocole doit donc :

- être robuste face aux erreurs de liaison et de décodage,
- associer les adresses IP aux canaux logiques, en respectant la technique MPEG-2 (tables SI) ou en utilisant un canal pour des messages de type ARP (Address Resolution Protocol),
- supporter les protocoles IPv4 et IPv6,
- gérer la QoS, le *multicast*, le *broadcast* et la compression d'en-tête,
- supporter des protocoles de sécurité tels que IPsec (IP security protocol),
- ...

Il reste donc encore du travail d'uniformisation avant d'arriver à intégrer ces différents objectifs dans un seul et même niveau protocolaire, ULE n'étant qu'une étape vers une solution plus globale.

### 3.4.2. Les techniques de multifaisceaux

Les satellites traditionnels sont le plus souvent des satellites monofaisceau. Or un unique faisceau peut être problématique dans plusieurs cas. D'un côté si le faisceau est très large, il permet d'inonder un grand nombre de terminaux au prix d'un gain limité et d'un gaspillage de ressources. En effet, dans le cadre de message *unicast*, la donnée va prendre la ressource sur tout le *spot*. D'un autre côté, un faisceau étroit permet d'avoir un meilleur gain d'antenne mais ne dessert qu'un nombre limité de stations, rendant l'utilisation d'un satellite équivoque. Une solution à ce problème est le multifaisceaux, encore appelé *multi-spots* ou *multi-beams*.

Un satellite *multi-spots* combine ces deux avantages dans un même système : plusieurs faisceaux étroits permettent de partager la couverture globale du satellite en plusieurs zones ou *spots* (Figure 3.18). Ainsi l'économie au niveau du bilan de liaison du *multi-spots* permet de réduire la taille des stations, et donc leur coût. De plus les techniques multifaisceaux permettent de réutiliser les fréquences d'un *spot* à un autre, augmentant ainsi les capacités sur chaque *spot* en termes de fréquences utilisables. Le gain obtenu par la réduction de la taille des faisceaux offre de bien meilleures perspectives à l'utilisation de la bande Ka. Des systèmes multifaisceaux se développent depuis longtemps déjà, tels que Astra 1h (8 faisceaux en bande Ka)

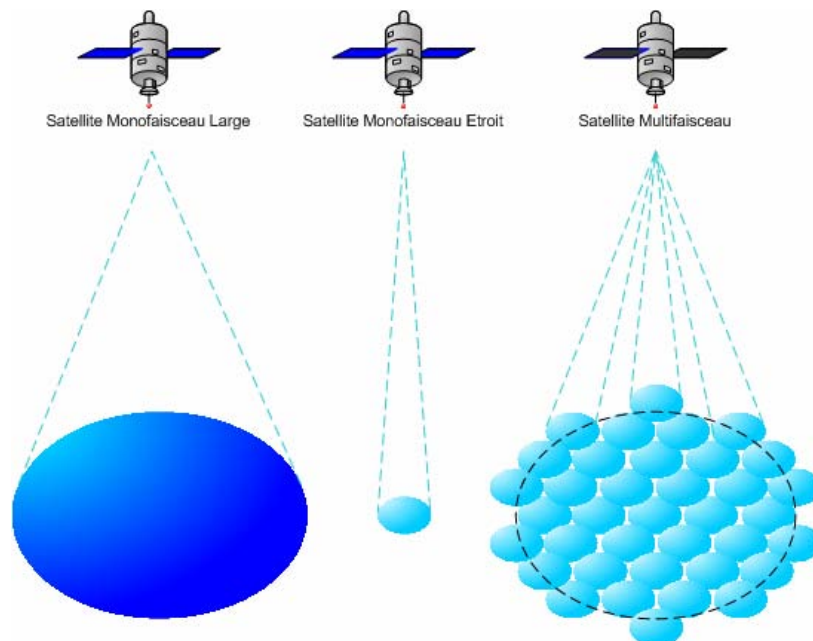


Figure 3.18 Couverture d'un satellite multi-spots

Cependant cette amélioration a un prix : la complexité du système. La présence de plusieurs *spots* induits inévitablement des interférences entre les différents *spots*. De plus si l'on souhaite gérer l'interconnexion entre les différentes zones de couverture, cette complexité est accrue. En effet, si une *gateway* dans un *spot* x veut envoyer une donnée sur un *spot* y, il doit y avoir un lien entre ces deux faisceaux. Pour ce lien plusieurs méthodes sont possibles, mais toutes requièrent un équipement à bord. Une de ces techniques utilise un filtrage sur les fréquences (*transponder hopping*) mais n'est envisageable que pour un nombre restreint de *spots*. La commutation bord est un autre type de solution, nécessitant un OBP parfois coûteux, mais permettant une plus grande marge de manœuvre et réactivité que la méthode reposant sur les signaux.

Le *multi-spots* est une technologie qui peut permettre un gain important de capacité pour un coût et une complexité maîtrisés. Ainsi il y a eu de nombreux satellites transparents lancés dernièrement (Astra 1K, IPStar, ...) utilisant cette technique, mais sans permettre l'interconnexion directe entre spots, impliquant une flexibilité réduite et des doubles bonds.

### 3.4.3. L'intelligence embarquée

Les satellites transparents proposent des solutions simples et efficaces qui permettent de répéter le signal sur le/les faisceaux descendants. Toutefois cette simplicité n'est pas toujours satisfaisante, et parfois un traitement à bord serait souhaitable pour améliorer les performances des systèmes et ouvrir le monde du satellite à une réelle gestion des flux IP. Cette étape passe par la mise en place d'équipements permettant un traitement non seulement analogique du signal, mais aussi numérique. C'est ce que l'on nomme l'intelligence embarquée, ou *On-Board Processing* (OBP). Cette technologie est déjà au point et utilisée dans les systèmes Skyplex HOT BIRD™ 5 et 6. Ces derniers multiplexent les différents flux montants envoyés par différentes *gateways* en un seul flux descendant. Mais l'intelligence embarquée propose plus que du multiplexage ; la génération de tables de signalisation à bord, la commutation ou encore le routage à bord sont autant de possibilités que l'OBP est capable d'offrir.

Dans le cadre du DVB-RCS, l'intelligence embarquée peut apporter de nombreuses améliorations au système. Nous avons vu précédemment deux limites du DVB-RCS comme support d'IP : la signalisation qui doit être apportée par un flux DVB-S, et le double bond entre deux RCSTs (cf. 3.3). L'OBP permet de dépasser ces limites en multiplexant les flux montants DVB-RCS en un seul flux DVB-S descendant par faisceau. Ainsi, lorsque qu'un RCST communique avec un autre RCST, il envoie des *bursts* DVB-RCS vers le satellite. Le signal est traité pour obtenir les données de niveau 2 (cellules ATM ou paquets MPEG-2 TS). Ces données sont ensuite multiplexées sur le TS descendant. Le signal DVB-S est ainsi directement reçu par l'autre RCST sans une *gateway* intermédiaire. Ce mécanisme est illustré dans la figure ci-dessous (Figure 3.19). De même, la présence d'un multiplexage à bord, permet au satellite de générer directement des tables de signalisation, de la synchronisation, et de devenir ainsi une entité à part entière de gestion du système.

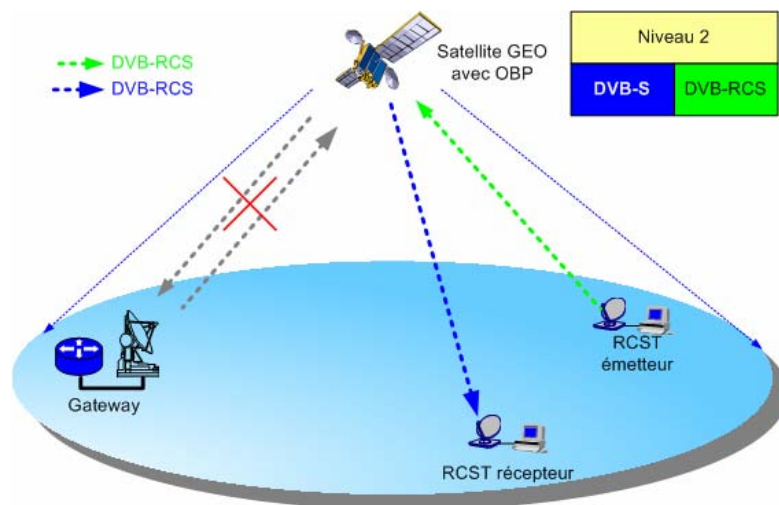


Figure 3.19 Élimination du double bond entre deux RCSTs sur un satellite intégrant un OBP

D'autre part l'OBP permet de gérer de manière plus flexible les systèmes *multi-spots* en remontant au niveau 2 et permettant ainsi une commutation des paquets (on parle alors de *on-board switching*). Cependant l'utilisation d'une telle technologie a, comme le *multi-spots*, un prix à bien considérer : la complexité. Celle-ci entraîne un coût nettement supérieur à celui d'un satellite transparent. De plus la complexité de l'OBP introduit des risques de dysfonctionnement du système qui inquiètent les constructeurs et les investisseurs. Ce coût plus élevé (de 1.5 à 2 fois supérieur) associé à des risques plus importants de rupture de service, freine en partie le développement de cette technologie. Tout comme le multifaisceaux, l'OBP doit être considéré avec soin, et son apport longuement envisagé avant d'opter pour son utilisation.

### 3.4.4. Exemple d'architecture intégrant intelligence bord et multifaisceaux

Notre participation au projet DIPCAST [28] nous a menés à travailler sur un système multifaisceaux intégrant une intelligence bord. Ce travail a été l'occasion de mieux comprendre les objectifs d'un industriel dans le domaine, et surtout de prendre note des différents acquis et compétences dans le cadre de ces nouvelles technologies. Toutefois cette partie du projet était davantage une étude de faisabilité qu'une véritable ouverture vers de nouvelles technologies : il s'agissait de réutiliser un brasseur ATM, déjà validé pour l'espace, pour réaliser la commutation bord. Cette contrainte, qui peut paraître légère dans un premier temps, a en réalité restreint de manière importante nos choix sur la structure protocolaire de la solution.

Dans cette partie, nous proposons de présenter ce travail [50] [51] [52].

#### 3.4.4.1. La mission du système DIPCAST avec OBP

La mission du système DIPCAST avec OBP est d'assurer le transport de contenus :

- entre FAI, le réseau satellite étant alors une solution alternative au réseau terrestre qui donne la possibilité d'alléger le trafic terrestre et permet de contourner les points de congestion comme cela est fait dans certains *backbones*,
- entre POPs (Point of Presence) d'un FAI, placés en tête des différents réseaux d'accès qui regroupent un ensemble de clients de ce FAI,
- entre utilisateurs finals, connectés à des réseaux d'accès, qui utilisent le réseau DIPCAST comme médium d'interconnexion.

Ce type de réseau constitue selon le terme DIPCAST un réseau *EDGE*, reliant des réseaux d'accès entre eux et à Internet.

#### 3.4.4.2. L'architecture générale DIPCAST

Le système DIPCAST a un cadre bien délimité qui ne comprend pas la totalité du réseau (d'une source première vers un utilisateur final). Le système à proprement parler se limite à deux segments : le segment sol et le segment spatial. Les contours du système sont présentés dans la figure suivante (Figure 3.20).

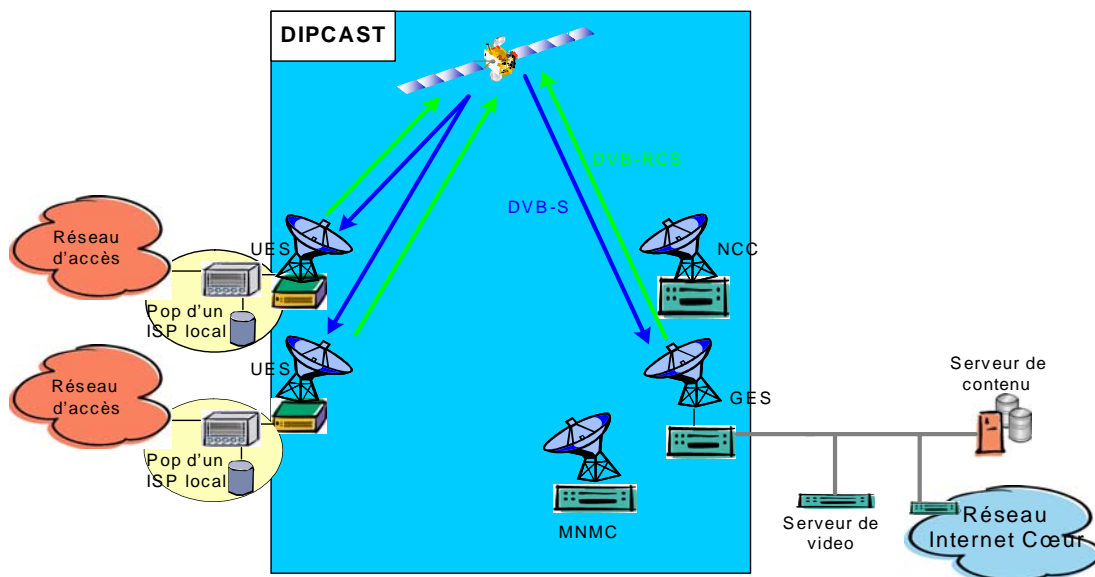


Figure 3.20 Contours du système DIPCAST – segment sol et air

Le segment sol est composé de plusieurs éléments comme indiqués sur la figure ci-dessus :

- Une GES (Gateway Earth Station), voire plusieurs. La *gateway* est un élément central du système, gérant le trafic provenant des FAIs et destiné aux réseaux d'accès. Cette entité a des fonctions appartenant au segment utilisateur (transmission du trafic) ainsi qu'un contact privilégié avec le/les NCC. Elle a également des fonctions de niveau réseau pour traiter les différents trafics, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un routeur. Cet élément est composé de différents modules (sept) qui communiquent entre eux en utilisant des circuits ATM. Les GES sont équipées d'antenne de 3 à 4 mètres de diamètre pour un débit pouvant aller de 8 à 40 Mbit/s, en émission à multi-porteuses.
- Des UES (User Earth Station). Dans la norme DVB-RCS, il s'agit de stations RCST. Celles-ci sont capables d'émettre vers d'autres UES, ou vers la GES. Ces stations sont les têtes de pont des réseaux d'accès. Les UES sont équipées d'antenne de 0,75 à 1,2 mètres de diamètre pour un trafic de 512 Kbit/s à 4 Mbit/s.
- Le MNMC (Mission and Network Management Centre). Il fait partie du segment sol de contrôle et s'occupe des différentes informations reçues du satellite (contrôle d'orbite, d'état de fonctionnement, corrections de codages...).
- Le ou les NCCs (Network Control Centre). Ils font partie du segment sol de contrôle. Ils gèrent l'accès au système, la mise à jour des tables de commutation, l'attribution des PIDs, l'émission de la plupart des tables SI ou encore la sécurité du système.

Le segment spatial est constitué du seul satellite géostationnaire multifaisceaux à intelligence embarquée. Ce système est appelé système régénératif et est composé de 8 faisceaux montants et descendants. Le processeur embarqué bande de base réalise la commutation des cellules ATM selon leur port d'entrée (correspondant au *spot* montant) et leur VPi (Virtual Path identifier). Il permet ainsi l'interconnexion entre les faisceaux montants et descendants. L'OBP est divisé en trois sections :

- une section de télécommunication en charge du traitement des signaux télécoms (démultiplexeur, brasseur, encapsulateur, multiplexeur, encodeur DVB-S) ;
- une section de traitement de la signalisation et des signaux de commande et de contrôle (gestion de la communication avec MNMC et NCC, tables générées à bord...) ;
- une dernière section d'horloge réseau : NCR (Network Clock Reference).

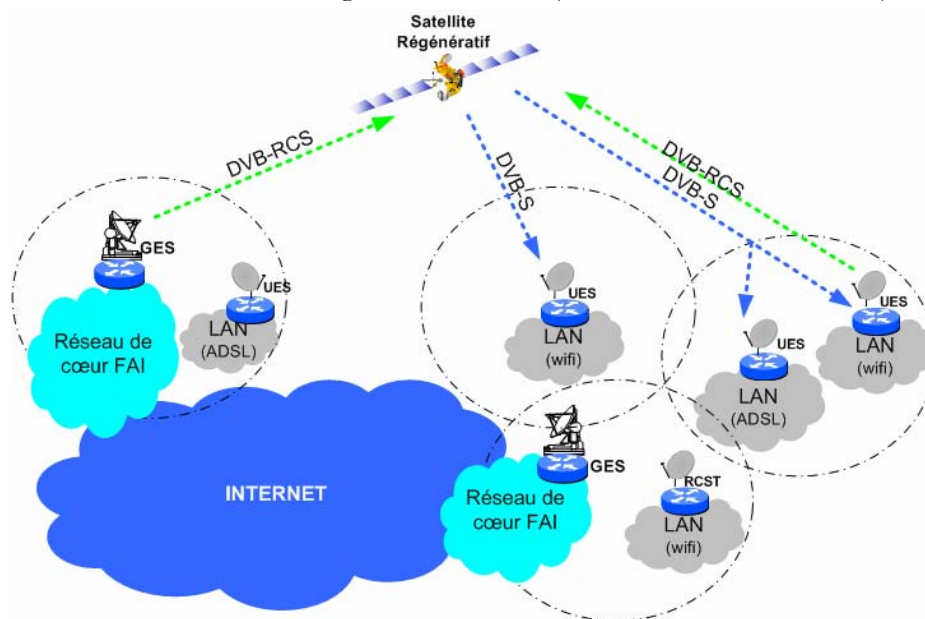


Figure 3.21 Architecture IP sur DVB bidirectionnelle

L'architecture est donc composée d'une ou plusieurs GES et d'UES interconnectées les unes aux autres grâce à un satellite régénératif. Les liens montants sont tous en DVB-RCS, permettant une gestion identique des cellules en provenance des GES comme des UES. Le lien descendant repose sur le standard DVB-S, permettant le multiplexage en un seul flux descendant par *spot*, l'insertion des tables de signalisation par le satellite et l'utilisation de récepteur DVB-S au sol (équipement peu cher comparé à la complexité des récepteurs DVB-RCS).

Cette architecture, comme le montre la figure précédente (Figure 3.21), permet de connecter les réseaux FAIs de coeur à leurs différents réseaux d'accès sans aucune infrastructure terrestre. Ces réseaux d'accès peuvent être des réseaux ATM, WiFi, ADSL, Ethernet... Le projet DIPCAST ne s'interrogeait pas sur une autre interconnexion possible, mais uniquement sur une connexion totalement satellite permettant la mise en place du *multicast* de manière souple et adaptée aux services proposées (télévisions interactives, applications partagées, CDN...).

### 3.4.4.3. L'architecture protocolaire DIPCAST

Les couches protocolaires supportant une telle architecture sont présentées ici (Figure 3.22). Ces piles représentent les protocoles déployés entre deux stations (UES ou GES) interconnectées d'un côté par le réseau DIPCAST, et de l'autre côté par un LAN Ethernet. On pourra noter ici le rôle double de l'OBP qui d'une part s'occupe de la gestion des différents faisceaux et de leur interconnexion grâce au brasseur ATM, et permet d'autre part la mise en oeuvre du multiplexage des cellules ATM dans les paquets MPEG-2 TS.

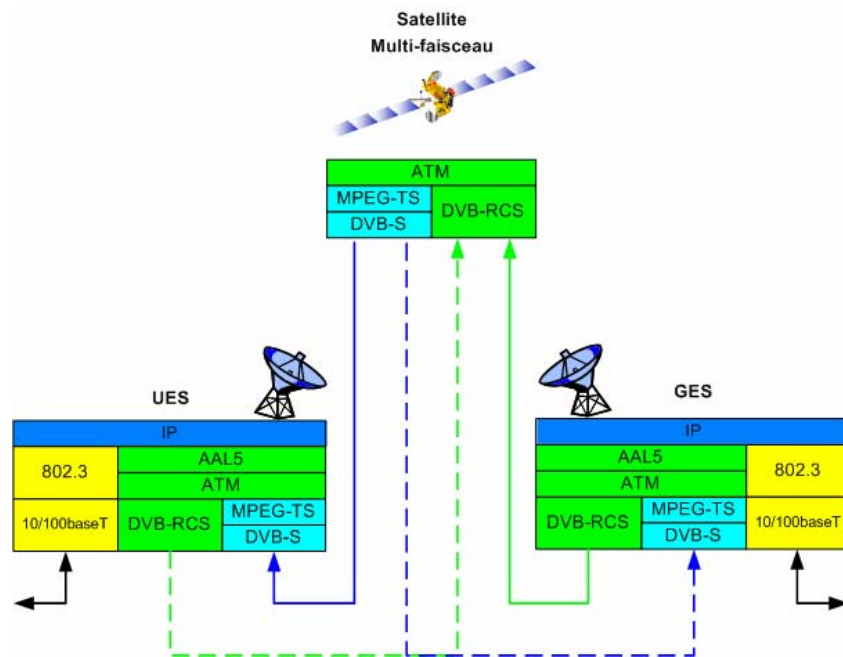


Figure 3.22 Couche protocolaires du système régénératif DIPCAST

Dans ce projet le choix ATM a orienté fortement la proposition. Si le brasseur ATM était une contrainte du projet, il n'en est pas moins important de noter les intérêts de l'utilisation d'ATM pour un système comme celui-ci. Dans un premier lieu, il faut remarquer qu'ATM d'après la norme DVB-RCS [16] doit être supporté par tout système intégrant ce standard. De plus ATM propose pour les commutateurs et les brasseurs une technologie mûre qui a connu plusieurs expériences dans le domaine spatial, avec notamment les constellations ou encore les VSATs, mais qui reste du domaine des laboratoires pour le moment. Il n'existe donc pas de commutateur ATM déjà à bord de véritables GEOs. Les commutateurs MPEG-2 TS sont pour l'instant du domaine de l'expérimental comme dans le cadre des projets IBIS et AmérHis (lancé en septembre 2004). L'ATM propose aussi une gestion précise de la QoS avec différentes classes de

service. Enfin, les courtes tailles des cellules ATM permettent de perdre moins d'informations en cas d'erreur au prix de codages correcteurs moins performants (augmentation du nombre de bits de redondance pour un bit utile). L'ATM a été pendant longtemps le protocole pressenti pour gérer les transferts de données sur satellite. Toutefois cette solution a plusieurs défauts dont la surencapsulation très perceptible ici.

#### 3.4.4.4. Le système bord DIPCAST

Dans le cadre de nos travaux de définition de l'architecture globale DIPCAST, nous avons étudié la mise en place de la commutation bord. Pour pouvoir tout d'abord comprendre la problématique de ce travail, le système bord doit être examiné. Il est composé de différents éléments (Figure 3.23), mais on notera toutefois trois principaux éléments :

- Le OBPC (On-Board Processor Controller) qui gère les mesures effectuées sur le satellite, la génération des tables de signalisation, et les tables de commutation ;
- Le brasseur qui interconnecte les 8 *spots* montants avec les 8 *spots* descendants. Le brasseur est capable de répliquer les cellules pour pouvoir faire du *multicast* au niveau 2. Il se base sur le port d'entrée et le VPi de la cellule pour la commuter ;
- Les formateurs DVB qui encapsulent les cellules ATM dans les paquets MPEG-2 TS via *data-piping*, à raison de sept cellules ATM pour deux paquets MPEG-2 TS.

Ainsi quand un signal est reçu sur l'un des *spots* montants, le MCDDD (Multi-Carrier Demultiplexer Demodulator Decoder) correspondant restitue le *burst* de cellules ATM. Ces cellules sont ensuite brassées par le brasseur embarqué vers le(s) *spot(s)* de sortie adéquate(s). Les cellules sont ensuite regroupées par le formateur MPEG-2 TS qui les encapsule dans des paquets MPEG-2 TS, et les multiplexe ensuite avec les tables SI générées par le système (satellite, NCC, GES...). Finalement les paquets sont codés et envoyés en DVB-S sur les faisceaux ciblés.

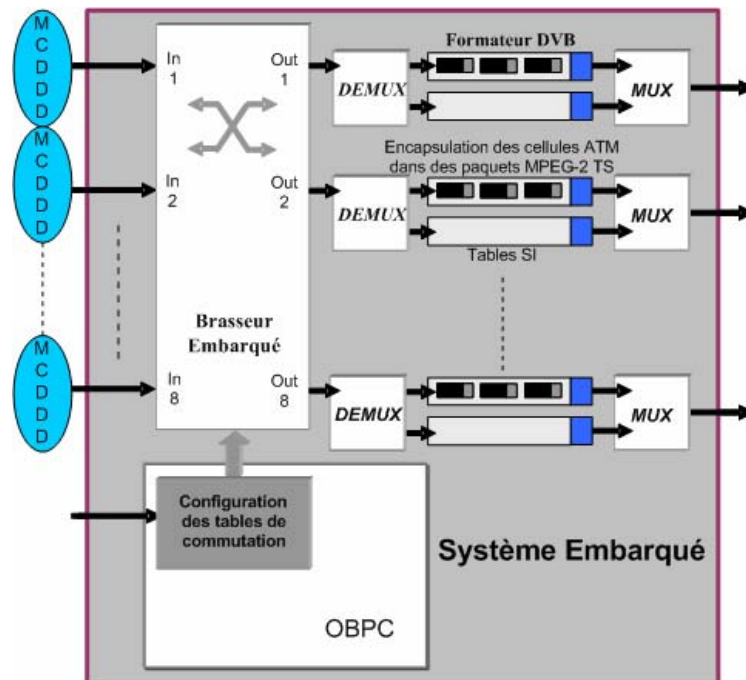


Figure 3.23 Schéma de l'OBP du système DIPCAST

#### 3.4.4.5. Une solution pour la commutation de flux multicast

Une fois la présentation de l'OBP et de son brasseur, nous pouvons aborder la mise en œuvre de la commutation bord et la résolution d'adresse associée à des flux IP *multicast*.

L'IP *multicast* sur ATM a été un long sujet de recherche, proposant plusieurs solutions. Une première réflexion nous a conduit à écarter rapidement la solution dite « LAN emulation » [53]. En effet cette solution ne répond pas du tout à notre objectif puisqu'elle propose une méthode diffusante qui ne permet pas d'économiser les ressources du système et rend la commutation bord inutile. Une autre solution reposant sur un « routeur-commutateur » ATM (ATM-switch-router) [54] n'est pas non plus appropriée à ce système dans la mesure où il n'est pas question dans ce projet d'intégrer un routeur IP à bord. Une autre possibilité consiste à utiliser les serveurs MARS (Multicast Address Resolution Server) [55]. Toutefois cette option pose la question de la localisation du serveur. L'intégration dans la NCC par exemple implique des délais élevés et une complexité accrue du système dans la mesure où de nouveaux messages doivent être mis en places. Dans notre cas, une solution plus spécifique au système a donc été envisagée.

Dans le but de brasser la cellule ATM nous avons deux possibilités : soit utiliser une méthode de *self-switching*, impliquant que la cellule contient en elle-même toutes les informations qui permettront de la commuter, soit du *label-switching*, utilisant un label et une table de commutation à bord pour pouvoir commuter la cellule. Comme il s'agit d'un brasseur, seul le VPi est disponible pour commuter la cellule. Dans le cadre d'une cellule UNI, celui-ci fait un octet, alors que pour une cellule de type NNI, ce champ fait douze bits (Figure 3.24). La norme DVB-RCS ne propose que d'utiliser les cellules de type UNI. Dans le cadre du projet DIPCAST, nous avons envisagé la solution UNI en priorité.

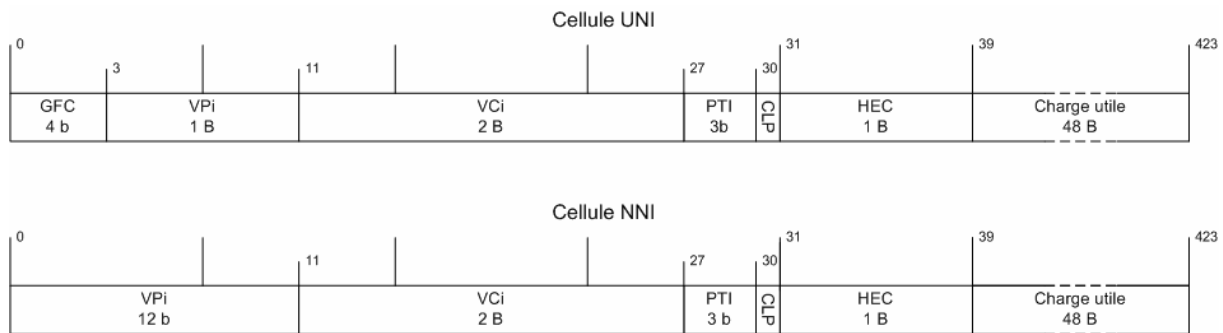


Figure 3.24 En-tête d'une cellule UNI et d'une cellule NNI

Si l'on considère alors le VPi d'une cellule UNI : un bit doit être utilisé pour indiquer s'il s'agit d'un trafic *multicast* ou pas, deux autres sont utilisés pour identifier le réseau sur lequel transite la cellule, il ne reste plus que 5 bits pour intégrer les informations *multicasts* si l'on restreint la gestion de la QoS aux stations sol. Le *self-switching multicast* sur 5 bits n'est pas envisageable puisqu'il n'est pas possible de faire la correspondance directe entre les *spots* cibles et les derniers bits du VPi. Cependant la méthode du *label-switching* est très limitée et sans aucune mise à l'échelle possible dans la mesure où 5 bits n'octroient par FAI que 32 groupes possibles. Il est néanmoins possible de proposer une solution adaptée si le système se prête à plusieurs conditions :

- le système peut desservir 1 à 4 INs (Interactive Network), un IN étant par exemple un FAI, un FSI ou un groupe de différents FAIs.
- le nombre de *spots* accessibles pour un IN ne peut être supérieur à cinq, ce qui est envisageable pour des applications dépendantes de la géographie.
- les GES et UES doivent savoir dans quel *spot* le prochain routeur se trouve. Cette condition n'est pas très contraignante dans la mesure où les adresses IP sont des éléments du système DIPCAST et peuvent donc être distribuées intelligemment.
- Une table embarquée et statique doit être implantée dans l'OBPC. Cette table est légère et ne nécessite pas de mécanismes de mise à jour rapide Cette table donne la



correspondance pour chaque IN entre les cinq derniers bits du VPi et les *spots* correspondants (Tableau I).

Tableau I. TABLE EMBARQUÉE DE CORRESPONDANCE ENTRE IN, VP ET SPOTS CIBLES

	VPi[X]	VPi[4]	VPi[3]	VPi[2]	VPi[1]	VPi[0]
IN	Corresponding spot					
0		1	2	6	7	8
1		5	6	8	-	-
2		1	3	5	7	-
3		2	3	4	6	7

Dans ce cadre une solution mixte est envisageable, utilisant les cinq derniers bits du VPi pour faire la correspondance avec les *spots*. Une fois qu'une station sol (UES ou GES) a reçu le datagramme, le mécanisme suivant est alors mis en place (Figure 3.25) :

- (1) L'adresse source et destination du datagramme sont lues. Dans le cas d'un datagramme *multicast*, la table *multicast* est interrogée.
- (2) Si une interface de sortie est l'interface air, l'interface d'entrée du datagramme donne son IN.
- (3) Après le traitement en QoS du datagramme, l'adresse source (s'il y a lieu), l'adresse *multicast* de destination et l'IN, donnent les cinq derniers bits du VPi de la cellule.
- (4) Après le traitement de la couche AAL5, le VPI de la cellule ATM est rempli. Le premier bit de la cellule est fixé à 1 pour signaler un trafic *multicast*, les deux suivants prennent la valeur de l'identifiant de l'IN tandis que les cinq derniers renseignent sur les *spots* associés.

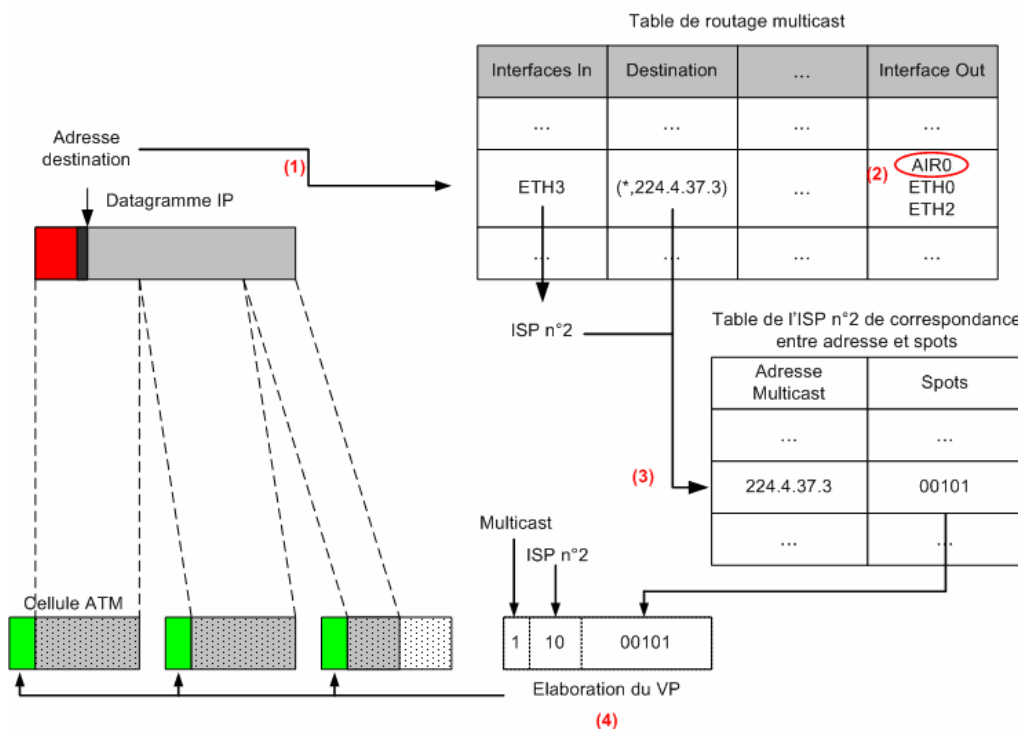


Figure 3.25 Traitement sol d'un datagramme multicast avant émission

Les cellules ATM sont alors rassemblées pour former un *burst* TRF, codées et envoyées au satellite. À bord le MCDDD restitue les cellules. Le brasseur les commute et les réplique en utilisant une table semblable à celle présentée ci-dessus. Ensuite les formateurs DVB encapsulent les cellules en utilisant un PID correspondant à l'IN et au *spot* descendant (5 PIDs max par IN et par flux *multicast*). Les GES et UES dans les faisceaux ciblés doivent récupérer ces données si elles appartiennent à l'IN, et écarter les données inutiles au niveau IP.

Cette méthode a deux défauts majeurs : d'une part elle peut difficilement être adaptée à des systèmes intégrant un grand nombre de *spots* (16, 32...), et d'autre part elle implique que toutes les stations d'un même IN et d'un même *spot* relèvent toutes les données reçues pour les écarter au niveau IP. Une première amélioration peut être apportée en utilisant les VCI pour permettre aux stations sol de différencier leur trafic *multicast* des autres trafics. Ainsi une station peut trier les cellules sans avoir à reconstituer les paquets IP.

La méthode proposée ci-dessus est cependant légère, n'impliquant aucun message de signalisation supplémentaire, vu que la table de commutation est quasi fixe. Il n'y a donc pas dans cette solution la complexité induite par une configuration dynamique de l'OBP.

L'utilisation de cellules NNI peut aussi être considérée comme alternative aux cellules UNI, attribuant ainsi 4 bits supplémentaires à la gestion de la commutation, permettant la mise en place d'une méthode de type label, mais requérant un protocole de mise à jour de la table embarquée.

#### 3.4.4.6. Configuration des tables du commutateur

Dans le cadre d'une solution intégrant du *label-switching*, nous avons vu la nécessité de mettre à jour les tables de commutation embarquée. Ce problème a été pleinement traité dans les réseaux terrestres, avec par exemple les commutateurs Ethernet [56] ou les adaptations d'ATM à l'IP *multicast* [57]. Pour le système satellite les solutions envisagées sont essentiellement les mêmes, c'est-à-dire :

- l'auto-apprentissage par analyse du trafic ;
- la définition d'un protocole spécifique.

En ce qui concerne les techniques d'auto-apprentissage, la correspondance entre datagrammes et trames est bien plus délicate pour un commutateur ATM ou MPEG qu'il ne l'est pour un commutateur Ethernet. Sur un réseau local Ethernet reliant un routeur aux clients multipoints, chaque paquet IP sera en effet véhiculé par une trame Ethernet unique et ne subira en aucun cas de fragmentation. Cette absence de fragmentation, et la forme fixe de l'en-tête d'un paquet IP véhiculant un message IGMP, permettent d'assurer une analyse suffisamment rapide des trames pour être réalisée par le processeur d'un commutateur Ethernet. La faible taille des cellules ATM et MPEG ne permet pas, en revanche, d'assurer une telle simplicité en cas d'utilisation d'un protocole tel qu'IGMPv3 [58]. L'auto-apprentissage ne semble donc pas être une solution acceptable pour le système DICAST régénératif, même en se limitant à l'utilisation d'IGMPv2 [59]. De plus la signalisation de niveau 2 doit être le plus possible indépendante de la signalisation de niveau 3 pour supporter le plus grand nombre de protocoles *multicast*. Enfin le système OBP DICAST n'a pas les capacités requises pour faire du *snooping* [60].

Il semble donc plus réaliste d'envisager une solution fondée sur un protocole spécifique de configuration à distance des tables de commutation de type CGMP (Cisco Group Management Protocol) [56]. La *gateway* ou la NCC sera alors responsable de la mise à jour de ces tables en fonction des abonnements et désabonnements des récepteurs aux différents groupes. Notons qu'une telle solution offre également l'avantage d'être adaptée aux stations uniquement réceptrices utilisant une voie retour terrestre. Le projet DICAST a donc opté pour cette solution, créant un

protocole spécifique, nommé SMAP (Satellite Multicast Adaptation Protocol) dont l'INRIA a été le maître d'œuvre de cette solution.

#### 3.4.4.7. Conclusion sur cette architecture

Le système proposé par le projet DIPCAST met en œuvre plusieurs des solutions techniques envisagées pour contribuer à l'efficacité du satellite comme médium de l'IP et particulièrement de l'IP *multicast*. Le projet a abouti à la réalisation d'une maquette physique incorporant les différentes solutions citées ci-dessus et supportant l'IP *multicast* via le protocole de routage PIM-SM. Des tests du système global ont été menés sous la direction d'Alcatel, démontrant la faisabilité du système ainsi que son bon fonctionnement. L'adaptation du protocole PIM-SM au cas satellite DIPCAST a été testée et validée dans ce cadre.

Toutefois ce travail reste une étude de cas, spécifique à une charge utile reposant sur un brasseur ATM, une technologie limitante pour certaines applications. De plus le système DIPCAST propose un support pour plusieurs services particuliers qui restent à ce jour insuffisants pour rentabiliser le prix d'un tel système. L'architecture DIPCAST régénérative représente un investissement de 1.5 à 2 fois supérieur au système transparent DIPCAST, rajoutant complexité et limitations. Enfin ce système est adapté à PIM-SM, mais pas à un autre protocole de routage *multicast*.

### 3.5. Un problème protocolaire : TCP sur satellite

Nous avons vu ici certains problèmes au niveau de l'interaction entre IP et la couche accès. Toutefois, le fonctionnement d'un système passe par d'autres niveaux que ces seuls ci. Aussi pouvoir supporter IP n'est pas suffisant, encore faut-il bien supporter les applications qui utilisent IP comme véhicule au sein des réseaux. Or la grande majorité de celles-ci utilisent TCP, dont le comportement sur les média sans fil, notamment satellite, n'est pas des plus probants.

L'une des causes majeures des problèmes rencontrés dans l'intégration d'IP sur satellite vient, en effet, de la relation délicate entre TCP et GEO : le satellite n'est pas un média pour lequel TCP a été conçu [61] [62]. Aussi, l'analyse de TCP fait partie des deux points les plus étudiés dans le cadre d'IP sur satellite, l'autre axe de recherches étant les méthodes d'accès au système. Notre travail ne vise pas à refaire ce type d'études, ni à proposer une solution définitive à ces problèmes délicats. Notre approche ici est plutôt tournée vers une authentification des différentes causes de ce problème, et quelles sont les nombreuses solutions que l'on peut trouver dans la littérature, comme dans les implantations réelles.

Cette partie observe cette démarche, en traitant dans une première section, les différents défauts de TCP, et leurs causes. Dans la section 3.5.2, un panorama des solutions à ces problèmes sera effectué, pour aboutir à une conclusion dans une dernière section (3.5.3)

#### 3.5.1. TCP standard et les limites de son utilisation sur satellite

La raison fondamentale de la mauvaise interaction entre TCP et les systèmes satellites vient de la nature même de ce type de lien : le fonctionnement global de TCP, qui n'est pas rappelé ici<sup>1</sup>, n'est pas prévu pour différentes caractéristiques de lien. Or les liens GEO cumulent un certain nombre de ces points :

- un délai de propagation élevé,
- une asymétrie souvent importante entre la voie aller et retour,
- une méthode d'accès dynamique délicate,

---

<sup>1</sup> Pour une introduction se référer à [63] ; pour une présentation complète se référer à [64].

- des erreurs physiques.

Chacune de ses raisons ne sont pas véritablement dissociées des autres, mais pour pouvoir clarifier notre approche, nous avons préféré aborder cette partie en les dissociant dans des sections distinctes.

### 3.5.1.1. Le délai de propagation

Un long RTT a pour premier effet de diminuer le débit maximum qu'une connexion TCP peut atteindre sur un lien. En effet, au maximum, on ne peut émettre que la fenêtre maximale du récepteur (*advertized window*) avant de recevoir le premier acquittement de cette fenêtre émise. Or la taille maximale de celle-ci est fixée à 65535 B [64]. De plus il s'agit d'une taille maximale qui n'est pas toujours utilisée (par exemple le FTP d'Unix utilise une maximum de 24 KB). On peut alors obtenir un majorant du débit avec la formule suivante (6)

$$(6) \quad D_{Max} = \frac{Avertized\_Window}{RTT}$$

Avec un RTT de 500 ms, on obtient alors un débit maximal d'environ 1043 Kb/s contre un débit de 393 Kb/s dans le cas d'une fenêtre maximale de 24 KB.

Le RTT influence aussi notablement la longueur de la phase de *slow start* comme celle de *congestion avoidance*, entraînant sur le lien satellite un débit limité pour une durée non négligeable.

Un dernier problème, typiquement lié au délai, est le calcul du RTT par TCP. En effet, le protocole de transport TCP se base sur l'évaluation du RTT pour calculer le RTO (Retransmission Time Out) [64]. Or l'estimation de ce RTT est effectuée à chaque émission de nouvelle fenêtre, ce qui peut poser un certain problème lorsque la taille de cette dernière est importante, surtout si le RTT fluctue beaucoup.

### 3.5.1.2. L'asymétrie

L'asymétrie du lien pose un problème important, comme nous aurons l'occasion de le constater à plusieurs reprises par la suite. Différentes études [42] [65] montrent l'influence du *ratio* d'asymétrie. En effet si l'on note  $T_1$  et  $T_2$ , respectivement le temps d'émission d'un datagramme (de taille *data*) sur le lien aller, et le temps d'émission d'un acquittement (de taille *ack*) sur le lien retour. Notons  $D_d$  et  $D_u$  les débits respectif de la voie aller (source vers terminal en passant par une *gateway*) et de la voie retour. On alors engorgement des acquittements dès que  $T_2$  est supérieur à  $T_1$ , soit, en fonction du débit du lien et de la taille de la donnée :

$$(7) \quad T_1 < T_2 \Leftrightarrow \frac{data}{D_d} < \frac{ack}{D_u} \Leftrightarrow \frac{ack}{data} > \frac{D_u}{D_d}$$

Or pour un débit aller  $D_d$  de 512 Kb/s, des acquittements de 40 B et une MSS de 1460 B, on obtient une valeur limite d'environ 13.7 Kb/s pour  $D_u$ . En deçà de ce seuil, il y a congestion des acquittements, et le trafic aller est ralenti par le faible débit retour des acquittements.

Un autre problème intimement lié est la notion d'autorégulation du flux TCP. En effet le temps d'arrivée des acquittements va être déterminant pour le flot de donnée aller. Aussi, en phase stationnaire de la communication TCP, on ne peut émettre qu'un paquet pour un acquittement reçu. Le nombre d'acquittements à la seconde est alors une borne supérieure sur le nombre de datagrammes émis à la seconde. Soit une borne sur le débit maximal de :

$$(8) \quad D_{MAX} = \frac{data}{T_2} = \frac{data.D_u}{ack}$$

L'application numérique donne la courbe suivante en fonction du débit de la voie retour (Figure 3.26). Il semble alors délicat de pouvoir profiter d'un débit important aller pour une connexion TCP, si le lien retour a un débit faible.

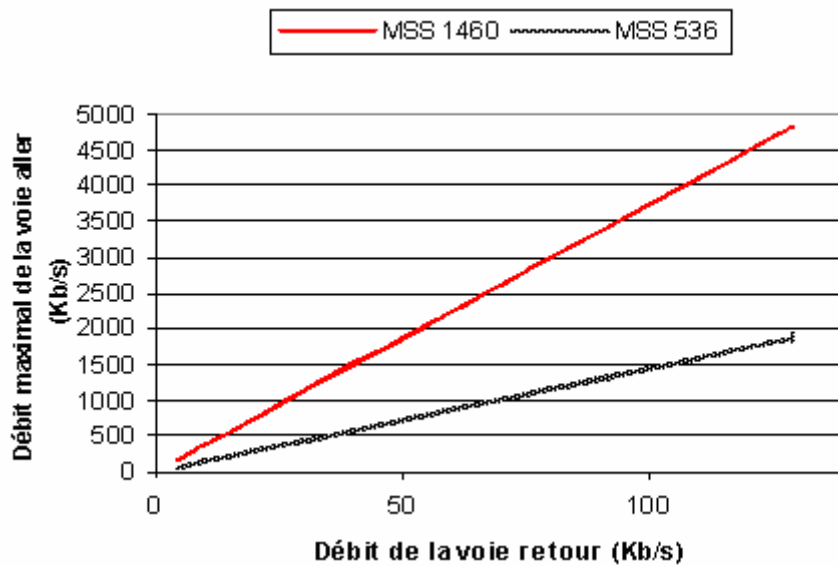


Figure 3.26 Borne supérieure sur le débit aller en fonction du débit de la voie retour

### 3.5.1.3. La méthode d'accès

La méthode d'accès satellite n'a une influence que dans le cadre d'un retour satellite. En effet, dans ce cas et par soucis de rentabilité de l'accès satellite, la réservation de capacité sur le lien retour est le plus souvent dynamique pour permettre des prix abordables. Ce type de méthode entraîne alors la mise en place d'un temps supplémentaire et variable pour avoir accès au média. D'une part le RTT est augmenté, influençant de manière négative la capacité de réactivité du système, et diminuant le débit maximal calculé précédemment (8). D'autre part, le RTT devient variable, entraînant des difficultés pour le calcul du RTO.

### 3.5.1.4. Les erreurs physiques

Un dernier obstacle à la bonne adéquation du satellite à TCP est son taux d'erreur plus important que sur les réseaux terrestres, d'autant plus que les pertes sur satellite suivent difficilement un quelconque modèle<sup>1</sup>. Pour TCP, une perte de paquet correspond à une congestion dans le réseau, or avec un média très bruité tel que le satellite, il n'en est pas forcément le cas. TCP va alors passer en *congestion avoidance* après l'écoulement du RTO. Cependant, si la perte est due au lien satellite, d'une part le débit va être diminué pour rien, et d'autre part, il peut y avoir réémission de segments inutiles. Dans le cadre d'une communication quasi point à point la *congestion avoidance* n'a pas lieu d'être, et la réaction de TCP aux erreurs satellites entraîne un fonctionnement bien en dessous des capacités du système.

Dans ce cadre, l'utilisation du *fast retransmit/fast recovery* va permettre d'améliorer la détection de pertes dues au bruit, grâce à la réception de duplicata des acquittements : Au troisième acquittement dupliqué, la source émet les paquets sans attendre le *time out*, entrant alors en phase de *fast recovery*, à la place du *slow start*. Ces mécanismes sont implantés notamment dans la version Reno [66] et NewReno [67] de TCP, et permettent de diminuer moins drastiquement le débit TCP.

<sup>1</sup> Nous aurons l'occasion de parler plus en détail de ce point dans la partie 5.1.

Toutefois du fait du long délai du média satellite, et des erreurs multiples sur une même fenêtre, ce mécanisme n'est pas toujours suffisant pour éviter le déclenchement du RTO, entraînant un impact déplorable sur le débit du système. Le problème des erreurs sur satellite est donc essentiellement couplé à celui du RTT élevé et incompressible.

### 3.5.2. TCP et ses adaptations au support satellite

Il existe beaucoup d'optimisations, de configurations et même de nouvelles versions de TCP avec comme volonté première une meilleure adaptation au satellite. Le RFC 2488 [68] propose dans ce cadre quatre type d'améliorations : le paramétrage de TCP, les modifications protocolaires de TCP, les mécanismes d'autres niveaux et les passerelles.

Les mécanismes d'autres niveaux étant pour la plupart applicatifs (comme il en est le cas pour XFTP par exemple [69]), leurs spécificités rendent leur présentation inutile dans le contexte général de cette étude. Nous découperons notre exposé en un panorama des paramétrages judicieux de TCP au support satellite dans la section 3.5.2.1, une description des extensions de TCP avec notamment des versions spécifiques aux média de type satellite et sans fil (3.5.2.2), et enfin une présentation des modifications dites transparentes (3.5.2.3).

#### 3.5.2.1. Les optimisations comportementales de TCP pour le support satellite

Une amélioration du comportement de TCP sur satellite peut simplement être apportée par un paramétrage plus adapté. En effet, les instanciations de ce protocole de transport partent du principe qu'ils sont sur un réseau de type terrestre, et leurs paramètres initiaux sont configurés de manière à être *TCP friendly* pour les autres communications. Or sur un lien satellite, au délai élevé, il ne sert à rien d'attendre une phase de *slow start* longue avant de pouvoir émettre à un rythme optimal. Ainsi on peut améliorer en partie le comportement de TCP sur satellite par un paramétrage *ad hoc* [68].

Parmi ces optimisations on peut noter :

- l'utilisation d'une taille de fenêtre de congestion initiale plus grande, permettant d'améliorer ainsi le temps de la phase de *slow start* assez longue sur satellite[68][69],
- la mise en place de Path MTU Discovery [71] pour permettre l'utilisation des segments les plus grands possibles,
- l'utilisation d'une fenêtre récepteur plus grande, avec notamment l'option *window scale* [68] [70]<sup>1</sup>.
- l'estampillage de datagrammes pour un calcul plus réactif du RTT [70],
- l'utilisation d'acquittements retardés [72], pour permettre de soulager la charge induite par les acquittements sur le lien retour<sup>2</sup>.

Ces optimisations apportent des améliorations certaines, mais implique aussi d'autres problèmes. Ainsi l'augmentation de la taille maximale de la *cwnd* (*congestion window*) permet d'avoir un meilleur débit sur le lien, mais accentue le risque de pertes multiples dans une même fenêtre, tandis que le Path MTU Discovery implique un temps d'établissement de la connexion TCP plus important. Pour ce qui est de l'estampillage des datagrammes, ils ajoutent de l'*overhead*, qui peut poser problème notamment au niveau de la voie retour. Les acquittements retardés, quant à eux,

---

<sup>1</sup> Cette solution aurait pu être traitée dans la section sur les modifications protocolaires, mais nous avons choisi de la présenter ici dans la mesure où ce mécanisme est suffisamment reconnu.

<sup>2</sup> De même cette solution pourrait être classifiée dans les solutions protocolaires, toutefois elle est assez commune pour être traitée ici.

réduisent le débit en *slow start* et *congestion avoidance*. Il y a donc un choix à faire entre le gain que peut apporter certaines de ces options, et leurs défauts.

### 3.5.2.2. Les évolutions protocolaires de TCP

Dans une certaine mesure les optimisations de TCP ne sont pas toujours suffisantes, des propositions optent alors pour des modifications protocolaires. Il faut noter toutefois, avant de commencer cette section, que certaines de ces évolutions (comme TCP SACK) n'ont pas été uniquement créées pour le satellite.

Les modifications protocolaires de TCP sont nombreuses<sup>1</sup> [68] [70] [73]. On compte par exemple des modifications permettant d'éviter la *congestion avoidance*, avec notamment le *fast retransmit/fast recovery* dont nous avons déjà parlé précédemment pour TCP Reno et TCP New Reno. D'autres modifications proposent des algorithmes pour améliorer les performances des mécanismes de TCP, comme l'algorithme CANIT (Congestion Avoidance with Normalized Interval of Time) pour la *congestion avoidance* [74].

En ce qui concerne les flux d'acquittements on trouve des mécanismes au niveau TCP (ou au niveau physique) : les mécanismes d'espacements, de compressions, de suppressions d'acquittements. Toutefois ils ne sont pas complètement satisfaisants. La suppression d'acquittements, par exemple, réduit de manière significative la congestion des acquittements en réduisant le *ratio* entre acquittements et segments, passant de 1/6 à 1/15 voire 1/150 [26]. Mais cette technique a de mauvaises performances sur de courts transferts, notamment parce que le *slow start* repose sur le nombre d'acquittements reçus.

En ce qui concerne les versions de TCP adaptées au satellite, on compte, par exemple, la version TCP SACK [75] qui permet des acquittements sélectifs de paquets. Cette solution combinée au *fast retransmit/fast recovery* offre la possibilité à l'émetteur de répondre à des erreurs multiples directement, en rémettant les paquets manquants. Une autre version de TCP, TCP Westwood [76] [77] [78] propose une optimisation de la gestion de la *cwnd* dans le cas de pertes multiples sur un lien à haut débit, en surveillant le temps d'interarrivée des acquittements. Plusieurs études de cette solution sont parues, notamment [76] et [78].

### 3.5.2.3. Les solutions de type passerelle

Les optimisations de TCP et encore plus spécifiquement les extensions de TCP impliquent souvent une mise en œuvre de bout en bout, ou tout du moins un impact sur les entités communicantes. Or il n'est pas, d'une part, toujours possible d'avoir la source et le client avertis qu'ils utilisent un lien satellite, notamment lorsque la source est serveur quelconque sur le *web*, et/ou que le satellite est utilisé comme lien *backbone*. D'autre part, si des modifications sont mises en place, celles-ci vont affecter tout le réseau traversé et non pas uniquement le lien satellite, au risque d'avoir un comportement indésirable sur à la traversée de réseaux terrestres.

L'utilisation d'entités intermédiaires est alors une solution pour implanter ses modifications de manière transparente. Ces passerelles sont alors nommées des PEPs (Performance Enhancement Proxies) [79] [80]. Grâce à ce type de solutions, l'implantation des mécanismes et des protocoles précédemment cités peut être effectuée de manière transparente. Pour une meilleure gestion du filtrage d'acquittements, une technique consiste par exemple à régénérer les acquittements manquants via un autre *proxy*, du côté FAI, ou à passer dans ce mode qu'une fois le *slow start* terminé. Des techniques plus élaborées existent, comme l'agrégation d'acquittements (*ack compaction*) et offrent de bonnes perspectives [42]. Cependant il reste encore à traiter la mauvaise réactivité de ses solutions face aux erreurs.

<sup>1</sup> Pour une vision plus complète de des recherches sur TCP sur satellite se référer au RFC 2760.

Il existe un réel besoin de pouvoir intervenir directement au niveau TCP. Une solution possible utilise les TCP PEPs ; le principe consiste alors à isoler le système satellite des autres réseaux, en utilisant des *proxies* pour intercepter les données et à implanter à ce niveau tout changement pour le lien satellite. À la sortie du système, un autre *proxy* restitue les données initiales en enlevant les changements effectués pour le satellite. Cette fragmentation de la connexion TCP entre la source et le destinataire en trois morceaux (Figure 3.27) se nomme *spoofing* [81] [82]. Dans une communication utilisant le *spoofing*, le client et le serveur croient communiquer directement entre eux, alors qu'ils ne communiquent qu'avec leur *proxy*.

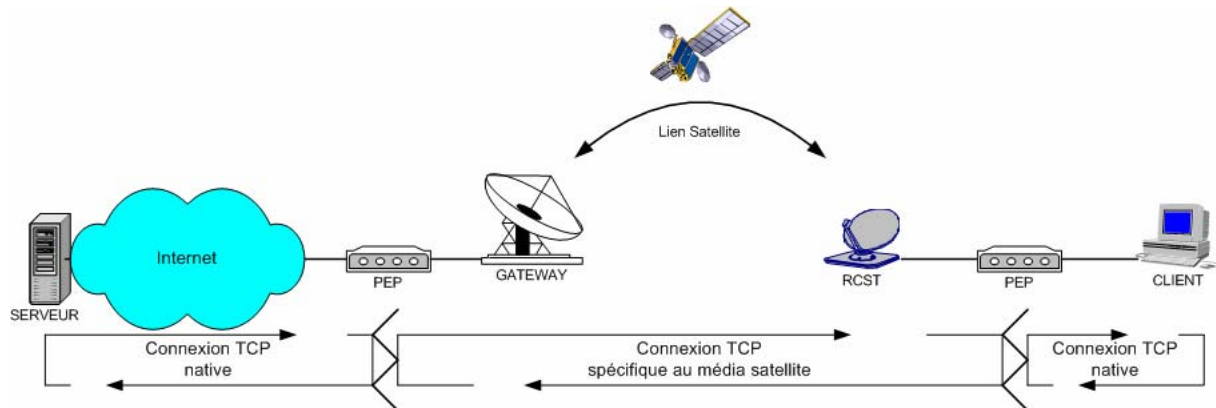


Figure 3.27 Principe de *spoofing* TCP – utilisation de *proxies*

Comme le montre la figure ci-dessus, cette « boîte noire » chez l'utilisateur du lien satellite permet d'implanter toutes les modifications vues précédemment tout en gardant un interfaçage standard, propice à la standardisation. Parmi les modifications que le *spoofing* peut apporter, on peut noter les versions spécifiques de TCP, comme par exemple SACK TCP, et TCP Westwood dont nous avons déjà parlées. D'autres propositions semblent intéressantes dans ce cadre. Ainsi l'utilisation de sessions multiples TCP [81] pour une même connexion native peut donner de bons résultats sur un système satellite. En effet, le risque d'un comportement peu conforme à TCP ne se présente pas ici où ce type de session est restreint à la portion satellite.

Il faut nuancer toutefois l'apport des *proxies* par un ajout notable de complexité dans le système, notamment au niveau matériel, puisque les TCP PEP doivent alors être en mesure de stocker les données pour pouvoir les renvoyer en cas de pertes. Ils peuvent aussi poser problème dans le cadre de mécanismes de bout en bout, notamment ceux de sécurité (IPsec par exemple).

Néanmoins, ces limites ont une influence très relative comparée au gain de performances que peuvent apporter les PEPs sur un système satellite. Sur les VSATs, cette technique est connue depuis longtemps, et les offres pour l'accès Internet par satellite ont commencé à proposer ces solutions<sup>1</sup>. Les PEPs offrent donc de bonnes perspectives pour les systèmes à contraintes physiques particulières où le traitement par les couches traditionnelles OSI n'est pas toujours facile. Dans ce cadre, on peut noter des propositions allant jusqu'à utiliser l'intelligence embarquée pour instancier des PEPs à bord [83], traitant chaque lien indépendamment des autres. Bien sûr, l'introduction d'un niveau 4 à bord reste du domaine de la proposition, tant que le niveau 3 n'est pas encore une réalité.

### 3.5.3. Conclusion sur le problème de la couche transport TCP

Nous avons clairement rappelé ici les obstacles au bon fonctionnement de ce protocole sur un système satellite. Or TCP est devenu, de par son lien étroit avec IP, un protocole nécessaire à

<sup>1</sup> On peut notamment citer [www.newtec.be](http://www.newtec.be) [84]



un grand nombre d'applications. Un axe de recherche s'est donc développé pour améliorer TCP en proposant des réglages adaptés du protocole, mais aussi des évolutions de TCP allant de mécanismes de gestion des acquittements à des versions complètes du protocole. Un type de solutions, prometteur pour beaucoup de système, est l'utilisation de PEPs. Ces passerelles, si elles vont à l'encontre de la connexion de bout en bout, permettent d'isoler le lien satellite, et d'y apporter les modifications protocolaires adaptées, sans influencer les autres réseaux traversés par le flux. Cette solution a l'avantage remarquable d'être transparente pour les utilisateurs finals, et peut même l'être pour les réseaux traversés autres que le système satellite, avec des mécanismes tels que la régénération d'acquittements.

### 3.6. Conclusion

Le satellite comme support d'IP est une réalité. Bien sûr, contrairement aux réseaux terrestres, aucune solution ne s'impose en maître sur les autres. Mais, dans ce cadre, le DVB-S se positionne comme un support de choix, de par son succès et donc son internationalité. Nous avons donc étudié le DVB-S comme support d'IP, surlignant les solutions classiques mais aussi les limites de ces dernières. Nous avons alors observé comment le standard DVB-RCS propose de palier le manque d'interactivité du DVB-S en offrant une voie retour satellite. Toutefois les autres limites subsistent, demandant un développement de nouveaux protocoles pour l'encapsulation et l'AR, comme de nouvelles technologies.

Ainsi nous avons étudiés ces solutions, montrant les possibilités offertes par l'OBP et les multifaisceaux. Toutefois nous avons pu constater un autre problème, lié aux couches supérieures, celui du comportement de TCP sur satellite. Une fois les causes de cette inadéquation rappelées, un grand nombre de solutions ont été dénombrées, comme notamment les PEPs.

Ainsi, cette partie a montré les difficultés de l'implantation d'IP sur satellite, mais surtout qu'il y avait des solutions techniques comme protocolaires existantes. Toutefois, ce n'est pas pour autant qu'il ne reste pas de problèmes. Ces différentes études posent une question fondamentale : la justification du coût du système. Plusieurs des solutions technologiques proposées (OBP, multifaisceaux) ont un impact non négligeable sur la complexité et le coût du système final. De plus ces solutions n'apportent pas toujours une amélioration au système pour un service donné. Dans le cadre d'un service de diffusion de télévision numérique à échelle continentale par exemple, le traitement bord et le *multi-spots* n'apportent pas un gain assez important pour justifier un prix si élevé.

De plus, même si ces technologies offrent de bonnes perspectives pour un service, un système coûteux dédié à un unique service est-il vraiment rentable (surtout si les services viennent à changer) ? Ce genre de solutions apporte une trop grande spécificité du système, dépendant intégralement d'un type d'applications. Le manque d'évolution possible d'un système et sa dépendance à un seul service sont des freins notables au développement des solutions satellites.

L'intelligence embarquée comme le *multi-spots* peuvent apporter un souffle nouveau aux systèmes satellites et à leurs applications. Mais la trop grande spécificité d'un système, le manque d'applications *ad hoc*, ou encore les problèmes d'uniformisation des méthodes de résolution d'adresse restent des obstacles importants pour les satellites de nouvelle génération.

Il s'agit donc de justifier dans un premier temps l'utilité de ces techniques et de montrer qu'elles peuvent être utilisées pour plusieurs services porteurs, tout en apportant une solution de transition entre les satellites actuels et futurs, ouvrant vers une architecture adaptable. C'est ce travail que nous nous proposons de réaliser à travers le chapitre 4 et 5 de ce mémoire, en proposant une architecture hybride et en l'évaluant.

## 4. PROPOSITION D'UNE ARCHITECTURE HYBRIDE

L'étude des différentes solutions, existantes ou à venir, de déploiement des protocoles de l'Internet au travers d'un lien satellite a clairement montré que les problèmes technologiques et protocolaires sont désormais clairement identifiés et que des réponses existent.

Au-delà de ces solutions technologiques, une nouvelle difficulté se dessine, celle de l'intégration. Il s'agit ici d'une intégration au sens large, se déclinant sous différents axes :

- les différents services susceptibles d'être déployés sur un système satellite (diffusion vidéo, (N)VoD, accès Internet, ...) seront plus simples à mettre en œuvre (et donc plus efficaces) s'ils le sont sur une base commune aussi large que possible. La répartition des ressources entre eux au grès des évolutions de la demande en sera également simplifiée.
- l'interaction avec d'autres modes de communication (terrestre en particulier) sera plus naturelle si elle est envisagée dès le départ. Il peut s'agir de l'association d'une voie retour, d'un réseau local avec ou sans fil permettant de partager le lien satellite, *etc...*
- l'intégration des technologies en cours de déploiement ou à venir sera grandement facilitée par une architecture globale ouverte et clairement découpée, comme nous le prouvons régulièrement les évolutions de l'Internet.

Le but de ce chapitre est alors de définir une architecture globale permettant d'intégrer divers types de services susceptibles d'utiliser un maillon satellite et différentes technologies satellitaires.

Au cœur de cette architecture se trouve la notion de charge utile hybride, c'est-à-dire intégrant une partie transparente traditionnelle et une partie régénérative utilisant une intelligence embarquée plus ou moins évoluée. L'apparition progressive d'une puissance de calcul à bord de plus en plus efficace semble en effet inéluctable. Mais il est également clair que pour des raisons technologiques comme économiques, cette capacité ne pourra, au moins dans un premier temps, suffire à réaliser des traitements complexes sur l'ensemble des flux, ce qui serait au demeurant, inutile, comme nous le verrons.

Ce chapitre est donc structuré de la façon suivante. Nous étudierons dans une première partie les besoins (vis-à-vis de l'architecture) des différents services. Notre étude reposera pour cela sur trois exemples de services jugés pertinents et représentatifs. Nous décrirons alors dans la section suivante les objectifs d'une telle architecture. La section 4.3, qui constitue l'essentielle de ce chapitre, sera consacrée à la description de l'architecture. Signalons dès à présent que de nombreux choix technologiques seront faits en fonction du contexte actuel du monde satellite, mais qu'aucun d'entre eux n'est critique pour le bon fonctionnement de l'architecture globale. Nous concluons alors ce chapitre en montrant comment les services peuvent s'intégrer au sein de l'architecture ainsi définie.

### 4.1. *Les besoins des services*

De la partie 3 ressort la nécessité d'analyser différents services, et leurs besoins en termes d'architecture satellite. Une étude exhaustive des services est toutefois hors du cadre de ce travail. Nous envisageons ici l'analyse des besoins architecturaux de trois services cibles : la VoD, l'accès

Internet et l'interconnexion de réseaux. Nous observerons les raisons de ce choix en portant l'accent sur l'intérêt de les déployer sur satellite, et sur la manière dont cela doit être fait.

L'organisation de cette partie est donc découpée en quatre sections.

La première propose l'étude du service de VoD (4.1.1). Nous y observons après une définition de ce que l'on entend par ce service (4.1.1.1), comment le satellite est un média de choix pour ce service (4.1.1.2). La section 4.1.1.3 propose différentes architectures réseaux déjà existantes ou envisagées ici, mettant en œuvre la VoD par satellite et les étudie qualitativement. Les sections 4.1.2 et 4.1.3 étudient respectivement l'accès Internet et l'interconnexion de VPNs, en suivant la même approche que celle utilisée pour la VoD. La section 4.1.4 conclut alors cette étude en soulignant les besoins différents de chacun de ces services.

#### 4.1.1. Vidéo à la demande

Naturellement diffusant et adapté au multimédia, le satellite offre un support de choix pour la Vidéo à la Demande (VoD). La VoD est donc le premier service présenté ici, faisant le lien entre les services actuels de télévision numérique sur satellite et d'autres services plus proches d'IP comme l'accès Internet.

##### 4.1.1.1. Quelques éléments sur la vidéo à la demande

Les services de VoD sont singuliers, posant plusieurs questions : l'utilisateur doit-il recevoir ce film de manière instantanée ou après un laps de temps à spécifier ? Cette vidéo doit-elle être regardable en instantané ou pouvoir être stockée ? Quelle est l'étendue du choix du média ? Dans ce cadre, on dégage généralement deux services : la VoD et la NVoD (Near Video on Demand). La NVoD est un service où la demande n'est pas directement considérée, puisque reposant sur une émission en continue et le choix d'acheter ou pas une séance. Mais la limite entre VoD et NVoD se resserre de plus en plus avec l'évolution actuelle de ce service.

###### 4.1.1.1.1. VOD ET NVoD

La NVoD a peut-être été le plus ancien de ces services. D'abord déployée sur le câble, elle s'étend aux satellites commerciaux, avec Kiosque. Il s'agit d'un service assez cher, qu'il soit sur TPS ou Canalsatellite. Ce service propose de la vidéo en push, c'est-à-dire l'émission de films en boucle sur plusieurs chaînes, offrant un temps d'attente de 30 à 60 minutes pour les médias les plus courants. La NVoD a plusieurs défauts importants :

- Monopolisation de canaux de manière permanente pour émettre un film, ce qui conduit inévitablement à un choix très restreint de médias.
- Indépendance de la demande ce qui peut aboutir à des émissions à pertes et donc à un coût élevé du média.
- Nécessité d'une voie retour pour commander le film. Le câble a l'avantage d'être bidirectionnel, alors que pour le satellite, l'IRD doit utiliser une ligne téléphonique.
- Pas de réelle marge temporelle pour regarder le film, le client est obligé d'attendre la prochaine session, 60 minutes pour un film courant cela peut être rédhibitoire. De plus le média est une émission et donc il ne peut être visionné qu'en temps réel. Si le client doit s'absenter, il a gaspillé plus de 5 euros.

Les décodeur-enregistreurs avec Pilotime de Thomson et Platinum de Sagem, offrent un palliatif récent à ce dernier problème [86].

L'avantage incontestable de la NVoD est la simplicité du système à mettre en place : du cryptage (ce qui est d'ailleurs fourni par le câble comme les satellites) et la mise en place d'un mécanisme de commande, lié au cryptage.

Face à ce service, on retrouve la VoD. Au contraire de la NVoD, ce service propose un véritable choix à ses utilisateurs, avec la présence d'un catalogue plus ou moins fourni. D'un point de vue temporel le service peut être plus ou moins immédiat, avec une nette répercussion sur les prix et/ou la qualité. Les émissions immédiates sont très dépendantes de la connexion de l'utilisateur (en particulier son débit) et de l'état du réseau entre ce dernier et le fournisseur de services, puisqu'il s'agit dans la plupart des cas de *streaming*. Mais le délai entre la commande et la réception peut être plus grand dans la mesure où un moyen de stockage est possible. Ainsi, l'on peut prévoir un téléchargement de nuit, pour avoir le film disponible le lendemain. Ce genre de services n'est certes pas immédiat, mais des systèmes de programmation sont alors possibles, la limite distincte avec la NVoD devenant moins nette.

L'avantage d'un tel service réside dans l'émission d'un média que lorsqu'il est réellement demandé. Puisque certains modes permettent d'attendre avant l'émission de la vidéo, différents utilisateurs peuvent la sélectionner. Aussi il serait envisageable d'envoyer la donnée une seule fois vers tous les utilisateurs. La VoD de ce type trouve de l'intérêt dans le *multicast* [87], ce dernier étant généralement effectué au niveau applicatif ou transport. Toutefois l'utilisation du *multicast* de niveau trois couplé à un média diffusant pourrait présenter pour ce service un attrait majeur, offrant une véritable économie de bande passante, et donc un prix réduit de l'accès au média.

#### 4.1.1.1.2. PERSPECTIVES DE LA VOD

En 2002, la VoD se présentait comme un service de choix pour le câble. Le câble, support bidirectionnel, facilite la commande des média, alors que les systèmes satellites offrant une voie retour directe sont coûteux et donc peu répandus. Des études avaient même prédit que la télévision par câble gagnerait sa lutte de marché contre les services TV par satellite grâce à cette soit disant *killer application* [88]. Aujourd'hui on peut facilement conclure à une erreur de pronostic : le câble et le satellite sont certes en concurrence, mais leurs atouts spécifiques permettent de cibler des clients différents [89]. Ainsi, en milieu urbain l'utilisation reste majoritairement celle du câble, grâce au câblage de quartiers entiers. Le satellite est une solution plus aisée et moins chère pour les milieux plus ruraux voire isolés, les maisons privées et les banlieues.

Il faut toutefois noter que la VoD est loin d'être un service très porteur. En effet la moyenne de vidéos louées par un français est de six films par an, ciblant de préférence les 16-34 ans. De plus les récents déboires des producteurs de disques freinent en grande partie les services de VoD sur le *web*, même si un film est moins « volatile » qu'un fichier audio. Dans ce cadre, la VoD ne peut pas être considérée comme rentable en tant que service unique, mais comme un complément intéressant à d'autres services. Certains experts considèrent même qu'un tel service n'apportera pas de clients en plus, mais permettra de les fidéliser avec un « joli complément » [90].

Malgré cela la Vidéo à la demande est depuis 2001-2002 au cœur des investissements et des recherches des différents groupes axés sur la communication et le multimédia (France Télécom, Monaco Télécom, MC Câble, Tiscali...), avec deux pays leaders dans le domaine les Etats-Unis (MovieLink.com) et la Corée du Sud. L'Europe et plus particulièrement la France ont su aussi investir dans le domaine. Ainsi la VoD est présente dans 100% des projets de télévision sur ADSL avec notamment TPSL ou MaLigneTV. On peut trouver facilement quelques exemples de la prolifération de ce service sur les infrastructures terrestres :

- Movie-System [91] qui, après une expérience peu concluante de télévision ADSL en 2002 (Sézame TV), a fini par trouver une bonne conjoncture avec MaLigneTV.
- L'association de MC Câble avec NetCiné (09/07/03), reprenant le projet Sézame TV.
- Le projet de Tiscali en Juin 2004 avec la volonté d'intégrer différents services de manière progressive (domotique, vidéo surveillance, santé en ligne...)

- NetCiné.com qui propose de la VoD via Internet et cela quel que soit le FAI.

La VoD est donc un service en vogue ces dernières années. Il faut toutefois le considérer, à l'heure actuelle, comme un complément et non comme l'unique service offert par un système. La VoD est donc un candidat parfait à l'intégration de services.

#### 4.1.1.2. *Le satellite comme support de la vidéo à la demande*

La VoD via la diffusion par satellite semble pouvoir avoir un bel avenir. En effet les spécificités du satellite deviennent vite des avantages pour ce service (large couverture, hauts débits, accessibilité, facilité du *multicast*...). Le satellite se présente de plus comme un média parfaitement adapté au transport de flux multimédia, grâce à sa compatibilité totale avec le MPEG-2. La VoD apparaît pour lui comme un complément de service pouvant tirer avantage de son support diffusant. Dans le cadre d'un marché de plus en plus concurrentiel, elle peut apporter le « plus » indispensable au développement des satellites.

La mise en œuvre de ce service sur satellite pose quelques questions dont les principales sont regroupées dans les trois points suivants :

- La requête des média : cet élément comprend d'une part la gestion d'une voie retour pour faire parvenir la requête aux serveurs multimédia, voire le paiement, et d'autre part la consultation du catalogue de média disponibles. Cette requête peut être gérée de différentes manières :
  - indépendante du système, via par exemple un site *web* auquel le client accède et commande le média,
  - semi dépendante, avec émission de catalogue de manière périodique vers l'IRD, une ligne téléphonique pouvant être utilisée pour commander le média après consultation,
  - dépendante, avec une gestion via un lien retour complet intégré dans l'IRD.
 Excepté dans le cadre d'un besoin de lien retour pour la gestion des erreurs, ce qui reste rare, la dernière solution n'apparaît pas comme adaptée au problème puisqu'une voie retour n'est pas indispensable pour de tels services.
- Le support de transport des flux de données : il existe deux solutions potentielles à savoir l'utilisation du support MPEG-2 TS du DVB-S ou l'utilisation des datagrammes IP. D'un côté le support MPEG-2 TS est adapté directement à la vidéo, mais il n'est pas sûr que le fournisseur ni les clients soient directement connecté à la *gateway*. De plus le MPEG-2 n'est pas le seul format possible, sa pérennité étant remise en question par le MPEG-4, idéal pour l'intégration des média. D'un autre côté le support IP propose une intégration facile au prix d'une seule sur-encapsulation. Les flux natifs sont donc considérés mais comme une simple opportunité.
- La gestion des émissions de films. Il s'agit d'une question délicate qui peut vite transformer la nature diffusante du satellite en un désavantage. En effet, dans le cadre d'émission de média haute définition instantanément après une requête, très peu de clients peuvent être servis à la fois. De plus émettre sans aucun temps d'attente implique nécessairement de faire du 1 film pour 1 client, sauf si les clients acceptent de prendre le film en cours. Le service devient alors très cher mais peut-être envisagé pour des clients importants tels que des chaînes d'hôtels. Une solution pour offrir ce type de service à des particuliers est la mise en place d'un système de votes. Le film est émis à heure fixe, et correspondra aux choix de la majorité. L'émission peut aussi être effectuée sous un format plus compressé, avant une heure donnée. Le film doit alors être stocké pour être visionné. Ces dernières solutions paraissent plus rentables et accessibles dans le cadre de la VoD sur satellite, puisqu'elles permettent de mettre à profit son support diffusant pour distribuer le média à plusieurs utilisateurs à la fois.

Un tel service ne peut alors se développer qu'à condition d'une gestion des requêtes de film et donc de la bande passante satellite. Un dernier point positif pour l'insertion du satellite dans la VoD, est sa nature adaptée à l'évolution des services. Contrairement au câble qui nécessitera toujours une infrastructure lourde, le satellite se place comme une technologie ouverte à l'ère du portable et de la mobilité. Son couplage avec les ondes terrestres (DVB-T, WiFi, UMTS...) offre des perspectives encourageantes, comme notamment la distribution sur téléphones portables [9].

L'incrémentation évolutive tout comme les différentes perspectives présentées ici peuvent alors conduire à différentes architectures.

#### 4.1.1.3. Différentes architectures réseaux de vidéo à la demande sur satellite

Nous nous proposons d'étudier dans cette partie l'intégration d'un service de VoD sur un système satellite. La figure suivante (Figure 4.1) présente différents types d'architecture de VoD via un système satellite. Ce schéma dégage cinq architectures, différentes en terme de technologie utilisée, que nous allons décrire dans les paragraphes suivants.

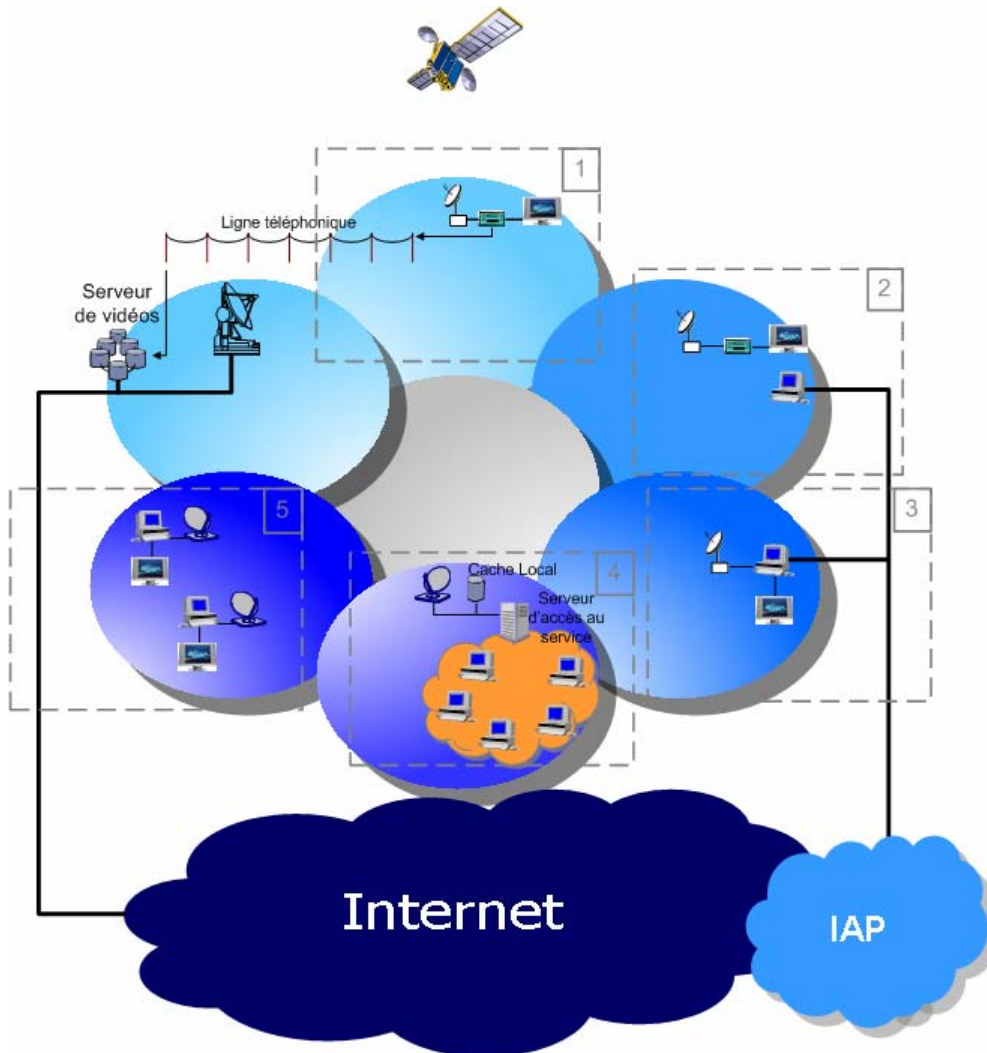


Figure 4.1 Cinq architectures de VoD sur un système satellite géostationnaire

Comme on peut le constater à première vue, les architectures de 1 à 3 proposent un accès au service par une voie autre que le satellite, alors que les solutions 4 et 5 sont fondées sur un lien bidirectionnel avec le satellite. Chaque topologie présentée ici implique une mise en œuvre spécifique du service de VoD, soit des services différents.

4.1.1.3.1. TOPOLOGIE 1

La topologie 1 met en œuvre un service similaire au service « classique » de NVoD, disponible de nos jours sans aucun changement sur les satellites de diffusion TV standard, avec comme différence fondamentale la possibilité de choisir la vidéo plutôt que d'avoir accès à un défilement de films en boucle.

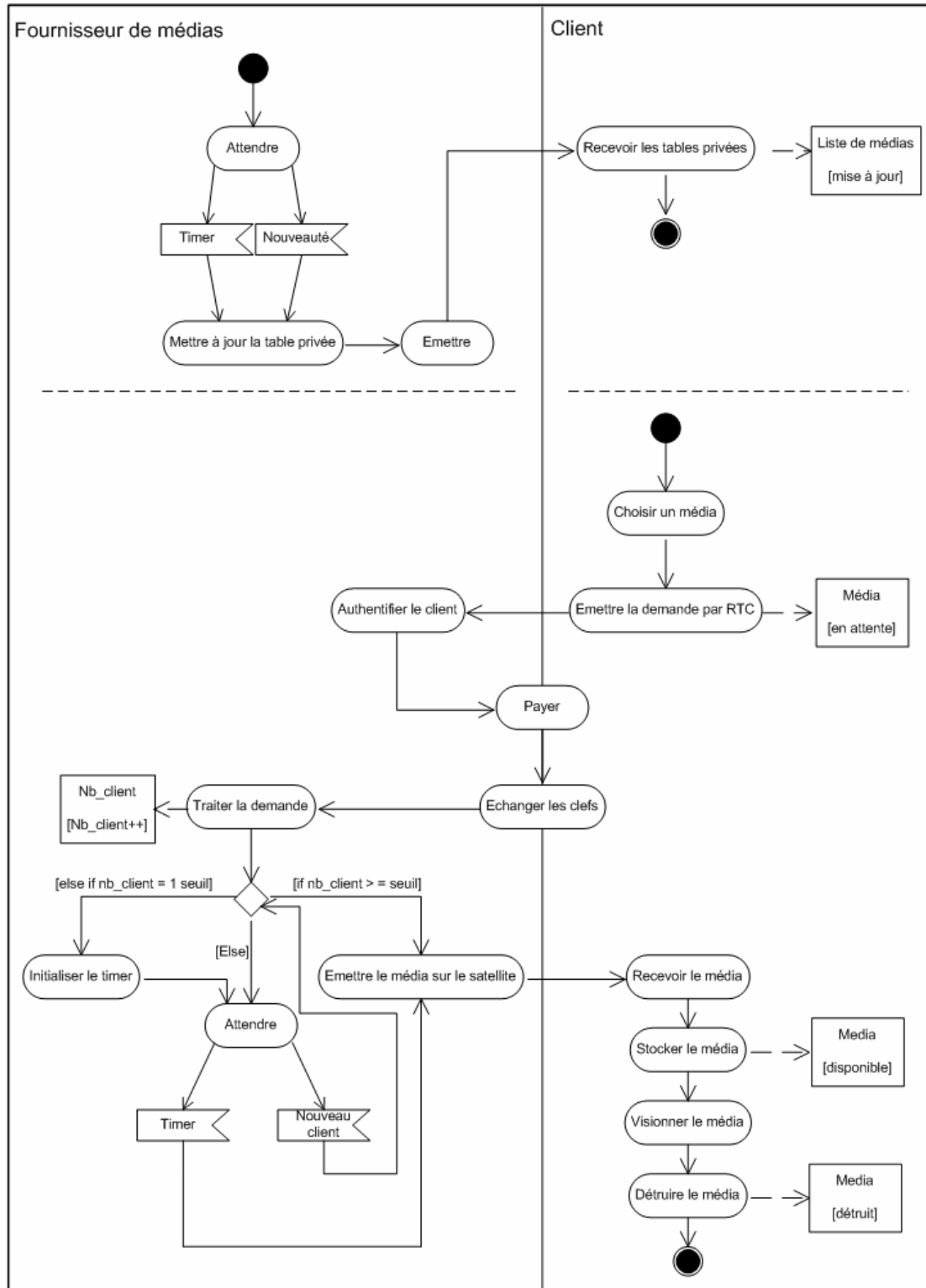


Figure 4.2 Diagrammes d'activité caractéristiques de la topologie 1

Le fonctionnement du service est alors décrit par le mécanisme proposé dans la figure précédente (Figure 4.2). Ce schéma regroupe deux diagrammes d'activité.

Le premier présente la mise à jour des média disponibles pour l'utilisateur. Ceux-ci sont consultables par l'utilisateur via la lecture des tables privées associées au service de VoD par son IRD.

Le deuxième retrace la vie d'une demande/acquisition/destruction d'un média : une transaction complète entre le fournisseur de service et un client. On peut noter différents points sur ce diagramme :

- Certains points ne sont pas détaillés par souci de lisibilité d'une part, et parce que les implantations peuvent être très différentes, comme par exemple le choix du média ou la procédure de paiement.
- Un choix particulier a été fait dans cette description, celui d'utiliser la méthode de deux seuils dont un doit être atteint pour envoyer la donnée, un temporel et un en nombre de requêtes.
- Il est toujours possible d'affiner cette représentation en insérant, par exemple, un lien entre le temps maximal écoulé entre la requête et l'émission du média, et le prix final du service. Cependant, ce travail s'éloigne trop de notre étude et n'est pas présenté ici.
- Un certain nombre de points comme la latence entre requête et émission, la qualité du média, ou encore sa forme (MPEG-2, MPEG-4, ...) sont des paramètres qui influent sur la qualité du service et donc son prix.

Les avantages sont surtout d'ordre technique, puisque le système s'intègre parfaitement dans les systèmes standards de télévision par satellite, ne demandant qu'un module logiciel à charger sur le décodeur. Aucun équipement supplémentaire n'est donc nécessaire.

Les inconvénients de cette topologie résident dans un couplage difficile avec des services autres comme l'accès Internet, la monopolisation de flux pour transmettre la vidéo, et la gestion en délai souvent difficile si le service connaît beaucoup d'abonnés qui souhaitent obtenir leur film tout de suite. De plus une infrastructure terrestre est nécessaire pour commander une vidéo. Enfin, il est très probable que dans le cadre d'un tel système le choix de films via les tables privées DVB-SI soit restreint, surtout pour un service reposant sur les votes des clients.

#### 4.1.1.3.2. TOPOLOGIE 2

La topologie 2 met en avant un type de service différenciant les équipements en fonction du sens de communication. D'un côté un accès Internet permet de choisir et commander un film et de l'autre, hors connexion Internet, le film est reçu via le décodeur. Il s'agit donc d'une configuration indépendante, comme présentée dans la partie 4.1.1.2.

Le mécanisme, est alors décrit par la figure ci-dessous (Figure 4.3). On observe une différence notable avec le cas précédent : c'est le client qui va chercher l'information sur le serveur de vidéos, et non plus le fournisseur d'accès qui met à jour les informations véhiculées par les tables SI et accessibles aux IRDs.

Une telle architecture propose alors une plus grande manœuvre et configuration du service, offrant une interface plus conviviale et plus fournie pour choisir le média, grâce au Web et donc en partie à l'intégration du service via IP. Comme la topologie précédente le système s'intègre parfaitement dans les systèmes de télévision par satellite standard, la connexion n'étant utile que pour la commande et pouvant être passée de n'importe où via les technologies mobiles (WAP, UMTS, un accès Internet WIFI, *etc...*). Tout cela à condition que l'IRD soit allumé. Comme précédemment, il n'y a pas besoin de mettre en place un niveau IP pour encapsuler le média, mais celui-ci peut être un plus pour recevoir des informations plus variées sur sa télévision.



Les inconvénients cités dans la topologie 1 restent valables ici. Toutefois un risque supplémentaire est possible si le client doit disposer d'un accès Internet chez lui. D'une part cela implique un coût supplémentaire pour le service, d'autre part cette solution peut vite devenir peu avantageuse face à la concurrence de la VoD via ADSL. En effet si le client est relié à Internet via une connexion illimitée, haut débit, il a peu d'intérêt à utiliser de surcroît l'abonnement à un système satellite, sauf si celui-ci lui permet un service complémentaire à des tarifs avantageux.

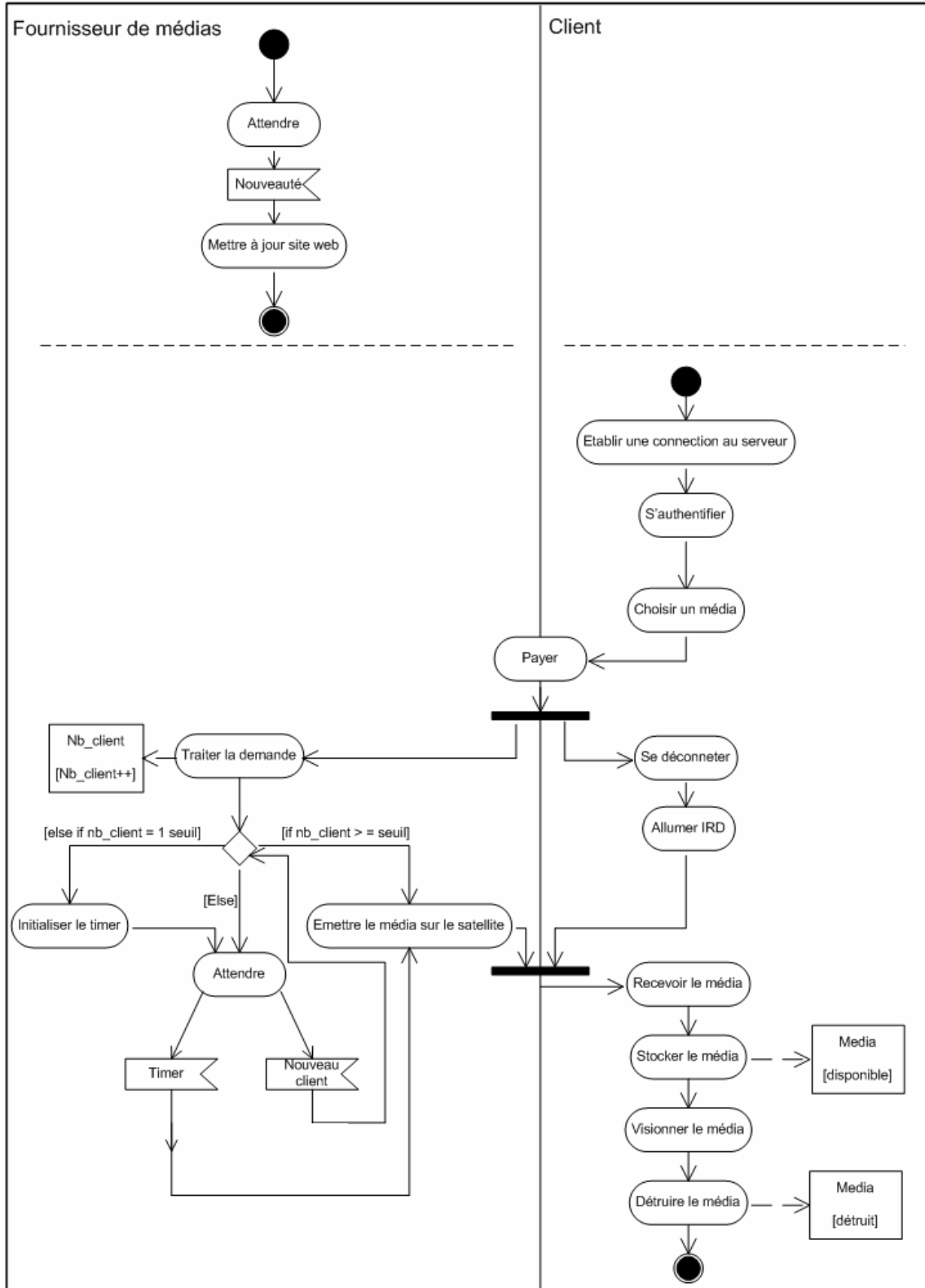


Figure 4.3 Diagrammes d'activité caractéristiques de la topologie 2

4.1.1.3.3. TOPOLOGIE 3

Cette topologie est totalement similaire à la topologie 2, à l'exception de l'utilisation d'un PC pour le choix comme la réception du film.

4.1.1.3.4. TOPOLOGIE 4

Le service proposé ici est radicalement différent de ceux des topologies précédentes dans la mesure où il met en avant l'utilisation de la technologie DVB-RCS. Dans ce cadre, le fournisseur de services a une entité locale. Cette annexe est équipée d'un récepteur/émetteur satellite, d'un cache local (parfois nommé *Point of Presence*), d'un serveur d'accès au service et enfin d'un réseau local où sont situés différents clients. L'utilisation de cette architecture est alors comparable à l'utilisation d'un proxy cache dans l'accès Internet.

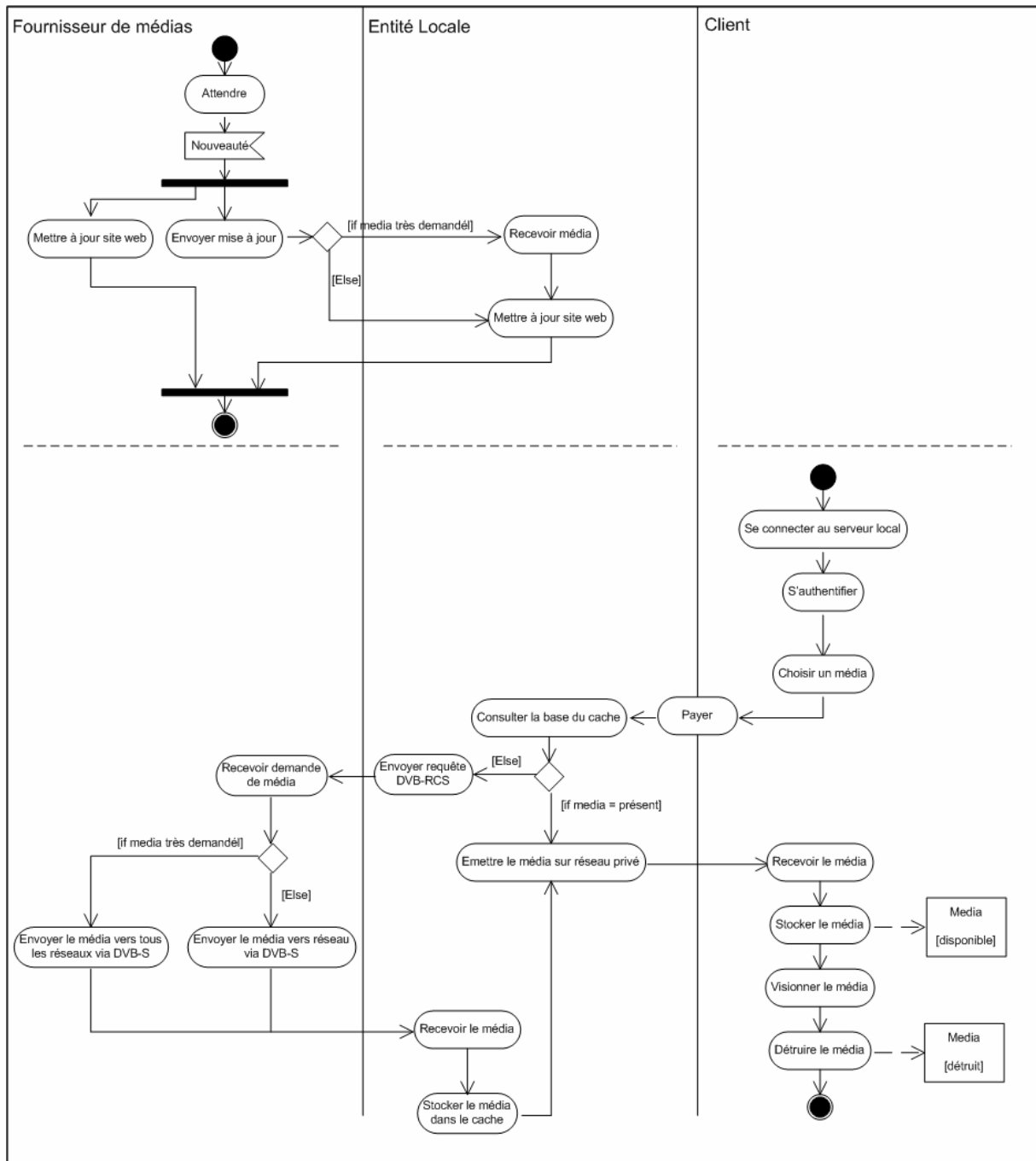


Figure 4.4 Diagrammes d'activité caractéristiques de la topologie 4

Dans cette topologie, l'utilisation du protocole IP est préférable pour éviter les problèmes d'homogénéité entre par exemple MPEG-2 TS, ADSL, Wifi, Ethernet, ou ATM. IP est donc utilisé ici comme support fédérateur.

Les principaux mécanismes de cette architecture de service sont alors représentés par les diagrammes d'activité suivant (Figure 4.4), définissant la mise à jour des média disponibles, le téléchargement des nouveautés sur le cache, et une transaction avec un client du service.

Les avantages de ce système sont différents de ceux précédemment cités. La présence d'un cache permet une économie de bande passante satellite notable. Ainsi l'émission de média courants a un prix de revient bien moins important pour le fournisseur de service, qui peut en retour proposer des promotions (en fonction des films déjà présents dans les caches). De plus ce système fonctionne sans aucun accès à un autre service (Web, téléphone, WAP, ...) et donc n'entraîne pas de coûts marginaux. Enfin, ce type d'architecture présente des perspectives intéressantes de couplage avec d'autres services.

Ce dernier point est aussi le défaut majeur d'une telle architecture : en elle-même elle n'est pas rentable pour le seul service de VoD. En revanche couplé à un réseau d'accès Internet, à un réseau déjà présent comme dans les hôtels, les hôpitaux, les universités ou encore plus généralement les zones câblées, cette architecture offre une très nette orientation à l'intégration de services.

#### 4.1.1.3.5. TOPOLOGIE 5

Cette architecture est la plus évoluée : elle utilise un lien bidirectionnel DVB-S/DVB-RCS pour chaque client. Dans son fonctionnement elle est tout à fait équivalente à la première architecture, en éliminant le défaut de la voie retour terrestre. Comme l'architecture bidirectionnelle précédente, cette solution de par son coût ne peut être envisagée que pour un service de VoD. De plus cette topologie est actuellement très coûteuse pour être déployée chez un particulier.

Dans le cadre d'un seul service VoD où la voie retour est très peu utilisée, une telle architecture n'est pas du tout justifiée et n'apporte donc rien. En revanche, dans le cadre de l'intégration de plusieurs services dont la VoD, elle peut être envisagée, même si coûteuse.

#### 4.1.1.4. Conclusion sur ces architectures

Nous avons observé différentes architectures de service VoD. Parmi ces architectures se dégage l'idée fondamentale que le lien retour n'est pas une nécessité, puisque l'émission en elle-même du média ne repose généralement pas sur une connexion bidirectionnelle. Les topologies 4 et 5 sont donc hors cadre du seul service de VoD, demandant un trop grand investissement pour peu (voire pas) de gain pour l'utilisateur final. La solution qui nous paraît la plus envisageable est la topologie 2 (et donc la 3), reposant sur un accès quelconque au site du fournisseur de services.

L'intégration d'un OBP n'est donc pas véritablement nécessaire ici, si ce n'est pour la gestion de plusieurs faisceaux. Mais une telle architecture a-t-elle besoin d'un système multifaisceaux ? Tout dépend du type de service VoD offert.

Un service proposant des vidéos en *streaming* sur satellite n'a pas un réel intérêt sur satellite, puisque le point fort du satellite est l'émission vers un grand nombre d'utilisateurs sans que cela ne lui coûte plus cher, alors que le est typiquement de l'unipoint, où, sur ce point, il ne peut efficacement concurrencer le terrestre. Le satellite propose de plus une diffusion haute définition, avec un débit de 5 à 6 Mbit/s par film, il peut ainsi en envoyer 6 à 7 en simultané sur un canal. Pour un grand nombre d'utilisateurs largement disséminés, le multifaisceaux est inutile puisque équivalent à du *broadcast* à un prix supérieur. En revanche, quand les utilisateurs sont géographiquement regroupés, le *multi-spots* permet d'économiser la capacité sur les *spots* non concernés.

De tels systèmes semblent alors envisageables sur satellite, et font l'objet de premières offres commerciales [92]. Il revient alors plus à un modèle de téléchargement de média, et pourrait être étendu dans ce cadre à des sons, des images, des programmes... La VoD telle que nous l'envisageons pour le satellite offre des perspectives favorables à l'intégration d'autres services sur satellite. Les différentes architectures analysées peuvent alors être considérées différemment : la clef d'une architecture évolutive pour intégrer d'autres services plus bidirectionnels. Ce service peut se contenter d'un satellite géostationnaire transparent lorsqu'il émet à un grand groupe le média. Par contre l'utilisation du multipincaux, peut permettre de gérer des groupes plus concentrés.

#### 4.1.2. Accès Internet

L'accès Internet a connu une croissance exponentielle et continue de croître à l'heure actuelle. C'est grâce à lui que le réseau terrestre s'est autant développé et il constitue une base indispensable à l'intégration de services sur support IP. Le satellite peut-il trouver sa place dans ce service, et ce malgré les protocoles tels que TCP qui ne le favorisent pas ? Cette partie se propose de montrer quelle place a le satellite dans ce domaine et avec quel type d'architecture. Nous étudierons alors le satellite comme un complément au réseau terrestre et non comme un concurrent, sa cible pour l'accès Internet n'est pas la même.

##### 4.1.2.1. L'accès Internet aujourd'hui

En France, l'année 2003 a été marquée par une large démocratisation de l'accès au « World Wide Web ». Ainsi, fin 2003, ce pays comptait 21 millions d'internautes, soit 42,6% des français de onze ans et plus (selon une étude de Médiamétrie [93]). Cette croissance a engendré la multiplication des FAIs, augmentant la concurrence et diminuant les prix du service, principalement pour les offres terrestres à haut débit (câble et ADSL).

Le réseau terrestre est le média principal de ce service avec des offres diverses :

- le bas débit (modem 56k, Numéris), qui reste très répandu surtout en dehors des grandes villes ;
- l'ADSL qui connaît actuellement une envolée grâce à une augmentation des capacités pour un prix très réduit ;
- le câble, concurrent principal de l'ADSL, il reste moins développé en France que dans le restant de l'Europe.

Cette croissance a permis le développement d'autres services, comme par exemple la vente via Internet (une croissance de 65% en 2003 et une prévision de plus de 50% en 2004). Ainsi pour l'année 2004, les acteurs du domaine prévoient [94] :

- une croissance élevée pour tous les services en ligne (achat, jeux, cinéma...),
- une ouverture importante du grand public au haut débit,
- l'enracinement de l'Internet dans la vie professionnelle comme personnelle.

##### 4.1.2.2. Le satellite comme média d'accès Internet

Le satellite comme média d'accès Internet n'apparaît pas encore comme une technologie assez économiquement intéressante pour concurrencer les réseaux terrestres haut-débit. Toutefois, pour les 25% de foyers qui n'auront pas encore accès à cette technologie en 2005, les offres commerciales d'accès par satellite (unidirectionnelle et bidirectionnelle) propose une solution. Les offres unidirectionnelles sont complétées par une voie retour modem 56k (de 9.6 à 28.8 Kbit/s), mais ce système est peu adapté aux applications type P2P qui fleurissent actuellement sur la toile. Les offres bidirectionnelles proposent l'utilisation d'une voie retour satellite en DVB-RCS, et passent toutes, en France, par Eutelsat.

Le satellite propose de nombreux avantages. Sa large couverture permet d'atteindre un point très distant en un seul bond, évitant ainsi les engorgements du réseau terrestre. De plus son adaptation innée à la diffusion permet d'ouvrir l'accès Internet vers d'autres horizons, comme le *multicast*. Enfin, l'on peut noter que seul le satellite est capable actuellement d'offrir le haut débit aux zones éloignées des grandes villes, rurales, ou même enclavées (plate-formes pétrolières, montagnes, déserts...). Le satellite apparaît comme un complément à l'accès terrestre haut débit.

Toutefois le satellite a deux inconvénients majeurs. D'une part la mise en œuvre d'IP sur satellite est plus délicate, notamment à cause du protocole de transport TCP [69]. D'autre part, les liens satellites unidirectionnels sont loin d'être performants, tandis que les liens bidirectionnels ont un prix élevé qui restent prohibitifs pour un utilisateur privé, voire pour une PME. En effet le coût d'un terminal est de l'ordre de 1500 à 2500 €, l'installation de l'ordre de 1000 €, et l'abonnement mensuel peut aller jusqu'à plus de 600 € par mois pour du 2 Mbit/s descendant et du 1Mbit/s en montée.

Toutefois, les perspectives offertes par les recherches actuelles pour baisser les coûts des terminaux DVB-RCS [44], la volonté d'une standardisation d'IP sur satellite, ou encore le bon couplage de la technologie satellite avec les réseaux terrestres ou sans fil, offrent au satellite la possibilité de se constituer un marché.

#### 4.1.2.3. Différentes architectures d'accès Internet via satellite

Cette partie propose d'étudier différentes architectures d'accès Internet via un lien satellite, toutes possibles à l'heure actuelle. La figure suivante (Figure 4.5) intègre plusieurs types d'accès Internet dans une vision globale et permettra ainsi d'avoir une référence commune pour l'étude de ces différentes topologies. Ce schéma dégage cinq architectures différentes, mettant en valeur deux types de topologie, l'une avec voie retour uniquement terrestre et l'autre satellite.

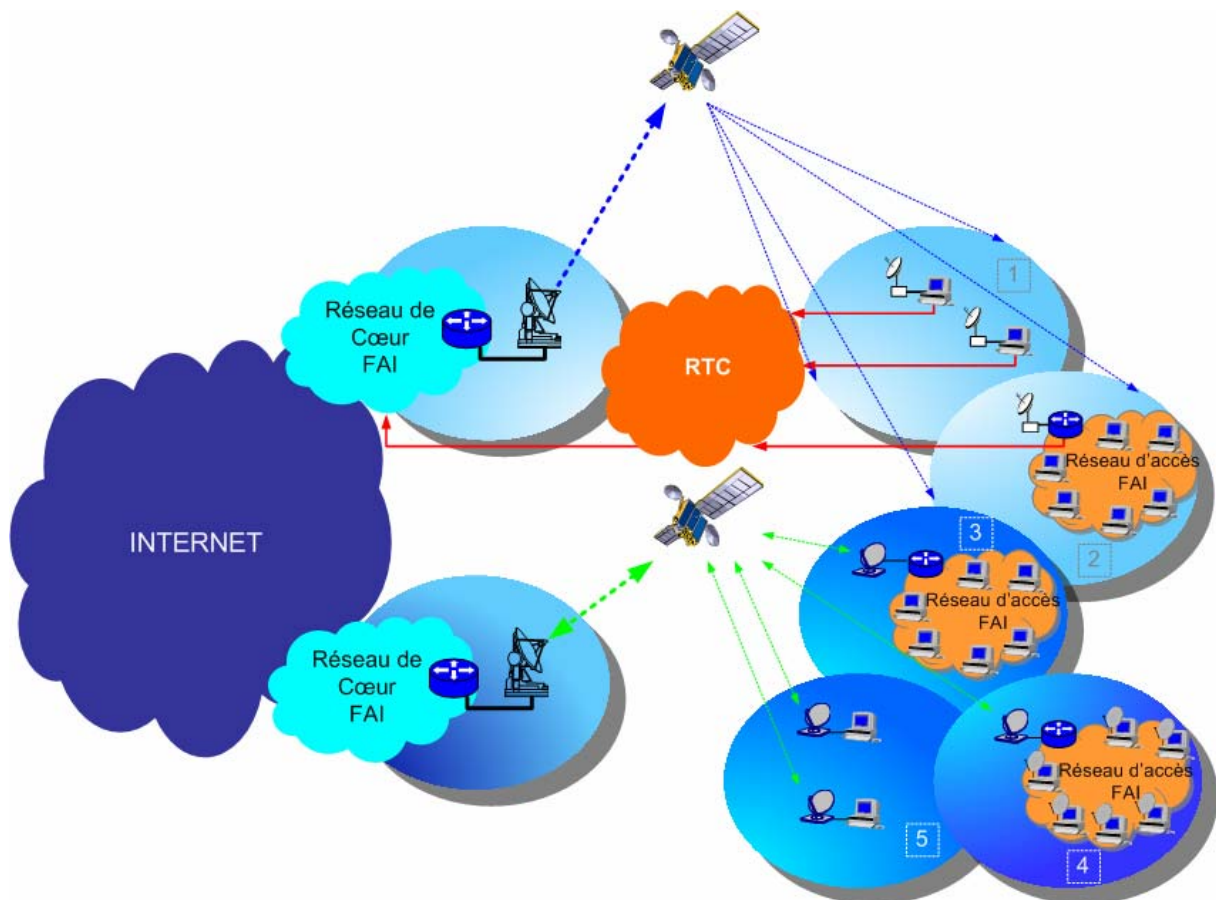


Figure 4.5 Cinq architectures d'accès Internet via un système satellite géostationnaire

Le premier type de topologie est une réalité aujourd'hui, même si elle n'a pas attiré beaucoup de particuliers en France. Le second type est une solution d'avenir : des offres commerciales sont actuellement proposées, mais elles resteront chère tant que les technologies mises en œuvre ne seront pas mûres<sup>1</sup>.

#### 4.1.2.3.1. ARCHITECTURES SATELLITES UNIDIRECTIONNELLES

Analysons tout d'abord les offres unidirectionnelles proposées (1 et 2). La topologie 1 est la solution classique déjà exposée dans la partie 3.2.2. Elle garde les limites déjà présentées. La topologie 2 réunit les clients dans un réseau d'accès (LAN, Wifi, Fibre optique...) et utilise un lien retour terrestre. Cette architecture présente les mêmes limites que la topologie 1. De plus, parce que le prix d'une antenne de réception est très modique, son partage entre plusieurs utilisateurs pose plutôt un problème de gestion de bande passante, et non une réelle économie. Enfin cette architecture, en proposant le partage d'une seule connexion terrestre entre ses différents clients, présente un véritable paradoxe : soit la voie retour est du modem 56k ou Numéris, et le système se situe en milieu rural, mais le partage de ce faible débit entre tous les clients pose problème (même s'il ne s'agit que de faire passer des acquittements et des requêtes), soit la connexion est en haut débit, l'intérêt du satellite comme médium d'accès Internet en ville reste alors très mitigé.

Par simulation, nous avons obtenu les courbes suivantes (Figure 4.6), présentant les limites de la topologie 2<sup>2</sup>. Ainsi on peut constater que le passage à l'échelle est délicat surtout pour une voie de retour faible. D'autant plus que la mise en place d'un tel système implique un coût, ne devenant rentable qu'à partir d'un nombre certain d'utilisateurs.

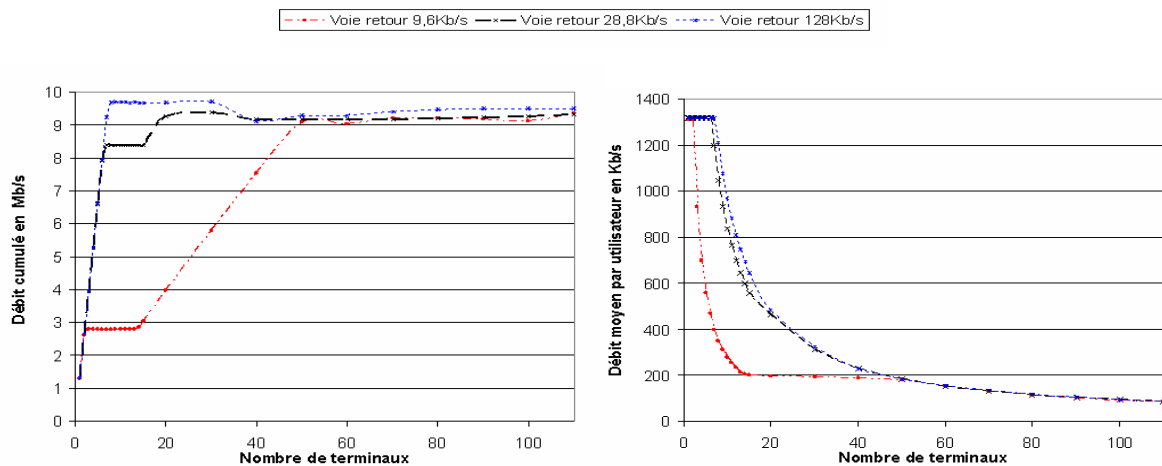


Figure 4.6 Évolution du débit en fonction du nombre d'utilisateurs pour la topologie 2

La topologie 1 paraît donc une meilleure solution pour l'accès Internet via un lien satellite unidirectionnel. Si elle n'est pas exempte de limites, dans le cadre d'un service traditionnel, comprenant *mail*, navigation *web*, et téléchargements (FTP, ...), elle propose une connexion intéressante, pouvant offrir un bon débit en voie aller, comparée à une connexion modem, ou numéris. La topologie 2 peut toutefois être utilisée pour un faible nombre de terminaux si une infrastructure est déjà en place.

<sup>1</sup> Il faut noter que des offres commerciales existent déjà pour des accès bidirectionnels, comme Thaïcom, où, dans les pays d'Asie, le satellite est une solution clef pour vaincre l'isolement et les reliefs accidentés.

<sup>2</sup> La simulation a été effectuée sous NS 2, avec un lien aller de 10 Mb/s partagé entre différents utilisateurs d'un réseau local.

## 4.1.2.3.2. ARCHITECTURES SATELLITES BIDIRECTIONNELLES

Les architectures 3, 4 et 5 utilisent toutes un lien retour DVB-RCS. Un tel équipement représente un investissement trop important pour des particuliers. La topologie 5 ne pourra donc être considérée comme une solution réelle à large échelle qu'avec une baisse du coût des VSATs.

Les architectures 3 et 4 sont très semblables proposant de regrouper les utilisateurs dans un réseau d'accès, et permettant de supporter ainsi le coût du terminal DVB-RCS entre les différents utilisateurs. Avec un débit retour plus important, ces réseaux sont plus adaptés aux développements des nouvelles générations d'applications sur Internet, plus bidirectionnelles.

Cependant ces solutions restent tout de même coûteuses, dans la mesure où une infrastructure est requise pour le réseau d'accès. De plus un aller retour satellite implique un délai relativement long qui peut rebuter l'utilisateur lorsqu'il souhaite uniquement faire de la navigation *web*. En effet, cette architecture a un RTT incompressible de 500 ms, augmentant le temps de réponse de protocoles de type http, où le débit est peu important comparativement au délai. La figure suivante (Figure 4.7) montre l'évolution du temps requis pour transférer des informations avec ftp, en fonction de la taille de cette information. Les résultats sont comparés entre une connexion satellite unidirectionnelle et une connexion satellite bidirectionnelle. L'on s'aperçoit qu'il faut avoir à transférer une donnée de taille supérieure à un seuil (ici 236,6 KB) pour que la durée de transfert soit moins longue dans le cas bidirectionnel et cette topologie devienne plus performante<sup>1</sup>.

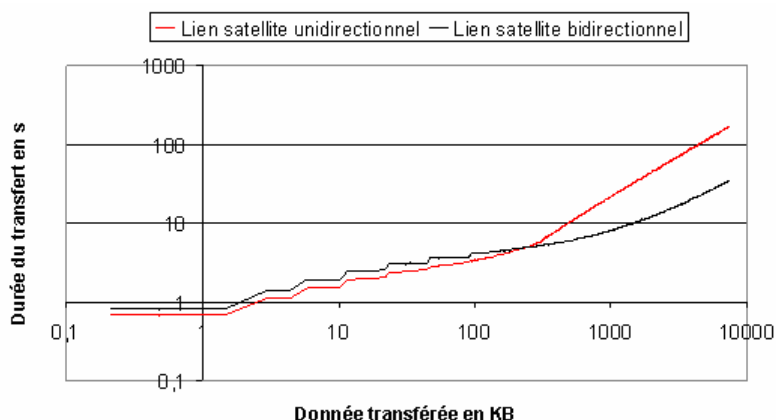


Figure 4.7 Évolution du temps de transfert sur un lien satellite unidirectionnel et bidirectionnel

Toutefois, dans le cadre de transferts plus importants, cette architecture présente de meilleures perspectives. Le couplage avec des technologies telles que le Wifi offre alors la possibilité à des collectivités locales de devenir fournisseur d'accès, et d'effacer la fracture numérique qui sépare les grandes villes des zones plus rurales [95]. Les solutions bidirectionnelles présentent enfin une solution d'accès haut débit pour les mobiles. Qu'ils s'agissent de bus fournissant l'accès Internet à des communes isolées, de trains [96] ou encore même d'avion (avec par exemple l'offre Connection by Boeing<sup>2</sup>), les solutions DVB-S/DVB-RCS ont un avenir. Des offres commerciales aux particuliers sont même proposées comme l'offre Drive de Sat2Way<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> La valeur prise pour le débit aller est de 2Mb/s, le débit retour satellite est de 256 Kb/s tandis que le débit modem considéré est de 9.6 Kb/s. Les pertes sur le satellite ne sont pas considérées. Le délai de la voie retour satellite est de 254 ms ajouté au 10 ms d'accès au serveur, comparé à une voie retour terrestre de délai 100ms

<sup>2</sup> <http://www.connexionbyboeing.com>

<sup>3</sup> <http://www.sat2way.com>

Cette solution apparaît alors comme un moyen d'offrir l'accès à Internet par satellite à des localités sans accès au réseau terrestre, et plus proches des offres terrestres haut débit. Bien sûr, le coût d'un tel système le rend non compétitif dans les zones urbaines.

#### 4.1.2.4. Conclusion sur ces architectures

L'étude de satellite comme support à l'accès Internet montre l'émergence de deux types d'architecture : l'une traditionnelle, qui présente un rapport qualité/prix satisfaisant pour un accès Internet asymétrique, l'autre reposant sur un réseau d'accès permettant d'accéder à un service plus symétrique, pour des applications de type P2P.

Cette étude a montré des besoins différents en fonction du type d'utilisation d'un service. Ainsi, un lien unidirectionnel propose une meilleure interactivité pour des données de faible poids, type navigation *web*, *mail*, court transfert FTP. Toutefois, son utilisation devient vite restrictive dans le cadre d'applications plus bidirectionnelles. Le lien bidirectionnel propose certes un délai plus grand, mais offre une meilleure accessibilité du système tout en ouvrant vers des performances s'approchant des hauts débits terrestres, pour un coût de revient plus élevé.

Cette étude a permis de dégager deux architectures réseaux selon le service d'accès Internet désiré. Ainsi, pour un accès Internet classique, l'utilisation des liens unidirectionnels avec une topologie mono-utilisateur, type architecture 1 est la solution envisagée dans cette étude. En revanche, pour un accès plus évolué, c'est-à-dire supportant des applications plus symétriques, l'utilisation des liens bidirectionnels avec regroupement des utilisateurs dans un réseau d'accès (topologie 3 et 4) est conseillée. Enfin, il faut noter que les autres architectures ne sont pas à rejeter, mais semblent simplement ne pas pouvoir convenir pour le seul service d'accès Internet à l'heure actuelle.

### 4.1.3. Interconnexion de réseaux distants

Le service de liaison entre réseaux distants a été à l'origine de la création des VSATs : l'interconnexion entre réseaux, notamment bancaires, a su profiter de cette technologie et a permis d'offrir un nouvel horizon aux VPNs (Virtual Private Networks) d'entreprise<sup>1</sup>[23].

#### 4.1.3.1. Le satellite géostationnaire et les VPNs d'entreprise

L'interconnexion de sites distants ne peut pas toujours être réalisée via un unique réseau fédérateur. Un câblage privé ou la location d'une ligne coûte en effet cher. L'idée de VPN d'entreprise est ainsi apparue : fédérer des réseaux appartenant à la même entité, mais géographiquement disséminés, comme des succursales bancaires. L'infrastructure terrestre a permis la mise en place de solutions passant par des tunnels à travers le réseau Internet [63]. Si cette technique est bien maîtrisée aujourd'hui, grâce notamment à des protocoles tels qu'IPsec, le *tunnelling* reste très vulnérable aux réseaux qu'il traverse, pouvant subir congestion, perte, et variation de gigue. De plus, le réseau terrestre n'est pas développé partout, ce qui peut poser un véritable problème pour des sociétés disséminées dans les pays à fortes contraintes géographiques ou du tiers monde [21].

Dans ce cadre le réseau satellite a su trouver un créneau, avec l'apparition des VSATs [23]. Le satellite se place comme un support de choix pour l'interconnexion de plusieurs sites distants. Son meilleur atout est certainement qu'avec un ou deux bonds satellites, les réseaux soient directement connectés. Ainsi un tel support permet d'éviter les aléas du passage à travers le réseau terrestre, tout en évitant les mises en place de lignes louées coûteuses. Le satellite peut donc offrir aux VPNs une maîtrise de la gigue tout comme une assurance sur le débit offert. La

---

<sup>1</sup> Dans la suite de cette partie, le terme VPN est plus généralement employé pour les VPNs d'entreprise, au sens donné par la référence [61] et peuvent être des VPNs de niveau 2 ou 3.



mise en place de QoS est donc grandement facilitée par un tel système, et ce type de système devient rentable avec la baisse du coût des terminaux (location de 7000 € en 1995 à un coût d'achat de 1500 à 2500 € aujourd'hui). Le satellite a de bonnes perspectives pour un tel service<sup>1</sup>.

#### 4.1.3.2. Différentes architectures d'interconnexion via satellite

Dans le cadre d'un service d'interconnexion, il est possible d'avoir plusieurs structures comme le montre la figure suivante (Figure 4.8). Ces architectures peuvent aussi bien fonctionner en monofaisceau qu'en multifaisceaux (d'où les *spots* en pointillés).

L'on distingue ainsi quatre topologies :

1 - Cette architecture n'est pas possible dans la plupart des cas, puisqu'elle met en œuvre plusieurs *gateways* (au moins deux) pour interconnecter les réseaux. D'une part une *gateway* est très coûteuse, et d'autre part il ne peut y avoir un grand nombre de *gateways* pour un même système satellite. Vu son prix cette solution n'est à envisager que dans le cadre de regroupements de nombreux VPNs comme par exemple pour l'interconnexion de pôles industriels importants.

2 - Ici une *gateway* est nécessaire, les autres réseaux sont équipés de récepteurs air, et utilisent une voie retour terrestre. La *gateway* n'appartient pas obligatoirement au réseau principal et seulement une plage de bande passante peut être louée à l'opérateur satellite. Toutefois cette structure implique un lien terrestre, et donc une perte de contrôle sur cette architecture, si ce lien passe par l'Internet.

3 - Les réseaux d'entreprises sont équipés de terminaux émetteurs/récepteurs, permettant ainsi d'envoyer directement les données vers le satellite. Sans traitement bord, les flux DVB-RCS sont envoyés vers une *gateway* qui retransmet les données dans un canal logique DVB-S. Le RTT d'un tel système est donc de quatre bonds satellites, soit plus de une seconde, rendant le système mal adapté aux échanges vocaux, comme aux applications temps réel avec faible délai. Cette architecture est donc mieux adaptée au transfert de volume de données.

4 - Comme dans la topologie 3, les réseaux privés sont équipés d'émetteurs DVB-RCS. Toutefois ce système utilise un satellite avec multiplexage à bord, permettant de n'avoir qu'un unique bond satellite entre les réseaux interconnectés en transformant les flux DVB-RCS montant en flux DVB-S descendant. Cette solution plus chère permet d'offrir un meilleur débit TCP, mais surtout de ramener le système dans une marge acceptable pour le transfert de la voix, ou les applications plus multimédia, ou temps réel, du type téléconférence ou télé-médecine.

#### 4.1.3.3. Conclusions sur ces architectures

Pour ces raisons, les architectures 3 et 4 paraissent les plus adaptées à l'interconnexion de réseaux privés. Si la solution 3 ne propose pas un délai suffisamment faible pour permettre la mise en place d'un réseau téléphonique inter-site, avec de la voix sur IP par exemple, elle met en place une structure peu coûteuse comparativement aux autres topologies, et capable de transporter un grand volume de données de manière sécurisée et fiable. La solution 4 quant à elle propose un service deux fois plus réactif, mais avec un prix plus élevé (au moins deux fois plus cher). Les deux solutions sont donc complémentaires et permettent la mise en œuvre d'applications différentes. L'architecture 4 remplit toutes les fonctionnalités de l'architecture 3, aussi bien, voire mieux, mais avec un coût bien plus élevé.

---

<sup>1</sup>Par exemple, le projet FICUS (<http://ficus.ups-tlse.fr>) met en place une cyber-université entre l'Inde et la France grâce à l'interconnexion satellite, solution meilleure qualité/prix.

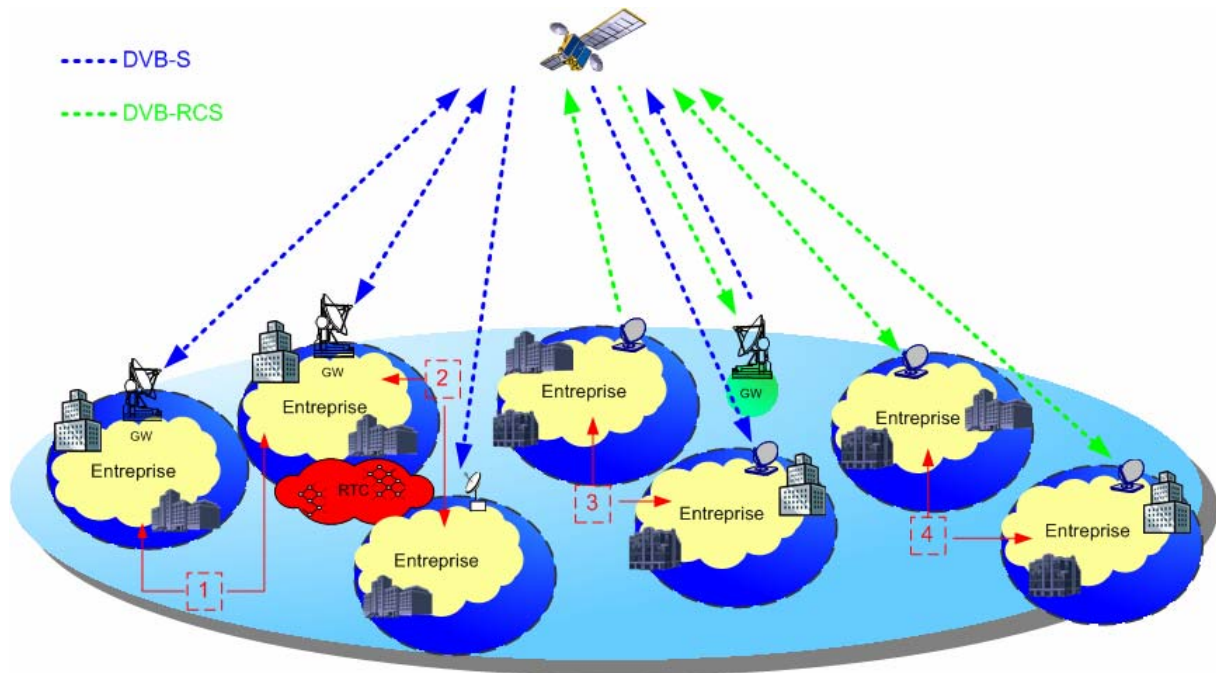


Figure 4.8 Quatre topologies d'interconnexion via un système satellite géostationnaire

#### 4.1.4. Conclusion et ouverture à d'autres services

Les trois services étudiés précédemment regroupent une large variété d'applications et de besoins que l'on peut retrouver dans la plupart des autres services. Ainsi, pour des services tels que la vidéoconférence, l'audioconférence, la téléformation, les applications partagées, on y retrouve les différents besoins précédemment cités : multiplexage bord pour réduction des délais et accroissement de la QoS, retour sol contre retour air, utilisation de la commutation bord...

En revanche, des applications posent d'autres problèmes que ceux posés par ces trois services. Si l'intégration de la VoIP peut être considérée comme une application envisageable dans le cadre du service VPN (vidéoconférence, téléphone intra-réseaux,...), elle nécessite une QoS adaptée, impliquant l'utilisation d'intelligence embarquée pour éviter la gigue et les doubles bonds. En effet la VoIP ne peut supporter un délai supérieur à 500 ms, borne au-delà de laquelle la qualité rendue n'est pas considérée acceptable. De plus, des problèmes restent aux niveaux transport comme applicatif ; le couplage du protocole de transport UDP-Lite (Lightweight User Data Protocol) [98] et RTP (Real Time Protocol) avec les codec AMR (Adaptative Multi Rate) [99] semblent une solution d'avenir, impliquant toutefois de pouvoir remonter les erreurs bits au niveau transport, ce qui n'est pas le cas avec un système DVB-S classique.

Le satellite présente un intérêt majeur pour les services impliquant la mobilité, mais ne peut être envisagé que pour un groupe d'utilisateurs (avion, train, bateau ...). Les GEOs permettent une grande économie de ressources et un déploiement rapide, tout en offrant une mobilité peu sujette aux problèmes de *handovers*. Toutefois cette solution met en œuvre une technique avancée pour l'auto-pointage de l'antenne, surtout dans le cadre de mouvements rapides [96].

Le satellite trouve aussi sa place dans les applications multicastées ou broadcastées, où il devient vite très concurrentiel des infrastructures de télécommunications terrestres, avec notamment la distribution à différents caches d'informations (services comparables au cas 4 de VoD précédemment étudié). Des études ont montré que le satellite avait un coût moindre que les réseaux terrestres au-delà d'un certain nombre de membres pour un groupe *multicast* [100].

Cette partie a souligné les besoins différents pour chaque service. Au sein même d'un unique service, selon l'utilisation souhaitée de ce dernier, un système satellite différent est parfois

requis. Cette analyse à gros grains peut être résumée dans le tableau suivant (Tableau II), montrant la diversité des solutions, et proposant, à titre d'exemples, des valeurs de débits aller et retour.

Tableau II. LES DIFFÉRENTS BESOINS DES TROIS SERVICES ÉTUDIÉS

		Lien aller		Lien retour		Multicast	Un bond?	QoS	Système satellite
		Type	Débit	Type	Débit				
Accès Internet	Classique	DVB-S	512kb/s-4Mb/s	Terrestre	9,6kb/s-64kb/s	Non	-	Non	Transparent
	P2P like	DVB-S	512kb/s-10Mb/s	DVB-RCS	128kb/s-2Mb/s	A voir	-	Non	Transparent Peut-être multispots
VoD	VoD instantnée	DVB-S	512kb/s-40Mb/s	Non	-	Non	-	Oui	Peut-être OBP Peut-être multispots
	VoD avec délai	DVB-S	512kb/s-40Mb/s	Non	-	Oui	-	A voir	OBP Multispots
VPN	Applications TR	DVB-RCS	1Mb/s-10Mb/s	DVB-RCS	1Mb/s-10Mb/s	A voir	Oui	Oui	OBP Peut-être multispots
	Transfert de données	DVB-RCS	1Mb/s-10Mb/s	DVB-RCS	1Mb/s-10Mb/s	A voir	Non	Non	Bent-pipe Peut-être multispots

Chaque service a donc besoin d'un système satellite particulier pour être performant. En effet, contrairement au réseau terrestre où les applications se sont construites autour de la technologie, le satellite doit quant à lui s'adapter aux services, habitués au réseau terrestre. Cela explique la tendance à avoir des systèmes satellites dédiés à des services particuliers, comme la télévision numérique, ou l'observation.

## 4.2. Les objectifs d'une architecture

Le concept d'une architecture reposant sur un système hybride est proposé ici pour répondre à la problématique posée précédemment : manque d'évolutivité, trop de spécificité, solution propriétaire, coût élevé, *etc...* De plus l'analyse des différents besoins des services a montré que la demande n'était pas la même selon le cadre applicatif considéré.

À partir de ces conclusions, cette partie propose de tracer les objectifs d'une architecture voulant intégrer ces différents services tout en s'inscrivant dans les principes actuels d'uniformisation et de standardisation des systèmes satellites. L'architecture doit proposer une interface utilisateur indépendante du constructeur pour être viable et pérenne. IP comme niveau protocolaire fédérateur semble alors la solution. Il n'est alors pas question de chercher à modifier les couches supérieures à IP dans ce travail, mais de proposer une interface standard à l'utilisateur final [85]. Ainsi le lien satellite deviendra transparent pour l'utilisateur final comme dans le cadre d'un réseau terrestre.

Les étapes de notre travail découlent directement de cet objectif fondamental : l'adaptation au trafic actuel, l'optimisation des communications, et l'adaptation au trafic à venir.

### 4.2.1. Adaptation aux trafics actuels

Le trafic actuel est majoritairement de l'accès Internet pour des applications de type consultation de pages *web*, *mail*, FTP, *peer-to-peer* (P2P), *etc...* Le P2P est notamment une application à forte croissance, représentant jusqu'à 80% du trafic Internet total en volume [101].

Le trafic Internet a donc évolué, passant d'un trafic utilisateur largement asymétrique à un mode plus symétrique.

Dans ce cadre, l'architecture doit être capable d'être réactive, offrant un lien retour adapté aux besoins des utilisateurs finals et nécessairement aux besoins des différents services.

L'émergence actuelle de l'intégration des services sur les différents réseaux terrestres ne doit pas être oubliée. Le *triple play* joue un rôle important pour attirer et fidéliser les clients, les FAI devenant aussi des FSI. Pour ne pas rester en marge, une architecture satellite doit offrir cette capacité d'intégration de service. S'il est vrai que la voix sur satellite ne jouit pas de la qualité du terrestre, le satellite se rattrape par un support de la télévision parfaitement maîtrisé. On pourra d'ailleurs noter que dans le cadre de télévision sur ADSL, celle-ci est parfois acheminée par satellite avant d'être diffusée sur les boucles locales aux utilisateurs finals<sup>1</sup>. Une architecture satellite doit permettre un support efficace et transparent de l'IP sans pour autant se priver de la possibilité d'émettre en flux natif.

Enfin une architecture se doit d'être flexible et modulable, pour pouvoir offrir aux services l'architecture réseau qui leur convient le mieux.

#### 4.2.2. Optimisation du système satellite

L'optimisation de cette architecture est un deuxième point non négligeable. En effet il n'est pas question de proposer un système plus coûteux et moins performant qu'un système transparent. Les critères considérés sont notamment :

- l'*overhead* qui prend en compte, d'une part le poids des encapsulations successives, et d'autre part le poids induit par la signalisation (tables SI, protocoles spécifiques),
- le RTT qui est équivalent au délai de transmission induit par le bond satellite dans la plupart des cas, avec néanmoins des nuances quant au temps d'accès dans le cadre de système DVB-RCS,
- le débit utile pour l'utilisateur qui dépend souvent de la couche de transport (cf. 3.5.1), de la configuration du système et des erreurs satellites,
- la répartition de la charge, qui permet de comparer le nombre de flux que le système peut traiter à la fois, permettant d'optimiser l'utilisation de la bande passante du système et donc intrinsèquement liée à la répartition des utilisateurs dans la couverture satellite,
- la gestion de la QoS qui peut être plus ou moins fine selon le système traité.

En plus de ces seuls critères, ce travail prendra essentiellement le gain de débit introduit comme critère de coût.

#### 4.2.3. Adaptation aux trafics futurs

Un objectif fondamental de cette architecture est la pérennité. Les évolutions du monde Internet et applicatif sont bien plus rapides que celles des systèmes satellites, souffrant d'une inertie justifiée par la lourdeur des investissements. La solution que nous envisageons offre une transition entre les systèmes transparents et la nouvelle génération de satellite<sup>2</sup>, sans pour autant devoir être de courte durée.

---

<sup>1</sup> Pour plus d'informations à ce sujet des articles sont consultables en ligne notamment un à l'URL : <http://www.nwfusion.com/edge/columnists/2003/0728edgecol1.html> .

<sup>2</sup> Il faut noter que l'on entend par nouvelle génération de satellite géostationnaire, les satellites intégrant OBP et techniques multi-spots.

Dans ce cadre, ce concept doit être assez souple pour supporter les différentes techniques à venir et envisageables sur satellite géostationnaire. L'objectif est donc de concevoir une architecture globale, offrant les possibilités suivantes :

- l'intégration des différentes couches de protocoles à venir comme notamment l'IPv6 [31],
- la gestion de l'*unicast*, du *broadcast* et surtout du *multicast* qui semble un outil de choix pour certaines applications futures, et se place comme un élément parfaitement indiqué pour le satellite,
- la gestion de la QoS des différents trafics,
- la gestion de la sécurité (avec notamment une compatibilité avec SatIPsec [102]),
- l'utilisation d'un interfaçage normalisée,
- l'ouverture vers le routage à bord,
- ...

Tout cela suppose de cette architecture la présence d'une couche fédératrice : le niveau 3, IP, qui constitue une perspective réaliste.

### ***4.3. L'architecture hybride***

Les études précédentes ont mis en évidence deux points : des objectifs qui passent par l'intégration d'IP, et des besoins architecturaux spécifiques à chaque service. La recherche d'une seule architecture permettant d'intégrer ces différentes architectures de service via un unique système est alors l'élément fondamental de cette étude.

L'analyse a montré que les besoins des services différaient en deux grands points : la voie retour, et la technologie à bord du satellite. L'intégration de différentes voies retour est possible dans une seule et même architecture, grâce notamment à UDLR [15]. L'intégration de deux systèmes satellite dans une même architecture est une solution coûteuse, impliquant la multiplication des équipements du côté opérateur comme utilisateur. Pour permettre une adaptation à ces différents services nous proposons d'intégrer deux charges utiles dans un système satellite ; l'une transparente, et l'autre proposant un OBP.

L'architecture qualifiée d'hybride repose sur cette approche, et reste ouverte aux perspectives technologiques. Cette proposition comporte la description d'une architecture générale, viable permettant d'offrir aux services un support adapté, sans pour autant rentrer dans les détails de dimensionnement.

Cette partie présente d'une part une proposition qui semble faisable et rentable avec les hypothèses actuelles, et d'autre part une ouverture vers des évolutions futures. Le plan de cette solution se découpe de la manière suivante : la section 4.3.1 propose de jeter les bases de cette proposition : le système hybride. La description du maillon physique (le satellite) est élaborée ici en présentant le concept hybride, une proposition et des perspectives. Toujours en suivant une approche similaire, nous observons ensuite dans la section 4.3.2 les autres entités du système. Puis la troisième section (4.4.3) place les différents éléments de l'architecture protocolaire de cette solution, tout en gardant une ouverture vers des évolutions possibles. Cette partie a un rôle fondamental, celui de faire l'intégration entre le niveau IP et le système hybride. Enfin la section 4.4.4 termine cette proposition.

#### **4.3.1. Description de la charge utile hybride**

Le cœur de cette architecture repose sur le maillon satellite. C'est en effet l'élément central qui permettra à l'architecture de s'adapter aux différents besoins des services.

La section 4.3.1.1 présente la notion de système hybride, donnant lieu à la section 4.3.1.2 et 4.3.1.3 présentant respectivement les propositions pour une charge utile transparente et une charge utile régénérative, ainsi que les perspectives envisageables. La dernière section (4.3.1.4) traite alors de l'intégration de ces deux charges utiles dans un unique satellite, concluant sur les conséquences au niveau de l'architecture protocolaire.

#### 4.3.1.1. *La notion de système hybride*

Le système hybride tel qu'il est envisagé ici définit un système satellite où cohabitent deux charges utiles différentes : une transparente et une régénérative.

La charge utile régénérative du système peut varier de 0% à 100%, et cela en fonction de plusieurs points : la mise en oeuvre, la maturité des technologies, ... Ce point comme le dimensionnement est donc laissé à la discrétion du constructeur.

Notre démarche est ici orientée sur les besoins et la flexibilité. Ce système reste donc ouvert, et nous insisterons particulièrement sur sa mise en oeuvre dans un contexte applicatif.

#### 4.3.1.2. *La charge utile transparente*

Dans un premier temps nous décrivons le système transparent de notre proposition (4.3.1.2.1) puis nous nous intéressons à différentes perspectives (4.3.1.2.2).

##### 4.3.1.2.1. LA DESCRIPTION DE LA CHARGE UTILE

La charge transparente du système hybride est un simple répéteur ou *hub* spatial. Ce système est divisé en deux grandes parties, l'une régénérant les signaux DVB-S au niveau physique et les retransmettant sur toute la couverture, l'autre s'occupant des signaux DVB-RCS et les émettant vers un *spot* resserré sur *gateway*.

La voie aller est en DVB-S et est composée de  $m_{a,t}$  transpondeurs, chacun avec un débit de 35 à 45 Mb/s au niveau physique. Pour notre étude nous fixerons un débit commun par transpondeur à 38 Mb/s.

La voie retour est en DVB-RCS, séparant  $m_{r,t}$  transpondeurs de la même capacité que précédemment entre les différents RCSTs du système. Toutefois, pour des raisons de tailles les RCSTs utilisées ne seront pas capables d'émettre au-delà de 8 Mb/s.

L'utilisation de la bande Ka (27 à 40 GHz) pour des raisons de saturation de la bande Ku (12 à 18 GHz) est choisie pour ce système. Ce choix apporte une augmentation de l'atténuation du signal, qui sera considéré comme une perte de PLR moyen  $10^{-3}$ .

##### 4.3.1.2.2. DES ÉVOLUTIONS

Le système transparent offre peu de perspectives d'un point de vue système bord. Il est toutefois possible d'améliorer la capacité transparente en intégrant des nouveautés technologiques.

Une première évolution réside dans l'intégration du DVB-S2 [103]. Celui-ci permet d'améliorer de manière significative les performances du média satellite sur la bande Ka. Cette perspective implique du système une modification de la méthode d'encapsulation. Si celle-ci reste compatible avec l'utilisation d'ULE, et utilise toujours des PIDs, la transition vers ce type de solution n'implique pas de modifications majeures dans l'architecture proposée (notamment au niveau protocolaire), les changements restant majoritairement d'ordre physique et matériel.

Un autre point est l'utilisation du multifaisceaux pour le mode transparent. Celui-ci, s'il n'est pas considéré dans notre proposition pour une question de coût du système, est à envisager comme perspective. En fonction de la technologie et d'un intérêt pour les services, réduire la couverture en différentes zones peut s'avérer économiquement intéressant. Dans ce cadre,

l'interconnexion peut se faire soit par une gestion physique à bord (*transponder hopping*), soit par le passage par des *gateways* de transition.

### 4.3.1.3. L'intelligence embarquée

La notion d'OBP, dans ce travail, est utilisée dès qu'un protocole de niveau 2 apparaît à bord du satellite. Cette partie suit la même démarche que précédemment. On notera toutefois que le système régénératif offre beaucoup plus d'ouvertures que la charge utile transparente.

#### 4.3.1.3.1. LA DESCRIPTION DE LA CHARGE UTILE

Comme pour le système transparent, la charge utile régénérative utilise le même type de voie aller et de voie retour. On notera cependant  $m_{a_r}$  le nombre de transpondeurs sur la voie aller,  $m_{r_r}$  le nombre de transpondeurs sur la voie retour.

Le système transparent utilise aussi la bande Ka et propose d'utiliser la technologie multifaisceaux, avec  $n$  faisceaux descendants comme montants. Dans le cadre de notre système, l'on pourra envisager des faisceaux couvrant un pays, pour les services nationaux, notamment.

D'un point de vue technologique, nous avons pris en compte ce qui est fait actuellement les systèmes actuels comme le système AmerHis lancé en août 2004 [104]. Aussi l'intelligence embarquée se propose comme un élément central de l'architecture de niveau liaison, intégrant commutation bord, multiplexage et signalisation. Le système régénératif n'intègre donc aucune fonctionnalité de niveau 3 à bord.

##### 4.3.1.3.1.1. Dans le plan utilisateur

La charge utile régénérative propose deux fonctionnalités sur le plan utilisateur : du multiplexage et de l'interconnexion des faisceaux via un commutateur.

La première fonctionnalité consiste à multiplexer sur chaque voie descendante les différents flux MPEG-2 TS originaires des voies montante ou de la signalisation.

La seconde utilise la commutation des paquets MPEG-2 TS pour interconnecter les différents faisceaux<sup>1</sup> entre eux. Un tel commutateur est capable de gérer les communications points multipoints, comme le *broadcast* en répliquant les données à bord.

L'utilisation d'un multiplexage à bord implique une relation entre la somme des débits montants sur la voie aller et sur la voie retour, et le débit descendant, parce que les flux DVB-RCS sont multiplexés en flux DVB-S. Si on note  $m_{d_r}$  le nombre de transpondeurs sur la voie,  $d_{s\_down}$  le débit de ce transpondeur,  $d_{s\_up}$  le débit d'un transpondeur DVB-S sur voie montante et  $d_{rcs\_up}$  le débit d'un transpondeur DVB-RCS, on a l'inégalité suivante :

$$(9) \quad n(m_{a_r} \cdot d_{s\_up} + m_{r_r} \cdot d_{rcs\_up}) \geq m_{d_r} \cdot d_{s\_down} \geq m_{a_r} \cdot d_{s\_up} + m_{r_r} \cdot d_{rcs\_up}$$

Cette relation repose sur le fait qu'il n'y a pas de connaissance *a priori* des types de flux. En effet si tous les flux sont diffusés sur tous les *spots*, l'inégalité de gauche devient une égalité, tandis que pour uniquement des flux *unicast*, c'est celle de droite qui le devient.

La notion de multifaisceaux introduit un coefficient  $k$  lien le débit montant DVB-S et le débit descendant sur les *spots*. Ce coefficient est au maximum égal à 1, et est lié à  $W$ , le coefficient de réutilisation de fréquence divisé par  $n$ , le nombre de *spots*<sup>2</sup> [105]. Ainsi si le nombre de *gateways* est assez limité pour permettre au débit montant DVB-S de rester à 38 Mb/s, il n'en est pas le cas

<sup>1</sup> Si  $n$  prend la valeur 1, alors il n'y a pas de commutation à bord.

<sup>2</sup>  $n$  est noté  $Z$  dans la référence.

pour  $d_{rcs\_up}$ , ni pour  $d_{s\_down}$ . Ces deux débits se voient appliquer un coefficient  $k$  par rapport à  $d_{s\_up}$ . Ce problème reste au niveau du dimensionnement du système et n'est pas abordé plus avant.

#### 4.3.1.3.1.2. Dans le plan de contrôle

Des fonctionnalités dans le plan contrôle sont présentes à bord. Une partie de la signalisation DVB-SI est générée par le satellite pour les flux descendants (tables de signalisation sur la voie descendante des flux DVB-S originaires des *bursts* DVB-RCS). De plus la mise à jour des tables de commutations est aussi effectuée à bord. Enfin, une gestion de la QoS est mise en place à bord grâce au commutateur. Celle-ci prend en compte deux niveaux de priorité. D'autres fonctions du plan de contrôle seront proposées en perspectives.

#### 4.3.1.3.1.3. D'un point de vue matériel

Les performances de l'OBP sont considérées comme adaptées aux capacités du système. Le délai introduit est donc faible comparé au bond satellite, et est majoré à 1 ms<sup>1</sup>. Différents éléments du processeur bord seront présentés dans la section suivante (cf. 4.3.1.4, Figure 4.9). Nous en donnons un résumé ici :

- le commutateur : il s'agit d'un commutateur de type circuit, commutant les paquets MPEG-2 TS en utilisant leurs PIDs. Ce commutateur a un nombre d'entrées correspondant au nombre de *spots*, ajouté à des entrées spécifiques aux *gateways* (si elles ne correspondent pas à un spot) et une entrée spécifique à l'OBPC et au NCC (Network Control Center). Pour les sorties, on retrouve une sortie par faisceau, et une spécifique à l'entrée de l'OBPC. Le commutateur possède des tables reconfigurables via l'interface précitée. Il gère la réplique de paquets pour le *multicast* et le *broadcast*.
- les multiplexeurs qui sont chargés de multiplexer les paquets en sortie du commutateur avec les tables de signalisation dans un flux unique DVB-S. Ces multiplexeurs font du bourrage pour remplir le flux MPEG-2 TS quand il n'y a rien à émettre. Ils sont capables de faire de la translation de PID si nécessaire.
- l'OBPC (On-board-Processing Controller) qui a comme tâche de gérer les mises à jour des tables de commutation, et la génération de la signalisation. C'est à ce niveau que d'autres algorithmes et fonctionnalités peuvent être implantées.
- les démultiplexeurs qui, à partir des signaux bruts, restituent les paquets MPEG-2 TS.

#### 4.3.1.3.2. DES ÉVOLUTIONS

Le système régénératif offre un grand nombre de possibilités dont nous traçons les grandes lignes ici.

#### 4.3.1.3.2.1. Dans le plan utilisateur

Au-delà du multiplexage à bord, l'OBP peut désencapsuler et formater les flux montants en de nouveaux flux descendants. Un exemple de ces techniques a été utilisé dans DIPCAST (cf. 3.4.4.4). Dans ce cadre on peut imaginer démultiplexer les flux MPEG-2 TS pour obtenir les SNDU (SubNetwork Data Unit), voire les datagrammes IP. Dans le premier cas, des techniques de commutation de niveau 3 sont alors possibles, c'est-à-dire d'extraire des informations de niveau IP (adresse source, adresse destination) dans les SNDUs pour réaliser la commutation. Le second cas permet de mettre directement en place du routage à bord. Le satellite se comporte alors comme un routeur IP, aiguillant les datagrammes et mettant en œuvre un certain nombre de protocoles de routage et de résolution d'adresse. On peut toutefois noter que si l'année 2003 a vu

<sup>1</sup> En 1996, les commutateurs ATM arrivaient à majorer ce temps à 1.2 ms [106]. Avec les avancées techniques actuelles on peut raisonnablement espérer ce type de performances.



son premier « routeur dans le ciel » [107], le routage à bord doit encore faire ses preuves avant de pouvoir être considéré comme une réelle possibilité. L'intérêt majeur d'un routage bord est alors une pleine intégration du niveau 3 dans le système, permettant d'alléger de manière significative les tables au sol comme la signalisation, améliorant le temps de réponse du système et son interopérabilité, au prix d'une charge utile lourde, complexe et coûteuse.

Dans ce cadre, certaines recherches vont plus loin, en proposant la mise en place de PEP TCP à bord [83], restant toutefois une perspective, puisque le routage à bord n'est qu'un projet pour le moment.

#### 4.3.1.3.2.2. Dans le plan de contrôle

Dans ce cadre, le système régénératif propose d'intégrer à bord certaines fonctionnalités du NCC (Network Control Center), voire son intégration complète dans le satellite. Ce centre a pour rôle de gérer notamment l'accès au système satellite. Il sera décrit dans la section 4.3.2.3. Nous noterons simplement ici que cette intégration permettrait qualitativement d'améliorer le temps de réponse du système en évitant les allers-retours nombreux entre le satellite et cette entité.

Une gestion plus complète de la qualité de service peut être envisagée à bord, surtout dans le cas d'un routeur embarqué. La mise en place de services différenciés ou encore une gestion par IPsec est alors facilitée.

#### 4.3.1.4. L'intégration des deux charges utiles dans le système hybride

Après avoir décrit les deux charges utiles et leurs perspectives, leur intégration dans un seul système est le sujet de cette partie.

##### 4.3.1.4.1. LE SYSTÈME HYBRIDE

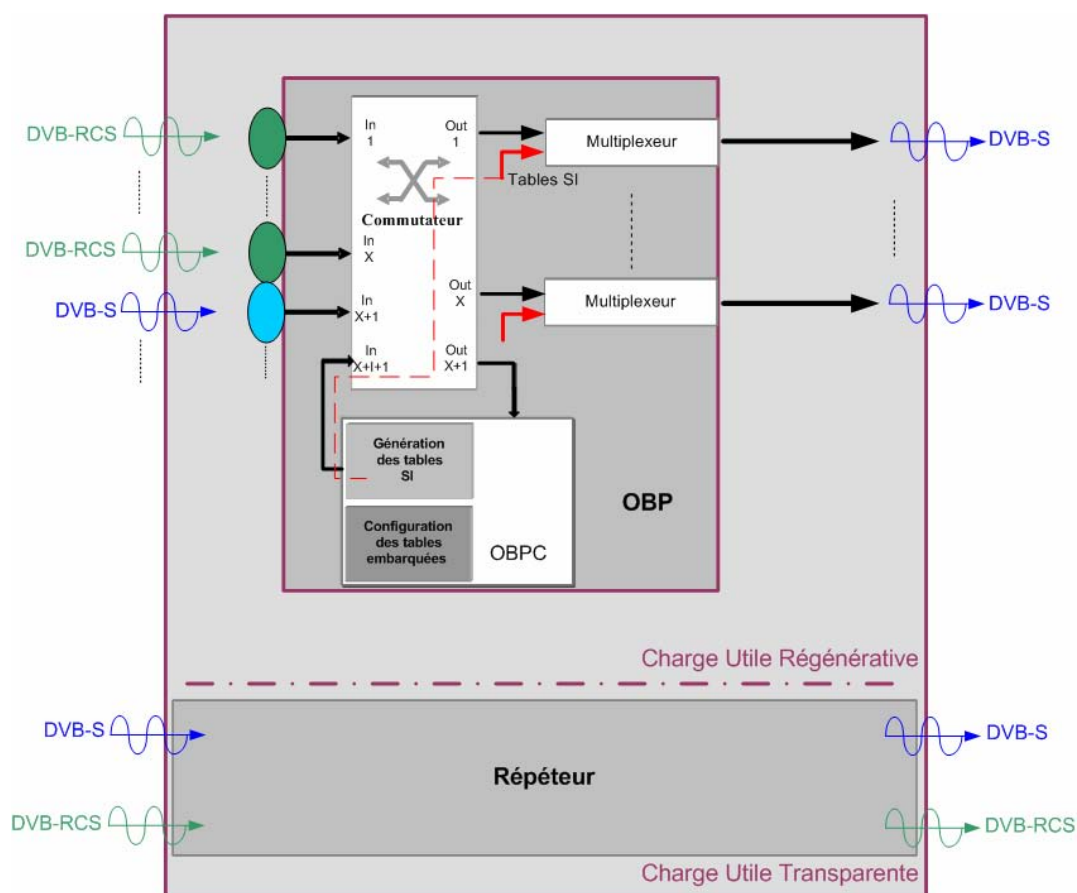


Figure 4.9 Structure de la charge utile hybride

Un schéma complet du système hybride est proposé dans la figure précédente (Figure 4.9). D'un point de vue satellite, les deux charges utiles sont totalement dissociées et il n'existe aucune interaction entre elles au niveau du satellite. On définit alors deux modes, une pour chaque charge utile. L'on parlera alors de mode transparent pour l'utilisation de la charge utile transparente, et de mode régénératif pour l'utilisation de l'OBP.

#### 4.3.1.4.2. LE PARTAGE ENTRE LES MODES

Le problème du système hybride n'est pas uniquement dans l'intégration de deux charges dans un système mais aussi dans le choix du mode utilisé, et celui-ci s'effectue à plusieurs niveaux.

Dans le cadre de cette partie nous nous placerons uniquement au niveau du système satellite et donc des signaux qu'il reçoit. Les modes sont clairement indépendants à bord, aussi pour pouvoir les différencier, une méthode analogique est indispensable (nous rappelons que le mode transparent ne gère que des signaux). Les deux sections suivantes proposent alors une solution pour les flux DVB-S (4.3.1.4.2.1) et pour les flux DVB-RCS (4.3.1.4.2.2).

Notre objectif ici est de montrer la possibilité d'une différenciation des deux modes, d'autres méthodes pouvant être envisagées.

##### 4.3.1.4.2.1. Partage entre les deux modes pour des flux DVB-S

Les flux DVB-S montant sont générés par les *gateways*. Nous proposons une méthode simple qui consiste à différencier les flux sur l'attribution des fréquences. La différenciation est directement faite sur les transpondeurs grâce à un filtre à bord.

La figure ci-dessous (Figure 4.10) illustre par un exemple cette méthode. Le FDMA (Frequency Division Multiple Access) est ici utilisé entre les différentes *gateways*. Le TDMA (Time Division Multiple Access) peut être utilisé uniquement pour la charge régénérative. En effet, si du TDMA était utilisé, le mode transparent devrait remultiplexer les signaux sur le flux descendant, ce qui n'est pas possible sans une charge régénérative dans ce système. Dans ce cadre, le schéma ne représente pas le TDMA pour ne pas surcharger la figure. Un filtre de fréquence est utilisé pour aiguiller les canaux vers la charge utile qui leur est associée. Dans le cas d'un flux transparent, le signal est simplement régénéré et sa fréquence décalée. Pour le mode OBP, le signal est démodulé, les paquets sont commutés et de nouveaux multiplexes descendants sont formés par *spot*, venant cohabiter avec les canaux transparents. On ne retrouvera pas alors, sauf dans de rares exceptions, un multiplexe montant régénératif sur un flux descendant.

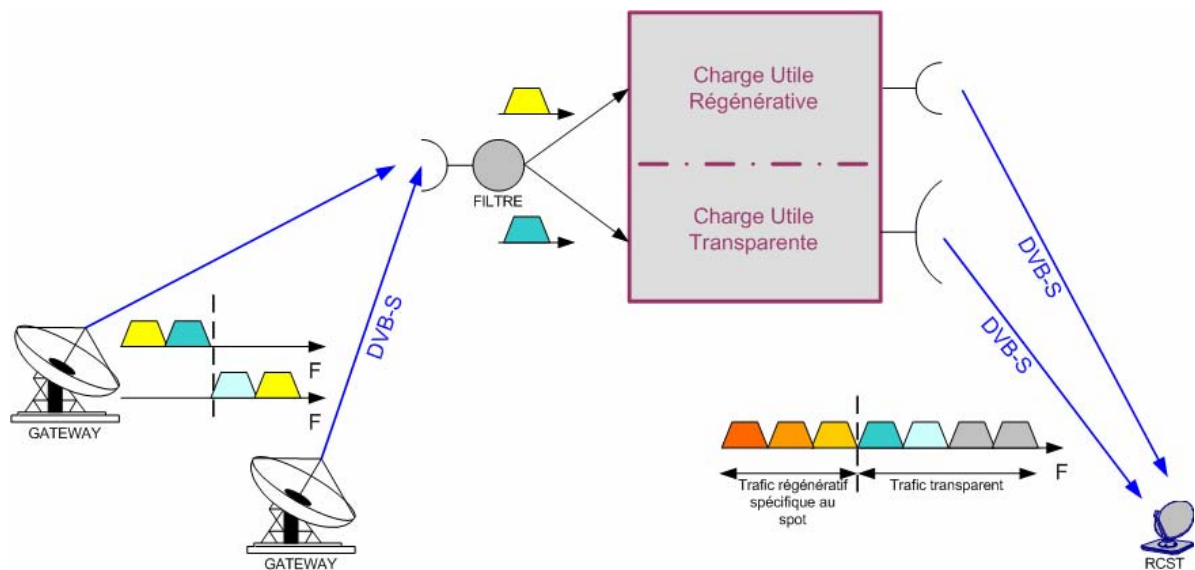


Figure 4.10 Émission de deux *gateways* vers le système hybride

4.3.1.4.2.2. Partage entre les deux modes pour des bursts DVB-RCS

L'utilisation d'un partage fréquentiel en fonction des transpondeurs n'est pas une solution adaptée au cas DVB-RCS, puisqu'elle empêche un même RCST d'utiliser les deux modes. Dans ce cas, nous envisageons une différenciation des modes en fonction des *slots* utilisés.

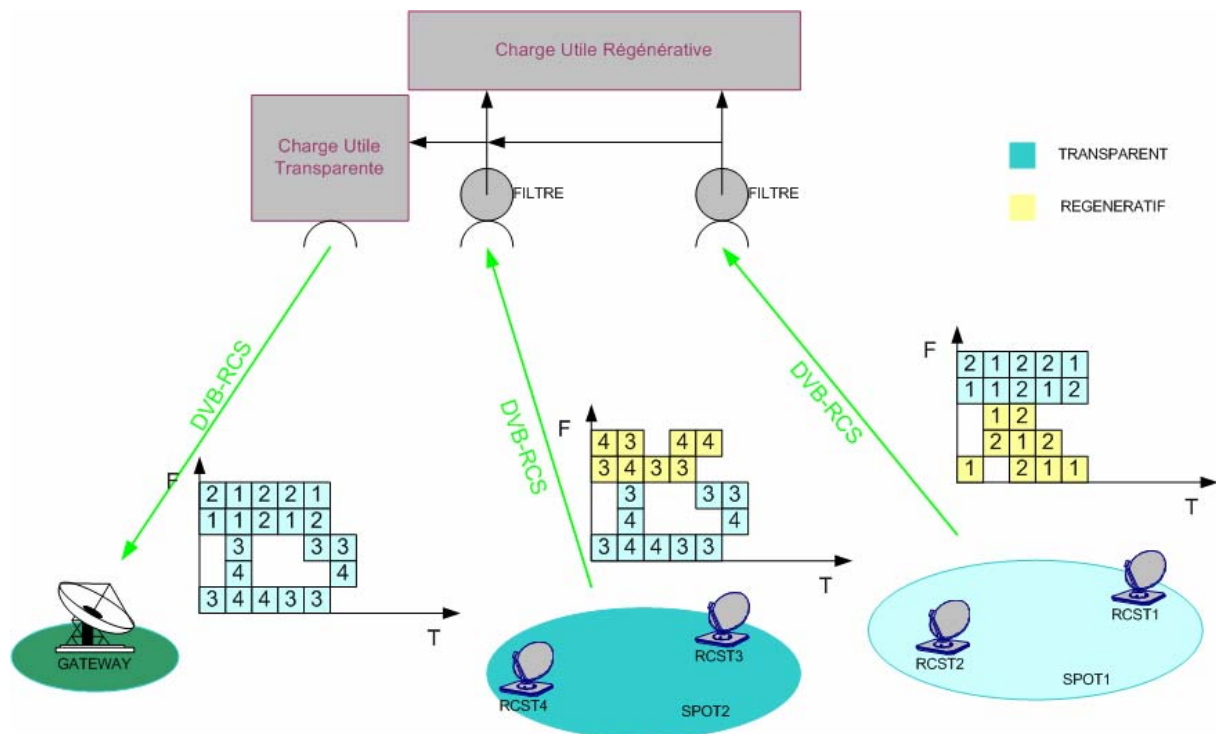


Figure 4.11 Émission de RCSTs situées dans des spots différents vers le système hybride

La figure précédente (Figure 4.11) présente le partage fréquentiel entre mode transparent et mode régénératif pour des RCSTs. Comme dans le cadre DVB-S, ce partage se fait en FTMA, c'est-à-dire que pour une même fréquence, le mode doit être soit régénératif soit transparent. Toutefois, le flux régénératif DVB-RCS montant étant incorporé dans le flux régénératif DVB-S descendant, il est possible ainsi possible de réutiliser les fréquences DVB-RCS sur le lien descendant.

4.3.1.4.3. CONCLUSION SUR L'INTÉGRATION DES DEUX CHARGES UTILES

Le système hybride intègre deux charges utiles, proposant chacune un service propre qualifié de modes. Nous avons vu dans cette partie que l'intégration de ces deux charges utiles pouvait être mise en œuvre sans souci majeur. Plusieurs éléments manquent toutefois à cette proposition, dont les plus notables sont la place des autres entités du système, le choix des modes ou encore la gestion des flux IP. Nous traiterons ces points dans la suite de cette partie.

4.3.2. Description des autres entités du système hybride

La figure suivante (Figure 4.12) propose une vision globale de l'architecture hybride, organisée autour du satellite. On y notera tout d'abord que la notion de *multi-spots* est étrangère au système transparent, puisque dans ce mode, tous les terminaux sont regroupés sous le même faisceau. Cette figure souligne aussi les différentes entités qui seront traitées dans les sections suivantes, à savoir les *gateways* (cf. 4.3.2.1), les terminaux (cf. 4.3.2.2), le NCC (cf. 4.3.2.3) et le MNMC (cf. 4.3.2.4).

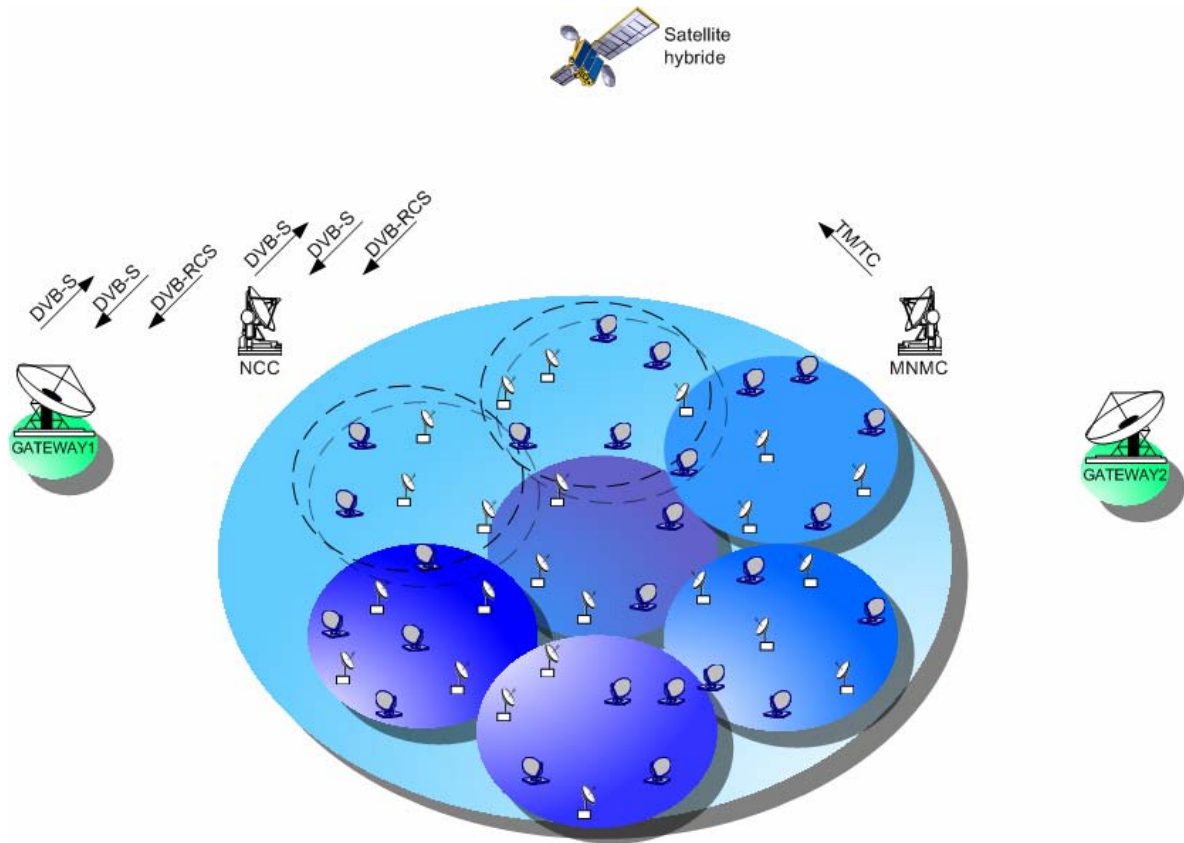


Figure 4.12 Vision d'ensemble des différentes entités spécifique à l'architecture hybride

#### 4.3.2.1. Les gateways

Cette partie décrit les *gateways* de l'architecture hybride.

##### 4.3.2.1.1. POSITION D'UNE GATEWAY

Même si cet élément n'est pas représenté sur la figure ci-dessus par soucis de clarté, une *gateway* se situe *a priori* dans un *spot*. Cette entité est en bordure du système satellite dans la mesure où elle est connectée à un réseau terrestre.

##### 4.3.2.1.2. FONCTIONS D'EMISSION D'UNE GATEWAY

Les *gateways* sont les centres d'émission en DVB-S. En effet elles seules sont habilitées à émettre du trafic en DVB-S sur le lien montant, et sont ainsi les génératrices du lien aller montant. Elles peuvent émettre en flux transparent ou en flux régénératif en fonction des transpondeurs dont elles disposent.

##### 4.3.2.1.3. FONCTIONS DE RÉCEPTION D'UNE GATEWAY

Les *gateways* sont les seuls récepteurs des *bursts* DVB-RCS utilisant le mode transparent. La *gateway* a alors la fonction de faire suivre ce trafic dans un canal DVB-S montant, si nécessaire. C'est ce qui explique le double bond satellite dans le cas d'une interconnexion entre deux RCST's via un système transparent.

Vu sa position la *gateway* peut aussi recevoir le flux DVB-S transparent (pour les communications entre *gateways*) et les flux DVB-S spécifiques à un spot (pour les retours en mode régénératif et les communications entre *gateways*).

## 4.3.2.1.4. FONCTIONS PROTOCOLAIRES

Les *gateways* sont des entités intégrant des fonctions de niveau 1, 2 et 3. Il s'agit donc de routeurs, passerelles d'accès aux réseaux de cœur des FAIs, aux fournisseurs de services, et à l'Internet plus généralement.

La *gateway* doit faire un aiguillage des trafics IP vers le bon mode, il s'agit de la mise en place d'un routage à qualité de service.

4.3.2.2. *Les terminaux*

Ils sont de deux types : les terminaux uniquement récepteurs (en blanc sur la figure) et les RCSTs.

## 4.3.2.2.1. TERMINAUX RECEPTEURS

Les récepteurs sont constitués d'une antenne parabolique actuellement de 60 cm de diamètre, l'*Outdoor Unit*, et d'un *Indoor Unit* simple qui peut être un IRD, ou dans la majeure partie des cas pour un système hybride, des modems-routeurs (PEPs) ou des ordinateurs équipés de carte DVB. Ces récepteurs sont capables de recevoir les flux DVB-S, en traitant en général 32 PIDs<sup>1</sup> en simultané.

Pour les récepteurs, les flux proviennent à la fois du mode transparent et du mode régénératif, de manière quasi transparente, puisque que seule la fréquence permet de déterminer le mode pour le récepteur.

## 4.3.2.2.2. TERMINAUX RECEPTEURS/ÉMETTEURS

Les récepteurs/émetteurs, nommés par la norme DVB des RCSTs, sont un type de VSAT équipé d'un *Outdoor Unit* de 80 à 120 cm de diamètre. L'*Indoor Unit* est toujours un routeur équipé d'une carte DVB. Ce routeur peut très bien être le terminal de l'utilisateur final, dans ce cas il met aussi en œuvre des protocoles de plus haut niveau.

Un RCST émet en DVB-RCS en utilisant quelques PIDs. Il est capable d'émettre sur les deux modes, et une sélection doit se faire à ce niveau. D'un point vue réception, il a les mêmes capacités qu'un terminal classique (cf. 4.3.2.2.1).

Le RCST peut être situé en tête de pont d'un réseau d'accès local, d'un réseau privé ou chez un utilisateur final. Il a des fonctions correspondant aux trois couches basses du modèle OSI. Mais nous verrons plus tard, dans la partie 5 (cf. 5.4.4.2) que des fonctionnalités de niveau supérieur peuvent être mises en place de manière à garder la transparence du système tout en améliorant ses performances.

4.3.2.3. *Le NCC – Network Control Centre*

Le NCC est l'entité de contrôle de l'accès au système. Il s'occupe de toutes les demandes d'émissions, d'allocations de capacité, mais aussi de la distribution des PIDs et de la QoS du trafic. C'est donc une entité centrale pour le choix du mode.

Le NCC est équipé comme une *gateway*, mais ne s'occupe que de la signalisation et du contrôle des flux. C'est donc une entité du plan de contrôle. Pour cette raison, le NCC est communément intégré dans une *gateway* (surtout lorsqu'il n'y en a qu'une seule) pour pouvoir émettre les tables SI directement dans le flux DVB-S. Nous envisageons ce cas ici, tout en considérant que certaines fonctions du NCC peuvent être transférées au satellite à court terme (cf. 4.3.1.3.2.2)

---

<sup>1</sup> Valeur couramment observée dans les spécifications techniques.

#### 4.3.2.4. *Le MNMC – Mission and Network Management Centre*

Le MNMC contrôle le système satellite en terme de position, d'alimentations, d'état de la charge utile, d'états de pertes dues aux perturbations atmosphériques... Ce centre est parfois regroupé avec le NCC, et ils ne font alors plus qu'un. Toutefois dans le cadre du système hybride, nous différencions ces deux éléments.

Le MNMC utilise les liens TM/TC (TeleMetry/TeleCommand) pour communiquer avec le satellite.

### 4.3.3. Description de l'architecture protocolaire

Après avoir étudié les différents éléments constituant le cœur de cette architecture, un point capital reste à définir : son architecture protocolaire qui montre d'une part comment IP est intégré, et d'autre part comment la sélection entre les deux modes s'effectue.

Pour mieux traiter ces points nous aborderons la structure protocolaire de ce système niveau par niveau, en soulignant la relation entre le niveau 2 et 3. Nous traiterons donc ici les couches 3 et 2, puisque les points intéressants du niveau physique ont été traités dans la partie 4.3.1, et que les niveaux supérieurs ne sont pas directement concernés ici.

Cette partie se découpe alors en cinq parties : Une première section (4.3.3.1) présente l'architecture protocolaire générale, et souligne les points durs à traiter. Une deuxième section (4.3.3.2) aborde le niveau 3, et particulièrement le mécanisme de sélection des modes. Une troisième section (4.3.3.3) propose d'étudier l'interaction entre le niveau 3 et le niveau 2. Une quatrième section (4.3.3.4) traite le niveau 2, insistant sur la méthode d'accès très liée à la différenciation des modes et à la résolution d'adresse, des fonctionnalités dépendantes de l'interaction avec le niveau 3. La section 4.3.3.5 propose une vision d'ensemble de la signalisation des flux IP dans le système, d'un point de vue utilisateur uniquement, en discutant du multiplexage des flux dans un même PID. Cette section est alors l'occasion d'ouvrir vers la commutation des SNDUs à bord. Enfin, la dernière section (4.3.3.6) conclut les différents éléments présentés dans cette partie en proposant une vision d'ensemble de la signalisation des flux.

#### 4.3.3.1. *Les couches protocolaires*

Avant de pouvoir traiter les différents éléments protocolaires de cette architecture, une vision d'ensemble est nécessaire, et c'est l'objectif de cette partie.

##### 4.3.3.1.1. VISION D'ENSEMBLE

L'agencement protocolaire dans le plan utilisateur est présenté dans la figure suivante (Figure 4.13). Ce schéma se veut simple et ne rentre pas dans la représentation matérielle sous-jacente, notamment le nombre de *spots* (étude a déjà été effectuée précédemment). Le schéma propose un aperçu des couches protocolaires d'un RCST, d'une *gateway*, et du système hybride.

Nous ne nous revenons pas ici sur la charge transparente puisqu'elle ne recouvre que la première couche de notre architecture (cf. 4.3.1.2). On rappelle ici qu'aucune interaction à bord entre les deux charges n'est prévue.

La charge utile régénérative, comme nous l'avons vu précédemment (cf. 4.3.1.3), se compose d'un niveau 1 et 2, même si on peut envisager à plus long terme d'intégrer un niveau 3. C'est le MPEG-2 TS qui est le protocole de niveau liaison et gère la commutation (Figure 4.9). Ce choix a été fait dans la mesure où cette commutation se présente comme une manière d'uniformiser le niveau 2 sur les systèmes DVB, et semble réaliste puisqu'une telle technologie est étudiée par Acaltel Espacio, avec des tests sur le système IBIS [27], et que le système AmerHis [104], lancé récemment, met en oeuvre un commutateur MPEG-2 TS.

Le multiplexage des flux est aussi réalisé à ce niveau.

On pourra noter l'homogénéité des couches protocolaires de la charge utile hybride. En effet l'utilisation du MPEG-2 TS pour le DVB-RCS, permet d'avoir un traitement similaire à celui du DVB-S.

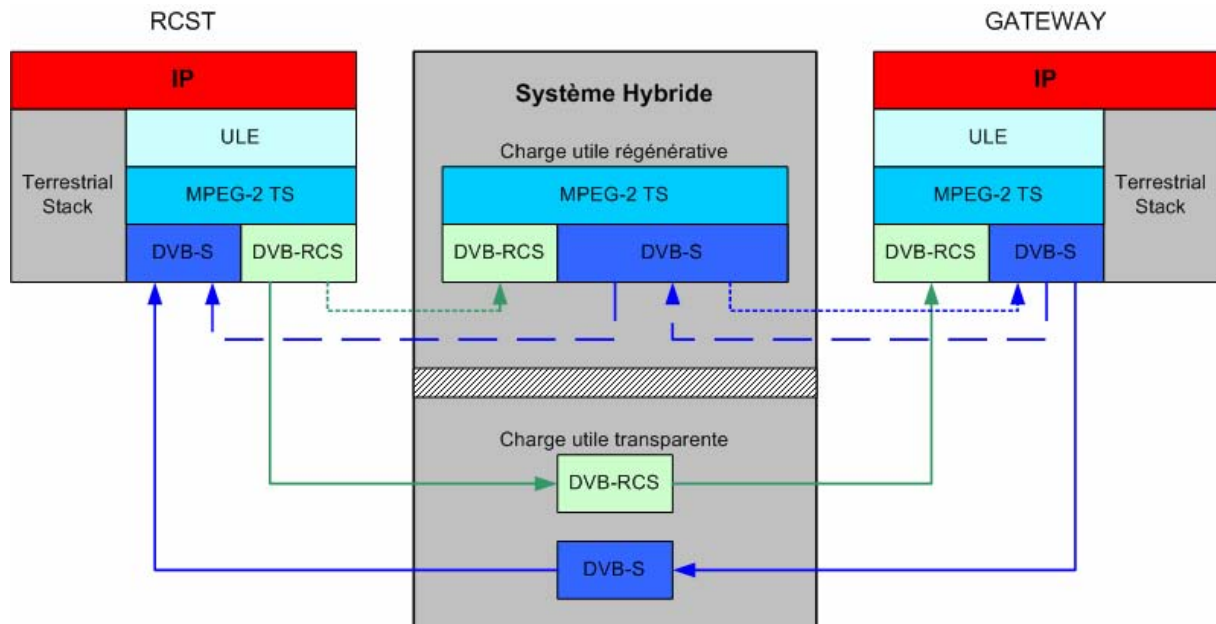


Figure 4.13 Les couches protocolaires de l'architecture hybride dans le plan utilisateur

Pour les *gateways* comme les RCST, les couches protocolaires sont celles proposées pour l'encapsulation ULE (cf. 3.4.1). Ainsi les piles de protocoles pour ces deux entités sont similaires sur le plan utilisateur.

Les choix faits ici ont été guidés par les différents aspects présentés précédemment, proposant un système qui se veut à la fois performant et réalisable dans un cadre actuel.

#### 4.3.3.1.2. LES POINTS DURS

Cette structure générale ne pointe pas directement sur les points qui demandent une étude approfondie, et pourtant un certains nombres de difficultés doivent être relevées pour aboutir à une architecture protocolaire parfaitement intégrée.

##### 4.3.3.1.2.1. Niveau 3

L'intégration du niveau 3 dans le système soulève quelques difficultés, essentiellement des problèmes d'interaction entre le niveau 3 et 2 (décrits dans la section suivante). Toutefois, deux points importants au niveau 3 sont la sélection des modes, et la mise en œuvre de *multicast* IP.

##### 4.3.3.1.2.2. Interaction entre le niveau 3 et 2

Si l'encapsulation proposée dans cette architecture ne pose pas de problème (puisqu'utilisant ULE), il n'en reste pas moins de nombreuses questions quant à la résolution d'adresse, et notamment le lien entre adresse IP, adresse MAC et PID dans un cadre unipoint comme multipoint. La sélection du mode est aussi à envisager à ce niveau.

##### 4.3.3.1.2.3. Niveau 2

L'allocation de ressources et la commutation bord sont les deux problèmes essentiels à traiter au niveau 2, et le seront dans la section 4.3.3.4.

## 4.3.3.1.3. CONCLUSION

Un certain nombre de questions posées dans cette partie doivent trouver des solutions protocolaires. Ces problèmes sont majoritairement liés à l'intégration et à la signalisation. C'est en se concentrant sur ces points que nous proposons de traiter les niveaux 3 et 2 de l'architecture.

**4.3.3.2. Le niveau réseau**

Cette section reprend les points durs abordés précédemment, à savoir la sélection du mode et le *multicast* IP, et propose l'approche choisie pour l'architecture hybride.

## 4.3.3.2.1. AIGUILLAGE ENTRE LES DEUX MODES DU SYSTÈME HYBRIDE

Une notion spécifique au système hybride est l'aiguillage des flux vers le mode du système adapté. Pour une station comme une *gateway* ou un RCST, la couche de niveau 3, IP, considère les deux modes du système hybride comme deux interfaces aires distinctes, avec des caractéristiques différentes. Le choix entre ses deux interfaces est alors fait en fonction d'une part des besoins des données routées, et d'autre part de la source de la donnée (plus exactement de son accord passé avec l'opérateur du système).

Il faut toutefois noter que la qualité de service offerte par le lien est connue *a priori*, il n'y a donc pas besoin d'ajouter des mécanismes qui permettent de déterminer l'état du lien, puisque ces informations sont centralisées par le NCC. Informé, le routeur est capable d'utiliser une forme de routage à qualité de service (aiguillant les flux vers l'interface correspondant aux demandes de l'utilisateur et à ses droits, mettant en œuvre du partage de charge...). Dans le cadre de cette proposition, nous avons choisi d'utiliser du marquage de flux. La section 4.3.3.2.1.1 propose une mise en œuvre avec l'utilisation de *tags*, la section 4.3.3.2.1.2 présente des ouvertures pour une gestion plus globale de cet aiguillage.

## 4.3.3.2.1.1. Les techniques de marquage des flux IP pour le système hybride

Dans le cadre du système hybride, le routage des flux peut prendre en compte différents éléments comme l'adresse source, l'adresse destination ou encore un *tag* spécifique, indiquant quel mode utiliser.

Une sélection du mode uniquement en fonction de l'émetteur restreint ce dernier à un service statique, tandis que l'aiguillage par adresse destination implique un seul mode possible entre deux entités de niveaux IP (au moins dans un sens).

Le marquage du flux apparaît alors comme une solution plus flexible et moins contraignante pour les couches supérieures. C'est donc la solution pour laquelle nous avons opté ici.

Plusieurs possibilités sont alors offertes. Toutefois, il n'est pas dans l'intérêt du système hybride de statuer sur une méthode. En effet, cette structure doit pouvoir s'intégrer dans un réseau IP proposant une architecture de QoS à plus large échelle. Le satellite hybride peut ainsi être incorporé dans un domaine DiffServ [108], chacune de ses *gateways* et chacun de ses RCSTs agissant comme un nœud DS, s'occupant alors de l'agrégats de flux. De même, le système peut être intégré dans un environnement IntServ [109], donnant une garantie de service à un nombre limité de flux. Dans le cadre d'une architecture plus vaste, on peut considérer que le système propose deux profils de QoS, spécifiques à chacun de ses modes.

Dans le cadre d'un système où la qualité de service à plus large échelle n'est pas présente, comme il en est le cas pour notre exemple, ce marquage peut être réalisé en utilisant l'ancien champ ToS (Type of Service) des paquets IPv4, ou l'octet de classe de trafic pour les paquets IPv6. Ce champ peut être rempli directement par l'application, ou par l'analyse du port source et destination de l'en-tête TCP. La solution applicative ne convenant pas à notre approche



transparente, c'est le routage qui s'occupe de ce marquage. Son automatiser est envisagée par l'utilisation des PEPs intégrant les fonctionnalités de modems routeurs qui utilisent, par exemple, un noyau Unix, et plus précisément les fonctions iptables. Ce système de « boîte noire » permet alors de ne pas impliquer l'utilisateur final dans le processus. Si le client triche sur sa qualité de service, c'est le niveau 2 qui écartera le flux.

Ce marquage est effectué par le premier routeur de bordure habilité de l'architecture. Ce routeur peut directement être celui d'un FAI ou d'un FIS, ou une *gateway*. Dans le cadre d'un RCST, c'est son PEP qui s'occupe du marquage.

Comme pour tout routeur IP, des techniques d'ordonnement, comme des politiques de contrôle de flux peuvent être mises en place, avec l'aide de protocoles tels que RSVP (Resource reSerVation Protocol) [110].

#### 4.3.3.2.1.2. Des perspectives pour l'aiguillage au niveau 3

Dans un cadre similaire, le routeur IP, en plus d'effectuer du marquage et du routage à QoS, peut intégrer des fonctionnalités de *policing* voire de mise en forme des flux, entrant ainsi en interaction avec les éléments de définition des contrats et de l'admission au système. Ainsi le niveau 3 peut devenir une entité de contrôle, vérifiant les droits des différents flux et les déclassant à l'occasion.

Ces fonctions sont particulièrement intéressantes quand le routeur d'accès au système n'est pas celui qui gère le marquage des flux, comme il peut en être le cas pour une *gateway*, mais sont à prendre avec prudence pour des RCSTs, par soucis de sécurité.

#### 4.3.3.2.2. MULTICAST IP

Dans le cadre de cette partie nous étudierons comment l'intégration du multicast IP est envisagée dans cette architecture. La première section (4.3.3.2.2.1) présentera le multicast IP dans cette architecture. Puis la section 4.3.3.2.2.2 proposera d'étudier son intérêt pour la réplication bord. Enfin c'est avec la section 4.3.3.2.2.3 que nous observerons quelques perspectives de cette architecture pour le déploiement du *multicast* IP.

##### 4.3.3.2.2.1. Le multicast IP sur l'architecture hybride

Le *multicast* IP est intégré dans l'architecture hybride. Tous les routeurs intrinsèquement dépendants de celle-ci (*gateways* et RCST) mettent en œuvre un protocole de routage *multicast* IP, à savoir PIM-SM [111], et un protocole de gestion de groupe, IGMP v2 [59]. Ces choix ne sont en rien exclusifs et sont en grande partie dues aux études menées dans le cadre du projet DIPCAST.

Ici, la version 2 d'IGMP a été préférée à sa troisième version pour la taille de ses messages qui permet d'envisager des techniques de type *snooping* à bord à court terme (cf. 3.4.4.6).

Une solution quant au *multicast* sur cette architecture peut consister à observer le réseau satellite comme un réseau local avec comme routeur de bordure les *gateways*. L'émission sur le satellite est alors gérée par le protocole IGMP qui permet à la *gateway* de savoir si un élément du groupe est sur son réseau. Cette solution est néanmoins limitée au cas du service Internet et de la VoD. Dans un service d'interconnexion, IGMP ne suffit pas, et la mise en place d'un protocole de routage *multicast* est nécessaire.

Il faut noter que les protocoles *multicast* au niveau IP n'impliquent rien quant aux niveaux inférieurs. Néanmoins, pour la commutation de niveau 2, un lien doit être fait avec ces protocoles.

4.3.3.2.2. *Le multicast IP et son intérêt pour la réplication à bord*

La présence de la réplication à bord a une influence directe sur la mise en oeuvre du *multicast* IP.

Sans réplication à bord, on peut considérer pour un terminal quelconque, qu'il dispose en mode régénératif de  $n$  interfaces, une pour chaque *spot*. Ainsi pour envoyer vers  $m$  *spots* différents un datagramme, celui-ci doit être émis  $m$  fois par le terminal.

Avec la réplication à bord, le système régénératif propose une seule interface. Le datagramme sera envoyé une seule fois sur le satellite par le terminal et sera ensuite répliqué à bord.

La figure suivante (Figure 4.14) permet d'illustrer ce propos. La réplication à bord permet une intégration plus naturelle du *multicast* dans le système, au prix d'une complexité plus grande au niveau 2. La réplication implique, en effet, l'utilisation d'une seule interface IP, c'est au niveau 2 de savoir vers quels *spots* aiguiller les flux.

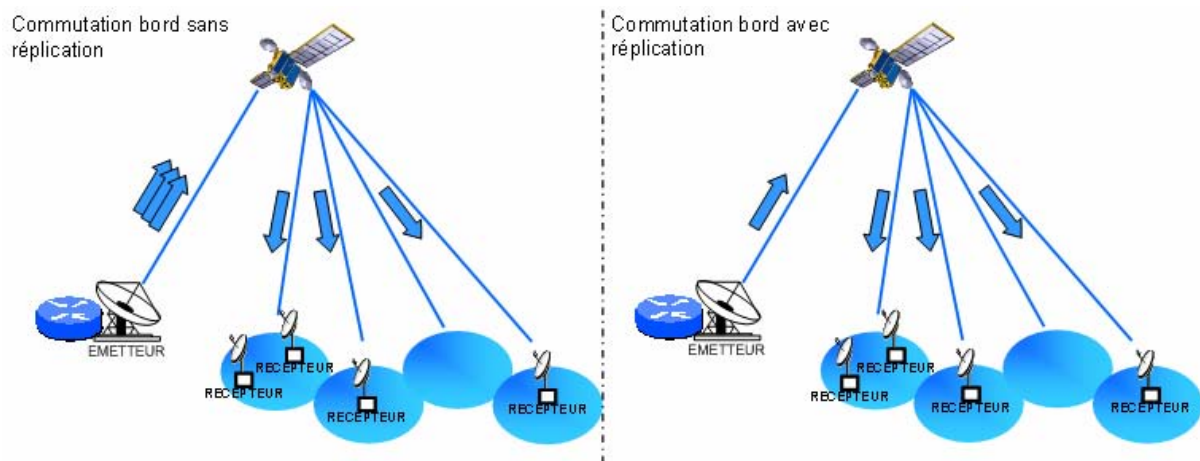


Figure 4.14 Distinction pour le multicast entre un système avec et sans réplication à bord

4.3.3.2.2.3. *Des perspectives pour le déploiement du multicast IP*

Un certain nombre de questions se pose quant à la mise en oeuvre des protocoles de *multicast* IP sur satellite [112]. Dans ce cadre, des configurations et des adaptations peuvent leur être apportées, comme il en a été d'ailleurs le cas dans DIPCAST [113]. Pour un système satellite, il est en effet préférable de préserver la bande passante en introduisant des modifications. La configuration des points de rendez-vous, ou encore l'émission sur le lien satellite que lorsqu'il y a au moins une source présente, sont autant d'optimisations pour mieux gérer la ressource satellite.

Toutefois, ces modifications ne doivent pas intervenir sur le protocole directement, sous peine de rompre la transparence du système. À ce niveau, les PEPs semblent encore la solution pour maintenir cette transparence, tout en apportant des optimisations spécifiques au lien satellite.

4.3.3.3. *L'interaction entre le niveau réseau et le niveau liaison*

Ce point joue un rôle capital pour l'intégration d'IP dans l'architecture hybride. Nous verrons dans cette partie la relation entre l'aiguillage de niveau 3 et celui de niveau 2 (section 4.3.3.3.1). Après quelques mots sur l'encapsulation qui ne pose pas de question ici (section 4.3.3.3.2), nous proposerons d'observer la méthode de résolution d'adresse dans la section 4.3.3.3.3, intrinsèquement liée à l'accès au système, une fonction traitée dans le niveau 2.

4.3.3.3.1. RELATION ENTRE L'AIGUILLAGE DE NIVEAU 3 ET LE NIVEAU 2

Une fois le marquage effectué au niveau 3, deux méthodes sont alors envisagées pour faire le routage, soit vers une unique interface, en impliquant une résolution d'adresse prenant en compte le *tag*, soit l'utilisation de deux interfaces distinctes de niveau 2, une pour chaque mode du système.

L'utilisation d'une résolution d'adresse prenant en compte le *tag* pose différents problèmes. D'une part sa relation avec un marquage spécifique, rend la méthode dépendante du système. Aussi un changement de la méthode d'aiguillage des flux implique une modification des mécanismes d'AR. D'autre part, l'AR est déjà un point critique dans les systèmes IP sur DVB (cf. 3.4.1.3).

La méthode utilisée est donc la mise en œuvre de plusieurs interfaces, une pour chaque mode. Cette méthode utilise deux instanciations des couches de niveaux 2 (Figure 4.15).

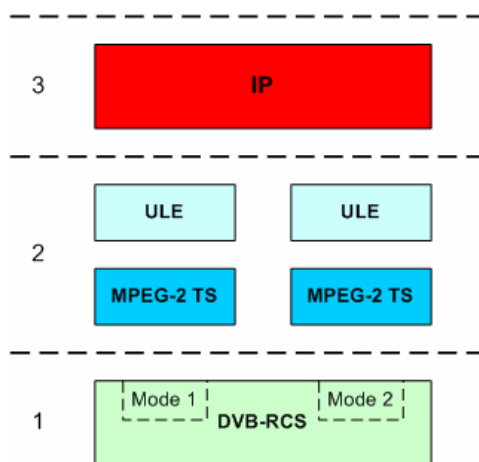


Figure 4.15 Exemple de relation entre l'aiguillage de niveau 3 et les couches inférieures pour une RCST

Pour l'interface du mode régénératif comme transparent, la couche ULE peut vérifier le *tag*, pour attribuer une priorité à la SNDU, cette priorité sera directement envoyée à la couche MPEG-2 TS qui utilisera son bit de priorité pour tous les paquets contenant la SNDU. Toutefois l'utilisation de files différentes entre IP et ULE permet de circonscrire cette gestion au niveau 3, sans impliquer un lien supplémentaire entre ces deux niveaux.

Chaque interface ayant ses propres PIDs, correspondants au mode auquel elle est associée, la relation se fait naturellement à ce niveau. Il existe alors deux niveaux 1 virtuels, utilisant la même structure physique. Cette solution n'est pas sans rappeler l'utilisation des interfaces virtuelles permettant la mise en œuvre de VLANs.

L'attribution des PIDs est alors un élément clef de la résolution d'adresse et de l'accès au système.

4.3.3.3.2. ENCAPSULATION DES DATAGRAMMES

L'encapsulation ULE est utilisée ici. Nous avons déjà présenté ce protocole dans la partie 3.4.1, et nous ne revenons pas dessus ici. Les datagrammes sont encapsulés dans une SNDU en utilisant un champ optionnel de 6 octets pour une adresse MAC (cf. Figure 3.14 p. 55).

4.3.3.3.3. RÉOLUTION D'ADRESSE

Un lien doit être mis en place entre l'adressage de niveau 3 et les adressages de niveau 2 (adresse MAC et PID). C'est ce que nous entendons ici par le terme résolution d'adresse (AR).

L'AR est une tâche délicate sur satellite. Au cœur des débats actuels en particulier dans le cadre du groupe de travail IP sur DVB, sa normalisation semble poser problème. L'architecture hybride n'échappe pas à cela, ajoutant même des questions particulières à la sélection entre ses deux modes.

Dans notre cadre la résolution d'adresse se résume à trois points centraux :

- la correspondance entre PID, MAC et adresse IP ;
- la méthode de résolution, à proprement parler (protocole spécifique, général (ARP) ou méthode statique) ;
- la correspondance avec les deux modes du système.

Cette étude suivra alors cette démarche. Dans un premier temps nous discuterons sur les différents choix quant à la correspondance d'adressage (4.3.3.3.1). Puis nous observerons la solution proposée ici (4.3.3.3.2). Dans un troisième temps nous proposerons la méthode d'AR utilisée pour les adresses MAC (4.3.3.3.3) et pour les PIDs (4.3.3.3.4). Enfin nous conclurons avec le lien avec les deux modes du système (4.3.3.3.5).

#### 4.3.3.3.1. *Les choix de la correspondance entre PID, adresse MAC et adresse IP*

Notre solution utilise le protocole ULE. Avant de choisir d'utiliser le champ MAC optionnel, nous devons nous interroger sur l'intérêt d'intégrer un tel champ. La réponse dépend principalement de deux critères : d'une part la technologie de commutation, et d'autre part le nombre d'utilisateurs du système.

Dans notre cas la commutation est faite sur les courts paquets MPEG-2 TS. Il n'est alors pas possible d'avoir accès pour chaque paquet à l'adresse MAC à bord, puisque les SNDUs sont fragmentées. Il n'est pas non plus question d'ajouter au paquet MPEG-2 TS de l'*overhead* avec un champ d'adaptation supplémentaire. Les PIDs sont la seule information disponible à ce niveau.

L'adresse MAC peut paraître inutile dans ce cas, mais c'est sans prendre en compte le nombre d'utilisateurs. Sans chercher à dimensionner le système hybride, l'utilisation du seul PID comme seul identifiant de niveau 2 peut poser deux limites pour un nombre d'utilisateurs important. D'une part, il devient vite impossible d'attribuer un PID par destinataire dans la mesure où la signalisation DVB en utilise déjà un grand nombre. D'autre part, les PIDs sont plus représentatifs d'une source que d'un récepteur, puisque deux sources ne peuvent émettre directement avec le même PID vers un même destinataire en même temps. En effet, le destinataire ne peut pas différencier les flux dans ce cas, et reconstituer les SNDUs.

L'utilisation d'une adresse MAC permet alors d'utiliser un PID par source, par mode et par spot, sans introduire la notion spécifique de destinataire. L'adresse MAC permet alors de faire le lien avec le destinataire.

#### 4.3.3.3.2. *La correspondance entre PID, adresse MAC et adresse IP*

Dans le cadre de cette architecture, nous avons opté pour une attribution de l'adresse MAC en fonction de l'adresse destinataire, dans le cadre des flux unipoint, et de l'adresse de groupe dans le cadre multipoint.

Les PIDs sont spécifiques à la fois à un mode, une source et, dans le seul cadre du mode régénératif, à un groupe de faisceaux utilisé à bord (1 seul *spot* pour le mode unipoint, plusieurs *spots* pour la diffusion et le multipoint).

Cette solution permet d'éviter l'utilisation des PIDs seuls qui peut soit ne pas supporter le passage à l'échelle, soit engendrer un travail important de la couche IP pour écarter les paquets dont elle n'est pas destinataire.

Le récepteur peut donc faire un premier filtrage au niveau PID, puis vérifier qu'il est bien le destinataire avec l'adresse MAC. Un dernier filtrage est toujours fait au niveau IP, dans la mesure où l'adresse une MAC *multicast* peut correspondre à plusieurs adresses IP *multicast*.

4.3.3.3.3. Les mécanismes mis en place pour la résolution d'adresse pour les adresses MAC

Plusieurs types de mécanismes existent pour la mise en œuvre de l'AR : des solutions statiques, et des solutions dynamiques. On peut envisager d'utiliser une résolution dynamique pour les adresses MAC, de type ARP. Toutefois, de tels mécanismes prennent un temps non négligeable sur un système satellite (Tableau III), et il serait dommage de ne pas prendre en compte l'avantage d'un système satellite : la distribution des adresses IP est effectuée par les FAIs gérant le système, ou par l'opérateur satellite lui-même. Dans ce cadre tous les équipements ayant un accès direct au satellite ont été configurés par une seule entité.

Tableau III. DÉLAI D'ALLER RETOUR D'UNE REQUÊTE DE TYPE ARP SUR UN SYSTÈME HYBRIDE

	Mode transparent			Mode régénératif		
	Gateway > Gateway	Gateway > RCST	RCST > RCST	Gateway > Gateway	Gateway > RCST	RCST > RCST
Temps minimum de retour d'une requête AR	500 ms	500 à 750 ms	1000 ms	500 ms	500 ms	500 ms

Pour les adresses MAC unipoints, deux mécanismes sont alors envisageables :

- Un *mapping* entre l'adresse IP et l'adresse MAC. Par une simple translation toute *gateway* ou RCST peut trouver l'adresse MAC correspondant à l'adresse IP destinataire.
- Une table de correspondance centralisée au niveau du NCC, faisant la correspondance entre adresse IP et adresse MAC. Pour les *gateways*, une image de cette table est disponible. Pour les RCSTs, à chaque demande de nouvelles émissions, l'émetteur, s'il ne connaît pas l'adresse MAC de la cible peut demander celle-ci au NCC, via un message de type privé, ou cette table peut être mise à sa disposition, via une émission périodique du NCC.

Nous avons choisi la première méthode pour notre système, dans la mesure où les adresses MAC peuvent être configurées pour les cartes ULE/DVB. Dans le cas contraire, la seconde méthode sera utilisée.

Pour les adresses MAC multipoints, le *mapping* de l'adresse du groupe IP *multicast* permet d'obtenir l'adresse MAC *multicast* correspondante (Figure 4.16).

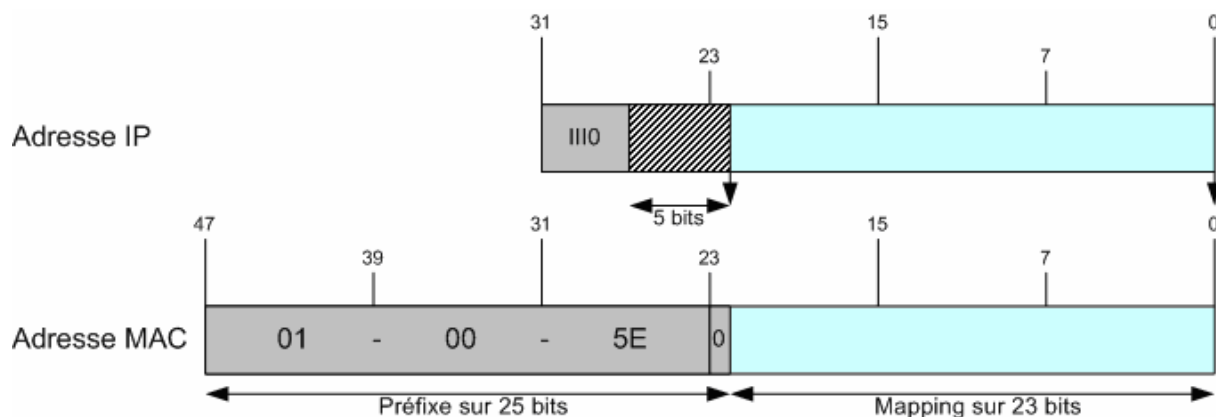


Figure 4.16 Mapping d'une adresse IP multicast sur une adresse MAC

4.3.3.3.4. Les mécanismes pour la résolution d'adresse pour les PIDs

Deux mécanismes sont nécessaires pour la résolution d'adresse au niveau des PIDs :

- un mécanisme pour que la source sache quel PID utiliser pour émettre son flux ;
- un mécanisme pour que le récepteur sache quel PID écouter pour recevoir le flux qui lui est destiné.

Le premier mécanisme est différent selon qu'il s'agisse d'une *gateway*, ou d'un RCST.

Dans le cas d'une *gateway*, les PIDs sont attribués *a priori*. La *gateway* a alors un pôle de PIDs attribué par IN (Interactive Network). Ce pôle est constitué de :

- un nombre limité de PIDs<sup>1</sup> pour le mode transparent. Ces PIDs peuvent même être réutilisés sur les autres transpondeurs, transparent comme régénératif (mais une seule fois sur tous les transpondeurs régénératifs) ;
- $n$  PIDs pour les flux unipoints en mode régénératif ( $n$  est le nombre de *spots*) ;
- $4n$  PIDs pour les flux multipoints en mode régénératif, il faut noter que si cela ne permet pas de traiter toutes les possibilités, une allocation de PIDs supplémentaires peut être faite par demande auprès du NCC.

Les PIDs sont utilisés au grès du service en mode transparent. Pour les flux régénératifs, chaque PID est utilisé en fonction des faisceaux utilisés. Cette correspondance est obtenue directement par un adressage judicieux du prochain *hop*, chaque adresse IP contenant l'information sur le faisceau dans lequel le destinataire se situe. Pour le *multicast*, la table de routage doit garder à jour les différents routeurs qui ont rejoint l'arbre *multicast*. Avec ses adresses, la *gateway* est capable de faire la relation.

Dans le cas d'un RCST, les PIDs peuvent être distribués à la demande d'allocation de ressource par la table TBTP émise par le NCC sur le flux aller DVB-S. En mode transparent un RCS aura un seul PID pour tout son trafic transparent (le partage de la ressource entre les différents flux transparents est donc gérée par le RCST). En mode régénératif, les PIDs sont toujours attribués par le NCC dans la TBTP, mais ces derniers correspondent à une destination précise. Ces éléments sont stockés dans une table, comme l'exemple suivant (Tableau IV).

Tableau IV. EXEMPLE DE TABLE DE CORRESPONDANCE D'UN RCST

Mode Transparent			Mode Régénératif		
Adresse IP	MAC	PID	Adresse IP	MAC	PID
120.45.45.1	01-01-1A-AE-05-08	60	181.45.250.7	0A-B2-5C-2D-FA-07	50
175.1.184.45	01-01-1A-AE-05-08	60	181.78.78.79	81-01-02-10-AD-45	53
154.165.0.2	01-01-1A-AE-05-08	60	154.165.0.2	70-00-45-8E-DD-12	50
...			...		
224.210.0.45	01-00-5E-52-00-2D	60	224.210.0.45	01-00-5E-52-00-2D	451
...			224.4.37.3	01-00-5E-04-25-03	456
			...		

Il faut toutefois noter que la table TBTP n'a pas été faite pour corréliser des *slots* à un PID. En revanche la norme propose avec le Channel\_ID une alternative qu'il conviendra d'analyser plus en détail dans de futurs travaux. Cette partie reste malgré tout un problème ouvert pour l'heure.

<sup>1</sup> Un seul PID peut tout à fait convenir, facilitant l'agrégation de flux et donc réduisant la signalisation SI. Toutefois un seul PID risque d'induire un travail notable pour les récepteurs. On lui préférera 10 à 20 PIDs en fonction du nombre de transpondeurs.

Le second mécanisme, consistant à informer les récepteurs des PIDs qu'ils doivent écouter, utilise les tables INT précédemment exposé (cf. 3.2.2.3). Ces tables sont générés soit directement par les *gateways* (pour la voie aller), soit par le NCC en fonction des demandes d'accès.

#### 4.3.3.3.5. *Le lien entre la résolution d'adresse et le choix des modes*

D'un point de vue aller, ce lien n'a pas lieu d'être puisque l'interface choisie par le niveau 3 conduit vers des transpondeurs d'un mode ou de l'autre. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'un même PID peut être utilisé sur l'un et l'autre.

Dans le cadre de la voie retour, ce lien est fait par le PID. En fonction du PID attribué au flux donné par la table TBTP, le RCST sait où émettre ses bursts, respectant ainsi le partage de fréquence proposé dans la section 4.3.1.4.2.2.

### 4.3.3.4. *Le niveau 2*

L'étude du lien entre le niveau 3 et 2 a permis de montrer le lien étroit entre la résolution d'adresse et l'allocation de ressources. Cette partie permet de conclure sur la signalisation du système en reprenant le niveau 2 déjà pleinement abordé dans la partie précédente.

Nous traiterons ici l'accès au système (4.3.3.4.1) et la commutation bord (4.3.3.4.2).

#### 4.3.3.4.1. MÉTHODE D'ACCÈS

L'accès au système comprend deux parties intrinsèquement liées : d'une part la méthode d'accès à proprement parler et d'autre part la différenciation entre les flux de mode transparent et de mode régénératif. Nous avons déjà traité ce dernier point dans les parties précédentes et nous traitons donc ici le point de la méthode d'accès en deux points : au niveau des *gateways* dans la section 4.3.3.4.1.1 et au niveau des RCST dans la section 4.3.3.4.1.2.

Avant de commencer cette description, notons qu'une étude des techniques d'accès reste hors du cadre de ce travail. Nous ne proposons pas ici de nous interroger sur les mécanismes d'accès eux-mêmes, mais sur les fonctionnalités qui y sont mis en œuvre. Les méthodes d'accès restent spécifiques au système et aux besoins de celui-ci, apportant un niveau de détail non souhaité ici puisque notre analyse se situe dans un cadre de normalisation, et non de maquettage.

##### 4.3.3.4.1.1. *L'accès au système des gateways*

L'accès au niveau des *gateways* se fait en deux points :

- Les flux IP sont gérés au niveau 3 en fonction des SLAs (Service Level Agreements), et de la bande passante louée. Il s'agit souvent d'un simple contrôle par l'interface du flux entrant, le trafic étant traité par les FAIs et les FISs auparavant. Les flux IP sont traités au préalable par le FAI, ou le FSI.
- L'accès au niveau 2 n'a pas besoin de demandes d'allocations puisque la *gateway* a l'exclusivité de l'émission sur des transpondeurs spécifiques. Le partage de la ressource se fait donc par transpondeur au niveau de la *gateway*.

Nous rappelons que chaque multiplexe correspond à un seul mode, le choix est donc fait au niveau de l'interface IP utilisée et non pas au niveau de l'accès.

Le niveau accès peut alors vérifier la validité du droit d'émission d'un flux, la qualité de service du flux. Si cela ne correspond pas le flux est soit supprimé, soit déclassé. Ces fonctionnalités peuvent cependant être réalisées au niveau 3, étant alors facilitées par l'introduction de QoS au niveau IP dans l'architecture.

#### 4.3.3.4.1.2. L'accès au système des RCSTs

Les RCSTs accèdent au multiple DVB-RCS via la méthode présentée dans la section 2.4.4. Que l'émission se fasse par CAC ou par DAMA, ou quelle que soit la réservation de flux choisie, l'accès au système se fait en quatre étapes :

- Le RCST vérifie selon un SLA donné que le flux a bien le droit d'émettre,
- Le RCST envoie une demande d'allocation de ressources au NCC via sur un canal à contention spécifique à ces demandes (les *bursts* SYNC). Cette demande n'est pas la même en mode transparent et en mode régénératif. En effet dans ce premier cas, il n'y a pas lieu de préciser la destination, puisque les données iront à la *gateway* alors que dans le second cas, la destination a une influence sur le PID utilisé et la commutation bord. Cette demande peut être de différents types : CRA (Continuous Rate Assignment), FCA (Free Capacity Assignment), RBDC (Rate-Based Dynamic Capacity) et VBDC (Volume-Based Dynamic Capacity) [114].
- Le NCC analyse les demandes des différentes RCSTs et attribuent un nombre de *slots* spécifique à ce flux. Cette affectation est plus délicate à calculer dans le cas régénératif car les capacités sur chaque faisceau montant et descendant doivent être prises en compte<sup>1</sup>. Cette information est véhiculée dans la table TBTP où un PID est associé à l'information d'un *slot* dans notre cas. Si la table TBTP ne véhicule une information sur le PID associé à chaque *slot*, une table privée peut être utilisée par le NCC pour faire la correspondance entre PID et flux à émettre.
- Le RCST reçoit cette table. Grâce à elle il est capable d'émettre son flux dans les *slots* correspondants avec le PID associé.

On peut noter dans cette méthode que, dans le cadre transparent uniquement, le PID associé au flux est toujours le même. Le lien entre *slots* et PIDs n'a pas véritablement lieu d'être. Dans ce cas, le PID peut être distribué une fois pour toute en phase de *logon* du terminal, comme spécifié dans [16]. L'attribution des PIDs transparents est donc effectuée par le NCC via les *logon initialize descriptors*.

#### 4.3.3.4.2. GESTION DE LA COMMUTATION BORD

Le dernier point à traiter ici est la commutation bord. Après la description d'ensemble faite en 4.3.3.4.2.1, nous observerons comment la table de commutation est mise à jour dans le cadre unipoint (4.3.3.4.2.2) puis dans le cadre multipoint (4.3.3.4.2.3). Enfin nous concluons sur les évolutions éventuelles de cette commutation et sur son influence très importante sur la gestion des PIDs et des adresses MAC (4.3.3.4.2.4).

##### 4.3.3.4.2.1. Une vision d'ensemble de la commutation bord

Le commutateur de la charge utile régénérative permet d'agir directement sur les paquets MPEG-2 TS, commutant en fonction du PID et du port de celui-ci. Les PIDs étant représentatifs d'un canal logique, la commutation utilise une table pour savoir sur quel(s) faisceau(x) envoyer les données. Il s'agit donc d'une méthode de type *label switching*. Le commutateur est lui-même capable de répliquer les paquets vers différents *spots* de sorties pour permettre le *multicast* de niveau 2.

Nous avons déjà observé que dans une architecture proposant des services comme l'accès Internet ou de la VoD, la topologie du réseau a une forte tendance au changement. Ce dynamisme implique la mise à jour de la table de commutation embarquée. Ce problème est

---

<sup>1</sup> Pour une allocation de type FCA, nous n'utiliserons pas pour un même *slot* une allocation à plusieurs RCST via contention. Ainsi on peut associer un PID à ces *slots*.



comparable à celui de la configuration d'un commutateur de niveau 2 (de type ethernet) utilisé dans le cadre de communication IP unipoint et multipoint dans un environnement terrestre. On peut donc considérer les solutions envisagées pour le cas terrestre :

- l'auto-apprentissage par analyse du trafic,
- la définition d'un protocole spécifique.

Pendant, comme dans le cas DICAST précédemment étudié (cf. 3.4.4.6), l'auto-apprentissage n'est pas une solution envisageable ici, puisque les paquets commutés sont de trop courtes pour permettre le *snooping*.

Il semble donc plus réaliste d'envisager une solution reposant sur un protocole spécifique comme CGMP [56] ou SMAP [113]. Un protocole de mise à jour de la table de commutation est donc utilisé par le NCC. Il s'agit alors pour chaque source de trafic, unipoint comme multipoint, de transmettre le port d'entrée (correspondant au *spot* de la source), le PID du flux et les ports de sortie (correspondant aux *spots* descendants). Ce protocole interagit avec l'OBPC via un port de sortie privilégié du commutateur. L'OBPC peut utiliser un port d'entrée spécifique pour envoyer de la signalisation vers les différents faisceaux du système (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Celui-ci peut être utilisé pour reconfigurer toute la table dans le cas d'un changement majeur de topologie.

#### 4.3.3.4.2.2. La mise à jour des tables de commutation pour l'unipoint

Pour la voie aller, les PIDs des flux unipoints sont tous prédéfinis (cf. 4.3.3.3.3.2), la table de commutation est donc fixe et n'a pas besoin d'être mise à jour.

Pour la voie retour, le PID est attribué au flux par le NCC. À ce niveau, le NCC met à jour la table de commutation bord, si besoin, en même temps qu'il attribue ce PID en utilisant un protocole privé (tel celui SMAP, proposé dans DICAST par l'INRIA).

#### 4.3.3.4.2.3. La mise à jour des tables de commutation pour le multipoint

Pour la voie aller, comme la voie retour, les flux *multicast* demandent une gestion dynamique de la table de commutation bord.

Un unique PID est utilisé par groupe *multicast*. En effet si le même PID est utilisé pour deux groupes différents qui alimentent les mêmes *spots* à un instant donné, et en provenance d'une même *gateway* ou d'un même terminal, le rajout de la desserte d'un nouveau faisceau pour un de ses groupes, implique une réattribution de PID, et une mise à jour de la table de commutation. Nous préférons limiter les modifications entraînées à la seule mise à jour de la table de commutation.

Dans le cadre d'une source placée derrière une *gateway*, à l'attribution du PID pour ce flux, la *gateway* connaît les différentes adresses des prochains noeuds sur le lien satellite, et peut donc faire la correspondance entre ceux-ci et les faisceaux concernés. La *gateway* envoie alors un message au NCC via un protocole privé, qui va elle-même mettre à jour la table de commutation. Quant un nouveau noeud rejoint l'arbre *multicast*, la *gateway* vérifie grâce à l'adresse de ce noeud si le faisceau de ce dernier est déjà desservi. Si c'est le cas, aucun changement n'est effectué, sinon, une demande de modification de la table de commutation est envoyée au NCC.

Pour une source placée derrière un RCST, c'est au moment de l'allocation de ressources que le NCC configure la table de commutation. L'ajout d'un noeud à l'arbre dans un *spot* nouveau entraîne une demande de ressource sur ce *spot*, et le NCC met alors à jour la table de commutation.

#### 4.3.3.4.2.4. Des perspectives

La norme DVB-S2 est une évolution probable du système satellite (cf. 4.3.1.2.2). Or DVB-S2 utilise des conteneurs de niveau 2 de taille plus importantes que les paquets MPEG-2 TS du

DVB-S. Un datagramme IP a alors peu de chance d'être fragmenté, permettant la mise en œuvre de méthodes d'auto-apprentissage à bord, comme celles évoquées dans la partie 3.4.4.6.

Une autre perspective est l'intégration d'une intelligence bord plus évoluée, capable de réassembler les SNDUs pour les commuter en fonction des adresses MAC. Cette solution propose un gain important en terme de signalisation, notamment au niveau du multiplexage de différents flux IP dans un même PID, et est au cœur de la partie suivante.

#### 4.3.3.5. Le multiplexage des flux

La signalisation propre aux flux, c'est-à-dire dans le plan utilisateur, a été décrite au cours de cette partie. Nous proposons toutefois de revenir ici sur ce point pour, d'une part, avoir une vision globale de l'architecture protocolaire et, d'autre part, introduire la notion d'agrégation de flux, c'est-à-dire l'utilisation d'un seul PID et/ou d'une seule adresse MAC pour plusieurs flux de niveau IP. Il s'agit là d'une notion de multiplexage qui peut avoir son intérêt dans la mesure où les PIDs sont codés sur 13 bits, et ne permettent pas toujours une unique association point à point.

Cette partie propose d'analyser ce multiplexage pour l'architecture hybride dans la section 4.3.3.5.1, puis d'aborder les perspectives offertes notamment par la commutation au niveau des SNDUs (4.3.3.5.2).

##### 4.3.3.5.1. CAS DE L'ARCHITECTURE PROPOSÉE

Après avoir traité les différentes couches protocolaires, une vision d'ensemble des flux transitant sur le système est donnée dans cette partie. Dans ce cadre nous considérerons la topologie présentée dans la figure ci-dessous (Figure 4.17). Ici, nous avons deux sources de flux A, et F. A émet en mode régénératif vers B, vers C, vers D et vers le groupe M, et en mode transparent vers C, vers E et vers F. F émet en mode régénératif vers B et D, et en mode transparent vers A et C.

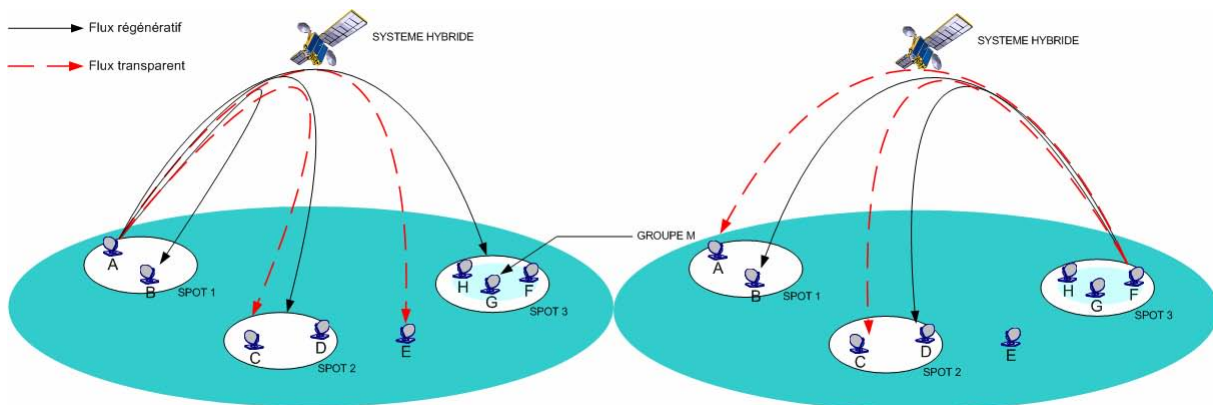


Figure 4.17 Topologie d'étude du traitement des flux IP sur l'architecture hybride

Dans le cadre l'architecture hybride, les flux émis par A et F sont représentés dans la figure ci-dessous (Figure 4.18). On y remarque qu'une source en mode transparent utilise toujours le même PID, alors qu'en mode régénératif le PID utilisé correspond à la source et au spot cible (cf. 4.3.3.3.3.2). Le multiplexage agrège alors tous les flux *unicast* transparents d'une même source dans un seul PID, tandis que cet agrégat se fait en fonction de la source et du faisceau cible pour le cas de l'*unicast* régénératif.

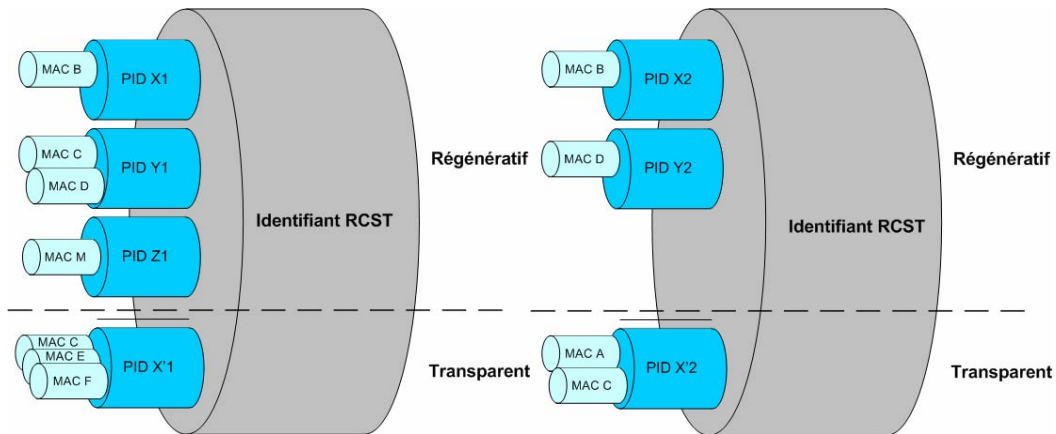


Figure 4.18 Organisation des différents flux sur le lien montant en provenance de A et de F

Sur le *spot 2* descendant, les flux engendrés par ces deux sources sont représentés ci-dessous. Ici on notera une différence entre le mode régénératif et transparent. Dans le cadre de notre architecture les flux doivent être impérativement différenciés si ils proviennent de terminaux différents, par des PIDs différents. Ainsi le flux à destination de D se retrouve dans deux PIDs régénératifs différents, l'un provenant de A, l'autre de F. En revanche, dans le cas transparent<sup>1</sup>, la *gateway* émettrice de transition désencapsule les données jusqu'au niveau 3. Les datagrammes sont ensuite multiplexés sur la même interface, utilisant alors la même adresse MAC, puis le même PID. C'est au niveau 3 de C de différencier les flux

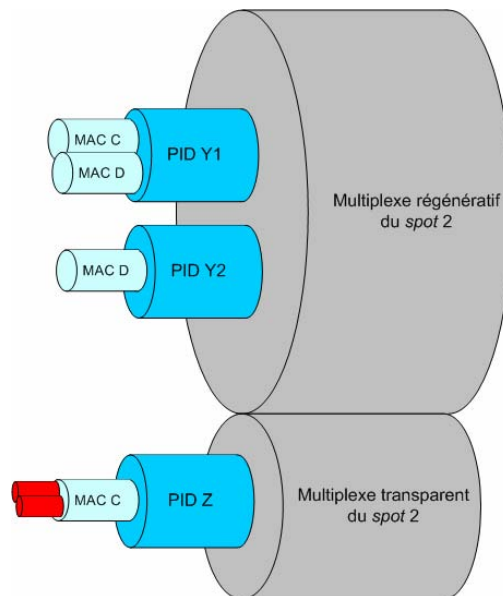


Figure 4.19 Organisation des différents flux sur le spot 2 descendant en provenance de A et de F

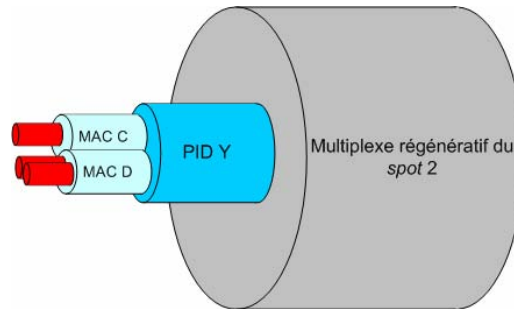
#### 4.3.3.5.2. PERSPECTIVES

Une solution permettant de multiplexer les flux descendants régénératifs sur des PIDs identiques est l'intégration d'une commutation bord au niveau MAC.

La présence d'une commutation bord au niveau MAC change le multiplexe régénératif du *spot 2*. Parce que les adresses MAC sont utilisées à bord, le flux doit être encapsulé à nouveau sur chaque *spot* (notamment ici sur le *spot 2*). Dans ce cadre, toutes les données d'un même IN

<sup>1</sup> Cet exemple prend comme hypothèse que les flux DVB-RCS transparents en provenance de A et F utilisent la même *gateway*.

peuvent être multiplexés dans le même canal logique (utilisant donc le même PID). Les flux sont alors différenciés au niveau MAC, puis au niveau 3, comme l'illustre la figure suivante (Figure 4.20).



**Figure 4.20 Organisation des différents flux régénératifs sur le spot 2 descendant en provenance de A et de F dans le cadre d'une commutation MAC à bord**

Cette perspective, en plus de permettre une meilleure gestion de la commutation bord, offre une réduction du nombre de PIDs utilisés, permettant à l'architecture hybride de pouvoir supporter un très grand nombre de flux.

D'autres perspectives sont aussi envisageables dans ce cadre, comme le routage à bord, permettant aussi d'alléger la signalisation de niveau 2, d'alléger les tables de routage au sol, etc...

#### **4.3.3.6. Conclusion sur l'architecture protocolaire**

Au cours de cette partie nous avons proposé une architecture protocolaire utilisant la couche IP comme un niveau unificateur et intégrateur. L'architecture envisagée ici offre un grand nombre de perspectives. D'une part, le niveau IP s'est en effet révélé comme un fort élément d'intégration dans les réseaux, permettant d'assurer une relative pérennité à l'architecture quant à son adéquation aux protocoles futurs. D'autre part, cette proposition a mis en valeur des techniques pouvant apporter des solutions protocolaires adaptées. Dans ce dernier cadre, nous avons remarqué les PEPS qui proposent d'isoler de manière transparente le système satellite pour optimiser les mécanismes qui y sont déployés. Une autre opportunité est fondée sur l'intégration d'une intelligence bord permettant un traitement plus évolué, comme une commutation directement au niveau des adresses MAC, ou mieux un routage à bord.

L'architecture hybride se positionne avec sa structure protocolaire comme un système ouvert pouvant supporter IP et donc tout ce qu'il intègre.

## **4.4. Conclusion**

Nous avons vu dans ce chapitre que chaque service a des besoins précis, qui peuvent même varier au sein d'un même service. Une classification à gros grains de ces besoins a été effectuée dans ce cadre (Tableau II). Fort de cette analyse, l'idée d'un système hybride, c'est-à-dire intégrant deux charges utiles dans un même système satellite, est apportée comme réponse à ces différents besoins. Le concept d'architecture hybride est alors proposé pour répondre à ces demandes. Nous avons dessiné cette solution en définissant les différentes entités du système, leurs fonctions, et la mise en œuvre protocolaire. Même si des détails de déploiement comme de dimensionnement ne sont pas abordés ici, cette architecture est envisageable dans l'état actuel des technologies. L'intégration des différents services sur cette architecture découle alors naturellement, puisque le concept a été construit autour des différents besoins, mettant en avant sa flexibilité.

Ainsi l'on peut proposer une intégration avec une seule et même architecture. La figure ci-dessous (Figure 4.21) propose un exemple à titre illustratif. Le schéma découpe le cadre de

l'architecture en deux zones distinctes : une zone dite urbaine où l'infrastructure terrestre est très développée, et une zone dite isolée parce que la connexion terrestre maximale est une liaison par RTC classique. Cette architecture propose alors un support pour :

- L'accès Internet dans les zones isolées uniquement. Celui-ci est de type traditionnel pour la majorité des utilisateurs privés, utilisant alors le mode transparent et un lien retour terrestre. Un utilisateur sans voie retour terrestre accessible, peut aussi s'équiper d'un terminal émetteur. Enfin des regroupements d'utilisateurs autour d'un RCST, comme des villages par exemple, peuvent obtenir l'accès Internet via le système, en utilisant un réseau local de type Wifi. Ce type de réseaux utilise préférentiellement le mode transparent.
- Des services de VoD utilisent le système pour fournir des média aux régions isolées comme urbaines. Ainsi des réseaux locaux urbains (hôtels, hôpitaux, ...) comme des utilisateurs privés reçoivent la VoD à moindre coût en utilisant une simple parabole. Ils peuvent utiliser par exemple une connexion Internet indépendante pour commander le média qu'il désire. La VoD se couple naturellement avec les accès Internet via satellite, et peuvent même s'associer à un fournisseur d'accès pour offrir des services de caches locaux, comme dans le cadre de la topologie 4 (cf. 4.1.1.3.4). Les modes du système utilisé dépendent fortement de la demande des utilisateurs comme le montre le tableau suivant (Tableau V).

Tableau V. DÉPENDANCE ENTRE LES REQUÊTES VOD POUR UN MÉDIA ET LE MODE DU SYSTÈME

Caractéristiques du service pour un média			Mode utilisé	Coût
Nombre de demandes	Position des utilisateurs	Temps entre la première demande et l'émission		
1	1 spot	Instantannée	Régénératif	Très élevé
1	1 spot	T	-	-
X	n spots (avec $n < N_{tot}$ )	T	Régénératif	Accessible
X	$N_{tot}$	T	Transparent	Peu coûteux

- L'interconnexion entre des réseaux privés reste un service fortement intéressé par le système satellite. L'interconnexion s'effectue via RCST, et utilise le mode transparent communément, le mode régénératif étant réservé aux applications telles que la vidéo conférence ou le téléphone d'entreprise. Ainsi dans le cadre d'une application de cours à distance, la plus grande partie des données comme les documents de cours et la présentation préenregistrée, utilise le mode transparent et est stockée à l'avance dans des caches au niveau de chaque réseau participant. Pendant la session, des données à faible débit vont être échangées (le scénario de la présentation), mais avec la garantie d'une faible gigue, le mode régénératif est alors utilisé. De même les interventions actives des différents « élèves » avec le formateur requièrent un faible RTT et passent donc par le mode régénératif.

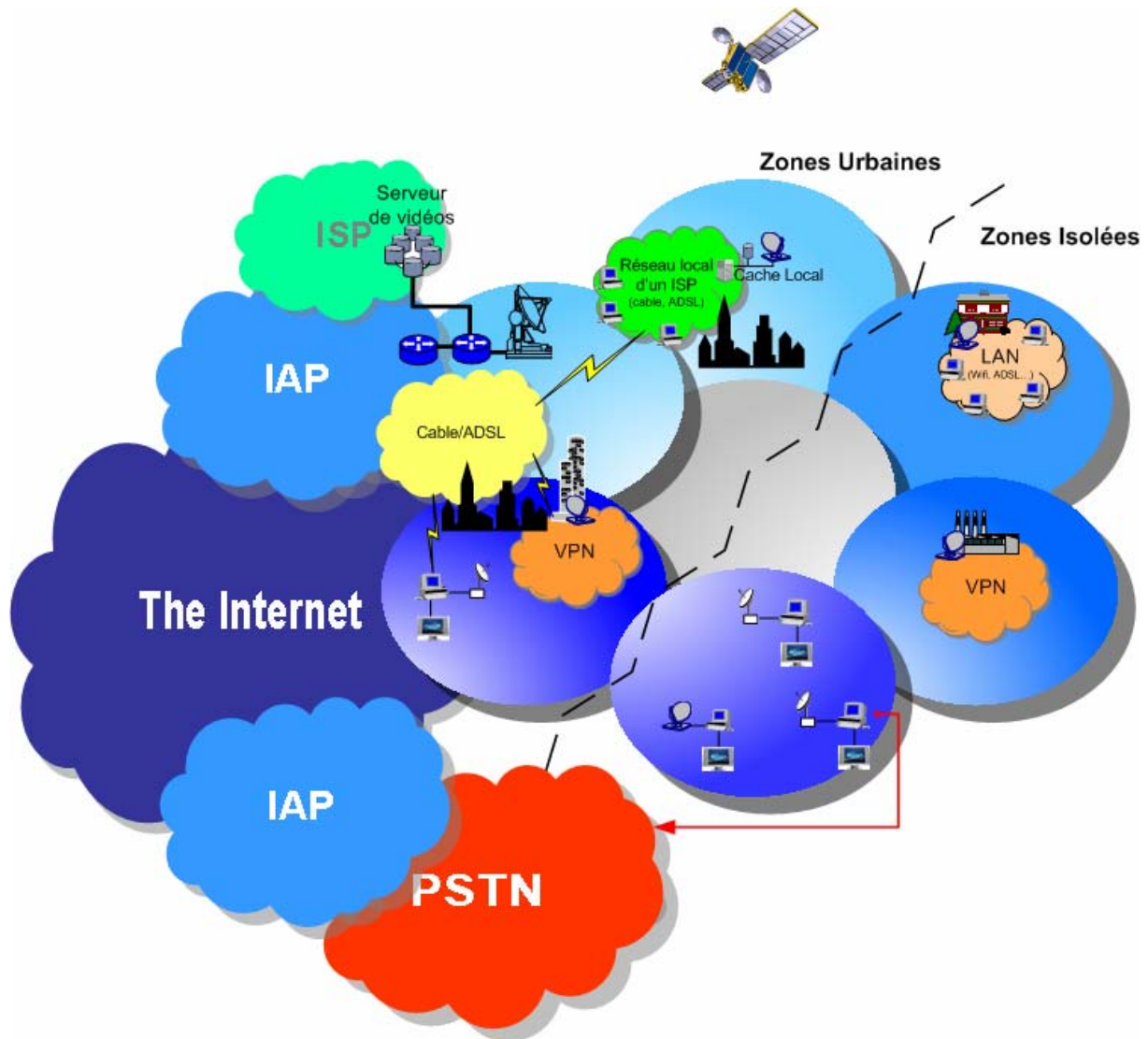


Figure 4.21 Exemple d'intégration de services dans une architecture hybride

Une telle architecture présente donc les aspects requis pour intégrer différents services, allant jusqu'à s'adapter aux différents flux d'une même application. Nous avons tracé ici les traits fondamentaux du principe hybride, présentant un exemple de système avec une vision assez large. Cet exemple représentatif de la notion hybride ouvre la voie à l'évaluation d'une architecture hybride, objet du prochain chapitre.



## 5. EVALUATION DE L'ARCHITECTURE HYBRIDE

Cette étude a, dans les parties précédentes, souligné les différentes problématiques du déploiement d'IP sur satellite. Il a été montré quelles étaient les limites et quels étaient les moyens technologiques et protocolaires pour y parvenir. Toutefois, un point important a été soulevé, le manque d'une architecture globale et flexible, capable de faire le lien entre les systèmes actuels et à venir pour intégrer différents services porteurs. Nous avons montré que l'utilisation d'une charge hybride comme support d'intégration pouvait être une solution. La partie précédente s'est donc centrée sur la description du concept d'architecture hybride, et la proposition d'une architecture mettant en application les principes exposés.

Il est maintenant nécessaire d'évaluer cette proposition, c'est-à-dire d'analyser en quoi elle répond aux besoins des différentes applications, et les apports qu'elle propose par rapport à des systèmes plus classiques. Cette architecture ne saurait, en effet, être complète sans une validation de son fonctionnement, notamment avec les trois services dont elle se propose d'être le support.

Notre choix pour l'étude de cette architecture s'est porté sur l'outil mathématique et les simulations. En effet, dans le cadre du projet DIPCAST, un maquettage a été réalisé permettant d'émuler le comportement du système DIPCAST et de valider certains éléments de notre travail, tel que la signalisation.

L'analyse du système hybride suit naturellement la dichotomie entre les systèmes régénératif et transparent, puisqu'un de ses points forts est la flexibilité offerte par la coexistence de ces deux modes et la possibilité de choisir pour chaque type de trafic celui qui permet les meilleures performances. Nous présenterons cependant cette analyse conformément à une décomposition plus traditionnelle en couches pour les raisons suivantes :

- Il s'agit bien d'une architecture globale, et non simplement de la cohabitation de deux sous-systèmes, dont l'analyse individuelle ne permettrait pas d'envisager leur interaction.
- Seule une analyse en couches permet de mettre clairement en évidence les points communs de l'architecture globale utilisés par les deux sous-systèmes, mais aussi les différences.

Ce chapitre est donc structuré comme suit.

Nous décrivons dans la section 5.1 les caractéristiques importantes de la couche physique. La modélisation des erreurs fait presque exclusivement l'objet de cette étude. Le but de nos travaux est en effet de définir une architecture reposant sur des technologies existantes, et non d'en proposer de nouvelles.

La seconde partie abordera le niveau deux de notre architecture. Après avoir discuté en 5.2.1 du temps d'accès au média et de notre position quant à son impact sur le système, cette partie reposera sur la question centrale du poids de la signalisation du système hybride. On peut en effet craindre que la présence de deux charges à bord n'engendre une surcharge de signalisation. Dans ce cadre, la section 5.2.2 offrira une étude de l'encapsulation mise en place ici, comparée à des encapsulations plus classiques. Dans 5.2.3, l'étude de la signalisation des flux IP sur le système sera menée. La section 5.2.4 proposera d'observer le temps de réponse de notre architecture, en fonction de la répartition bord/sol de certaines fonctionnalités. Enfin, la dernière



partie (5.2.5) fera le point sur la signalisation, observant que cette architecture ne propose pas une solution plus lourde qu'une autre, dans la mesure où un soin important a été porté sur ce point dans la partie 4.3 de notre étude.

La partie 5.3 sera alors consacrée au niveau 3. Nous montrerons comment IP peut s'insérer naturellement dans une telle architecture et en devenir un maillon central. C'est notamment sa présence au cœur de l'architecture qui dote celle-ci d'une cohérence globale et d'une certaine pérennité vis-à-vis des évolutions technologiques.

Nous consacrerons alors la fin de cette étude aux trois services précédemment présentés. Chaque service donnera lieu à une comparaison des performances d'un système transparent face à celles d'un système régénératif, concluant sur comment une architecture hybride peut permettre la meilleure optimisation (et donc intégration) de ces services grâce à la flexibilité qu'offre l'alternative entre les deux modes.

Ainsi la section 5.4 analysera le service d'accès Internet sur satellite, et son lien critique avec le protocole TCP. Dans un premier temps, après quelques mots sur la modélisation du trafic Internet (5.4.1), nous montrerons qu'un satellite intégrant IP peut se révéler un médium plus performant qu'un lien bas débit terrestre. Ainsi les performances des satellites seront étudiées dans le cadre d'applications *web* classiques (5.4.2), et d'applications plus symétriques (5.4.3). Dans les deux cas, nous pourrions observer que, outre l'apport du système hybride en tant que support d'IP, son intérêt est directement lié à l'utilisation du *multi-spots*. Un autre point important pourra être dégagé de ces analyses : les performances de ces applications sont limitées par la mauvaise adéquation du satellite et du protocole de transport le plus couramment utilisé, TCP. Nous étudierons cette influence plus précisément dans la section 5.4.4, montrant d'une part comment chaque version de TCP réagit différemment sur le satellite, et d'autre part le véritable enjeu que peut représenter les PEPs pour l'architecture hybride. La section 5.4.5 conclura à la fois sur la légitimité d'un service d'accès Internet sur satellite et sur la validité du système hybride pour un tel service.

La section 5.5 propose une approche du service de VoD et de sa relation étroite avec l'utilisation du *multi-spots*. Nous verrons dans ce cadre les limitations du système transparent comme du système régénératif, et comment l'architecture hybride permet d'apporter une réponse des plus adaptées au FIS.

Dans l'avant-dernière section (5.6), l'interconnexion de réseaux privés est étudiée, montrant l'importance de l'utilisation du multiplexage bord. En effet, le système régénératif permet d'une part d'éviter l'influence néfaste du double bond sur le RTT, et donc sur les performances des applications utilisant TCP comme des applications à fortes contraintes temporelles. D'autre part, le double bond a un impact non négligeable sur le PLR, puisqu'à la place d'un passage par un lien satellite, la communication utilise deux liens, donc un risque double de pertes.

Enfin, la dernière section conclura cette évaluation, montrant comment le système hybride permet l'intégration de différents services.

## ***5.1. Le niveau physique et son influence sur le système***

Comme nous l'avons noté précédemment, il ne s'agit pas pour nous de proposer une couche physique satellite. En effet, le satellite est avant tout caractérisé par son niveau physique qui implique des technologies spécifiques, dépassant largement le motif de cet exposé.

Au contraire cette partie s'interroge sur les éléments à prendre en compte pour l'étude de notre architecture. Pour évaluer un système il faut se donner des outils et une modélisation de celui-ci. Un modèle prenant en compte la totalité du système est rarement une bonne solution, puisqu'il est inconcevable de connaître toutes les caractéristiques d'un système satellite dans le cadre de cette étude. De plus, les détails ne sont pas toujours nécessaires dans un modèle d'étude

et risque même d'engendrer un comportement inopportun. Aussi nous ne modélisons pas le système dans son intégralité, mais uniquement les éléments qui ont une influence réelle sur notre étude.

Si un certain nombre d'éléments n'ont pas lieu d'être représentés, d'autre notamment du niveau physique ont leur importance. On notera ainsi la diffusion, les erreurs physiques et le délai. Chacun de ces éléments fera alors l'objet d'une section dans cette partie.

### 5.1.1. Diffusion du médium satellite

La diffusion est un élément inhérent au satellite : toute donnée émise sur un *spot* est reçue par tous les clients sur le *spot* sans aucun besoin d'une quelconque réplification. Cet élément important sera pris en compte de la manière suivante :

- pas de surcoût du média pour plusieurs utilisateurs sur le même faisceau,
- utilisation d'une fraction de la bande passante totale pour chaque message,
- réplification nécessaire entre différents *spots*.

Comme le système n'est pas au cœur d'un problème de dimensionnement, le facteur d'échelle ne sera donc pas étudié, permettant de simplifier cet élément dans l'étude. Ainsi dans le cadre des simulations, la diffusion ne sera pas modélisée le plus souvent puisque l'on étudiera la communication entre une source et un puits.

### 5.1.2. Délai d'un bond satellite

Le délai d'un bond satellite varie en fonction de la position du satellite, de la *gateway* et du terminal. Dans notre cas, où la conception matérielle nous est indifférente, nous ne prendrons pas en compte cette légère variation. Un aller vers le satellite comme une descente sera de 127 ms, soit un délai pour un bond de 154 ms pour un système totalement transparent.

### 5.1.3. Pertes sur le support physique

Sur un réseau terrestre, les pertes viennent pour la plupart des congestions et très rarement du support physique. Pour les réseaux satellite, le contrôle d'accès limite grandement les pertes dues aux congestions dans le système. En revanche, leur canal physique très bruité provoque des erreurs bits qui peuvent devenir nombreuses et entraîner des pertes au niveau paquet.

L'influence de ces erreurs n'est pas problématique pour la comparaison de deux systèmes satellites. Il est en effet possible de faire abstraction des pertes sur l'un et l'autre des systèmes, si l'on suppose qu'elles sont identiques. Cela implique que la reprise d'erreur est la même pour chaque système. Cette supposition ne peut donc être faite pour l'étude de codes correcteurs, de la différence entre un bond et deux bonds satellite, ou encore pour la comparaison avec un système terrestre. Les pertes doivent alors être prises en compte, d'une manière ou d'une autre.

Le taux d'erreur binaire (BER) sur satellite est très variable, et dépend du bilan de liaison. Puisque notre proposition ne comprend pas le niveau physique et notamment la mise en place de codes correcteurs, c'est le taux de pertes de paquets qui nous intéresse. Toutefois, le lien entre le BER et le PLR (Packet Loss Rate) reste toujours très dépendant de la technologie comme des codages utilisés pour reprendre les erreurs. Traditionnellement pour un système satellite on trouve un taux de disponibilité du système de 95% et 99.9%, ce qui correspond à un PLR entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2}$  [115]. Cependant, ces pertes sont loin d'être uniformément réparties, et c'est là le problème de la modélisation. Les liaisons satellites sont en effet le jeu d'erreurs en rafales, couplées à des erreurs ponctuelles plus classiques. Si les erreurs ponctuelles peuvent être corrigées facilement grâce à des techniques de codages adaptées, les erreurs en rafale entraînent quant à elles, des pertes de paquets en rafale ou pas. Ces erreurs étant corrélées aux perturbations atmosphériques, les lois d'apparitions de pertes deviennent alors très difficiles à exprimer. Des

modélisations tentent de s'approcher de la réalité (loi de Pareto, source on/off, modèles à états ...) mais ne peuvent être adaptées qu'à des conditions précises. Une solution commune est alors d'utiliser des traces réelles de pertes, les rejouant au cours de l'étude [116]. Il reste difficile toutefois d'avoir accès à ce type de résultats, et rien ne prouve qu'elles sont représentatives. Enfin, les pertes causées par les perturbations du canal sont certes les plus communes mais pas les seules (erreur de pointage, détérioration de l'antenne, etc...).

Aucun modèle n'est donc à ce jour valide pour représenter les erreurs satellites en général. Nous essayerons toutefois d'avoir une idée de l'influence de ces erreurs sur le trafic en utilisant soit un taux d'erreur uniforme, soit un modèle à deux états, dit de Gilbert.

### 5.1.3.1. Taux de pertes selon une loi de Bernoulli

Dans un premier temps, il est possible de modéliser les pertes satellites de manière très simplifiée en utilisant une loi de perte au niveau paquet de type Bernoulli, de  $10^{-3}$ . Cette modélisation, si elle est très simple, permet d'avoir déjà une idée des limites du lien satellite.

### 5.1.3.2. Modèle de Gilbert à deux états

Ce premier modèle ne permet pas de prendre en compte la nature en rafales des pertes satellites, or le satellite a peu d'erreurs ponctuelles [76] [117].

Une chaîne de Markov à deux états (modèle de Gilbert-Elliot [118]) peut être utilisée pour modéliser la forte tendance des erreurs sur satellite à survenir en rafale [119]. On a alors un état sans perte, l'état 0, et un état 1 où tous les paquets sont perdus. À chaque nouveau paquet, on oscille entre ces deux états suivants un tirage de Bernoulli de probabilités  $p$  et  $q$  (Figure 5.1). En effet, il est courant sur le satellite d'observer des pertes en rafale, et le reste du temps aucune perte.

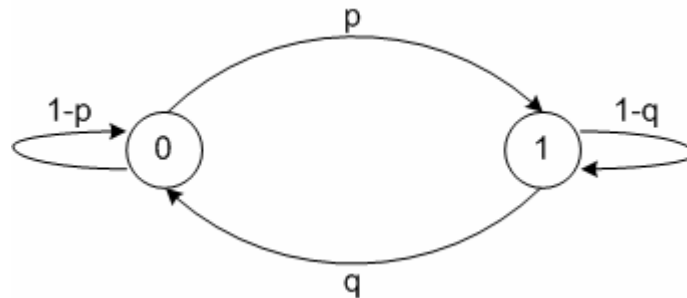


Figure 5.1 Modélisation des pertes de paquet selon une chaîne de Markov à deux états

Quelque soit le PLR, si on note  $P_n$  la probabilité pour que le  $n^{\text{ième}}$  paquet soit perdu ou non. Soit  $P_\infty$  sa limite en régime stationnaire. On a :

$$(10) \quad P_n = [1 - PLR, PLR] = P_\infty$$

Si on note  $A$ , la matrice de transition, on a alors :

$$(11) \quad P_\infty = P_\infty \cdot A$$

Soit la relation entre  $p$ ,  $q$  et le PLR :

$$(12) \quad p = \frac{PLR}{1 - PLR} \cdot q$$

Pour un PLR de  $10^{-3}$  et un  $q$  donné, on a la valeur de  $p$  par l'expression (12).

On se propose de calculer la taille moyenne des rafales pour ce modèle,  $E_r$ . L'expression (13) donne l'espérance du nombre du temps passé dans l'état 1, c'est-à-dire l'espérance du nombre de paquet perdu dans une rafale :

$$(13) \quad E_r = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \left( n(1-q)^n \cdot q \right)$$

Une mise en forme donne l'expression (14), conduisant à une suite entière classique :

$$(14) \quad E_r = 1 + q(1-q) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d}{dq} \left( (1-q)^n \right)$$

Les conditions de convergence étant vérifiées, on a :

$$(15) \quad E_r = 1 + q(1-q) \frac{d}{dq} \left( - \left( \frac{1}{1-q} \right) - 1 \right)$$

On obtient alors :

$$(16) \quad E_r = 1 + \frac{q(1-q)}{(1-q)^2} = \frac{1}{q}$$

$q$  est donc directement lié au nombre moyen de paquets perdus dans une rafale. Si l'on considère un PLR plus important, de  $10^{-2}$  par exemple : soit l'on garde la même valeur de  $q$ , l'on aura alors des rafales en moyenne de même taille, mais plus fréquentes, soit l'on peut baisser  $q$  et avoir des rafales aussi fréquentes, mais plus importantes.

Ainsi ce modèle, bien qu'encore loin de la réalité, peut retracer un peu plus fidèlement le profil des pertes satellitaires, notamment pour les rafales.

## 5.2. Le niveau liaison

Une fois les caractéristiques du niveau physique étudiées, le niveau liaison est abordé ici. Encore appelée niveau accès, cette couche a été l'objet d'une proposition poussée dans la partie 4 de ce mémoire. En effet, ce niveau doit être capable de véhiculer des flux IP, donc de les encapsuler comme de les référencer dans le système.

Cette partie se focalise alors sur l'étude de ce niveau, en corrélation avec les flux IP qu'il transmet. Dans cette analyse un accent particulier est porté sur le poids de la signalisation d'un tel système. En effet, l'inquiétude pourrait être le poids de la signalisation du système hybride comparativement à des systèmes purement transparents ou régénératifs.

Pour répondre à cette question, et ainsi montrer la viabilité de la proposition hybride, nous proposons de suivre la démarche suivante :

Dans une première section (5.2.1), nous proposerons de ne pas étudier l'impact du temps d'accès au support satellite dans la mesure où il est extrêmement dépendant de l'implantation et donc du dimensionnement du système, point qui n'est pas du tout l'objet de notre étude.

La section 5.2.2 étudiera la comparaison entre le poids de l'encapsulation choisie pour notre solution et une encapsulation plus classique. Cette étude de l'*overhead* donnera lieu de constater le choix judicieux que peut représenter la solution ULE, comme l'intérêt d'utiliser la commutation MPEG-2 à bord plutôt qu'une commutation ATM.

Ensuite, la lumière sera faite sur la signalisation induite par les flux IP (5.2.3), et le poids réel que ces messages représentent par flux IP véhiculé. Nous découperons la signalisation en quatre points (table DVB pour indexer les flux, messages de mise à jour des tables de commutation, messages de résolution d'adresse, et messages d'accès au système), permettant de prendre en compte toute la signalisation de niveau 2 spécifique aux flux IP.

Une dernière étude sur le niveau 2 sera menée dans la section 5.2.4, étudiant l'influence de la répartition bord/sol sur le temps de réponse du système. Cette partie permettra, notamment, de mettre en valeur la solution hybride par sa capacité à intégrer des fonctionnalités à bord, permettant de gagner en réactivité globale du système, et cela même pour des flux transparents.

Enfin, la section 5.2.5 conclura cette analyse du niveau 2 en notant l'intérêt de la solution hybride dans la mesure où celle-ci n'induit pas une signalisation plus importante, et permet de gagner en temps de réponse comme d'alléger l'*overhead* induit par l'encapsulation.

### 5.2.1. Le temps d'accès au support

Parmi les éléments du niveau 2 qui influencent directement les performances applicatives, on trouve la méthode d'accès. Cette partie statue sur la manière dont le temps induit par l'accès au médium est pris en compte dans notre étude.

Si le partage de la ressource est en MF-TDMA, c'est la méthode d'accès (c'est-à-dire de répartition de la ressource) qui induit un temps d'accès au support. Or ces méthodes sont nombreuses et souvent spécifiques à une implantation donnée. Il est néanmoins possible de les subdiviser en deux classes : une classe orientée connexion et une classe plus dynamique.

- Les méthodes de type CAC (Connexion Admission Control) reposent sur une demande du RCST qui peut être acceptée ou rejetée en fonction de son SLA et de la bande passante disponible. Une fois acceptée, cette requête n'induit plus aucun délai puisqu'un certain nombre de *slots* est ainsi alloué au seul RCST pour une période de temps donnée. Si cette période est suffisamment grande, ce temps d'accès peut être négligé. Elles introduisent un délai au début de la connexion et plus aucun par la suite. C'est le cas de l'accès sur la voie aller et des méthodes CAC, pour des trafics de type CBR (Constant Bit Rate) sur la voie retour. Le CAC peut notamment être mis en œuvre pour des demandes de type CRA (Continuous Rate Assignment) d'un RCST.
- Les méthodes plus dynamiques sont les plus courantes sur la voie retour car elles permettent d'éviter le gaspillage de bande passante. L'avantage d'un accès de type connecté avec l'exemple classique du RTC (Réseau Téléphonique Commuté), est la réservation des ressources. Toutefois ce type d'accès n'est rentable que dans le cadre d'un trafic constant, sans rafale ni silence. Or les applications *web* classiques ou encore les applications multimédia ont un trafic irrégulier, donc peu propice à un mode d'accès connecté. Dans ce cadre les RCSTs peuvent faire des requêtes sous différentes formes : le FCA (Free Capacity Assignment), le RBDC (Rate-Based Dynamic Capacity) et le VBDC (Volume-Based Dynamic Capacity) [114]. Aussi il est souvent délicat d'avoir une idée du temps d'accès au système pour un utilisateur donné. Un grand nombre d'études essaie de trouver la méthode d'accès la plus adaptée, comme par exemple des méthodes réactives, prédictives, ou encore combinant les deux [120]. Mais le délai d'assignement de slots d'émission dépend toujours de deux facteurs distincts : d'une part le temps d'aller-retour au NCC, et d'autre part le temps de calcul de l'assignement par l'algorithme de DAMA (Demand Assignment Multiple Access), qui dépend naturellement du nombre de terminaux connectés. Comme le montre [121], ce temps peut être malgré tout assez important, et il devient alors difficile même de borner le délai pris par la méthode d'accès. Le temps d'accès sur la voie retour est alors difficilement modélisable et très dépendant de la technologie.

Ici nous ne modéliserons donc pas le temps induit par l'algorithme d'allocations, le considérant comme faible comparé au temps d'aller-retour d'une requête au NCC. De plus dans la plupart des simulations, ce facteur, très spécifique à une implantation particulière du système, n'apporte rien à notre analyse : une allocation statique et donc sans délai sera convenue.

## 5.2.2. Étude et comparaison de l'encapsulation

Un point notable de l'architecture est sa structure protocolaire, avec notamment ses mécanismes d'encapsulation. Nous avons déjà présenté différentes encapsulations possibles pour des datagrammes sur DVB-S (cf. partie 3.2.1 et 3.4.1) et DVB-RCS (2.4.2). Notre choix pour le système hybride s'est arrêté sur l'utilisation de ULE pour le DVB-S comme le DVB-RCS, et donc sur des conteneurs uniquement MPEG-2, et non ATM. Par souci d'homogénéité et d'implantation, le mode régénératif et le mode transparent utilisent tous les deux ULE pour encapsuler les données sur la voie retour.

Nous proposons dans cette partie d'étudier ce point, comparativement aux méthodes classiques que sont MPE sur la voie aller et AAL5/ATM sur la voie retour.

La première section (5.2.2.1) de cette partie compare l'*overhead*<sup>1</sup> engendré par l'encapsulation sur la voie aller, tandis que la section 5.2.2.2 étudie cela sur la voie retour. Enfin, la partie 5.2.2.3 conclut par une analyse de l'influence globale de cet *overhead* sur le système.

### 5.2.2.1. La comparaison de l'overhead engendré par l'encapsulation sur la voie aller DVB-S

Cette partie repose sur de nombreux éléments proposés dans le chapitre 3 de ce mémoire. Nous ne rappelons pas ici en détail l'encapsulation via MPE et ULE (cf. figures pages 43 et 55).

Cette analyse prend comme hypothèse le cas idéal où le *section packing* est toujours possible. Parce que nous comparons deux encapsulations utilisant cette technique, les remarques restent comparables pour un taux de *section packing* plus faible que 100%.

Nous avons déjà eu un aperçu du gain apporté par ULE dans la partie 3.4.1.2. Cette partie propose une approche un peu plus fine, en prenant en compte des détails d'implantation.

Soit  $T_{MP}(s)$  et  $T_U(s)$ , les tailles de données nécessaires pour encapsuler un datagramme de taille initiale  $s + 20$  octets respectivement par MPE et ULE avec *section packing*. Cette encapsulation est effectuée en deux étapes dans les deux cas : l'encapsulation dans le(s) section(s) datagramme(s) pour MPE ou une SNDU pour ULE (section 5.2.2.1.1), puis l'encapsulation dans le(s) paquet(s) MPEG-2 TS (5.2.2.1.2)

#### 5.2.2.1.1. ENCAPSULATION AU NIVEAU SECTION

Commençons par l'encapsulation de niveau intermédiaire. Celle-ci n'est pas la même dans le cadre MPE et ULE.

##### 5.2.2.1.1.1. L'encapsulation via MPE

Soit  $T_S(s)$ , la taille requise par une ou plusieurs sections pour encapsuler un datagramme IP de taille  $s + 20$  octets (on considère un segment TCP de  $s$  octets). La MTU de MPE étant de 4080 octets, au-delà de cette valeur, la couche IP doit scinder le paquet en deux rajoutant 20 octets supplémentaires d'en-tête IP<sup>2</sup>. Une encapsulation dans une section datagramme rajoute 12 octets d'en-tête et 4 de CRC. On obtient alors l'expression de  $T_S(s)$  (17) :

---

<sup>1</sup> Une hypothèse à noter pour ces calculs est l'utilisation d'une taille de segment TCP  $s$ . Pour chaque calcul d'*overhead*, on considère des segments de taille identique  $s$ , pour pouvoir avoir une base de comparaison commune.

<sup>2</sup> L'utilisation de Path MTU Discovery permet de limiter cette fragmentation [71].

$$(17) \quad T_s(s) = s + \left\lceil \frac{s}{4060} \right\rceil (20 + 12 + 4)$$

Cette expression simple considère un segment de taille  $s$ , et l'ajout de 36 octets par datagrammes. On peut la décomposer en (18), comme la somme des  $n(s)$  sections complètes de taille totale 4096 octets et d'une dernière section (qui peut être vide), de taille  $T_s(s)$ .

$$(18) \quad T_s(s) = (s \wedge 4060) + \min(1, s \wedge 4060) \cdot (20 + 12 + 4) + \left\lceil \frac{s}{4060} \right\rceil (4096)$$

$$T_s(s) = T_{s'}(s) + 4096 \cdot n(s)$$

#### 5.2.2.1.1.2. L'encapsulation via ULE

Comme précédemment, on pose  $T_{SN}(s)$ , la taille d'une section encapsulant un segment TCP de taille initiale  $s$ . La taille maximale d'une donnée encapsulée dans une SNDU ULE étant codée sur 15 bits, on peut alors encapsuler des datagrammes de plus de 32 Kbits (en incluant le champ optionnel d'adresse et le CRC dans le décompte). Il n'y a donc pas de fragmentation ici. L'encapsulation dans une SNDU ULE rajoute, dans notre cas, 4 octets d'en-tête obligatoire, 6 d'en-tête optionnel correspondant à l'adresse MAC destination et 4 de CRC (19).

$$(19) \quad T_{SN}(s) = s + 20 + 4 + 6 + 4$$

#### 5.2.2.1.2. ENCAPSULATION AU NIVEAU MPEG-2 TS

Une fois les datagrammes encapsulés dans un ou plusieurs conteneurs, ces derniers sont encapsulés dans les flux MPEG-2 TS. Si dans les deux cas ces encapsulations se ressemblent, il existe certaines spécificités, notamment au niveau de l'insertion du pointeur et des cas limites du *section packing*.

#### 5.2.2.1.2.1. L'encapsulation via MPE

Chaque section datagramme est ensuite encapsulée dans un ou plusieurs paquets MPEG-2 TS. Toutefois le *section packing* n'aura lieu que s'il reste strictement plus de 7 octets dans le paquet, sinon il y aura bourrage. En effet, ces 7 octets de seuil permettent de ne pas tronquer le champ longueur de la section MPE. On alors :

$$(20) \quad T_{MP^n}(s) = T_{MP^n}(T_{s'}(s)) + n(s) \cdot T_{MP^n}(4096)$$

$$(21) \quad T_{MP^n}(4096) = \frac{4096 + 4}{184} \cdot 188 \approx 4189.13$$

$$(22) \quad \begin{array}{l} \text{Si } (T_{s'}(s) = 0) \text{ alors } \{T_{MP^n}(T_{s'}(s)) = 0\} \\ \text{SinonSi } ((T_{s'}(s) + 4) \wedge 184 < 177) \text{ alors} \\ \quad \left\{ T_{MP^n}(T_{s'}(s)) = \left( \frac{(T_{s'}(s) + 4)}{184} \right) \cdot 188 \right\} \\ \text{Sinon} \\ \quad \left\{ T_{MP^n}(T_{s'}(s)) = \left( \left\lceil \frac{(T_{s'}(s) + 4)}{184} \right\rceil \right) \cdot 188 \right\} \\ \text{FinSi} \end{array}$$

(21) est une application particulière de (22) pour 4096 octets. On peut noter dans (22), la prise en compte du pointeur de 4 octets dans le calcul pour identifier le début de la section dans le paquet MPEG-2 TS.

#### 5.2.2.1.2.2. L'encapsulation via ULE

La SNDU est ensuite encapsulée dans des paquets MPEG-2 TS. Dans ce cadre, deux cas limites sont à prendre en compte pour le calcul de  $T_{U'}$  en fonction de  $T_{SN}$  :

- le cas où plus d'un paquet peut être encapsulé dans un seul paquet MPEG-2 TS. C'est possible lorsque  $T_{SN}$  est inférieur à 184 octets. Alors le poids de ce message est de :

$$(23) \quad T_{U'}(s) = \left( \frac{T_{SN}(s)}{183} \right) .188$$

sauf quand il ne peut y avoir le début d'une nouvelle SNDU dans le paquet, c'est-à-dire s'il reste uniquement 1 octet. Dans ce cas, la taille MPEG-2 TS utilisée pour l'encapsulation de la SNDU est de 188 octets divisés par le nombre de SNDU de même taille que l'on peut mettre dans le paquet (183 octets), soit :

$$(24) \quad T_{U'}(s) = \left\lfloor \frac{183}{T_{SN}(s)} \right\rfloor^{-1} .188$$

- le cas où il ne reste qu'un ou deux octets dans le paquet MPEG-2 TS pour encapsuler la donnée suivante. Ici du bourrage doit alors être introduit.

Cela donne alors :

$$(25) \quad \left. \begin{array}{l} \text{Si } (T_{SN}(s) < 184) \text{ alors} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } (183 \wedge T_{SN}(s) > 1) \text{ alors } \left\{ T_{U'}(s) = \left( \frac{T_{SN}(s)}{183} \right) .188 \right\} \\ \text{Sinon } \left\{ T_{U'}(s) = \left\lfloor \frac{183}{T_{SN}(s)} \right\rfloor^{-1} .188 \right\} \\ \text{FinSi} \end{array} \right\} \\ \text{Sinon} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } ((T_{SN}(s) + 1) \wedge 184 < 182) \text{ alors } \left\{ T_{U'}(s) = \left( \frac{T_{SN}(s) + 1}{184} \right) .188 \right\} \\ \text{Sinon } \left\{ T_{U'}(s) = \left\lfloor \frac{T_{SN}(s) + 1}{184} \right\rfloor^{-1} .188 \right\} \\ \text{FinSi} \end{array} \right\} \\ \text{FinSi} \end{array} \right\}$$

#### 5.2.2.1.3. CONCLUSION SUR L'ENCAPSULATION DE LA VOIE ALLER

On peut alors représenter le rapport entre  $T_{U'}(s)$  et  $T_{MP}(s)$  (Figure 5.2). Cette courbe reprend l'allure générale de la Figure 3.17, puisque ce précédent calcul proposait une analyse rapide de l'encapsulation ULE comparée à MPE. Cette étude plus précise met en valeur plusieurs points :

- l'encapsulation ULE est plus performante pour des paquets plus petits ;



- des creux et des pics sont observables, correspondant à l'introduction de bourrage quand un pointeur ne peut être inséré. Les creux étant plus prononcés que les pics, le bourrage a plus d'impact sur les performances de MPE. Cela s'explique par l'importance relative du bourrage dans MPE qui peut aller jusqu'à 7 octets, alors que dans ULE, seul 2 octets sont introduits au maximum ;
- au delà de 4060 octets rentre en jeu la fragmentation du datagramme IP pour MPE, tandis que la méthode ULE ne scinde pas le datagramme. Le *ratio* tend alors vers 99%.

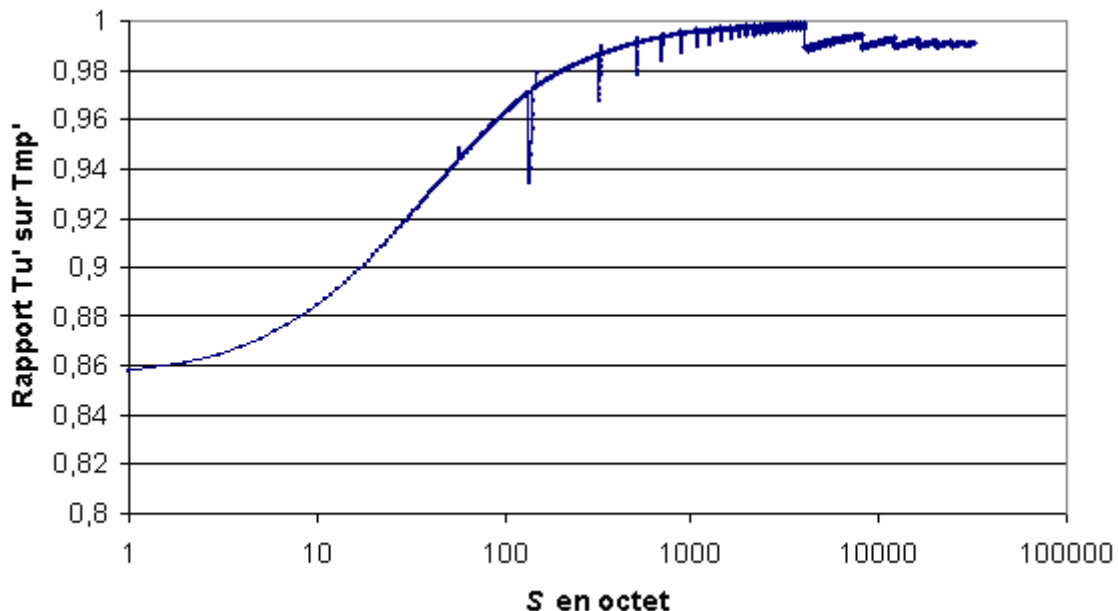


Figure 5.2 Comparaison de l'encapsulation MPE et ULE sur le lien montant DVB-S dans le système hybride

Cette analyse de l'encapsulation de datagrammes sur la voie aller montre comment ULE, utilisée dans le cadre de notre architecture, propose un gain dans tous les cas. Il est certain que pour des paquets importants ce gain reste assez faible, oscillant entre 0.1 % et 2%. Pour des paquets plus faibles néanmoins, les performances de cette solution sont nettement supérieures à celles d'une encapsulation plus classique de type MPE. Ainsi obtient-on jusqu'à 14% de gain pour des paquets de très petites tailles, 9.5% pour les acquittements TCP (s pris à 20 octets), ou encore 4% à 8% pour des segments de signalisation de quelques dizaines d'octets.

Ainsi, sur la voie aller, le système hybride présente une encapsulation des flux IP moins lourde que les solutions classiques, notamment sur les paquets de petites tailles comme les messages de signalisation grâce à l'intégration de la proposition ULE.

#### 5.2.2.2. *La comparaison de l'overhead engendré par l'encapsulation sur la voie retour*

L'utilisation de paquet MPEG-2 TS comme conteneurs pour le DVB-RCS a été choisie pour conserver l'homogénéité entre les flux DVB-S montants et les flux DVB-RCS descendants. De plus une approche homogène permet un agencement des couches protocolaires plus léger, induisant qualitativement une encapsulation moins lourde.

Dans ce cadre, cette partie propose de vérifier qu'au lieu d'induire un surcoût d'encapsulation sur la voie retour, la solution hybride propose une encapsulation plus légère.

Puisque dans le mode régénératif, les flux montants sont démultiplexés à bord puis multiplexés en de nouveaux flux descendants, une encapsulation peut être utilisée ici, notamment pour le formatage des cellules ATM en paquet MPEG-2 TS. Cette étude est alors divisée en deux sections : d'abord le lien montant (5.2.2.2.1), ensuite le lien descendant (5.2.2.2.2).

#### 5.2.2.2.1. ANALYSE SUR LE LIEN MONTANT

Le cas ATM, au contraire de la voie aller, n'encapsule pas successivement dans deux conteneurs différents les datagrammes. Pour le DVB-RCS, l'utilisation de paquets MPEG-2 TS n'est pas obligatoire. En revanche l'encapsulation ULE reste identique à celle de la voie aller (25).

Toutefois, la mise en place de cette encapsulation est très liée à des notions de codage canal, puisque les conteneurs de niveau 2 sont assemblés sous la forme de *bursts*, et codés d'une manière différente. Cet élément est directement intégré dans cette analyse, qui se découpera alors en la présentation des hypothèses d'encapsulation, l'analyse de l'encapsulation AAL5/ATM jusqu'au niveau des *bursts*, et de celle utilisant ULE. Enfin nous comparerons les deux approches.

##### 5.2.2.2.1.1. Les hypothèses d'encapsulation

Pour l'encapsulation *via* les cellules ATM, l'étude repose sur notre expérience dans DIPCAST. Ainsi une cellule ne pourra contenir plus d'un morceau de segment TCP. Le bourrage sera alors de rigueur.

Les *bursts* TRF seront formés d'au maximum 4 cellules ATM, et nous considérons dans les calculs que ce maximum est toujours atteint. Le taux de codage des cellules sera de 2/3 et un en-tête de 4 octets sera rajouté par *burst*, sans préambule SAC optionnel.

Pour les paquets MPEG-2 TS, dans le cas ULE, nous considérerons aussi 4 paquets par *burst*, avec un codage 3/4 et un en-tête de 4 octets, toujours sans préambule SAC optionnel.

##### 5.2.2.2.1.2. L'encapsulation via AAL5/ATM

Comme précédemment, notons  $T_{Aup}(s)$ , la taille des *bursts* TRF nécessaires à l'encapsulation d'un segment TCP de taille  $s$ . On a alors  $N_A(s)$ , le nombre de cellules ATM nécessaires pour encapsuler les  $s + 20$  octets :

$$(26) \quad N_A(s) = \left\lceil \frac{s + 20}{48} \right\rceil$$

Ces cellules sont ensuite regroupées par 4 pour former un *burst*. Un codage de 2/3 et un préambule de 4 octets sont utilisés. On a alors une taille totale de :

$$(27) \quad T_{Aup}(s) = \frac{N_A(s)}{4} \cdot (4 + 4 \times 53 \times 3/2)$$

##### 5.2.2.2.1.3. L'encapsulation via ULE

La formule (25) restant valable, on peut regrouper les paquets en quadruplets, ajoutant un préambule de 4 octets. On obtient alors l'expression de  $T_{Uup}(s)$  en fonction de  $T_U(s)$  (23).

$$(28) \quad T_{Uup}(s) = \frac{T_U(s)}{4} \cdot 188 \cdot (4 \times 4 \times 188 \times 4/3)$$

##### 5.2.2.2.1.4. La comparaison entre les deux encapsulations

Nous proposons d'analyser l'efficacité de ces deux encapsulations, en étudiant le rapport entre  $T_{Uup}(s)$  et  $T_A(s)$  (Figure 5.3).

Il est naturel de retrouver ici au minimum le facteur dû aux taux de codage différents, c'est-à-dire environ 11% de gain pour la solution ULE. Or, ici, on observe une limite vers 0.815, soit un gain de 18.5%. Cette partie va donc analyser les différentes causes responsables de ce gain.

Une première raison pourrait être le bourrage introduit dans les cellules ATM, mais la figure suivante dément cette conclusion. En effet, s'il est évident que le bourrage a un effet notable pour des valeurs de  $s$  peu élevées, l'augmentation de  $s$  estompe cette différence qui se traduit par un amortissement des oscillations sur la courbe. Le bourrage a donc peu d'impact pour  $s$  élevé.

Une autre cause de ce gain vient de la formation des *bursts*. En effet, si un *burst* est composé de 4 éléments dans tous les cas, 4 cellules ATM font uniquement 318 octets (codage inclus) contre environ 1003 octets pour les paquets MPEG-2 TS. Or, à chaque *burst*, 4 octets sont rajoutés, donnant un gain d'environ 1% pour l'encapsulation ULE.

La dernière raison de cette différence est le total des en-têtes ULE contre ATM. En effet ATM rajoute 5 octets pour 48 octets, tandis que ULE/MPEG-2 rajoute 14 octets en-tête et CRC, 1 octet de pointeur, et 4 octets par 184 octets. Par un calcul approché, considérant  $48 \times 184$  octets à encapsuler, on obtient la formule (24) pour le *ratio* entre la taille des données une fois encapsulée par ULE et la taille obtenue par ATM. Soit un gain pour ULE de 7.3%.

$$(29) \quad \frac{\left(\frac{15}{184} + 48\right) \cdot 188}{184 \times 53} \approx 0.927$$

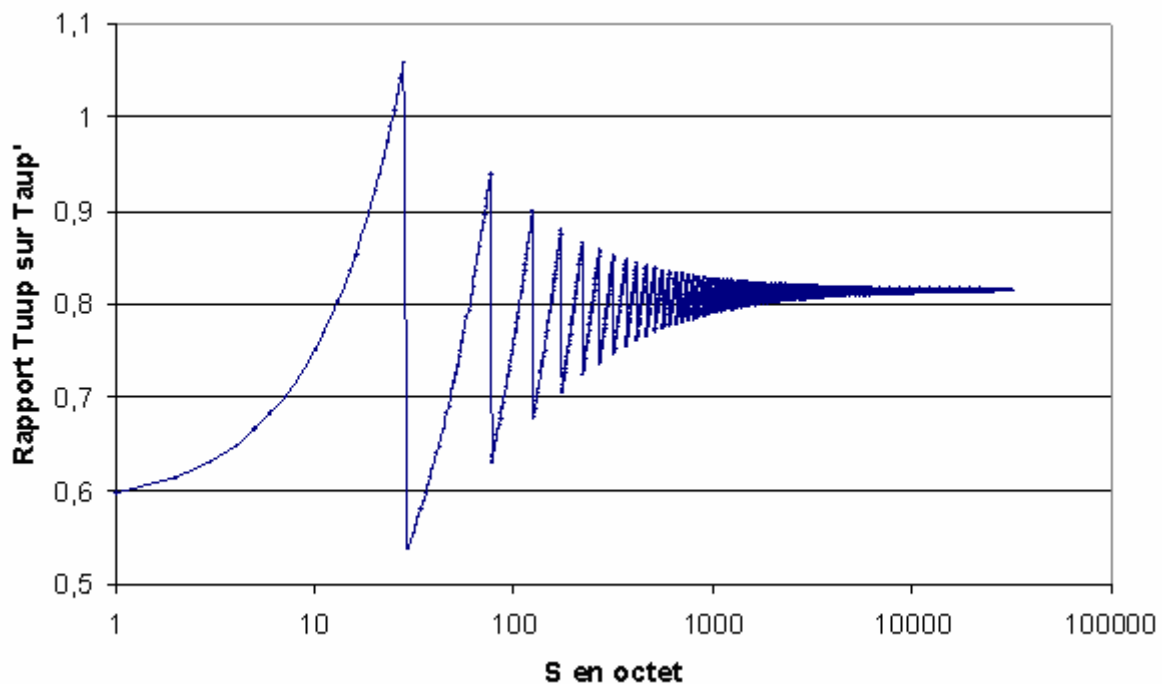


Figure 5.3 Comparaison de l'encapsulation ATM et ULE sur le lien montant DVB-RCS dans le système hybride

Cette partie a montré que sur la voie retour, le système hybride propose un *overhead* plus faible, gagnant de l'ordre de 18.5 % dont 7.3 % sont intrinsèquement liés à l'encapsulation. Ce gain est d'autant plus appréciable qu'il est plus important pour les paquets de petite taille, plus courants sur le lien retour.

5.2.2.2. ANALYSE SUR LE LIEN DESCENDANT EN MODE RÉGÉNÉRATIF

Nous proposons de terminer cette analyse par l'encapsulation sur le lien descendant en mode régénératif. Ce n'est, en effet, que dans le cadre du mode régénératif que le multiplexage en flux DVB-S descendant implique le formatage des cellules ATM en paquet MPEG-2 TS. Dans le cas de l'architecture hybride, ce problème n'a pas lieu, puisqu'il s'agit déjà de paquets MPEG-2.

Après avoir posé les hypothèses d'encapsulation dans 5.2.2.2.1, nous étudierons le cas AAL5/ATM, puis le cas ULE, et enfin nous concluons avec le *ratio* entre ces encapsulations.

5.2.2.2.1. Les hypothèses d'encapsulation

Dans cette partie, puisqu'il s'agit de comparer deux modes DVB-S, le codage est le même dans les deux cas. Nous ne le prenons donc pas en compte ici.

À bord, dans le cas AAL5/ATM, les cellules sont multiplexées dans des paquets MPEG-2 TS. Pour un flux ATM de cellules de même segment TCP d'origine, on encapsule 7 cellules pour 2 paquets MPEG-2 TS. Par contre, l'encapsulation de cellules ATM d'un datagramme différent n'est pas autorisé dans un même paquet MPEG-2 TS. Cette encapsulation utilise du *data piping*.

5.2.2.2.2. L'encapsulation via AAL5/ATM

Soit  $T_{A\text{down}}(s)$ , la taille des paquets MPEG-2 TS utilisées pour encapsuler les cellules ATM encapsulant elles-mêmes un segment TCP de taille  $s$ . Les hypothèses ci-dessus impliquent l'expression suivante pour  $T_{A\text{down}}(s)$  :

$$(30) \quad T_{A\text{down}}(s) = \left\lfloor \frac{\left\lceil \frac{s+20}{48} \right\rceil}{7} \right\rfloor \cdot 2 \times 188 + \left\lceil \frac{\left\lceil \frac{s+20}{48} \right\rceil \wedge 7}{3} \right\rceil \times 188$$

5.2.2.2.3. Encapsulation via ULE

Pour ce qui concerne  $T_{U\text{down}}(s)$ , l'encapsulation à bord reste la même que précédemment, on a donc la même expression que  $T_U(s)$  (25).

5.2.2.2.4. La comparaison entre les deux encapsulations

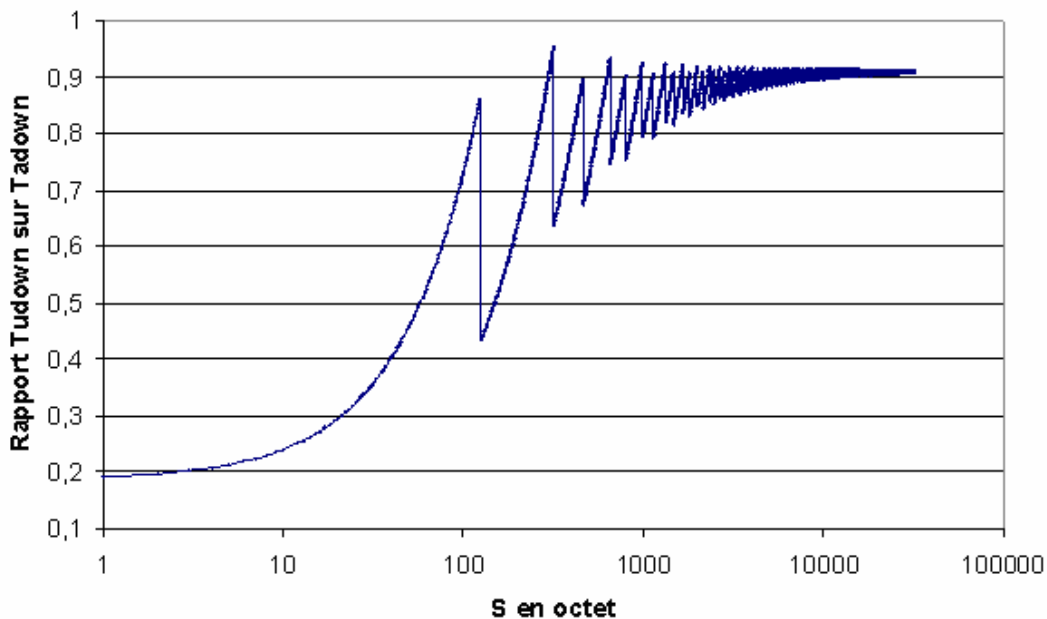


Figure 5.4 Comparaison de l'encapsulation ATM et ULE sur le lien descendant DVB-S dans le système hybride

La figure ci-dessus (Figure 5.4) présente le rapport entre  $T_{Udown}(s)$ , et  $T_{Adown}(s)$ , sans prendre en compte cette fois les critères de codage, puisqu'ils sont exactement les mêmes. Cette courbe montre un gain pour la méthode ULE tendant vers 9%.

Néanmoins il faut nuancer quelque peu cette valeur dans la mesure où l'on compare ici une méthode utilisant du *section packing* contre une solution avec bourrage. Or, la solution ULE se place dans le cas idéal d'un *section packing*. Toutefois, les études telles que [47] montre que l'on peut envisager dans les 70% de *section packing*. Aussi même si ce gain peut être un peu moins grand, on peut conclure sur de meilleures performances de l'utilisation de MPEG-2 TS comme support pour DVB-RCS dans le cadre régénératif, même lorsqu'il y a un peu de bourrage.

Plus d'oscillations sont observés ici que précédemment. Celles-ci proviennent du double bourrage, dans les paquets MPEG-2 TS d'une part, et dans les cellules ATM d'autre part pour la solution AAL5/ATM. Une amélioration de la solution ATM peut cependant être apportée en utilisant MPE ou ULE à la place du *data piping*. Mais dans l'ensemble, l'encapsulation ULE reste plus avantageuse, car cette technique ne fait que gommer les oscillations.

Le système hybride propose d'utiliser une encapsulation plus légère que les méthodes classiques, permettant de gagner en capacité sur le lien retour descendant, surtout pour des paquets courts. Dans ce cadre, le gain oscille entre 10% et 50%, pouvant même atteindre 80% pour des paquets de très petites tailles.

### 5.2.2.3. Des conclusions sur l'étude de l'overhead

Cette analyse a permis d'observer plusieurs éléments. Dans un premier lieu, ULE reste la plus performante que les solutions communes étudiées ici, et cela sur le lien aller comme retour. De plus, ULE est mieux adapté aux paquets de petite taille. Enfin l'overhead d'ULE reste le plus léger, même pour des paquets de très grande taille (10 KB) puisque le champ longueur de cette méthode permet de les encapsuler sans la nécessité d'une fragmentation au niveau IP (par exemple sur gigabit Ethernet).

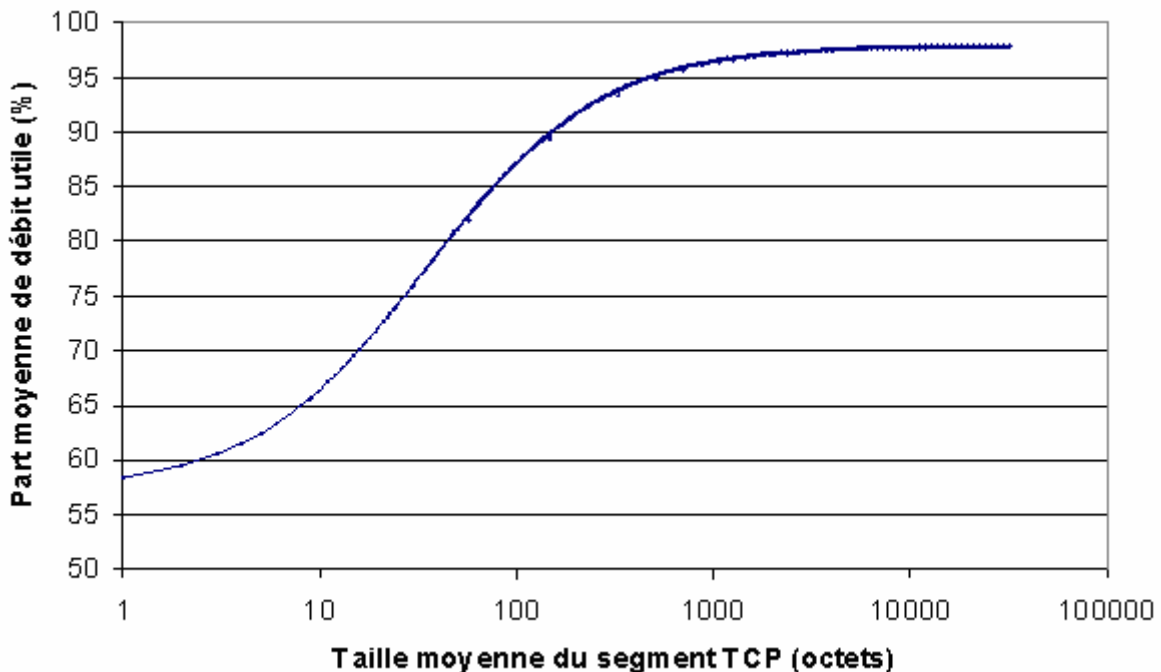


Figure 5.5 Part moyenne de débit utile en fonction de la taille moyenne des segments TCP véhiculé sur le système hybride

L'architecture hybride propose donc une mise en œuvre spécifique et performante d'ULE, offrant notamment une meilleure rentabilité de la voie retour en limitant le gaspillage de débit engendré par les encapsulations successives.

La figure ci-dessus donne un aperçu du pourcentage réel de bande passante utile sur la voie aller (Figure 5.5)<sup>1</sup>, comme la voie retour descendante en mode régénératif. Cette figure montre clairement que pour un système utilisant des segments moyens de 1000 octets, l'encapsulation prend moins de 4% du débit, contre 4.4% dans le cadre d'une encapsulation Ethernet.

La nature hybride de l'architecture n'a donc pas une influence négative sur le poids de l'encapsulation du système. Les solutions proposées sont mêmes plus performantes que les méthodes classiques.

### 5.2.3. Étude du poids des messages de signalisation

L'étude précédente a permis de montrer que l'architecture hybride, loin d'entraîner une surcharge d'encapsulation, proposait une encapsulation à l'*overhead* léger, comparativement à des solutions satellites classiques. Cependant, l'encapsulation n'est pas seule à pouvoir engendrer un poids certain au niveau 2. La spécificité du système hybride, à savoir l'intégration de deux charges utiles différentes dans un même système, présente un risque : celui d'une signalisation lourde.

L'objet de cette partie est donc d'avoir une idée des pertes de capacité introduites par les messages de signalisation. Bien sûr, il est utopique d'obtenir un calcul très précis de ces valeurs, mais une évaluation du poids des messages par flux IP est envisageable.

Si l'on reprend les chapitres 2, 3 et 4 de ce mémoire, il est possible de référencer les messages de signalisations spécifiques à la communication des flux IP, à savoir les tables SI pour les flux IP, les messages induits par la résolution d'adresse, les messages gérant le contrôle d'accès et les messages de mise à jour des tables de commutation. On peut ainsi résumer les quatre types de messages spécifiques aux flux IP, et donc à l'architecture hybride. Par contre il est plus délicat de connaître le poids de ces messages par rapport aux flux IP. C'est là l'objectif de cette partie.

Pour suivre cette démarche, les quatre premières sections étudieront ces signalisations, alors que la dernière fera le point sur l'impact de la signalisation sur le système.

#### 5.2.3.1. Le poids de la signalisation DVB-SI pour les flux IP

Le système hybride se propose d'utiliser la méthode INT pour référencer les flux IP véhiculés au niveau MPEG-2 TS. Cette solution est conseillée par la norme DVB-S, et se présente pour le moment comme l'unique solution standard sur système DVB-S.

Tableau VI. TABLES SI CONSULTÉES POUR AVOIR ACCÈS AU PID D'UN FLUX IP

Table	Fonction	Utilisation	Nombre de tables	Nombre de consultations	Spécificité		
					IP	PID	Adresse IP
NIT	Table centrale de l'IN	Indique le numéro du programme INT	1 (par IN)	1	non	non	non
PAT	Table indiquant le lien entre chaque numéro de programme et le PID de leur PMT	- Indique le PID de la table PMT du service INT - Indique le PID de la table PMT du flux IP	1 (par multiplexe)	2	non	non	non
PMT	Table indiquant les PIDs constituant un programme	-Indique le PID de la table INT -Indique le PID du flux contenant l'adresse IP	2	1 1	oui non	non oui	non non
INT	Table faisant le lien entre une adresse IP (ou MAC) et un numéro de programme	Donne le numéro de programme correspond à l'adresse recherchée	1	1	oui	non	non

<sup>1</sup> Ici n'est pris en compte que le débit utilisé par l'encapsulation, et donc aucune autre signalisation.

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. 3.2.2.3), le standard DVB-S prévoit de faire le lien entre les adresses IP destination, unipoint comme multipoint, et les PIDs. Cette solution utilise les tables INT pour faire le lien entre une adresse, et un numéro de programme. Le tableau précédent récapitule les tables à consulter pour avoir accès au PID des paquets transportant le flux IP recherché (Tableau VI).

Comme ce tableau le montre, seuls deux types de tables sont spécifiques au service IP sur satellite : la table INT, et les tables PMT des programmes liés à IP. Nous négligerons ici le poids des lignes correspondant à des flux IP ajoutés dans les tables NIT, ou PAT, puisque comparativement au nombre de flux, elles représentent quelques octets. On alors :

- Un ajout d'un numéro de programme pour la table INT dans la table PAT. Ce qui correspond à un ajout de 4 octets (*program\_number* et *network\_PID*).
- Une table PMT pour indiquer le programme INT. La table PMT d'une table INT se décompose en :
  - un en-tête de 12 octets [4],
  - un bloc composé d'un octet de *stream\_type*, de 3 bits réservés, de 13 bits de *elementary\_PID* [1], et d'un *data\_broadcast\_Id\_descriptor* [13] de 10 octets incluant un champ spécifique à INT [10], l'*IP/MAC\_notification\_info* (6 octets),
  - un CRC de 4 octets.
- Deux blocs dans la table INT pour traiter une adresse IP donnée. La table INT est elle-même composée d'un en-tête de 12 octets, suivi d'une *platform\_descriptor\_loop*, puis d'une boucle de deux blocs composés, l'un du *target\_descriptor\_loop*, l'autre de l'*operational\_descriptor\_loop*, et enfin un CRC de 4 octets. Seuls les deux blocs sont spécifiques à une adresse IP (ou un regroupement d'adresses). La figure ci-dessous (Figure 5.6) présente de manière plus précise la composition de la table INT.

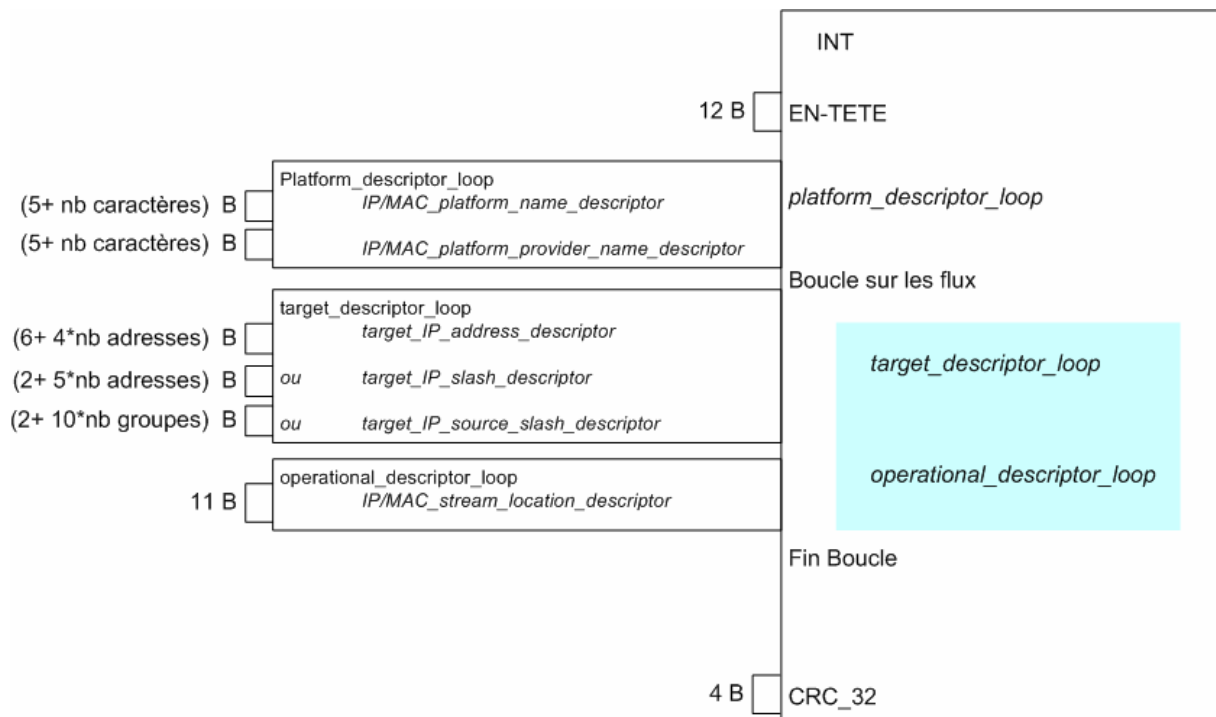


Figure 5.6 Taille d'une table INT en fonction du nombre de flux IP traités

- Un ajout d'un numéro de programme pour le flux IP dans la table PAT<sup>1</sup>, qui prend donc 4 octets (*program\_number* et *program\_map\_PID*).
- Une table PMT associée à un flux IP. Il s'agit toujours d'une table de 12 octets d'en-tête, avec un bloc de 10 octets contenant le *data\_broadcast\_id\_descriptor*, et d'un CRC de 4 octets.

Le tableau suivant (Tableau V) propose alors une évaluation du poids de la signalisation SI ramenée à un flux IP. Les valeurs prises pour la période d'émission des tables sont celles proposées par le guide d'implantation de DVB-SI [122], et un guide produit par EUTELSAT pour HOT BIRD<sup>tm</sup> [123]. En revanche, il n'y a pas d'informations quant à la périodicité de la table INT. Comme cette table paraît aussi importante que la table PMT, nous avons fixé sa périodicité à 100 ms. Nous avons opté pour des chaînes de caractères de 8 octets.

Tableau VII. ÉVALUATION DU POIDS DE LA SIGNALISATION POUR UN FLUX IP

	UNIPOINT 1 PID par y <sub>1</sub> regroupements de x <sub>1</sub> adresses IP pour n flux totaux	MULTIPOINT 1 PID par y <sub>2</sub> regroupements de x <sub>2</sub> groupes pour n flux totaux
PAT période 100 ms	$\left(\frac{4}{n} + \frac{4}{x_1 * y_1}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$	$\left(\frac{4}{n} + \frac{4}{x_2 * y_2}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$
PMT période 100 ms	$\left(\frac{28}{n} + \frac{26}{x_1 * y_1}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$	$\left(\frac{28}{n} + \frac{26}{x_2 * y_2}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$
INT période 100 ms	$\left(\frac{42}{n} + \frac{y_1(6+4*x_1)}{x_1 * y_1}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$	$\left(\frac{42}{n} + \frac{y_2(2+10*x_2)}{x_2 * y_2}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$
Total	$\left(\frac{74}{n} + \frac{30+y_1(6+4*x_1)}{x_1 * y_1}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$	$\left(\frac{74}{n} + \frac{30+y_2(2+10*x_2)}{x_2 * y_2}\right) * 10 \text{ B.s}^{-1}$

Ainsi si l'on utilise un seul PID par adresse IP et flux *multicast* on obtient un poids total de signalisation de  $(740/n + 400)$  octets par seconde par flux unipoint et  $(740/n+420)$  octets par seconde par flux multipoint. Pour un multiplex de 38 Mbit/s, on peut offrir 38 communications simultanées à 1 Mbit/s. On a alors au minimum 419.5 octets utilisés pour un flux *unicast*, soit 0.34% du débit. Toutefois, sur la voie DVB-S, il ne s'agit pas de connexions garanties, mais de communications concurrentes, avec certaines garanties de services pour les utilisateurs. On peut garantir le débit pour les premiers gigaoctets téléchargés, ou encore un minimum de débit. Dans notre cas, pour permettre l'évaluation, on garantit un minimum de 10% du débit maximum offert. La figure suivante (Figure 5.7) présente alors l'évolution du poids de la signalisation SI en fonction du nombre de clients simultanés sur le système.

L'utilisation d'un PID par flux IP peut engendrer une génération de signalisation de tables SI à plus de 3% du débit attribué pour ce flux. L'utilisation d'agrégation de flux par PID permet de réduire cette consommation de la bande passante d'un facteur 10. Ainsi si l'on utilise 1 PID pour 100 flux (ce qui peut être moins encore dans le mode transparent), le débit par flux est diminué à environ 0.37% pour la signalisation SI spécifique à ce flux. L'utilisation d'un unique PID pour tout le trafic et la résolution d'adresse au niveau MAC permettent de réduire les messages SI à leur plus simple expression. Toutefois, dans un tel cas, le flux IP n'a plus aucune signification au niveau MPEG-2 TS, et tout le travail est reporté sur le niveau MAC ULE.

<sup>1</sup> Un flux IP peut partager un même programme avec d'autres flux IP, c'est-à-dire un même PID.



Cependant, nous avons vu dans la partie 4 que l'agrégation de flux proposée par l'architecture hybride était limitée sur le lien régénératif, pour éviter le déséquilibrage introduit par la commutation à bord. Ainsi, l'agrégation des PIDs est possible au niveau des *gateway*, mais pas en mode régénératif pour les flux de deux RCST différents.

Toutefois, le trafic engendré par les *gateways* est plus important que celui des RCSTs. Aussi l'agrégation des PIDs utilisée par l'architecture hybride permet sur la voie aller d'avoir une perte comprise entre 0.08% et 0.37%. Le poids augmente sur la voie descendante régénérative par l'ajout des flux en provenance des RCSTs, puisque dans le cas d'une commutation sur les PIDs, l'utilisation du même PID reste restreinte au couple (RCST, *spot*). Ce couple est associé généralement à un seul flux IP quand la destination est un autre RCST, et à plusieurs pour une *gateway*. Ces flux, de débit plus faible, introduisent une signalisation plus importante. Si l'on considère qu'ils utilisent 10% du débit total du multiplexe descendant, soit 3.8 Mb/s, on a alors de 14 à 148 flux circulant avec un débit de 25.6 à 256Kb/s, soit un poids d'encapsulation variant de 1.4 à 12.6 % du débit du flux. Il est naturel, toutefois, d'observer une augmentation du poids de l'encapsulation relatif quand le débit décroît.

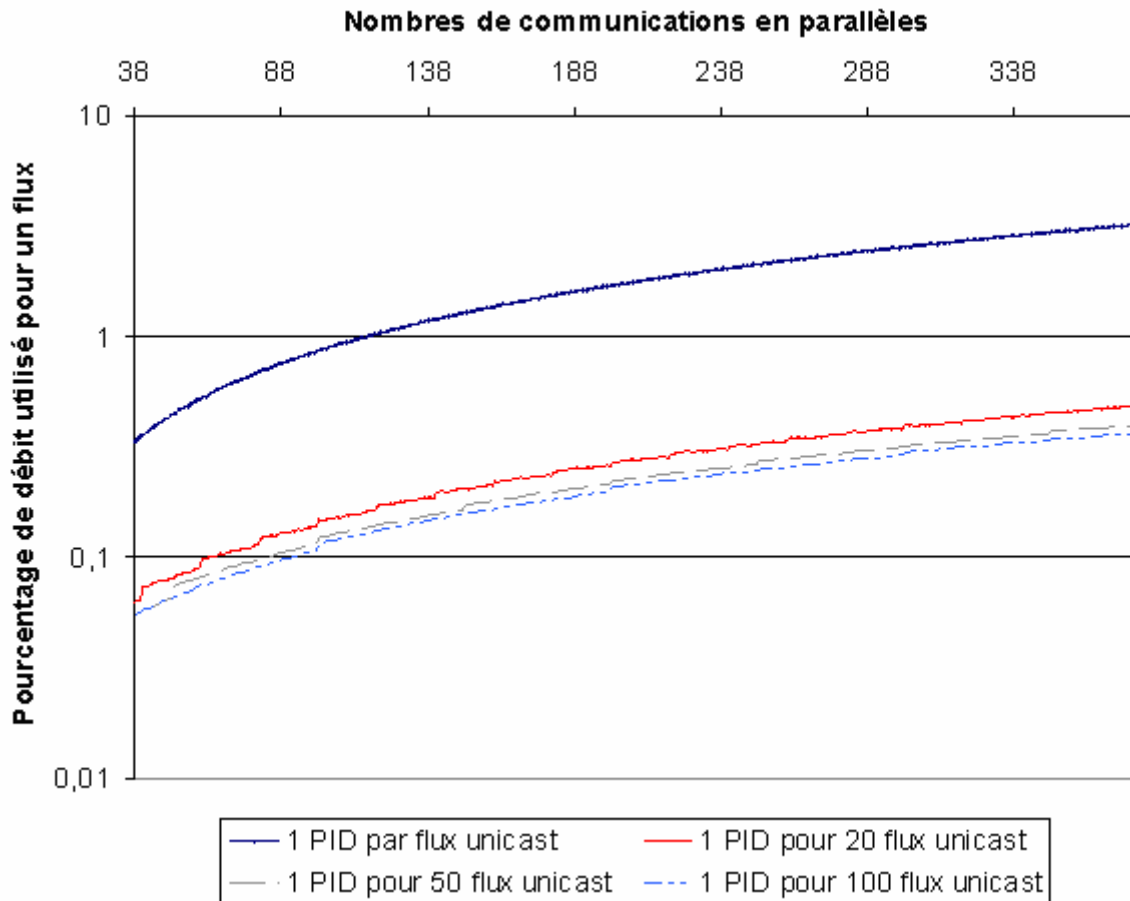


Figure 5.7 Évolution du poids de la signalisation SI en fonction du nombre de clients simultanés

Au niveau de la signalisation DVB-SI, le système hybride introduit la même signalisation qu'un système utilisant la méthode INT. Pour les flux de la voie aller, cette signalisation a un faible poids, grâce notamment à l'agrégation des PIDs utilisée par les *gateways*. Ce poids devient plus important pour la voie retour régénérative, surtout pour des faibles débits. Toutefois un poids de 12.6 % reste celui proposé par la méthode INT, et une spécificité de notre architecture.

### 5.2.3.2. *Le poids de signalisation induite par la résolution d'adresse*

Dans cette partie nous proposons une discussion sur le poids de la signalisation induite par l'AR. Nous verrons ce cas dans l'architecture telle qu'elle est proposée ici (section 5.2.3.2.1), ainsi que quelques perspectives (section 5.2.3.3.2).

#### 5.2.3.2.1. DANS L'ARCHITECTURE HYBRIDE

La résolution d'adresse peut introduire un poids de signalisation en début de communication. Toutefois, ce n'est pas le cas de notre architecture (cf. 4.3.3.3.3) où la correspondance entre l'adresse MAC et l'adresse IP se fait automatiquement.

La demande d'un PID reste un cas très rare de la part de la *gateway* et, pour une RCST, celle-ci est faite en même temps que l'allocation de ressources, si besoin. Il n'y a donc pas de message particulier à prendre en compte ici, donc aucun impact sur l'architecture hybride.

#### 5.2.3.2.2. OUVERTURES VERS UNE AUTRE MÉTHODE D'AR

Dans le cadre du système hybride, on peut envisager une autre méthode de résolution d'adresse : l'utilisation de messages de type ARP pour, d'une part, communiquer aux récepteurs d'un flux quel PID les concerne et pour, d'autre part, leur demander leur adresse MAC. Cette méthode introduit des messages supplémentaires mais plus ponctuels que la méthode INT, rendant la signalisation INT précédemment étudiée inutile. Cependant, nous n'avons pas proposé cette méthode ici dans la mesure où rien n'est encore normalisé pour le satellite sur ce point tandis que la méthode INT est incluse dans le standard DVB, et permet une cohabitation des flux IP avec des flux MPEG-2 (ce qui peut être un atout pour la VoD).

### 5.2.3.3. *Le poids de la signalisation induite par la méthode d'accès*

Dans le cadre du système hybride, la méthode d'accès est liée en partie à la résolution d'adresse, parce que le NCC est le maître d'œuvre de l'attribution des PIDs et le contrôleur de l'accès au système. Ainsi, le NCC profite des demandes d'accès pour attribuer les PIDs à la station émettrice, correspondant à ses besoins.

La signalisation induite est très variable en fonction de la voie et du mode. Pour l'étude de cette signalisation, nous découperons alors l'analyse en deux sections : la signalisation induite par la méthode d'accès sur la voie aller et la signalisation induite par la voie retour.

#### 5.2.3.3.1. LA SIGNALISATION INDUITE SUR LA VOIE ALLER

La méthode d'accès sur la voie aller est assez simple pour le mode transparent, elle est gérée par les *gateways* elles-mêmes (cf. 4.3.3.4.1.1). Aucune signalisation n'est donc induite à ce niveau. Comme la plupart des systèmes, l'architecture hybride n'induit pas de signalisation liée à l'accès sur la voie aller qui puisse avoir une quelconque influence sur le débit d'une *gateway*.

#### 5.2.3.3.2. LA SIGNALISATION INDUITE SUR LA VOIE RETOUR

Il s'agit ici d'étudier l'impact de l'accès au support satellite des RCSTs dans l'architecture hybride.

La méthode d'accès a un rôle essentiel au niveau de la voie retour. Dans le cadre d'une allocation dynamique, de type DAMA, tous les terminaux voulant émettre sur la prochaine supertrame doivent communiquer leur demande au NCC via un canal à contention (le plus souvent de type aloha). Le NCC calcule la meilleure attribution possible en prenant en compte les ressources du système (le calcul est donc plus complexe en mode régénératif) et envoie cette distribution sous la forme des messages (table SI) TBTP (cf. 4.3.3.4.1.2). La signalisation se découpe en deux parties : les messages sur la voie retour et la table TBTP sur la voie aller.

5.2.3.3.2.1. Sur la voie retour

Comme la signalisation sur le lien retour utilise un canal réservé à contention, le poids de la signalisation est donc naturellement contrôlé et limité, sans impact sur les bursts de type TRF. La signalisation peut toutefois utiliser le champ SAC optionnel des *bursts* TRF, mais l'évaluation de l'impact de cette signalisation revient alors à prendre en compte un *overhead* supplémentaire moyen dans la formation des bursts. L'architecture hybride n'utilise pas cette méthode. Il n'y a donc aucune influence de l'accès à la voie retour sur la voie retour elle-même.

5.2.3.3.2.2. Sur la voie aller

Sur la voie aller, en revanche, les tables TBTP se rajoutent au débit utilisé par la signalisation SI. La fréquence des tables TBTP dépend grandement de la taille de la supertrame, qui peut aller jusqu'à 93.2s [124]. Toutefois, dans ce cas, la TBTP est découpée en morceaux, distribués au fur et à mesure en fonction des numéros de trame. Un exemple d'implémentation donne une période de 140 ms [84], mais il s'agit d'un cas mettant en œuvre ATM. En prenant appui sur des exemples proposés pour ATM [121][124], nous avons choisi de prendre pour exemple d'étude la répartition proposée dans le tableau suivant (Tableau VIII)<sup>1</sup>, où  $n_{TRF}$  est le nombre de *bursts* TRF par trames :

Tableau VIII. COMPOSITION D'UNE SUPERTRAME

$T_{st}$	1.3 s
$T_{st} / T_t$	16
$W_{st} / W_t$	2
$n_{TRF}$	256

La TBTP peut utiliser un numéro de PID fixe, ou un numéro de programme pour être trouvée. Si l'on considère ce dernier cas (équivalent à celui de la table INT), on a alors 28 octets de table PMT, et 4 octets dans la table PAT pour indiquer ce programme. La TBTP a un en-tête de 11 octets, une boucle sur les trames comprenant 3 octets et une boucle sur les *slots*, et un CRC de 4 octets. La boucle sur les *slots* est composée d'un bloc de 5 à 6 octets. Si l'on veut introduire la notion de PID par slot, on peut le faire à ce niveau en rajoutant un champ de 2 octets. Le débit offert au terminal est alors du nombre de *slots* qui lui est alloué, multiplié par la taille d'un *burst* en capacité utile (c'est-à-dire 4 paquets MPEG-2 TS), ramené à la durée d'une supertrame. Dans cet exemple un *slot* correspond alors à environ 4.62 Kb/s pour le terminal. Puisque l'on peut calculer le poids par *slot* avec (31), on en conclut ici à une utilisation par *slot* de 7.01 octets.

$$(31) \quad P_{Slot} = \frac{11}{n_{Slot}} + 3 \cdot \frac{n_{Trame}}{n_{Slot}} + 7$$

Si l'on considère le poids par slot ramené en b/s, on a la formule suivante (32), soit une valeur dans notre cas d'environ 43.18 b/s, pour un débit de 4.62 Kb/s. Pour un débit de 128 Kb/s sur sa voie retour, un terminal va utiliser ainsi sur sa voie aller environ 1.2 Kb/s, ce qui reste assez faible pour le débit de la voie aller.

$$(32) \quad P_{Slot/s} = \left( \frac{11}{n_{Slot}} + 3 \cdot \frac{n_{Trame}}{n_{Slot}} + 7 \right) \cdot \frac{8}{1.3} + \frac{28+4}{n_{Slot}} \cdot 10$$

D'une manière plus globale, sur une voie aller de 38 Mbit/s, on a une consommation, pour un transpondeur de 38 Mbit/s sur voie retour, de 354 Kb/s, soit environ 0.93% du débit total.

<sup>1</sup> Nous rappelons que les notations ont été introduites dans la Figure 2.13, page 38.

#### 5.2.3.3.3. CONCLUSION

Cette partie a montré l'influence assez faible du contrôle d'accès sur le poids de la signalisation. En effet un canal spécifique lui est réservé sur la voie retour. Ainsi seule la voie aller voit une faible part de son débit consommée par l'introduction de la table TBTP, de l'ordre de 0.93% de la capacité totale de la voie aller. Le système hybride, là encore, n'introduit aucune augmentation de la signalisation, le calcul restant valable dans le cadre transparent comme régénératif.

#### 5.2.3.4. *Le poids de la signalisation induite par la mise à jour des tables de commutation*

La mise à jour des tables de commutation, comme la résolution d'adresse, a une fréquence liée aux nouvelles communications, et aux changements de topologie. Ainsi les messages sont de nature ponctuelle. De plus, une partie de ces messages est liée au NCC qui utilise un canal réservé pour sa communication avec le satellite, et une autre partie se situe entre le NCC et les terminaux, et est le plus souvent couplée avec les messages d'AR, ou d'accès au système. Le poids des messages uniques de mise à jour des tables de communication est donc négligeable et n'influence en rien le débit du système. Comme pour l'AR, le problème est au niveau du délai requis par une mise à jour, c'est-à-dire du temps de réponse du système à un changement.

#### 5.2.3.5. *Conclusion sur le poids des messages de signalisation*

Nous avons vu dans cette partie que la signalisation nécessaire aux flux IP pouvait avoir de l'importance sur un système satellite, surtout sur le lien aller, où le DVB-S n'est pas toujours très adapté au support d'IP. Toutefois, l'utilisation d'agrégats de flux IP dans un seul PID permet de diminuer cette perte de ressources.

Ainsi, cette étude a permis de montrer que la signalisation des flux IP sur le système hybride n'engendrait pas un poids de signalisation supérieur identique à celui d'un système utilisant la méthode INT. Pour les flux émis par une *gateway*, cette signalisation est au maximum de 3%. Cette borne supérieure peut être diminuée par l'utilisation d'agrégation de flux, jusqu'à valoir 0.37% par flux. La voie retour induit plus de signalisation par son aspect dynamique, et cela sur la voie aller elle-même. Une constatation importante est que le système hybride n'introduit aucun ajout de signalisation sur le mode transparent qui n'est pas directement lié à ce mode, ainsi le système reste au minimum équivalent, en terme de signalisation, à un système DVB-S utilisant des solutions classiques.

### 5.2.4. Étude du temps de réponse du système en fonction de la répartition bord/sol des fonctionnalités du NCC

Nous avons pu constater dans la partie précédente qu'une partie de la signalisation est réactive aux changements dans le réseau. Aussi son poids ramené à une communication peut être considéré comme négligeable puisque lié à la vie d'une communication. En revanche, le temps de réponse de cette signalisation a une influence directe sur les performances du système. En effet, les messages qui ne sont pas périodiques représentent des changements de topologie (arrivée de nouvelles sources, de nouveaux membres de groupes, changement de la nature d'un flux) ou des demandes d'émission. On compte pour les flux IP trois messages de ce type :

- les requêtes d'accès principalement sur la voie retour : le flux n'est pas émis tant qu'une réponse, le plus souvent une attribution de *slots*, n'a pas été reçue ;
- les messages de résolution d'adresse MAC : ceux-ci sont les seuls à ne pas être centralisés par le NCC. Ils ne sont donc pas étudiés ici ;

- les demandes de PIDs : ces dernières sont souvent traitées de manière instantanée, notamment pour les *gateways*, ou en même temps que la connexion des terminaux, ou encore par le contrôle d'accès. Sans PID attribué, l'émission n'est pas possible ;
- la mise à jour des tables de commutation, sans cette dernière les flux ne sont pas aiguillés correctement. Aussi un flux unipoint n'est pas permis tant que ce changement n'est pas effectué, et l'attribution de PID est d'ailleurs effectuée en même temps, tandis que pour l'ajout d'un membre de groupes, cette modification influence le temps au bout duquel le nouveau membre reçoit les données du groupe.

Nous proposons dans cette partie d'étudier l'influence de la répartition bord/sol de certaines fonctionnalités du NCC, et d'observer comment le système hybride propose des perspectives intéressantes, même pour le système transparent. La gestion du système étant principalement du ressort du NCC, la répartition de ses fonctionnalités est alors un élément clef de l'optimisation du temps de réponse du système. Positionnée traditionnellement dans une *gateway* (ou quelquefois encore dans une entité dédiée), le NCC a une relation étroite avec le système satellite, si bien qu'il apparaît comme une solution envisagée dans les systèmes à intelligence embarquée d'intégrer certaines fonctionnalités du NCC à bord.

Cette partie abordera cela en analysant l'influence successive de la répartition bord/sol de l'allocation de ressources (5.2.4.1), de l'attribution des PIDs (5.2.4.2) et de la gestion des tables de commutation (5.2.4.3). La section 5.2.4.4 conclura cette partie.

#### 5.2.4.1. L'allocation de ressources

Pour la voie aller, la méthode la plus simple pour le contrôle d'accès est d'attribuer les fonctionnalités du NCC à chaque *gateway*. Si dans le cadre transparent, cette politique est naturelle, dans le cadre régénératif, cela peut poser quelques problèmes dont notamment le dimensionnement de la charge utile embarquée pour qu'il n'y ait pas de conflit avec les autres flux des différentes *gateways* et des RCST utilisant le mode régénératif. De plus cette méthode implique une perte potentielle de bande passante. Toutefois pour la gestion de l'allocation des ressources, elle reste conforme au DVB-S, et est instantanée. C'est la méthode choisie ici.

Pour le contrôle d'accès en DVB-RCS, on peut considérer que le temps de réponse correspond au temps d'accès au NCC, via un canal à contention, ajouté au délai entre le RCST et le NCC, au temps d'établissement de la TBTP ( $v$ ) et au délai retour, ce qui peut s'exprimer sous la forme<sup>1</sup> :

$$(33) \quad T_{\text{Accès}} = T_{\text{Aloha}} + RTT_{\text{NCC}} + v(T_{\text{ST}})$$

Nous avons déjà parlé précédemment du problème de la méthode d'accès (cf. 5.2.1). Le temps d'accès au support à contention fait partie de ce problème ( $T_{\text{Aloha}}$ ). Toutefois, nous resterons conforme à notre discussion précédente et ne le prendront pas en compte.

Si l'on note  $T_{\text{min}}$ , le temps minimum requis pour qu'à l'arrivée d'une requête à la NCC, ce dernier ait le temps de l'intégrer dans le calcul de la prochaine TBTP, on a alors un temps d'accès pouvant varier entre  $RTT + T_{\text{min}}$  et le  $RTT + T_{\text{min}} + 1.3 \text{ s}$ .

Dans le cas idéal où  $T_{\text{min}}$  est négligeable, une rapide analyse permet de conclure que l'intégration de la fonctionnalité d'allocation de ressources dans l'OBP peut entraîner une diminution du délai de 14% à 50%. Dans le cas où  $T_{\text{min}}$  n'est plus négligeable, il y a toujours un gain, mais un peu moindre.

---

<sup>1</sup> Ici  $v$  est une fonction du temps d'établissement d'un TBTP, directement liée à la période d'une supertrame,  $T_{\text{ST}}$  (comme nous l'avons vu dans la partie 5.2.3.3)

Le temps de réponse du système est amélioré par l'intégration des fonctions de contrôle d'accès à bord. Il faut noter cependant que ces fonctions peuvent être lourdes à mettre en oeuvre, comme notamment l'algorithme de DAMA, et donc augmente le prix de la charge utile du système.

L'architecture hybride offre donc la possibilité d'intégrer les fonctionnalités d'allocations de ressource dans son mode OBP. Cette solution permet de gagner en temps de réponse pour le mode régénératif sur la voie retour, mais aussi de faire passer le contrôle d'accès de la voie retour transparente par ce mode, gagnant alors sur les deux fronts.

#### **5.2.4.2. L'attribution du PID**

Dans cette partie nous discutons de la fonctionnalité d'attribution du PID.

Pour les *gateways*, si ce sont elles-mêmes qui gèrent cette attribution, comme dans le cas de cette proposition, ce temps est nul.

Pour les RCSTs, cette attribution est faite à la demande d'allocation de ressources, si besoins. La dissociation de ces deux fonctionnalités du NCC (allocation de ressources et attribution de PIDs) est malvenue et rajoute un temps supplémentaire. L'attribution du PID a donc tout intérêt à se faire en même temps que l'attribution des *slots*, en donnant par exemple dans la table TBTP le PID à utiliser.

#### **5.2.4.3. La mise à jour de la table de commutation**

Ce dernier mécanisme est lié à la distribution de nouveaux PIDs, comme à l'ajout d'un nouveau *spot* desservi par un groupe *multicast*. Ainsi dès qu'un changement est noté, le NCC doit mettre à jour la table de commutation. Si cette fonctionnalité est intégrée dans chaque *gateway*, cette technique peut poser un problème réel de sécurité, et une entité de contrôle doit être mise en place à bord.

Si le NCC est situé dans l'OBP, pour le lien retour aucun délai supplémentaire n'est introduit, le délai est lui inévitable pour les *gateways*, qui doivent de toute manière contacter le satellite si elles utilisent un nouveau PID. Toutefois cette méthode permet de décharger l'OBP d'un surplus de fonctionnalités. De plus les *gateways* peuvent profiter de l'envoi de leur premières données pour envoyer cette information à l'OBPC.

#### **5.2.4.4. Conclusion**

L'attribution d'un PID et le contrôle d'accès ne semblent pas pouvoir être dissociés. Le tableau suivant (Tableau IX) montre que l'intégration de certaines fonctionnalités du NCC dans l'OBP améliore le temps de réponse du système notamment pour la voie retour. On peut noter que la mise en oeuvre au niveau des *gateways* est la meilleure solution pour le lien aller. Dans tous les cas, l'utilisation d'un système dédié uniquement au NCC n'est pas la solution : autant répartir ces fonctionnalités dans des *gateways*.

La solution hybride présente la perspective d'intégrer un certain nombre de fonctionnalités du NCC à bord, grâce à son mode régénératif. Si cet élément n'est pas prévu dans un premier temps dans le système étudié présentement, il est possible de le réaliser dès que les technologies seront suffisamment mûres et abordables sur ce point. En effet l'approche hybride propose de ne pas figer le débat sur un système, en proposant une architecture incrémentale.

On peut enfin noter que l'utilisation du mode régénératif pour la signalisation de la voie retour transparente peut apporter une amélioration notable des performances du système transparent. En effet, le système hybride propose, en agrégeant l'allocation de ressources avec l'attribution de PID et la mise à jour des tables de commutations, de réduire le nombre de bonds satellites, et donc d'améliorer le temps de réponse global du système.

Tableau IX. L'INFLUENCE DE LA RÉPARTITION BORD/SOL SUR LA RÉACTIVITÉ DU SYSTÈME

	TRANSPARENT			RÉGÉNÉRATIF					
	LIEN RETOUR			LIEN ALLER			LIEN RETOUR		
	Contrôle Accès	Attribution PID	Table de commutation	Contrôle Accès	Attribution PID	Table de commutation	Contrôle Accès	Attribution PID	Table de commutation
ENTITÉ DEDIEÉE	0.5 à 2.3 s	0.5 à 1 s	-	500 ms	500 ms	625 ms	0.5 à 1.8 s	500 ms	125 ms
GATEWAY	0.5 à 1.8 s	0.5 s	-	0 s	0 s	125 ms	0.5 à 1.8 s	500 ms	125 ms
OBP	0.25 à 1.45 s	0.25 s	-	250 ms	250 ms	125 ms	0.25 à 1.45 s	250 ms	125 ms
Tout OBP	0.25 à 1.45 s		-	250	+0	+0 ms	(0.25,1.45)	+0	+0 s

### 5.2.5. Conclusion sur la signalisation de l'architecture hybride

Au travers de cette étude, nous avons pu montrer comment l'architecture hybride n'introduit pas une gestion plus lourde en termes de messages de signalisation qu'une solution classique utilisant la méthode INT. De plus l'utilisation d'une encapsulation adaptée reposant sur ULE permet au système de proposer un faible *overhead* dû à l'encapsulation. Au niveau de la signalisation, l'architecture introduit une perte de débit aller de l'ordre de 1% à 3%, perte qui n'a rien de spécifique au système hybride et reste semblable à tout système DVB. Enfin le système hybride offre des perspectives intéressantes quant à l'amélioration du temps de réponse du système dans la mise en place de nouvelles communications.

Cette solution n'est pas plus lourde qu'une autre solution DVB, et le mode régénératif n'a aucun impact négatif sur le système transparent. Un souci particulier a donc été porté sur une signalisation légère, proposant même d'alléger les échanges au sol en introduisant une gestion à bord du satellite d'un certain nombre de fonctionnalités.

### 5.3. Le niveau réseau

Une fois le niveau liaison étudié et sa spécificité à IP analysée, le niveau 3 peut être considéré ici. Cette partie propose d'observer l'apport IP d'un point de vue fonctionnel, et donc nécessairement qualitatif.

Dans cette étude, IP se positionne comme un élément fondamental de l'architecture grâce à ses deux forces : sa nature fédératrice et sa souplesse.

IP est un élément fédérateur par essence. Son historique et sa mise en œuvre universelle lui permettent de se placer comme un passage incontournable pour l'interconnexion de réseaux différents et pour le déploiement d'applications. IP est capable de véhiculer tout type de données, certes avec plus ou moins de succès. Ainsi, même après des années de controverse sur les limites d'IPv4, il reste au cœur des solutions actuelles. Malgré les difficultés envisagées, la VoIP s'installe peu à peu sur le marché<sup>1</sup>, et le *triple play* connaît un grand succès avec les offres de Free, de France Télécom, du Neuf, etc... Il en va de même avec les propositions d'architecture de QoS ou de la mise en œuvre de la sécurité.

<sup>1</sup> On peut par exemple noter le service Skype™ gratuit qui offre pour un débit symétrique de 40 à 50 Kb/s une qualité surprenante.

L'architecture hybride profite de ce pouvoir fédérateur pour intégrer naturellement différents services. De plus, comme il s'agit d'un cadre restreint, on peut facilement envisager des architectures à QoS telles que du routage à QoS, de l'IntServ, du DiffServ, *etc...* Ainsi, il sera possible de tirer plus aisément profit de la nature hybride de cette architecture.

IP est un protocole ouvert et souple, capable de s'adapter à n'importe quel support puisqu'il ne demande presque rien aux niveaux inférieurs, si cela n'est de pouvoir véhiculer des datagrammes. Nous avons pu constater dans cette étude que cela pouvait impliquer plus ou moins d'adaptations des niveaux inférieurs, mais qu'au final, cela fonctionnait et des optimisations étaient même possibles. Cette souplesse permet à IP d'être adaptable à des changements au niveau des couches basses. Dans ce cadre, des idées comme celles proposées par BSM consiste à construire une interface standard à IP pour tous les systèmes satellites.

Il semble alors cohérent de pousser cette démarche jusqu'à proposer une interface IP standard à l'utilisateur, en intégrant directement le niveau IP dans l'architecture.

Il faut noter que le lien entre le niveau 3 et 2 a été créé de telle sorte qu'il laisse le champ libre à la cohabitation entre des flux IP et des flux natifs, MPEG-2 TS. En effet, notre proposition garde la signalisation DVB-SI, même pour les flux IP, permettant aux RCSTs de recevoir les deux types de flux. Cette solution serait appréciable notamment dans le cadre de services de VoD.

### 5.3.1. IP et son économie

La solution IP présente une économie intéressante : celle d'utiliser des technologies éprouvées pour des systèmes de nature spécifique, comme les systèmes embarqués par exemple, en évitant les difficultés posées par les systèmes propriétaires. Cette démarche s'inscrit dans une tendance actuelle du monde industriel pour l'intégration de composants sur l'étagère dans des systèmes propriétaires.

C'est le cas de projets du monde satellite comme DIPCAST avec son brasseur ATM, mais aussi des réseaux embarqués comme l'A380 et son utilisation d'Ethernet pour l'AFDX (Avionics Full Duplex) [125].

### 5.3.2. Conclusion sur le niveau 3

L'intégration d'IP en tant qu'élément fédérateur de l'architecture hybride permet à cette dernière de profiter des capacités d'IP pour intégrer différents services, comme pour s'adapter aux couches inférieures. Cette souplesse permet à cette proposition de se positionner comme une solution capable de supporter, avec plus ou moins de qualité, les services supportés par IP, proposant par là même une certaine pérennité.

D'un autre point de vue, l'architecture a été conçue avec un certain nombre de perspectives, qui permettent notamment d'intégrer des évolutions futures comme IPv6 (avec l'utilisation de ULE), et l'intégration d'un routeur à bord. Elle prévoit donc des évolutions potentielles d'IP pour rester adaptées aux trafics futurs.

## 5.4. L'accès Internet

La mise en œuvre d'IP sur satellite conduit naturellement au service d'accès Internet sur satellite. Mais ce service est aussi le premier service à poser problème sur satellite. D'une part le lien retour peut avoir un impact sur l'interactivité du système, et d'autre part le protocole TCP n'est pas adapté au support sans fil et notamment le satellite (cf. 3.5.1).

S'il est un fait que le satellite n'offre pas les mêmes performances que les réseaux terrestres hauts débits, il est intéressant de savoir jusqu'à quel point son comportement est différent. Cette partie a alors un double objectif : valider les architectures de services proposées dans la partie 4.1.2.3, en montrant que même sans modification, le satellite peut être un support plus



performant qu'un accès bas débit terrestre pour Internet, et observer comment le système hybride vient s'inscrire, en jouant de sa flexibilité, dans l'intégration de ce service.

Cette partie sera donc découpée en cinq sections.

Après quelques mots sur la représentation du trafic Internet et de notre approche ici (5.4.1), nous étudierons l'accès Internet satellite dit classique dans la section 5.4.2. Ce service regroupe les utilisations les plus communes de l'accès Internet (*navigation web*, FTP, *mail*), à caractère grandement asymétrique. Cette partie argumentera sur le choix d'une architecture de service avec un lien retour terrestre.

La section 5.4.3 présente l'étude de l'architecture pressentie pour le service d'accès Internet que nous avons appelé ici évolué dans la mesure où il considère des applications plus récentes, aux échanges plus symétriques, comme le P2P. Nous étudierons dans cette partie l'intérêt d'une topologie à voie retour satellite.

Les parties 5.4.2 et 5.4.3 permettent de montrer l'intérêt de certaines architectures de service, comme du satellite hybride pour pouvoir limiter grâce aux *multi-spots* le gaspillage de ressources. Toutefois, les performances du système ne sont pas toujours les meilleures, notamment à cause du mauvais comportement de TCP sur satellite. Cette partie proposera d'observer quelles influences peuvent avoir différentes versions de TCP sur un lien satellite, et surtout d'intégrer la solution de PEP à notre architecture pour permettre d'assurer au système de meilleures performances tout en respectant la transparence.

Enfin la partie 5.4.4 conclura cette étude, montrant comment le système hybride peut profiter des solutions PEPs pour permettre un accès haut débit, sans contraintes sur les utilisateurs finals, et totalement conforme aux principes de normalisation déjà abordés dans les parties 2, 3 et 4.

### 5.4.1. Représentation du trafic Internet

Il est délicat de modéliser le trafic Internet, même d'un seul utilisateur, car à la différence des trafics conventionnels tels que ceux induits par les communications téléphoniques, ce trafic échappe au réseau lui-même et dépend principalement des applications utilisées par les utilisateurs finals [126][127]. Or les applications évoluent très rapidement et se disséminent à une grande vitesse sur le *web*. L'évaluation de l'accès à Internet est d'autant plus difficile que la caractérisation précise du trafic Internet dépend aussi du routage entre différents réseaux, de l'état de ces réseaux et du partage des ressources. Le lien entre le trafic utilisateur, les performances du réseau et la perception de ces performances par l'utilisateur reste encore une question. Dans ce cadre, des études plus globales ont réussi à montrer l'autosimilarité du trafic Internet [128] en analysant des traces de nombreux trafics sur des liens de *backbone*.

Dans notre étude les limitations du trafic utilisateur dû au réseau Internet ne nous concerne pas : il s'agit d'offrir un accès suffisant à l'utilisateur pour qu'il ne soit pas bridé par ce dernier, mais par les limites inhérentes à Internet. L'étude se fera donc en ne considérant uniquement l'architecture hybride.

### 5.4.2. Accès Internet standard

La première topologie proposée dans la partie 4.1.2.3.1 se propose comme solution pour l'accès Internet que nous qualifions ici de « standard », proposant un support à des applications largement asymétriques. Cette asymétrie entre le trafic aller et le trafic retour peut être fixée pour des applications de type *web* et *email* à un *ratio* d'environ 6 pour 1 [26]. Un réseau satellite unidirectionnel, utilisant un lien retour de 28.8 kb/s, contre un lien aller de 512 kb/s, offre un *ratio* d'environ 17.8. Un tel rapport peut donc poser problème.

Nous nous proposons ici d'étudier ce service, en insistant dans un premier temps sur une comparaison avec les réseaux terrestres (5.4.2.1). Cette étude sera d'ailleurs l'occasion de prendre en compte pour la première fois le modèle de pertes présenté dans la partie 5.1.3.2.

La section 5.4.2.2 proposera une approche en fonction du lien retour. Ici nous pourrons observer le phénomène de congestion des acquittements qui est un facteur limitant important de ce type architecture de service.

La section 5.4.2.3 propose une étude de l'intérêt d'un système régénératif dans le cadre de ce service. Nous verrons ainsi qu'il peut être intéressant d'utiliser du *multi-spots* pour économiser la bande passante, et donc que le concept d'hybride à sa place ici.

La conclusion de cette partie sera traitée dans la conclusion dans la partie 5.4.4.

### 5.4.2.1. Une comparaison au réseau terrestre

Cette comparaison avec le réseau terrestre s'effectuera en trois temps : une première comparaison avec un modèle très simple, une seconde prenant en compte les pertes et une dernière sur la réactivité du système dans le cadre d'une navigation *web*.

#### 5.4.2.1.1. UNE PREMIÈRE COMPARAISON

Dans un premier temps, une courte étude propose de comparer le service d'accès Internet via une liaison terrestre avec un lien asymétrique satellite/terrestre. L'outil de comparaison est la simulation sous NS 2 [129], et le réseau est modélisé comme suit (Figure 5.8).

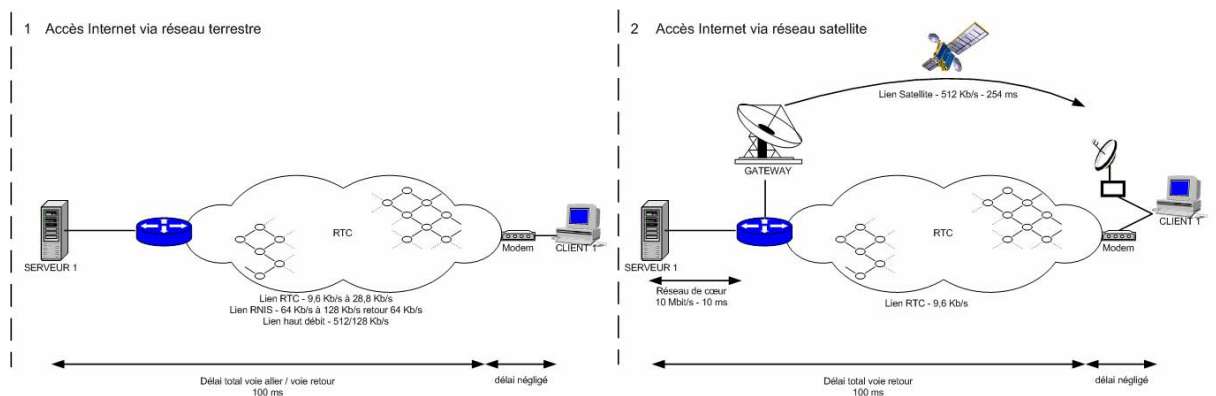


Figure 5.8 Scénario de comparaison entre un accès Internet via une connexion terrestre et le même service via un système satellite unidirectionnel

Dans cette comparaison, on notera que pour le lien retour, le délai considéré est de 100 ms, puisque cette valeur nous semble représenter le délai moyen d'une communication client/serveur sur le réseau Internet [42]. Nous considérons le débit du réseau d'accès comme le débit limitant ; il est donc utilisé pour la communication de bout en bout. Dans le cas satellite, le délai du serveur à la *gateway* est de 10 ms, le délai satellite de 254 ms, et le délai engendré par l'accès au médium dans ce sens est négligé. Dans un premier temps la communication est effectuée par temps clair. Toutes les pertes ponctuelles du canal physique satellitaire sont considérées comme corrigées par les FEC. La figure suivante propose un aperçu des résultats obtenus (Figure 5.9).

Cette comparaison montre dans un premier temps la supériorité des réseaux hauts débits terrestres pour l'accès Internet. Toutefois pour les longs transferts, le délai devient moins sensible, et les performances du système satellite se rapprochent de celles d'un accès haut débit comme l'ADSL. Par contre, la comparaison avec un lien bas débit, et notamment RTC, fait ressortir le lien unidirectionnel asymétrique comme une alternative intéressante.

Toutefois deux points viennent nuancer cette première analyse :

- Le trafic dit standard est plutôt constitué de petits messages comme des pages *web*, des *mails*, etc... C'est donc la réactivité du système pour les petits paquets qui est en jeu. Dans ce cadre, on remarque que le satellite est le moins performant, pour des données de très faibles tailles (moins de 1 KB), voire en dessous d'une liaison 9.6/9.6 Kb/s. Cette comparaison pourrait être poussée en étudiant une navigation *web*, utilisant le protocole http.
- Le satellite est un média avec un BER bien plus élevé que les réseaux terrestres classiques. Or, cette comparaison n'a pris en compte ce facteur.

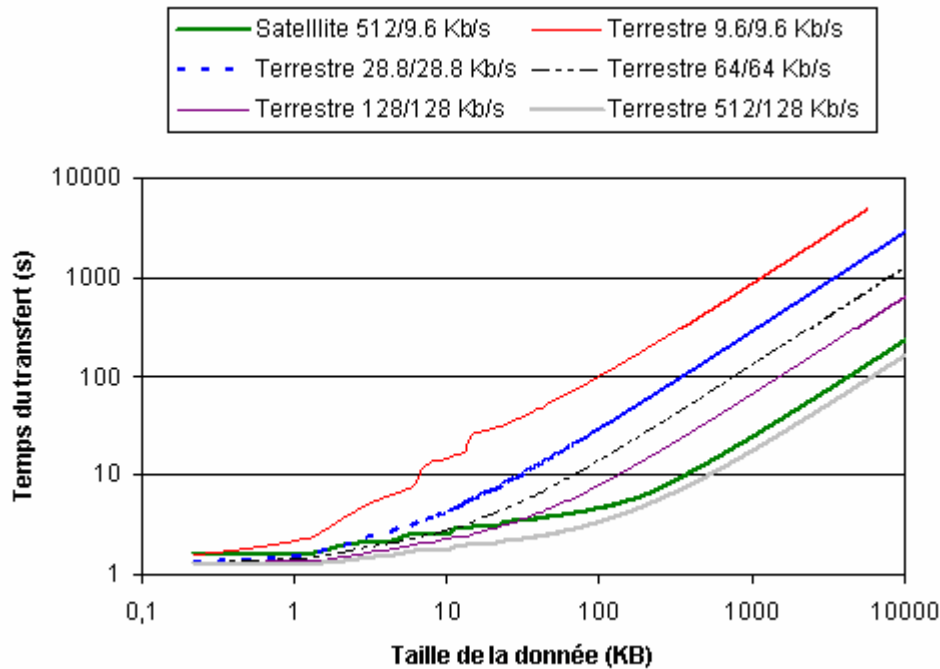


Figure 5.9 Observation du délai d'un transfert FTP en fonction de la technologie d'accès à Internet

#### 5.4.2.1.2. L'INTRODUCTION DE PERTES DANS LA COMPARAISON

Nous proposons ici d'observer d'abord une étude avec une modélisation par pertes uniformément réparties et une autre par pertes en rafales.

##### 5.4.2.1.2.1. Modélisation de type Bernoulli

Dans un premier temps nous avons ajouté au lien satellite une loi de perte au niveau paquet de type Bernoulli, tel que le PLR soit de  $10^{-3}$ . La loi proposée dans [130] donne déjà une valeur maximale pour le trafic d'environ 106 paquets à la seconde (34)<sup>1</sup>, soit un total de 1.24 Mb/s pour des paquets de MSS 1460 octets.

$$(34) \quad B(PLR) = \frac{1}{RTT} \times \sqrt{\frac{3}{2 \cdot PLR}}$$

Avec un lien satellite de 512 Kb/s, ce débit ne peut être atteint. Mais cette expression ne prend pas en compte l'asymétrie du lien, tant au niveau débit que différence de PLR. Nous avons donc réalisé une simulation calculant l'espérance du débit utile maximale au niveau applicatif pour un PLR de 0, de  $10^{-3}$  et de  $10^{-2}$ , avec une seule connexion TCP. L'étude repose sur un seul

<sup>1</sup> On note ici B, le débit en paquets par seconde.

transfert FTP d'une durée comprise entre 50 à 5000 secondes et utilisant le débit maximal offert par la connexion au FAI. On peut comparer cet accès en fonction de la version de TCP utilisée et de la durée du transfert (Tableau X).

Tableau X. COMPARAISON DU DÉBIT MOYEN OBSERVÉ SUR UN TRANSFERT FTP EN FONCTION DE LA DURÉE D'OBSERVATION – MODÈLE D'ERREUR UNIFORMÉMENT RÉPARTIE

		Satellite unidirectionnel							
		Ss Perte		PLR 10 <sup>-4</sup>		PLR 10 <sup>-3</sup>		PLR 10 <sup>-2</sup>	
		RENO	NEW RENO	RENO	NEW RENO	RENO	NEW RENO	RENO	NEW RENO
Débit moyen applicatif en Kb/s pour	10 s	382.8	382.8	382.8	382.8	382.8	382.8	362.08	362.08
	50 s	477.2	477.2	477.2	477.2	458.85	458.85	295.09	308.45
	200 s	493.14	493.14	493.14	493.14	484.57	487.57	242.52	266.88
	1000 s	497.31	497.31	496.7	496.7	484.91	485.86	274.94	289.9
	5000 s	498.14	498.14	497.41	497.41	485.27	487.29	283.95	297.37

On observe ici différents éléments. D'une part, plus le temps du transfert est important, plus le débit offert à l'application devient stable, sauf dans le cas d'un taux de perte trop élevé. D'autre part, les débits proposés, même pour 10 secondes de transfert dans des conditions très bruitées, restent supérieurs à ceux d'une connexion RNIS 64 Kb/s ou 128 Kb/s. Enfin on peut noter avec ce tableau la légère amélioration que peut apporter TCP NewReno comparé à TCP Reno, surtout quand il y a beaucoup d'erreurs. Dans le dernier cas, on peut remarquer un meilleur débit pour 10 secondes de transfert. L'explication est ici assez simple : vu le faible taux de pertes, il n'y a pas eu beaucoup de pertes sur ce court temps. A partir d'une certaine durée de transfert, le support satellite unidirectionnel est donc plus intéressant qu'un lien terrestre bas débit, même de type Numéris.

Tableau XI. COMPARAISON DU DÉBIT MOYEN OBSERVÉ SUR UN TRANSFERT FTP EN FONCTION DE LA DURÉE D'OBSERVATION – MODÈLE D'ERREUR À DEUX ÉTATS

		Satellite unidirectionnel							
		Ss Perte		PLR 10 <sup>-4</sup>		PLR 10 <sup>-3</sup>		PLR 10 <sup>-2</sup>	
		RENO	NEW RENO	RENO	NEW RENO	RENO	NEW RENO	RENO	NEW RENO
Débit moyen applicatif en Kb/s pour	10 s	382.8	382.8	382.8	382.8	382.8	382.8	382.8	382.8
	50 s	477.2	477.2	477.2	477.2	477.2	477.2	317.74	429.78
	200 s	493.14	493.14	483.99	476.88	483.99	476.88	361.84	420.19
	1000 s	497.31	497.31	495.08	493.67	486.29	489.17	346.25	413.21
	5000 s	498.14	498.14	496.62	496.68	483.49	490.58	316.15	357.1

5.4.2.1.2.2. Modélisation de type Gilbert

Toutefois, le modèle d'erreur utilisé ici n'est pas très réaliste. Le modèle proposé dans la partie 5.1.3.2 est donc utilisé ici pour avoir une idée de l'impact de pertes en rafale sur le service.

Dans ce cadre, les simulations ont été réalisées en prenant successivement un PLR de  $10^{-4}$ , de  $10^{-3}$  et de  $10^{-2}$ , tout en gardant des rafales de même taille en moyenne (4 paquets), soit une valeur de  $q$  égale à 0.25 (Tableau XI).

L'observation reste dans les grandes lignes la même que précédemment. Toutefois on peut noter que les pertes en rafales ont une influence moindre sur le transfert que les pertes uniformément réparties : le débit est dans l'ensemble plutôt meilleur. Ce principe vient du fait que pour une seule erreur, TCP tend à considérer une rafale d'erreur, entraînant la réémission d'un grand nombre de données déjà reçues. Lors de rafales, TCP se comporte de la même manière, or le modèle de rafales peut introduire une perte de plus de 10 paquets consécutifs (Figure 5.10). Ainsi à un même taux de pertes global, TCP se comporte mieux sur un médium où les pertes de paquets se produisent en rafales, car les réémissions se font de manière plus efficace.

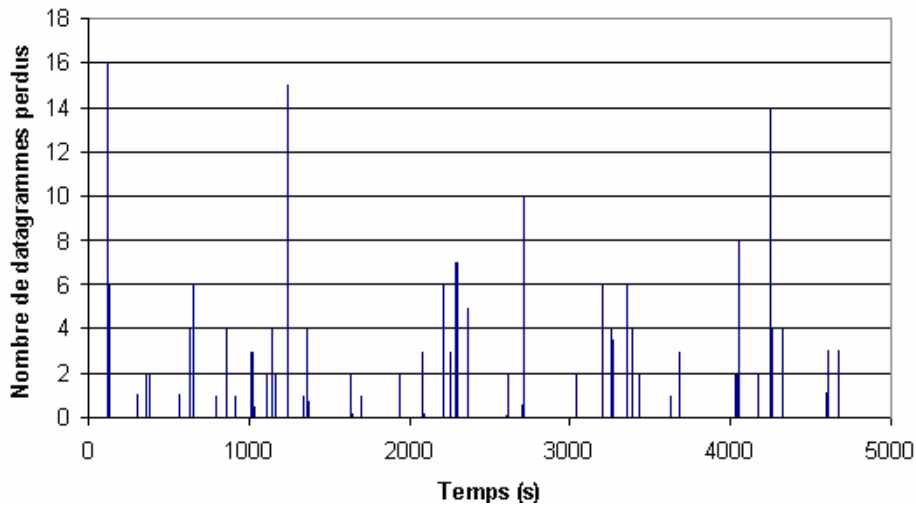


Figure 5.10 Exemple de pertes en rafale pour un PLR de  $10^{-3}$  avec le modèle de Gilbert

5.4.2.1.2.3. Conclusion

L'introduction de pertes dans la modélisation baisse certes les performances du système, mais celles-ci restent supérieures aux réseaux bas débit. De plus, les pertes de type rafale sont mieux supportées par les applications de type FTP. Pour la suite de cette étude, nous utiliserons alors, quand cela est nécessaire, le modèle à deux états pour représenter les pertes.

Ce type d'architecture de service est donc envisageable dans le cadre du système hybride.

5.4.2.1.3. UNE COMPARAISON REPOSANT SUR LE PROTOCOLE HTTP

Une troisième étude menée dans ce cadre repose sur le protocole HTTP. Avec un profil d'utilisateur identique dans chaque cas, nous proposons d'observer le nombre de pages consultées pendant une période de consultation d'un quart d'heure, soit 900 s. L'étude reprend la topologie présentée précédemment. Nous comparons ici un accès unidirectionnel satellite avec retour terrestre à différents accès terrestres. L'étude satellite utilise le modèle d'erreur en rafale présenté précédemment, avec un PLR de  $10^{-3}$ . Le comportement de l'utilisateur est modélisé par un intervalle entre deux requêtes suivant une loi de Poisson, de moyenne 5 s (après que la précédente requête ait été traitée). La répartition des tailles de pages *web* suit une loi exponentielle dont la variation de la moyenne est un critère d'étude ici. Les résultats (Figure 5.11) sont obtenus via la méthode du *batch mean*, soit une moyenne sur 100 blocs de 900 secondes. Pour un quart

d'heure, nous considérons les résultats suffisamment décorrélés. Les simulations ont été réalisées sous NS 2.

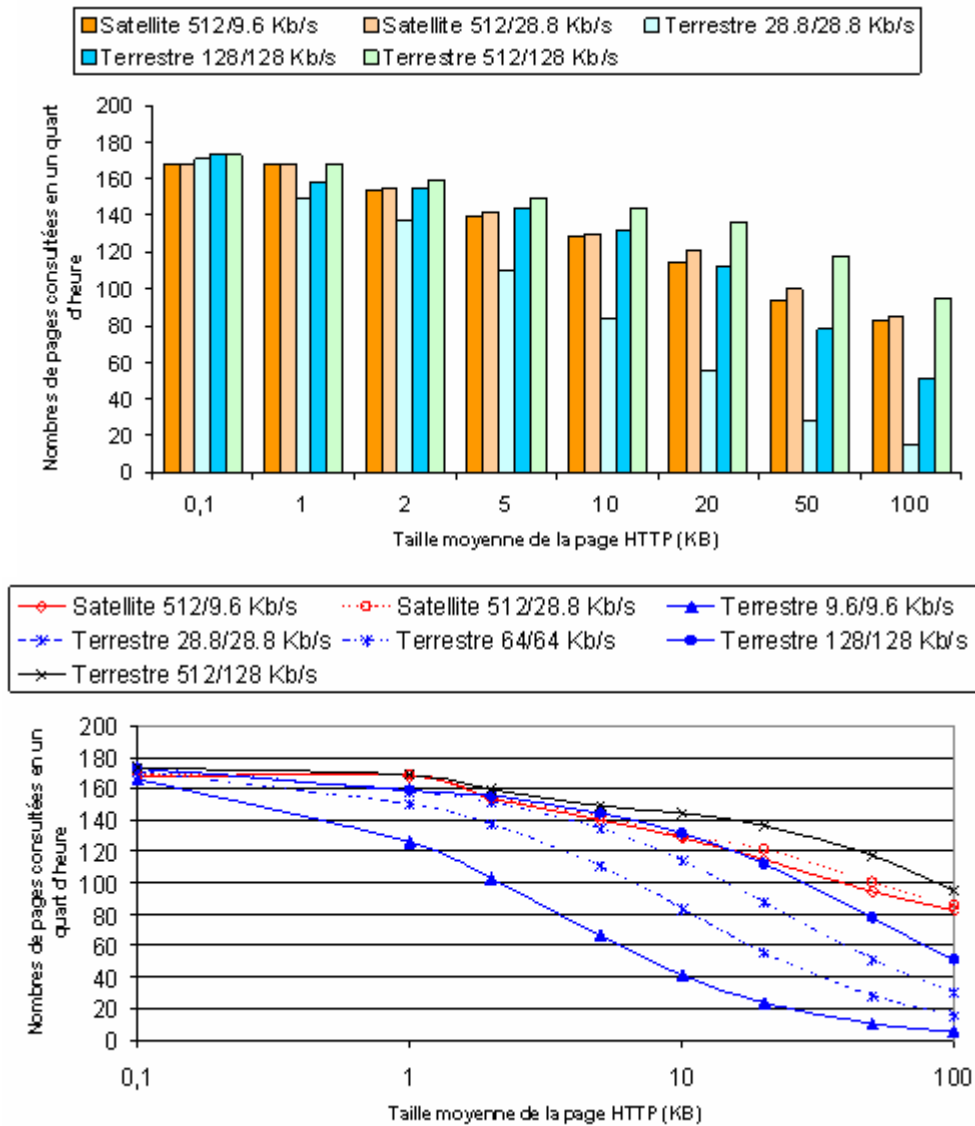


Figure 5.11 Évolution du nombre de pages http consultées en un quart d'heure en fonction de la taille moyenne de ces pages

Les figures ci-dessus représentent cette évolution. On peut constater que la réactivité d'un accès satellite unidirectionnel, contrairement aux *a priori*, est presque comparable à celle d'un accès ADSL. En effet si l'on considère que la taille moyenne des pages web sont de 50 KB [130], en un quart d'heure un utilisateur accédant à Internet via un système satellite unidirectionnel, aura consulté en moyenne 94.1 pages (retour 9.6 Kb/s), contre à 117,5 pour un accès ADSL. De plus on peut noter que, mis à part pour des pages en moyenne très petites, l'accès par satellite unidirectionnel a de très bonnes performances. Pour des pages de tailles importantes, il dépasse de loin les accès terrestres bas débit, tous types confondus. L'évolution de la courbe montre comment le débit du lien influence plus directement la navigation *web* estompant l'impact du délai, quand les pages ont une tendance à être importantes.

La navigation *web* sur un accès satellite unidirectionnel propose des performances satisfaisantes, pouvant avoir un gain sur un accès très bas débit de l'ordre de 900 % pour des pages en moyenne de 50 KB.

## 5.4.2.1.4. CONCLUSION

Ces premières études permettent de conclure positivement sur le support d'un service d'accès par satellite. L'architecture proposée pour l'accès Internet standard est une solution meilleure que les solutions de type terrestre disponibles dans des zones isolées.

5.4.2.2. *L'influence du lien retour*

Nous avons validé précédemment cette architecture de service comparativement aux accès terrestres. Toutefois, comme nous l'avons noté précédemment, un lien retour modem est susceptible de poser problème, même pour un trafic asymétrique. Une solution purement satellite peut-elle être meilleure ?

Nous proposons dans un premier temps d'observer l'impact de la nature du lien retour dans la section 5.4.2.2.1, puis d'observer comment un lien terrestre est une solution plus adaptée au service d'accès Internet standard, avec notamment l'étude d'une consultation de pages *web* (5.4.2.2.2). Enfin la section 5.4.2.2.3 conclura cette étude.

Dans ce cadre nous avons réalisé plusieurs expériences sous NS 2 mettant en jeu un utilisateur connecté à Internet via le système hybride sur la voie aller, et une connexion terrestre sur la voie retour. Nous considérons un client avec un débit aller garanti à 512 Kb/s, la signalisation étant négligeable. La figure suivante (Figure 5.12) trace l'évolution de trois *ratios* entre les délais nécessaires pour véhiculer une donnée en fonction de la taille de cette donnée. Parce qu'il est question d'une comparaison entre plusieurs liens satellite, l'étude est effectuée sans l'introduction d'un modèle de pertes.

## 5.4.2.2.1. UNE COMPARAISON SUR UN TRANSFERT FTP

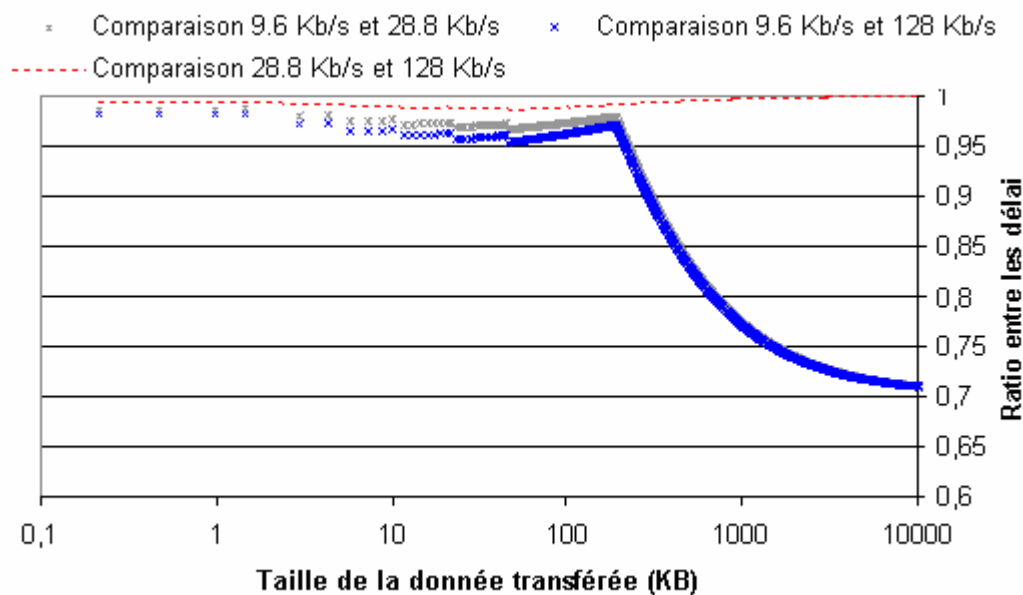


Figure 5.12 Comparaison de l'évolution du délai requis pour télécharger un fichier via FTP en fonction du débit offert par le lien retour pour un lien aller de 512 Kb/s

Mis à part pour un lien retour de 9.6 Kb/s, ce tracé montre que, l'impact du lien retour est peu notable pour un lien aller de 512 Kb/s. En revanche pour un lien retour de 9.6 Kb/s, on peut émettre 1 acquittement de 40 B toutes les 33.3 ms, soit un débit maximal sur le lien aller d'environ 350.4 Kb/s au niveau applicatif. Pour un débit retour de 28.8 Kb/s, le débit maximal aller est atteint. Pour un débit aller plus élevé, la congestion des acquittements sur le lien retour est réelle, et donc ce *ratio* devient bien plus significatif. Cependant dans le cadre d'une connexion

de type standard, il ne semble pas envisageable d'utiliser un lien aller satellite de 2 Mb/s, avec un lien retour terrestre de 9.6 Kb/s.

#### 5.4.2.2.2. UNE COMPARAISON SUR UNE CONSULTATION DE PAGES WEB

D'un autre point de vue, le lien terrestre offre généralement un meilleur temps de réponse, comparativement au lien retour satellite. Ainsi pour une seule navigation *web*, le transfert d'un fichier http de 50 KB<sup>1</sup> demande la transmission de 35 segments TCP de MSS 1460 B. La communication s'établit alors selon la poignée de main classique de TCP :

- le client demande l'ouverture d'une connexion TCP avec le serveur via un SYN. Posons alors  $T_{SYN}$  le temps d'émission du SYN sur le lien retour.
- le serveur émet l'acquiescement du SYN (SYNACK), soit  $T_{SYNACK}$  le temps d'émission du SYNACK sur le lien aller.
- le client acquiesce l'ouverture de connexion en envoyant un ACK au serveur. Soit  $T_A$  le temps d'émission d'un ACK sur le lien retour.

Une fois la connexion TCP ouverte, avec un temps total noté  $T_{Connexion}$ , le client peut entamer sa requête HTTP :

- le client envoie un GET au serveur. Nous noterons  $T_{GET}$  le temps requis à l'émission du GET sur le lien retour ;
- le serveur répond en envoyant le premier segment, noté  $S_1$ , avec un temps d'émission  $T_{S1}$  ;
- à la réception du segment, le client renvoie un ACK ;
- à chaque réception d'ACK par le serveur, deux nouveaux segments sont envoyés par ce dernier, jusqu'au dernier segment ;
- à la fin de la communication, le serveur clos la connexion.

Dans le cadre de cette étude, nous considérons qu'il n'y a aucune perte sur le transfert. Nous notons  $T_{SA}$ , le délai introduit par le temps de propagation du serveur au client, et sur  $T_{CR}$ , le délai sur le lien retour. La figure suivante<sup>2</sup> (Figure 5.13) résume ces premières considérations. Le débit des liens est pris constant, ainsi que le délai.

Pour pouvoir calculer la durée totale d'une communication HTTP, il faut s'assurer que la pause est bien supérieure à 0 (Figure 5.13), soit :

$$(35) \quad \sum_{i=0}^n T_{S(i+k)} \leq T_{S1} + T_{SA} + T_{ACK} + T_{CR}$$

Dans le cas où le MSS est constant, le dernier segment pouvant être à la limite plus court, cela donne la majoration suivante :

$$(36) \quad n.T_S \leq T_S + T_{SA} + T_{ACK} + T_{CR}$$

Pour des acquiescements de 40 B, des datagrammes de 1500 B, on obtient alors une valeur de  $n$  pour le cas unidirectionnel de 17 segments, et de 23 segments dans le cas bidirectionnel. Or, dans le cas de 35 segments et avec une fenêtre initiale fixée à 1, il n'y aura pas plus de 16 segments à envoyer d'un seul coup.

<sup>1</sup> Taille moyenne précédemment utilisée dans la partie 5.4.2.1.3

<sup>2</sup> Cette figure n'est pas à l'échelle.



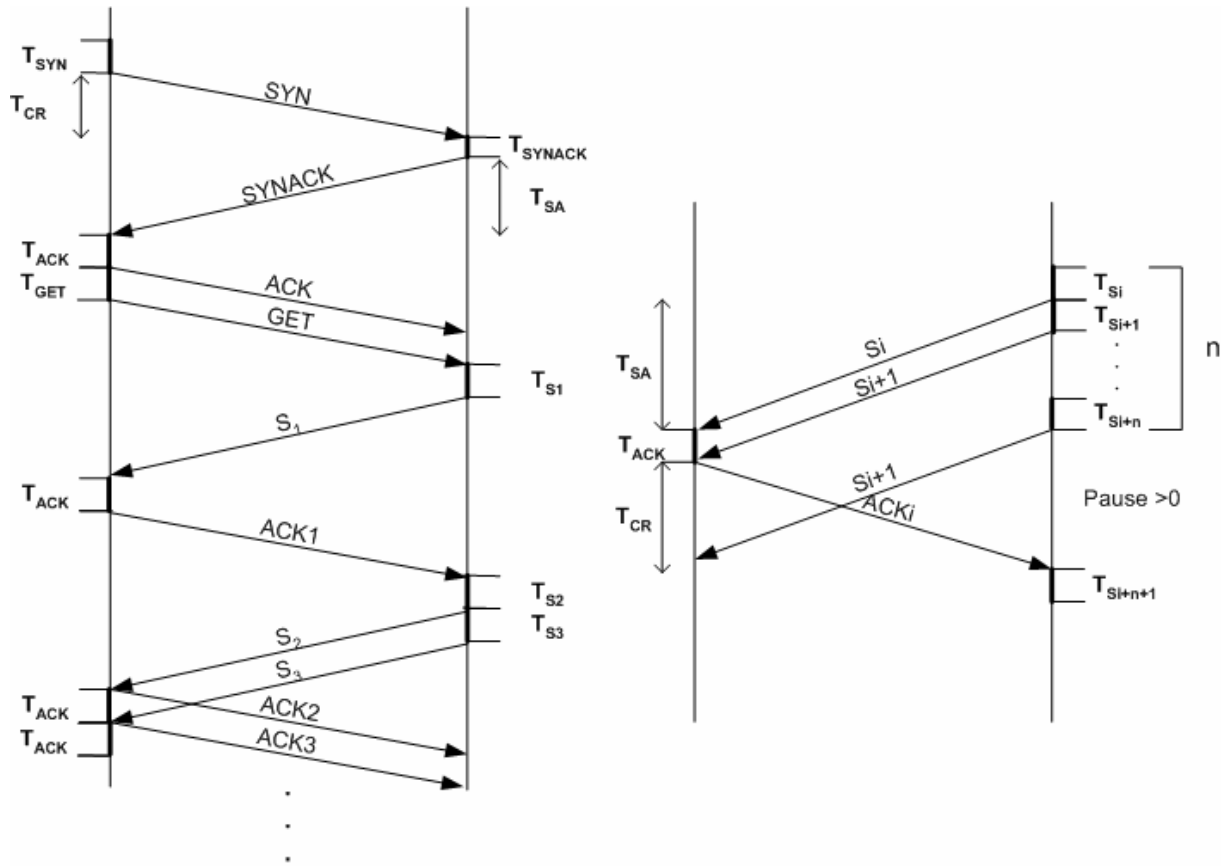


Figure 5.13 Diagramme simplifié d'une communication HTTP

Si on note  $T_{TU}$  et  $T_{TB}$ , le temps total requis pour que l'utilisateur reçoive la page *web*, respectivement dans le cas unidirectionnel et bidirectionnel, on a alors :

$$(37) \quad T_T = T_{Connexion} + T_{GET} + T_{CS} + 5.(T_S + T_{SA} + T_{ACK} + T_{CR}) + T_{FIN}$$

Avec

$$(38) \quad T_{Connexion} = T_{SYN} + T_{CS} + T_{SYNACK} + T_{SA} + T_{ACK}$$

Et, où  $T_S(400)$  est le temps requis pour émettre les 400 octets restants.

$$(39) \quad T_{FIN} = 3.T_S + T_S(400) + T_{SA}$$

Soit après applications numériques, un  $T_{TU}$  de 2.847 s contre un  $T_{TB}$  de 3.914 s. On constate donc un gain de l'ordre de 27.3 % entre le cas bidirectionnel et le cas unidirectionnel. Le lien retour terrestre est donc mieux adapté que le retour satellite pour les applications de type navigation *web*. Il faut noter cependant que pour le lien retour terrestre, surtout dans les cas de faibles débits (9.6 à 28.8 Kb/s), la liaison aller peut être bridée par la congestion des acquittements sur le lien retour. Toutefois comme cette étude a pu le montrer, pour un débit aller de 512 Kb/s, cet effet est limité, et peut donner des performances tout à fait suffisantes quand le débit retour est de 28.8 Kb/s ou plus.

#### 5.4.2.2.3. CONCLUSION

Nous avons noté ici la difficulté que peut représenter un lien retour à très faible débit, c'est-à-dire 9.6 Kb/s. Toutefois ce bas débit permet, d'une part, au système de mieux fonctionner

qu'un accès de type Numéris et, d'autre part, une faible augmentation de ce dernier est suffisante pour pouvoir atteindre le débit maximum du lien aller.

On peut tout de même noter ici un avantage à utiliser un lien retour de type Numéris lorsque le satellite peut offrir ponctuellement un débit important sur la voie aller (jusqu'à 4 Mb/s), avec des techniques de type *Turbo Button*<sup>1</sup>.

Enfin cette étude a montré la plus grande réactivité d'un lien retour terrestre, même très bas débit, pour la navigation *web*. L'utilisation d'une architecture de service reposant sur un lien aller DVB-S et un retour terrestre est donc une solution satisfaisante pour un accès Internet standard, car plus adaptée qu'un retour satellite en terme de réactivité et de coût.

### 5.4.2.3. L'influence de l'utilisation de l'intelligence embarquée

Dans cette dernière partie de l'étude de l'intégration du service d'accès Internet standard, l'intérêt de l'utilisation du satellite hybride est soulevé. En effet, nous avons montré au cours de cette partie que l'accès Internet standard pouvait être supporté par le système hybride aussi bien que n'importe quel autre système satellite. En soi cette conclusion est importante, impliquant qu'elle peut être intégrée avec d'autres services dans l'architecture hybride. La nature flexible du système hybride peut offrir un gain supplémentaire à ce service grâce son mode régénératif.

En effet, l'étude précédente ne prend jamais en compte une charge régénérative. Il est vrai que pour un accès Internet par voie satellite unidirectionnelle, l'intérêt de l'OBP n'est pas *a priori* dans le traitement bord en lui-même, mais dans l'apport de l'utilisation des techniques multifaisceaux. Aussi, le satellite offre une perspective économique qui peut apparaître d'intérêt pour l'opérateur satellite : économiser la capacité des *spots* non concernés par la communication.

Considérons une *gateway* émettant sur un satellite hybride des flux unipoints. La configuration et les notations pour le mode transparent et régénératif sont présentées ci-dessous.

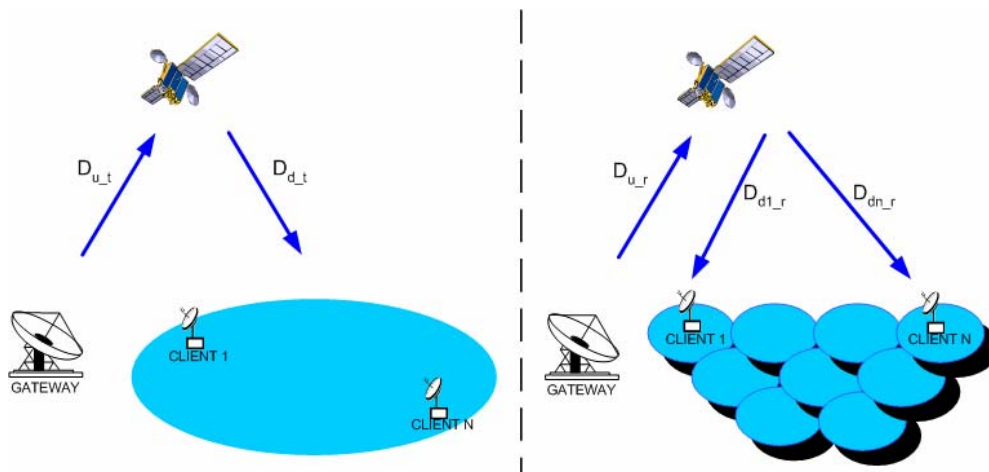


Figure 5.14 Utilisation du monofaisceau et du multifaisceaux pour la voie aller DVB-S

On peut considérer le problème par deux points de vue : soit en fixant un débit  $D_{u,t}$  ou  $D_{u,r}$  pour le FAI, et en observant combien l'opérateur satellite peut économiser de bande passante sur la couverture, soit en laissant libre  $D_{u,t}$  ou  $D_{u,r}$  et en observant quel est le maximum que peut obtenir le FAI dans l'un et l'autre cas. Nous allons considérer la première proposition qui nous paraît la plus abordable.

<sup>1</sup> Par exemple les propositions de BellSouth Turbozone, avec des propositions de DSL 56k, avec des augmentations jusqu'à 3 Mb/s. On peut aussi trouver d'autres propositions comme celles de Laurel : <http://www.telecomweb.com/news/1088046617.htm>.

Dans le cadre transparent, si l'on octroie un multiplexe complet au FAI, on retrouve ce même multiplexe sur le lien descendant, d'où  $D_{u_t}$  est égal à  $D_{d_t}$ . Dans le cas régénératif, si l'on fait la même supposition, on doit retrouver au total le débit d'un multiplexe sur les différents *spots*. Supposons que les clients soient uniformément répartis parmi les faisceaux,  $D_{u_r}$  est alors également réparti sur chaque faisceau. On a alors l'expression suivante (40), où  $D_{Di}$  est le débit engendré par la *gateway* sur le *spot*  $i$ , et  $D_D$  est ce même débit lorsqu'il devient indépendant de  $i$ .

$$(40) \quad D_{u_r} = \sum_{i=1}^n D_{Di} = n.D_D$$

On peut alors considérer le débit restant sur le spot  $i$  (41), noté  $D_i$ , où la deuxième égalité n'est valable que dans le cas d'une répartition uniforme.

$$(41) \quad D_i = D_{Di_r} - D_{Di} = D_{Di_r} - \frac{D_{u_r}}{n}$$

Dans un cadre multifaisceaux, on peut considérer que, par *spot*, le débit du multiplexe descendant est égal à la valeur du débit sur le multiplexe montant multiplié par un facteur  $k$ , défini en 4.3.1.4.2. On a alors l'expression suivante :

$$(42) \quad D_i = k.D_{u_r} - D_{Di} = \left(k - \frac{1}{n}\right) D_{u_r}$$

D'où un gain, comparé au cas monofaisceau, de :

$$(43) \quad G = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{D_{D_t}} = \frac{n \left(k - \frac{1}{n}\right) D_{u_r}}{D_{u_r}} = nk - 1$$

Ainsi par rapport au cas transparent, l'opérateur du système peut faire passer  $nk-1$  fois plus de débit montant sur son système. Soit pour une valeur de  $k$  comprise entre 0.7 et 0.8, le tableau suivant (Tableau XII), qui donne une idée de la bande passante réutilisable par l'opérateur.

Tableau XII. GAIN DU MULTIFAISCEAUX POUR LA VOIE ALLER EN MODE UNIPOINT

<b>k \ n</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>32</b>
<b>0.7</b>	1.8	4.6	10.2	21.4
<b>0.8</b>	2.2	5.4	11.8	24.6

Dans l'ensemble, on peut noter qu'il pourra toujours réutiliser  $n*D_D - D_{u_r}$ , soit toujours l'expression (43) qui peut ainsi se généraliser au cas de répartition non uniforme.

Pour des communications à haut débit de type unipoint, il semble dommage d'utiliser un lien transparent, utilisant ce débit sur la totalité de la couverture du satellite pour un seul utilisateur. La couverture multifaisceaux est donc intéressante si le gain pour l'opérateur justifie le coût d'utilisation de la technologie, typiquement pour les débits importants, et non les communications avec un faible poids de données (comme la consultation de pages *webs*). En effet, l'utilisation du mode régénératif introduit une signalisation plus complexe, qui est certes négligeable pour les flux importants, comme nous l'avons montré dans la partie 5.2.3, mais pas pour un grand nombre de flux à faible débit. Comme les notions de coût réel sont des données hors de notre atteinte, l'étude est une analyse *a priori* et ne peut être poursuivie plus loin.

Cette analyse montre qu'il y a un gain potentiel à utiliser une charge régénérative, mais que cette utilisation est réservée plutôt aux flux importants. L'architecture hybride s'intègre alors parfaitement dans cette optique par la flexibilité d'aiguillage entre ses deux modes.

### 5.4.3. Accès Internet évolué

Dans un premier temps nous avons vu l'accès unidirectionnel. Celui-ci est justifié pour un service dit classique, mêlant les applications les plus courantes de l'accès Internet (navigation, web, FTP,...). Ce profil d'application est particulièrement asymétrique, privilégiant les accès types serveurs/clients, où l'*upload* est important, mais la voie retour n'est utilisée que pour les requêtes et les acquittements. Dans ce cadre nous avons montré comment le système hybride pouvait contribuer au déploiement d'un tel service.

L'apparition d'applications d'échanges de données, telles que le P2P, a créé une nouvelle demande sur le marché : celle d'un accès plus symétrique. Le terme « accès évolué » englobe ici ces nouveaux services. Dans ce cadre l'impact plus important du lien retour, nous a fait considérer l'accès satellite bidirectionnel comme la solution privilégiée à ce type de service.

Comme la partie précédente, cette étude vise à montrer la validité de cette architecture de service, et l'intérêt d'utiliser un système hybride. Toutefois, cette partie présentera un intérêt particulier à montrer comment un paramétrage différent peut apporter une nette amélioration des performances du système.

Ainsi nous comparerons cet accès avec la solution terrestre dans la section 5.4.3.1, montrant que ce débit reste supérieur à un accès terrestre bas débit. Pour palier ces problèmes, nous observerons tour à tour des améliorations qui peuvent être introduites au niveau applicatif par un comportement commun des utilisateurs (5.4.3.2), ou par des gestions particulières au niveau liaison/physique (5.4.3.3). La section suivante (5.4.3.4) propose une comparaison avec l'architecture de service précédente. Enfin la section 5.4.3.5 traite l'intérêt des deux modes du système hybride.

#### 5.4.3.1. Une comparaison avec l'accès terrestre

La comparaison faite précédemment pour l'accès unidirectionnel par satellite reste en partie valable. Toutefois, trois points importants sont à noter : l'augmentation du RTT, le taux de perte non négligeable sur la voie retour, et le temps d'accès sur cette même voie qui peut s'avérer élevé.

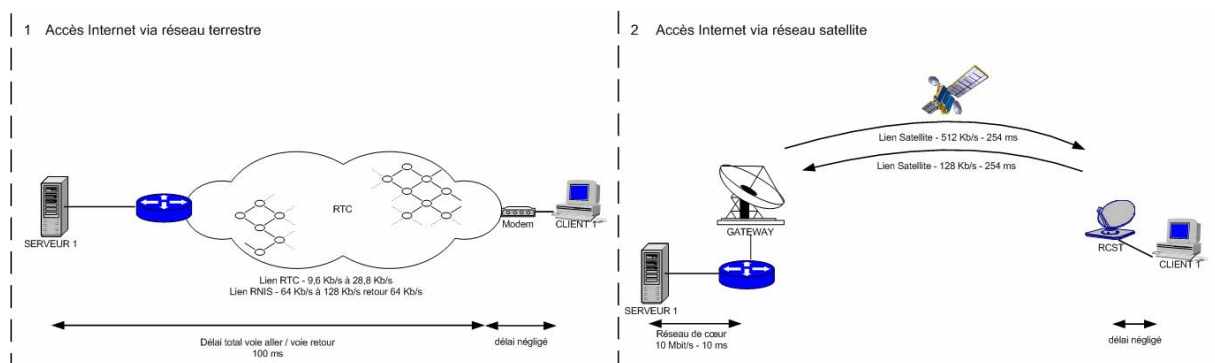


Figure 5.15 Scénario de comparaison entre un accès Internet via une connexion terrestre et le même service via un système satellite bidirectionnel

Nous partons sur le principe que l'accès satellite sur voie retour utilise une réservation de type CBR, le temps d'accès au système est alors négligeable. La modélisation présentée dans la figure ci-dessus (Figure 5.15) permet d'obtenir sous NS 2 l'évolution du débit en fonction du

temps de transfert (Figure 5.16)<sup>12</sup>. Il faut noter que la version de TCP utilisée est TCP Reno. Quant au modèle de pertes, il s'agit de celui présenté précédemment (5.1.3.2.). Les *buffers* d'émission du client et du serveur sont fixés à 150 KB dans cette simulation. Les MSS sur le lien aller et le lien retour sont de 1460 B.

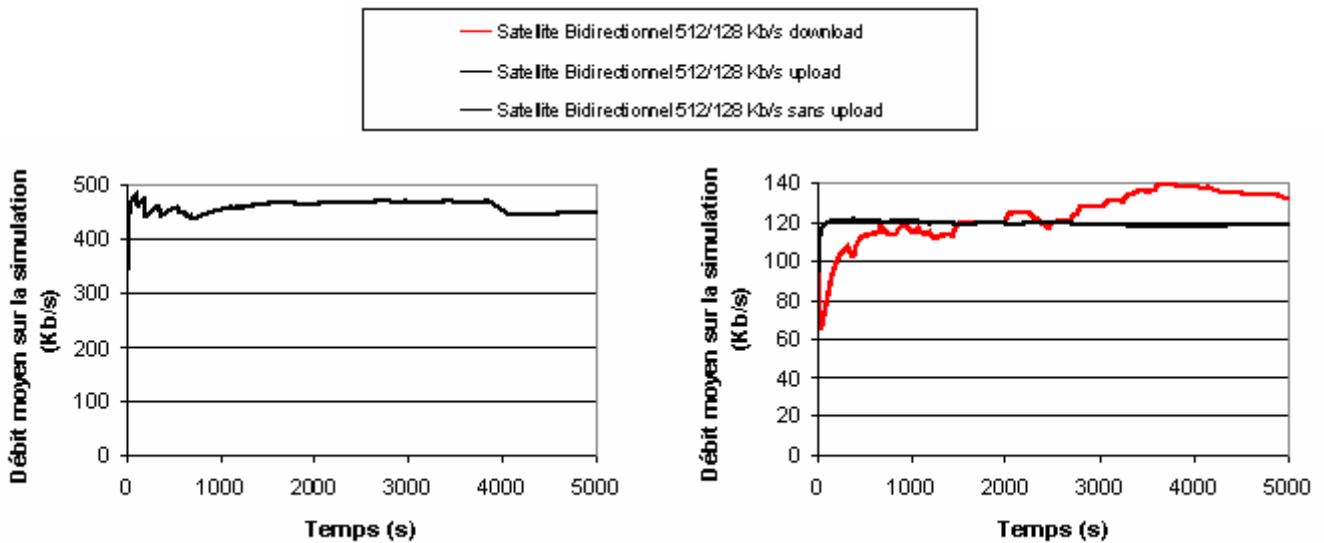


Figure 5.16 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps

Comme on peut le noter dans la figure précédente (Figure 5.16), les performances du lien aller sont affectées par le transfert *upload* qui a lieu sur le lien retour. En effet, lorsque l'on compare le débit pour le transfert *download* sans et avec un transfert sur le lien retour, on obtient une réduction du débit de plus de 70% (à 5000 s).

La raison principale de ce gaspillage de ressources provient de l'attente importante des acquittements dans le *buffer* d'émission sur le lien retour du client, le temps que les datagrammes à destination du serveur soient émis. C'est ce qui explique l'apparition de variations sur la courbe ci-dessus. Toutefois il faut noter que ce n'est pas l'unique cause, puisqu'une partie de ces variations est aussi due aux pertes de paquets en rafale, comme on peut le noter dans la courbe suivante (Figure 5.17). En effet lorsque l'on regarde la simulation, on se rend compte que les 16 premiers paquets perdus sont en fait des acquittements de la communication aller.

Ce débit reste toutefois équivalent au meilleur accès terrestre possible dans les zones isolées, le RNIS (on obtient un débit applicatif aller comme retour de 121.24 Kb/s à 5000 s contre 131.5 Kb/s et 118.5 Kb/s pour un accès satellite).

La solution satellite, même non optimisée, reste donc une solution admissible comparée aux solutions de type terrestre. Cependant, son coût est peut-être élevé pour proposer des performances de la sorte. Si le lien retour est effectivement utilisé à pleine capacité, le lien aller reste dans ce cadre peu rentabilisé.

<sup>1</sup> Il faut noter que ce débit est le débit moyen calculé de 0 à t, et non pas le débit moyenné sur une seconde, qui lui témoigne plus directement de l'impact des pertes, mais est plus difficile à comparer. Ainsi si l'on considère la valeur à t = 100s, le débit représenté est la moyenne sur l'intervalle [0,100].

<sup>2</sup> Nous ne représenterons ici que l'évolution pour le cas satellite.

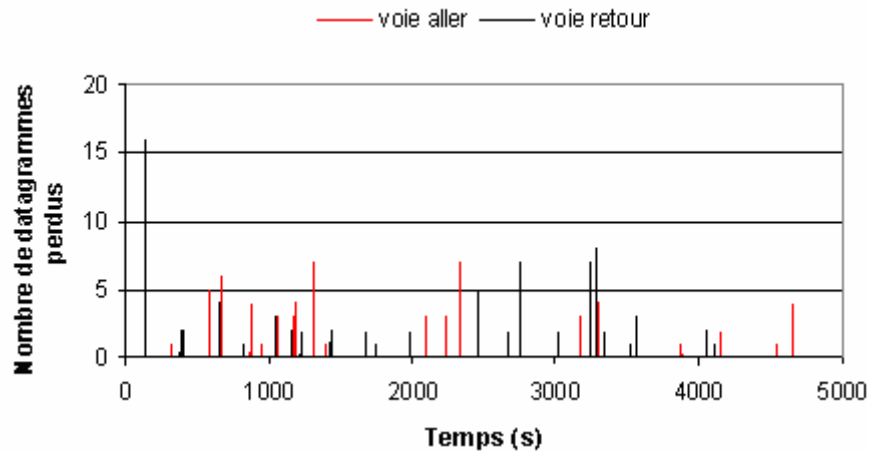


Figure 5.17 Profil de pertes au cours de la simulation sur la voie aller et retour

#### 5.4.3.2. Une optimisation au niveau applicatif

Il existe plusieurs méthodes pour remédier à ce problème. En effet cet amoindrissement sur du débit sur la voie aller est causé par l'engorgement des acquittements dans la file d'attente du *buffer* d'émission, devant attendre l'émission de la fenêtre TCP de la communication sur la voie retour.

Une première solution consiste à s'attaquer directement à la cause du problème, et donc à s'interroger sur le fonctionnement du protocole TCP sur satellite (cf. 3.5.2). Toutefois, il existe des possibilités de remédier à ce problème, notamment au niveau applicatif.

La limitation de l'*upload* est une de ces solutions. Cette limitation peut se faire à plusieurs niveaux, dont le plus simple est certainement le niveau applicatif. Mais encore ici la notion de transparence peut être malmenée, sachant que c'est l'application utilisateur qui doit limiter ce débit. De plus, il est rare que l'utilisateur, voire l'application, ait conscience qu'un débit important sur sa voie retour risque d'entraîner une diminution de son débit aller.

Néanmoins la plupart des logiciels de ce type permettent de fixer un seuil sur ce débit d'*upload*, et un grand nombre d'utilisateurs l'utilise pour pouvoir continuer à naviguer sans problème, et limiter les accès disques à leur système. Dans ce cadre, nous avons fixé successivement le débit maximum utilisable par le transfert retour à 80 Kb/s et à 100 Kb/s, et constaté l'évolution du débit aller et retour (Figure 5.18). Une limitation de 83 % du débit retour, donne une augmentation de l'ordre de 333 % pour le transfert aller, le cas 100 Kb/s donnant d'ailleurs d'aussi bonnes performances que le cas 80 Kb/s. Il suffit donc de réserver un débit suffisant pour les acquittements pour retrouver les performances d'un transfert unidirectionnel<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Notons que ce type de solution est aussi valable pour les accès asymétriques terrestre, tel que l'accès 512/128 Kb/s ADSL qui s'ouvre de ce même problème.

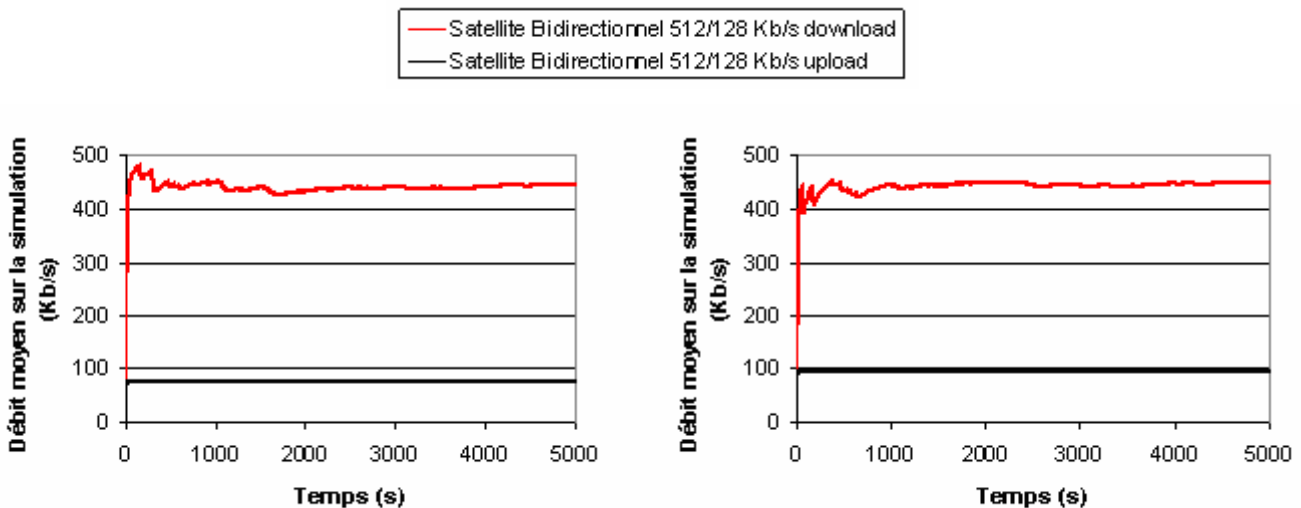


Figure 5.18 Évolutions du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps de simulation avec limitation à 80 Kb/s et 100 Kb/s du débit de type *upload*

### 5.4.3.3. Des optimisations au niveau liaison

Le niveau MAC offre aussi des solutions à ce problème. En effet l'engorgement du *buffer* d'émission est la raison physique de la baisse du débit d'émission des acquittements sur le lien, entraînant implacablement la chute du débit en *download*. Pour palier cela, nous avons envisagé trois solutions : régler la taille du *buffer* d'émission, appliquer une politique de service en fonction des flux, ou limiter le MTU sur le lien<sup>1</sup>.

#### 5.4.3.3.1. L'INFLUENCE DE LA TAILLE DES *BUFFERS* D'ÉMISSION

L'influence de la taille des *buffers* sur les deux communications est le premier point traité ici. Nous proposons de faire varier la taille de ces *buffers* et d'observer les résultats donnés par simulation. Dans un premier temps, observons ces résultats pour des *buffers* d'émission 50 KB, et de 100 KB. Pour donner une idée de l'influence du modèle de pertes choisi, nous présentons les résultats sans et avec pertes (Figure 5.19).

Cette figure souligne deux points. Tout d'abord cette optimisation a bien une influence similaire sur un modèle avec et sans perte. Pour un *buffer* plus petit, les paquets de 1500 octets sur la voie retour ont une plus grande chance d'être éliminés que les acquittements de 40 octets. Les mécanismes de TCP détectent alors de la congestion dans le système, et diminuent le débit d'émission sur le lien retour, laissant alors champ libre aux acquittements. La seconde conclusion que l'on peut tirer de cette étude est la plus délicate stabilité du système dans ce cas, qui donne des résultats moins performants que la solution applicative précédente. Enfin on peut noter que la présence d'erreur n'a pas toujours un impact négatif sur le système, puisqu'il peut permettre de diminuer le débit en *upload*, et ainsi augmenter le débit sur le lien retour. Toutefois on ne peut s'appuyer vraiment sur cette constatation pour optimiser le système.

Pour constater à quel point cette influence est sensible, nous avons fait varier la taille des *buffers* de 3 KB à 200 KB pour une simulation de 5000 s. La figure suivante (Figure 5.20) représente alors l'évolution du débit moyen obtenu pour le transfert aller et le transfert retour en fonction de la taille du *buffer* d'émission aller et retour (nous affectons la même taille aux deux *buffers* pour la simulation).

<sup>1</sup> Cette dernière solution est souvent mise en œuvre sur les accès asymétriques terrestre bas débit.

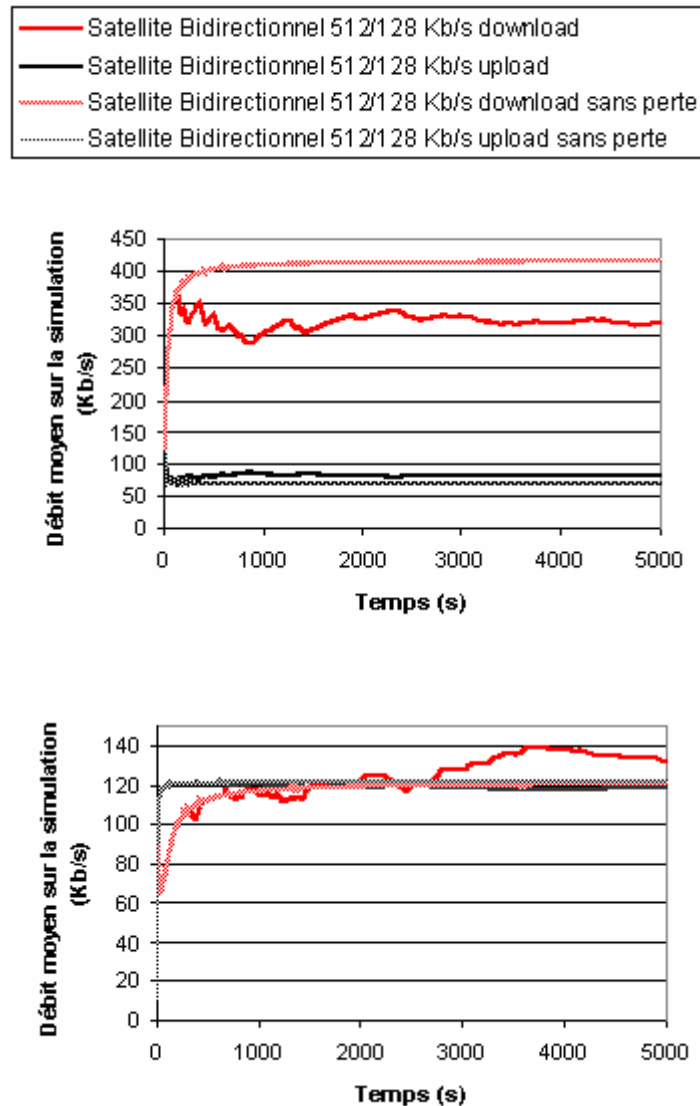


Figure 5.19 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps avec un *buffer* d'émission de 50 KB et de 100 KB

On peut observer ici l'influence réelle de la taille des *buffers* d'émission sur le débit moyen aller et retour. Cet impact est bien plus important sur le flux à destination, que celui en partance. En effet la variation peut aller jusqu'à près de 700 % sur le lien aller, alors que pour le flux en *upload*, on observe une variation de moins de 100 % (au maximum). La taille optimale pour la voie aller semble être de 41 KB, avec un débit aller moyen de 338.65 B, contre un débit retour de 85.6 KB.

Cette variation surprenante est essentiellement due à la régulation des échanges TCP. Dans un échange bidirectionnel comme celui là, aucun état stationnaire n'est vraiment possible, il s'agit alors plutôt d'un cycle de remplissage des *buffers*. Ainsi lorsque le *buffer* d'émission du client arrive à saturation, les paquets à émettre, acquittements comme données, sont rejetés. Toutefois, les données étant plus volumineuses que les acquittements, elles ont plus de chance d'être supprimées. Le flux *upload* TCP s'autorégule alors, baissant son débit, et laissant la voie libre aux acquittements de la voie descendante. On arrive alors dans un état cyclique de remplissage du *buffer*. Un état optimal peut alors être trouvé.



Plus la taille du *buffer* d'émission du serveur augmente, plus celui-ci peut émettre efficacement vers le client, entraînant une augmentation du débit aller.

Plus la taille du *buffer* d'émission du client augmente, plus il est possible d'émettre de paquets en *upload*, augmentant le temps d'attente des acquittements dans la file d'attente, et dégradant ainsi le débit de la voie aller.

Puisque cette courbe représente l'évolution en simultanée des deux *buffers*, il est normal d'observer cette double évolution. Les oscillations sont dues en grande partie à ce phénomène, cumulé à l'impact des variations de la taille du *buffer*, qui entraîne la perte ou non d'acquittements, et donc une dégradation potentielle du débit du lien aller.

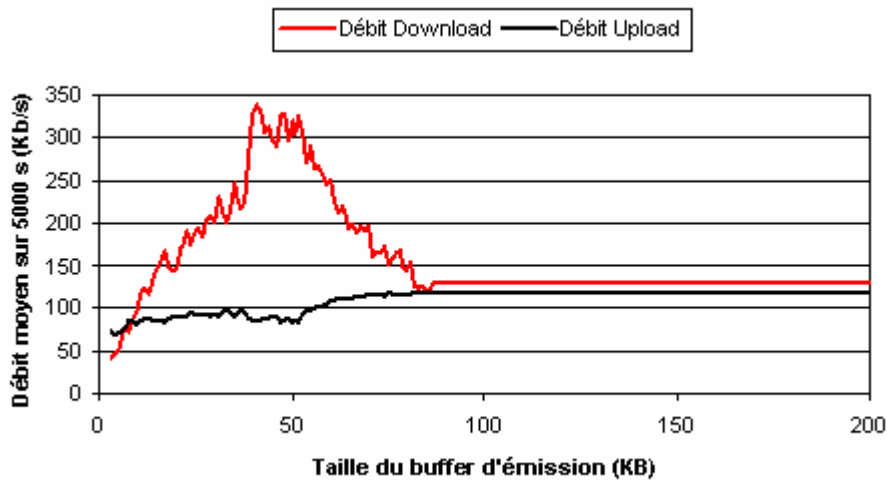


Figure 5.20 Évolution du débit moyen applicatif sur 5000 s en fonction de la taille des *buffers* d'émission

On peut enfin noter un seuil qui correspond à une taille décisive de la file d'attente, au-delà de laquelle le RTO de TCP se déclenche dans tous les cas. Aucun paquet n'est perdu par des files d'attente supérieures à 87 KB, mais c'est TCP qui s'autorégule alors, entraînant une baisse du débit, et donc une diminution de la taille de la file d'attente. Ce qui explique que lors d'une telle communication, le *buffer* d'émission ne pourra jamais dépasser une certaine taille (ici 87 KB), et donc le comportement de TCP sera identique au-delà de cette valeur.

#### 5.4.3.3.2. L'INFLUENCE DE LA POLITIQUE DE SERVICE DES *BUFFERS* D'ÉMISSION

Une autre méthode consiste à gérer le *buffer* d'émission au niveau de l'interface IP, ou MAC. Ainsi il est possible d'implanter ici une politique différente du FIFO, permettant de donner une priorité équivalente voire plus grande aux acquittements. La politique de service sur la file peut ainsi être changée, mais d'autres files peuvent aussi être introduites, une pour les trafics prioritaires, de type temps réel par exemple, et une autre pour les autres.

Nous proposons ici d'observer l'amélioration apportée par ces techniques sur le débit applicatif du système. Les figures suivantes présentent respectivement la mise en oeuvre d'une politique de diminution du nombre de paquet en attente dans la file pour un type de flux donné (cette politique est introduite en NS sous le nom de *Deficient Round Robin*) (Figure 5.21), et du *Fair Queueing* (Figure 5.22) reposant sur un Round Robin prenant en compte la taille des données.

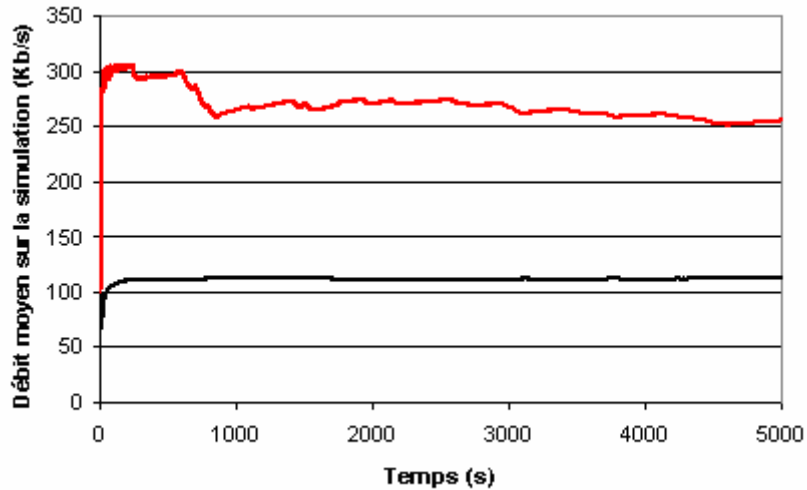


Figure 5.21 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps avec une politique de *Deficient Round Robin* sur le *buffer* d'émission de 150 KB

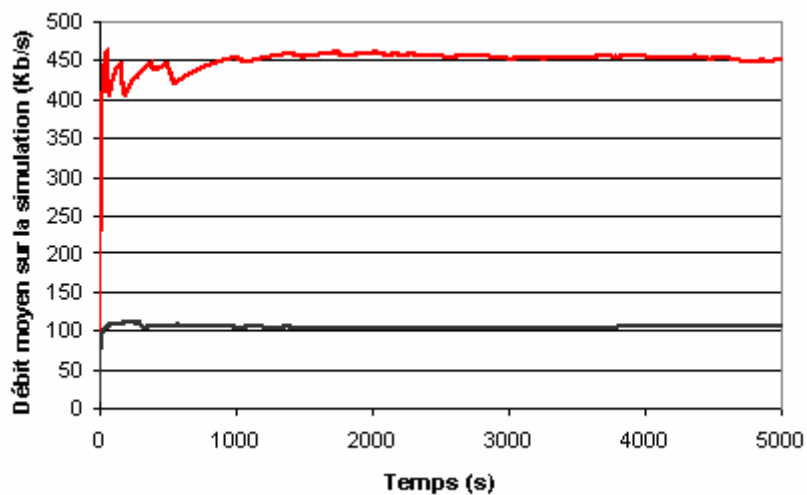


Figure 5.22 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps avec une politique de *Fair Queueing* sur le *buffer* d'émission de 150 KB

Sur ces deux courbes, on peut constater l'amélioration très nette apportée par une gestion de la file d'émission du client. On pourra noter une meilleure performance du *Fair Queueing* pour le débit applicatif aller. En effet, son utilisation fondée sur la distribution d'étiquette en fonction du trafic transmis, permet d'assurer aux acquittements un passage rapide en tête de la file, n'ayant qu'à attendre tout au plus l'émission du datagramme en cours du flux d'*upload* (le mode préemptif étant rarement conseillé). De plus, l'attribution des étiquettes se fonde sur la taille des données, permettant pour des paquets de MTU 1500 B, d'envoyer entre 37 et 38 acquittements pour un datagramme d'*upload*. Dans le cas du *Deficient Round Robin*, l'amélioration est notable, mais le flux des acquittements à encore à souffrir de grandes variations, ce qui explique de moins bonnes expériences (Figure 5.23).

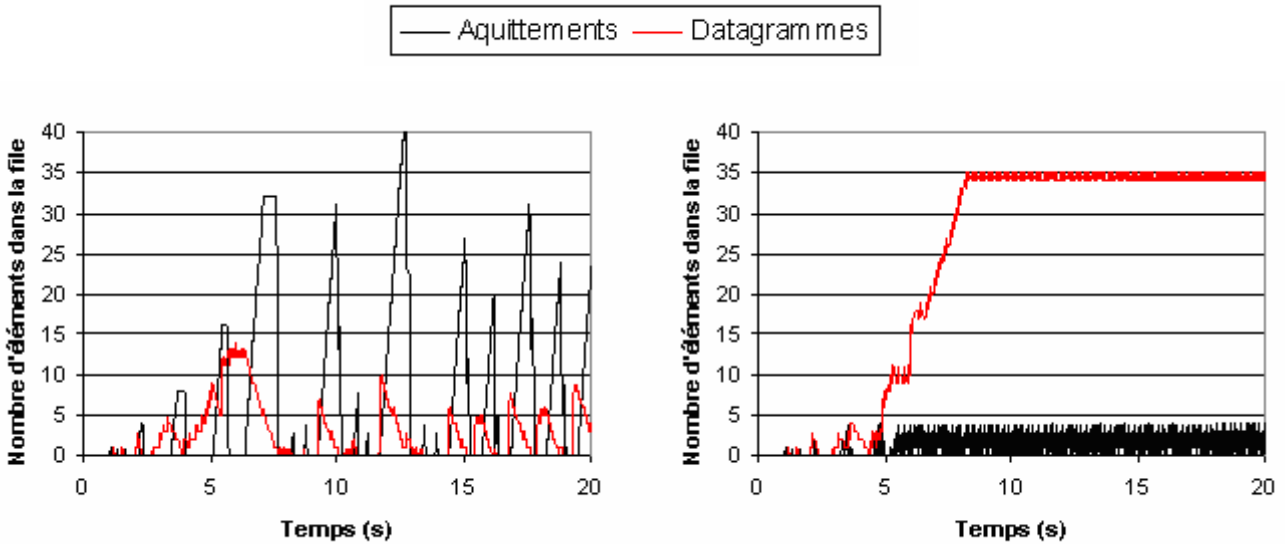


Figure 5.23 Aperçu de l'évolution de la file d'attente d'émission dans le cas DRR et FQ

#### 5.4.3.3.3. L'INFLUENCE DE LA MTU

Une dernière solution proposée ici est la diminution de la MTU sur le lien retour. Ce type de problème a déjà été rencontré sur les réseaux terrestres qui, pour permettre une meilleure réactivité, fixent la MTU sur le lien retour à 576 B (valeur plus communément utilisée sur Internet), soit une MSS de 536 B.

L'avantage de ce type de solution est étudié ici, montrant l'influence d'un découpage en plus petits paquets sur la voie retour. Il faut noter qu'il n'est pas tout à fait dans l'intérêt de la voie retour d'utiliser une MTU plus petite que 1500 B, puisque cela générerait un grand nombre d'acquittements supplémentaires sur la voie retour, ainsi qu'une diminution du trafic TCP dans la période de *slow start* et de *congestion avoidance* (période très sensible sur le satellite).

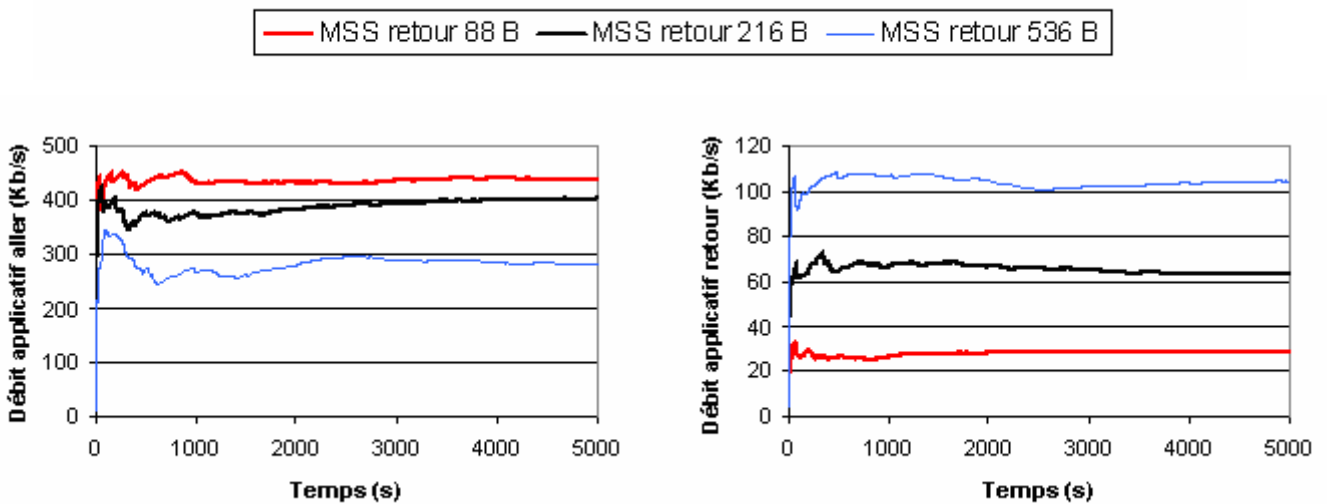


Figure 5.24 Évolution du débit applicatif observé sur le lien aller et retour en fonction du temps et de la MSS du lien retour.

Les figures ci-dessus proposent d'observer l'évolution du débit moyen en fonction du temps. Nous avons fait cette étude pour différentes valeurs de la MSS, et nous proposons ici les

courbes obtenues pour des MSS de 88, 216, et 536 et 1460 B. Le cas 1460 B est présenté précédemment dans cette partie (Figure 5.16), les autres sont tracés dans la figure ci-dessus.

On observe dans ces courbes une très nette corrélation entre l'augmentation du débit aller et la diminution du débit retour. Ainsi pour le passage d'une MSS de 216 B à 88 B, on observe une diminution de plus de 50 % pour le débit applicatif retour, contre à peine une augmentation de 10 % sur la voie aller.

Cependant si l'on compare les résultats obtenus pour une MSS de 1460 B et ceux pour 536 B, on a une baisse sur le lien retour de quelques pourcents pour une augmentation entre 100% et 150 % pour le débit applicatif retour. On peut donc conclure que cette méthode peut apporter un gain réel de performance à condition de garder une MSS de l'ordre de 500 B sur la voie retour, pour ne pas dégrader le débit en *upload*.

#### 5.4.3.3.4. CONCLUSION SUR CES OPTIMISATIONS

Nous pouvons noter dans cette partie qu'un grand nombre de ces optimisations permettent d'améliorer le débit aller au détriment plus ou moins important de la voie retour. Toutefois, la majeure partie de ces solutions permet de gagner plus que l'on ne perd. Une solution comme l'application d'une politique de service du *buffer* d'émission permet d'offrir de très bons résultats, sans une baisse trop importante du débit applicatif sur la voie retour.

Ces améliorations nous semblent très utiles pour obtenir un service performant, et doivent donc être prises en compte dans le système hybride, d'autant plus que des modifications au niveau liaison restent transparentes pour l'utilisateur final.

#### 5.4.3.4. Une comparaison entre l'accès unidirectionnel et l'accès bidirectionnel satellite

Le choix de l'architecture de ce type est justifié pour avoir un débit retour important. L'utilisation d'un accès unidirectionnel pour avoir ces capacités doit utiliser un lien retour à débit important. Hors le maximum est une ligne Numéris de 128 Kb/s, au débit difficilement augmentable contrairement au satellite, où une simple demande à l'opérateur permet de porter ce débit jusqu'à 1, 2 ou 4 Mb/s.

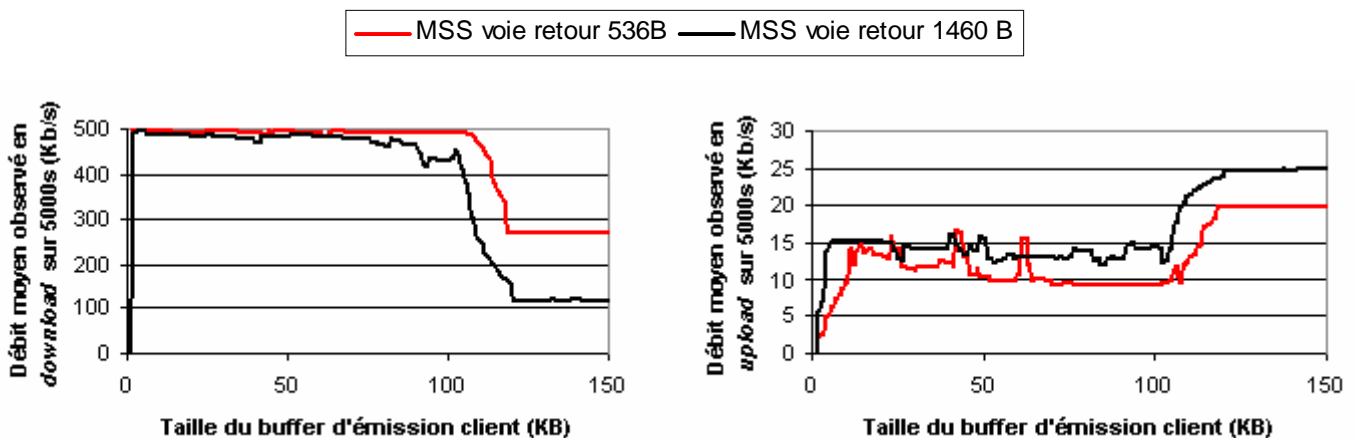


Figure 5.25 Évolution du débit moyen sur 5000 s en fonction de la taille des *buffers* d'émission pour un lien retour terrestre de 28.8 Kb/s et une MSS de 476 et 1460 B

Un autre type de lien retour, typique entre 9.6 Kb/s et 28.8 Kb/s a de sérieuses limites pour ce type de service. Une rapide étude permet de le montrer. On retrouve à une autre échelle les difficultés d'asymétrie évoquées précédemment. Des améliorations similaires peuvent alors être apportées, mais leur marge d'action est plus restreinte dans la mesure où la voie retour reste

très limitée en débit. La figure précédente (Figure 5.25) propose un aperçu des débits applicatifs aller et retour, en fonction de la taille du *buffer* d'émission du client, montrant comment le système reste limité par son débit maximum, inhérent au lien retour. On notera que ces simulations ont été réalisées sans l'introduction de pertes dues au canal physique, pour pouvoir observer uniquement l'influence désirée.

La courbe ci-dessous montre un comportement identique au lien satellite bidirectionnel : l'influence de la taille du *buffer* d'émission client a un impact important sur la communication aller comme retour. On peut observer que pour des segments de plus grande taille sur la voie retour, la courbe de débit est plus instable, puisque la perte d'un paquet s'en ressent davantage. En revanche, des paquets de petites tailles sur le lien retour avantagent le lien aller.

Le seuil observé n'est pas non plus tout à fait le même selon les MSS : il est plus élevé dans le cas d'une MSS plus élevée, s'expliquant par le fait que ce seuil corresponde au nombre de paquets qu'il peut y avoir dans le *buffer* avant que le RTO ne s'active.

Enfin on peut noter que le lien retour terrestre bas débit, de type modem à 28.8 Kb/s, peut poser problème par sa forte asymétrie pour un trafic de type FTP important (Figure 4.7). L'architecture satellite bidirectionnelle se justifie donc parfaitement dans un cadre applicatif plus symétrique, ou même pour d'importants trafics aller.

#### 5.4.3.5. *L'influence de l'utilisation de l'intelligence embarquée*

Cet impact reste le même que celui étudié pour le cas d'un accès satellite unidirectionnel (cf. 5.4.2.3), encourageant l'intégration de ce service dans une architecture hybride.

#### 5.4.4. **Intégration d'optimisations dans l'architecture hybride**

Dans les parties précédentes nous avons constaté que si le service d'accès Internet avait de meilleures performances que dans les réseaux bas débit, les résultats affichés étaient loin des débits maximaux proposés par le service. Plutôt que de laisser l'utilisateur s'évertuer à optimiser sa connexion Internet, l'architecture hybride propose d'intégrer des optimisations dans sa structure même. Nous avons d'ailleurs déjà vu dans les sections 5.4.3.2 et 5.4.3.3 des améliorations potentielles. Mais la question d'intégration reste en suspend, surtout que des optimisations de type applicatif semblent difficilement être la solution.

L'un des points fondamentaux de ces problèmes repose sur le mauvais comportement de TCP sur satellite (cf. 3.5.1). Un grand nombre de solutions ont été proposées et nous en avons déjà fait un état de l'art dans la partie 3.5.2. Toutefois beaucoup de ces méthodes altèrent le système au niveau utilisateur, ce qui est contraire à l'idée de transparence de notre proposition. Pour palier ce fait, nous proposons d'étudier l'intégration de ces techniques *via* des méthodes transparentes, et essentiellement en utilisant l'apport des PEPs (3.5.2.3).

À partir de là, nous découpons cette partie en quatre points. La section 5.4.4.1 proposera d'observer dans un premier temps le comportement des versions TCP sur un accès Internet, montrant que dans l'ensemble, même si les comportements sont différents sur les pertes, les problèmes d'asymétrie et même de reprises d'erreurs ne peuvent être résolus par une version classique de TCP. La section suivante (5.4.4.2) proposera d'aborder l'intégration de passerelles dans l'architecture hybride pour répondre d'une part aux problèmes d'optimisation, mais aussi au souci de transparence du système. Ensuite, un exemple de mise en œuvre sera étudié, montrant comment les PEPs peuvent avoir une influence des plus bénéfiques sur le système (5.4.4.3). La conclusion de cette partie sera faite dans la conclusion générale sur l'accès Internet.

5.4.4.1. Une comparaison du comportement des versions classiques TCP sur un lien satellite

Nous avons déjà utilisé dans les parties précédentes TCP pour faire nos simulations. Nous proposons ici de revenir sur les versions de TCP les plus communes et d'observer comment elles se comportent sur un système satellite.

Dans ce cadre nous proposons comme test un échange FTP entre un serveur et un client connecté directement par un lien satellite de RTT 508 ms. Le lien aller est à 512 Kb/s, tandis que le lien retour est à 128 Kb/s. Un PLR de  $10^{-3}$  est introduit sur le lien aller avec des rafales en moyenne de 4 paquets. Sur le lien retour, le PLR est aussi fixé à  $10^{-3}$ . Toutefois cette hypothèse est un cas des plus défavorables, puisque les acquittements sont de plus petites tailles. La MSS est fixée à 1460 B, les acquittements à 40 B. Nous proposons ici la comparaison de TCP Tahoe, Reno, et NewReno.

Tout d'abord l'observation montre qu'au bout d'un transfert de 2000 s, le segment maximal transféré n'est pas le même dans les trois cas (Tableau XIII).

Tableau XIII. SEGMENT MAXIMAL TRANSFÉRÉ AU BOUT DE 2000 s

Type de TCP	Tahoe	Reno	NewReno
Segment maximal	83097	81097	83445

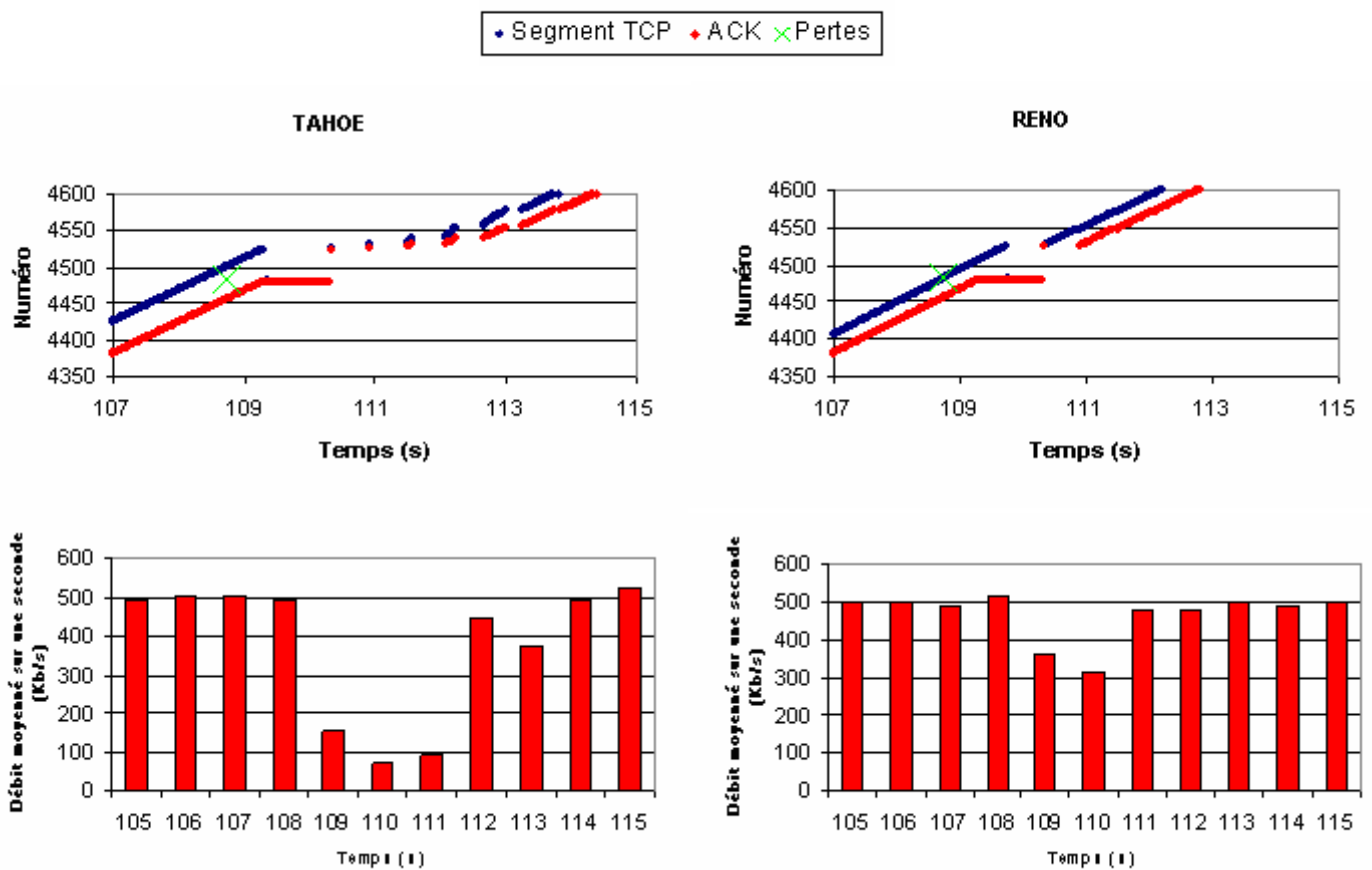


Figure 5.26 Observation du comportement de TCP Tahoe et Reno sur un lien satellite face à une perte ponctuelle.

Dans le cadre d'erreurs ponctuelles, on observe de meilleures performances pour TCP Reno. Son comportement est d'ailleurs identique à celui de TCP NewReno dans ce cas. Le *Fast Retransmit* est déclenché dans les deux cas (Tahoe comme Reno). Toutefois à la réception de l'acquittement de ce segment, TCP Tahoe passe en *congestion avoidance*, tandis que TCP Reno utilise le *fast recovery*, évitant ainsi de faire repasser sa fenêtre à la taille initiale (Figure 5.26).

La figure suivante montre le comportement de TCP Tahoe et Reno dans le cadre de pertes multiples (Figure 5.27). Contrairement à TCP Tahoe, il passe d'abord en phase de *fast retransmit*, mais comme l'acquittement ne concerne que le dernier segment, il est contraint de passer en *congestion avoidance*, repartant avec sa fenêtre initiale. Il perd donc en efficacité face à TCP Tahoe qui a déjà entamé cette phase un RTT auparavant.

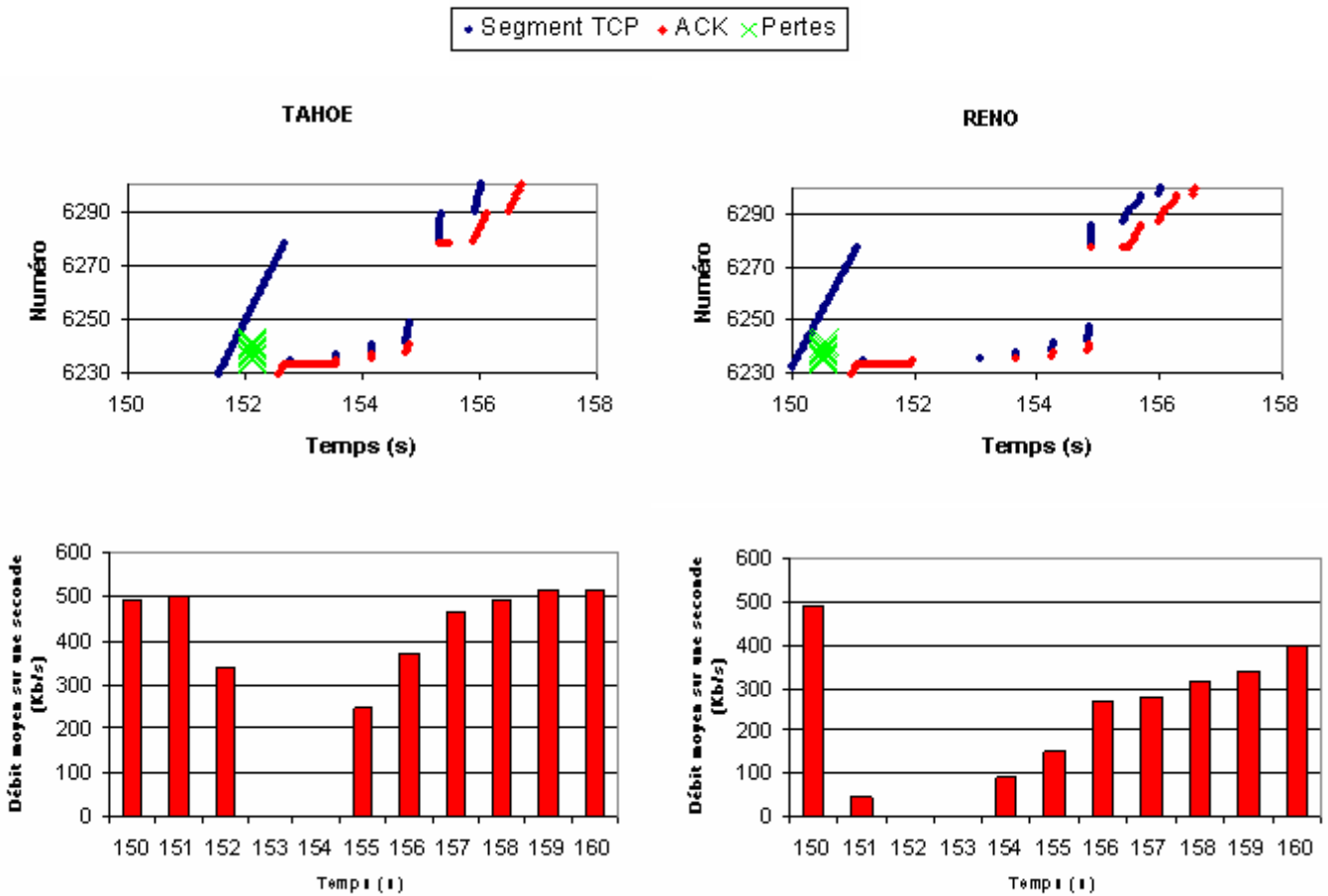


Figure 5.27 Observation du comportement de TCP Tahoe et Reno sur un lien satellite face à des pertes en rafales.

Contrairement à TCP Reno, TCP NewReno supporte mieux les pertes en rafales en permettant une phase de *fast retransmit* plus longue. La figure suivante (Figure 5.28) propose un aperçu de ce comportement face à des pertes en rafales. On peut remarquer que le traitement des pertes est plus long que pour les autres. Toutefois une fois les pertes traitées, les paquets sont émis directement au même rythme qu'avant la perte. NewReno récupère donc plus vite que les deux autres implantations de TCP.

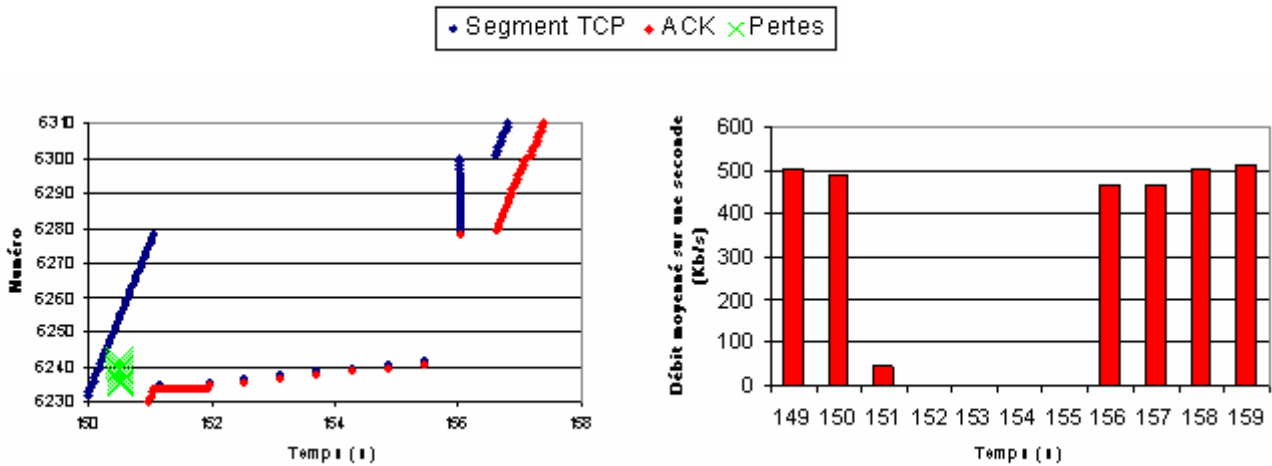


Figure 5.28 Observation du comportement de TCP NewReno sur un lien satellite face à des pertes en rafales.

Cette partie montre les différences de comportements entre différents protocoles TCP. Le protocole NewReno semble alors le plus adapté au satellite, parmi les variantes couramment implantées de TCP. C'est pour cette raison qu'il sera utilisé par la suite. Toutefois, cette utilisation n'améliore pas de manière effective les performances du système. Il faut passer par une optimisation réelle du comportement sur satellite.

#### 5.4.4.2. L'enjeu de l'intégration de PEPs dans l'architecture hybride

Des solutions sont envisageables pour améliorer le comportement de TCP sur satellite (cf. 3.5.2). Toutefois, pour l'architecture hybride, il n'est pas question que les contraintes techniques influencent d'une part les utilisateurs du système et d'autre part les réseaux terrestres constituant la Toile. Or un type de solution permet de garder une transparence pour les utilisateurs de bout en bout : les PEPs. Ces solutions mettant en œuvre des passerelles, ont été l'objet de la section 3.5.2.3.

Pour l'architecture hybride, l'intégration des PEPs représente un véritable enjeu.

D'une part ils permettent une optimisation du comportement de TCP sur lien satellite, en incorporant de manière transparente les modifications telles que celles présentées dans la partie 3.5.2, sans influencer le système de bout en bout, mais uniquement sur le système satellite (*spoofing*).

D'autre part, le PEP peut devenir l'entité idéale pour unifier l'accès satellite. En effet, il ne s'agit pas uniquement d'utiliser ces systèmes pour TCP, mais comme un élément d'interface fondamentale de l'architecture, présentant une interface IP standard. En effet, les PEPs n'étant pas limité au niveau TCP, sont considéré comme des *modem-routeurs* dans notre architecture, traitant à la fois la sélection du mode, l'accès au système, la mise en place de FEC, la résolution d'adresse, l'encapsulation des flux IP... Cette solution permet alors d'isoler la spécificité de l'architecture dans une « boîte noire », rendant ainsi totalement transparent son utilisation par les utilisateurs finals. Ainsi les protocoles qui n'ont pas été prévus pour le satellite, alors que leur implantation sur un tel système est souhaitable comme la gestion de groupe avec le protocole IGMP (Internet Group Management Protocol) ou les protocoles de routage multicast IP, comme PIM-SM (Protocol Independant Multicast – Sparse Mode), peuvent trouver dans le *proxy* une méthode pour implanter un protocole optimisé au système, en respectant la transparence.



Cette utilisation des PEPs se place comme un atout de choix pour l'architecture hybride, rentrant pleinement en accord avec les travaux de l'ETSI recherchant un interfaçage standard des systèmes satellite, BSM (Broadband Satellite Multimedia) [132] [133].

**5.4.4.3. L'utilisation de PEP pour un accès Internet par satellite**

Pour conclure cette partie, nous proposons d'observer l'amélioration de la mise en place de PEP pour un accès Internet unidirectionnel, avec un lien retour de débit utile estimé à 9.6 Kb/s et une voie aller à 1 Mb/s. La modèle de perte reste le même que précédemment, ainsi que les délais des différentes liaisons. Toutefois nous considérons que les traitements effectués au niveau des PEPs ajoutent 2 ms de délai dans chaque sens. Nous analyserons dans ce cadre l'évolution du débit d'un transfert FTP au cours d'un temps simulé de 200 s.

On peut tout d'abord noter que cette liaison à un fort coefficient d'asymétrie, de l'ordre de 1/100 contre 1/37 pour le rapport acquittement sur datagrammes. Il est donc naturel que sans changement, le débit aller soit très limité. Une série de simulations a alors été mise en place pour observer comment un PEP pouvait améliorer cette communication.

Les débits moyens observés pour un temps simulé de 200 s sont reportés dans le tableau suivant (Tableau XIV). On notera :

- (0) - Aucune modification, TCP NewReno.
- (1) - Augmentation de la fenêtre initiale et maximale.
- (2) - Utilisation de TCP SACK.
- (3) - Utilisation d'acquittements retardés.
- (4) - Utilisation de filtrage d'acquittements (au niveau du *buffer* d'émission).
- (5) – Sessions Multiples (ici 2).

Tableau XIV. DÉBIT MOYEN OBSERVÉ SUR 200 S EN FONCTION DU TYPE D'AMÉLIORATION APPORTÉ PAR LE PEP

Type d'amélioration	0	1	2 (PEP 1)	3	4	5	2+3	1+2+3 (PEP 2)	1+2+3+4 (PEP 3)	1+2+3+4+5 (PEP 4)
Débit moyen sur 200s (Kb/s)	337	339.1	346.1	662.1	868.2	348.3	666	682.1	880.2	903.7

Ces expérimentations montrent que l'amélioration qui a le plus de poids dans ce type d'accès est le coefficient d'asymétrie, à savoir le poids des acquittements par rapport aux données reçues. Ainsi lorsque l'on utilise des acquittements retardés, ou mieux, du filtrage d'acquittement, les performances du système sont tout de suite grandement augmentées (augmentation de 158% par rapport à 0).

On retrouve notamment les résultats tracés dans la figure ci-dessous (Figure 5.29), reportant plusieurs quatre des améliorations, nommées PEP 1, 2, 3 et 4.

Cette courbe permet de montrer les différentes améliorations. On peut ainsi noter trois grandes familles de courbes.

- Celles qui ne touchent pas fondamentalement au flux d'acquittements (sans PEP et PEP n°1). Le débit reste alors inférieur à  $D_{MAX}$  (36), c'est-à-dire 360 Kb/s.
- Celles qui implantent les acquittements retardés (PEP n°2). Le flux d'acquittement étant à peu près divisé par deux, le débit maximum est alors d'environ 720 Kb/s.
- Celles qui utilisent des techniques de filtrage/suppression d'acquittements (PEP n°3 et n°4). Dans ce cas le débit maximum atteignable peut avoisiner le débit du lien aller.

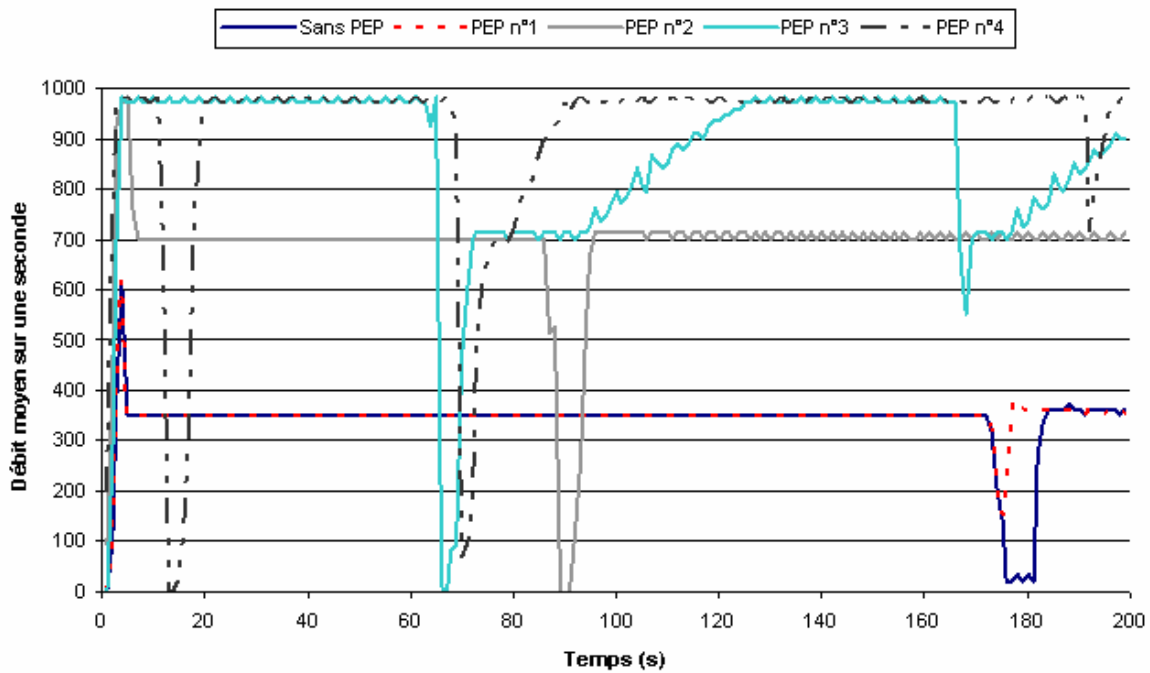


Figure 5.29 Comparaison entre l'utilisation d'une connexion sans PEP et une connexion avec PEP sur un lien satellite unidirectionnel 1 Mb/s avec lien retour terrestre de 9.6 Kb/s

Cependant quelques éléments viennent nuancer cette tendance générale. On peut remarquer tout d'abord, l'influence de TCP SACK sur les pertes qui permet de rétablir la connexion TCP plus rapidement que TCP NewReno. Dans ce cadre TCP SACK peut s'avérer une solution de choix pour l'implantation d'une solution sur un médium très bruité.

On peut noter ensuite que la suppression d'acquittement, comme elle est réalisée ici, a une influence néfaste sur la réactivité du système face aux pertes. En effet la suppression d'acquittement par gestion de la taille des *buffers* peut induire en cas de perte une grande latence quant au rétablissement d'une communication à plein régime. En effet suite à une perte, il est possible que la suppression d'acquittement élimine ceux contenant les paquets manquants, induisant malgré tout un *time out* et le début d'une phase de *congestion avoidance*. Or la suppression d'acquittement couplée aux acquittements retardés implique une phase de *slow start* longue qui peut être améliorée au début de la communication en choisissant une fenêtre initiale plus grande. Mais dans ce cas, celle-ci repart à 1, et le rétablissement d'une communication à plein régime en est grandement affecté. Plusieurs solutions à ce problème existent, la régénération des acquittements détruits, ou l'utilisation de sessions multiples (PEP n°4), qui peuvent limiter voire résoudre ce défaut.

Les PEPs offrent une amélioration adaptée du comportement de TCP, permettant de rentabiliser le lien, même dans le cadre d'une asymétrie de 1/100.

#### 5.4.5. Conclusion sur l'accès Internet

Cette partie a justifié les deux architectures de service choisies pour les accès Internet standard et évolué. Toutefois, un point n'a pas été abordé pour l'accès Internet évolué, celui de l'accès multiple. En effet nous avons considéré dans cette étude que le dimensionnement du système n'était pas notre priorité. L'étude s'est donc concentrée sur l'utilisation d'un lien satellite unidirectionnel et d'un lien bidirectionnel. Si les performances obtenues aux cours de nos différentes simulations sont encore loin des débits optimaux, l'accès Internet par satellite reste, de

loin, supérieur à un accès classique bas débit, pouvant même se rapprocher parfois d'un accès de type ADSL.

L'architecture hybride a ainsi un véritable intérêt à intégrer un tel service, basique pour la plupart des zones sans accès haut débit<sup>1</sup>. De plus s'il est vrai que le mode privilégié pour l'accès Internet reste le mode transparent, le système hybride peut jouer de sa capacité régénérative *multi-spots* pour économiser une partie de la bande passante pour les transferts de données importants.

Pour un retour *via* satellite, le mode transparent est conseillé dans la mesure où les débits sont relativement faibles et le transparent offre un simple bond pour l'accès à la *gateway*. Le mode régénératif offre toutefois des perspectives quant à une allocation dynamique se fait à bord, gagnant en temps de réponse du système, ce mode pouvant être utilisé uniquement pour la signalisation.

Tout au long de cette étude, nous avons proposé un certain nombre de solutions augmentant les performances du trafic en particulier sur la voie aller. Il ressort en effet que le satellite n'est pas un médium adapté à TCP, comme nombre d'études le constate. L'utilisation des PEPs semble être alors une solution de choix pour assurer à la fois l'adéquation au service d'accès Internet et la transparence de la solution hybride (c'est-à-dire n'apporter aucune contrainte sur les utilisateurs du système). Les PEPs se positionnent comme la clef de voûte de l'architecture hybride, proposant d'intégrer les fonctionnalités spécifiques du système en dehors du système utilisateur, devenant par la même un modem d'accès au lien satellite, et offrant ainsi une interface IP standard.

## 5.5. La vidéo à la demande

La vidéo à la demande est un service très éloigné de l'accès Internet. Même si elle peut être facilement couplée à ce dernier dans le cadre d'accès à hauts débits, il n'en reste que ces besoins sont très différents : une voie aller à fort débit, une voie retour non indispensable, un support physique fortement diffusant, ou mieux supportant le *multicast*. Or, ces caractéristiques sont celles proposées par l'architecture hybride.

Cette partie propose d'étudier l'intérêt d'un tel service pour la solution hybride. Pour cela nous comparerons un système transparent à un système régénératif, montrant comment le système hybride propose un compromis fructueux.

La première section (5.5.1) présente une comparaison entre le *multi-spots* et le *mono-spot*, qui est en fait l'intérêt majeur du système régénératif comparé au système transparent pour ce service. La section 5.5.2 discute brièvement de l'intérêt d'une voie retour pour la VoD.

### 5.5.1. Comparaison entre multi-spots et mono-spot

Comme nous avons pu le constater dans l'étude de ce service (4.1.1), les besoins de la VoD sont très dépendants de deux facteurs : le type de service proposé, et la répartition de leurs clients.

Les demandes instantanées forment un type de service très coûteux et inaccessible pour des particuliers. S'il s'agit d'un film de bonne qualité, il faut observer que le débit peut avoisiner alors 4 Mb/s à 5 Mb/s (l'équivalent d'une chaîne télévisée). L'utilisation du mode régénératif est donc conseillée pour éviter un gaspillage de ressources excessif. Un tel service peut être envisagé pour des chaînes télévisées d'hôtels, de navires de plaisance, ou encore pour des avions. Dans ce cas, l'unique client est un groupe de récepteurs, la vidéo doit être distribuée à tous les membres du

---

<sup>1</sup> Ce type de régions représentera en France et en 2005, 75% des foyers.

groupe. Le choix du mode peut alors devenir un critère important de ce service. Pour cela cette analyse doit donc prendre en compte la répartition des différents récepteurs du flux vidéo.

Les services de quasi VoD semblent plus appropriés à un utilisateur particulier. Nous avons déjà discuté du délai d'émission de la vidéo dans ce cadre (cf. 4.1.1.2), l'associant à des seuils : un seuil temporel au-delà duquel le média doit être envoyé, et un seuil de requêtes à partir duquel il est possible d'envoyer le média, car rentable pour le fournisseur de services (FSI). Ainsi, pour des média récents et/ou à forte popularité, le seuil de requêtes est souvent atteint avant le seuil temporel, tandis que pour des média moins communs, c'est ce dernier qui sera *a priori* atteint en premier. Grâce aux réglages spécifiques pour chaque vidéo de ces deux seuils, le fournisseur de services pourra rentabiliser son émission de média. Toutefois, un autre critère a une importance dans une architecture hybride : la position des différents clients.

En effet s'il s'avère que pour certains média, les clients sont équitablement répartis dans la zone couverte du satellite, il est aussi possible que ces derniers soient concentrés sur des zones précises, et il est alors dommage de diffuser la vidéo sur la totalité de la couverture du satellite alors qu'une faible zone de celle-ci est concernée. C'est dans ce cadre que le *multi-spots* rentre en jeu, et que le mode régénératif peut avoir un intérêt pour le service de VoD.

Observons tout d'abord différentes raisons qui peuvent pousser les clients d'un service à être géographiquement concentrés :

- Une notion temporelle : les services de VoD sont bien plus utilisés en soirée après le dîner. Dans ce cas on peut découper la couverture en bandes longitudinales avec une plus forte probabilité d'avoir une demande dans une bande donnée, cette probabilité variant avec l'heure effective dans la bande.
- Une notion nationale : en fonction de la législation des sorties de films dans différents pays, il est très possible qu'un média ne soit disponible que pour un groupe de pays. Dans ce cas, on connaît directement quels sont les spots concernés ou pas. De plus peuvent être prises en compte ici des notions de langues pour les média, ou encore des considérations de nouveautés pour certaines régions, *etc...*
- Une notion d'ouverture de services : il est possible que le FSI n'offre pas son service sur toute la couverture du satellite, pour des raisons de restriction de marché, de fiscalité, *etc...* Ces zones sont alors des zones mortes pour le FSI. Il est aussi possible que le service soit nouveau dans certaines régions, le nombre d'abonnés étant alors moins important.

Dans ces cas, deux possibilités s'offrent au FSI : ne pas se soucier de cette répartition et émettre quand le seuil de clients est atteint en mode transparent, ou considérer que le mode régénératif est plus rentable, et envoyer ainsi sur les *spots* uniquement concernés. Dans cette dernière possibilité, il est alors concevable d'étudier les seuils par faisceaux, et de décider de ne pas envoyer sur un *spot* donné s'il n'y a pas assez de clients dans ce dernier.

Pour cette étude, il est très difficile d'avoir des données réalistes et réelles sur le coût d'utilisation de telles technologies. En effet ce coût dépend intrinsèquement du nombre total de faisceaux du système, et du nombre de faisceaux utilisés pour un flux donné. Toutefois, il est possible de faire une comparaison sur le gain en débit descendant, de la même manière que l'analyse menée dans la partie 5.4.2.3. Observons donc du point de vue de l'opérateur système quel gain en débit il peut obtenir en utilisant un système transparent, un système régénératif à multifaisceaux, ou un système hybride.

Dans ce cadre notons  $d$ , le débit utilisé par l'émission d'une vidéo. Soit  $x_t$  et  $x_r$ , le nombre maximal d'émission de vidéos en simultanées respectivement pour un système transparent et

régénératif. Pour que le service soit rentable, on considérera que le nombre de vidéos émis en simultanées est le nombre maximal.

Dans un cas purement transparent, le débit consommé sur la couverture est donc toujours de  $x_t * d$ .

Pour un système purement régénératif, le débit consommé sur la couverture dépend de la répartition des clients sur les différents *spots*. Si l'on note  $n_i$ , le nombre de spot utilisé par le  $i^{\text{ème}}$  flux vidéo, on peut noter le débit restant de la forme, où  $D_{MAX}$  est le débit maximum utilisable par le FIS :

$$(44) \quad D_i = n \times D_D - \left( \sum_{i=1}^n n_i \right) \cdot d = n \times k \times D_{u_r} - \left( \sum_{i=1}^n n_i \right) \cdot \frac{D_{MAX}}{x_r}$$

Dans un premier temps, si les clients du service sont uniformément répartis pour chaque flux vidéos, on a alors la relation suivante :

$$(45) \quad D_i = n \times k \times D_{u_r} - x_r \times n \times \frac{D_{MAX}}{x_r} = n \left( k \times D_{u_r} - D_{MAX} \right) \geq 0$$

Soit une valeur maximale pour  $D_{MAX}$  de  $k * D_{u_r}$ , valeur inférieure au cas transparent, égal à  $D_{u_r}$ . De plus dans ce cas, le FIS paie bien plus cher sa bande passante que dans le cas transparent, sans avoir la même capacité.

Si l'on considère le cas inverse, où les clients pour chaque flux sont concentrés dans un seul *spot*, on retrouve le cas unipoint étudié dans l'accès Internet, avec l'expression (46):

$$(46) \quad D_i = n \times k \times D_{u_r} - x_r \frac{D_{MAX}}{x_r} = (nk - 1) D_{u_r}$$

Entre ces deux extrêmes, on retrouve toutes les variations dues à la répartition des différents clients intéressés par un même média. Parmi elles certaines rendent le système transparent plus intéressant (comme le premier cas), et d'autres favorisent le *multi-spots* régénératif (comme ce dernier cas), puisque l'utilisation d'un nombre de *spots* restreints permet de sauvegarder une grande partie de la capacité du satellite, et donc de baisser le prix de l'utilisation du lien.

Deux données importantes manquent toutefois pour poursuivre cette étude de manière plus poussées : le coût du système régénératif en fonction du nombre de *spots* total et utilisé, et des données sur la répartition des groupes d'utilisateurs. Toute étude plus poussée ne saurait être alors qu'un exemple sans fondement concret.

Néanmoins, il est possible de considérer l'alternative proposée par le système hybride. En effet, nous venons de voir qu'il y a des cas où le système transparent est plus rentable, et d'autres où c'est au contraire le système régénératif. Toutefois, la décision de quel système doit être utilisé, en fonction des données du service et des coûts relatifs de l'utilisation de la liaison satellite doit être effectuée une fois pour toutes. Si le coût du système est une réalité qui risque peu de changer, le comportement des clients est plus difficile à prévoir. Ainsi il peut arriver que le système choisi ne soit pas toujours le mieux pour une période donnée. Le système hybride permet d'offrir une approche plus fine du problème. En fonction des données de répartitions des différents clients, le choix du mode peut ainsi être fait pour chaque média, profitant du même coup du prix le plus avantageux.

Le système hybride propose alors une méthode flexible et rentable pour un service de VoD.

### 5.5.2. Influence du lien retour

Le lien retour n'a pas toujours lieu d'être pour un service de VoD. Même si certains protocoles de niveau transport ou applicatif utilise le lien retour pour une distribution fiable des données, il est aussi possible d'utiliser un codage FEC à fort pouvoir correcteur pour assurer cette fiabilité, au prix d'une consommation de bande passante accrue. En effet, lorsqu'il s'agit de VoD instantanée, la distribution de la vidéo revient à de la distribution télévisée, et il n'est pas possible alors de mettre en place des mécanismes de retransmissions au niveau transport.

Enfin, si un lien retour n'est pas un prérequis au service de VoD, son couplage commun avec un accès Internet est un élément important, permettant d'envisager la mise en place de mécanismes de reprises d'erreurs. Si ces considérations dépassent en partie le cadre de notre exposé, nous pouvons noter que ces mécanismes impliquent une faible consommation de la voie retour, utilisant souvent des systèmes de NACK à suppression. Ainsi la fiabilisation de la VoD n'a pas une influence majeure sur la voie retour, à l'exception des solutions utilisant des réseaux P2P, où le trafic engendré risque de rentrer en conflit avec l'accès Internet, et même de l'utilisation de PEPs.

### 5.5.3. Conclusion sur la Vidéo à la Demande

Nous avons vu précédemment que les services de VoD proposent une attrayante perspective pour le satellite. Ainsi, des offres commerciales sont en place depuis quelques années. De plus, un tel service semble vouloir s'étendre rapidement sur le satellite à la distribution plus générale de contenu. Des services commerciaux proposent alors de télécharger plusieurs types de contenus (DVD, jeux, MP3...) *via* un système satellite [92]. Ces offres ont tout intérêt à exploiter le satellite comme un outil de diffusion. Elles mettent donc en place un système de *timers* et de seuils, équivalents à ceux proposés précédemment. Le *multicast* apparaît ici un outil de choix, et son intégration est un atout de choix pour une meilleure gestion des ressources du système.

Le système hybride se positionne comme une opportunité. D'une part il permet de choisir au cas par cas le meilleur mode à utiliser en fonction de la répartition des différents clients sous la couverture satellite. D'autre part, la gestion du *multicast* par le mode régénératif permet d'offrir une adéquation parfaite du système aux besoins du FIS.

## 5.6. L'interconnexion de réseaux privés

Nous avons étudié, au cours de ces différentes parties, un grand nombre de caractéristiques du système. Pour finir cette étude nous proposons d'aborder le dernier service proposé dans le cadre de cette intégration : l'interconnexion de réseaux privés.

Cette partie est essentiellement l'occasion d'aborder le principe de multiplexage bord, qui est l'intérêt majeur de l'utilisation d'un système régénératif, puisqu'il permet d'éviter le double bond dans une communication inter RCST. Dans ce cadre l'architecture hybride se positionne comme une solution clef, permettant de basculer d'un mode à l'autre en fonction du type de trafic à traiter.

La section 5.6.1 abordera ce point. La partie 5.6.2 étudiera l'impact d'une couverture multifaisceaux et enfin la partie 5.6.3 conclura cette étude, avec notamment quelques éléments sur la gestion de la QoS à bord.

### 5.6.1. Performances du multiplexage embarqué

Une des différences fondamentales entre un système transparent et un satellite régénératif dans l'interconnexion de VSATs est la nécessité de passer par une *gateway* ou non. On nomme généralement réseau étoilé (*star network*) une architecture centralisée par une *gateway*, et réseau maillé (*mesh network*) l'autre cas.

Dans cette étude trois facteurs vont intervenir : le coût du système, le délai, et les pertes dues au support physique. Le coût du système sera traité dans la prochaine partie avec l'étude de l'intérêt du *multi-spots*, et nous nous focaliserons ici sur l'étude des deux autres facteurs.

### 5.6.1.1. Les hypothèses d'étude

Nous considérons dans cette partie une interconnexion entre deux réseaux. Ces réseaux seront modélisés par une unique station. Le délai d'un bond satellite sera pris à 254 ms pour un lien transparent et 255 ms pour un lien régénératif (le traitement bord étant majoré à 1 ms).

Les débits des liens sont fixés à 2 Mb/s dans les deux sens.

L'influence de la méthode d'accès dynamique ne sera pas étudiée ici, puisque si elle doit être mise en place, elle le sera dans les deux cas, et le même nombre de fois<sup>1</sup>.

Le modèle de pertes restera celui proposé dans la partie 5.4.2.1.2, avec des rafales de moyenne quatre paquets et un PLR de  $10^{-3}$  par liaison satellite, et ne sera introduit que dans l'étude de l'influence des erreurs. TCP Reno est utilisé ici, et aucun PEP n'a été mis en place pour comparer ces architectures.

La figure suivante (Figure 5.30) présente ce modèle.

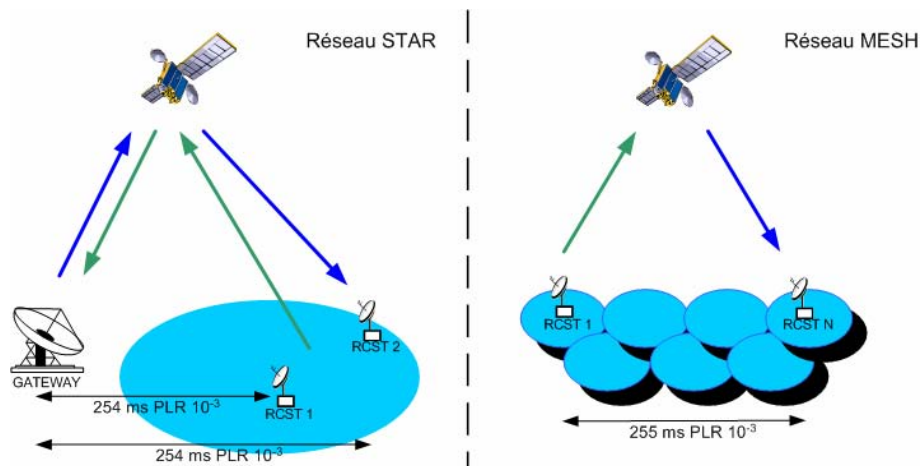


Figure 5.30 Topologie étoilée et maillée

### 5.6.1.2. L'influence du délai sur la communication entre les deux réseaux

L'impact du choix du réseau sur le délai est des plus notable. Le système de type *star* propose un délai de 508 ms entre les deux terminaux, tandis que le réseau *mesh* propose un délai de 255 ms. Ainsi si l'on considère la formule (34), on obtient dans un cas un débit maximum avec TCP d'environ 516 Kb/s dans le cas étoilé, contre un peu plus de 1 Mb/s dans l'autre cas. Nous avons déjà observé qu'avec l'utilisation de PEPs, et notamment l'augmentation de la taille maximale de l'*advertized window*, ce débit peut être dépassé.

Toutefois, cette observation témoigne d'un autre problème, l'impact du RTT sur la réactivité du système. Ainsi les applications à fortes contraintes temporelles telles que la VoIP ne peuvent être implantées sur un système proposant un RTT de 1016 ms, quand la borne maximale du délai envisageable pour le confort utilisateur est de l'ordre de 500 ms [97].

<sup>1</sup> En effet, dans le cas d'un système étoilé, la *gateway* a accès directement au support. Le seul problème qu'il peut advenir est de la congestion à l'émission. Nous considérerons que la réservation de bande passante pour le flux est suffisante, et que les autres trafics n'influencent pas alors sur la communication entre les deux réseaux.

Ce RTT élevé introduit un temps important de mise en place d'une communication à haut débit. Ainsi la simulation suivante compare ces deux accès pour le temps moyen d'un transfert FTP, en fonction de la taille de ce transfert (Figure 5.31).

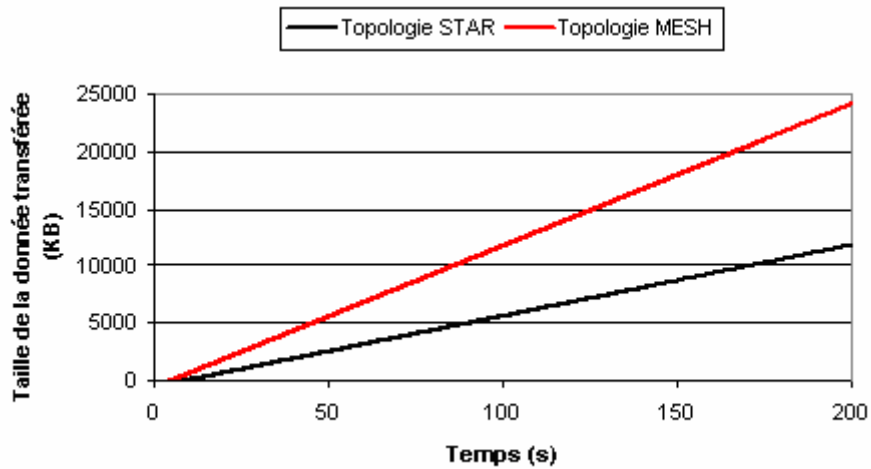


Figure 5.31 Comparaison du temps de transfert FTP entre une topologie *star* et *mesh* sans perte

Ces deux courbes montrent clairement un facteur voisin de deux entre les débits du réseau étoilé et maillé. Cette relation est directement liée au rythme des acquittements TCP qui autorégule de débit du flux. La mise en place d'une fenêtre initiale plus grande et d'une fenêtre maximale plus grande permet d'améliorer les performances des deux flux, mais resserre l'écart que pour un transfert très important.

### 5.6.1.3. L'influence du taux de pertes paquets sur les deux systèmes

Un autre facteur influence grandement les performances de ces architectures, les pertes. En effet, nous avons vu dans l'étude de TCP sur satellite l'impact que pouvait avoir les pertes sur le débit maximum du lien, cette influence étant d'autant plus importante que le RTT est élevé (21). La figure suivante (Figure 5.32) trace l'évolution du débit applicatif maximum en fonction du PLR pour le cas d'une topologie *star* et d'une topologie *mesh*. Sur cette figure, on constate le coefficient lié au RTT qui lie ces deux courbes. Toutefois, le passage par deux liens satellites, implique deux fois plus de pertes dans le cas *star* que dans le cas *mesh*, soit un débit d'environ 315 Kb/s pour le réseau étoilé, contre 887 Kb/s dans l'autre cas.

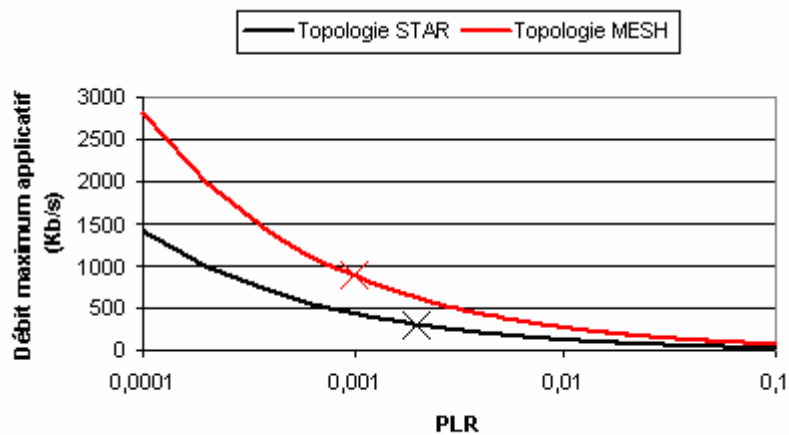


Figure 5.32 Comparaison de l'évolution du débit applicatif maximum en fonction du PLR pour une architecture étoilée et une architecture maillée



Nous proposons alors d'observer dans un dernier temps les résultats observés après simulations sur l'évolution des débits dans un et l'autre cas (Figure 5.33).

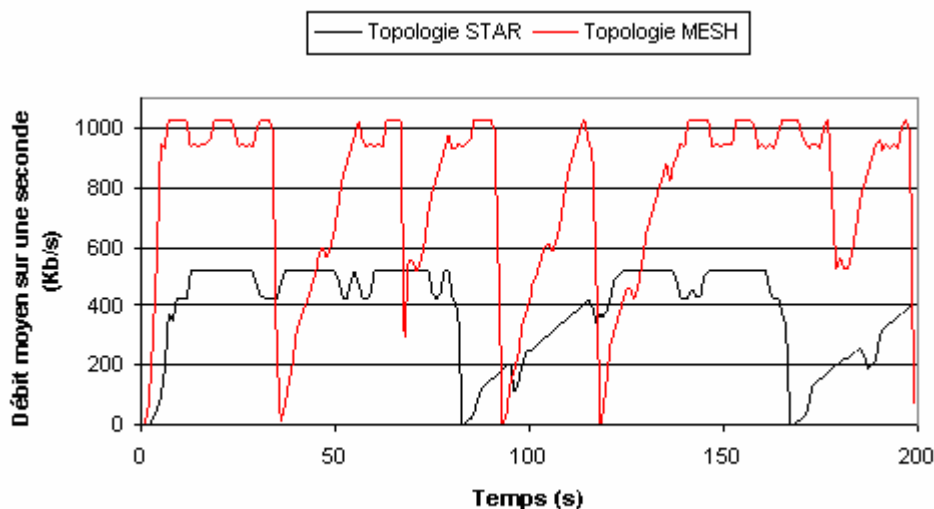


Figure 5.33 Évolution du débit moyenné sur une seconde au cours du temps pour une topologie de type *star* et *mesh*

Bien que cette courbe ne trace qu'un exemple, elle permet de montrer la nature incompressible de la différence du RTT entre ces deux réseaux. Une topologie étoilée met alors plus de temps pour se récupérer son débit après une perte, tandis que le RTT plus faible du réseau maillé offre une meilleure réactivité aux pertes.

Dans ce cadre, l'utilisation du mode régénératif du système hybride est une meilleure solution pour les transferts demandant un délai plus court. De même, il apparaît que ce mode peut apporter un gain important en débit sur un médium très bruité.

### 5.6.2. Intérêt du *multi-spots* pour l'interconnexion

Dans la mesure où l'on utilise le mode régénératif pour faire du simple bond, le *multi-spots* présente un intérêt évident pour économiser la bande passante.

De même pour des communications à débit élevé entre uniquement deux ou trois sites, ce mode peut apporter une économie certaine.

En revanche, lorsqu'il s'agit de lourd transfert entre un grand nombre de réseaux privés, la sélection du mode régénératif n'est pas toujours souhaitable dans la mesure où d'une part il ne s'agit pas d'applications pour lesquelles le délai est de l'importance, et d'autre part il y a peu d'intérêt d'un point de vue coût à choisir le mode régénératif pour économiser quelques faisceaux, voire aucun.

### 5.6.3. Conclusion sur le service d'interconnexion

Nous avons vu ici que l'interconnexion de réseaux privés pouvait trouver des opportunités réelles dans l'utilisation d'un système régénératif, notamment pour des applications à contraintes temporelles. L'utilisation d'une interconnexion de type *star* présente toutefois un intérêt économique pour les communications mettant en place des transferts importants de données à un grand nombre de réseaux disséminés sur une large partie de la couverture.

Le système hybride trouve donc parfaitement sa place dans un tel service, jouant de sa dualité pour convenir aux différents besoins du service d'interconnexion.

Un autre atout important du mode régénératif est sa capacité à gérer la QoS. S'il est vrai que d'un point de vue délai, le système ne permet pas de gagner une quelconque marge significative, la QoS à bord peut toutefois être une notion clef pour trier les flux et permettre de gérer d'autres paramètres du trafic, comme la gigue. Ce point reste toutefois hors cadre de cette étude, et ne saurait être abordé plus avant ici.

### ***5.7. Conclusion sur cette évaluation***

Au cours de cette étude nous avons montré que le système hybride n'était pas une solution plus lourde à mettre en place qu'une quelconque autre. Au contraire, les choix effectués notamment pour l'encapsulation, ou encore la possibilité d'agréger les PIDs permet au système d'avoir une signalisation efficace, pouvant même jouer de son mode régénératif pour gagner en temps de réponse du système (notamment pour l'allocation de ressources).

Nous avons proposé tout au long de cette partie une étude de l'intégration de différents services sur le système hybride. Cette étude a permis de montrer d'une part que ces services avaient leur place dans une architecture telle que la nôtre, et que l'architecture hybride, en plus de pouvoir intégrer des services différents sur le même système, propose par ses deux modes une grande flexibilité. C'est cette flexibilité qui permet au système de s'adapter de la meilleure façon, tant d'un point de vue performances que coût, aux différents besoins des trois services étudiés.

Au cours de cette étude, nous avons pu souligner une solution permettant de gérer la transparence de l'architecture. En plus d'améliorer le comportement des nombreuses applications utilisant TCP, ils offrent une interface transparente et standard aux utilisateurs, permettant d'isoler le lien satellite et sa gestion dans un modem.

Cette étude n'a pas la prétention d'être complète, dans la mesure où l'architecture hybride est flexible, dépendante du choix technologique de son implantation. Il n'était pas question ici de faire une étude de protocoles ou de dimensionnement spécifique. En revanche, cette analyse a su montrer d'une part la validité de notre approche, et d'autre part les apports du concept hybride peut apporter : flexibilité et adaptabilité. Nous proposons ici une architecture qui s'adapte aux besoins des services et des utilisateurs finals, évitant le piège de la spécificité des solutions, comme de leur non-transparence. Cette solution ne peut être envisagée qu'en traitant IP comme un élément fédérateur de l'architecture, et non d'un point de vue extérieur et applicatif.



## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous proposons dans ce chapitre de résumer notre étude et ses contributions, puis de proposer, dans un dernier temps, différentes perspectives à ces travaux, concluant sur une vision à long plus terme du couplage entre le monde des télécommunications spatiales et celui des réseaux terrestres.

### La conclusion

La problématique de l'intégration des systèmes satellites dans les réseaux terrestres s'est construite autour du succès des satellites GEO avec la diffusion de la télévision numérique, et de la vague actuelle d'intégration de services dans les réseaux terrestres. Dans un monde où IP se présente comme une solution de convergence forte, de nombreux travaux envisagent le déploiement de réseaux IP intégrant un lien satellite géostationnaire, notamment au travers des systèmes DVB. Des propositions propriétaires existent, émanant directement des constructeurs. Les limites de ces systèmes dédiés font d'eux des solutions difficilement adaptables à des besoins plus généraux des utilisateurs. Les communautés satellite (ETSI avec BSM) et Internet (IETF avec le groupe de travail IP sur DVB) tentent de permettre une cohabitation efficace et pérenne de ces deux architectures de communication très différentes.

Dans ce contexte nous nous sommes interrogés sur la définition d'une architecture capable de prendre en compte les caractéristiques des deux domaines, et de les unifier dans une seule architecture, grâce à la souplesse mais aussi au fort pouvoir fédérateur d'IP, démarche que nous avons présentée dans le premier chapitre de ce mémoire.

Après avoir rappelé les caractéristiques des systèmes spatiaux de type DVB, un second chapitre a décrit des normes DVB-S, DVB-SI et DVB-RCS dans leur ensemble.

Nous avons alors étudié et analysé dans le chapitre 3 les technologies disponibles pour la définition d'une telle architecture. Nous avons observé dans un premier temps comment la norme ETSI propose de véhiculer d'autres flux que ceux de type MPEG-2. Une solution classique utilisant MPE a alors été analysée, concluant à des limites que le DVB-RCS, le protocole d'encapsulation ULE et la nouvelle génération de satellite se proposent de résoudre. Pour illustrer ce point, l'architecture régénérative DIPCAST a alors été étudiée. Si d'autres problèmes protocolaires subsistent, comme le comportement de TCP mal adapté au satellite, nous avons observé qu'il existait un nombre important de solutions à chacun de ces problèmes (notamment les PEPs). La conclusion de ce chapitre a mis en évidence une problématique centrale : si les solutions existent, il y a un manque d'une architecture fédératrice et pérenne, apportant une solution entre les satellites actuels et futurs et intégrant différents services porteurs.

Après avoir analysé les besoins architecturaux de différents services ainsi que leur adéquation avec le support satellite, le chapitre 4 a défini les objectifs d'une architecture répondant à cette problématique. Sur ces bases, nous avons proposé et décrit une solution, l'architecture hybride. Celle-ci présente une grande flexibilité grâce à l'intégration de deux charges utiles dans un seul système satellite. Elle propose une interface IP rendant l'utilisation du système satellite transparente pour l'utilisateur final et permettant de sélectionner le mode du système utilisé. De nombreux choix technologiques ont été faits dans cette proposition, justifiés par le

contexte actuel du monde satellite. L'une des forces majeures de cette architecture (c'était un objectif fondamental) est cependant que chacun de ces choix peut être remis en question au grès des évolutions technologiques.

Le chapitre 5 a été consacré à l'analyse de cette architecture en considérant son adéquation aux différents services et ses apports par rapport à des solutions plus classiques. Une étude par niveau de service a été menée pour cela. Après l'analyse du niveau 1 et de son influence sur le reste de l'architecture, l'étude du niveau liaison a permis de montrer le coût relatif de la signalisation des flux IP, concluant sur l'absence d'un ajout d'*overhead* induit par la nature hybride du système, et même sur de meilleures performances que les solutions classiques grâce à l'encapsulation ULE et à des évolutions possibles de la charge utile régénérative. Après l'insertion naturelle dans l'architecture d'IP comme l'élément fédérateur, la fin de ce chapitre a été consacrée à l'analyse du déploiement des trois services précédemment étudiés. L'accent a été mis sur l'accès Internet, démontrant qu'il offre une véritable perspective pour les zones sans l'accès au haut débit. Au-delà de l'intégration manière transparente ces services, l'architecture hybride offre une grande souplesse dans leur déploiement, leur proposant une alternative économiquement intéressante, et adaptée à chacun de leur flux.

Notre contribution se situe donc sous deux formes distinctes :

- Une synthèse autour de la mise en œuvre d'IP sur satellite, couplant état de l'art et analyse critique. Mis à part le savoir-faire qu'il représente, ce point a voulu souligner le fait que, si le satellite est souvent considéré comme une technologie de niche, il se positionne comme une des technologies qu'il faudra intégrer pour répondre aux besoins des utilisateurs sans un accès haut débit dans les temps à venir (25% des foyers en France en 2005).
- Une proposition décrivant le concept de système hybride. Cette architecture est détaillée dans ce mémoire et intègre différents mécanismes (différentiation des modes, résolution d'adresse, *etc.*...) et des évolutions possibles. Un autre élément important de cette proposition est son inscription dans une démarche d'uniformisation du monde satellite, en proposant IP comme la couche fédératrice de l'architecture.

## Les perspectives

Dans un cadre plus global, une perspective fondamentale pour le monde satellite est la normalisation, ou tout du moins l'uniformisation. Pour cela, l'intégration d'IP comme un élément central des architectures satellites nous semble une étape nécessaire comme nous l'avons décrit dans cette étude. Des travaux tels que BSM ou ULE, s'inscrivent parfaitement dans ce sens en se focalisant sur l'interaction entre les niveaux protocolaires liaison et réseau.

Cette optique générale touche intrinsèquement les systèmes matériels satellites, la normalisation conduisant à des coûts moindres (par exemple le projet SATLABS, visant l'interopérabilité des VSATs). Dans ce cadre, notre proposition s'insère parfaitement. En offrant un système hybride, cette solution permet d'envisager un développement plus massif des systèmes à charge utile régénérative, et donc une potentielle baisse des prix. La notion de coût nous semble un point capital pour l'étude d'une architecture satellite telle que la proposition décrite ici, et doit être menée dans un cadre industriel.

Toujours dans ce cadre de normalisation, nous avons suggéré au cours de cette étude l'utilisation des PEPs comme une solution à la mise en œuvre d'une telle architecture, permettant d'isoler les spécificités inhérentes au support satellite. L'intégration de ces éléments et leur description architecturale constitue une suite naturelle à nos travaux.

Les évolutions technologiques laissent penser que l'apparition d'une intelligence à bord est inéluctable, et que cette intelligence sera de plus en plus évoluée. L'architecture proposée ici a, par essence, la capacité d'intégrer ces évolutions qui constituent donc des perspectives d'études.

Ainsi, l'opportunité de faire de la commutation à bord au niveau SNDU s'avère un axe de recherches, ouvrant la voie à des études orientées système de commutation bord (de type ATM, Ethernet, AFDX, *etc...* ou spécifique), à des protocoles de mise à jour des tables de commutation utilisant l'auto-apprentissage, ou à de la gestion de QoS plus élaborées.

Si la mise en place d'un routeur à bord reste actuellement prématurée, CISCO a déjà fait une première expérience sur un LEO [107], et Alcatel travaille sur l'intérêt d'IP à bord. L'intégration d'IP à bord se constitue en véritable enjeu du monde satellite : savoir si la technologie embarquée est suffisamment fiable pour supporter des fonctionnalités de routage sans aucune maintenance matérielle pendant des années. Dès que ce cap sera franchi, le satellite deviendra un élément parmi d'autres des réseaux IP, soulageant de ce fait la signalisation terrestre du système satellite. Notre travail se place comme un préambule à cette intégration en prenant en compte IP comme un élément à part entière de l'architecture et non comme un simple interfaçage.

D'autres points peuvent encore être traités dans le prolongement de cette étude, comme des études de la mise en œuvre de cette architecture dans une architecture de QoS plus fine, ou encore l'influence du DVB-S2 sur un tel système. Notre proposition d'architecture globale, offrant une flexibilité par sa technologie comme ses protocoles, devra donc être enrichie par des études futures comme un dimensionnement pour un déploiement réel.



## Liste des communications

### Conférences Internationales avec actes (2)

- J. Fasson, E. Chaput, C. Fraboul, “*IP Multicast Architectures over Next-Generation GEO Satellites*”, VTC Spring 2004, 06/2004 (à paraître).
- J. Fasson, E. Chaput, C. Fraboul, “*GEO Satellites and their applications : service integration over DVB systems*”, WCC 2004, BSCS workshop, p 67-76, 08/2004 (à paraître chez Kluwer).

### Autres Conférences (1)

- J. Fasson, « *La nouvelle génération de satellites géostationnaires comme support d’IP* », EDIT 2004, 03/2004.

### Rapports de Recherche et de contrats (5)

- Riadh Dhaou, Julien Fasson, Farid Jaddi, Mahamadou Issoufou Tiado, André-Luc Beylot, “*Report on Performance Modelling and Congestion Control Applications : Performance issues of routing in ad-hoc networks and IP over GEO satellite links*”, Rapport de contrat, Network of Excellence NoE EURONGI : Livrable D.JRA.5.5.1 N°2, 06/2004.
- J. Fasson, E. Chaput, C. Benassy-Foch, C. Faure, F. Filali, « *Architecture système transparent pour le projet DIPCAST* », WP 1421, 2002
- J. Fasson, E. Chaput, « *Intégration du protocole IP multicast au système DVB-RCS/OBP* », WP 2820, 02/2003
- J. Fasson, E. Chaput, C. Fraboul, « *Évolutions d’architectures IP multicast sur satellite, rapport interne* », 02/2003
- A. Duverdier, J. Fasson, E. Chaput, F. Filali, C. Oustric, C. Benassy-Foch, « *Système satellite hybride DVB-RCS : Charge utile transparente et régénérative* », WP 1422, 08/2003.





## Références

- [1] G. Dicenet, "Le RNIS : techniques et atouts", ed. Masson, Collection CNET, 1990.
- [2] D.R. Glover, "NASA Experimental Communications Satellites", <http://roland.lerc.nasa.gov/~dgllover/sat/>.
- [3] Site historique de la NASA, <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/>.
- [4] "Generic coding of Moving Pictures and Associated Audio Information", Ref: ISO/IEC 13818-16.
- [5] Site officiel du DVB, <http://www.dvb.org>.
- [6] Advanced Television Systems Committee, "ATSC Data Broadcasting Standard", Ref: Doc A/90, 26/07/2000.
- [7] H. Benoit, "Digital television : MPEG-1, MPEG-2 and principles of the DVB system", Ed. Focal Press, 2 ed, ISBN 0240516958, 2002.
- [8] J.Yoshida, "DVB-X spec to deliver TV on cell phones", EE Times, [www.eetimes.com](http://www.eetimes.com), 10/03/2003.
- [9] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting (DVB);Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H)", ETSI EN 302 304, 06/2004.
- [10] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting ; DVB specification for Data Broadcasting", ETSI EN 301 192 v1.3.1, 01/2003.
- [11] H. D. Clausen, H. Linder, B. Collini-Nocker, "Internet over Direct Broadcast Satellites", IEEE Communication Magazine, Vol. 37, p. 146-151, 06/1999.
- [12] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting; Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services", ETSI EN 301 421, 08/1997.
- [13] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting; Specification for Service Information in DVB systems", ETSI EN 300 468, 06/2004.
- [14] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting; DVB specification for data broadcasting", ETSI EN 301 192, final draft, 06/2004.
- [15] E. Duros, W. Dabbous, H. Izumiyama, Y. Zhang, "A Link Layer Tunneling Mechanism for Unidirectionnal Links", RFC3077, 03/2001.
- [16] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting; Interaction Channel for Satellite Distribution Systems", ETSI EN 301 790, 03/2003.
- [17] C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitmajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding;turbo-codes," in IEEE Int. Conf. on Communications, (Geneva, Switzerland), pp. 1064-- 1070, 05/1993.
- [18] D. Giancristofaro, A. Bartolazzi, "Novel DVB-RCS standard Turbo-Code : details and performances of a decoding algorithm", Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications (DSP 2001), 10/2001.
- [19] F. Ananasso and G.L. Verde, "Networking Solutions for the 90's: Which Role for Satellites ?", AIAA, pages 148--157, 1994.
- [20] T. Inukai, D. Shyy, F. Faris, "On-Board Processing Satellite Network Architectures for Broadband ISDN", 14<sup>th</sup> AIAA International Communication Satellite System Conference, Washington, 03/1992.
- [21] E. Altman, A. Ferreira, J. Galtier, "Les réseaux satellitaires de télécommunication", Ed. Dunod, ISBN 2100048252, 1999.
- [22] I.F Akyildiz, S.H. Jeong, "Satellite ATM Networks: A Survey.", IEEE Communications Magazine, vol 35, p 30 à 43, 07/1997
- [23] G. Maral, "VSAT networks", John Wiley and Sons, 1995
- [24] R. Goodings, "IP over Satellite: Standardisation activities in ETSI/TC-SES",ITU Workshop on Satellites in IP and Multimedia, 12/2002.
- [25] Spacebridge, "DVB-RCS: Satellite Industry Needs, Opportunities and Issues", 2001, <http://www.spacebridge.com/documents/appnotes/WP-DVBRCSIN-DB.pdf>.
- [26] N. Abramson, "Internet Access Using VSATs", IEEE Communications Magazine, p60-68, 07/2000.
- [27] S. Chacón, J.L. Casas, A. Cal, R. Rey, J. Prat, J. de la Plaza, G. Monzat, P. Carrere, C. Miguel, F. J. Ruiz, "Networking over the IBIS System", IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit, 2002.
- [28] DIPCAST, projet RNRT, <http://www.dipcast-satellite.com>.
- [29] GEOCAST, projet EC IST, <http://www.ee.surrey.ac.uk/CCSR/IST/Geocast>
- [30] SATIP6 project, IST-2001-34344, <http://satip6.tilab.com>
- [31] Tachyon commercial web page, <http://www.tachyon.net>
- [32] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting; Implementation guidelines for Data Broadcasting", ETSI TR 101 202, 03/2003
- [33] IETF working-group IP/DVB, <http://www.erg.abdn.ac.uk/ip-dvb>
- [34] U. Reimers, "Digital Video Broadcasting. The International Standard for Digital Television", Ed. Springer, ISBN 3540609466, 2001.

- [35] G. Fairhurst, M.J. Montpetit, "Address Resolution for IP datagrams over MPEG-2 networks", Internet draft, 07/2004.
- [36] Digital Video Broadcasting, "Digital Video Broadcasting; Multimedia Home Platform (MHP) Specification 1.03", ETSI ES 201 812, 12/2003.
- [37] H.D. Clausen, B. Collini-Nocker, G. Fairhurst, H. Linder, "Simple Encapsulation for transmission of IP datagrams over MPEG-2/DVB networks", Internet Draft, 04/2002, Expiré.
- [38] G. Fairhurst, B. Collini-Nocker, "Ultra Lightweight Encapsulation (ULE) for transmission of IP datagrams over MPEG2/DVB networks", Internet Draft, 05/2004.
- [39] M. Sooriyanbandara, M. Forrest, G. Fairhurst, "Predicting performance of ROHC over Ultra Lightweight Encapsulation protocol", WCC 2004, Broadband Satellite Communication Systems, p 57-66, 27/08/04
- [40] G. Gebler, W. Fritsche, K. Mayer, A. Ritoux, "Standardisation Support enhanced IETF IP Encapsulation Techniques", Final Report, European Space Agency, n° 177477/03/NL/ND, 2004.
- [41] F. Filali, G. Aniba, W. Dabbous, "Efficient Support of IP Multicast in the Next-Generation of GEO Satellites", IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), p 413-425, Vol 22, n°2, 02/2004.
- [42] N.K.G. Samaraweera, "Return Link Optimization for Internet Service Proposition Using DVB-S Networks", ACM SIGCOMN Computer Communication Review, Vol. 29, n°3, 07/1999.
- [43] J. Fasson, E. Chaput, C. Benassy-Foch, C. Faure, F. Filali, "Architecture système transparent pour le projet DIPCAST", WP 1421, 2002.
- [44] X. Lobao, "SATLABS group: Leading the DVB-RCS standard to a commercial success", WCC 2004, Broadband Satellite Communication Systems, p 11-16, 27/08/04
- [45] M. Degermark, B. Nordgren, S. Pink, "IP Header Compression", RFC2507, 02/1999.
- [46] 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, H. Zheng, "RObust Header Compression (ROHC): Framework and four profiles: RTP, UDP, ESP, and uncompressed", RFC3095, 07/2001.
- [47] M. Montpetit, M. Schmidt, G. Fairhurst, B. Collini-Nocker, H. Linder, H. Tork, "IP over DVB: Study of Encapsulation and Protocol Performance", Final Report, 2004.
- [48] Global Communication & Services (GCC), produit Highflex converter, <http://www.gcs-salzburg.at/> .
- [49] M.J. Montpetit, G. Fairhurst, B. Collini-Nocker, H. Linder, "A Framework for transmission of IP datagrams over MPEG-2 networks", Internet Draft, 07/2004.
- [50] J. Fasson, E. Chaput, "Intégration du protocole IP multicast au système DVB-RCS/OBP", WP 2820, 02/2003
- [51] J. Fasson, E. Chaput, C. Fraboul, "IP Multicast Architectures over Next-Generation GEO Satellites", VTC 2004 Spring, 06/2004.
- [52] J. Fasson, "La nouvelle génération de satellites géostationnaires comme support d'IP", EDIT 2004, 03/2004
- [53] H.L. Truong, W.W. Ellington, J.Y. LeBoudec, A.X. Meier, J.W. Pace, "LAN Emulation on an ATM Network", IEEE communications Magazine, Vol 33, N°5, p 70-85, 05/1995.
- [54] C.W. Chao, Y.S. Chu, W.L. Shyu, "Design and Implementation of IP Multicast over ATM Network", <http://citeseer.nj.nec.com/570654.html>, 2001.
- [55] T. Braun, S. Gumbrich, H. J. Stuttgen, "Comparison of concepts for IP multicast over ATM", IEEE ATM'96 Workshop, San Francisco.
- [56] Cisco, "Multicast in a Campus Network: CGMP and IGMP Snooping", <http://www.cisco.com/warp/public/473/22.html>, 03/2003.
- [57] W. Milliken, "IP Multicasting over ATM: System Architectures Issues", Internet Draft, 07/1995.
- [58] B. Cain, S. Deering, I. Kouvelas, B. Fenner, A. Thyagarajan, "Internet Group Management Protocol, Version 3", 10/2002.
- [59] B. Fenner, "Internet Group Management Protocol", Version 2, 11/1997.
- [60] M. Christensen, K. Kimball., F. Solensky, "Considerations for IGMP and MLD Snooping Switches", Network Working Group MAGMA, 03/2003.
- [61] I.F. Akyildiz, S.H. Jeong, "Satellite ATM networks: A survey", IEEE Communications Magazine, 1997.
- [62] D. Roddy, "Satellite communications", 3eme edition, ISBN 0-07-137176-1. 2001
- [63] G. Pujolle, "Les Réseaux", Ed Eyrolles, 2003.
- [64] W. R. Stevens, "TCP/IP Illustrated Volume 1 – The Protocols", Ed. Addison-Wesley, ISBN 0201633469, 2001.
- [65] S. Oueslati-Boulahia, A. Serhouchni, S. Tohmé, S. Baier, M. Berrada, "TCP Over Satellite Links: Problems and Solutions", Telecommunication Systems, ed. Kluwer, vol. 13, p. 199-222, 2000.
- [66] M. Allman, V. Paxons, W. Stevens, "TCP Congestion Control", RFC 2581, 04/1999.
- [67] S. Floyd, T. Henderson, "The NewReno Modification to the TCP's Fast Recovery Algorithm", RFC 2582, 04/1999.

- [68] M. Allman, D. Glover and L. Sanchez, “Enhancing TCP over Satellite Channels using Standard Mechanisms”, RFC 2488, janvier 1999.
- [69] M. Allman, S. Ostermann, “Multiple Data Connection FTP Extensions”, Technical Report TR-19971, Ohio University 02/1997.
- [70] V. Jacobson, R. Braden, D. Borman, “TCP Extensions for High Performance”, RFC 1323, 06/1992.
- [71] J. Mogul, S. Deering, “Path MTU Discovery”, RFC 1191, 11/1990.
- [72] R. Braden, “Requirements for Internet Hosts – Communication Layers”, STD 3, RFC 1122, 10/1989.
- [73] N. Chaher, C. Barakat, W. Dabbous, E. Altman, “Improving TCP over Geostationary Satellite Link”, INRIA Research Report RR-3773, 10/1998.
- [74] H. Benadoud, A. Berqia, N. Mikou, “Enhancing TCP over satellite links using CANIT algorithm”, International Journal of SIMULATION, Vol. 3 No. 3-4. pp 81-91, 2002.
- [75] M. Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd, A. Romanow, “TCP Selective Acknowledgment Options”, RFC 2018, 10/1996.
- [76] G. Yang, R. Wang, F. Wang, M.Y. Sanadidi, and M. Gerla, “TCP Westwood with Bulk Repeat for Heavy Loss environments”, UCLA CSD Technical Report #020023, 2002.
- [77] Site de TCP Westwood, <http://www.cs.ucla.edu/NRL/hpi/tcpw> .
- [78] G. Giambene, M. Marandola, “Internet Access in ybrid Terrestrial and Satellite Mobile Communication Systems”, VTC 2004 Spring, 06/2004.
- [79] J. Border, M. Kojo, J. Griner, G. Montenegro, Z. Shelby, “Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations”, RFC 3135, 06/2001.
- [80] L. Wu, F. Peng, V.C.M. Leung, “Dynamic Congestion Control for Satellite Networks Employing TCP Performance Enhancement Proxies”, IEEE PIMRC’04, 09/2004.
- [81] N. Ghani, S. Dixit, “TCP/IP Enhancement for Satellite Networks”, IEEE Communications Magazine, p. 64-72, 07/1999.
- [82] S. Oueslati-Boulahia, A. Serhouchni, S. Tohmé, S. Baier, M. Berrada, “GACK : A Spoofing Mechanism for Enhancing TCP Performance over Satellite”, IFIP, Africom’98, Tunisie, 1998.
- [83] M. Luglio, J. Stepanek, M. Gerla, “TCP performance using splitting over the satellite link”, 8<sup>th</sup> Ka Band utilization conference, p. 45-52, 09/2002.
- [84] G. Adams, “DVB-RCS; Enabling 2way-sat broadband communications”, [www.newtec.be](http://www.newtec.be), vol. 2, 06/2002.
- [85] R. Goodings, M.J. Montpetit, “ Broadband Satellite Multimedia (BSM) Architectures”, WCC 2004, Broadband Satellite Communication Systems, p 1-10, 27/08/04.
- [86] C. Guillemin, “Thomson livre à Canal Satellite un décodeur enregistreur”, ZDNet France, <http://www.zdnet.fr/actualites/technologie/0,39020809,2132447,00.htm>, 25 mars 2003.
- [87] K. Almeroth, M. Ammar, “The Role of Multicast Communication in the Provision of Scalable and Interactive Video-On-Demand Service”, Proc. 5th Intl. Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video, p. 267-270, 04/1995.
- [88] J. Bernoff, “How Cable TV Can Beat Satellite”, Forrester Research, <http://www.forrester.com/ER/Research/Report/Summary/0,1338,14566,FF.html>, avril 2002.
- [89] T. Watts, “Outside the box : Satellite Vs. Cable – Coexistence, but not peacefull”, skyreport.com , janvier 2003.
- [90] K.C. Neel, “VOD: Satellite Killer or Bundle Filler?”, CableFAX’s CableWORLD, [http://www.cableworld.com/cgi/cw/show\\_mag.cgi?pub=cw&mon=030804](http://www.cableworld.com/cgi/cw/show_mag.cgi?pub=cw&mon=030804), 08/03/2004.
- [91] <http://www.moviesystem.com> .
- [92] <http://www.europeonline.com> .
- [93] <http://www.mediametrie.fr> .
- [94] Le Journal du Net, “Ce que l’on peut attendre de 2004”, <http://www.journaldunet.com>, enquête fin 2003 début 2004.
- [95] R. Tran Van Lieu, “Le Haut débit”, 01 Réseaux n°138, avril 2004.
- [96] V. Schena, F. Ceprani, “FIFTH Project Solutions Demonstrating New Satellite Broadband Communication System for High Speed Train”, TC 2004 Spring, 06/2004.
- [97] M. A. Vasquez Castro, F.J. Gonzalez Serrano, A. Martinez Fernandez, G. Mohedano Moya, “Quality of service of VoIP over DVB-RCS”, Sixth Baiona Workshop on Signal Processing in Communications, 09/2003.
- [98] L-A. Larzon, M. Degermark, S. Pink, L-E. Jonsson, G. Fairhurst, “The Lightweight User Datagram Protocol (UDP-Lite)”, RFC 3828, 07/2004.
- [99] J. Sjöberg, M. Westerlund, A. Lacaniemi, Q. Xie, “Real-Time Transport Protocol (RTP) Payload Format and File Storage Format for the Adaptive Multi-Rate (AMR) and Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) Audio Codecs”, RFC 3267, 06/2002.

- [100] F. de Belleville, L. Dairaine, C. Fraboul, J. Lacan., “Une Approche Hybride Satellite/Terrestre pour le transport fiable multipoint à grande échelle”, Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles, 2003.
- [101] N. Ben Azzouna, F. Guillemin, “Experimental analysis of the impact of peer-to-peer applications on traffic in commercial IP networks”, European transactions on Telecommunications: Special issue on P2P networking and P2P services, ETT 15(6),12/2004.
- [102] L. Duquerroy, S. Josset, O. Alphand, P. Berthou, T. Gayraud, “SatIPSec: an optimized solution for securing multicast and unicast satellite transmissions“, 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), Monterey (USA), 9-12 Mai 2004.
- [103] Digital Video Broadcasting, “Digital Video Broadcasting; Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactives Services, News Gathering and other broadband satellite applications.”, ETSI EN 302 307, 06/2004.
- [104] European Space Agency, “AmerHis: first switchboard in space launched”, <http://www.telecom.esa.int/telecom> ,08/2004.
- [105] E. Lutz, M. Werner, A. Jahn, “Satellite System for Personal and Broadband Communications”, Ed. Springer, ISBN 3 540 66840 3, 2000.
- [106] D. Present, “Architecture d'Interconnexion de cartes de commutation ATM par bus optique”, tèse de doctorat de l'Université de Versailles-ST Quentin en Yvelines, 12/1996.
- [107] D. M. Elwatt, “Cisco Shoots For The Stars Satellite. Company uses off-the-shelf Cisco router in space; networks could extend to the cosmos”, informationweek.com, 2003
- [108] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss, “An Architecture for Differentiated Service”, RFC2475, 12/1998.
- [109] R. Braden, D. Clark, S. Shenker, “Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview”, RFC1633, 06/1994.
- [110] R. Braden, Ed., L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, “Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification”, RFC2205, 09/1997.
- [111] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. Liu, P. Sharma, L. Wei, “Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification”, RFC 2362, 06/1998.
- [112] F. Filali, W. Dabbous, “Issues on the IP Multicast Service Behaviour over the Next-Generation Satellite-Terrestrial Hybrid Networks”, IEEE ISCC'2001, 07/2001.
- [113] F. Filali, J.P. Pomies, T. Meynadier, N. Douchin, C. Benassy Foch, “DVB comme support de l'IP multiCast : Adaptation de PIM-SM pour un système satellite GEO transparent DVB”, CFIP 2003, 10/2003
- [114] Digital Video Broadcasting, “Digital Video Broadcasting; Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines of the use of EN 301 790”, ETSI TR 101 790, 01/2003.
- [115] F. Arnal, A. Bolea Alamañac, L. Castanet, L. Dairaine, M. Bousquet, L. Claverotte, G. Maral , R. Gutierrez, “Reliable Multicast Transport Protocols performances in emulated satellite environment taking into account an adaptative physical layer for GEOCAST system”, International Workshop of COST Actions 272 and 280, 06/2003.
- [116] M.W. Koyabe, G. Fairhurst, “Performance of reliable multicast protocols via satellite at EHF with persistent fades”, 7th Ka-Band Utilization Conference, 09/2001.
- [117] C. Casetti, M. Gerla, S. Mascolo, M. Y. Sanadidi, R. Wang, “TCP Westwood: Bandwidth Estimation for Enhanced Transport over Wireless Links,” Mobicom 2001, Rome,Italy, 07/2001.
- [118] E. N. Gilbert, “Capacity of a burst-noise channel”, Bell System Technical Journal, Vol. 39, pp.1253-1265, 09/1960.
- [119] M. Yajnik, J. Kurose, D. Towsley, “Packet loss correlation in the Mbone multicast network: Experimental measurements and Markov chain models” UMASS COMPSCI Technical Report 95-115, 1996.
- [120] L. Chisci, R. Fantacci, F. Francioli, T. Pecorella, “Multi-terminal dynamic bandwidth allocation in GEO Satellite Networks”, VTC 2004 Spring, 06/2004.
- [121] K.D. Lee; Y.H. Cho; H.J. Lee; H. Jeong “Optimal scheduling for timeslot assignment in MF-TDMA broadband satellite communications”, VTC 2002-Fall, Vol: 3, p. 1560-1564, 09/2002.
- [122] Digital Video Broadcasting, “Digital Video Broadcasting; Guidelines on implementation and usage of Service Information”, ETSI TR 101 211, 05/2004.
- [123] EUTELSAT, “Recommended transmission parameters for DVB broadcasters and operators of DVB multiplexes using the EUTELSAT HOT BIRD<sup>™</sup> system”, guide technique, <http://www.eutelsat.com> 07/06/99.
- [124] Digital Video Broadcasting, “Digital Video Broadcasting; Interaction channel for Satellite Distribution Systems, Guidelines for the use of EN 301 790”, ETSI TR 101 790, 01/2003.
- [125] J. Grieve, “ Analyse et évaluation de techniques de commutation Ethernet pour l'interconnexion des systèmes avioniques”, thèse de doctorat, 2004.
- [126] V. Paxson, S. Floyd, “Wide area traffic: The failure of Poisson modeling”, IEEE/ACM Transaction on Networking”, vol. 3, n°. 3, p. 226-244, 06/1995.

- [127] W.E. Leland et *al.*, “On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic”, IEEE/ACM Transaction on Networking, vol. 2, p. 1-15, 1994.
- [128] M.E. Crovella, A. Bestavros, “Self-similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes”,. Networking, IEEE/ACM Transactions, n° 6, Vol. 5, p. 835-846, 12/1997.
- [129] Site de NS 2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns> .
- [130] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, J. Kurose, “Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation”, ACM SIGCOM’98, 1998.
- [131] J. Neale, A. Mohsen, “Impact of CF-DAMA on TCP via satellite performance”, IEEE Globecom’01, 11/2001.
- [132] SESBSM, “Satellite Earth Stations and Systems (SES);Broadband satellite multimedia;Part 1: Survey on standardization objectives”, ETSI TR 101 374-1 V1.2.1, 10/1998.
- [133] SESBSM, “Satellite Earth Stations and Systems (SES);Broadband Satellite Multimedia;Overview of BSM families”, ETSI TR 102 187 V1.1.1, 05/2003.
- [134] F. de Belleville, L. Dairaine, C. Fraboul, J.Y. Tournet, “Group size estimation for hybrid satellite/terrestrial reliable multicast”, WCC 2004, Broadband Satellite Communication Systems, p 57-66, 27/08/04.

---

## Résumé

Cette thèse aborde les problèmes relatifs à l'intégration des satellites géostationnaires dans les réseaux IP. Une première étape de ce travail consiste en une analyse critique des systèmes utilisant le Digital Video Broadcasting pour véhiculer des flux IP. Cette étude souligne les faiblesses des solutions actuelles : tandis que les solutions classiques souffrent de limites inhérentes à la technologie et aux protocoles utilisées, les propositions reposant sur les satellites de nouvelle génération impliquent un système spécifique et à fortes contraintes financières. Ces limites engendrent des difficultés d'interopérabilité, témoignant de la nécessité d'une démarche plus globale qui viserait à dessiner une architecture plus large qui ne reposerait pas sur des contraintes techniques. La thèse propose alors de suivre cette démarche, et de concevoir une architecture pour intégrer ces différentes solutions dans un seul système et pouvoir supporter des services porteurs comme l'accès Internet, la vidéo à la demande et l'interconnexion de réseaux privés. Au cœur de cette architecture se trouve la notion de charge utile hybride, c'est-à-dire intégrant une partie transparente traditionnelle et une partie régénérative utilisant une intelligence embarquée plus ou moins évoluée. Ses objectifs sont alors d'assurer l'intégration de services porteurs sur satellite, d'offrir une transition entre les systèmes transparents et les satellites de nouvelle génération, et enfin de s'adapter aux évolutions protocolaires. Dans ce contexte, cette proposition est décrite à plusieurs niveaux, en insistant sur le lien entre le niveau réseau et la couche liaison. Cette description implique des choix technologiques témoignant des solutions actuelles, mais reste ouverte aux technologies à venir par son intégration d'IP comme un élément fédérateur. Enfin l'analyse du système hybride permet de légitimer les services choisis, et de souligner sa flexibilité offerte par la coexistence de ces deux modes et la possibilité de choisir pour chaque type de trafic celui qui permet les meilleures performances.

---

## Title

STUDY OF AN IP ARCHITECTURE INTEGRATING A GEOSTATIONARY LINK

---

## Abstract

This thesis studies issues related to the integration of geostationary satellites in IP networks. A first part of this work presents an analysis of today and future DVB systems for IP support. The limits of standard solutions are underlined. However new technologies and protocols adaptations allow satellite systems to be more compliant to IP services, but at several costs: high complexity and specificity. As there is a real need of a global solution, an architecture based on two different payloads (a transparent one and an on-board-processing) in a same system is proposed for service integration. This solution, called a hybrid system, is defined according to different service needs. It proposes to undertake the transition between today systems and next generation satellites, as to integrate different services and protocols. The study describes such a solution, underlining that the technologic choices have been made according to today solutions, and may be changed in future days. Eventually this architecture is evaluated. The analysis of the system overhead for IP support shows that the architecture proposes a light way to manage IP streams and hybrid mode. The study of service integration concludes on the flexibility of managing two modes for different traffic streams, allowing the best performances for each one.

---

## Discipline

RÉSEAUX ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

---

## Mots-clés

Satellite géostationnaire, DVB-S, DVB-RCS, intégration de services, routage, transparence, normalisation.

---

## Intitulé et adresse du laboratoire:

TéSA, 2 rue Charles Camichel F-31071 Toulouse, Cédex 7, BP 7122, FRANCE.