

# Le nouveau standard DVB-S2 et les applications IP par satellite

## V.1. Introduction

La nouvelle génération du standard de diffusion par satellite, DVB-S2 [1] est certainement la plus performante de celles qui existent actuellement. Elle apporte des améliorations significatives. Cela va du changement dynamique du codage canal et de la modulation à une pile protocolaire qui procure une meilleure efficacité d'encapsulation. Ce nouveau standard a eu un écho favorable auprès des équipementiers satellite. Ils ont même commencé à le proposer dans des systèmes, y compris bidirectionnels et anciennement basées sur DVB-S ou des formats propriétaires. C'est en particulier le cas des technologies étudiées DVB-RCS et iDirect.

Le travail présenté dans ce chapitre a été intégré dans un projet de recherche et développement, une étude d'évaluation du nouveau standard lorsqu'il est amené à transmettre des flux IP. Nous nous intéressons à l'avantage procuré par DVB-S2, intégré à une voie retour par satellite (RCS), pour transmettre de l'IP.

La première partie du chapitre fournit une présentation du nouveau standard. Nous mettons en évidence les nouveaux aspects qu'il introduit tant sur le plan de l'encapsulation des données, que sur la modulation et le codage adaptatifs.

Ensuite, nous procédons à la description des évaluations théoriques et des expérimentations menées sur un réseau prototype DVB-S2/RCS suivie par l'interprétation et l'analyse que nous faisons des observations et des résultats. Ce travail a été mené dans le cadre du projet *DVB-S2 satellite experiment* dont nous donnons davantage de détails par la suite.

Notre contribution porte sur l'intégration de la plateforme DVB/S2-RCS sur banc de test et dans un environnement satellite. Elle concerne la définition et la mise en œuvre des tests applicatifs IP en plus du travail d'interprétation et d'analyse.

## V.2. Le standard DVB-S2

### V.2.1 Introduction

Le DVB-S2 a été publié en mars 2005 par l'ETSI pour pallier les limites du standard DVB-S. On assistait depuis quelques années à une carence croissante des fréquences, accentuée par l'avènement de nouveaux services de diffusion à haute définition. Le DVB-S2 représente la solution pour accroître la capacité de transmission, en particulier celle de la télévision numérique haute définition par satellite.

La norme DVB-S ne définit que le QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) comme schéma de modulation. C'est une contrainte notable pour les infrastructures professionnelles en place et pouvant acheminer des débits plus élevés des schémas de modulation plus développés. Le standard DVB-DSNG (*Digital Video Broadcasting Digital Satellite News Gathering*) [2] a apporté la solution pour ce contexte particulier d'utilisation<sup>19</sup> en apportant plus de capacités avec les modulations 8PSK et 16QAM.

---

<sup>19</sup> Des équipes de télévision sur le terrain diffusant des émissions en direct ou en différé vers les régions centrales avant de les retransmettre au grand public.

Pourtant, le besoin de recourir à des *ModCod*<sup>20</sup> avec des valeurs d'Es/No (rapport énergie par symbole par densité de bruit) plus faibles, et donc le recours à d'autres codages canal que le Reed Solomon, se faisait sentir.

La nouvelle génération de la norme est venue combler les lacunes qui persistent principalement au niveau de la couche physique. On pourra donc caractériser les apports du standard ainsi :

- Un codage canal plus puissant LDPC (*Low Density Parity Check*) et BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem).
- Un mode adaptatif où la chaîne de transmission fait varier le débit utile en fonction des conditions de transmission.
- Un large éventail de codages et de modulations avec un total de 28 *ModCod* allant de QPSK 1/4 à 32APSK 9/10, qui couvrent un grand intervalle de valeurs de signal sur bruit de -2 dB à +17 dB environ.
- Un format de trame ainsi qu'un schéma d'encapsulation plus efficace qui s'accommode d'une variété de sources d'entrée (flux continu, multiplex MPEG-TS, paquets IP...)
- La norme ne se restreint plus au seul standard de compression MPEG-2 (audio et vidéo). Elle s'adapte à un large éventail de schéma de compression et de codage, en particulier MPEG-4 et son option AVC, également standardisée par le groupe sous le nom de H.264.

Le DVB-S2 est une technologie relativement « jeune » si on considère les équipements industriels en vente sur le marché. Toutefois, les performances qui se profilent des évaluations théoriques ainsi que des premières expérimentations sont largement meilleures que ce que présentait le DVB-S.

- Un codage canal efficace et proche de la limite théorique de Shannon.
- Une meilleure efficacité spectrale
  - 30% pour un même débit symbole et un rapport C/N donné [3]
  - Plus de 100% à 200 % de gain avec le codage et la modulation adaptatifs (ACM) en fonction de la condition du lien. [3]
- Une meilleure disponibilité de la liaison satellite (de l'ordre de 99,9% quand l'ACM est activé).
- Une meilleure couverture géographique.

De part ses caractéristiques, le DVB-S2 apparaît comme un standard flexible pouvant répondre à une variété d'applications par satellite. Cela va des services DTH à la télévision numérique en passant par les services interactifs. C'est pourquoi la norme propose plusieurs profils d'utilisation.

- **Le profil diffusion (*Broadcast*)**, est le contexte le plus répandu du standard avec des services de télévision numérique en simple et haute définition. Dans ce cadre, les utilisations type DVB-DSNG sont possibles bien que les équipements de ce genre soient encore assez rares.

---

<sup>20</sup> Le terme *ModCod*, signifie Combinaison d'un taux de codage et d'un schéma de modulation

- **Le profil interactif**, destiné à fournir des services interactifs notamment, IP avec l'accès à Internet par satellite pour des particuliers ou des petites structures. Il ne requiert pas d'infrastructures coûteuses ni sophistiquées.
- **Le profil professionnel**. Il ne se distingue du profil interactif que par le niveau de fiabilité de ses infrastructures et la taille de ses antennes. Il est destiné aux applications IP bidirectionnelles par satellite dans un cadre d'utilisation professionnelle. Il permet des transferts de données en mode point à point ou point à multipoints. Il est amené à assurer un certain niveau de services comme un débit minimum garanti ou une disponibilité élevée.

## V.2.2 Les principaux apports du standard

Les principaux apports du standard résident dans la couche physique. Les innovations concernent deux aspects essentiels :

- L'introduction d'un codage canal plus performant et des schémas de modulation permettant des débits plus élevés.
- La possibilité de modifier le *ModCod* trame par trame et l'adapter aux conditions de transmission, soit par l'intermédiaire du mode VCM (*Variable Coding and Modulation*) ou par l'ACM en présence d'une voie retour.

### V.2.2.1 La correction d'erreur et la modulation

Le DVB-S2 profite des avancées technologiques récentes apportées sur les codeurs. Le codage canal qu'il met en place améliore sensiblement les conditions de transmission dans un canal fortement bruité comme le lien satellite.

Pour ce faire, la norme repose sur une concaténation d'un code en bloc interne LDPC et d'un code en bloc externe BCH. Ce schéma remplace le codage convolutif concaténé *Reed Solomon* de DVB-S et propose 11 taux de codage.

Le codage LDPC retenu, a été découvert en 1963 [4]. Il offre un écart minimal, inférieur à 1 dB, par rapport à la limite théorique de Shannon sur un canal de bruit blanc Gaussien AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). (cf. figure 6.1)

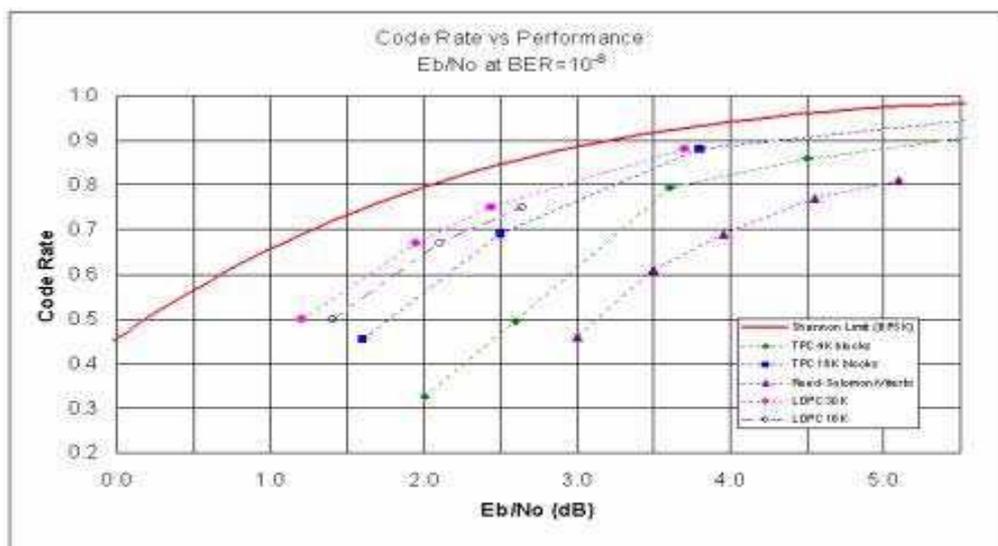


Figure V.1 ModCod et Eb/No [5]

Il représente une amélioration de l'ordre de 2 dB comparé au codage *Reed Solomon*. Cela se traduit par une augmentation des marges en puissance d'un système donné et de la réduction des dimensions des antennes en réception pour un débit donné

Un autre avantage du codage LDPC provient les performances qu'il apporte à des débits élevés et pour de longueurs de blocs importantes ainsi qu'à la relative simplicité de ses décodeurs [5]. Deux longueurs de bloc sont retenues pour le DVB-S2, une trame courte 16200 bits et une trame longue de 64800 bits. Bien que les trames courtes soient moins efficaces, elles restent recommandées pour des applications qui exigent un long temps d'attente ou des délais plus courts.

Quatre schémas de modulation sont proposés par la norme DVB-S2. Les modes QPSK et 8PSK sont mieux adaptés aux applications de radiodiffusion car elles disposent d'une enveloppe quasi constante [5]. Elles peuvent donc être utilisées avec des répéteurs satellite non-linéaires portés à quasi-saturation [6]. Les deux autres modes proposés sont le 16-APSK et le 32-APSK. Ils se caractérisent par un rendement énergétique moindre puisqu'ils exigent un niveau plus élevé du rapport C/N. Ils présentent, tout de même, une efficacité spectrale nettement supérieure recommandée pour un contexte d'utilisation professionnelle.

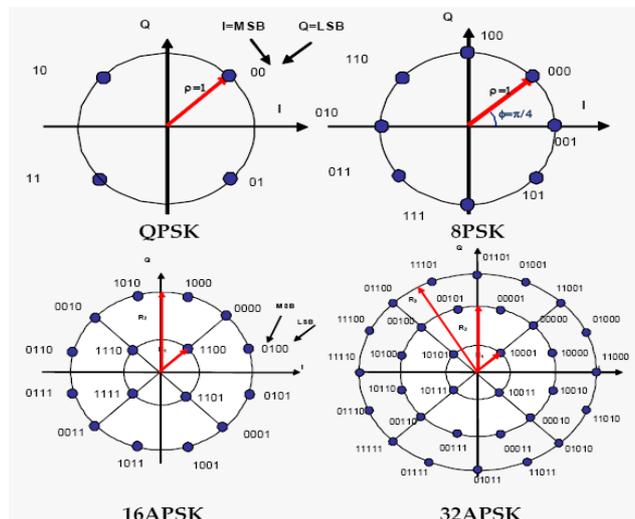


Figure V.2 Schémas de modulations DVB-S2

Ces ordres de modulations supérieurs présentent des gains en efficacité en raison d'un plus grand nombre de bits mappés dans les constellations.

Codage et modulation sont combinés pour proposer 28 *ModCods* au total. Afin d'atténuer les mauvaises performances énergétiques de certains ordres de modulation, la norme adapte le choix du taux de codage en vue d'améliorer les performances en puissance. La figure 6.3 [6] présente les efficacités spectrales théoriques en fonction du rapport C/N (Roll-off exclu) dans un canal *AWGN*.

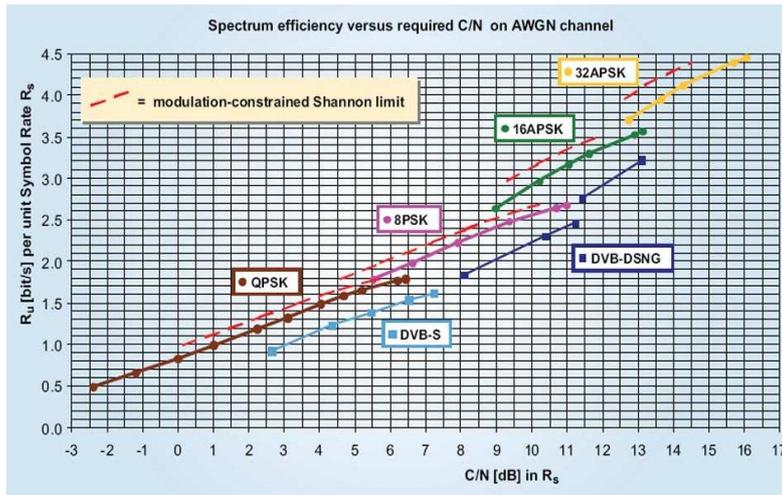


Figure V.3 Efficacité spectrale théorique en présence d'un bruit gaussien [6]

On peut observer que certains *ModCods* présentent une faible efficacité spectrale pour un niveau élevé de signal sur bruit par rapport à d'autres *ModCods*. En effet, en fonction du canal et des conditions de transmission, du satellite et du point de fonctionnement souhaité, chaque opérateur fera son choix parmi les 28 *ModCods* proposés par le standard.

Dans ce cas d'utilisation, seuls 22 *ModCos* sont retenus. A titre d'exemple, on privilégie le *ModCod* 8PSK 3/5 au QPSK 5/6 puisque le premier présente une meilleure efficacité spectrale pour le même rapport de signal sur bruit. Pour le projet DVB-S2 Satellite Experiment –que nous présenteront par la suite- également seuls 22 *ModCods* sont exploitables.

A titre d'illustration, nous présentons la courbe ci-dessous (figure 6.4) obtenue dans le cadre du projet *DVB-S2 Satellite Experiment*. Avec une antenne de 1,2 m en réception d'une porteuse DVB-S2. Elle balaye les valeurs d'efficacité spectrale en fonction du niveau du signal pour les 28 *ModCod*. On notera que les valeurs couvrent un intervalle allant de -2 à 17 dB ce qui traduit la souplesse procurée par le standard DVB-S2. Aussi, est il toujours possible d'émettre même en cas de très mauvaises conditions puisque on observe que pour une modulation en QPSK 1/4, le niveau de puissance du signal est inférieur à celui du bruit.

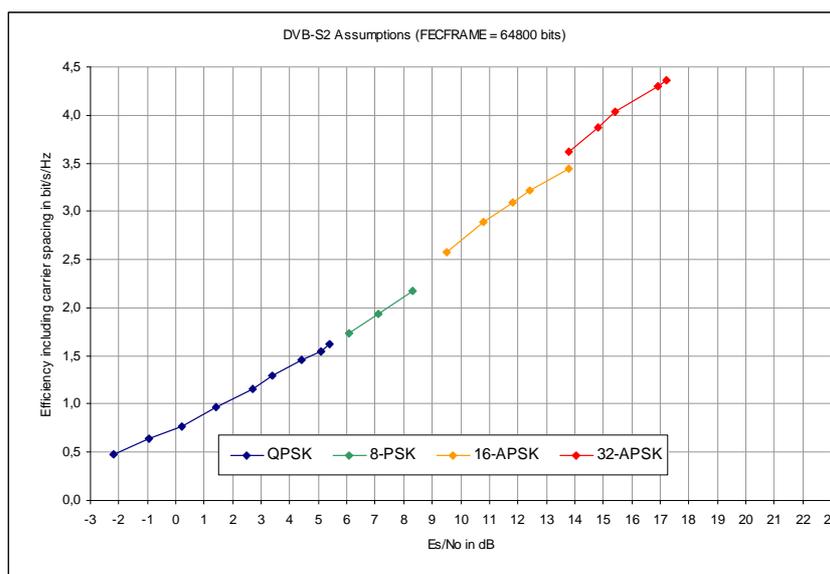


Figure V.4 Efficacité spectrale et Rapport signal sur bruit [3]

En plus d'une multitude de *ModCods* et afin d'améliorer encore l'efficacité du répéteur satellite, la norme DVB-S2 propose deux facteurs additionnels de Roll-off permettant d'optimiser l'occupation de bande. En ayant recours à des valeurs inférieures, on peut soit « rapprocher » les porteuses adjacentes d'un transpondeur, soit augmenter le débit symbole pour une même largeur de bande.

DVB-S	DVB-S2	Décroissance $\alpha$	$1+\alpha$
35 %	35 %	0,35	1,35
—	25 %	0,25	1,25
—	20 %	0,20	1,20

Tableau V-1 Les facteurs de Roll-off en DVB-S2

### V.2.2.2 Le codage et la modulation adaptatifs

Le standard DVB-S2 a été conçu pour une multitude d'applications à haut débit, y compris les services interactifs en particulier ceux fondés sur de l'IP. Avec l'adoption du codage et de la modulation adaptatifs **ACM** (*Adaptive Coding and Modulation*), il permet de modifier le taux de codage canal et le schéma de modulation sur une base trame par trame. Au moyen d'une voie retour (par satellite), l'émetteur est renseigné sur les conditions de réception, et adapte en conséquence le *ModCod*.

Les systèmes satellites multi faisceaux implantant le DVB-S ont été dimensionnés en fonction du pire cas de transmission selon la disponibilité visée. Le standard, envisagé pour des services en diffusion, considère donc un taux de codage et un schéma de modulation qui demeurent fixes au cours de la transmission. C'est par ailleurs ce qui est appelé **CCM** (*Constant Coding and Modulation*). Ce *ModCod* a été sélectionné en fonction de la couverture ainsi que du niveau de disponibilité convenu. Cette approche implique le recours à une marge fixe en plus de la puissance requise du signal dans le but de compenser les atténuations résultant de mauvaises conditions de propagation. Pourtant, et dans la plupart du temps, les interférences et les conditions de propagations permettant un meilleur niveau du signal SNIR (*Signal to Noise plus Interference Ratio*). Par exemple, les liens de diffusion en bande Ku sont dimensionnés avec une marge de 4 à 6 dB pour une disponibilité de 99% le pire mois (une moyenne de 99,6%). Or et vu la nature des atténuations, cette marge peut s'avérer utile uniquement pour une région donnée et ce pendant quelques minutes par an. Ces pertes en ressources peuvent difficilement être évitées dans le cas de services de diffusion puisque des millions de récepteurs dispersés dans la zone de couverture reçoivent simultanément le même contenu. En revanche, ce dimensionnement n'est pas optimal pour les réseaux point à point interactifs par satellite.

Fort de ce constat, le DVB-S2 permet d'exploiter cette dispersion des récepteurs dans le temps et dans l'espace afin d'émettre au meilleur débit. Par conséquent, l'émetteur adapte le *ModCod* en fonction du niveau de signal SNIR du récepteur. Ainsi, le débit devient dépendant du temps et de la localisation du récepteur.

En cas de bonnes conditions de propagation, typiquement la plupart du temps, le signal SNIR prend des valeurs élevées. Cela facilite le recours à des schémas de modulation à forte efficacité spectrale comme 16APSK ou 32APSK et accroît le débit de transmission. Si les conditions se dégradent, le système se replie sur des *ModCod* plus robustes pouvant transmettre même avec un faible niveau de signal sur bruit. A partir des informations sur les conditions de réception que remontent les terminaux via une voie retour, l'ACM change de *ModCod* sur une base trame par trame en l'adaptant aux conditions de propagation propres à chaque destination.

Dans le même esprit, le standard propose le VCM (*Variable Coding and Modulation*). Cette technique adapte les *ModCod* en fonction de la destination du trafic dans la zone de couverture (sans aucun retour d'information de la part des récepteurs). Le VCM donne la possibilité de transmettre plusieurs services sur une même porteuse, chacun utilisant son propre *ModCod*. Ce multiplexage au niveau physique, permet un codage et une modulation en fonction des services (SDTV, HDTV, audio, multimédia) qui ne nécessitent pas le même degré de robustesse.

### V.2.2.3 ACM et les applications IP interactives

De part le caractère bidirectionnel des réseaux sur lesquels ils sont implantés, les services interactifs, en particulier les applications IP, tirent un avantage réel de recours à l'ACM. En étant informés par l'intermédiaire d'une voie retour sur les conditions de réception, il est possible d'optimiser les paramètres de transmission en fonction de chaque utilisateur mais aussi de l'état du canal. De plus, la diversité des schémas de modulation et des niveaux de protection d'erreur procure à l'opérateur une marge de liberté dans la différenciation de ses niveaux de services (en fonction de la priorité de chacun, du débit minimal garanti...)

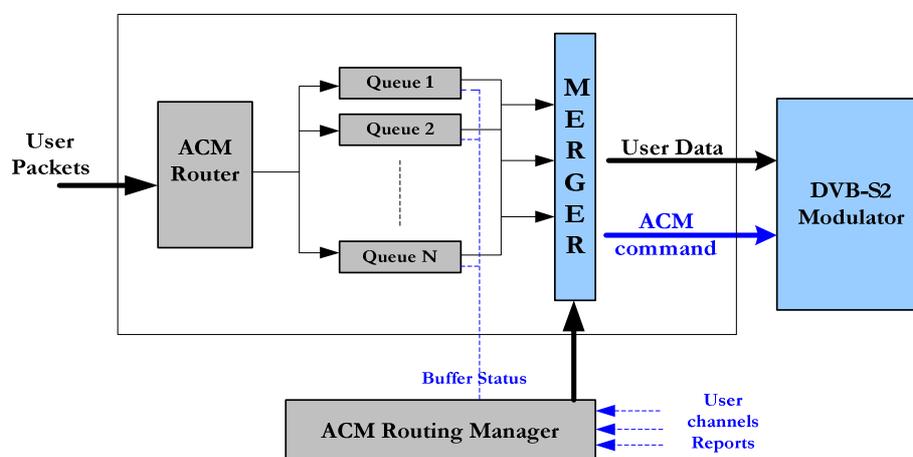


Figure V.5 Fonctionnement schématisique du DVB-S2 ACM [7]

Dans les systèmes ACM, les paramètres physiques retenus pour chaque trame ne sont pas dissociés du processus d'ordonnancement. Si on considère des paquets IP, ceux contenus dans la même trame sont transmis avec le même *ModCod*. Formulé autrement, les données (IP ou autres) contenues dans une même trame doivent être sélectionnées en prenant en considération les paramètres physiques requis pour le terminal destination. C'est la raison pour laquelle, l'information relative au *ModCod* est générée en même temps que les données (utilisateurs) et envoyée en entrée du modulateur DVB-S2 ACM. La figure 6.5 décrit le principe de fonctionnement du module DVB-S2 ACM.

Le module *Merger* sélectionne un nombre de paquets à partir des files et les combine pour former un ensemble de bits d'informations. Les trames ainsi constituées sont envoyées au modulateur ACM avec les paramètres de transmission associés.

### V.2.3 Les méthodes d'encapsulation

Outre le codage et la modulation adaptatifs, le standard DVB-S2 offre un nouveau schéma d'encapsulation. Il tolère de multiples formats en entrée, en plus du schéma classique MPE MPEG, cellules ATM, des formats génériques de trames ou même des flux continus de données. Pour les paquets IP, les deux principales méthodes qui se dégagent sont :

- Une encapsulation MPE/MPEG similaire au standard DVB-S sur certains aspects.
- Une encapsulation GSE (*Generic Stream Encapsulation*) où les paquets IP sont fragmentés et/ou contenus dans des paquets de niveau 2 de longueur fixe ou variable. Ils peuvent également être directement *mappés* sur le flux TDM

Dans cette section, nous allons décrire deux méthodes d'encapsulation. La première repose sur MPE MPEG à l'instar du standard DVB-S. Elle est implantée dans les premiers systèmes DVB/S2-RCS. La seconde GSE (*Generic Stream Encapsulation*) est encore au stade de spécification par le groupe DVB et a l'avantage de présenter des performances supérieures en termes d'efficacité d'encapsulation.

### V.2.3.1 L'encapsulation MPE MPEG

C'est une encapsulation « classique » MPE MPEG d'un paquet IP avec l'ajout d'un en-tête de 12 octets et d'une somme de contrôle CRC de 4 octets pour générer une section privée MPE. Ensuite les paquets MPE sont fragmentés afin d'être contenu dans des paquets MPEG-TS de 184 octets de champ données. Du bourrage est introduit sur les paquets IP partiellement remplis dans le cas où le mode *Section Packing* n'est pas activé.

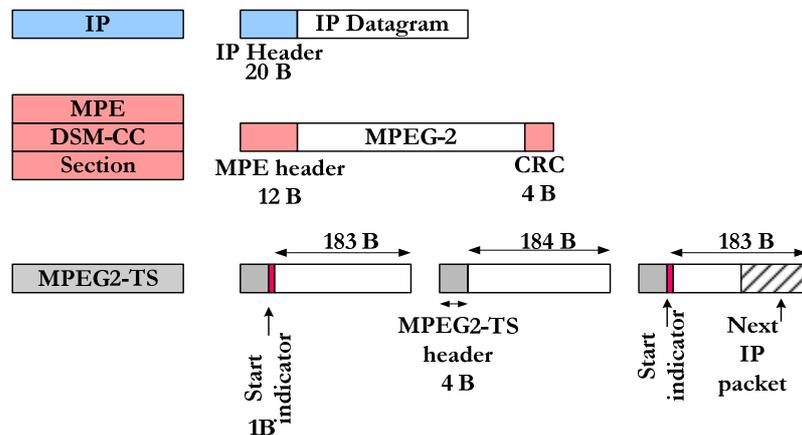


Figure V.6 Encapsulation IP MPE avec le mode *Section Packing* (Sans bourrage)

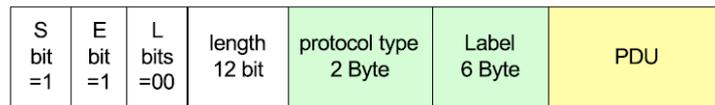
### V.2.3.2 L'encapsulation GSE (Generic Stream Encapsulation)

Le protocole GSE [8] permet l'encapsulation des paquets IP ainsi que des paquets ou trames provenant d'autres protocoles de niveau réseau à véhiculer sur DVB-S2. Conçu en parallèle au standard, et il est en voie de normalisation, il est censé remplacer l'encapsulation MPE/MPEG-TS. Nous n'entendons pas le présenter dans ses détails mais plutôt en présenter les aspects qui nous serviront par la suite notamment pour la comparaison d'efficacité avec MPE/MPEG-TS.

GSE supporte une multitude de protocoles « réseau » (IPv4, IPv6, Ethernet...). Plus généralement, ils sont appelés PDU (*Packet Data Unit*). Il permet le transport de paquets chiffrés ainsi que la compression d'en-tête IP. Il supporte notamment plusieurs modes d'adressage (Multicast, Unicast, adressage IP...)

GSE agit en définissant le début et la fin de chaque PDU, ajoute des informations de contrôle comme le type du protocole réseau. Il permet des contrôles d'intégrité lorsque c'est nécessaire. Il offre notamment la possibilité de fragmenter les paquets IP et plus généralement les PDUs dans le cas où c'est nécessaire.

La longueur d'un paquet GSE varie en fonction du PDU qu'elle contient. La composition de son en-tête l'est également. La figure 6.7 décrit la forme que peut prendre un paquet GSE quand il contient un PDU entier (non fragmenté). Dans ce cas, la taille d'en-tête ajoutée par GSE est de 10 octets.



#### Start (S)/End (E) Indicator Bits

#### Label Bits

- 6 Byte Label Field
- no label
- 3 Byte Label Field
- concatenation

Length Field: 12 bit -> 4kB packets

Label Field (address)

Protocol Type Field follows ULE

- extension headers as with ULE

Figure V.7

Format d'un paquet GSE (PDU complet) [8]

## V.2.4 L'interface air du standard DVB-S2

Une fois les paquets MPEG ou GSE générés, c'est un format de trame conçu par le standard DVB-S2 qui intervient. La plateforme de tests implante un schéma d'encapsulation MPE/MPEG, on adaptera donc notre description à cette méthode.

Les cellules MPEG-TS devant assurer un même niveau de service sont associées aux paramètres physiques qui leur correspondent. Elles sont ensuite insérées dans le champ de données de la trame en Bande de Base ou *BB Frame* définie par le standard. Une *BB Frame* est composée d'un en-tête fixe de 10 octets et d'un champ de données DFL (*Data Field Length*) de longueur fixe pour un taux de codage et une modulation donnés. Sa taille varie uniquement en fonction du *ModCod* utilisé. Une *BB Frame* représente les données à l'entrée du codeur canal (BCH puis LDPC).

Pour les flux de diffusion ou les flux DSNG, la totalité du champ de données DFL d'une *BB Frame* ( $K\text{-BCH}^{21} - 80$ ) est remplie. En revanche, pour les applications unicast, seul un nombre entier de cellules MPEG-TS (ou GSE) peut être contenu dans une *BB Frame*. Cela simplifie l'opération de décodage côté récepteur. Par conséquent, du bourrage est introduit pour remplir la partie restante du champ de données DFL. Ceci est également le cas, quand le nombre cellules MPEG n'est pas suffisant pour remplir le champ de données. Plus généralement, du bourrage est introduit à chaque fois qu'on a l'inégalité suivante  $DFL < (K\text{-BCH} - 80)$ . (Figure 6.8)

#### Remarque

Le bourrage et la taille de la *BB Frame* en entrée du codeur dépend notamment du choix *Long Frames* (64800 bits) ou *Short Frames* (16200 bits) proposées par la norme.

<sup>21</sup> K-BCH spécifie la taille totale d'une *BB Frame* avant codage, en-tête compris.

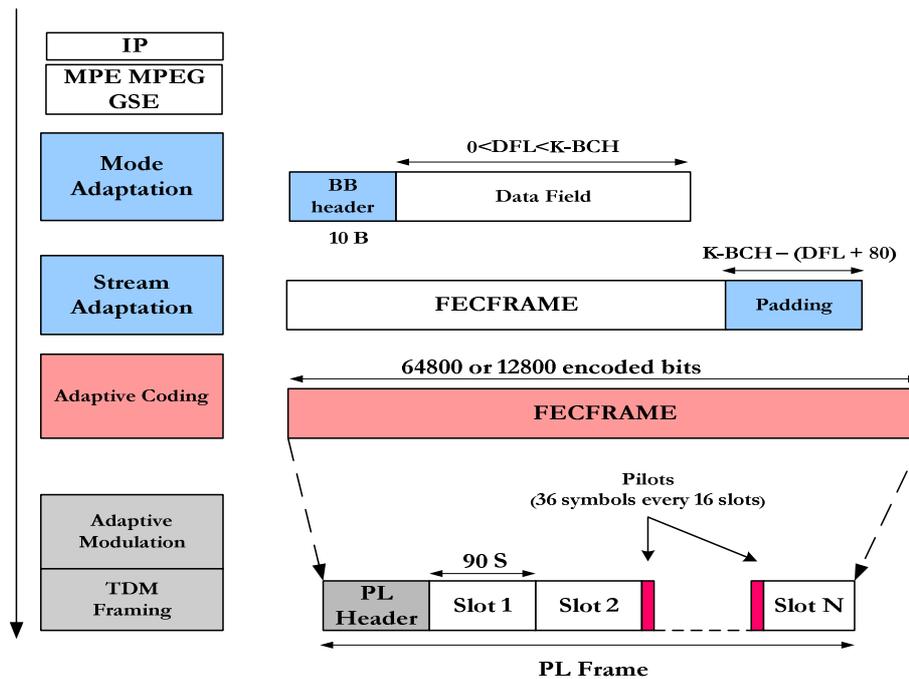


Figure V.8 L'air interface DVB-S2 avec ACM [8]

A la sortie du codeur canal, une *FEC Frame* est ainsi générée. Elle correspond à une trame de 64800 ou de 16200 bits. La FEC Frame est ainsi fragmentée en un nombre de slots de longueur identique (90 symboles par slot) et d'un en-tête de même longueur. L'ensemble constitue ce que le standard définit comme la *Physical Layer Frame* ou *PL Frame*. (Figure 6.8)

En mode ACM, chaque trame peut avoir son propre *ModCod*. L'en-tête au niveau physique (PL Header) sert, entre autres, à indiquer au démodulateur côté réception, le taux de codage et la modulation appropriés à utiliser. De plus, et afin de faciliter la démodulation, spécialement pour les ordres supérieurs (8PSK, 16APSK et 32APSK) même en présence d'un bruit de phase ou d'un léger décalage en fréquence, le standard recommande le recours au *Pilot Symbols*, introduits périodiquement au sein d'une trame physique *PL Frame*. Notons, finalement que le temps d'émission d'une FEC Frame dépend aussi du schéma de modulation.

### V.3. Le projet *DVB-S2 Satellite Experiment* et les expérimentations

#### V.3.1 Introduction

Le projet *DVB-S2 Experiment* a été lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) afin de mener une évaluation en profondeur en laboratoire et sur satellite des multiples nouveautés introduites par le standard DVB-S2. Le projet est piloté par EADS Astrium en tant que maître d'œuvre. Il regroupe notamment de multiples acteurs du monde satellite comme les équipementiers ou les opérateurs satellites. Les premiers contribuent en fournissant les équipements DVB-S2 ou DVB-S2/RCS prototypes ou commerciaux. Les seconds mettent à disposition leurs infrastructures ainsi que l'accès au satellite.

Le premier objectif du projet est de monter des plateformes de tests à partir de solutions proposées dans l'industrie. Il tend par là à valider le fonctionnement des nouveautés introduites par le standard et ce pour les trois profils d'application (**broadcast, interactif et professionnel**).

Le but ultime de projet est de convaincre les acteurs du monde des télécommunications par satellite d'intégrer le nouveau standard dans leur solution.

Notre tâche au sein de ce projet vient compléter le travail que nous avons entamé dans le cadre de cette thèse. Notre contribution commence par l'intégration du banc de test DVB/S2-RCS spécifique au profil professionnel d'utilisation du standard DVB-S2. C'est par ailleurs l'une des premières plateformes dans le monde. Notre travail s'étend également à la spécification et la mise en œuvre des tests applicatifs et à l'analyse et l'interprétation des résultats.

La démarche expérimentale portait dans un premier temps sur une évaluation théorique de l'encapsulation IP sur DVB-S2. Dans un deuxième temps on cherche à analyser le comportement des applications IP (VoIP, applications TCP) en présence d'une boucle de codage et de modulation adaptatifs. En cas de dégradation des conditions de transmission, l'ACM intervient en adaptant les paramètres physiques de la transmission. Ce changement induit entre autres une variation du débit utile.

Notre observation porte sur l'effet qu'entraîne la variation de débit sur les applications IP ayant des niveaux de priorités différents.

## V.3.2 La plateforme de tests

### V.3.2.1 Description

Pour le profil professionnel, plusieurs applications IP ont été évaluées afin d'en apprécier le comportement avec une boucle DVB-S2+ACM en plus du délai de transmission ainsi qu'une bande passante variable dans le temps.

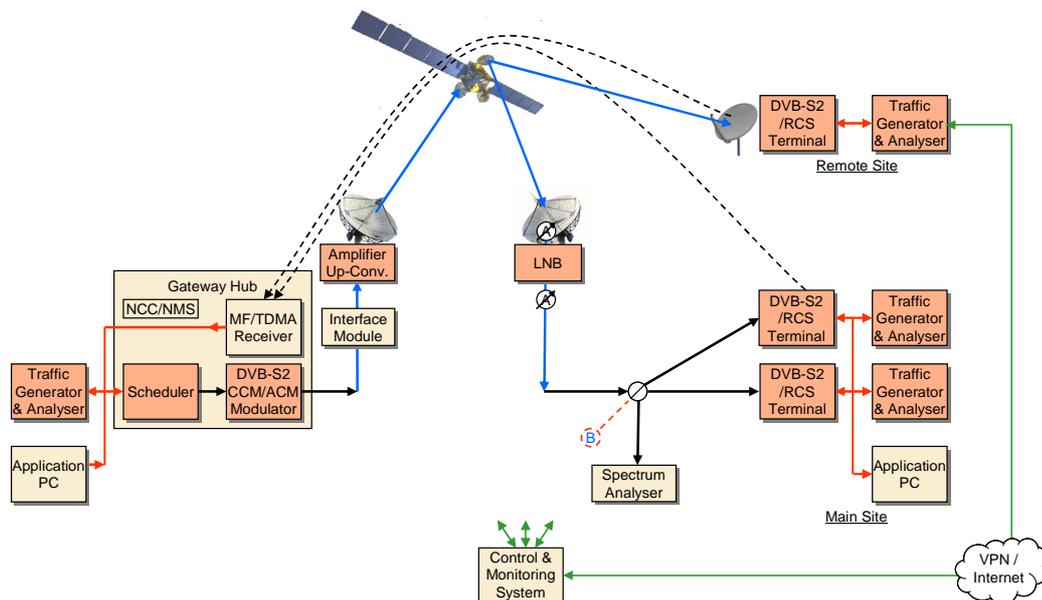


Figure V.9

La plateforme de test DVB-S2 Experiment pour le profil professionnel par satellite

Dans son principe et son architecture, le banc de tests est similaire à celui décrit au chapitre 3. La différence se situe au niveau des équipements DVB-S2/RCS avec

- **Un segment opérateur** comprenant un NCC (*Network Control Center*) avec une Gateway DVB/S2-RCS. Le sous-système Aller FLS (*Forward Link Subsystem*) implante un lien DVB-S2+ACM avec les 22 *ModCod* « utiles » disponible, des trames

longues (64800 bits) à la sortie du codeur canal, l'option insertion des symboles pilotes activée et un schéma d'encapsulation MPE/MPEG. Le temps de réponse de la boucle ACM est d'environ 1s.

- **Deux segments utilisateurs** avec des terminaux DVB-S2/RCS et des réseaux locaux composés d'IP phones et de PCs. Les RCSTs implantent une voie retour RCS avec un schéma d'encapsulation MPE/MPEG. L'adaptation apportée aux terminaux par rapport au cas DVB-S est le DRA (*Dynamic Rate Assignment*). C'est la possibilité de faire varier dynamiquement le débit en réception en fonction du changement du ModCod.
- **Un segment satellite** qui varie en fonction de la configuration de tests
  - Dans un premier temps un simulateur satellite est utilisé. Il a pour rôle de simuler un comportement réel d'une liaison satellite géostationnaire avec le délai, la dégradation du signal en plus d'un scénario de *fading*<sup>22</sup> complet permettant le recours à l'ACM.
  - Dans un second temps, c'est une vraie liaison satellite qui est mise en place. Cela permet d'un côté de voir le comportement des applications dans un contexte réel. Il est en revanche, moins évident d'observer le comportement de la boucle ACM. En effet, il est plus difficile et plus rare à une échelle de temps de quelques semaines d'observer un réel phénomène de *fading*

Sur un plan applicatif IP, aussi bien pour la VoIP que pour l'accélération, nous avons repris les mêmes solutions techniques utilisées précédemment

- Un PABX (*Private Automatic Branch eXchange*) reposant sur le logiciel *Open Source Asterisk*.
- Des modules d'accélération TCP placés des deux extrémités du lien satellite au niveau de la Gateway et des terminaux.

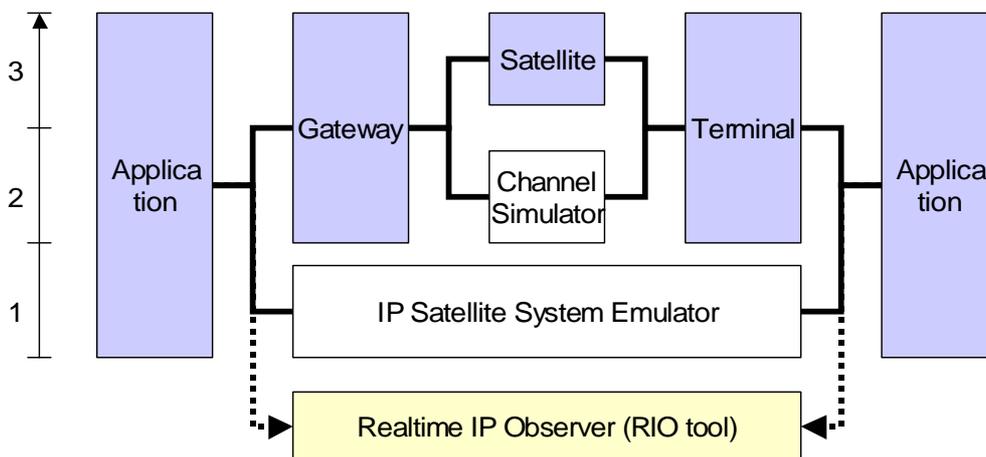


Figure V.10 Blocs fonctionnels du banc de tests DVB/S2-RCS

### V.3.2.2 Fonctionnement du lien Aller DVB-S2

<sup>22</sup> Ce terme désigne une dégradation du signal nécessitant la mise en œuvre de procédés de contre mesure tels que l'ACM.

Le fonctionnement du sous-système Aller DVB-S2 ACM représente la modification la plus significative par rapport à la plate forme IP DVB-RCS. Nous en donnons donc un bref descriptif dans ce qui suit.

A l'arrivée des paquets IP et tel que décrit par la figure 6.11, une encapsulation en MPE est effectuée suivie par une fragmentation en paquets MPEG avec le mode *Section Packing* (Sans Bourrage) activé.

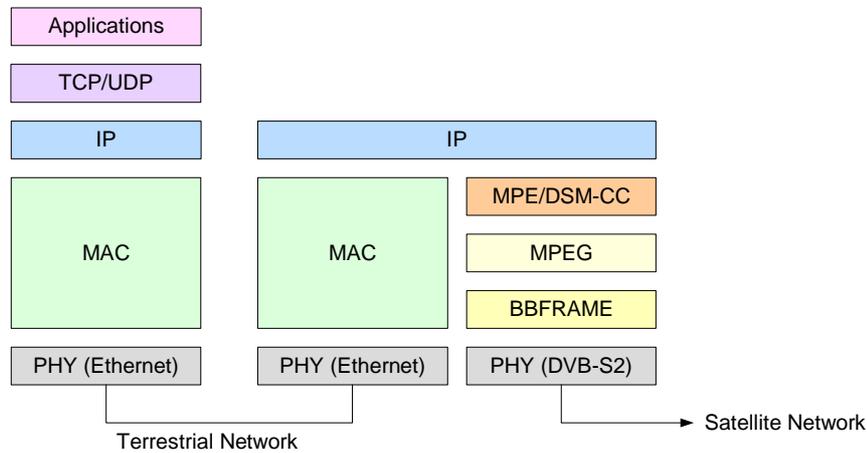


Figure V.11 La pile de protocole DVB-S2

La phase d'encapsulation est suivie par la prise en charge des paquets par l'ordonnanceur. Il a pour tâche de répartir les paquets selon les différents niveaux de priorités IP spécifiés. L'ordonnancement (ou *Scheduling*) est l'étape la plus critique de la transmission en raison de son impact sur les performances de la transmission DVB-S2. La prise de décision du module d'ordonnancement est régie par la qualité de service IP, ainsi le choix des paramètres physiques (*ModCod*).

Le banc de test *DVB-S2 experiment* étant principalement un prototype pour un profil professionnel d'utilisation du DVB-S2, pour les flux de données, 2 classes de services ont été prévues : temps réel et *Best Effort*. Le fonctionnement global de la chaîne, encapsulation et ordonnancement décrit par la figure 6.12.

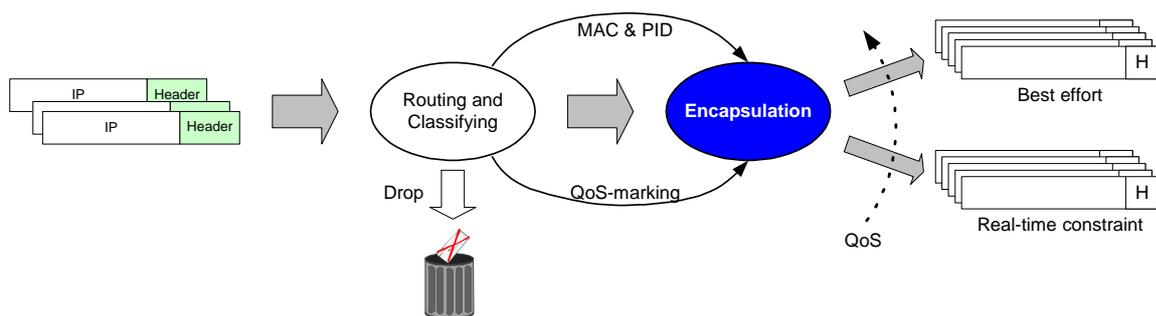


Figure V.12 Encapsulation et ordonnancement

En plus des flux de données, une file d'attente pour la signalisation est prévue et dispose de la plus haute priorité. Au niveau physique, et au vue de son importance critique, la signalisation est diffusée avec la modulation et le codage canal le plus robuste, le ModCod 1 (QPSK  $\frac{1}{4}$ ).

L'encapsulation couche physique de banc de test a été implantée conformément au standard. Seul un nombre entier de paquets MPEG peut être encapsulé dans une *BB Frame*. La

fragmentation d'un paquet IP sur plusieurs paquets MPEG n'est pas permise. Du bourrage est donc introduit dans les trames Bande de Base partiellement remplies.

Le nombre maximal de paquets MPEG-TS par *BB Frame* dépend du *ModCod* et du débit symbole. La manière avec laquelle les *BB Frames* sont remplies dépend de la taille des paquets MPE issus de l'encapsulation. Si la longueur du paquet MPE suivant est supérieure à la partie non encore remplie dans la *BB Frame*, alors du bourrage est introduit aussi bien dans le paquet MPEG que dans la *BB Frame*.

Notons encore une caractéristique spécifique au banc de test *DVB-S2 experiment* mais qui n'est pas sans impact sur les performances en occupation de bande par les paquets IP. Les terminaux, utilisés sont à la base prévus pour le DVB-S et conçus pour fonctionner en CCM (*Constant Coding and Modulation*). Le constructeur a dû les adapter au mode ACM et leur permettre de recevoir de porteuses dont le débit varie dynamiquement en fonction du *ModCod*. Le nombre maximal de cellules MPEG a été limité à une certaine valeur pour chaque *ModCod*, inférieure à celle définie par le standard.

### V.3.3 Les évaluations théoriques

Dans le cadre du projet et en parallèle aux expérimentations menées sur le banc de tests, nous avons effectué une évaluation des encapsulations successives des paquets IP au sein de la pile de protocole DVB-S2. En plus des éléments de repère dégagés de cette étude théorique, cela a l'avantage de nous sensibiliser à la manière d'optimiser ces encapsulations et à améliorer l'occupation de la bande passante.

Notre schéma d'encapsulation de référence reste le profil IP/MPE/MPEG sur DVB-S2 (voir figures 6.6 et 6.8). Dans ce qui suit, nous cherchons à déterminer le nombre maximal de paquets MPEG et de paquets IP à transporter par *BB Frame* en fonction d'un *ModCod* donné. Au risque de se répéter, ci-dessous nous énumérons les critères et les hypothèses servant de base à l'évaluation:

- Un paquet IP est composé d'un champ de donnée en plus d'un en-tête de 20 octets.
- L'encapsulation MPE DSM-CC ajoute un en-tête de 12 octets et une somme de contrôle de 4 octets.
- Le mode *Section Packing* est activé au niveau de l'encapsulation MPEG-TS avec un en-tête de 5 octets (au lieu de 4) pour le premier MPEG-TS contenant le premier fragment d'une section MPE DSM-CC.
- Au niveau de la couche physique DVB-S2, chaque *BB Frame* transporte un nombre entier de paquets MPEG-TS. Une *BB Frame* est composée d'un champ de données et d'un en-tête de 10 octets.

#### V.3.3.1 Cellules MPEG-TS par *BB Frame*

Ainsi le nombre maximal de paquets MPEG est donné par la formule (1)

$$N_{MPEG} = \left\lfloor \frac{K_{BCH} - 80}{188 \times 8} \right\rfloor^{23} \quad (1)$$

Le tableau ci-dessous, établit en fonction des *ModCod*, le nombre d'octets utiles par trame Bande de Base et le nombre maximal de paquets MPEG correspondant

---

<sup>23</sup> K-BCH représente la longueur totale (données + en-tête) d'une *BB Frame* avant codage.

Modcod Number	Modulation / Coding	BCH Uncoded Block Length	BBheader	Useful data per FEC Frame	Nb of MPEG Packets
1	QPSK 1/4	16008 bits	80 bits	15928 bits	10
2	QPSK 1/3	21408 bits	80 bits	21328 bits	14
3	QPSK 2/5	25728 bits	80 bits	25648 bits	17
4	QPSK 1/2	32208 bits	80 bits	32128 bits	21
5	QPSK 3/5	38688 bits	80 bits	38608 bits	25
6	QPSK 2/3	43040 bits	80 bits	42960 bits	28
7	QPSK 3/4	48408 bits	80 bits	48328 bits	32
8	QPSK 4/5	51648 bits	80 bits	51568 bits	34
9	QPSK 5/6	53840 bits	80 bits	53760 bits	35
10	QPSK 8/9	57472 bits	80 bits	57392 bits	38
11	QPSK 9/10	58192 bits	80 bits	58112 bits	38
12	8-PSK 3/5	38688 bits	80 bits	38608 bits	25
13	8-PSK 2/3	43040 bits	80 bits	42960 bits	28
14	8-PSK 3/4	48408 bits	80 bits	48328 bits	32
15	8-PSK 5/6	53840 bits	80 bits	53760 bits	35
16	8-PSK 8/9	57472 bits	80 bits	57392 bits	38
17	8-PSK 9/10	58192 bits	80 bits	58112 bits	38
18	16-APSK 3/5	43040 bits	80 bits	42960 bits	28
19	16-APSK 2/3	48408 bits	80 bits	48328 bits	32
20	16-APSK 3/4	51648 bits	80 bits	51568 bits	34
21	16-APSK 5/6	53840 bits	80 bits	53760 bits	35
22	16-APSK 8/9	57472 bits	80 bits	57392 bits	38
23	16-APSK 9/10	58192 bits	80 bits	58112 bits	38
24	32-APSK 3/4	48408 bits	80 bits	48328 bits	32
25	32-APSK 4/5	51648 bits	80 bits	51568 bits	34
26	32-APSK 5/6	53840 bits	80 bits	53760 bits	35
27	32-APSK 8/9	57472 bits	80 bits	57392 bits	38
28	32-APSK 9/10	58192 bits	80 bits	58112 bits	38

Tableau V-2 Nombre maximal de cellules MPEG en fonction du ModCod

Une remarque importante se dégage de ce tableau et pour ce schéma d'encapsulation. Pour chaque ordre de modulation, on retrouve le même nombre de cellules MPEG transportées pour les deux taux de codage les plus élevés. Ainsi, on transporte la même quantité d'informations utiles dans ces deux cas. Le choix à recommander à l'opérateur est d'utiliser le *ModCod* le plus robuste (avec le plus faible taux de codage) et par ailleurs celui qui requiert un niveau plus bas de signal sur bruit. Plus généralement, le nombre de paquets MPEG-TS par *BB Frame* est indépendant de la modulation et dépend uniquement du taux de codage.

### V.3.3.2 Paquets IP par BB Frame

Ce calcul représente la première étape de l'évaluation du nombre de paquets IP à encapsuler par *BB Frame* en fonction de la longueur des premiers. L'overhead introduit sur un paquet IP avant la fragmentation MPEG est de 17 octets (MPE + IP). Dans le cas où plusieurs paquets IP sont encapsulés au sein d'un même paquet MPEG, l'overhead introduit pour les autres paquets IP est de 16 octets.

Les sections MPE sont « mappées » dans les 184 octets utiles d'un paquet MPEG et le nombre maximal de paquet IP est donné par la formule (2)

$$N_{IP} = \left\lfloor \frac{N_{MPEG} \times (183 + \delta)}{IP\_packet\_size + (16 + \delta)} \right\rfloor \quad (2)$$

where  $\delta = 1$  when  $IP\_packet\_size \geq 167$ , 0 otherwise

On itère la formule (2) pour des tailles de paquets IP allant de 1 jusqu'à 1460 octets (inférieur au MTU Ethernet). Le résultat est donné par la figure 6.13

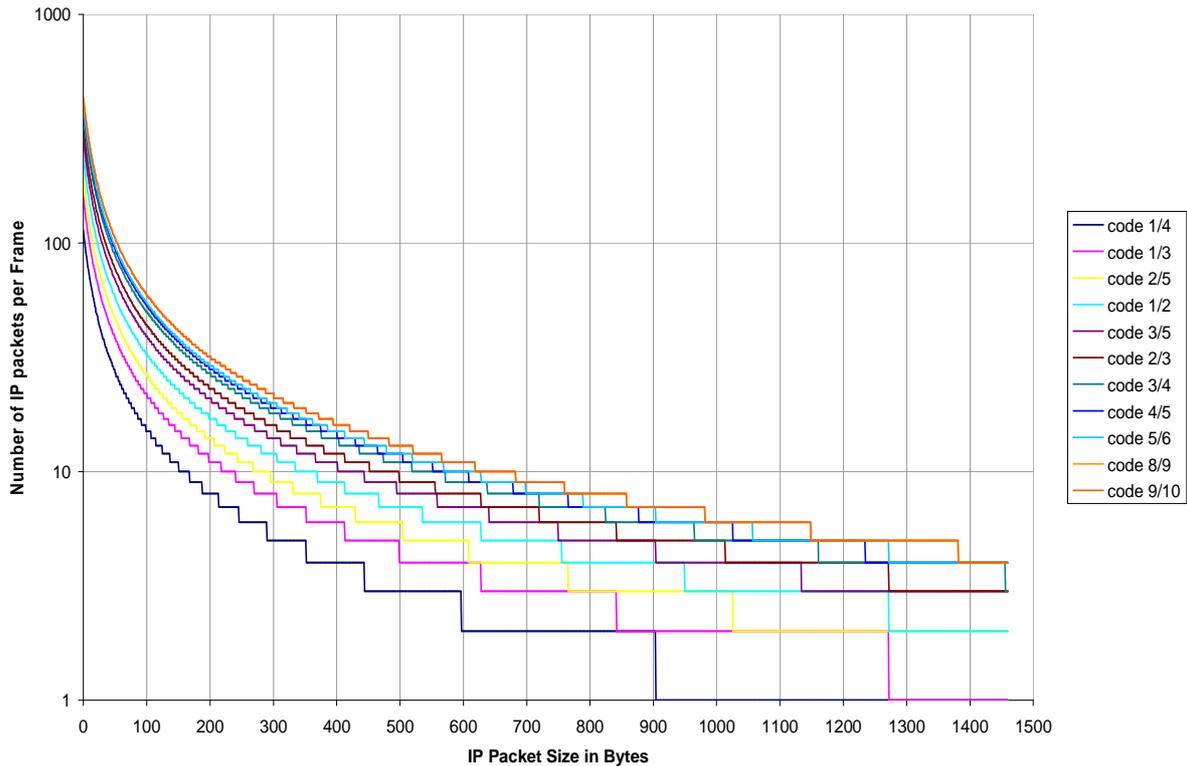


Figure V.13 Nombre maximal de paquets IP par BB Frame et par ModCod

Notons que le nombre de paquets IP diminue au fur et à mesure qu'on approche du MTU (*Maximum Transfer Unit*) Ethernet de 1500 octets, où seulement 4 paquets peuvent être contenus dans une *BB Frame*. Le résultat aurait été plus mauvais si on avait eu recours à des trames courtes (16200 bits).

Aussi, pour des longueurs élevées de paquets IP, les courbes avec des taux de codage différents ont tendance à se confondre. Par exemple et pour une taille de paquets de 1400 octets et en fonction du taux de codage, 1, 2, 3 ou 4 paquets peuvent être contenus dans une trame. Plus généralement, nous nous apercevons que 4 taux de codage ( $1/4$ ,  $2/5$ ,  $3/5$  et  $3/4$ ) suffisent pour couvrir toutes les possibilités et offrir les meilleurs pourcentages de remplissage des trames. Les taux de codage restants peuvent s'avérer inutiles et inefficaces en termes de seuil opérationnel du rapport signal sur bruit.

De plus, il est possible de maximiser l'efficacité de remplissage des BB Frames et exploiter l'ensemble des *ModCod* proposés par le standard DVB-S2 en limitant l'utilisation du bourrage. Il est plus judicieux de recourir à des paquets IP de longueurs différentes. Cette approche peut ne pas s'avérer uniquement théorique. En effet, dans le cas où on connaît exactement les types d'applications qui transitent sur le réseau, on pourrait en fonction de des caractéristiques de chacune lui attribuer une taille de paquet appropriée.

### V.3.3.2.1 Rapport IP sur BB Frame

En fonction du nombre de paquets IP par BB Frame, l'efficacité IP sur *BB Frame* est définie comme le rapport entre la longueur totale des paquets IP encapsulés et le champ de données de la BB Frame. La figure 6.14, montre les courbes d'efficacité pour chaque taux de codage.

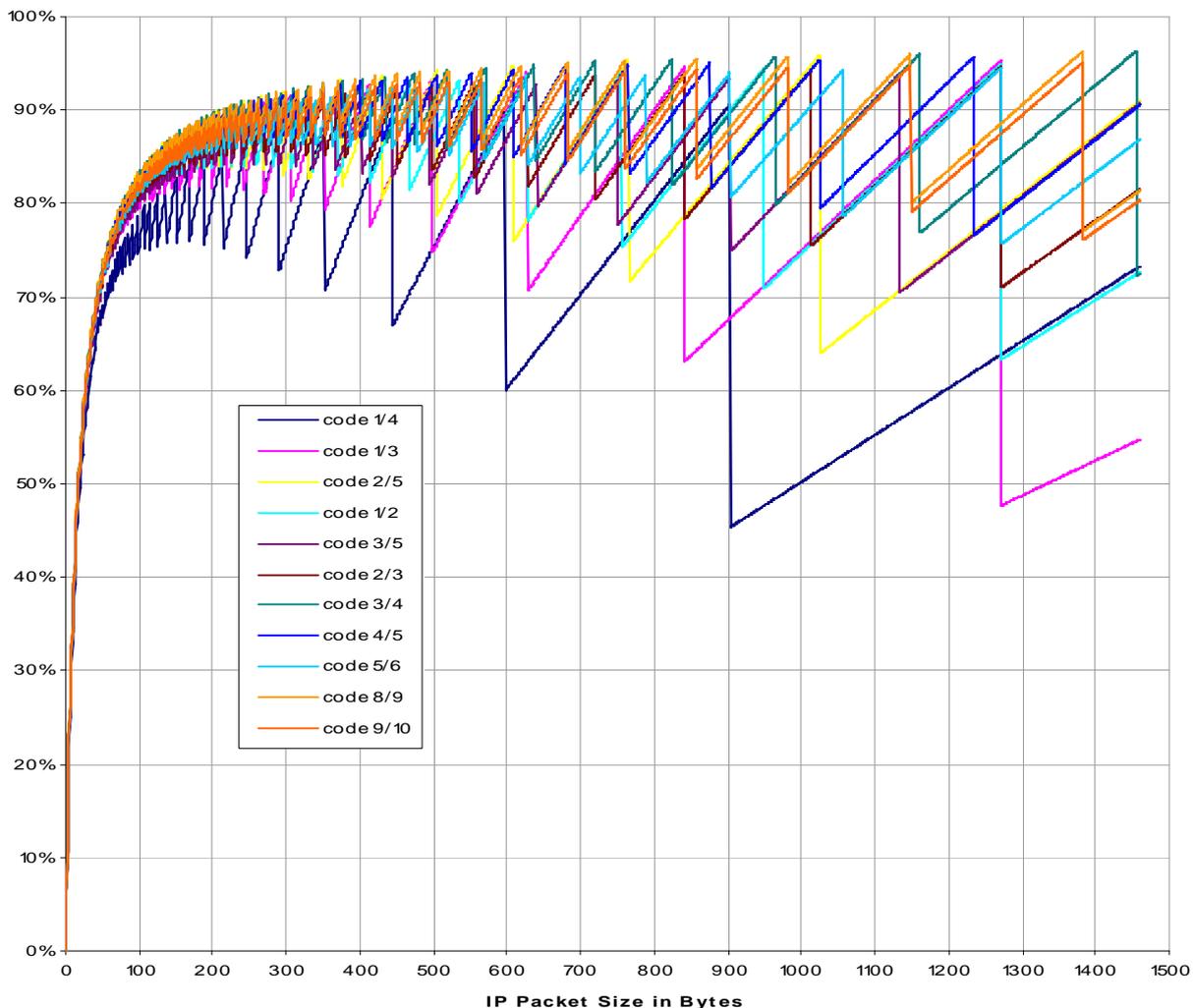


Figure V.14 **Efficacité IP sur BB Frame**

Les courbes représentent une concaténation de segments linéaires formant ainsi une courbe en accordéon dont l'importance varie en fonction l'évolution croissante des paquets IP. Pour les taux de codage les plus bas, la longueur du champ données est faible comparée aux paquets IP de grandes tailles (entre 1000 et 1500 octets). D'une part ceci limite le nombre de grands paquets IP pouvant remplir une *BB Frame*. D'autre part, la granularité de ces paquets étant importante, le passage d'un pas à un autre combiné à l'incapacité de la *BB Frame* de les contenir, implique un recours au bourrage induisant une chute significative de l'efficacité.

Cet effet accordéon est atténué à mesure que les taux de codage augmentent. En effet, la longueur du champ de données au sein d'une *BB Frame* croît proportionnellement et devient largement supérieure pour des taux comme 9/10 à la taille maximale que peut atteindre un paquet IP (~1500 octets). Ceci réduit l'effet néfaste de la granularité et améliore l'efficacité. On note au passage, le rapport IP sur *BB Frame* pour les petits paquets (< 100 octets) est assez faible et ce en raison de l'*overhead* introduit par les en-têtes successifs.

### V.3.3.3 Efficacité Spectrale

En poussant le raisonnement sur l'efficacité IP, un peu plus loin, nous tentons d'évaluer le rapport IP par symbole. Ceci représente l'efficacité spectrale IP. On la définit comme le nombre de bits par symbole. Il reste tout de même possible - ce qui n'est pas le cas

ici- d'intégrer dans les calculs, les différents Roll-off proposés par le standard et estimer le taux d'occupation « utile » d'un répéteur satellite. La figure 6.15 donne les efficacités spectrales relatives aux 22 ModCod en fonction de la taille du paquet IP.

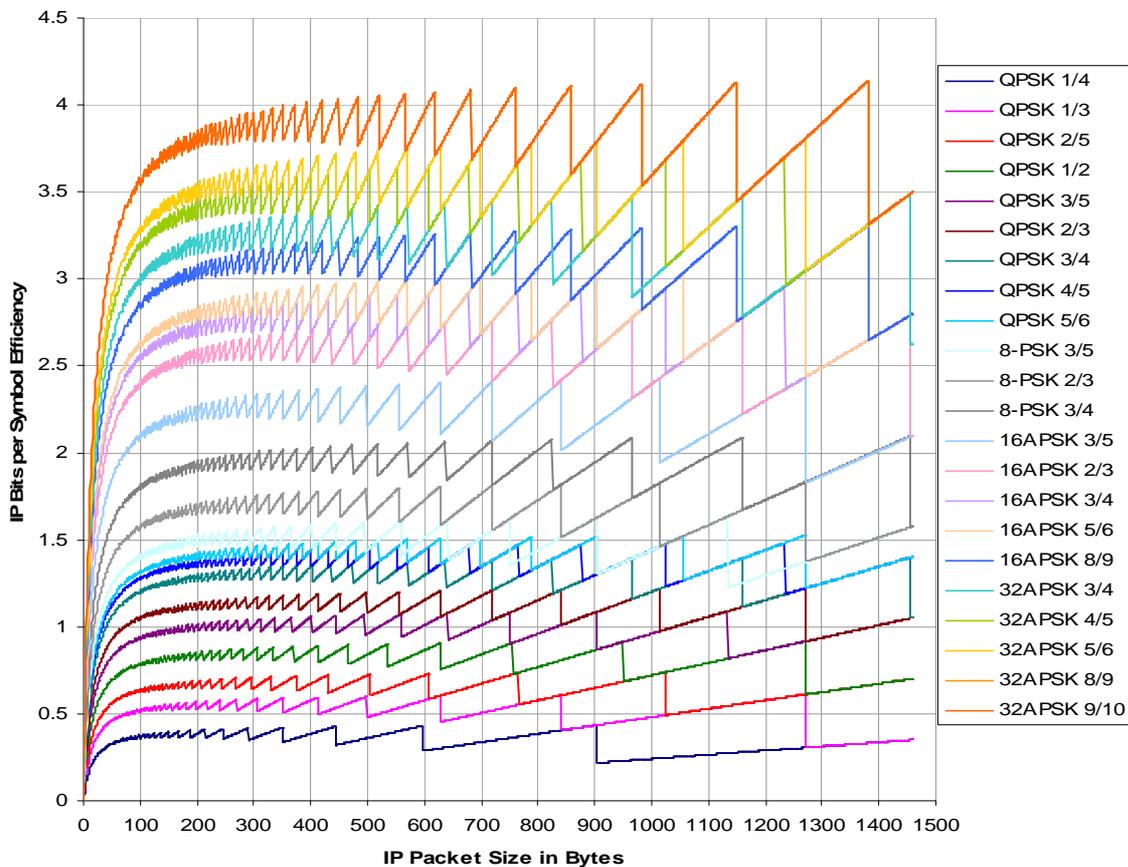


Figure V.15 Bits IP par symbole

A partir des évaluations ci-dessus, il devient aisé de déduire les débits IP en multipliant les efficacités spectrales respectives par le débit symbole. A titre d'exemple, des paquets IP de 600 octets transmis avec le *ModCod 25* (32-APSK 4/5) ont une efficacité de (10 paquets IP/13338 symboles = 3,6 bits/symbole). Un débit IP de 108 Mbit/s requiert un débit symbole de 30 MS/s

#### V.3.3.4 Comparaison MPE & GSE

Dans ce qui suit nous établissons une comparaison théorique entre le schéma d'encapsulation MPE/MPEG et le GSE décrit précédemment et proposé en option du standard. L'en-tête d'une encapsulation GSE varie en fonction de plusieurs paramètres (fragmentation des paquets IP, paquet complet...). On se place dans le pire cas, et on suppose que pour chaque paquet IP, c'est un en-tête maximal GSE qui est introduit avec 10 octets et une somme de contrôle de 4 octets.

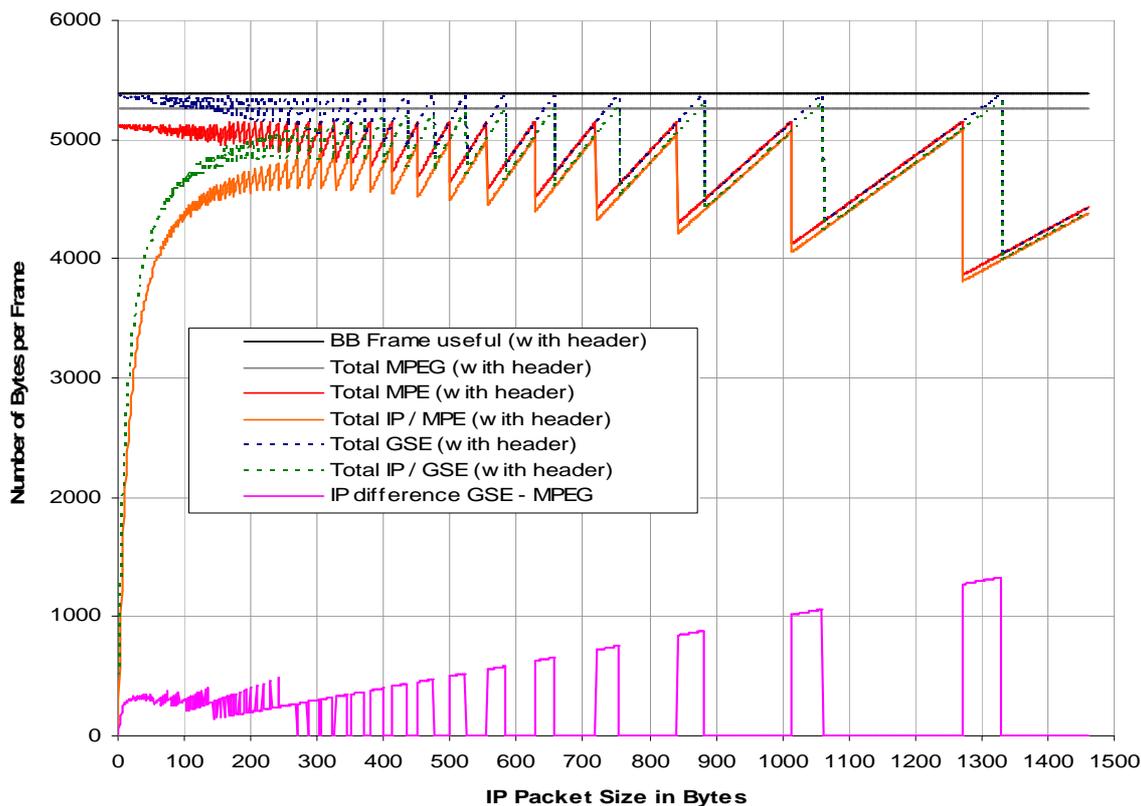


Figure V.16 IP sur MPE et GSE pour code 3/5

Le tableau III prend comme exemple le taux de codage  $3/5$  et nous évaluons le nombre de paquets IP à encapsuler par *BB Frame* si on adopte GSE comme schéma d'encapsulation. Le schéma montre notamment l'écart IP « utile » dans le remplissage entre une encapsulation MPE/MPEG et une encapsulation GSE.

On note que, dans l'ensemble, GSE présente un meilleur taux de remplissage utile et ce en raison d'un overhead plus réduit. Ce résultat est indépendant de la taille des paquets IP mais il reste en particulier vrai pour des petits paquets IP. GSE est ainsi mieux adapté pour acheminer des applications comme la VoIP. Le gain moyen en efficacité apporté par GSE est de l'ordre de 4,6 % pour des trames DVB-S2 avec le code  $3/5$  et une distribution uniforme des tailles de paquets IP entre 0 et 1460 octets.

### V.3.3.5 Conclusion

Ces évaluations renseignent sur les performances théoriques des paquets IP sur DVB-S2. La principale conclusion est le gain en efficacité d'encapsulation apporté par GSE. Aussi, le recours aux trames longues (64800 bits) est recommandé pour la transmission de l'IP.

Un choix adapté de la taille des paquets IP ainsi que du *ModCod* permet d'atteindre des résultats optimaux en termes d'occupation de bande. Cette affirmation peut toutefois n'être que théorique. En effet, la taille des paquets IP varie selon les applications IP. En plus celle des BB Frames varie dynamiquement si le mode ACM est activé.

Cependant, d'un point de vue pratique et selon les cas, il est toujours possible de trouver un moyen d'occuper au mieux la bande passante en jouant sur la taille des paquets IP et le *ModCod*. D'une manière générale, un opérateur d'un réseau IP par satellite connaît exactement les applications qui transitent sur le réseau. Si on prend l'exemple d'un réseau de

données avec un trafic consistant majoritairement en un accès Web, e-mail ou le transfert de fichiers, il devient plus aisé de fixer la taille des paquets IP. Il s'agit, dans ce cas, d'une majorité de paquets de grandes tailles. On peut avoir recours à des modules aux extrémités d'un réseau satellite tels que les accélérateurs TCP, véritables goulet d'étranglement du trafic ascendant et descendant. De cette manière, il est possible de choisir la taille des paquets IP qui conduit aux meilleures efficacités. En parallèle, et pour une transmission en ciel clair, il est toujours possible de définir le *ModCod* qui assure l'efficacité visée. Ce couple taille IP de paquets et ModCod sera opérationnel la plupart du temps.

En plus, l'ACM n'est déclenché qu'en cas de dégradation de conditions de transmission et ce pour un faible pourcentage du temps. Durant cet intervalle de temps, la priorité est davantage à la transmission même du signal qu'à un usage efficace de la bande passante.

### V.3.4 Les tests applicatifs et l'ACM

L'objectif premier des tests que nous décrivons ci-dessous est de d'analyser le comportement des applications IP avec des conditions de transmission nécessitant le recours à l'ACM.

Notre attention porte, d'une part, sur la relation entre la boucle ACM (d'une durée d'1 seconde) et son effet sur les flux IP. D'autre part, nous nous penchons sur l'observation du comportement des applications IP, par ailleurs implantées par des sous-systèmes distincts de la solution DVB/S2-RCS. En présence d'une boucle ACM, il reste crucial de savoir si les niveaux de précedence IP sont respectés et d'évaluer le niveau de dégradation des performances qui résulte de la baisse brusque des ressources. Au cours des expérimentations, nous étions attentifs à l'impact d'un changement rapide dans le temps du niveau du signal sur bruit sur ces applications.

Dans notre approche nous considérons deux catégories d'applications IP.

- Les applications TCP : elles regroupent l'ensemble des flux IP reposant sur le protocole TCP pour la transmission et nécessitant la mise en œuvre de mécanismes d'accélération sur satellite.
- La VoIP, application temps réel et à débit constant et sensible à la variation de la bande passante.

#### V.3.4.1 L'événement de *Fading*

Si l'on considère un contexte -réel- de transmission par satellite, les phénomènes de dégradations des conditions atmosphériques entraînant des variations significatives du niveau du signal sur bruit et le déclenchement de la boucle ACM sont peu fréquents dans le temps -heureusement d'ailleurs-.

L'environnement contrôlé du laboratoire et le recours au simulateur satellite, nous permettent de définir un scénario de *Deep Fading* ayant pour conséquence de déclencher une boucle ACM et d'activer une multitude de *ModCods*.

Par ailleurs et à titre d'information, la figure 6.17 retrace un événement de fading naturel. En effet, au cours de la campagne de tests par satellite, nous avons eu la chance d'assister à un orage !

La figure 6.17 décrit une variation de signal sur bruit suite à des intempéries sur trois antennes en réception d'une porteuse DVB-S2. La boucle ACM oscille entre 6 *ModCod* (19 et 25). La courbe de couleur orangée montre les seuils impliquant un changement de *ModCod*.

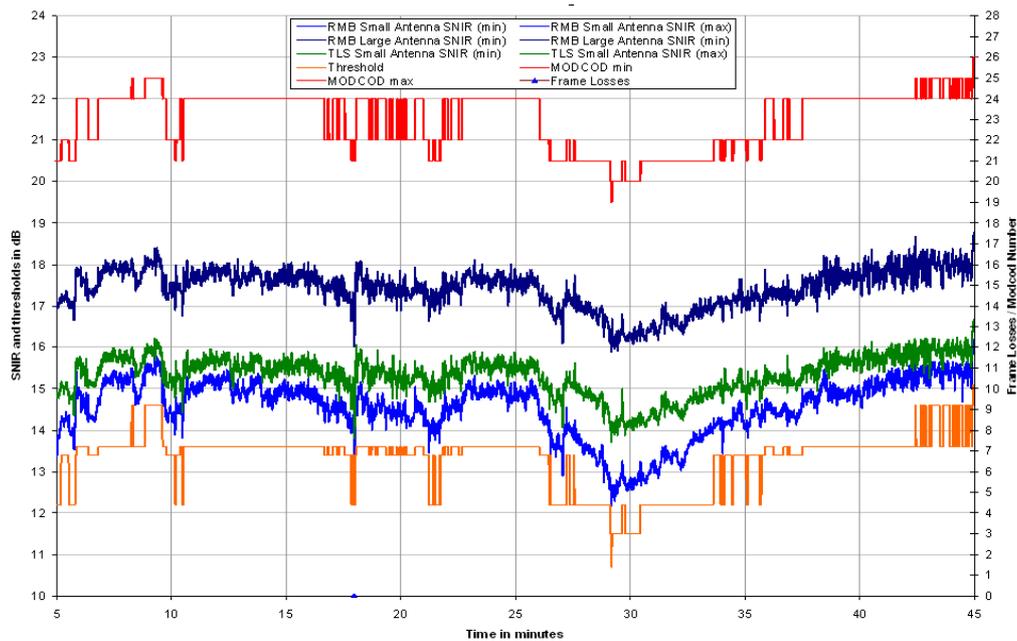


Figure V.17 Fading naturel par satellite observé sur trois antennes

Cependant et pour les besoins des tests applicatifs IP, nous avons élaboré un événement de *Deep Fading* (entraînant une forte chute du signal sur bruit). Cet événement, bien que de courte durée et ne parcourant pas la totalité des 22 *ModCod* utiles, reste assez représentatif de ce qui survient en cas de fortes détérioration de la liaison suite à des intempéries.

L'événement se répartit en trois phases successives. La première caractérise des conditions de transmissions optimales en ciel clair. Ensuite, intervient la phase de *Fading*, avec une dégradation notable entraînant une chute du niveau de signal sur bruit. Elle implique une baisse de 70 % de l'efficacité spectrale et une atténuation de l'ordre de 7 dB. On part du *ModCod 9* (QPSK 5/6) avec un niveau de signal d'environ 6 dB pour atteindre le *ModCod 1* (QPSK 1/4) et un niveau de signal de -1 dB avec une atténuation de 0,5 dB par seconde. Notons que même avec un niveau de bruit supérieur à celui du signal utile, il est toujours possible d'émettre. Suit la phase d'atténuation, un retour aux conditions de transmission optimales avec une croissance du niveau du signal et une transmission en *ModCod 9*.

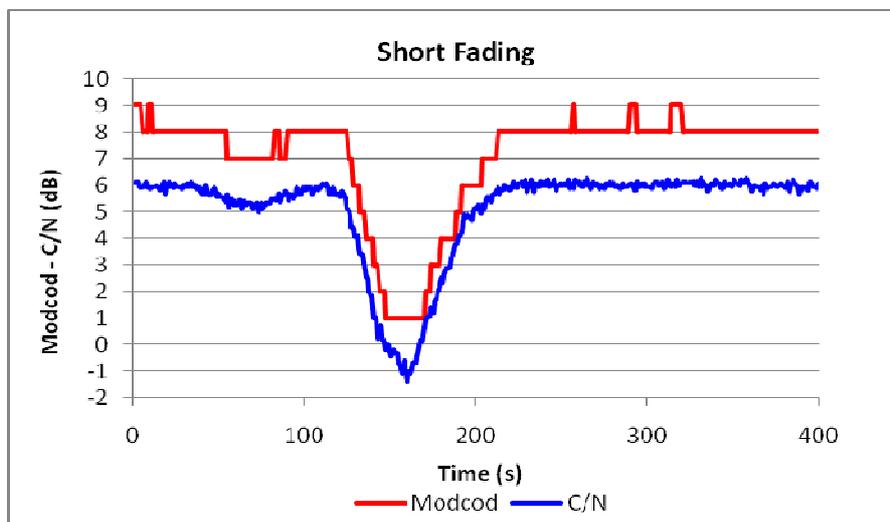


Figure V.18 Événement de *Fading* expérimental

Cet événement de *Fading* expérimental donne la possibilité de « parcourir » 9 *ModCods* en mode ACM. C'est une situation assez rare étant donné qu'un orage ou une dégradation de cette ampleur des conditions de transmission est tout de même peu fréquente. Remarquons que l'événement de fading naturel (figure 6.17) déclenche 6 *ModCod* ce qui est déjà exceptionnel !

### V.3.4.2 ACM et applications TCP

Dans notre démarche expérimentale, nous avons regroupées l'ensemble des applications TCP. Cela couvre aussi bien la navigation Web, l'e-mail ainsi que le transfert de fichiers. Les deux premières se caractérisent plutôt par un débit variable avec des pics en période de récupération de données avec un comportement *bursty*, le transfert de fichiers a généralement<sup>24</sup> lieu à débit constant. Toutefois, TCP étant un protocole sans pertes, le caractère commun reste le temps requis pour transmettre les données, en particulier par satellite. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous avons regroupé les applications TCP.

Pour les besoins de nos tests, nous avons opté pour un transfert de fichier via FTP. En effet, les accès Web ou l'email (à moins d'une pièce jointe de grande taille) n'entraînent pas de débits significatifs pouvant être sujet à observation, spécialement pour notre réseau expérimental d'une Gateway et deux terminaux.

Notre test consiste donc en un transfert d'un fichier de 1 Go entre la Gateway et le terminal (lien DVB-S2) auquel on applique un événement de *fading* impliquant le déclenchement de la boucle ACM. Ce test se déroule en deux étapes. Le première se déroule sans le recours à l'accélération TCP, le deuxième a lieu avec des PEPs placés des deux extrémités du lien satellite.

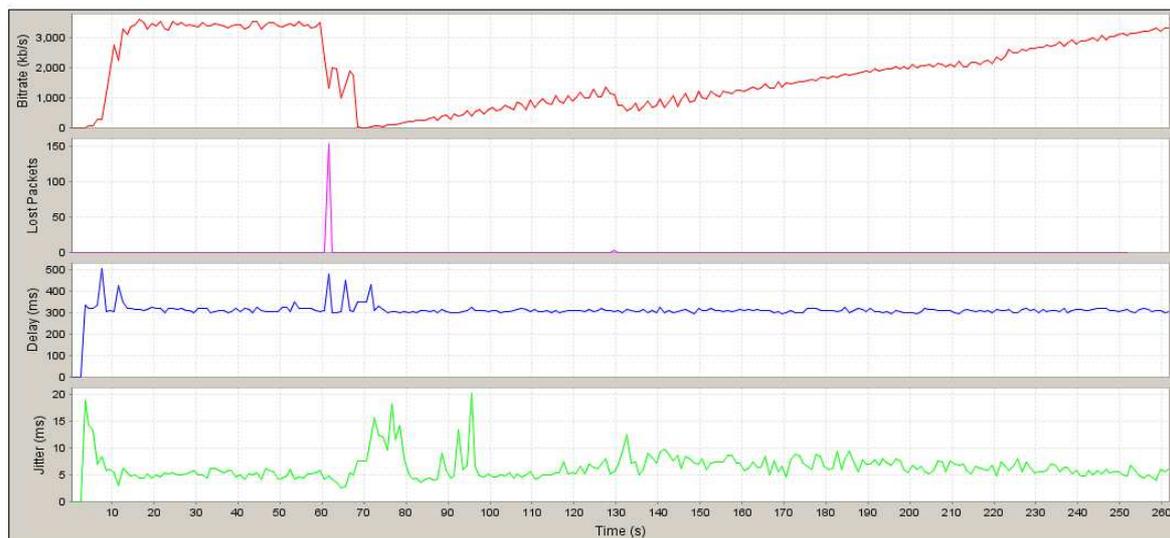


Figure V.19 **Transfert FTP avec TCP non accéléré en présence d'un événement de Fading et d'une boucle ACM**

La figure 6.19 retrace la courbe d'évolution du débit, des pertes de paquets, du délai et de la gigue pendant la durée de tests entre la source du trafic (serveur FTP) côté Gateway

<sup>24</sup> Pour peu que la taille du fichier à transférer soit suffisamment grande (pour durer un minimum).

et sa destination (le client FTP) côté terminal. Notons que la durée du transfert du fichier excède largement celle de l'événement de fading que nous avons mis en place.

Durant la première phase (conditions optimales), on observe un comportement standard de l'algorithme *Slow Start* de TCP et une augmentation graduelle (bien que lente en raison du délai satellite) de la fenêtre de transmission jusqu'à atteindre la taille optimale avec le débit maximal autorisé. Remarquons au passage que le débit IP maximal de la porteuse DVB-S2 est de l'ordre de 6 Mbit/s. La taille des fenêtres TCP maximales, initialement limitées à 64 KB ont été modifiées au niveau du client et du serveur FTP pour permettre d'atteindre le débit maximal (Débit = taille de la fenêtre / RTT).

Ensuite survient l'événement de *Fading* proprement dit. Le mode *congestion avoidance* est activé. Cette phase intervient au moment de l'atténuation du signal et du déclenchement de la boucle ACM. Dans la phase descendante de l'ACM, le nombre croissant de paquets perdus et la constante décroissance du niveau du signal oblige le protocole à réduire la taille de sa fenêtre. Les premières tentatives de déclenchement de l'algorithme *fast recovery* échoue puisque le niveau signal est encore en train de baisser.

Ainsi, le débit TCP chute jusqu'à une valeur quasi nulle résultant par ailleurs en une perte de paquets ainsi qu'un pic de délai et de gigue. Ensuite, débute une phase de *fast recovery*, où le débit observe une progression. Notons par ailleurs, que durant cette phase et même si le signal subit encore des dégradations, le trafic est tout de même transmis puisque son volume est inférieur au débit IP max que permet le *ModCod 1*.

L'algorithme *fast recovery* agrandit en permanence la taille de la fenêtre résultant par là même en une augmentation du débit. Cette croissance est également accompagnée par l'évolution du débit dans la phase ascendante de l'ACM.

Ce que nous pouvons conclure de ces observations, c'est le préjudice causé par les atténuations et le déclenchement du mode ACM. Bien que les pertes de paquets soient réduites, grâce au changement dynamique du codage et de la modulation pour renforcer la liaison, le comportement standard de TCP, en particulier la combinaison des algorithmes de *Congestion avoidance* et de *fast recovery*, ne permet pas d'atteindre rapidement le débit IP maximal que permet le *ModCod* de la boucle ACM activé à cet instant.

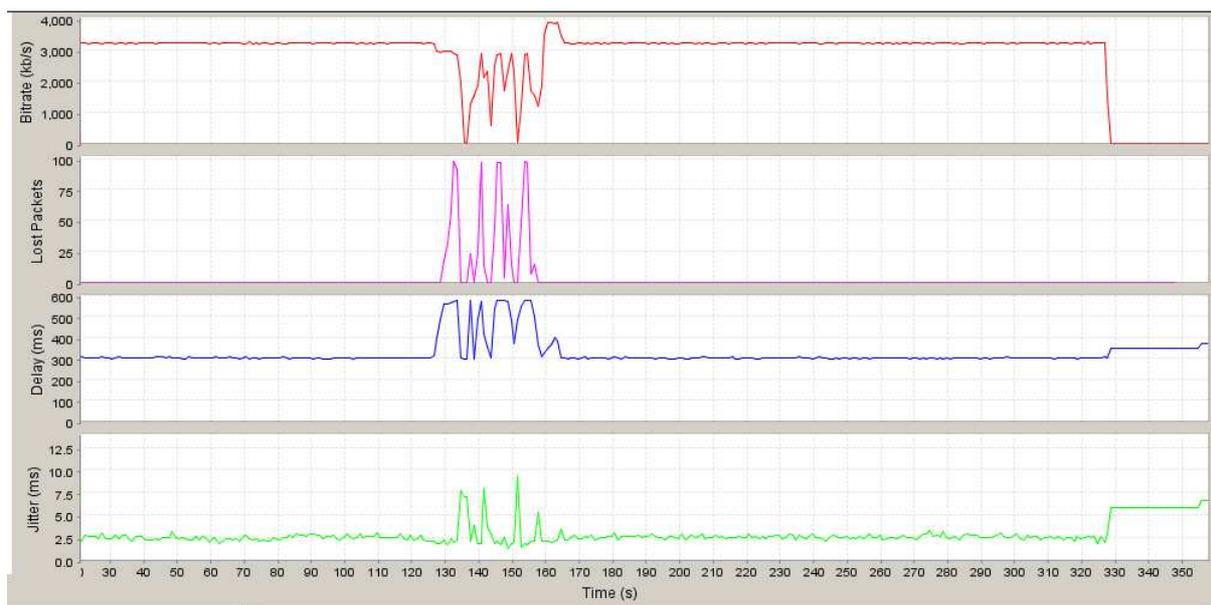


Figure V.20 FTP avec TCP accéléré en présence d'un événement de *fading* et d'une boucle ACM

Dans la seconde étape du test, le transfert FTP est effectué en présence d'accélérateurs TCP aux deux extrémités du lien satellite. Lorsque l'événement de *fading* est déclenché et que la boucle ACM est activée, on observe une forte augmentation des pertes de paquets en plus de celles des délais. Toutefois, en mode TCP accéléré et même en cas d'atténuation du signal, TCP tente de « revenir » au débit d'émission maximal autorisé par le *ModCod* le plus élevé avec une quasi inexistence des algorithmes de contrôle de flux. L'explication tient au fait que les valeurs de débit maximal de la liaison ainsi que celle du RTT, sont déjà préconfigurées au sein de l'accélérateur TCP. Par conséquent, et à priori indépendamment des conditions de liaisons, l'accélérateur tente de revenir au débit maximal tel qu'il l'a évalué en fonction des paramètres configurés. Cela explique par ailleurs les pertes de paquets plus nombreuses que dans le cas standard. Ceci étant et dans la « phase ascendante de l'ACM », TCP accéléré atteint plus rapidement le débit maximal de la liaison.

On conclut des ces observations, que dans sa version accélérée, TCP nous évite de gaspiller de la bande passante en atteignant plus rapidement le débit maximal. Toutefois, il implique des pertes de paquets plus significatives en présence d'un événement de *fading*. En effet, il tente systématiquement d'atteindre le *ModCod* permettant la plus large bande passante alors qu'on en présence d'ACM, ce sont les *ModCod* inférieurs qui sont utilisés. Nous remarquons que ce comportement reste spécifique à l'accélérateur TCP utilisé dans le cadre de ce test où la configuration est statique et n'évolue pas en fonction des conditions de transmissions. Toutefois, ceci reste le cas de la plupart si ce n'est de la totalité des solutions d'accélération TCP implantées. Ces dernières ont été conçues pour des liaisons satellite configurées avec des marges statiques et des largeurs de bande fixes, ne supportant pas l'ACM.

Cette observation nous sensibilise à la nécessité d'interaction qui doit avoir lieu entre le niveau transport, en l'occurrence TCP, et le module ACM (Couche physique) où les décisions de changement de *ModCods* sont prises. C'est aussi l'esprit des interactions *Cross-Layer* où un échange d'informations sur l'état de liaison est nécessaire pour éviter des pertes de bande passante. Dans ce cas précis, on peut imaginer qu'à chaque changement de *ModCod* le module ACM puisse communiquer au module d'accélération TCP le débit maximal atteignable. En se basant sur cette information en plus de la valeur du RTT, le PEP est en mesure d'estimer la taille de fenêtre adaptée au *ModCod* en question.

Dans l'immédiat et afin d'éviter les pertes des paquets, une solution possible – qui loin d'être optimale en terme d'usage de bande- est de configurer l'accélérateur TCP pour qu'il atteigne au plus le débit IP maximal autorisé par le *ModCod* le plus robuste et donc le « plus bas » de la boucle ACM. C'est envisageable dans ce contexte d'utilisation professionnelle du réseau IP par satellite (pas d'applications pair-à-pair ou de téléchargement lourd). Les accès Internet et les transferts de fichiers ne requièrent pas en général des débits très élevés.

### **V.3.4.3 Voix sur IP et ACM**

Les tests de VoIP que nous allons décrire sont utiles sur plus d'un aspect. Ils permettent dans un premier temps d'évaluer l'encapsulation sur le format de trame DVB-S2. Ensuite, ils procurent un moyen d'évaluer la qualité de service IP et l'impact de l'ACM.

#### **V.3.4.3.1 VoIP et durée de trame**

A travers ce test, nous tentons de trouver la durée de trame voix optimale en fonction du codec choisi. Nous recommandons ici un exercice déjà effectué avec les technologies étudiées précédemment. Outre le délai, la durée de la trame voix est également dépendante de la pile protocolaire de la technologie qui la transporte. L'objectif du test est de trouver le compromis entre l'overhead introduit par les encapsulations successives et la taille des

données utiles. Notre choix de codecs a porté sur le G.729 en raison de la modularité offerte par la taille élémentaire de l'échantillon qu'il génère (10 ms).

On établit une communication VoIP (seul trafic sur le lien et sans mécanisme de compression) qui transite via le lien DVB-S2. On modifie à chaque fois la durée de la trame voix. On débute avec une durée de 10ms et on incrémente graduellement à chaque phase de test jusqu'à 80 ms. Ce test a lieu en mode CCM (*Constant Coding and Modulation*) avec le ModCod 3 (QPSK 2/5) qui permet le meilleur ratio MPEG/BB Frame. (De l'ordre de 99,5%.) Les courbes de débit IP et MPEG et *BB Frame* (sur une autre échelle) sont montrées par la figure 6.20.

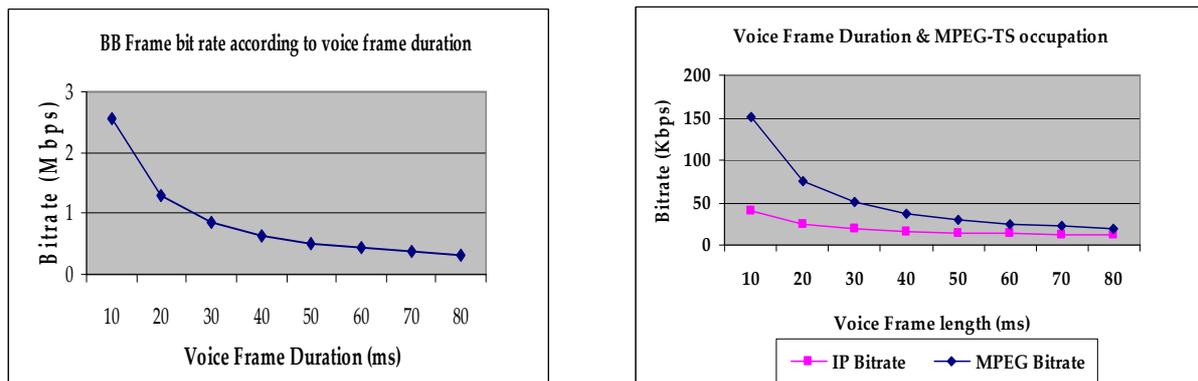


Figure V.21 Les courbes de débit IP, MPEG et BB Frame en fonction de la durée de la trame voix

Nous observons que plus la trame voix est longue moins les débits IP, MPEG et *BB Frame* sont élevés. Nous notons également que chaque paquet VoIP est encapsulé en une seule cellule MPEG-TS et en une seule BB Frame ce qui explique le débit important de ces dernières. A mesure qu'on augmente la durée des trames, le nombre de paquets IP, de cellules MPEG-TS et de *BB Frames* nécessaires par seconde diminue induisant une baisse du débit.

En parallèle l'augmentation de la durée de trame voix améliore l'efficacité d'encapsulation. Toutefois, il n'est pas possible d'augmenter indéfiniment la durée des trames. Cela résulte en une dégradation sensible de la qualité de la voix, perceptible à l'oreille. A ce titre et aussi bien pour le DVB-S2 que pour les autres technologies, nous optons pour une trame voix entre 40 et 50 ms qui présente le meilleur compromis entre utilisation de la bande et qualité de la voix restituée.

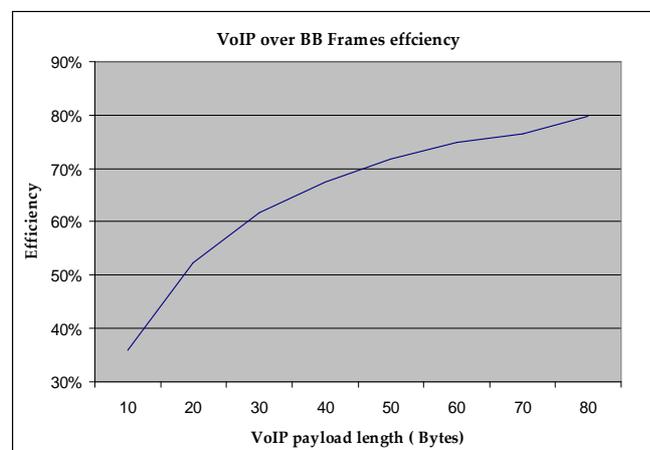


Figure V.22 Efficacité VoIP(utile)/BB Frame