

Thèse

présentée en vue de
l'obtention du titre de

Docteur
de

**L'École Nationale Supérieure
de l'Aéronautique et de l'Espace**

ÉCOLE DOCTORALE: Mathématiques, Informatique, Télécommunication de
Toulouse

SPÉCIALITÉ: Télécommunications et Réseaux

par

Ferdinand TRA

**Contrôle d'Admission des Connexions pour les
Systèmes de Télécommunication par Satellite avec
des Liaisons Physiques Adaptatives**

Soutenance prévue le 29 janvier 2008 devant le jury:

Michel BOUSQUET	Professeur ISAE	Président
Walid DABBOUS	Directeur de Recherche INRIA	Rapporteur
Samir TOHMÉ	Professeur UVSQ	Rapporteur
André-Luc BEYLOT	Professeur INPT-ENSEEIH	Encadrant
Christian FRABOUL	Professeur INPT-ENSEEIH	Directeur de thèse
Cédric BAUDOIN	Ing. Recherche Thalès Alénia Space	Examineur

*Au jour du bonheur, sois heureux,
et au jour du malheur, réfléchis*

Ecclésiaste chapitre 7 verset 14

Remerciements

*Le bonheur le plus doux [n]'est[-il pas] celui qu'on partage ?*¹ Merci à tous d'avoir, chacun à sa façon, contribué aux connaissances techniques et à la leçon de vie tirées de ces trois années de doctorat.

Toute ma gratitude et mes sincères remerciements vont à M. André-Luc BEYLOT, Professeur à L'INPT-ENSEEIH, qui a permis le réamorçage de ce travail de thèse si mal parti. Il n'aurait pu arriver à terme sans son intervention et son implication au moment où je lâchais prise. Je lui suis donc infiniment reconnaissant, outre pour ses perspicacités techniques et sa part humaine et relationnelle, de la confiance et du courage témoignés en acceptant d'encadrer mes travaux de recherches et de les mener sur une fin heureuse.

Je tiens à remercier le professeur Christian FRABOUL, mon directeur de thèse, qui a su par sa patience m'aider lorsque tout semblait s'écrouler.

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance aux membres du jury pour la confiance qu'ils m'ont témoignée, et particulièrement au président du jury M. Michel BOUSQUET, directeur des Programmes aérospatiaux et professeur à l'ISAE. Je remercie aussi les deux rapporteurs, M. Walid DABBOUS, Directeur de Recherche à l'INRIA, et M. Samir TOHMÉ, Professeur à l'UVSQ, pour le difficile exercice de relecture de manuscrit et leurs observations fort judicieuses.

Une gratitude toute particulière à Cédric Baudoin, ingénieur de recherche à Alcatel Alénia Space, pour son rôle d'examineur et de conseil industriel. De même, je réitère mes remerciements à Katia Leconte pour sa disponibilité et son expertise technique sur le difficile sujet des modèles de propagation.

Je suis également reconnaissant à Alcatel Alénia Space et le laboratoire TésA d'avoir bien voulu supporter la partie financière de cette thèse.

Merci à tout le laboratoire TésA, à son directeur Francis CASTANIÉ, à Marie-Jo et Sarah, ainsi qu'à tous les collègues et amis pour tous les bons moments que nous avons partagés, en particulier Emmanuel C. (merci

1. Jacques Delille (1738-1813), académicien et poète français.

pour l'initiation à Latex!), Emmanuel D., Patrice, Ponia, Lucile, Mariana, Anchalee, Julien, Xavier, Taï. Par ailleurs, je remercie toute l'équipe de recherche IRT.

Mille merci à Corinne MAILHES. Je n'oublierai pas ce que je dois à son indignation et son soutien.

Je remercie chaleureusement famille et amis pour leurs mots, paroles et conseils quand il fallait.

Enfin, je ne terminerai pas ses remerciements sans une pensée tendre pour Lydia, ma chère épouse : merci pour tes prières et ton sourire quotidien - mè bou la yè!

Que Dieu vous bénisse tous !

Résumé

Pour les systèmes de communication par satellite qui utilisent de hautes bandes de fréquence, les phénomènes atmosphériques induisent de très fortes atténuations qui ne peuvent plus être couvertes par une seule marge statique. Des procédures de contre-mesure dynamique des affaiblissements ont donc été proposées. Elles permettent d'adapter les paramètres de transmission (modulation, codage, puissance, débit,...) en fonction des conditions réelles de propagation.

Ces procédures, dénommées techniques FMT (Fade Mitigation Techniques), améliorent les performances au niveau de la couche physique. Malheureusement, elles induisent une variation à la fois de la capacité globale offerte par le système et de la capacité individuelle des terminaux utilisateurs. Cela implique, donc, de redéfinir les mécanismes classiques de gestion de ressources, notamment le Contrôle d'Admission de Connexions (CAC). En effet, une fonction CAC qui n'utiliserait pour sa décision d'admission qu'une capacité constante conduirait à interrompre certaines connexions dès que des affaiblissements atmosphériques surviendraient. Ces interruptions de connexion sont un motif d'insatisfaction de la part des usagers.

Cette thèse se propose donc d'étudier les fonctions CAC pour les systèmes satellitaires à capacité variable. Dans ces systèmes, la fonction CAC doit être capable d'anticiper l'état de la capacité dans le futur. Ceci permet de n'accepter une connexion que si la fonction CAC suppose que la capacité sera disponible suffisamment longtemps pour la maintenir avec le niveau de qualité requis. On parle alors de *CAC adaptatif*.

Ce travail s'est, alors, construit autour de la prise en compte de la variation de la capacité pour la définition de CAC adéquats au travers de l'analyse des phénomènes d'atténuation et de leur prédiction. L'étude menée sur les modèles d'évolution spatio-temporelle des atténuations et leur prédiction a mis en évidence leur inadéquation pour une fonction CAC. En effet, d'une part, ils agissent sur des échelles de temps trop courte, de l'ordre de la seconde, pour leur exploitation par la fonction CAC, et d'autre part, ils sont trop complexes pour leur utilisation dans le cadre d'un système réel.

Par conséquent, une méthodologie simplifiée a été proposée. Celle-ci consiste à séparer le cas de la survenue de la pluie sur la Gateway/NCC

de celui de la cellule de pluie sur les terminaux utilisateurs.

Quant à la politique d'admission, on pourra s'appuyer sur l'une des deux fonctions CAC définies en fonction de la vitesse de variation de la capacité. La première est une fonction CAC dite *pessimiste* qui suppose que la variation de la capacité est rapide par rapport à la durée des connexions. Dans ce cas de figure, la décision d'admission est prise en évaluant la capacité comme étant celle correspondante au pire cas de propagation survenant dans le système. La seconde politique CAC dite *optimiste*, suppose elle, que la capacité du système reste constante pour une durée d'au moins les durées des connexions. Sa décision d'admission est alors prise en se fondant sur l'état courant de la capacité tout en tenant compte des conditions de transmission instantanées des terminaux.

Mots clés : CAC adaptatif, FMT, atténuations atmosphériques.

Abstract

In high frequency bands (Ka and above), multimedia satellite communication systems may suffer from deep fading caused by atmospheric phenomena. Unfortunately, those deep atmospheric losses can no longer be overcome by a static link margin. Fade Mitigation Techniques (FMT) are then used to counteract those fades by enabling link adaptation according to propagation conditions.

Without sacrificing bit error rate, FMT provide high average spectral efficiency by transmitting at high speeds under favorable channels conditions and by reducing throughput as the channel degrades. This capacity variation causes some difficulties to define resource management mechanisms, in particular the Connection Admission Control (CAC). Indeed a CAC function, which only uses current capacity information, may lead to intolerable dropping of admitted connection, and thus breaches the QoS guarantees made upon connection acceptance.

This thesis focuses, then, on CAC mechanisms suitable for satellite systems with varying capacity. In those kinds of systems, CAC functions should estimate the possible evolution of the capacity. Therefore connections will only be admitted if the CAC function supposes the required capacity to be available for a long period of time. This kind of CAC is called as *adaptive CAC*.

This work deals with the variation of the capacity by analyzing the different climatic phenomena and their prediction.

The current study made on attenuation spatio-temporal models and their prediction showed their unsuitability for an adaptive CAC function. In fact, either they act over a very short period of time, typically some seconds, or they are too complex to be used within the context of a real system.

Therefore, a simplified approach is argued in this study. It consists in separating the configuration where the Gateway/NCC is facing atmospheric impairments from the one where some user terminals face directly rain cells.

For the admission policy, one could use one of the two CAC defined in this document, according to the way the system capacity varies in comparison with the connections duration : an *optimistic CAC* and a *pessimistic CAC*. This latter supposes the variation of the channel quality to be faster

than connections duration. Therefore, the system capacity, on which connection admission decisions are based, corresponds to the case when the deepest fades occur. The optimistic policy is defined in the favorable case when channel quality varies slowly w.r.t to connections duration. The system capacity is, then, supposed to remain constant during connections lifetime. Thus, connection admission decision is made upon the current system capacity and the actual transmission condition faced by any of the user terminals.

Keywords : Adaptive CAC, FMT, atmospheric attenuations.

Table des matières

	Acronymes	1
	Introduction générale	5
1	Concepts généraux des télécommunications par satellite	11
	1.1 Évolution des communications par satellite	12
	1.1.1 Un peu d'histoire	12
	1.1.2 Les services de communication par satellite.	13
	1.1.3 Les types de satellite	14
	1.1.4 Récapitulatif	16
	1.1.5 Les configurations des réseaux par satellite	16
	1.2 Avantages des systèmes satellites	18
	1.2.1 La zone de couverture.	19
	1.2.2 Le satellite et la fracture numérique	19
	1.2.3 La diffusion.	19
	1.2.4 Le (re)déploiement de réseaux.	20
	1.3 Bandes de fréquences et systèmes satellites	20
	1.3.1 Introduction	20
	1.3.2 Allocation de bandes	21
	1.3.3 La bande Ka	22
	1.4 Conclusion	23
2	FMT et gestion de ressources	25
	2.1 Les techniques de contre-mesure d'atténuation ou FMT	26
	2.1.1 Motivations.	26
	2.1.2 Calcul du bilan de liaison	27
	2.1.3 Principe des FMT	29
	2.1.4 Efficacité théorique des FMT	33
	2.1.5 Choix et procédures d'activation des FMT	33
	2.2 Couche de liaison et gestion de ressource	36
	2.2.1 Les protocoles et fonctions MAC.	37
	2.2.2 Fonctions CAC	39
	2.3 Couche de liaison et procédures FMT	39
	2.3.1 FMT et protocoles MAC.	40
	2.3.2 FMT et CAC	44
	2.4 Conclusion	46

3	Les mécanismes CAC	47
3.1	Fonction CAC : généralités	48
3.1.1	Définition	48
3.1.2	Présentation	48
3.2	Taxonomie des CAC	49
3.2.1	Paramètres de trafic	49
3.2.2	Critères d'admission	51
3.2.3	Politique d'admission	54
3.3	CAC et variation de capacité.	57
3.3.1	Critères de performance	57
3.3.2	CAC réactif ou CAC préventif	58
3.3.3	Politique d'abandon	60
3.4	Conclusion	61
4	Vers un CAC adaptatif : un premier pas...	63
4.1	Présentation du problème	64
4.1.1	Système de référence	64
4.1.2	Problématique.	65
4.1.3	Hypothèses	66
4.2	Etude de la politique pessimiste	70
4.2.1	Présentation	70
4.2.2	Cas 1 : Porteuses bien dimensionnées	72
4.2.3	Cas 2 : Porteuses mal dimensionnées	74
4.2.4	Analyse des résultats	76
4.2.5	Amélioration de l'équité entre les connexions	82
4.3	Etude de la politique optimiste	83
4.3.1	Présentation	83
4.3.2	Cas du Bin Packing.	84
4.3.3	Cas MF-TDMA pur	88
4.3.4	Analyse des résultats	90
4.3.5	Etude dans un cas de grande taille	91
4.3.6	Avec ou Sans déclassement ?	94
4.4	Conclusion	96
5	Vers un CAC adaptatif : un peu plus loin...	99
5.1	Vue générale d'une fonction CAC adaptative	101
5.1.1	Introduction	101
5.1.2	Architecture d'un CAC adaptatif.	102
5.2	Canal de propagation et atténuations atmosphériques	103
5.2.1	Méthodologie d'estimation du niveau d'atténuation.	103
5.2.2	Dynamiques des phénomènes d'affaiblissement	105
5.2.3	Conclusion	109

	5.3 Prédiction de l'évolution du canal	110
	5.3.1 Evolutions spatiale et temporelle des affaiblissements . .	110
	5.3.2 Méthodes de prédiction : état de l'art	112
	5.3.3 Conclusion	116
	5.4 CAC adaptatif : Recommandations	117
	5.4.1 CAC et localisation du phénomène d'affaiblissement . .	118
	5.5 Cas pratique : pluie sur la Gateway/NCC.	120
	5.5.1 Modélisation	120
	5.5.2 Evaluation des capacités	120
	5.5.3 Analyse	121
	5.5.4 Politique d'admission	121
	5.6 Conclusion	124
	Conclusion générale	127
A	Les Systèmes DVB	131
	A.1 Systèmes DVB-S.	131
	A.1.1 Présentation	131
	A.1.2 La pile protocolaire	132
	A.1.3 La couche physique.	133
	A.1.4 Les principes d'accès	133
	A.2 Systèmes DVB-S2	134
	A.2.1 Présentation	134
	A.2.2 Particularités techniques	134
	A.3 Systèmes DVB-RCS	135
	A.3.1 Présentation	135
	A.3.2 Architecture DVB-RCS	135
	A.3.3 La pile protocolaire	136
	A.3.4 La couche physique.	136
	A.3.5 La méthode d'accès	138
B	Etude mathématique des algorithmes de CAC	139
	B.1 Solution à forme produit	139
	B.2 Méthode de Kaufman-Roberts	140
	B.3 Méthode de Ritter et Tran-Gia	141
C	Projet SATSIX	143
	C.1 Présentation	143
	C.1.1 Définition et Objectifs.	143
	C.1.2 Architecture globale	144
	C.2 Caractéristiques techniques	144
	C.2.1 Terminaux utilisateurs.	144
	C.2.2 Couche physique.	145
	C.2.3 Modes FMT	145
	Bibliographie	147

Table des figures

1	Réseau de communication par satellite (système DVB-RCS)	7
1.1	Évolution des systèmes de communication par satellite	16
1.2	Architecture maillée et liens de communications	17
1.3	Architecture en étoile et liens de communication	18
2.1	Schéma général de la boucle de contrôle FMT	36
2.2	Exemple de trame fixe (lien aller)	41
2.3	Exemple de trame fixe (lien retour)	41
2.4	Exemple de trame variable (lien aller)	42
2.5	Exemple de trame variable slot par slot (lien retour)	42
2.6	Ex. de trame variable porteuse par porteuse (lien retour)	43
3.1	Taxonomie à 3 dimensions pour les CAC	49
4.1	Schéma d'ensemble d'un système DVB-RCS	65
4.2	Illustration de l'algorithme best fit descending	72
4.3	Probabilité de blocage théorique - pessimiste (variante I)	78
4.4	Probabilité de blocage simulation - pessimiste (variante I)	79
4.5	Probabilité de blocage - pessimiste (différentes porteuses)	79
4.6	Probabilité de blocage - pessimiste (variante II)	80
4.7	Probabilité de blocage - pessimiste (système réel)	81
4.8	Illustration de l'algorithme sans déclassement	86
4.9	Illustration de l'algorithme avec déclassement	87
4.10	Probabilité de blocage Bin packing sans déclassement	91
4.11	Probabilité de blocage Bin packing avec déclassement	91
4.12	Probabilité de blocage MF-TDMA pur sans déclassement	92
4.13	Probabilité de blocage MF-TDMA pur avec déclassement	92
4.14	Prob. de blocage sans déclassement - syst. réel (ciel clair)	95
4.15	Prob. de blocage avec déclassement - syst. réel (ciel clair)	95
4.16	Prob. de blocage sans déclassement - syst. réel (pluie forte)	95
4.17	Prob. de blocage avec déclassement - syst. réel (pluie forte)	96
4.18	Probabilité de blocage avec vs sans déclassement	96
5.1	Architecture d'un CAC adaptatif et ses entrées	102

5.2	Exemple du CDF de l'atténuation due à la pluie	107
5.3	Algorithmie générale pour une fonction CAC adaptative .	119
5.4	Variation de la capacité - Att. max de 10dB sur la Gateway	124
5.5	Variation de la capacité - Att. max de 15dB sur la Gateway	125
A.1	Piles protocolaires du DVB-S	132
A.2	Chaîne de codage du DVB-S	133
A.3	Architecture DVB-S/DVB-RCS	136
A.4	Pile protocolaire du DVB-RCS	137
A.5	Chaîne de codage du DVB-RCS	137

Liste des tableaux

1.1	Bandes de fréquences et principaux domaines d'utilisation	20
2.1	Gain des procédures FMT	33
2.2	Echelle de temps et Protocole	46
4.1	Paramètres d'évaluation pour le scénario 1	77
4.2	Configuration des porteuses -scénarios 2	81
4.3	Mécanisme à seuil	83
4.4	Configuration du système, politique optimiste	90
4.5	Configuration du système - ciel clair	92
4.6	Configuration du système - pluie forte	93
5.1	Exemple de probabilités d'occurrence de durées à 10 dB	108
5.2	Proportion de capacité offerte pour différentes atténuations	121
5.3	Paliers de capacité pour le spot 23	123

Acronymes

AAL	ATM Adaptation Layer
AC	Adaptive coding
ACM	Adaptive Coding and Modulation
ACTS	Advanced Communication Technology Satellite
AM	Adaptive Modulation
ARMA	autoregressive moving average
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCH	Bose Chaudhuri Hocquengeim
BER	Bit Error Rate
BP	Bin Packing
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BT	Burst Tolerance
CAC	Connection Admission Control Contrôle d'Admission des Connexions
CDF	Cumulative Distribution Function
CLR	Cell Loss Rate
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DBCAC	Declared-Based CAC
DiffServ	Differentiated Service
DLPC	DownLink Power Control
DRR	Data Rate Reduction
DTH	Direct To Home
DTU	Direct To User
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-C	DVB per Cable
DVB-RCS	DVB with Return Channel per Satellite
DVB-S	DVB per Satellite

DVB-S2	DVB per Satellite second generation
DVB-T	DVB per Terrestrial
EHF	Extremely High Frequency
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
ESA	European Space Agency
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FIFO	First In First Out
FMT	Fade Mitigation Techniques
GEO	Geostationary Earth Orbit
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communication
HDTV	High Definition TeleVision
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
IFMT	Interference and Fade Mitigation Techniques
IntServ	Integrated Service
IP	Internet Protocol
IPv6	IP version 6
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LCFD	Last Come First Drop
LCFD-C	LCFD per Class of service
LDPC	Low Density Parity Check
LEO	Low Earth Orbit
MAC	Medium Access Control
MBCAC	Measurement-Based CAC
MBS	Maximum Burst Size
MCR	Minimum Cell Rate
MEO	Medium Earth Orbit
MFS	Maximum Frame Size
MF-TDMA	MultiFrequency TDMA
MMSE	Minimum Mean Square Error
ModCod	Modulation and Coding
MPE	Multiple Protocol Encapsulation
MPEG	Motion Picture Experts Group
NCC	Netwrk Control Center
NWP	Numerical Weather Prediction

OBBS	On-Board Beam Shaping
OBP	On-Board Processing
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
PCR	Peak Cell Rate
PDF	Probability Density Function
PER	Packet Error Rate
PIRE	Puissance Isotropique Rayonnée Equivalente
PSK	Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RCST	Return Channel Satellite Terminal
RF	Radio Frequency
SATSIX	SATellite-based communication System within IPv6 networks
SCR	Sustained Cell Rate
SLA	Service Level Agreement
SNIR	Signal to Noise and Interference Ratio
TBTP	Terminal Burst Time Plan
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TWTA	Travelling Wave Tube Amplifier
UDP	User Datagram Protocol
ULPC	UpLink Power Control
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USAT	Ultra Small Antenna Terminal
VPN	Virtual Private Network
VSAT	Very Small Antenna Terminal
WiFi	Wireless Fidelity
Wimax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Introduction générale

Motivation

Les nouvelles applications multimédia telles que le *streaming* audio et vidéo, les vidéoconférences, la vidéo sur demande, les jeux en ligne, etc. conçues à la fois pour des usagers isolés (ou résidentiels) et collectifs, requièrent de larges bandes passantes et des garantis de qualité de service (QoS). Le service “best effort” que proposait initialement l’Internet ne suffit donc plus à répondre aux contraintes plus ou moins fortes de ces nouvelles applications en termes de débit garanti, de gigue, de taux de perte paquet ou d’erreur acceptable, de retard et de délai de transmission, etc.

Il devient, donc, nécessaire d’implanter des mécanismes de garantie de QoS qui pour certains s’apparentent à des mises en place de connexion (exemple : IntServ [20]). On peut noter que cette orientation au niveau 2 sur des segments hertziens (re)devient largement prédominante (GPRS, UMTS, Wimax..) à l’exception notable du Wifi pour lequel la QoS reste médiocrement prise en charge.

Les systèmes par satellite jouissent à la fois d’une large zone de couverture, d’une grande capacité de diffusion (idéal pour les services tels que télévision et radio) et d’une (re)configuration aisée permettant de les utiliser dans des zones où les systèmes de communications terrestres sont déficients ou endommagés (comme dans le cas de catastrophes naturelles). Les communications par satellite peuvent donc constituer à la fois une solution crédible et un complément de choix pour les systèmes de communications terrestres quant à la fourniture de services multimédias et informatiques.

Aussi, sur le segment satellite, la mise en place d’un contrôle d’admission des connexions (CAC) s’impose-t-elle donc, comme souvent dans le monde télécom. Le rôle de la fonction CAC est de vérifier que le système peut accepter une nouvelle connexion, avec ses contraintes de qualité, au vu de la capacité globale du réseau et de celle consommée par les autres connexions déjà établies. Cette fonction permet donc (1) de garantir la QoS spécifique à chaque usager/flux et (2) d’adopter un partage efficace et équitable de la ressource globale du système entre tous les usagers. Ainsi favorise-t-elle,

d'une part, la viabilité économique et, d'autre part, l'efficacité du système de communication.

Dans les systèmes classiques abondamment décrits dans la littérature ([113, 129] et leurs nombreuses références), la fonction CAC recevait les demandes de connexion exprimées en débit équivalent : en fonction des paramètres de trafic, le débit équivalent ou le coût d'un terminal ou d'une session est calculé. Puis le CAC vérifie si ce débit peut être pris en charge par le débit disponible du système. Si oui, cette bande équivalente est déduite du débit système et le terminal ou la session est accepté(e).

Dans ces scénarii, le CAC n'utilisait comme connaissance de la capacité système que le débit physique disponible à un instant donné. Dans le cadre de cette thèse, des techniques modernes adaptatives de modulation et de codage sont mises en place. Les différentes valeurs d'efficacité spectrale offertes par ces techniques conduisent à une variation dans le temps, d'une part de la capacité individuelle de chaque terminal et, d'autre part de la capacité globale au niveau de toute la zone de couverture, à l'instar de ce que l'on trouve dans les systèmes GPRS-EDGE, HSDPA-3G ou Wimax.

Cette variation dans le temps de la capacité entraîne une difficulté dans la définition de mécanismes CAC. En effet les fonctions CAC qui n'utiliseraient que l'information de la capacité courante du réseau comme seul critère pertinent pour la décision d'admission pourraient conduire, à chaque fois qu'un événement surviendrait pour réduire la capacité, à des pertes intolérables de connexions. Par conséquent, on obtiendrait un repli significatif des critères de qualité de service, et un grand motif d'insatisfaction des utilisateurs du réseau de communication.

Il est donc proposé d'étudier un CAC qui aurait une connaissance historique du débit du système : le CAC connaît la manière dont évolue la capacité, à plus ou moins long terme et est capable d'anticiper l'état de celle-ci dans le futur. Ainsi un terminal ou une session ne pourra être admis(e) dans le système que si le CAC suppose les capacités disponibles pour un temps *suffisamment* long pour le (ou la) maintenir avec le niveau adéquat de qualité requis. C'est ce type de CAC, dit *CAC prédictif* ou *CAC adaptatif*, a priori, très intéressant pour les systèmes adaptatifs, donc à capacité variable, que nous nous proposons d'approfondir dans cette thèse.

Contexte

Le système de communication de référence est un réseau de communication bidirectionnelle par satellite géostationnaire où des services Internet sont fournis aux usagers, comme décrit sur la figure 1. Dans ce système un nombre d'usagers, individuels ou collectifs, sont connectés au réseau Internet par le biais d'une passerelle (ou Gateway/NCC - *Network Control Center*) qui est liée de manière bidirectionnelle à un satellite géostationnaire. Cette

passerelle est rattachée à des fournisseurs de services Internet, ou plus globalement au réseau Internet. De par sa position, la passerelle ou Gateway/NCC renferme les fonctions de gestion de ressources, le CAC et le DAMA responsables respectivement de l'acceptation des connexions et de l'allocation de la ressource.

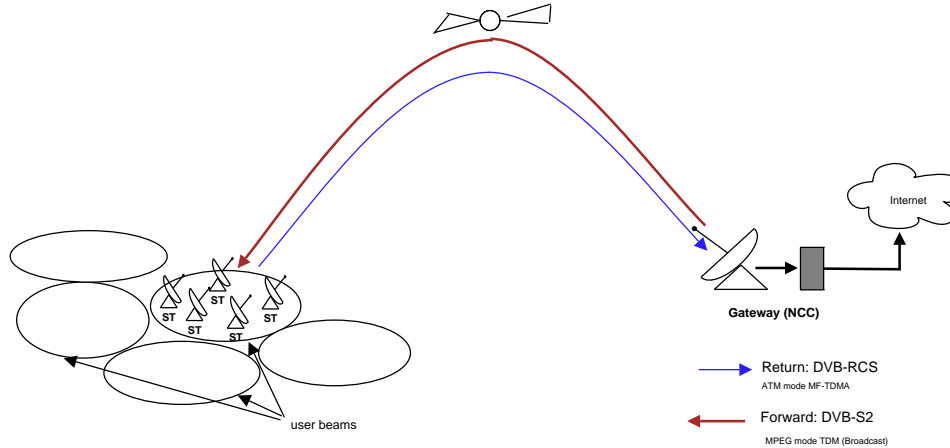


Figure 1 Réseau de communication par satellite (système DVB-RCS)

Les caractéristiques radio du système sont similaires à celles du système décrit dans le DVB-RCS (*Digital Video Broadcasting- Return Channel by Satellite*) [48]. En effet sur la voie aller, le partage de ressource est effectué suivant le principe FDM/TDM en bande Ka et sur la voie retour, ce partage est de type MF-TDMA en bande Ka.

L'état actuel du marché des télécommunications est caractérisé par une augmentation d'applications multimédia très gourmandes en bande passante et cela de la part de tous les utilisateurs. Dans le contexte des communications par satellite pour la fourniture de services vers des usagers fixes, des bandes passantes assez larges pour offrir de tels débits de transmission ne peuvent plus être allouées dans les bandes de fréquences conventionnelles (bandes C et Ku) [18]. Ces largeurs de bandes ne sont disponibles que dans les hautes bandes de fréquences telles que la bande Ka (20 GHz - 30 GHz), la bande Q/V (40 GHz - 50 GHz) ou les bandes EHF (20 GHz - 45 GHz).

Malheureusement ces hautes bandes de fréquences présentent des inconvénients majeurs. En effet, les effets de scintillation et d'atténuation des gaz dans l'atmosphère, des nuages, de la pluie, des couches de fusion augmentent en fonction de l'accroissement de la fréquence [28, 29]. Des études de caractérisation des niveaux d'atténuation pour ces gammes de fréquences ont fait apparaître de grandes dégradations de la qualité des signaux radios (jusqu'à 40 dB d'atténuation à 40 GHz [126]).

Les grandes valeurs d'atténuations qui surviennent ne peuvent plus être

compensées par le seul choix d'une marge statique. En effet, des mesures effectuées sur les balises ITALSAT à Spino d'Adda à Milan ont montré que pour garantir une disponibilité de l'ordre de 99,9 % et de 99,97 % à une fréquence de 49.5 GHz, il faudrait fournir une marge statique de l'ordre de 25 dB et de 40 dB, respectivement, sur une année moyenne [72, 117]. Couvrir de telles marges requiert des terminaux satellites de grande taille et très performants, fournissant de fortes puissances de transmission. Cela va à l'encontre de la philosophie de terminaux satellites à bas coût nécessaires pour que le système de télécommunication par satellite soit viable vis à vis des fournitures de services par les réseaux terrestres.

Ainsi de nouvelles méthodologies permettant de fournir des valeurs de disponibilité suffisamment intéressantes pour le réseau satellitaire pour les hautes bandes de fréquence ont été étudiées.

Une des solutions préconisées par les ingénieurs consiste à adapter en temps réel les paramètres de transmission (puissance d'émission, taux de codage, schéma de modulation, débit de transmission, etc.) en fonction du niveau d'atténuation. Cette méthodologie est connue sous le nom de technique de contre-mesure des atténuations ou technique FMT (Fade Mitigation Technique).

Cette étude de fonctions CAC sera donc menée dans le cadre d'un système de communication par satellites représenté sur la figure 1 où des techniques FMT sont implantées au niveau de la couche physique.

Contribution

Il vient donc qu'un CAC adaptatif ne peut pas être décorrélé du contrôleur FMT. En effet, d'une part, la capacité globale est déterminée en fonction des modes FMT admis et des efficacités spectrales qui en découlent, et d'autre part, le contrôleur FMT renseigne sur la capacité individuelle de chaque terminal. Les performances d'un CAC adaptatif sont donc liées à celles du contrôleur FMT, et à la prédiction de l'état des liens de communication. Une fonction CAC, associée à un module FMT, doit donc déterminer ou estimer [67]

- La valeur courante du niveau d'atténuation afin de vérifier si la gamme d'atténuation se trouve dans une classe spécifique de mode FMT.
- La durée de cet affaiblissement afin d'adapter sa politique d'admission des connexions et le partage des ressources afférentes.
- La variation court terme de cette atténuation pour adapter au mieux la décision du contrôleur FMT, et par extension de la fonction CAC.
- La durée d'inter-affaiblissement une fois que l'événement d'atténuation prend fin ; les statistiques à long terme permettent de renseigner cette valeur.

- La valeur crête de l’atténuation qui survient pour savoir si l’affaiblissement qui survient va se dégrader. Cette valeur peut être calculée par l’estimation de la pente d’atténuation.

Cette étude de fonction CAC adaptative dans un contexte de système de télécommunications par satellite qui utilisent des procédures FMT a été menée dans la littérature en se fondant le plus souvent sur des modèles théoriques de variation de capacité spécifique et connue [131, 132], ou sur des modèles de variation du trafic [31].

L’étude menée et décrite dans cette thèse nous a permis d’avancer sur trois points :

En premier lieu, nous avons proposé deux exemples CAC adaptatifs dont les performances apparaissent comme les bornes supérieures et inférieures pour un CAC adaptatif [139]. Pour ce faire, nous avons fait des hypothèses sur la vitesse de variation de la capacité vis à vis de la durée des connexions : une variation de capacité rapide comparée à la durée des connexions, et une variation lente de la capacité comparée à la durée des connexions. Une modélisation mathématique et une validation par simulation nous ont permis d’exhiber des probabilités de blocage pour les connexions dans les deux cas de variation de capacité traités.

En second lieu, nous avons fait un état de l’art des mécanismes implantés au niveau de la couche physique. Cela nous a permis de déterminer dans quelle mesure les modèles de variation de capacité généralement admis étaient exploitables pour l’implantation d’une fonction CAC adaptative dans un système réel. Cette étude de l’état de l’art des possibilités de prédiction des valeurs et instants d’atténuation a montré que les échelles de prédiction ne sont pas adéquates pour la fonction CAC. Cette étude a, par ailleurs, montré l’absence de modèles globaux de variation spatio-temporelle de la capacité ; lesquels modèles seraient très intéressants pour la définition d’un CAC adaptatif. Cette étape a fait l’objet d’une publication [138].

En dernier lieu, nous avons proposé une approche simple pour la définition d’une fonction CAC adaptative en séparant le cas de la survenue des atténuations sur les terminaux satellites de celui où les affaiblissements ont lieu au niveau de la Gateway/NCC [138]. Cette dernière étape a été illustrée par un exemple fondé sur le projet SATSIX [76].

Plan de lecture

Ce manuscrit est organisé en cinq chapitres, hormis cette introduction générale et les annexes.

Le **premier chapitre** définit les concepts généraux des systèmes de télécommunication par satellite. Ce chapitre débute par un bref rappel historique de l’évolution des systèmes de télécommunications par satellite. Puis,

il s'attarde sur les avantages des systèmes satellitaires comparés aux réseaux de communications terrestres. Enfin, le processus d'allocation des bandes de fréquences pour les communications par satellite est décrit. Cette dernière étape a pour objectif de rappeler les particularités (avantages et inconvénients) des bandes Ka qui deviennent, de plus en plus, les bandes de référence pour les nouveaux systèmes de télécommunications par satellite offrant des services multimédias.

Les techniques FMT nées des contraintes liées à la fois aux hautes bandes de fréquence, comme les bandes Ka, et aux services multimédia à offrir sont décrites dans le **second chapitre**. Dans ce chapitre, il est décrit l'impact des techniques FMT sur les procédures de gestion de ressources de la couche de liaison. Notamment, l'influence des FMT sur les procédures de configuration de trame dans un accès de type MF-TDMA y est étudiée.

Le chapitre précédent permet de souligner la potentielle variabilité de la capacité du fait des procédures de contre-mesure dynamique contre les affaiblissements atmosphériques. Cette variation de capacité conduit dès lors à songer aux propriétés d'une fonction CAC adéquate aux systèmes où des techniques FMT sont implantées. Le **troisième chapitre** s'attelle donc à définir les attributs des fonctions CAC adaptatives, leurs critères de performance et leur nouvelle taxonomie.

Dans le **quatrième chapitre** deux exemples de CAC adaptatifs sont décrits : un CAC optimiste et un CAC pessimiste. Ces exemples sont donnés pour différentes contraintes sur les procédures d'allocation de la ressource. L'analyse des performances de ces deux algorithmes a été menée à la fois par des développements mathématiques exacts ou approchés et des simulations informatiques.

Une étude de la variabilité de la capacité a été menée dans le **cinquième chapitre**. Pour ce faire, la dynamique des différents phénomènes de propagation affectant le canal de propagation y est étudiée. Les résultats obtenus nous ont amenés à recommander des procédures simplifiées pour la définition d'une fonction CAC adaptative.

Chapitre 1

Concepts généraux des télécommunications par satellite

1.1	Évolution des communications par satellite	12
1.1.1	Un peu d'histoire	12
1.1.2	Les services de communication par satellite.	13
1.1.3	Les types de satellite	14
1.1.4	Récapitulatif	16
1.1.5	Les configurations des réseaux par satellite	16
1.2	Avantages des systèmes satellites	18
1.2.1	La zone de couverture.	19
1.2.2	Le satellite et la fracture numérique	19
1.2.3	La diffusion.	19
1.2.4	Le (re)déploiement de réseaux.	20
1.3	Bandes de fréquences et systèmes satellites	20
1.3.1	Introduction	20
1.3.2	Allocation de bandes	21
1.3.3	La bande Ka	22
1.4	Conclusion	23

L'objet de cette thèse est d'étudier les procédures de Contrôle d'Admission des Connexions dans un contexte de télécommunication par satellite pour lesquelles les liaisons physiques sont adaptatives. L'objectif de ce chapitre est d'introduire le contexte général dans lequel s'inscrivent les travaux menés dans cette thèse. Le chapitre débute par un aperçu général des systèmes satellitaires, leurs atouts et leurs domaines d'application. Puis l'histoire de l'allocation des bandes de fréquences pour les systèmes de télécommunication par satellite est rappelée. Enfin une synthèse des particularités des systèmes satellitaires pour les télécommunications clot ce préluce.

1.1 Évolution des communications par satellite

1.1.1 Un peu d'histoire

A la fin des années 50, les communications téléphoniques internationales restent très difficiles car les câbles sous-marins ont une capacité réduite. En outre la télévision, bien qu'en plein essor, n'offre toujours pas la possibilité de retransmission en direct sur de longues distances. Pour ce faire, les programmes sont enregistrés sur des bandes magnétiques, puis transportés en avion. Un projet est donc mis en place pour réduire ces délais de transmission entre deux lieux géographiques éloignés : les satellites artificiels.

Ce projet fait écho à l'œuvre *2001 Odysée de l'espace*, écrit en 1945, par l'auteur de science-fiction Arthur C. Clarke. En effet, cet ouvrage décrit un système de satellites artificiels de la terre comme relais de télécommunication. Les premiers essais de satellites artificiels menés par les russes (SPOUTNIK 1 en octobre 1957, SPOUTNIK 2 en novembre 1957, et SPOUTNIK 3 en mai 1958) ont permis de démontrer la faisabilité de satellisation d'engins fabriqués par les humains. La réplique des américains avec le satellite SCORE, en décembre 1958, s'est faite en envoyant sept messages sur terre.

Mais c'est avec le satellite actif TELSTAR 1, en 1962, que le premier grand pas dans l'ère des systèmes de télécommunication par satellite est réalisé. En effet, ce satellite est le premier à avoir servi aux communications transatlantiques : il a permis la diffusion de programmes de télévision et les relais de communications téléphoniques entre les États Unis et deux villes européennes. Les communications par satellite entraînent ainsi dans le domaine grand public. Ce fait s'est accentué, en avril 1965, avec le lancement d'EARLY BIRD qui marqua le début du réseau commercial de télécommunication internationale par satellite ou INTELSAT.

1.1.2 Les services de communication par satellite

L'utilisation initiale des satellites se résumait à un simple relais permettant d'assurer des communications point à point. La large couverture géographique qu'offrait le satellite n'était utilisée que pour mettre en place des liens à longue distance : les communications étaient essentiellement transmises d'une station terrestre vers une autre, toutes deux fixes et dotées de larges antennes (environ 30 m de diamètre). Le satellite EARLY BIRD, par exemple, connectait deux stations de part et d'autre de l'Atlantique ; des relais permettaient ensuite d'acheminer les communications dans les foyers. Les premiers services par satellite étaient donc essentiellement des communications téléphoniques à longue distance et l'échange de programmes de télévision entre deux grosses stations terrestres

Avec les avancées technologiques, les performances des satellites se sont accrues (taille, puissance de transmission...) et les tailles des antennes de réception se sont amenuisées, devenant du coup transportables. Ces innovations techniques ont permis de fournir des services de communications entre points mobiles, notamment les services maritimes mobiles (système INMARSAT). Par la suite, la capacité de diffusion des satellites combinée à la petite taille des antennes, de type VSAT (Very Small Aperture Terminals) [98] a favorisé l'introduction des services de télécommunication, principalement la diffusion de télévision et de vidéo (connu sous le terme DVB-S pour Digital Video Broadcasting by Satellite), dans les foyers de milliers d'utilisateurs. Ces services point à multipoint sont connus sous le terme DTH (Direct To Home) [99]. Une autre réduction dans les tailles d'antenne a permis de fournir des services de diffusion d'audio numérique (connu sous le sigle DAB pour Digital Audio Broadcasting [51]).

Les premiers services par satellite étaient orientés essentiellement vers la diffusion de programmes aux usagers dont les antennes n'agissaient qu'en mode réception. Avec les progrès technologiques réalisés à la fois pour les performances et les tailles des satellites et des antennes, et les procédures de partage de ressource, de nouveaux services bidirectionnels et interactifs ont été conçus. Pour ces services, une voie *retour*, des terminaux utilisateurs vers les terminaux des fournisseurs de service, a été mise en place. Ainsi les systèmes de communication par satellite peuvent fournir des services interactifs de télévision et d'accès à l'internet. Ces services s'apparentent à ce qui est offert par l'ADSL terrestre où un lien asymétrique est utilisé. En effet, dans les services interactifs par satellite, le lien *aller* opère avec des débits de plusieurs mégabits par seconde (*Mbps*) alors que la voie *retour* opère avec seulement quelques centaines de kilobits par seconde (*kbps*)¹.

1. Pour les systèmes de télécommunication par satellite, la voie aller fait toujours référence au lien de communication établi depuis les stations des fournisseurs d'accès et de service vers les stations des utilisateurs ; et la voie retour fait référence au lien inverse des stations utilisateurs vers les stations des fournisseurs de services et accès.

En dépit de l'évolution des services offerts, la diffusion de télévision demeure encore le service prépondérant des télécommunications par satellite : elle représente plus de la moitié du trafic des satellites géostationnaires de télécommunications [39].

1.1.3 Les types de satellite

L'évolution des services proposés par les systèmes de télécommunication par satellite a été rendue possible par la mutation des satellites tant par la forme (poids, taille d'antenne...) que par les principes de transmission des signaux radios.

En effet, les premiers satellites étaient de très petite taille, de faible capacité et avaient une faible durée de vie. Par exemple, INTELSAT 1 pesait 68 kg au lancement pour une capacité de 480 canaux téléphoniques et une durée de vie de l'ordre de 1,5 année [99]. Au fil du temps, le développement des lanceurs a permis de passer à des satellites plus lourds et plus performants : le satellite HOT BIRD 8 d'EUTELSAT, lancé en 2006, pesait près de 5 tonnes, offrait 40000 canaux téléphoniques et 600 signaux de télévision numérique standard pour une durée de vie de plus de 15 ans. Cet accroissement des capacités offertes et du poids des satellites a été favorisé par l'évolution de la technologie de lancement.

Cependant la mutation la plus marquante des satellites a concerné les techniques de transmission et de couverture des zones de service, aboutissant à plusieurs types de satellite.

1.1.3.1 Satellite passif ou miroir

Les premiers satellites artificiels étaient de simples *miroirs* de signaux radioélectriques. Ils réfléchissaient donc les signaux transmis par une station terrestre vers une autre station terrestre. Ce type de satellite est dit *passif*. Le premier exemple de ce type de satellite est celui de la Nasa, au début des années soixante, baptisé Echo. Les satellites passifs n'émettaient qu'avec de faible puissance vers les stations terrestres, obligeant ces dernières à être dotées de larges antennes (de 20 à 30 m de diamètre) pour, à la fois, recevoir les faibles puissances et transmettre à forte puissance.

1.1.3.2 Satellite actifs

La seconde évolution des satellites s'est traduite par le passage aux satellites dits *actifs* capables de traiter les signaux captés. Deux types de satellites actifs existent : les satellites *transparents* et les satellites *régénératifs*.

Satellite transparent

La première génération des satellites actifs est représentée par les satel-

lites *transparentes*. Avec les satellites transparents, les signaux sont reçus sur une fréquence, puis ils sont amplifiés avant d'être retransmis aux antennes réceptrices sur une fréquence plus basse.

L'amplification des puissances captées à bord des satellites permet de réduire la taille des antennes de réception au sol (antenne VSAT de quelques mètres). La conversion des fréquences permet, quant à elle, de réduire les interférences entre les liens montants et les liens descendants.

Les premiers satellites transparents étaient dotés d'un seul et unique faisceau qui assurait la couverture, à lui seul, de la large zone géographique de service. Cependant, il ne permettait pas de fournir les meilleures garanties de bilan de liaison sur toute la couverture [17].

Les satellites *multi-faisceaux* ont apporté une solution à ce problème. Les satellites multi-faisceaux consistent à couvrir la zone de service avec plusieurs faisceaux, offrant du coup un gain important dans chaque zone. De plus, les satellites multi-faisceaux permettent une réutilisation des fréquences ; ce qui a l'avantage d'augmenter la capacité du système de communication. En contrepartie, les niveaux d'interférence ainsi que les procédures d'interconnexion² entre faisceaux sont à prendre en compte. Cette dernière est réalisée en utilisant soit des techniques dites de "saut de transpondeurs"³ soit des techniques de commutation embarquée utilisant une division dans le temps, d'où le terme de SSTDMA (Satellite-Switched Time Division Multiple Access) [99].

Satellite régénératif

Les satellites *régénératifs* représentent la seconde génération des satellites actifs. Ces satellites ont la capacité de démoduler les signaux en bande de base puis de les remoduler avant de les retransmettre. La démodulation au sein du satellite permet d'avoir des trains binaires sur lesquels un traitement peut être effectué. Le traitement embarqué dans le satellite, connu sous le sigle OBP, pour On-Board Processing, permet donc d'effectuer les opérations suivantes : la conversion des signaux en fréquence RF (Radio Fréquence) ou en bande de base, la démodulation, la régénération du signal, le multiplexage, la bufferisation, la commutation et le routage des paquets ou cellules [17].

Les satellites régénératifs requièrent une plus faible puissance de signal. En outre le traitement embarqué permet de découpler les bruits introduits sur les liens montants et descendants. Ainsi les niveaux d'interférence sont réduits, et les antennes, qui émettent à plus faible puissance, peuvent être de taille plus petite.

Les satellites régénératifs, du fait du traitement embarqué, permettent la commutation des paquets de données et leur routage d'un faisceau à un

2. transition du trafic d'une zone de couverture à l'autre

3. Le transpondeur est l'appellation donnée au réémetteur embarqué à bord des satellites, dont la fonction est de retransmettre les signaux reçus de la station de montée vers une partie précise du globe sur des fréquences différentes.

autre. De plus, les traitements qui avaient lieu sur un segment sol dans le cas des satellites transparents ont lieu dans le satellite même, réduisant du coup les temps de transfert des paquets entre faisceaux et entre utilisateurs. En définitive, les satellites régénératifs présentent l'avantage majeur de fournir un routage flexible entre différents faisceaux et une plus faible taille d'antenne des terminaux terrestres. En contrepartie, le satellite régénératif doit être sûr et fiable. La fiabilité est assurée le plus souvent par de la redondance introduite dans la charge utile du satellite ; ce qui malheureusement alourdit le satellite.

1.1.4 Récapitulatif

La figure 1.1 extraite de [99] représente un récapitulatif de l'évolution des systèmes de communication par satellite.

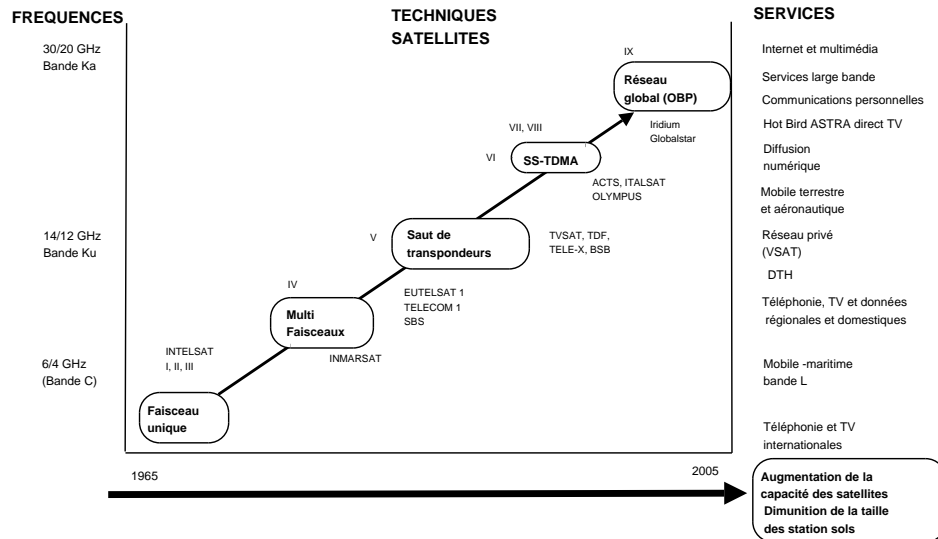


Figure 1.1 Évolution des systèmes de communication par satellite

1.1.5 Les configurations des réseaux par satellite

Le service à offrir aux usagers du réseau de communication par satellite ainsi que le type de satellite permettent de fournir deux grandes classes de connectivité pour les usagers : le réseau maillé (ou réseau de connectivité) et le réseau en étoile (ou réseau d'accès) [90].

1.1.5.1 Réseau maillé

Dans un réseau maillé, tous les terminaux sont connectés les uns aux autres par un lien direct qui ne transite que par le satellite comme retracé

sur la figure 1.2. On dit que la communication se fait en *un bond*. Cette connectivité totale nécessite des satellites capables de commuter ou de router les communications d'un usager vers un autre usager.

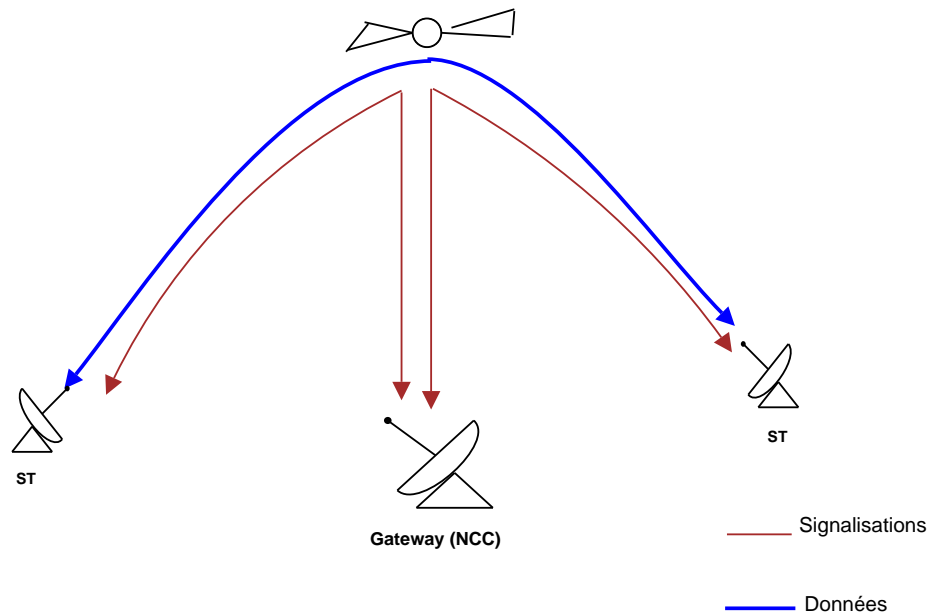


Figure 1.2 Architecture maillée et liens de communications

L'avantage d'une telle architecture est de tirer bénéfice des satellites avancés (satellite à commutation bord, satellite régénératif) pour assurer une connectivité totale entre les usagers et de réduire ainsi le délai de communication. Dans un réseau maillé, tout terminal pourrait potentiellement jouer le rôle du gestionnaire de ressource (le Gateway/NCC sur la figure 1.2) de sorte que la panne de n'importe lequel des terminaux n'entrave pas le bon fonctionnement du réseau. Cela implique, en revanche, de ne disposer que de terminaux usagers performants; ce qui ne peut être envisagé que dans les réseaux privés propriétaires où tous les terminaux usagers sont du même type en terme de performances.

La pérennité d'un réseau maillé réside, toutefois, sur le degré de fiabilité du satellite utilisé. Ce dernier doit donc être sûr, robuste et comporter de la redondance.

1.1.5.2 Réseau en étoile

Dans un réseau en étoile, toutes les communications des terminaux usagers passent par une passerelle ou un concentrateur comme décrit sur la figure 1.3. Dans les télécommunications par satellite, ce concentrateur est le plus souvent le NCC (Network Control Centre). Cette passerelle agit à la fois comme porte d'entrée des communications vers le réseau satellitaire et

comme porte de sortie des communications vers les réseaux de fournisseurs de services et de données. On est donc dans une relation *maître-esclave*. Le NCC, ayant donc une vue globale sur tout le réseau, peut alors assurer les fonctions de gestion et d'allocation de ressources dans le système de communication.

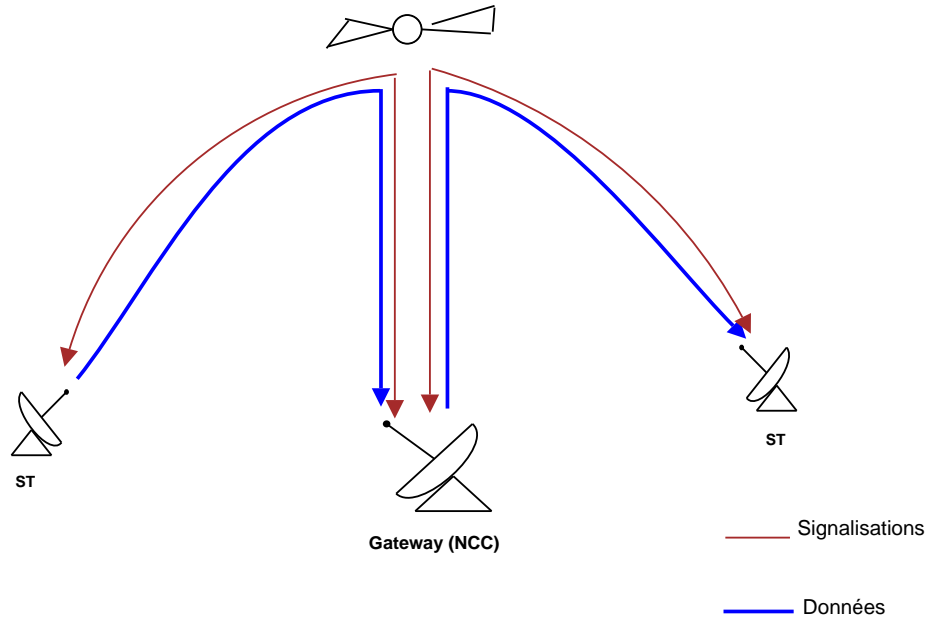


Figure 1.3 Architecture en étoile et liens de communication

Cette topologie est le plus souvent adoptée pour des systèmes avec un satellite transparent classique (sans commutation bord). Elle est assez robuste en matière de gestion de réseau. En effet, la panne d'un nœud ne perturbe pas le fonctionnement du réseau global. Cependant la panne de la passerelle qui lie tous les terminaux du réseau constitue un point individuel de défaillance car celle-ci pénalise tout le réseau. En général, des passerelles secours (ou back-up) sont implantées pour assurer la robustesse du réseau.

L'inconvénient principal de cette topologie réside dans le délai de communication entre deux usagers quelconques du réseau : dans un système de communication par satellite géostationnaire, ce délai atteint 500 ms.

1.2 Avantages des systèmes satellites

Les satellites disposent de certaines potentialités que les réseaux terrestres ne peuvent, ou difficilement, réaliser. Les plus visibles sont les larges zones de services et la capacité de diffusion. De surcroît, la facilité de (re)déploiement en zones sinistrées ou la capacité de réduire la fracture nu-

mérique apparaissent de plus en plus comme des avantages indéniables du satellite.

1.2.1 La zone de couverture

En fonction de leur altitude orbitale (LEO, MEO, GEO), les satellites offrent différentes couvertures : plus le satellite est proche de la terre plus sa couverture est petite. Cependant, quelle que soit l'altitude orbitale, les satellites offrent de larges couverture de réseau. Un satellite géostationnaire arrive à couvrir plus d'un quart de la surface de la terre [17] ; et trois satellites du même type suffisent à couvrir la totalité du globe terrestre, hormis les pôles.

Une différence doit être faite entre la zone de couverture et la zone de service. La zone de couverture fait référence à la zone du globe éclairée par le satellite. La zone de service, elle, correspond à la zone de couverture où le niveau de puissance des satellites dépasse un certain seuil. En effet, les bordures des zones de couverture souffrent, en général, d'une baisse du gain de rayonnement de l'antenne et d'une puissance amoindrie, conduisant à l'impossibilité de fournir de manière optimale des services de télécommunications.

Néanmoins, on assiste de plus en plus à une coïncidence de ces deux zones. Celle-ci est due au développement des technologies d'antenne qui permettent d'obtenir des faisceaux qui épousent parfaitement des zones géographiques déterminées (le contour d'un continent, d'un pays ou d'une région) faisant quasi coïncider les zones de services avec les zones de couverture.

1.2.2 Le satellite et la fracture numérique

La large couverture qu'offre les satellites de télécommunication permet d'avoir accès à des zones difficilement accessibles ou dépourvues d'infrastructures terrestres. Ainsi le satellite peut être un formidable outil de développement et de réduction de la fracture numérique, comme en témoigne le projet TWISTER⁴ [119]. De fait, les satellites de télécommunication constituent le moyen le plus économique de relier les collectivités les plus isolées aux services dits de l'autoroute de l'information.

1.2.3 La diffusion

La capacité de diffusion est plus importante par le réseau satellitaire que par tout autre type de réseau de communication [90]. En effet, de par sa

4. TWISTER : (Terrestrial Wireless Infrastructure integrated with SatelliteTelecommunication for E-Rural) "Solution de Télécommunications par Satellite et Réseaux sans fil pour les Zones rurales" est un projet intégré du 6ème Programme Cadre de Recherche et Développement de la Commission Européenne.

Bande UHF 300 MHz à 3 GHz Services mobiles militaires	Bande L 1.5 GHz à 1.67 GHz Services mobiles civils	Bande S 2.0 GHz à 4.0 GHz Diffusion de TV, radio, données	Bande C 4.0 GHz à 8.0 GHz Diffusion de TV, radio, données vers mobiles	Bande X 8 GHz à 12 GHz services fixes et militaires	Bande Ku 12 GHz à 14 GHz Diffusion de TV radio, données	Bande Ka 20 GHz à 30 GHz Diffusion de TV radio, données
---	--	---	---	---	---	---

Table 1.1 Bandes de fréquences et principaux domaines d'utilisation

vision globale, tout message transmis par le satellite peut être reçu par toute station terrestre de la zone de couverture. Ainsi la diffusion (Broadcasting) apparaît comme la caractéristique fondamentale et première des satellites de communication. De même le multicast, qui est la capacité de diffusion à un nombre réservé de terminaux, est une propriété première et intéressante des satellites.

1.2.4 Le (re)déploiement de réseaux

Un avantage certain des satellites est qu'ils ne souffrent pas des catastrophes naturelles (tremblement de terre, tornades, inondations...) qui affectent les réseaux terrestres. Ainsi, le (re)déploiement de services dans des zones sinistrées est plus performant en termes de temps, de coûts et de facilité, avec des réseaux par satellite qu'avec les réseaux hertziens ou filaires.

De plus, pour les applications militaires en zones de conflits, le satellite est une solution de choix pour d'une part la célérité de déploiement et d'autre part par le nombre restreint de machines à déployer au sol, à condition de disposer de satellites déjà en activité dans l'espace.

Enfin, les satellites gardent une très grande souplesse opérationnelle, car ils peuvent être reconfigurés en fonction de l'évolution des techniques et des besoins. En effet, les répéteurs présents dans la charge utile des satellites sont transparents à toutes les technologies. Ainsi peuvent-ils indifféremment relayer des signaux analogiques ou numériques de toute taille et de tout format de compression.

1.3 Bandes de fréquences et systèmes satellites

1.3.1 Introduction

Les fréquences radio sont régulées par un organisme onusien, l'ITU - International Telecommunication Union, Union Internationale des Télécommunications en français- [77]. Cette régulation permet d'assurer une utilisation à la fois efficace et économique du spectre radio entre tous les systèmes de télécommunication terrestres et satellitaires. En effet, contrairement, aux systèmes filaires (câbles, fibre optiques...) qui ont des canaux dédiés, les ra-

diocommunications utilisent un canal commun et partagé, l'air. Si l'accès aux fréquences et leur utilisation n'étaient pas réglementés, les radiocommunications souffriraient de fortes atténuations dues aux interférences. Ce qui est nuisible pour la fourniture de services performants.

Le rôle de l'ITU est donc de coordonner et d'harmoniser les politiques intérieures d'allocation des fréquences de chaque pays, et de définir, dans les grandes lignes, les bandes de fréquence dédiées pour des services spécifiques de télécommunication. Le tableau 1.1 résume l'allocation des bandes de fréquence aux services satellites spécifiques.

1.3.2 Allocation de bandes

Les premières bandes de fréquence allouées pour les systèmes commerciaux de communication par satellite ont été la bande C, puis la bande Ku.

La bande C requiert de larges antennes et des terminaux performants pour les services fixes (larges passerelles ou gateway jusqu'à 20 m de diamètre). La bande Ku, quant à elle, tolère des antennes plus petites, les VSAT, d'environ 45 cm de diamètre [98, 121]. La bande Ku permet alors d'introduire les services directement chez les usagers (service DTH - Direct To Home).

La progression des services DTH a conduit à une congestion de cette bande [27]. Par conséquent, la bande Ka qui autorise des antennes encore plus petites et un plus grand facteur de réutilisation de fréquence (systèmes multi faisceaux), et qui dispose d'une large bande passante, est devenue une solution attractive pour les systèmes large bande de communication par satellite [62]. Ainsi plusieurs systèmes de communications par satellite en cours de développement ou en exploitation fonctionnent en bande Ka. Les systèmes Eutelsat, Space Way, EuroskyWay ou encore Astrolink en sont des exemples. Ils visent des applications multimédias interactives destinées au grand public [62].

Ces trois bandes de fréquences (C -de 4 à 6 GHz-, Ku -de 12 à 14 GHz- et Ka -de 20 à 30 GHz-) sont celles qui sont les plus utilisées pour les transmissions par satellite. Elles proposent de larges bandes passantes (de 500 à 3500 MHz) permettant d'offrir des débits très élevés.

En plus des fréquences citées ci-dessus, d'autres bandes de fréquence sont utilisées : les bandes L et S.

La bande L est utilisée pour les communications mobiles. Elle sert aussi à la diffusion de la radio (DAB) [51], pour des projets radioastronomiques à des fins de recherches spatiales et scientifiques et pour la géolocalisation par satellite comme le GPS.

La bande S est utilisée pour les services de diffusion. Elle sert aux télécommunications intercontinentales. En parallèle, l'utilisation de la bande S permet d'offrir des systèmes hybrides de communication Satellite - réseaux

mobiles terrestres 3G. Cette possibilité a suscité l'intérêt de l'opérateur de satellite Eutelsat qui propose un système hybride en bande S et comportant un réseau de diffusion multi-national combinant les avantages du satellite et ceux des répéteurs terrestres.

1.3.3 La bande Ka

L'encombrement croissant des bandes de fréquences Ku, C et L traditionnellement utilisées pour la fourniture de services mondiaux, les nouvelles offres de services de télécommunications et les progrès technologiques ont conduit les opérateurs de satellite à planifier de nouveaux systèmes capables d'utiliser la bande Ka (bande des 30/20 GHz). L'intérêt manifesté pour cette bande s'est accru avec les nombreux avantages qu'elle offre, en dépit des inconvénients dus aux atténuations atmosphériques en cas de pluie.

1.3.3.1 Avantages

La bande Ka dispose de larges bandes passantes de l'ordre de 1 GHz [27,28]. Elle est ainsi adaptée à la fourniture de services à haut débit. Cette grande quantité d'information permet de fournir un service multimédia.

Le diamètre des antennes est inversement proportionnel aux fréquences utilisées pour la communication. Ainsi, plus la fréquence augmente, plus les antennes deviennent petites. Par conséquent la bande Ka autorise de très petites antennes, dites USAT (Ultra Small Aperture Antenna) [121]; ce qui permet d'avoir des terminaux qui peuvent être mobiles et de taille comparable à celle des GSM. Les services, ainsi proposés, en comparaison aux services DTH, sont souvent dénommés sous le vocable DTU (Direct To User).

Par ailleurs, la bande Ka permet d'adopter des faisceaux de petites tailles et de disposer d'une plus grande PIRE⁵ pour les antennes des utilisateurs. Les performances obtenues avec ces antennes permettent d'envisager des voies retour de communication, i.e. des liens de communication de l'utilisateur vers le satellite. Néanmoins les débits de transmission sur la voie retour sont plus faibles que ceux transmis depuis les passerelles, tout en restant acceptables.

En définitive la bande Ka offre la possibilité de mettre en œuvre un système de télécommunication multimédia par satellite qui dispose d'une voie retour avec de petites antennes performantes.

1.3.3.2 Inconvénients

La qualité de propagation des signaux se dégrade lorsque les fréquences augmentent. En effet, les effets des phénomènes troposphériques tels que la

5. Puissance Isotropique Rayonnée Effective

pluie ou les nuages ainsi que l'influence des gaz atmosphériques qui réduisent considérablement la disponibilité des services de communications par satellite augmentent avec la fréquence [28, 29]. Des études de caractérisation des niveaux d'atténuation pour les hautes bandes de fréquences ont fait apparaître de grandes dégradations de la qualité des signaux radios, jusqu'à 40 dB d'atténuation à 40 GHz [126]. La qualité des services offerts peut être ainsi dégradée par les effets de la propagation à travers l'atmosphère. Des méthodes de lutte contre les affaiblissements doivent donc être implantées.

De plus, pour les hautes bandes de fréquence, il est nécessaire de développer des transistors à faible bruit et à forte puissance. Cette augmentation des performances des récepteurs va en l'encontre de la politique de terminaux bas coût nécessaire pour la rentabilité du marché des services grand public par satellite.

En outre, la faible taille des faisceaux de couverture conduit à adopter des méthodes de pointage très précis. Par conséquent, le maintien des communications dans un contexte mobile n'est pas toujours aisé. Ainsi, les premières applications dans la bande Ka ont concerné les services fixes.

1.4 Conclusion

Les systèmes de communication par satellite ont connu une évolution rapide et un grand succès pour la diffusion des programmes de télévision dans les années 70. Le développement des systèmes terrestres, comme la fibre optique, a mis à mal la suprématie des satellites dans la diffusion des programmes. Cela a conduit à rechercher de nouveaux débouchés, et donc de diversifier les services offerts.

Les services de communication ont ainsi muté de la simple diffusion intercontinentale à des services à la personne (DTU, DTH), en passant par des services mobiles terrestres et maritimes, de géolocalisation, de navigation, de météorologie et multimédias... Les satellites ont donc fourni plusieurs configurations de services : point à multipoint, multipoint à point, point à point.

Cette transformation des services s'est accompagnée de l'évolution à la fois des technologies de satellites (type et orbite) et des bandes de fréquences allouées. Le développement des technologies a permis de basculer de simples miroirs à des satellites actifs, capables en leur sein d'opérer des transformations sur les signaux de communication. Par ailleurs, l'évolution des technologies de satellisation a permis de tester plusieurs types d'orbites ; cependant, l'orbite géostationnaire est de loin la plus utilisée.

La nécessité de recourir à de nouvelles bandes de fréquences est née à la fois de la congestion des bandes classiques de communication et du besoin de convoier de très grandes quantités d'information. Malheureusement, cela a résulté en une utilisation de bandes de fréquences de plus en plus hautes,

qui présentent une grande sensibilité aux pertes atmosphériques.

Les systèmes de communication présentent plusieurs particularités comme la large zone de couverture et de service, le très long délai de propagation pour la transmission des données (plus de 250 ms pour un satellite géostationnaire) ou encore les pertes atmosphériques qui croissent à la fois en fonction des fréquences utilisées et de la distance terre-satellite. Cependant, la ressource limitante des systèmes de communication par satellite est la bande passante qu'il faut utiliser avec intelligence et parcimonie. Cette ressource est chère, comparée à celle fournie pour les communications terrestres. Des procédures de gestion de ressources efficaces doivent donc être développées afin de permettre à un nombre maximal d'utilisateurs de bénéficier des services satellitaires à des coûts proches de ceux des réseaux terrestres.

Chapitre 2

FMT et gestion de ressources

2.1 Les techniques de contre-mesure d'atténuation ou FMT	26
2.1.1 Motivations.	26
2.1.2 Calcul du bilan de liaison	27
2.1.3 Principe des FMT	29
2.1.4 Efficacité théorique des FMT	33
2.1.5 Choix et procédures d'activation des FMT	33
2.2 Couche de liaison et gestion de ressource	36
2.2.1 Les protocoles et fonctions MAC.	37
2.2.2 Fonctions CAC	39
2.3 Couche de liaison et procédures FMT	39
2.3.1 FMT et protocoles MAC.	40
2.3.2 FMT et CAC	44
2.4 Conclusion	46

La ressource radio pour un système de communication multimédia par satellite est partagée entre plusieurs utilisateurs. De plus, elle représente la ressource limitante pour ce type de système, comparée à celle que peuvent offrir les communications terrestres comme les fibres optiques. Ainsi la gestion des ressources radio dans les systèmes de communication par satellite est impérative pour, à la fois, la viabilité économique et l'efficacité du système.

Cependant, c'est un sujet délicat à traiter dans les systèmes satellitaires car il touche plusieurs couches de l'architecture protocolaire [9] : aux contraintes de qualité de service (QoS) spécifiées à la couche applicative répondent des actions des couches inférieures, aussi bien au niveau de la couche physique (avec les procédures FMT) qu'au niveau de la couche de liaison (DAMA, CAC...) et de la couche quatre avec le choix du protocole de transport idoines (TCP, UDP).

Cette section présente donc les méthodes de gestion de ressources aux niveaux de la couche physique avec les techniques FMT et de la couche de liaison au travers des mécanismes DAMA et CAC. Les protocoles des couches transport et réseau ne seront pas étudiés ici. Plusieurs études ont déjà traité de cette problématique en se fondant sur la combinaison TCP/IP qui est de loin la plus admise [6, 8, 25, 26, 134].

2.1 Les techniques de contre-mesure d'atténuation ou FMT

2.1.1 Motivations

Les applications multimédia prennent, de plus en plus, une part très importante du trafic sur Internet. Ces applications, incluant la voix sur IP, le streaming vidéo et audio, les jeux sur Internet et les vidéoconférences en temps réel ont des contraintes plus ou moins fortes sur des paramètres tels que la gigue, le taux de perte des paquets, le retard à l'arrivée, le délai de traitement, et surtout le débit de transmission. Elles nécessitent souvent de plus grandes bandes passantes.

Pour répondre à ces contraintes, la quasi-totalité des projets de satellite multimédia présente des caractéristiques communes, comme l'utilisation de la bande Ka, le traitement embarqué ou la multiplicité des faisceaux afin d'accroître la capacité des systèmes. En outre, ces projets de satellite multimédia optent pour des stations à faible coût pour demeurer compétitifs vis à vis des fournisseurs de services par les réseaux terrestres.

Mais ces améliorations ne sont pas sans coût. En effet, la bande Ka est sujette à de fortes réductions de la capacité dues aux phénomènes atmosphériques (pluie, scintillation troposphérique, dépolarisation, bruit gaussien...) [28, 29]. Aussi la philosophie, lors du dimensionnement des systèmes

de communication par satellite, qui consiste à compenser ces atténuations par une marge statique calculée en fonction des conditions de propagation du pire mois de l'année [80], engendre-t-elle des inconvénients majeurs. En premier lieu, elle induit un surdimensionnement du système qui n'utilise, en fin de compte, les ressources de puissance et de bande passante que sur un pourcentage de temps assez faible, ce qui équivaut à un gaspillage de la ressource [13]. En deuxième lieu, un tel surdimensionnement requiert l'élaboration de grosses stations terrestres (larges antennes, puissance plus forte...), ce qui va à l'encontre de la logique faible coût pour les nouveaux systèmes de télécoms pas satellites utilisant les stations de type VSAT [98].

Ainsi, la conception d'un système de communication optimisé impose l'utilisation de techniques de contre-mesure, les techniques FMT (*Fade Mitigation Techniques*), pour contrebalancer de manière adaptative ces fortes atténuations subies par les liaisons terre/satellite. Une interface air adaptative a deux avantages : elle permet d'une part d'utiliser de manière optimale la capacité de chaque canal utilisateur, et d'autre part elle permet de contre-carrer les effets atmosphériques. Les FMT permettent donc d'augmenter la disponibilité et le taux d'utilisation des liaisons physiques du canal de communication, et donc de la capacité du réseau.

Avant de décrire le principe des techniques FMT, un rappel sur le calcul du bilan de liaison est donné ci-dessous.

2.1.2 Calcul du bilan de liaison

Le bilan de la liaison fait partie de l'outil de planification et de déploiement d'un système de communication par satellite. Il traduit la prise en compte de toutes les pertes et de tous les gains que subit un signal de communication d'un émetteur, à travers un canal de transmission (espace libre, câble, guide d'onde, fibre optique...) vers un récepteur dans un système de télécommunication. Il tient donc compte des pertes d'atténuation dues à la propagation dans le canal, ainsi que des pertes et des gains dus aux performances des antennes à l'émission et à la réception.

Pour un système de télécommunication par satellite, le bilan de liaison est la somme de cinq termes. Il est donné par la valeur du rapport signal à bruit (SNIR), les interférences étant comprises, $\frac{C}{N_0 + I_0}$, suivant l'équation (2.1)

$$\left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{ciel_clair}^{-1} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{up}^{-1} + \left(\frac{C}{I_0}\right)_{up}^{-1} + \left(\frac{C}{N_0}\right)_{dl}^{-1} + \left(\frac{C}{I_0}\right)_{dl}^{-1} + \left(\frac{C}{IM_0}\right)_{dl}^{-1} \quad (2.1)$$

où $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{up}$ et $\left(\frac{C}{I_0}\right)_{up}$ (resp. $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{dl}$ et $\left(\frac{C}{I_0}\right)_{dl}$) sont respectivement le rapport puissance à bruit et le rapport puissance à interférence sur la liaison

montante (resp. descendante); et $\left(\frac{C}{IM_0}\right)_{up}$ est le rapport puissance à bruit d'intermodulation.

Cette valeur de $\left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{ciel_clair}$ correspond au bilan de liaison lorsque le système fonctionne en *ciel clair*, ce qui est le cas la majeure partie du temps. Elle traduit ce que le système peut **fournir** en terme de rapport signal à bruit, interférences comprises, dans les conditions d'absence de phénomènes d'atténuation.

L'équation (2.2) traduit le bilan de liaison en terme de rapport signal à bruit **requis** par le système. Les paramètres de la chaîne de transmission et de réception des données y apparaissent : E_b est l'énergie fournie par bit et R_b est le débit de transmission des bits; le terme $\frac{E_b}{N_0}$, traduisant la performance du démodulateur, renseigne sur le type de modulation et le taux de codage que le système peut supporter. Ce SNIR requis calculé suivant la recommandation BO.1696 [80] permet d'assurer un fonctionnement optimal dans la zone de service avec un TEB proche de 10^{-10} .

$$\left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{req} = \frac{E_b}{N_0 + I_0} * R_b \quad (2.2)$$

Le système n'est donc fonctionnel que si l'équation (2.3) est vérifiée. Cette équation traduit donc la disponibilité du système de télécoms.

$$\left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right) \geq \left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{req} \quad (2.3)$$

Pour augmenter la disponibilité du réseau (équation (2.3) vérifiée) en cas d'atténuation (interférences, affaiblissements climatologiques...) l'on incorpore une marge au bilan de liaison. Le choix de cette marge est un élément très important pour le bon fonctionnement du système de télécommunications. Deux méthodologies existent pour le choix de cette marge : la première, illustrée à l'exemple ci-dessous, consiste à choisir une *marge statique* valable tout le temps et pour le pire cas de propagation, et la seconde suggère d'adapter la valeur de la marge au niveau réel de pertes subies par les liens de communication. C'est cette seconde méthodologie qui est à la base des procédures FMT.

Exemple d'un cas de système unidirectionnel (diffusion) en bande Ku

Dans les systèmes classiques de communication de diffusion par satellite, notamment en bande Ku et en deçà, le calcul du bilan de liaison permettait d'optimiser la valeur de la puissance de transmission (EIRP ou PIRE¹) de

1. Equivalent Isotropic Radiative Power ou Puissance Isotropique Rayonnée Equivalente

sorte à garantir une certaine qualité de service à tous les utilisateurs quelles que soient les conditions de propagations.

Dans ce système, le lien descendant (du satellite vers les terminaux usagers) constitue le lien dimensionnant ; par conséquent la PIRE du satellite est adaptée de sorte à fournir, pour une proportion de la zone de service et pendant une proportion de temps donnée, un service optimal aux utilisateurs du système. Le bilan de liaison ainsi que la marge de fonctionnement pour un amplificateur de type TWTA étaient donc choisis en deux étapes :

1. Pour chaque point i de la zone de service, on établit le rapport signal à bruit (SNIR) (ici pour la liaison descendante) pour le pire cas de propagation en choisissant la puissance $EIRP_{sat,i}$ de sorte à satisfaire la condition de disponibilité (équation (2.3)) :

$$\left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{dl,i} = f\left(A_i, \frac{G}{T_{i,pire_cas}}, EIRP_{sat,i}\right) \geq \left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{dl,req} \quad (2.4)$$

où A_i et $\frac{G}{T_{i,pire_cas}}$ représentent respectivement le pire cas d'atténuation évaluée pour la zone i et le facteur de mérite du terminal.

2. Après l'évaluation de ce SNIR, le choix définitif de la puissance de transmission $EIRP_{sat}$ du satellite est faite comme étant le maximum des puissances $EIRP_{sat,i}$ trouvées :

$$EIRP_{sat} = \max(EIRP_{sat,i})$$

Cela correspond à une concaténation des "pire cas" de propagation pour toute la zone de service ; conduisant du coup à une utilisation inefficace de la puissance [13].

2.1.3 Principe des FMT

Pour contrecarrer les atténuations survenant sur un lien radio, plusieurs méthodes peuvent être adoptées au niveau de la couche physique. Ces méthodes, dénommées FMT ou IFMT (Interference and Fade Mitigation Techniques)², sont choisies en considérant les niveaux de pertes qui surviennent, les bandes de fréquences, les objectifs de disponibilité et même la géométrie du réseau. Plusieurs documents ont traité des techniques FMT notamment la revue finale du COST 255 [120].

Le principe général des procédures FMT est d'agir sur l'un des termes de l'équation (2.2) en cas de dégradation du canal de communication. En effet, l'idée de base est de maintenir cette inégalité en faisant varier soit le niveau de la puissance de transmission [71], soit le débit symbole [30], soit le taux

2. nous adopterons la dénomination FMT au lieu de IFMT dans la suite de ce document

de codage [143], soit la taille ou la forme de la constellation [84, 109, 144], ou en combinant deux ou plusieurs de ces techniques [7, 100, 140].

En fonction de leur principe d'action, les techniques FMT peuvent être regroupées en trois catégories : le contrôle de puissance, l'adaptation de la forme d'onde et la diversité [18]. Le contrôle de puissance et l'adaptation de la forme d'onde tirent partie des ressources du système qui sont en excès et non utilisées afin de maintenir ou d'améliorer la qualité du lien qui subit les atténuations atmosphériques ; tandis que la diversité utilise une *autre route* (un autre antenne, une autre porteuse...) pour maintenir la qualité du lien de communication.

2.1.3.1 Le contrôle de puissance

Le *contrôle de puissance* a pour but de maintenir le paramètre $\frac{C}{N_0}$ à une valeur constante. Pour ce faire, on augmente ou on réduit la puissance C de transmission de chaque porteuse en fonction du niveau de dégradation subi par la porteuse. Le contrôle de puissance permet alors d'agir sur la valeur fournie du SNIR.

Il est à noter que le contrôle de puissance n'offre pas une très grande marge (voir tableau 2.1) car en augmentant la puissance de chaque terminal, on augmente la valeur des interférences et donc du bruit vu par les terminaux voisins.

Le *contrôle de puissance* se décline en trois variantes.

1. ULPC (*Up Link Power Control*) ou Contrôle de puissance en montée

L'ULPC assure, pour toutes les porteuses, une valeur de puissance constante à l'entrée du répéteur du satellite afin de maintenir un niveau adéquat de bilan de liaison de bout en bout. Avec l'ULPC, le niveau de puissance à la sortie de la station émettrice est adapté en fonction des pertes atmosphériques mesurées sur le lien montant ou sur le lien descendant dans le cas d'un satellite transparent ; tandis qu'avec un satellite régénératif, l'ULPC n'agit que sur le lien montant car les bilans de liaison sur les liens montant et descendant deviennent, dans ce cas, indépendants.

2. DLPC (*DownLink Power Control*) ou Contrôle de puissance en descente

Le DLPC ajuste la puissance de transmission du lien descendant en fonction du niveau d'atténuation ; le bilan de liaison de la voie descendante est donc sollicité. Le DLPC utilise, pour ce faire, la puissance en excès dans le satellite. Cette dernière est en général très faible comparée au gain de l'ULPC (cf. le tableau 2.1).

3. OBBS (*On-Board Beam Shaping*) ou Mise en forme des faisceaux du satellite

L'OBBS repose sur le principe des antennes actives qui adaptent la taille, le niveau de puissance ou même le maillage des faisceaux en fonction des conditions de propagation. Avec cette technique, les spots qui subissent des atténuations sont reconfigurés en fonction des valeurs de pertes en y allouant les puissances en excès dans le satellite.

L'OBBS et le DLPC modifient la puissance à la sortie du répéteur du satellite, et donc la valeur de la PIRE au niveau du satellite alors que l'ULPC agit sur la PIRE du terminal émetteur. En principe, ces techniques permettent d'adapter les conditions de transmission lien par lien en fonction des niveaux d'atténuation subis par chaque terminal. Elles doivent donc être activées dès qu'un seul terminal est affecté par les pertes atmosphériques. En réalité, elles ne sont activées que lorsqu'un nombre assez significatif de terminaux subissent le contre-coup des atténuations afin de lisser les conséquences d'une augmentation de puissance sur tous les terminaux [91].

2.1.3.2 Adaptation de la forme d'onde

L'*Adaptation de la forme d'onde* permet de réduire la valeur requise de $\frac{C}{N_0}$ pour un taux d'erreur binaire (BER) donné. En fait, cette méthode a pour but de réduire la valeur requise du rapport énergie-par-bit-d'information ($\frac{E_b}{N_0}$), qui se traduit ensuite suivant l'égalité (2.2) en une réduction de la valeur requise du rapport $\frac{C}{N_0}$. Deux procédures d'adaptation de la forme d'onde existent :

1. Adaptation du codage et de la modulation (ou ACM -*Adaptive Coding Modulation*)

Cette technique consiste à adapter la valeur requise de $\frac{E_b}{N_0}$ en fonction des conditions de propagation. L'ACM comporte deux volets qui peuvent être combinés :

- **L'adaptation de codage** consiste à rajouter des bits de redondance afin d'augmenter la capacité de correction du décodeur lorsque les conditions de propagation se dégradent. Le système adopte donc différents taux de codage afin de pallier les dégradations éventuelles de la qualité de transmission.
- **L'adaptation de la modulation** consiste à adapter l'efficacité spectrale par le biais d'un éventail de schémas de modulation en fonction du niveau d'atténuation subi par les liens radios. En effet, l'augmentation du nombre de bits par symbole (i.e. l'efficacité de modulation) permet d'augmenter le débit de transmission, tout en gardant une bande transmise constante, au prix d'un $\frac{E_b}{N_0}$ élevé. Aussi la réduction de ce taux de modulation, en cas d'affaiblissement, permet-elle de réduire la valeur requise de $\frac{E_b}{N_0}$ et donc de

toujours garantir le bilan de liaison.

La dynamique de l'ACM dépend des taux de codage et des modulations adoptés (Tableau 2.1).

2. Réduction de débit (ou DRR - *Data Rate Reduction*)

Cette technique consiste à adapter le débit de transmission aux conditions de propagation. En effet, elle permet de transmettre à fort débit dans les cas favorables (pas d'atténuations) et de réduire la valeur du débit, R_b , afin de garantir l'égalité (2.1) lorsque $\frac{C}{N_0}$ décroît (cas d'affaiblissements atmosphériques).

Le DRR peut faire varier la bande passante des porteuses. En effet selon (2.5), le débit est égal au produit de la bande passante de la porteuse par l'efficacité spectrale.

$$R = \Gamma * B \quad (2.5)$$

Ainsi lorsque l'on veut réduire le débit, soit on fait varier l'efficacité spectrale soit on réduit la bande passante.

2.1.3.3 La diversité

La *diversité* consiste à offrir une autre voie de transmission lorsque une dégradation du canal de communication survient. Au niveau de la couche physique, trois types de diversité peuvent être cités :

1. la diversité de site

Deux terminaux en deux endroits différents séparés de sorte à ne pas subir les mêmes effets atmosphériques au même moment, peuvent se relayer la transmission lorsque l'un ou l'autre subit une forte atténuation. La distance entre les deux terminaux est prise en général au delà de 10 km [91] pour que les niveaux d'atténuation subis de part et d'autre soient statistiquement indépendants. Elle ne s'applique en général qu'à des terminaux de type passerelle rattachés au même fournisseur de service ou interconnectés par un lien terrestre (LAN, câble...)

2. la diversité de fréquence

Elle s'appuie sur le fait que la valeur d'atténuation subie par une porteuse croît avec la fréquence centrale de celle-ci. Ainsi en cas de fortes dégradations de la liaison, on utilise une fréquence de transmission plus basse.

3. la diversité de satellite

Elle permet aux terminaux terrestres de choisir le satellite qui leur offre les meilleures conditions de transmission lorsque le système de communication est formé d'au moins deux satellites.

La technique de la diversité s'apparente à un "back up". Elle offre une marge intéressante (voir le tableau 2.1) mais elle introduit de la redondance dans les équipements; ce qui entraîne des problèmes de coût. De plus ces équipements de réserve ne seront utilisés que pour des durées assez faibles correspondant aux instants où surviennent les atténuations. Par conséquent, la diversité n'est pas toujours viable pour les systèmes commerciaux; en revanche elle s'impose pour les systèmes militaires [37, 137].

2.1.4 Efficacité théorique des FMT

Les valeurs du tableau 2.1, extraites de [1], représentent la gamme de gain que les techniques FMT décrites plus haut peuvent offrir.

Technique FMT	Gain offert
ULPC	5 dB (VSAT) jusqu'à 15 dB (hubs)
DLPC	3 dB pour la puissance de sortie de l'amplificateur TWTA du satellite
OBBS	5 dB pour les antennes du satellite
AC et AM	10 dB au niveau du rapport $\frac{E_b}{N_0}$
Diversité de satellite	de 3 à 10 dB
Diversité de site	de 10 à 30 dB pour des cellules convectives
Diversité de fréquence	jusqu'à 30 dB en passant de la bande Ka à la bande Ku

Table 2.1 Gain des procédures FMT

2.1.5 Choix et procédures d'activation des FMT

2.1.5.1 Bilan de liaison et techniques FMT

Comme décrit à la section 2.1.3, les techniques FMT sont des procédures de contre-mesure que le système adopte en fonction du rapport signal à bruit (SNIR) obtenu par le calcul du bilan de liaison.

Pour les systèmes classiques de communications par satellite, i.e sans procédures FMT, un seul bilan de liaison est établi pour toute la zone de service. Celui-ci est obtenu en tenant compte du pire cas de propagation qui pourrait survenir dans le système. Ce qui correspond en général à l'émission d'un terminal satellite en bordure de couverture vers un autre terminal [27]. Ainsi une seule modulation, un seul de taux de codage et une valeur constante de puissance sont choisis afin de garantir, pour tous les terminaux, la disponibilité de service (équation (2.3)).

En revanche, le bilan de liaison pour un système de télécoms par satellite utilisant des procédures FMT n'est pas global [27]. En effet, un bilan de liaison est établi pour chaque position géographique en tenant compte des

conditions particulières de propagation de chaque terminal. Cela permet de combattre les affaiblissements terminal par terminal : chaque terminal pourra adopter la technique FMT adéquate en fonction de sa valeur de SNIR. Par conséquent, les techniques FMT à employer peuvent différer d'un terminal à l'autre [97].

Les terminaux étant dans des conditions différentes (position dans la zone de couverture, angle d'élévation, ...), une même valeur d'atténuation vue par deux terminaux différents ne conduit pas nécessairement au choix de la même technique FMT pour la transmission. Le choix de la technique FMT ne dépend que de la valeur de SNIR propre à chaque terminal.

Pour les systèmes de télécoms sans FMT, il existe un seul SNIR requis. La disponibilité du réseau est donc traduite par l'équation (2.3). L'introduction des procédures FMT entraîne une autre définition des SNIR requis. En effet il n'en existe plus un seul, mais plusieurs, chacun fonction du mode FMT adopté. Par conséquent, le réseau est disponible tant que le SNIR fourni est supérieur au minimum des SNIR requis. La disponibilité est donc plus importante, et il y a une meilleure utilisation des ressources du système.

Terminologie Le terme **technique FMT** fait référence dans ce document à l'une des trois catégories de FMT décrites à la section 2.1.3. Dans la suite, nous utiliserons la dénomination de **mode FMT** pour décrire la condition de transmission adoptée par les terminaux ; par exemple le choix d'une modulation donnée avec un certain taux de codage, ou le choix d'un niveau de puissance donné.

2.1.5.2 Principe de choix

Afin de garantir un fonctionnement optimal du réseau de communication (niveau d'interférence acceptable par tous ...) un module qui supervise tout le réseau, le *contrôleur FMT*, est choisi. Ce dernier doit déterminer les modes FMT adéquats pour chaque terminal. Ce module peut être intégré soit au niveau de la Gateway/NCC pour un système centralisé, soit au niveau du satellite (si satellite régénératif).

Pour choisir le mode FMT idoine, le contrôleur FMT doit pouvoir estimer ou recevoir le niveau d'atténuation A que subit chaque terminal (les méthodes d'estimation des niveaux d'atténuation sont décrites à la section 5.2). Le niveau de SNIR **fourni** en dB est évalué ensuite par le biais de l'équation (2.6)

$$SNIR_{fourni} = f\left(\left(\frac{C}{N_0 + I_0}\right)_{ciel_clair}, A\right) \quad (2.6)$$

où f est une fonction, assez complexe, qui dépend de plusieurs paramètres tels que le type de satellite (régénératif ou transparent), les capacités

des amplificateurs à bord du satellite, le lien qui subit l'atténuation (montant ou descendant), la distribution du gain d'antenne dans la zone de couverture, etc.

On définit la marge de décision, M , par la donnée de l'équation (2.7)

$$M = SNIR_{fourni} - \left(\frac{C}{N_0 + I_0} \right)_{req} \quad (2.7)$$

Si $M \leq 0$ alors on active un mode FMT, sinon on transmet dans les mêmes conditions.

Le mode FMT choisi sera celui qui minimisera cette marge afin de tirer le meilleur profit des ressources du système. Chaque mode FMT correspond donc à une gamme de marge. Cependant, afin d'éviter des allers et retours intempestifs entre deux modes FMT pour des petites fluctuations des atténuations, on introduit également une *marge d'hystérésis* [66, 91]. En définitive chaque mode FMT est valable pour un intervalle de valeurs de SNIR ; les bornes de cet intervalle sont les valeurs seuils de basculement d'un mode à l'autre.

2.1.5.3 Procédures d'activation des FMT

Les modes FMT s'activent suivant la mesure de paramètres quantitatifs et qualitatifs (SNIR, niveau de puissance, BER...) et la définition de seuil de viabilité d'un mode FMT, i.e les valeurs de $\frac{E_b}{N_0}$ pour lesquelles un mode est adéquat.

Dans le cas où l'activation du mode FMT n'est pas locale³, le grand temps de propagation dans un système satellitaire (environ 500 ms pour les deux allers et retours) est un frein à la bonne activation des modes FMT en temps réel. Pour s'affranchir de ces contraintes, il convient de faire une prédiction au moins à court terme des caractéristiques statistiques et dynamiques de facteurs d'atténuation ; notamment des affaiblissements dus à la pluie, qui est de loin le facteur prépondérant des phénomènes d'atténuation [68]. Il s'agit d'évaluer ce qui pourrait être le niveau d'atténuation à $t + \delta t$ connaissant l'atténuation à l'instant t afin d'activer le bon mode FMT au moment opportun (quand l'atténuation survient).

Les procédures FMT s'activent selon un ordre prédéfini, du moins au plus contraignant en termes d'efficacité spectrale : l'adaptation de la puissance puis l'adaptation de la forme d'onde et enfin la diversité de site est un ordre d'activation classique et cohérent [91].

3. Les problèmes de gestion de ressource requièrent de ne pas avoir d'activation locale mais plutôt une activation centralisée au sein d'un terminal que nous notons dans ce document Gateway/NCC

2.1.5.4 Récapitulatif

Le schéma de décision du mode à activer est illustré sur la figure 2.1 [14, 46] :

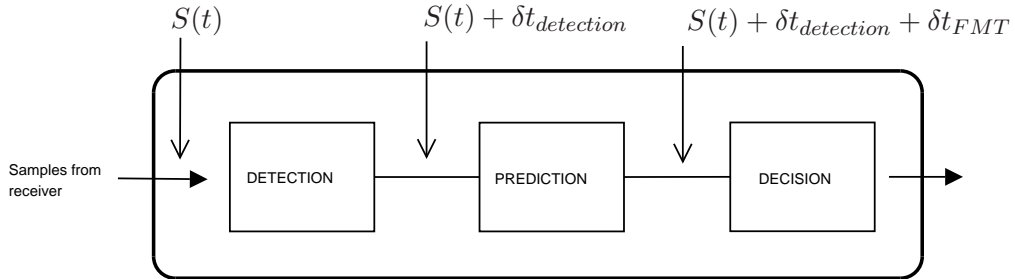


Figure 2.1 Schéma général de la boucle de contrôle FMT

Les fonctions de chaque phase peuvent être décrites comme suit

1. module *detection* : la qualité des liens de communication est évaluée de manière périodique. Cela permet d'évaluer la présence d'atténuation et le niveau du SNIR, celui de la puissance de transmission ou encore le taux erreur binaire (BER). Voir la section 5.2 pour plus de détails.
2. module *prediction* : prédire, au moins à très court terme l'évolution de la qualité de chaque lien pour pallier le délai de propagation.
3. module *decision* : choisir le mode FMT idoine pour la transmission.

2.2 Couche de liaison et gestion de ressource

Au niveau de la couche de liaison, la gestion de ressource consiste à partager entre divers utilisateurs et diverses applications la ressource radio disponible. Cela est accompli au travers des mécanismes MAC qui gèrent l'accès aux ressources et l'allocation de celles-ci et de la fonction CAC qui est en charge d'admettre intelligemment les connexions.

Un comportement générique pour la gestion de ressources au niveau de la couche liaison repose sur la définition de deux entités : le gestionnaire de ressource et les agents de ressource. Les agents de ressource sont des entités logicielles ou matérielles implantées au niveau des terminaux utilisateurs. Leur rôle est de transmettre des requêtes pour accéder aux ressources du système pour pouvoir transmettre leurs données. Le gestionnaire de ressource est, quant à lui, en charge de répondre aux requêtes exprimées par les agents de ressource. Le gestionnaire de ressource doit, en général, avoir une vision globale du réseau de communication et est donc localisé au niveau des passerelles ou points d'accès du réseau.

Les sections suivantes décrivent un peu plus dans le détail les fonctions MAC et CAC et leurs attributs.

2.2.1 Les protocoles et fonctions MAC

Les fonctions MAC représentent les mécanismes physiques et logiques de partage de la bande passante entre les différents usagers. Le rôle majeur de la fonction MAC (*Medium Access Control*) est de déterminer le terminal qui a le droit d'émettre sur le réseau de communication, et donc d'avoir accès aux ressources du système de communication.

Ces protocoles et mécanismes, sous leur forme classique héritée des communications terrestres, ont été longuement et largement utilisés dans les réseaux satellites. Cependant ils ont subi des modifications pour prendre en compte les caractéristiques des communications par satellite (paquets de trafic multiplexés, sensibilité au retard et à la propagation, propension vers le multimédia...) [5, 130].

Les protocoles MAC permettent de mettre en œuvre deux volets : la technique de partage de ressource (ou encore politique d'accès) et la technique d'allocation de ces ressources.

2.2.1.1 Partage de Ressource ou politique d'accès

La politique d'accès se définit comme la méthode qui permet à plusieurs terminaux d'interconnecter simultanément leurs applications (voix, données, vidéo...) au satellite [9]. C'est un terme générique qui définit le schéma de partage de la ressource disponible entre tous les utilisateurs du système de communication.

Il existe plusieurs politiques d'accès aux ressources, dont les principales sont le FDMA, le TDMA, le CDMA, et une combinaison de celles-ci.

Dans le FDMA (Frequency Division Multiple Access), on divise le spectre de communication en fréquences porteuses, chaque fréquence étant allouée à un usager/terminal. C'est la première des techniques de partage de ressource à avoir été utilisée, surtout lorsque la téléphonie n'était qu'analogique. Ici les usagers n'ont donc accès qu'à une partie de la ressource globale.

Dans le TDMA (Time Division Multiple Access), on divise le canal en tranches horaires (communément appelés *time slots*). Dans ce cas, le terminal se voit allouer des tranches horaires pour sa transmission. Ici les usagers n'ont accès qu'à la ressource pendant de brefs instants, et donc à une partie de la capacité du système.

Avec le CDMA (Code Division Multiple Access) on attribue des codes distincts aux signaux afin de les différencier une fois qu'ils sont transmis sur le canal. Ces codes sont en général orthogonaux afin de faciliter la discrimination entre les différents signaux. Contrairement aux deux premières techniques, chaque terminal, avec le CDMA, a accès à la totalité de la ressource.

La dernière politique consiste à combiner les techniques énumérées ci-dessus. Cela permet d'accroître le nombre d'usagers pouvant accéder au

réseau satellitaire. La technique FDMA-TDMA (ou MF-TDMA Multi-Frequency TDMA) est la combinaison la plus utilisée pour les systèmes de communication multimédia par satellite.

2.2.1.2 Allocation des ressources

La politique d'allocation de ressource consiste à assurer la répartition des ressources entre les utilisateurs de sorte à optimiser la capacité du système en termes de qualité de service (QoS), de rentabilité, de spectres... Il existe trois grandes politiques d'allocation de ressources [9, 121]

- **allocation fixe** : chaque terminal se voit allouer de manière fixe toute ou une partie de la capacité du système de télécommunication telle que partagée par la politique d'accès, quels que soient ses besoins réels. Cela pourrait s'apparenter au cas de la téléphonie fixe, où le câble de communication appartient en dur à un numéro de téléphone, et donc à un usager. Dans ce cas, l'usager a une qualité de service toujours garantie puisque les ressources affectées sont une fois pour toutes connues et non fluctuantes. Dans le secteur des communications sans fil (le cas des communications par satellite), cette technique entraîne une sous-utilisation de la capacité du canal. Il faut remarquer que la capacité en communication satellitaire, qu'est la ressource radio, est un facteur limitant et une ressource très chère. Cette technique ne peut donc pas s'appliquer dans le contexte d'un système d'accès multimédia. Elle est surtout utilisée dans le cadre de la diffusion de télévision où les ressources sont allouées en dur aux canaux de télévision [9, 99, 121].
- **allocation avec contention** : ici les terminaux concourent pour accéder aux ressources du système. En général, un tirage aléatoire est effectué pour déterminer le moment d'accéder à la capacité ; cela peut engendrer des collisions lors de l'accès car deux terminaux peuvent avoir la même valeur de tirage. Cette technique ne se prête donc pas à une garantie de qualité de service. Son point fort réside dans une mise en œuvre à bas coût et une implantation simple [121]. Le protocole *Aloha* [4] et sa variante *slotted Aloha* en sont des illustrations.
- **allocation dynamique** : la capacité allouée à un terminal n'est plus fixe mais varie dans le temps en fonction à la fois de la capacité globale disponible du système et des besoins réels de l'usager. Cette technique multiplexe un maximum d'utilisateurs sur le même canal et sur une base de temps assez courte. Parmi les protocoles MAC d'allocation à la demande, il y a le DAMA (Demand Assignment Multiple Access) dont la fonction est d'allouer de la capacité sur demande en réponse à une requête provenant d'une station. Le DAMA fournit un meilleur

taux d'utilisation de la capacité même si cela peut engendrer une complexité de gestion du fait des processus de négociation et d'attribution de ressources. Plusieurs protocoles DAMA ont été décrits dans la littérature [57, 85, 101, 125, 145] mais la plupart des techniques sont propriétaires comme le FODA/IBEA décrit dans [9].

Le protocole d'accès envisagé dans cette étude reposera sur un protocole DAMA conforme à celui normalisé par le DVB-RCS [48]. En revanche, les mécanismes retenus ne seront pas décrits dans le détail, l'objectif étant de se focaliser sur les fonctions CAC.

2.2.2 Fonctions CAC

La fonction de contrôle d'admission des connexions a pour objet de rejeter ou d'accepter une demande de connexion en fonction du comportement de l'application à connecter (en termes de capacité requise), de la qualité de service demandée et de la capacité disponible du système. Si le centre de gestion estime qu'il ne pourra pas garantir la qualité demandée ou si cette nouvelle connexion risque de perturber les connexions en cours, la demande est rejetée. Si la demande est acceptée et si une QoS stricte est à garantir, les ressources sont alors réservées sur toutes les entités constituant le chemin de la connexion. Pour ce faire, la fonction CAC doit donc d'une part avoir accès aux paramètres de la qualité de service liant l'utilisateur au fournisseur d'accès, et d'autre part avoir accès aux paramètres d'état du réseau (état de congestion et capacité du réseau).

Voir le chapitre 3 pour une étude plus fournie sur la fonction CAC.

2.3 Couche de liaison et procédures FMT

La technique d'adaptation de la forme d'onde, comme procédure FMT, permet d'utiliser des modulations et des taux de codage différents sur une base de temps assez faible. Ce changement de paramètres de transmission conduit à avoir une couche physique variable; et par conséquent, a des répercussions sur les procédures de niveau supérieur.

Dans cette section, nous allons décrire les interactions des procédures FMT avec les protocoles MAC et CAC de la couche de liaison. L'étude sera portée essentiellement sur les procédures d'adaptation de la forme d'onde car les autres techniques FMT n'induisent que des changements sur la signalisation du système comme l'illustre la référence [46] concernant le contrôle de puissance.

Dans la suite le vocable *ModCod* (**Mod**ulation et **Cod**age) fera référence aux procédures d'adaptation de la forme d'onde ; un ModCod correspondant au choix d'une combinaison particulière de modulation et de taux de codage.

2.3.1 FMT et protocoles MAC

Dans le système de référence (figure 1) calqué sur l'architecture du DVB-RCS [48], le mode de partage des ressources est le MF-TDMA pour la communication entre les terminaux usagers et le satellite. Ainsi le système adopte une configuration sous forme de trames pour la transmission des données des usagers. La trame se réfère au cycle d'allocation, i.e. l'ensemble des slots alloués à un même instant à l'ensemble des terminaux.

L'ajout de bits de redondance, le changement de modulation ou la réduction de débit conduisent à avoir un nombre variable de symboles, et de donc de bits, d'une période à une autre. Ainsi dans une structure de type TDMA, les nombres de slots peuvent varier à chaque période. De plus la réduction de débit, parce qu'elle peut faire varier la bande passante, entraîne, pour une structure de type FDMA, une variation du nombre de porteuses dans le système. Par conséquent, dans une structure de type MF-TDMA, les ModCod ont une répercussion sur la formation des trames, que celles-ci soient fixes ou variables.

2.3.1.1 Trame à configuration fixe

Une trame est dite à configuration fixe si sa structure se conserve à chaque cycle d'allocation : on garde donc le même découpage temporel et fréquentiel des slots à chaque cycle d'allocation.

Pour la formation de cette trame, il faut donc tenir compte de toutes les possibilités d'atténuation qui peuvent survenir dans le système. Ainsi un large spectre de ModCod peut être utile pour toujours offrir un service quelles que soient les valeurs d'atténuations qui peuvent survenir.

Pour cette configuration, on peut tirer les conséquences suivantes :

- Pour le lien aller, le nombre de blocs par ModCod est fixe ainsi que l'ordre dans lequel ils sont formés comme illustré sur la figure 2.2 (les en-têtes éventuelles ne sont pas représentées) ;
- Pour le lien retour, il n'y a qu'un seul ModCod par porteuse, et le nombre de porteuses comportant un ModCod donné est fixe d'une trame à l'autre. La figure 2.3 en est une illustration. Sur cette figure, toutes les porteuses ont la même largeur de bande.

La configuration à trame fixe conduit le plus souvent à une perte de capacité. En effet, les modes les plus robustes de la trame ne seront vraiment utiles que si de fortes atténuations surviennent, alors que ces fortes atténuations n'apparaissent que très rarement. Par ailleurs, les modes les

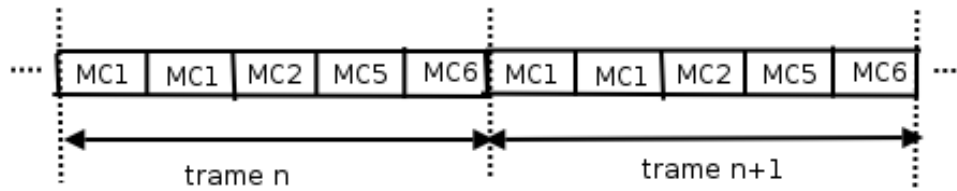


Figure 2.2 Exemple de trame fixe (lien aller)

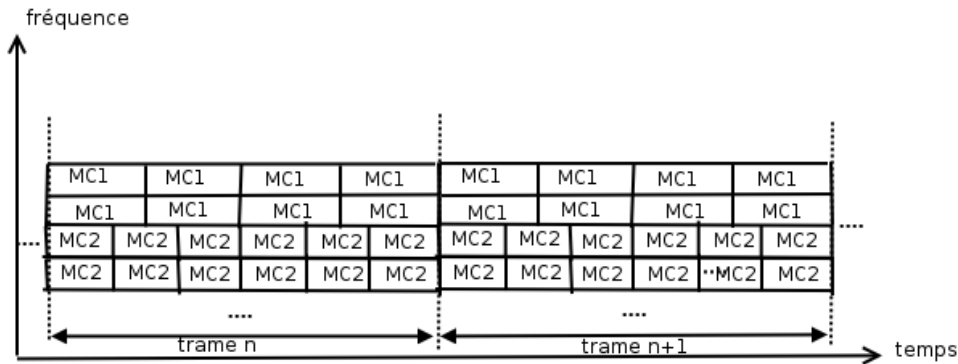


Figure 2.3 Exemple de trame fixe (lien retour)

moins robustes ne seront pas utilisés si la dégradation devient importante. On aboutit dès lors à une sous-utilisation de la capacité globale du système.

Il vient donc qu'une structure de trame fixe comportant différents ModCod est inopportune lorsque le taux de variation des atténuations n'est pas négligeable et que cette variation se fait avec de fortes amplitudes.

2.3.1.2 Trame à configuration variable

La trame à configuration variable consiste à changer la structure des trames, les découpages temporel et fréquentiel, à chaque période d'allocation. Ainsi la composition de la trame, en termes de ModCod, varie dans le temps en fonction des affaiblissements atmosphériques qui apparaissent dans la zone de service.

Deux configurations de trames variables peuvent être formées : soit la variation des ModCod se fait slot par slot, soit elle se fait d'une porteuse à l'autre.

Dans le cas d'une trame configurable slot par slot, les changements de ModCod se font à l'échelle des timeslots. Ainsi la composition des ModCod des slots pour une même porteuse peut varier d'une trame à l'autre. Il vient donc que :

- sur la voie aller, le nombre de ModCod ainsi que l'ordre de chacun des ModCod varient d'une période de trame à l'autre, comme illustré sur la figure 2.4 ;

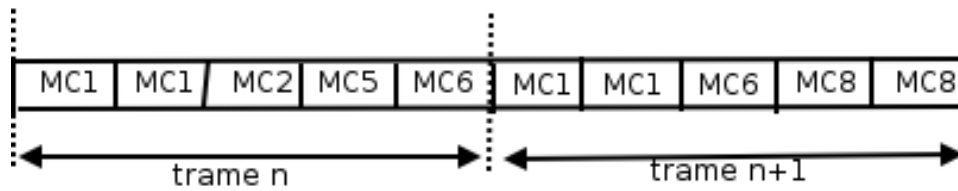


Figure 2.4 Exemple de trame variable (lien aller)

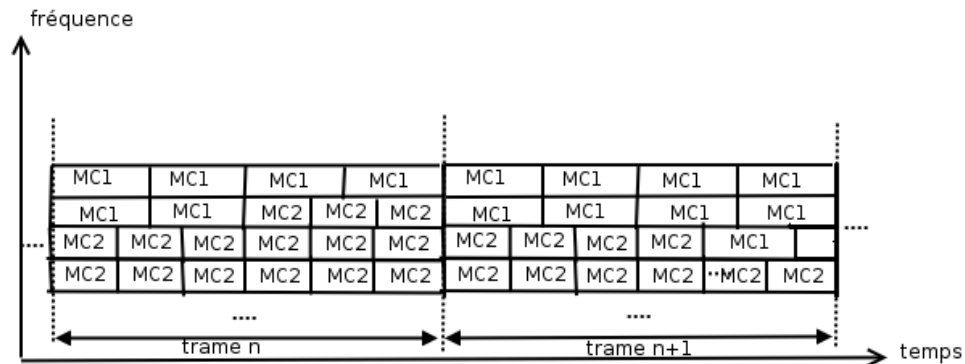


Figure 2.5 Exemple de trame variable slot par slot (lien retour)

- sur le lien retour, une porteuse donnée peut comporter plusieurs types de ModCoD dans une même trame. En outre la configuration globale de la trame peut changer à chaque période de formation de trames (voir la figure 2.5).

Pour une trame configurable porteuse par porteuse, à chaque période d'allocation la configuration globale change mais seulement au niveau des porteuses. Dans ce cas, on fait supporter les mêmes ModCod par porteuse. D'une valeur d'atténuation à l'autre, la composition en termes de porteuses varie donc dans le temps. On aboutit aux conséquences suivantes :

- sur le lien aller, on a la même configuration que dans le cas des trames variables slot par slot (figure 2.4) ;
- sur la voie retour, les porteuses ont un seul ModCod par trame ; mais le ModCod choisi pour cette porteuse varie d'une trame à l'autre, comme illustré sur la figure 2.6.

La configuration des trames slot par slot est plus efficace que celle au niveau des porteuses. En effet, du fait de la granularité des changements de ModCod, la capacité des trames est plus proche des valeurs optimales. Cependant le changement de ModCod slot par slot engendre de la complexité dans les démodulateurs des terminaux récepteurs ; ce qui peut aller en l'encontre de la politique de terminaux à bas coût nécessaire pour la viabilité économique des systèmes de communication multimédia par satellite pour le

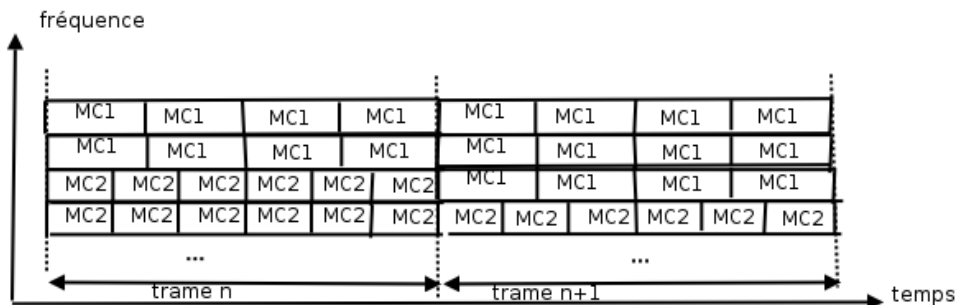


Figure 2.6 Exemple de trame variable porteuse par porteuse (lien retour)

grand public. De plus, la complexité pour la formation de telles trames, configurables slot par slots, s'accroît avec le nombre de terminaux et de ModCod éligibles comme démontrés au chapitre 4. Par ailleurs, pour des problèmes de synchronisation des émetteurs et des récepteurs, il faut s'assurer d'un certain rapport entre les différentes durées des slots d'une même trame ; ce qui ajoute un point dur supplémentaire. La configuration de la trame porteuse par porteuse est donc un bon compromis quand à la complexité de calcul et la capacité offerte.

2.3.1.3 Conclusion

Les pertes de capacité qui surviennent, dans le cas des configurations fixes des trames, lorsqu'une porteuse ne peut plus être utilisée parce que les affaiblissements sont très importants, désavantagent cette méthode vis à vis de la trame à configuration variable. Mais la connaissance de modèles précis d'atténuation peut aider à établir une trame à configuration fixe qui minimise les pertes éventuelles de capacité. Un tel modèle reposerait sur les statistiques, calculées sur une année moyenne, de l'utilisation des ModCod par les terminaux. Malheureusement, même si de puissants outils statistiques existent, comme décrit au chapitre 5.3, le modèle de trame à configuration fixe ne tire pas profit de la réactivité du contrôleur FMT et conduit donc à des pertes de capacité.

Le cas de la trame variable est plus général que celui de la trame fixe. En effet, en absence de changement notable sur le canal de transmission, la configuration demeure fixe. De plus la configuration variable permet de mieux répondre aux fluctuations de la qualité du canal physique. La (re)configuration de la trame se fait sur la base des attentes des utilisateurs en terme de mode FMT et donc de la qualité des liens de communication et du niveau d'atténuation subis par le terminal.

La procédure FMT qui a principalement un impact sur les protocoles couche MAC est l'adaptation de la forme d'onde ou ModCod car elle a une

répercussion grande sur l'algorithme de formation des trames et d'allocation de ressource. Les autres procédures FMT ont surtout un impact sur la signalisation. Pour la formation des trames, et donc pour la gestion de ressource, les protocoles MAC doivent être renseignés à la fois sur les requêtes de capacité et sur les ModCod de chaque usager. Ainsi un lien doit s'établir entre le contrôleur FMT en charge de l'allocation des modes FMT et les protocoles de gestion de ressource MAC. Ce lien peut s'établir à distance ou au sein d'un même équipement, comme la Gateway/NCC.

La collaboration entre le contrôleur FMT et les protocoles MAC permettra d'une part d'adopter la meilleure configuration de la trame (dans le cas de trame à configuration variable) et d'autre part de calculer le nombre de slots par trame afin d'allouer la capacité en réponse aux requêtes des terminaux. Cette problématique a été l'objet de plusieurs travaux [31, 92, 106, 112, 142].

2.3.2 FMT et CAC

Les décisions d'admission ou de refus au niveau de la fonction CAC sont tributaires de la valeur de la capacité du système. De plus le nombre de connexions, donc le revenu des exploitants du système satellitaire, est étroitement lié à la valeur de la capacité. Ainsi l'estimation et l'utilisation de cette dernière sont donc primordiales afin d'avoir une fonction CAC efficace.

Les techniques FMT, notamment les ModCod, même si elles luttent contre les affaiblissements atmosphériques et augmentent la disponibilité du système de communication, ont des répercussions sur la capacité globale du système. Par exemple, lorsqu'une porteuse passe d'un mode favorable à un autre plus robuste, elle perd nécessairement en nombre de slots utiles à transporter et diminue donc la capacité du système.

2.3.2.1 Capacité du système et CAC

La capacité d'un système traduit la quantité de ressources disponibles pour transmettre les données des utilisateurs du système de communication. Elle peut être traduite indifféremment dans l'un ou l'autre des termes suivants : bande passante, débit binaire, débit symbole, nombre de cellules transportées par unité de temps.

Dans une architecture d'accès de type MF-TDMA, cadre de cette thèse, une transcription de la capacité en termes de slots de trafic transportés par trame est opportune. Ainsi allons-nous parler de nombre de slots TRF par trame pour traduire la capacité du système.

Si la configuration des trames est fixe, on a toujours le même nombre de slots d'une trame à l'autre. La capacité des trames reste donc constante dans le temps. Cependant, l'évolution des phénomènes météorologiques peut conduire à ne plus utiliser certains slots. En effet, lorsque les atténuations atmosphériques augmentent, les slots adéquats pour le mode *ciel clair* et qui

ont donc les modes FMT les moins robustes, deviennent inutilisables. Dans ce cas, seuls les slots avec les modes les plus robustes sont éligibles. Par conséquent, le nombre de slots utiles devient plus petit, et la capacité *réelle utilisable* du système baisse. Cela s'apparente à une variation de la capacité. L'efficacité du système, en termes de taux d'occupation de la capacité, diminue donc.

Si la configuration de la trame est variable, l'efficacité du système est augmentée par le mécanisme d'adaptation de la trame aux conditions de propagation. En contrepartie, la capacité globale devient variable car une porteuse d'un mode FMT à l'autre ne comporte pas le même nombre de slots. Ici encore la capacité globale est variable dans le temps.

En définitive l'adaptation de la forme d'onde, au travers des différents ModCod proposés, conduit à une variation dans le temps de la capacité réellement utilisable dans le système. La fonction CAC, dont l'admission repose sur la capacité réelle offerte par le système, doit donc être transformée en fonction des conditions de propagation. Son implantation s'en trouve, ainsi, modifiée.

2.3.2.2 CAC variable

La fluctuation de la capacité conduit à des difficultés dans l'implantation de la fonction CAC. En effet, une telle fonction qui ne fonderait sa politique d'admission que sur l'état courant de la capacité (cas classique des fonctions CAC) conduirait à une perte de connexions déjà établies. Ceci constituerait un motif d'insatisfaction pour les usagers.

Pour éviter que des baisses de capacité conduisent à des rejets de connexions en cours, la fonction CAC doit anticiper les instants de réduction de capacité, et donc prévoir l'évolution des modes FMT alloués aux terminaux. La fonction CAC doit donc adapter sa politique d'admission à la variation de la capacité ; on parle dès lors d'un *CAC variable* ou d'un *CAC adaptatif*.

Par ailleurs, la fonction CAC, étant un mécanisme temps réel, elle doit estimer la valeur de la capacité courante du système. Cependant cette évaluation n'est pas nécessaire à chaque période d'allocation de ressource, car la fonction CAC et les protocoles MAC agissent à des échelles de temps différentes (cf. tableau 2.2). En effet, la fonction CAC agit au niveau des connexions, dont les durées moyennes sont de l'ordre de plusieurs minutes, alors que la période d'allocation est le plus souvent inférieure à la seconde [113]. Par exemple, dans le cadre du DVB-RCS, 26.5 ms pour la période d'allocation sont préconisés [49].

Cette problématique sera traitée dans le détail dans les chapitres suivants.

	Court terme	Moyen terme	Long terme
Événement	-Évaluation d'atténuation -Activation des modes FMT -DAMA (allocation de ressources)	-Prédiction évolution dynamique des affaiblissements -Planification des modes FMT -CAC	-Prédiction évolution statistique des affaiblissements -Valeur disponibilité -Performances attendues (BER, SNIR..)

Table 2.2 Echelle de temps et Protocole

2.4 Conclusion

Les protocoles FMT, notamment l'adaptation de la forme d'onde, interagissent fortement avec les procédures de gestion de ressources au niveau de la couche liaison. D'une part, ils peuvent conduire à avoir une configuration variable de trames dans une structure de type MF-TDMA ; ce qui nécessite une interaction entre les protocoles MAC et le contrôleur FMT en charge d'attribuer les modes FMT pour la transmission des terminaux.

D'autre part, ils conduisent à une variation de la capacité fournie par le système. Cette variation de la capacité a des répercussions sur l'implantation d'une fonction CAC qui doit, par conséquent, prédire les instants de variation de la capacité afin d'éviter des pertes de connexions préjudiciables aux critères de qualité de service (QoS) du système de télécommunication.

Cependant, les deux phénomènes n'agissent pas à la même échelle de temps (tableau 2.2). Cela conduit à *dissocier* fortement les deux fonctions MAC et CAC : les protocoles MAC, notamment au travers du DAMA, sont en charge de répondre aux requêtes de capacité en allouant les ressources radios à l'échelle de la trame alors que la fonction CAC est en charge de répondre aux requêtes de connexions à l'échelle de plusieurs trames. Ainsi la politique de décision de la fonction CAC est dissociée de celle d'allocation des ressources par le DAMA ; et cela même si la fonction CAC peut se reposer sur l'évaluation de la capacité née de la formation des trames au niveau des protocoles MAC. Ce principe sera adopté dans la suite de ce manuscrit.

Chapitre 3

Les mécanismes CAC

3.1	Fonction CAC : généralités	48
3.1.1	Définition	48
3.1.2	Présentation	48
3.2	Taxonomie des CAC	49
3.2.1	Paramètres de trafic	49
3.2.2	Critères d'admission	51
3.2.3	Politique d'admission	54
3.3	CAC et variation de capacité.	57
3.3.1	Critères de performance	57
3.3.2	CAC réactif ou CAC préventif.	58
3.3.3	Politique d'abandon	60
3.4	Conclusion	61

L'étude de l'impact des procédures FMT sur l'évaluation de la capacité a été menée dans le chapitre précédent. Il en est ressorti que la capacité du système devient variable du fait des procédures de contre-mesure. Ainsi, une fonction CAC qui ne tiendrait pas compte de la variation de la capacité pourrait conduire à un recul significatif des paramètres de QoS spécifiés pour les utilisateurs du système. Par conséquent, les fonctions CAC doivent adapter leur politique d'admission en fonction de l'évolution de la capacité, et donc en fonction des conditions de propagation. Avant de décrire de tels CAC, dits CAC adaptatifs, il est présenté dans ce chapitre les mécanismes CAC dans leurs généralités, leurs attributs et leurs propriétés.

3.1 Fonction CAC : généralités

3.1.1 Définition

La fonction CAC, *Contrôle d'Admission des Connexions*, est définie selon l'ITU-T [135] comme l'ensemble des procédures et actions accomplies par le réseau pendant la phase d'établissement d'une connexion pour déterminer si celle-ci peut ou non être établie.

La fonction CAC a donc pour objet de limiter le nombre de connexions dans le système favorisant ainsi les mécanismes de contrôle de congestion, de flux, de reprise sur pertes, d'accès aux supports, etc.

3.1.2 Présentation

La gestion de ressource, comme montré au chapitre 2 est un outil de haute importance pour les systèmes de communication multimédia. Un des volets de la gestion de la ressource est le contrôle d'admission des connexions.

Cette fonction s'assure que l'établissement des connexions se fera sans contrepartie néfaste à la fois pour le réseau et pour les autres utilisateurs afin d'atteindre les objectifs de performance du réseau et de respecter les garanties en matière de qualité de service. Un rôle secondaire de la fonction CAC, comme toute procédure de gestion de ressource, est d'assurer une utilisation optimale des ressources du système.

Ainsi, une connexion n'est admise dans le réseau par la fonction CAC que (1) s'il y a suffisamment de ressources pour établir la connexion, (2) si les objectifs de qualité de service pour la connexion dont l'admission est requise peuvent être satisfaits et (3) si les objectifs de qualité de service pour les connexions en cours peuvent être maintenus.

En définitive, la fonction CAC permet à la fois de maintenir les critères de performance du réseau et de garantir que les connexions établies dans le réseau se déroulent sans entraver leurs paramètres de QoS et/ou le contrat de service qui les lie au gestionnaire du réseau.

3.2 Taxonomie des CAC

Les différents paramètres dont dispose la fonction CAC pour sa prise de décision s'articulent essentiellement autour de trois points qui permettront de définir sa finesse et sa robustesse : les descripteurs de trafic, la méthode d'estimation de la ressource qui est le critère d'admission, et la politique d'admission [93, 129]. La taxonomie de la fonction CAC s'en déduit donc comme illustrée sur la figure 3.1.

Chacun de ses trois attributs de la fonction CAC se subdivisent en deux sous-branches : les paramètres de trafic pouvant être déclarés ou mesurés, l'admission pouvant se faire sur l'évaluation de la bande équivalente ou sur un critère de qualité de service (QoS) tel que BER, CLR, et enfin la politique d'admission pouvant se faire par un partage de la ressource stricte ou non.

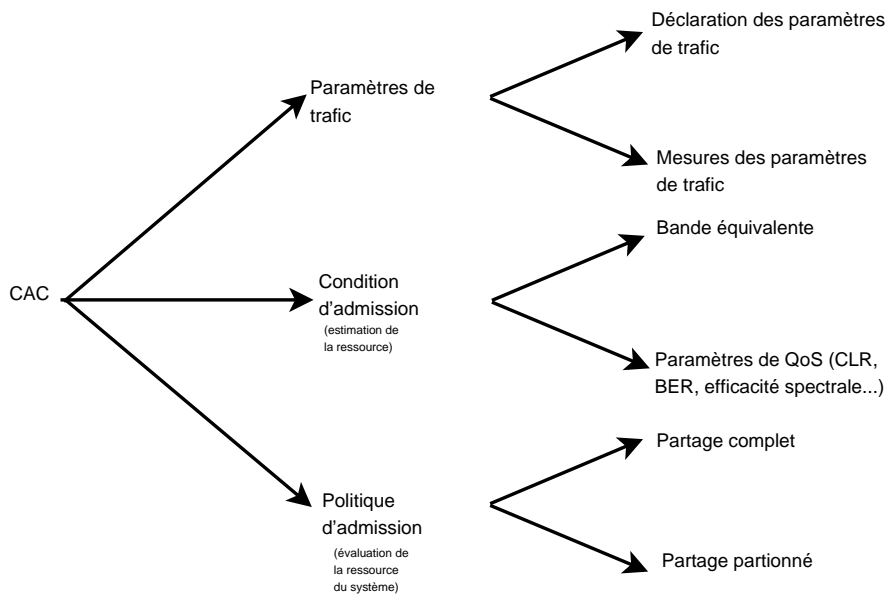


Figure 3.1 Taxonomie à 3 dimensions pour les CAC

3.2.1 Paramètres de trafic

Le premier volet d'une fonction CAC est de caractériser la connexion à établir dans le réseau. Cette caractérisation se fait par le biais de paramètres descriptifs du trafic à connecter. Cela permettra d'évaluer, par la suite, les besoins en ressource pour la connexion. Les paramètres suivants, tels que définis par le forum ATM [61] et extrapolés dans un cadre général dans la référence [60], servent à décrire les trafics : **PCR** (Peak Cell Rate) -débit crête pour un trafic-, **SCR** (Sustainable Cell Rate) -débit moyen pour un trafic-, **MCR** (Minimum Cell Rate) -débit minimal pour un trafic-, **MBS**

(Maximum Burst Size) -taille maximum des bursts pour une application-, **BT** (Burst Tolerance) - taille maximale d'un burst -, **MFS** (Maximum Frame Size)- taille maximale de la trame pour une application, une trame étant, ici, un ensemble de bursts-, ...

Ces éléments caractéristiques du trafic peuvent être obtenus à partir des propriétés statistiques des sources de trafic (mesures des paramètres du trafic) ou des propriétés non statistiques (déclaration des paramètres de trafic) [114].

3.2.1.1 Paramètres de trafic déclarés

Dans la littérature, les CAC qui reposent sur une déclaration des paramètres caractéristiques des trafics à connecter sont connus sous le vocable de DBCAC (Declared-based CAC). Les paramètres de trafic déclarés caractérisent *a priori* le type d'application à connecter.

L'inconvénient de cette méthode est que, hormis le débit maximal (*peak rate*) tous les autres paramètres de trafic pour décrire précisément un flux de trafic ne sont pas fiables, du fait de la nature hétérogène des flux transportés [108]. De plus, ces paramètres *a priori* traduisent la plupart du temps le comportement "pire cas" des sources de trafic. Ce qui conduit à une sous-utilisation des ressources du réseau.

Elle a cependant un avantage : elle garantit un débit pour lequel la connexion atteint à coup sûr tous les objectifs de qualité de service. C'est ainsi que les DBCAC peuvent être utilisés pour les applications à débit constant, et qui ont de fortes contraintes sur la gigue et les délais de transmissions.

3.2.1.2 Paramètres de trafic mesurés

Les MBCAC (Measurement-based CAC) sont les fonctions CAC qui reposent sur une mesure en ligne des paramètres de trafic [108]. Ce calcul est en général fondé sur les modèles statistiques des trafics. Ces modèles servent à déterminer des paramètres caractéristiques des flux de trafics plus proches de la réalité ; et qui permettent dès lors d'utiliser au mieux la bande passante du réseau de communication.

Les MBCAC proposent des algorithmes d'estimation de la source de trafic soit de manière formelle ou par apprentissage. Les documents [129] et [22] présentent de tels types de CAC : [129] présente une vue d'ensemble des algorithmes MBCAC et [22] commente les performances de divers MBCAC.

Plusieurs approches pour l'estimation de trafic ont été adoptées dans la littérature. Le but étant à chaque fois d'obtenir de meilleures approximations des caractéristiques des trafics du système de télécommunications. Des méthodes employées vont de la fenêtre temporelle (*Time Window*), à la moyenne exponentielle (*Exponential Averaging*), en passant par celles

de l'échantillonnage par point (*point sample*), l'échantillonnage adaptatif (*adaptive sampling*) et les filtres de Kalman [22], [5], [81].

L'avantage indéniable des MBCAC est le fort taux d'utilisation des ressources du système qu'ils permettent. Cependant, les modèles statistiques des flux individuels sont moins réalistes que ceux des agrégats. Ainsi, dans le cadre de trafic individuel, l'estimation de la ressource est assez optimiste. De plus, les MBCAC du fait des calculs nécessaires en temps réel des paramètres de trafic sont très consommatrices de ressources de calcul (processeur).

3.2.2 Critères d'admission

Le critère d'admission fait référence à la méthode d'évaluation de la ressource que nécessite la connexion à établir. Comme indique la figure 3.1, cette évaluation peut se faire suivant deux axes principaux : l'évaluation de la bande équivalente ou l'évaluation de critères QoS.

3.2.2.1 Bande équivalente

La bande équivalente est un débit associé à une source de telle façon que, si on suppose que cette source émet à ce débit, la probabilité de perte reste inférieure à une valeur ϵ et donc que les critères de qualité sont respectés [116]. Ce débit peut être inférieur ou égal au débit crête.

La bande équivalente peut être déterminée en fonction du contrat de trafic (notamment la probabilité de perte), ou en fonction des caractéristiques statistiques du trafic (paramètres de trafic) ou encore comme un paramètre du contrat de service (à chaque type de trafic, on associe une bande équivalente indépendamment du trafic réel). Son calcul a fait l'objet de plusieurs études [45, 70] et est utilisé dans plusieurs protocoles de CAC [113].

Lorsque la bande équivalente est prise égale au débit crête, la stratégie garantit des performances déterministes mais elle s'avère très conservatrice. En effet, elle alloue le débit maximal à chaque connexion et conduit, dès lors, à des pertes de capacités lorsque la transmission effective se fait en deçà des valeurs optimales. Cette politique, très simple, est surtout utilisée dans le cas des sources de trafic à débit constant.

Pour tirer profit du multiplexage statistique possible entre les différentes sources de trafic, la bande équivalente est prise inférieure au débit crête. La valeur, dans ce cas, est généralement comprise entre le débit crête et le débit moyen. Elle permet, ainsi, d'admettre plus de connexions dans le réseau. Elle est surtout utilisée pour des trafics à débit variable.

La notion de bande équivalente nécessite pour être précise une description statistique complète des sources de trafic injecté. Cependant non seulement certains modèles de trafic sont très complexes et donc poussent à de lourds calculs mais d'autres sources de trafic sont difficilement modélisables [113].

Ainsi le plus souvent c'est le pire cas de trafic qui est pris en compte pour l'évaluation de la bande équivalente. Il vient donc que la méthode s'appuyant sur l'estimation de la bande équivalente est entachée d'une erreur d'estimation (due à la modélisation indispensable du trafic) et d'une erreur d'approximation (due aux calculs temps réels).

Par conséquent certains pensent qu'il vaut mieux malgré tout conserver l'allocation au débit maximal dès lors que la proportion de trafic de cette catégorie reste faible. Dans le domaine satellite, on peut même envisager que les ressources allouées à ces connexions et qui ne sont pas effectivement utilisées puissent être utilisées par d'autres flux du terminal concerné.

Toutefois, l'évaluation de la bande équivalente permet d'avoir une politique d'admission assez simple. En effet si la somme des bandes équivalentes des connexions en cours plus la nouvelle connexion est inférieure à la capacité globale du système alors la connexion est admise, sinon elle est rejetée.

Plusieurs exemples de calcul de la bande équivalente sont donnés dans la référence [114]. Shiomoto et al donnent, quant à eux, des exemples de CAC qui utilisent l'évaluation de la bande équivalente [129].

3.2.2.2 Critères QoS

En général, la proposition d'une politique CAC qui tient compte de tous les critères QoS est un problème très difficile [19]. En effet, non seulement les paramètres de QoS sont grands mais en plus ils évoluent le plus souvent à différentes échelles de temps. Ainsi la modélisation d'un problème de CAC regroupant tous les critères QoS peut aboutir à un espace de calcul très complexe, ardu à définir et beaucoup trop grand.

Pour contourner cette difficulté, la plupart des politiques de CAC se focalisent sur la prise en compte des paramètres QoS de même niveau : niveau bit, niveau paquet ou niveau connexion.

CAC et paramètres QoS de niveau bit

Les paramètres QoS de niveau bit ont une échelle de temps très courte, de l'ordre de la microseconde. Ils se traduisent à travers les paramètres tels que le taux d'erreur binaire (BER) ou le niveau de qualité SNIR de la liaison de communication. Les très faibles valeurs de l'échelle de temps comparées aux échelles de temps des durées de connexions, font que ce niveau de qualité n'est pas très utilisé pour la définition de politique CAC. De plus, avec l'amélioration des techniques de transmission (procédures FMT, gain d'antenne...) ces paramètres de qualité sont le plus souvent respectés.

CAC et paramètres QoS de niveau paquet

Les propositions de CAC utilisant des paramètres QoS de niveau paquet sont les plus développées dans la littérature [44, 114, 129, 147]. En effet, les paramètres de QoS de ce niveau ont une influence directe sur la perception

de la qualité par les utilisateurs du réseau. Ces paramètres sont le CLR- Cell Loss Rate- pour taux de perte de cellule et le PER -Packet error Rate- pour taux de perte des paquets.

Les paramètres de QoS de niveau paquet suggèrent de compter les paquets perdus afin d'assurer leur retransmission, d'estimer ceux arrivés en retard afin de les ordonner, et d'éliminer les paquets dupliqués. Ces procédures entraînent donc des problèmes de bufferisation, de routage et d'ordonnement ; ce qui rend difficile de définir des CAC qui tiennent compte des critères QoS de niveau paquet.

Dans ce cas de figure, les politiques de type MBCAC (Measurement-Based CAC) [129,147] qui adoptent leur politique en fonction de la qualité service mesurée donnent les meilleures performances.

CAC et paramètres QoS de niveau connexion

Les CAC pour le niveau connexion ou CAC de niveau appels ont suscité moins d'intérêt. Ces politiques ont été proposées pour le support des communications unicast dans les réseaux cellulaires [128] ou les systèmes LEO [132]. Le but étant de garantir une qualité de service acceptable pour les nouveaux appels ou les handoffs.

Mais il apparaît que les paramètres de QoS de niveau tels que le taux de blocage des connexions [43] (ou le taux de réussite des connexions) ou la probabilité de rejet de la connexion [132] sont plus adaptés dans la définition des procédures CAC. Des modèles mathématiques, comme les processus de décision de type markovienne ou les problèmes de Bin Packing, comme illustrés dans [112,139], sont très utiles dans la recherche de solution de tels CAC

Il faut souligner que la méthode reposant sur les critères de QoS ne permet pas de définir la quantité de ressource effective à allouer à une nouvelle connexion. Ainsi l'admission repose sur la comparaison du critère QoS (BER, PER, taux de blocage...) mesuré avec une valeur admissible : si la valeur du critère QoS utilisée est inférieure à une valeur nominale, ϵ , connue pour le type de trafic à connecter alors la connexion est établie sinon elle est rejetée. En général, le choix de la valeur nominale ϵ est dicté par les caractéristiques des classes de trafic. L'ATM forum [61] décrit les caractéristiques des catégories de service pour les réseaux ATM, et ou au niveau IP les références [2,12] définissent les caractéristiques des classes DiffServ.

Cette méthode est complexe car l'évaluation en ligne des critères QoS n'est pas aisée et prend en compte plusieurs paramètres comme la classe de chaque trafic, le taux d'utilisation de la capacité du système, le nombre de connexions du même type...

3.2.3 Politique d'admission

Après l'évaluation du critère d'admission, la décision d'admission est assez simple :

- **Avec le calcul de la bande équivalente**, une nouvelle connexion de débit b_k est admise dans le réseau si :

$$\sum \text{capacite_deja_allouee} + b_k \leq C$$

où C est la capacité du système.

Sinon elle est rejetée.

- **Avec le critère des paramètres QoS**, une nouvelle connexion de paramètre QoS p est admise dans le réseau si

$$p \leq \epsilon$$

où ϵ est le critère QoS nominal.

Sinon elle est rejetée. Le choix de la valeur du paramètre ϵ dépend fortement de celle de la capacité C et des contraintes de qualité de services spécifiées par l'opérateur du système satellite.

On voit donc que la décision d'admission dépend de la capacité offerte du système. Cependant, la capacité globale offerte par le réseau de communication peut être partagée complètement ou partiellement par les usagers du système de communication. Suivant le type de partage adopté pour la ressource du système, plusieurs politiques d'admission peuvent être définies [19]. Chacune des politiques a ses caractéristiques propres que nous détaillons dans les sous-sections suivantes.

3.2.3.1 Partage Complet

Avec le partage complet des ressources, ou *Complete Sharing*, tous les utilisateurs et toutes les applications concourent sur la même base pour la capacité. Dans ce cas, un appel est accepté s'il y a de la place. En effet, les connexions sont admises en fonction de l'ordre d'arrivée des demandes.

Cette méthode a fait l'objet de plusieurs publications [36, 87, 105, 124]. Elle a l'avantage d'être très simple et robuste. Cependant, elle n'est pas équitable vis à vis des classes de trafic les moins chargées, comme toutes les procédures FIFO. En effet, les classes les plus chargées, et donc avec les connexions les plus nombreuses, peuvent s'accaparer les ressources au détriment de celles moins chargées. Toutefois, le complete sharing est la politique la plus rencontrée dans la littérature.

Une amélioration de cette technique a été proposée avec les mécanismes de partages de ressource.

3.2.3.2 Partage partiel

Plusieurs mécanismes de partage de ressource existent dans la littérature. Leur idée de base est d'allouer une partie de la ressource globale pour certaines classes de trafic.

Partitionnement complet

Cette politique vise à diviser la bande passante du lien en autant de subdivisions qu'il y a de classes de trafic. Ainsi chacune des classes n'a accès qu'à sa subdivision. Le partitionnement complet, ou *Complete Partitioning*, protège certaines classes de trafic de la consommation et de la monopolisation des ressources par d'autres classes de trafic plus chargées. Il permet donc d'être plus équitable que le partage complet, à condition de bien choisir la taille des partitions.

En revanche, il offre un taux d'utilisation moindre de la ressource du système que le partage complet car des connexions peuvent être rejetées alors qu'il y a la place; cette place étant réservée pour un autre type de connexions.

Une illustration de l'utilisation de cette politique d'admission est donnée dans les références [16] et [32] pour un réseau ATM.

Partitionnement partiel

La politique de partitionnement partiel, ou *partial partitioning*, permet d'offrir un meilleur taux d'utilisation que la politique de partitionnement complet. En effet, avec cette politique le nombre de subdivisions n'est plus égal au nombre de classes de trafic, de sorte que plusieurs classes peuvent concourir pour une même ressource. C'est une politique hybride qui associe le partage complet pour certaines classes de trafic et le partitionnement complet pour d'autres classes. Une illustration est donnée dans la référence [38].

Politique à seuil

La politique à seuil, ou *threshold policies*, a pour but d'accepter un certain type d'appel ou une classe de trafic en se fondant sur des seuils définis pour chaque classe de service. Contrairement aux deux politiques de partitionnement (partiel et complet) la somme des seuils peut excéder la capacité globale du système. La référence [36] donne deux variantes de la politique à seuil. La première, dite "politique Limite Supérieure", n'accepte les connexions d'une classe donnée que si la quantité de ressource de cette classe de trafic n'excède pas un seuil donné. La seconde, dite "politique Minimale Garantie", quant à elle, réserve une quantité minimale de ressources pour chaque classe.

Les politiques d'admission décrites ci-dessus (politique partage complet et partage partiel) font partie de la famille des politiques dites à **coordonnées**

convexes. Cette famille est caractérisée par la solution sous **forme produit** des probabilités d'états stationnaires (le nombre de connexions dans le système) comme démontré par Kaufmann [87] et Roberts [124]. Cette expression simple du nombre de connexions dans le serveur permet de calculer aisément des paramètres de performance comme les probabilités de blocage. Ce fait sera utilisé dans les propositions de CAC faites au chapitre 4 de ce manuscrit. De plus, l'expression sous forme produit des probabilités des états stationnaires facilite le calcul des paramètres de dimensionnement tels que les seuils de partage ou la taille des partitions ...

Il existe d'autres politiques d'admission qui ne sont pas à coordonnées convexes. Elles donnent de meilleures performances en terme de taux de blocage, et un meilleur taux d'utilisation des ressources. La politique de réservation de ressources ou *trunk reservation* et sa variante *Virtual reservation* en sont les plus connues.

Trunk reservation

La politique de *trunk reservation* permet de favoriser les classes de trafic qui, en partage complet, affichent un fort taux de blocage. Pour ce faire, elle n'admet dans le système des connexions que si les ressources encore libres excèdent un seuil donné. Ce seuil est calculé pour chaque classe de trafic. Ainsi après l'admission une connexion de la classe k il reste au moins θ_k ressources dans le système.

Le choix des θ_k permettra de gérer les probabilités de blocage. Par exemple, le choix de θ_k tel que $\theta_k = C - b_{max}$, où b_{max} représente la valeur maximale de bande équivalente d'une connexion pour toutes les classes de trafic, permet, selon [123], d'attribuer à chaque classe de trafic un taux de blocage spécifique des connexions. Cette méthode, dite règle d'égalisation, permet ainsi d'obtenir une solution optimale¹.

Plusieurs études [74, 75, 88] ont démontré l'efficacité de la politique de Trunk Reservation.

Virtual reservation

La politique de Virtual Partitioning est une extension de celle de Trunk Reservation [102]. Ici deux seuils sont choisis : un seuil par classe de trafic et un seuil par groupe de classe. Ainsi une connexion est admise lorsque l'un ou l'autre des seuils n'est pas excédé ; et donc même lorsque le seuil de sa classe est excédé, une connexion peut être admise à condition que le seuil de son groupe ne soit pas dépassé.

1. On pourra se référer à la section 4.2.5 pour une démonstration de cette méthode.

3.3 CAC et variation de capacité

Les fonctions CAC, comme décrites dans les sections précédentes, considèrent la capacité du système comme constante et connue.

Dans notre contexte d'étude, l'utilisation de procédures de contre-mesure adaptatives conduit à une variation de la capacité offerte par le système (cf. chapitre 2). Ainsi de nouvelles problématiques s'ajoutent à celles déjà mentionnées pour la fonction CAC. En effet les fonctions CAC qui n'utiliseraient que l'information de la capacité courante du réseau comme seul critère pertinent pour la décision d'admission pourraient conduire, à chaque réduction de la capacité, à des pertes intolérables de connexions ; par conséquent à un repli significatif des critères de qualité de service, et un grand motif d'insatisfaction des utilisateurs du réseau de communication. Par ailleurs, l'objectif d'utilisation maximale de la capacité peut ne pas être atteinte si après refus des connexions à un instant donné, il survient une augmentation de la capacité du système.

Il vient donc que la fonction CAC ne doit plus juste prendre une décision d'admission mais elle doit aussi garantir aux connexions de se maintenir avec le même niveau de qualité pendant leur durée de vie tout en assurant un taux d'utilisation optimale de la capacité du système. En définitive la fonction CAC doit veiller sur plusieurs critères de performances.

3.3.1 Critères de performance

La fonction CAC, Contrôle d'Admission des Connexions, a pour but d'accepter ou de refuser l'établissement des connexions dans le réseau. Elle assure ainsi que les connexions admises se maintiennent durant leur durée de vie tout en respectant les garanties de qualité de service. La fonction CAC permet ainsi d'atteindre les objectifs de performance du réseau en protégeant à la fois le réseau et les applications de l'utilisateur.

La décision de la fonction CAC doit donc reposer sur la taxonomie décrite dans la section 3.2 couplée à des critères de performances spécifiés dans le contrat de service (SLA²) qui lie les utilisateurs du système au gestionnaire de ressources.

Une fonction CAC, tout comme toute autre fonction de gestion de ressources, est un moyen pour le gestionnaire de ressource de respecter ses engagements de qualité de service tels que spécifiés dans le SLA. Une fonction CAC s'assure que les connexions admises dans le réseau ont un trafic qui respecte les objectifs de QoS qui caractérisent le type de connexion ; et cela pendant toute la durée de la session ouverte. Cette contrainte est

2. Service Level Agreement : contrat qui regroupe les accords et les engagements de niveau service entre le fournisseur et les usagers. Il contient à la fois les paramètres de qualité liés au trafic, tels que le BER, CLR... [83] et les paramètres de qualité de service.

respectée, dans un système à capacité constante et connue, dès l'admission de la connexion. En effet, dans le cas classique de la capacité fixe, la capacité réservée pour la connexion est maintenue durant la durée de vie de la connexion. En revanche, dans le cadre d'un système utilisant des procédures de contre mesure dynamique, la capacité est fluctuante et donc la connexion admise peut être rejetée par la suite.

Ainsi un critère de performance pour une fonction CAC dans un système à capacité variable sera d'assurer un certain *taux d'abandon* de connexion. Ce taux doit être maintenu à un niveau assez bas, car les connexions coupées sont très mal perçues par les usagers.

En outre, une fonction CAC doit assurer un *taux d'utilisation* optimal de la ressource et un fort *taux d'acceptation* des connexions (ou de manière équivalente un faible *taux de blocage* des connexions) : le taux d'utilisation est lié aux revenus du gestionnaire qui doit partager la bande passante et le taux de blocage est lié aux critères de qualité de service du SLA.

Cependant, assurer un fort taux d'acceptation peut conduire à avoir un fort taux de rejet lorsque survient une baisse de la capacité du système. De plus, pour assurer un faible taux d'abandon, conforme aux critères de qualité, l'on peut être amené à utiliser des marges ; ce qui peut déboucher sur un faible taux d'utilisation de la capacité.

En définitive toute fonction CAC, dans un système à capacité variable, doit trouver un compromis entre la probabilité de blocage, le taux d'utilisation de la capacité et le taux d'abandon de connexions déjà admises [63, 132]. Il est à noter que si toutes les connexions ont les mêmes propriétés statistiques, alors les contraintes taux d'utilisation de la capacité et le taux de blocage des connexions sont identiques ; en effet si les connexions sont statistiquement identiques alors elles utilisent toutes la même proportion de capacité. Ainsi, bloquer l'une ou l'autre des connexions a la même répercussion sur la proportion d'utilisation de la capacité.

En fonction du critère de performance que l'on veut respecter en premier, plusieurs politiques CAC peuvent être définies. Deux exemples simples sont les CAC réactifs et préventifs.

3.3.2 CAC réactif ou CAC préventif

Une réduction de capacité du fait des affaiblissements atmosphériques peut affecter les connexions déjà en place. En fonction des possibilités de prédiction des instants d'atténuation et de la durée d'atténuation correspondante, ainsi que des critères de performance, il convient de définir deux types de CAC : un CAC *réactif* et un CAC *préventif*.

Un CAC *réactif*, réagit après coup : il pourra mettre fin à certaines connexions qui sont en cours pour en privilégier d'autres et cela en cas d'une réduction importante de la capacité. Il favorise alors le taux d'acceptation

des connexions. Un CAC *préventif*, quant à lui, peut refuser d'admettre certaines connexions lorsqu'il estime que des affaiblissements peuvent survenir sur le lien de communication. Ainsi, un CAC préventif privilégie un faible taux d'abandon des connexions.

Chacune de ces deux politiques a ses avantages et ses inconvénients que nous décrirons dans les paragraphes suivants.

3.3.2.1 CAC préventif

Un CAC préventif bloque les connexions à l'admission lorsqu'il estime que la capacité du système va baisser. Ainsi un CAC préventif conduit à avoir un fort taux de blocage, qui peut fortement croître si on permet plusieurs tentatives de connexion. Par ailleurs, du fait du fort taux de blocage des connexions, le CAC préventif entraîne un faible taux d'utilisation de la bande passante; car le CAC préventif agit comme si une marge était prise sur l'évaluation de la capacité.

A contrario, une politique de CAC préventif permet de réduire la frustration de voir couper une connexion en cours; et donc d'assurer un faible taux d'abandon des connexions. En général, le fait de couper une connexion en cours avant son terme est le plus souvent mal vécu, comparé au fait de bloquer la connexion à l'établissement [132]; et cela même si les deux actions enfreignent les critères de QoS spécifiés dans le SLA.

Un CAC préventif est utile lorsque des informations assez précises existent sur l'évolution de la capacité, ceci afin d'éviter de bloquer inutilement des connexions. Ainsi une fonction CAC préventive fonde sa décision d'admission à la fois sur les valeurs courante et future de la capacité. Les informations telles que l'instant de réduction, la valeur de réduction de la capacité, et même la durée de la réduction sont obligatoires pour définir un CAC préventif performant. Des exemples de CAC préventifs sont donnés par Siwko et Rubin [131, 132].

3.3.2.2 CAC réactif

Avec un CAC *réactif*, des connexions déjà admises peuvent être interrompues en cas de réduction de la capacité. Dans cette politique, le taux de blocage des connexions est privilégié et maintenu à une valeur faible. Ce type de CAC n'asseoit sa politique d'admission que sur l'état courant du système (valeur courante de la ressource libre, nombre courant de connexions admis...). Il est donc très utile lorsque des informations sur l'instant de la réduction ou sur la durée de cette réduction sont manquantes ou peu fiables. Un CAC réactif du fait de sa politique d'admission assure un meilleur taux d'utilisation de la ressource du système comparée au CAC préventif.

En contrepartie le taux d'abandon des connexions peut être très élevé (surtout si la variance de la capacité est grande). Un inconvénient majeur,

d'une telle politique de CAC, est le ressenti des usagers qui voient leur connexion, précédemment acceptée, coupée. La définition d'une politique de d'abandon des connexions qui permet d'atténuer le ressenti négatif des usagers s'impose. Par ailleurs, pour maintenir le taux d'abandon des connexions à un niveau acceptable, un CAC réactif peut être amené à définir un seuil pour le niveau d'utilisation de la capacité ; et donc à utiliser une politique d'admission de type *trunk reservation*.

3.3.3 Politique d'abandon

En général il semble moins approprié de couper une connexion déjà établie que de la refuser au moment de la requête. Néanmoins pour certaines commodités ou dans certains cas très critiques, il peut être envisagé de laisser tomber certaines connexions en cours. Par exemple avec un CAC réactif, une réduction de la capacité conduit à couper des connexions admises au préalable. Et même, avec un CAC préventif, on peut être amené à rejeter des connexions en cours en cas de forte dégradation de la capacité.

La politique d'abandon des connexions devient donc un attribut des fonctions CAC, lorsque la capacité du système est variable. Ainsi, à la taxonomie de la fonction CAC présentée à la section 3.2, l'on doit ajouter un quatrième attribut : la politique d'abandon. On aboutit donc à une taxonomie de la fonction CAC à quatre dimensions dans le cadre de systèmes de télécommunication à capacité variable.

Des exemples de politiques d'abandon de connexion sont définies dans les références [113, 132]. Nous donnons, dans les sous-sections suivantes, deux d'entre elles.

3.3.3.1 politique LCFD

Décrite dans [132], la politique LCFD³ consiste à abandonner les connexions dans l'ordre inverse de leur arrivée. C'est une stratégie de priorité chronologique pour l'abandon connexion. Dans un cadre de connexions homogènes (même catégorie de service, même capacité requise, même contrainte de qualité...) ce principe est naturel et équitable.

Dans un cadre de trafic hétérogène (différenciation des contraintes de qualité propres à chaque type de trafic), force est de constater que l'abandon des connexions n'est pas ressenti de la même manière, soit qu'elle soit de haute priorité, soit qu'elle soit de basse priorité. La politique LCFD risque donc de ne pas respecter les propriétés distinctives des connexions, et conduirait par conséquent à des performances non-optimales. Une variante est la LCFD-C ou LCFD par classe, définie ci-dessous.

3. LCFD (*Last Come First Drop*) Dernier Arrivé Premier Relâché

3.3.3.2 politique LCFD-C

Dans le LCFD-C (LFCD per Class) les connexions sont rangées par classe de trafic, par ordre croissant de priorité. On applique alors la politique LCFD en remontant dans les niveaux de classe. On arrête dès que la capacité du système peut prendre en charge les connexions restantes.

3.4 Conclusion

Les attributs des fonctions CAC ont été présentés dans ce chapitre. Il a été souligné que la finesse et la robustesse d'une fonction CAC classique dépendait de la définition de trois paramètres : les descripteurs de trafic, la politique d'estimation de ressource et la politique de décision d'admission. A ces attributs se greffe une politique d'abandon de connexion lorsque la capacité du système est variable ; ce qui est le cas lorsque des procédures de contre-mesure adaptative des atténuations (FMT) sont utilisées au niveau de la couche physique.

Ainsi, au-delà de la définition classique d'une fonction CAC en charge d'accepter ou de refuser l'établissement des connexions dans le système, il vient qu'une fonction CAC se doit aussi d'assurer que les connexions déjà admises se maintiennent pendant leur durée de vie avec les mêmes critères de qualité négociés à l'établissement de la connexion. Autrement ses performances s'en trouveraient diminuées et le contrat de qualité de service qui lierait le gestionnaire du réseau aux utilisateurs deviendrait caduc.

Le chapitre suivant présentera deux exemples de tels CAC, définis dans un contexte de liaisons physiques adaptatives.

Chapitre 4

Vers un CAC adaptatif : un premier pas...

4.1	Présentation du problème	64
4.1.1	Système de référence	64
4.1.2	Problématique.	65
4.1.3	Hypothèses	66
4.2	Etude de la politique pessimiste	70
4.2.1	Présentation	70
4.2.2	Cas 1 : Porteuses bien dimensionnées	72
4.2.3	Cas 2 : Porteuses mal dimensionnées	74
4.2.4	Analyse des résultats	76
4.2.5	Amélioration de l'équité entre les connexions	82
4.3	Etude de la politique optimiste	83
4.3.1	Présentation	83
4.3.2	Cas du Bin Packing.	84
4.3.3	Cas MF-TDMA pur	88
4.3.4	Analyse des résultats	90
4.3.5	Etude dans un cas de grande taille	91
4.3.6	Avec ou Sans déclassement ?	94
4.4	Conclusion	96

La relation étroite qui peut exister entre la vitesse de variation de la capacité et la durée des connexions à admettre dans le système est étudiée dans ce chapitre. En effet, en fonction de la variabilité de la capacité, deux exemples de fonction CAC adaptative sont établies : lorsque la variation de la capacité est rapide par rapport à la durée des connexions et lorsque la capacité du système reste assez stable pendant la durée des connexions. Dans le premier cas, nous définissons un CAC dit pessimiste et dans le second cas, un CAC dit optimiste.

4.1 Présentation du problème

On considère un système de voie retour dans un réseau de communication par satellite où les terminaux, pour remonter des informations, doivent partager un support de communication. On se place dans un contexte de réseau DVB-RCS [48] pour lequel le fonctionnement repose sur un mode connecté et une technique d'accès de type MF-TDMA¹. On se propose de définir une méthode d'acceptation des connexions dans le réseau fondée sur la répartition des ressources entre les utilisateurs.

4.1.1 Système de référence

Le système de communication de référence est un réseau de communication bidirectionnelle par satellite géostationnaire où des services Internet sont fournis aux usagers, comme décrit sur la figure 4.1. Dans ce système un nombre d'usagers, individuels ou collectifs, sont connectés au réseau Internet par le biais d'une passerelle, Gateway/NCC - *Network Control Center* qui est liée de manière bidirectionnelle à un satellite géostationnaire. Cette passerelle est rattachée à des fournisseurs de services Internet, ou plus globalement au réseau Internet. Dans toute la suite de ce chapitre, le terme NCC vaudra nom pour la passerelle.

Les caractéristiques radio du système sont calquées sur celles du DVB-RCS (accès FDM/TDM sur la voie aller et MF-TDMA sur la voie retour). Ainsi les terminaux voulant remonter des informations vers le NCC doivent partager le support de communication.

Dans ce contexte, les décisions d'allocation de ressource sont prises au niveau du NCC qui contient les fonctions de gestion de ressource. Les utilisateurs seront donc placés par le NCC sur les fréquences porteuses et se verront attribuer un certain nombre de créneaux ou slots. Nous ferons le choix que chaque slot pourra contenir exactement un² paquet utilisateur, soit dans le contexte évoqué une cellule ATM. Cette allocation est effectuée

1. Voir l'annexe A pour plus de détails sur les systèmes DVB

2. Selon le standard DVB-RCS, chaque slot MF-TDMA pourra contenir 4, 2 ou 1 paquet de données. Le choix d'un seul paquet par slot est fait pour simplifier les calculs.

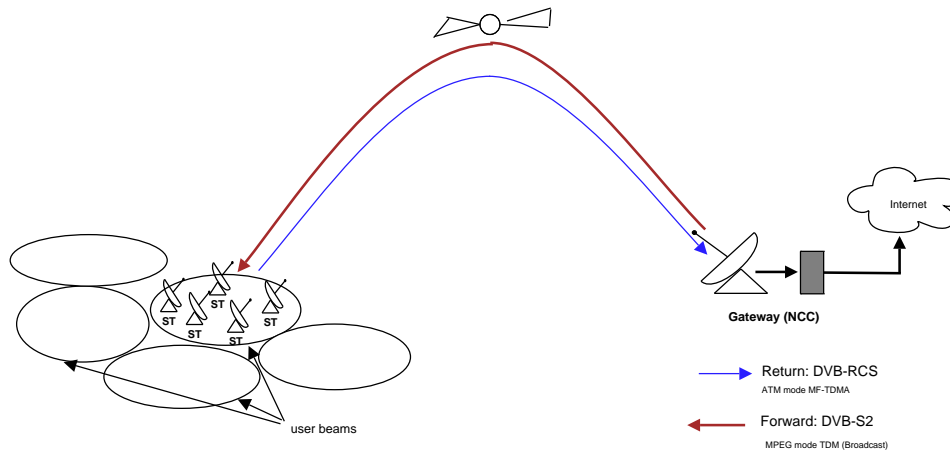


Figure 4.1 Schéma d'ensemble d'un système DVB-RCS

de manière dynamique par la fonction DAMA située au dessus du partage MF-TDMA.

Des procédures de contre-mesure (FMT) sont implantées au niveau de la couche physique. Dans le contexte DVB-RCS, seule la combinaison modulation QPSK associée à plusieurs taux de codage (7 de 1/3 à 6/7) est utilisée comme procédure de contre-mesure dynamique (FMT). Mais, en prévision de l'évolution des applications vers le multimédia, et donc la nécessité d'avoir une plus large gamme d'efficacité spectrale, nous pouvons supposer l'existence d'autres types de modulation, comme la BPSK et la 8PSK.

4.1.2 Problématique

Le système DVB-RCS est un système dont le but est de garantir un niveau de qualité de service (QoS) différencié en fonction des besoins applicatifs des utilisateurs. Ce principe s'inspire largement de la technique ATM [61] tant pour la caractérisation des flux de trafic que pour leur classification. La garantie de la QoS s'opère essentiellement en deux temps en utilisant un mode connecté, le seul véritablement à même de garantir un certain niveau de qualité de service aux utilisateurs. Dans un premier temps, le terminal utilisateur émet une demande de connexion qui comporte le type de service désiré par l'utilisateur et le niveau de qualité de service associé. Au vu des paramètres de la demande de connexion et de l'état du système le NCC, au travers de la fonction CAC, acceptera ou refusera la connexion. Ensuite au fur et à mesure de la connexion, les ressources seront allouées à l'utilisateur par le protocole DAMA au niveau de la couche MAC.

Pour les trafics qui n'ont pas de contrainte temporelle forte, l'allocation des ressources s'effectue au fur et à mesure de la communication en fonction des besoins sur une base de requêtes/allocation. Cette mécanique présente

un temps de réaction trop lent, en particulier dans un contexte satellite, où le délai de propagation peut valoir la moitié d'une seconde, pour pouvoir être appliqué aux trafics ayant des contraintes temporelles fortes. Pour ces derniers, les problèmes d'allocation de ressources doivent être traités, pour la plupart, au moment de l'établissement de la connexion. Nous allons donc nous intéresser à des fonctions d'admission de connexions (CAC) visant à garantir des ressources aux utilisateurs dès la mise en place de la connexion. Dans le présent problème, nous allons essentiellement nous intéresser à la fonction CAC tout en restant convaincu du lien fort entre les fonctions CAC et DAMA.

Dans le cadre des réseaux terrestres classiques, ce problème a déjà été largement traité en particulier dans le contexte ATM [40,44,116,129] qui est largement à la base des solutions implantées dans les systèmes plus récents. La problématique est alors de déterminer combien de ressources doivent être allouées aux différentes connexions ainsi qu'une politique d'admission de connexion qui garantisse à la fois un niveau de qualité de service raisonnable au niveau connexion ainsi qu'au niveau paquet dans la mesure où les réseaux considérés sont de type paquet.

L'on ne s'intéresse pas à la signalisation nécessaire pour mettre en place les connexions qui sont véhiculées par les trames, ni à la durée de cette mise en place. De même, on ne s'intéressera pas à l'attribution précise des slots aux utilisateurs.

4.1.3 Hypothèses

4.1.3.1 Configuration système

Le NCC est supposé avoir une vision globale du réseau pour la gestion de ressource. Ainsi supervise-t-il la politique d'admission des connexions et l'allocation des modes FMT pour la transmission des terminaux. Pour ce faire, les terminaux remontent, vers le NCC, à la fois les requêtes de connexions et les informations de mesure de qualité du signal. Ces dernières permettent au contrôleur FMT situé au niveau du NCC de déterminer le mode de transmission le plus adapté à l'utilisateur. Au fur et à mesure du déroulement de la communication et des évolutions du canal de transmission, le contrôleur FMT pourra décider de faire évoluer le mode FMT d'un utilisateur.

Au niveau de la trame MF-TDMA, l'hypothèse d'une trame variable porteuse par porteuse, comme décrite à la section 2.3.1.2, est faite. Ainsi une porteuse donnée dans une trame ne comportera-t-elle qu'un seul mode FMT. Une porteuse sera donc déterminée par le mode FMT qui lui est attribué.

Les porteuses, quelque soit le mode FMT, sont supposées avoir la même bande passante³ ; cela se traduira par un nombre de slots variable en fonction

3. Nous reviendrons sur cette hypothèse dans la fin de ce chapitre. En effet, dans les

du mode FMT choisi. En effet, en passant d'un mode à un autre plus robuste, l'on rajoute des bits de redondance supplémentaires, ce qui a pour effet, lorsque l'on veut offrir le même débit d'information, de diminuer le nombre de slots par porteuse. Les trames MF-TDMA seront donc toujours formées par le même nombre de porteuses.

On considérera par la suite que le système est composé de N porteuses et qu'il y a K modes FMT possibles. A un instant t donné, on aura $p_i(t)$ porteuses de type i , $1 \leq i \leq K$, chacune contenant C_i slots. Par conséquent la capacité du système, exprimée en nombres de slots, est donnée par l'équation (4.1) :

$$C(t) = \sum_{i=1}^K p_i(t) * C_i \quad (4.1)$$

La répartition des porteuses dans la structure de trame MF-TDMA varie en fonction des atténuations et des besoins en capacité des utilisateurs du système. Il vient donc que le système peut être reconfiguré tant au niveau de la répartition des utilisateurs sur les porteuses qu'au niveau de l'attribution des slots et de l'association des modes FMT à la fois aux porteuses et aux usagers.

4.1.3.2 Variation de capacité et politique d'admission

La contrainte qui s'ajoute dans cette étude aux problèmes classiquement posés par les fonctions CAC dans les réseaux filaires provient de la variabilité potentielle du canal de transmission. En effet au cours de la communication, l'utilisateur pourra être amené à changer de mode FMT et donc de porteuses en fonction de son niveau d'atténuation. Ainsi le système pourra reconfigurer la distribution des porteuses de chaque type dans la trame ; ce qui résulte en une variation de la capacité globale du système.

Deux cas de figure sont considérés dans cette étude quant à la variation de la capacité.

Dans le premier cas, la qualité du canal est supposée varier lentement par rapport à la durée des connexions. Dans ce cas de figure plutôt favorable pour mettre en œuvre une connexion, il faudra simplement regarder le mode FMT le plus approprié à l'établissement de la connexion pour accepter ou refuser la connexion : c'est la politique dite *optimiste*.

Dans le second cas, la qualité du canal peut éventuellement varier rapidement par rapport à la durée des connexions. Ainsi toute connexion pendant sa durée de vie peut potentiellement être amenée à utiliser le mode FMT le plus robuste : une politique d'acceptation *pessimiste* est alors établie. Dans un premier temps, celle-ci se fonde sur le mode FMT le plus robuste pour

systèmes réels, du fait de l'adaptation du débit (voir section 2.1.3.2) les bandes passantes sont variables. Le plus souvent, les bandes passantes attribuées aux différents modes FMT sont multiples les unes des autres.

l'ensemble des connexions en cours. Dans un second temps, en s'appuyant sur un cas réel où la qualité du support perçue par les terminaux chutent d'environ deux niveaux de mode FMT dans les conditions de propagation très défavorables, la politique pessimiste consistera à considérer non pas les conditions du support à l'initialisation de la connexion mais le mode FMT le plus robuste pouvant affecter chaque terminal émettant la demande de connexion. La trame MF-TDMA sera ainsi formée de ces modes les plus robustes. Cette méthode est étayée par la remarque suivante : le mode FMT optimal est obtenu en fonction de la qualité du canal ressentie par le terminal ; ce dernier pourra toutefois, si le NCC le juge nécessaire, utiliser un mode FMT différent. La politique pessimiste constitue donc une méthode pire cas.

4.1.3.3 Caractéristiques du trafic

La taxonomie présentée dans le chapitre précédent a montré que les performances de la fonction CAC sont influencées par la modélisation du trafic : pour chaque modèle de trafic [83,96,108], il existe un CAC idéal fondé sur les propriétés de cette modélisation. Les références [33,34] donnent des exemples de CAC pour des modèles précis de trafic. Le document [31] présente, quant à lui, des modèles de trafics, temps réel et non temps réel, utilisés comme entrée d'une procédure de gestion de ressource. Par conséquent, afin de donner une réponse assez large et qui conviendrait dans la plupart des cas, une modélisation simple, efficace et classique du trafic doit être adoptée.

Dans le système DVB-RCS, deux grandes familles de trafic répondant à des contraintes sur leur QoS sont données : Les trafics à débit constant et les trafics à débit variable mais avec garantie de débit. Cependant, on regroupera les flux de trafic (indifférenciés à débit constant ou variable) par débit équivalent : On suppose qu'il existe M classes ou types de trafic ; chaque connexion d'un type i , $1 \leq i \leq M$, donné nécessitera b_i slots par trame MF-TDMA.

Les hypothèses suivantes sont faites :

- Les demandes de connexion de type i constituent un processus de Poisson de taux λ_i
- Les durées des connexions de type i suivent une loi exponentielle de taux μ_i
- A l'instant t il existe $n_i(t)$ connexions de la classe i .

On note $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ la charge en nombre de connexions de la classe i et $\rho_i b_i$ la charge en nombre de slots requis par la classe i ⁴.

4. La charge normalisée est, quant à elle, plus difficile à définir dans la mesure où selon la configuration des porteuses, on n'aura pas le même nombre de slots globalement disponibles par trame.

4.1.3.4 Allocation de la ressource

Le présent travail comporte deux grandes parties.

Dans la première partie, nous avons essayé de comprendre les mécanismes potentiellement mis en jeu sur un système qui sera de petite taille. Les contraintes posées par le système qui est de type MF-TDMA est que le nombre de terminaux est assez grand ; qu'un terminal peut gérer de nombreuses connexions mais qu'en revanche, les ressources qui peuvent lui être attribuées ne correspondent qu'à un seul mode FMT. De la même manière, un utilisateur ne peut pas émettre sur plusieurs fréquences porteuses à la fois.

Dans le présent problème, comme assez classiquement, on ne va pas considérer les terminaux utilisateurs isolément mais se placer à une échelle plus générale où le système doit satisfaire des demandes de connexion nécessitant un certain débit garanti.

Dans le cas de ces porteuses de très petites tailles, deux cas de figure sont considérés pour essayer d'appréhender l'allocation des ressources à une connexion. Dans l'une, on n'alloue des ressources à une connexion que sur une seule fréquence porteuse (on tente d'appréhender ici les informations perdues lors de la modélisation des connexions et non pas des terminaux) et dans l'autre on suppose qu'il y a très peu de connexions par terminaux et que on peut affecter indifféremment les ressources d'un même type de porteuses à un utilisateur donné. Cette dernière sera dénommée "MF-TDMA pur" dans la suite de ce manuscrit.

Dans un deuxième temps, nous prendrons des exemples de plus grande taille inspirés de scénarios plus réalistes. Dans ce cas de figure, les porteuses pouvant comporter des centaines ou des milliers de slots, on laissera le soin au DAMA de réaliser la mise en correspondance avec les slots réellement alloués et l'on fera l'hypothèse simple qu'une connexion pourra être placée sur des fréquences porteuses différentes, avec la contrainte toutefois que des slots alloués sur des porteuses différentes ne coïncident pas dans le temps.

La répartition de ressource présentée dans la suite de ce document ne sert qu'à l'admission des connexions. En effet, elle n'est donnée qu'à titre indicatif ; la fonction DAMA pourra soit se calquer sur la politique décrite ou toute autre politique de calcul et d'estimation de ressource. Un exemple de DAMA dans des systèmes à capacité variable est donné par Petraki et al [115].

4.2 Etude de la politique pessimiste

4.2.1 Présentation

Dans le cadre de la politique pessimiste, la capacité du système est supposée varier fortement sur des périodes de temps assez faibles comparées aux durées des connexions. Ainsi potentiellement, toute connexion, pendant sa durée de vie, peut se voir allouer, par le contrôleur FMT, le mode FMT le plus robuste.

On peut dès lors supposer pour la fonction CAC que toutes les porteuses se voient assigner le mode le plus robuste afin de parer au pire cas de propagation qui peut survenir. On a donc un seul type de porteuse comportant s slots dans la structure MF-TDMA. La capacité du système en nombre de slots vaut donc $C = N * s$ où N est le nombre de porteuses dans la trame MF-TDMA. Une politique d'admission de type *complete sharing*, où une connexion est admise tant qu'il y a des ressources à hauteur de ses besoins, peut donc être envisagée. La politique d'acceptation des connexions se pose alors en ces termes :

“existe-t-il une répartition de l'ensemble des connexions déjà en cours plus la nouvelle connexion qui se présente sur l'ensemble des porteuses disponibles ?”

On peut remarquer que si les nombres de slots, b_i , nécessaires par connexion sont des multiples les uns des autres et que le nombre de slots par porteuse est lui-même un multiple de ces quantités alors on n'a pas à placer les utilisateurs sur les porteuses. La question perd également de son sens dans le cas où l'on suppose que l'on peut placer les slots attribués à une connexion sur n'importe laquelle des porteuses sans se préoccuper des terminaux émettant les requêtes (voir la section 4.2.1.1 pour une illustration) . Par ailleurs, si l'on dispose d'un grand nombre de slots par porteuse, grand par rapport aux besoins des connexions, on pourra sans perte de beaucoup de généralité se replacer dans ce cas de figure.

Sinon, il s'agit alors réellement de regarder si l'on sait placer les connexions sur les porteuses.

On considère qu'à l'instant d'arrivée de la nouvelle connexion, on est dans un état où l'on a n_i connexions de type i . Pour chacune d'entre elles, il y a b_i slots réservés. On note $n = (n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_M)$ le vecteur des connexions admises et $n_i^+ = (n_1, n_2, \dots, n_i + 1, \dots, n_M)$ l'état lorsque une nouvelle connexion de type i arrive. Il faut donc voir si toutes ces connexions pourront être placées sur les N porteuses.

La configuration qui sera adoptée ici ne sera pas la solution réellement utilisée par le DAMA, les utilisateurs pouvant être placés sur des porteuses

comportant plus de slots. C'est juste une solution qui peut être mise en œuvre si les conditions de propagation se détérioraient pour tous les utilisateurs simultanément.

Le problème auquel on est alors confronté est un problème de **bin packing**. Ce problème fort connu dans le domaine de la recherche opérationnelle peut se formuler de la manière suivante :

Disposant de boîtes de taille 1 (taille normalisée), l'on veut faire rentrer des pièces de taille t_i , $0 \leq t_i \leq 1$, dans ces boîtes. Le problème est unidimensionnel. On veut minimiser le nombre de boîtes nécessaires pour faire rentrer toutes les pièces.

Dans notre cas, il faut calculer le nombre de porteuses nécessaires pour faire rentrer toutes les connexions y compris la nouvelle connexion. Si ce nombre est inférieur ou égal au nombre total de porteuses, la connexion sera acceptée, sinon elle sera refusée.

Ce problème de *bin packing* est un problème NP-dur. On ne dispose donc que de solutions heuristiques pour le résoudre. Dans ce contexte, la solution la plus adaptée, le plus souvent, est la solution dite **best fit descending** [82]. Elle consiste à trier les connexions par taille (nombre de slots nécessaires) décroissante et à les placer au fur et à mesure. De la même façon, on range les porteuses par nombre de slots disponibles croissants. On cherche alors à placer les connexions sur les différentes porteuses déjà partiellement occupées en tâchant de terminer de compléter les porteuses déjà les plus sollicitées afin de minimiser la place perdue. Si aucune des porteuses déjà utilisées ne suffit pour mettre une connexion, on prend une nouvelle porteuse. Nous n'avons retenu que cette variante : les solutions de type *First Fit*, où la première place disponible est utilisée ou *Best Fit* en sont d'autres variantes.

4.2.1.1 Illustration de la politique Best Fit Descending

La porteuse la plus robuste est supposée avoir 10 slots. Soit deux classes de trafic nécessitant 2 slots (type 1) ou 4 slots (type 2) ; la classe 1 requiert 4 connexions et la classe 2, 2 connexions. 16 ($= 4 * 2 + 2 * 4$) slots sont alors requis au total.

Si l'on ne se préoccupe pas de la répartition des connexions sur les porteuses comme évoqué précédemment, juste $\lceil \frac{16}{10} \rceil = 2$ porteuses sont nécessaires.

Cela correspond bien au résultat de l'algorithme *best fit descending* de bin packing envisagé qui placera les deux connexions nécessitant 4 slots sur la première porteuse y ajoutera une connexion de type 1 puis placera les trois autres connexions de type 1 sur une deuxième porteuse (comme illustré sur la configuration 1 de la figure 4.2)

En revanche, dans la même configuration de porteuses mais avec des connexions de type 1 nécessitant, cette fois, 3 slots, la solution n'est plus

optimale. En effet, il suffirait de placer une connexion de type 2 et deux connexions de type 1 sur chaque porteuse comme sur la configuration 3 de la figure 4.2 ; deux porteuses suffiraient donc. Le *best fit descending*, quant à lui, nécessite 3 porteuses : il commencera par placer les deux connexions de type 2 sur la première porteuse ; puis aucune connexion de type 1 ne pouvant alors y être ajouté (il ne reste que deux slots), 2 porteuses supplémentaires seront utilisées pour les autres connexions. La configuration 2 de la figure 4.2 illustre ce fait.

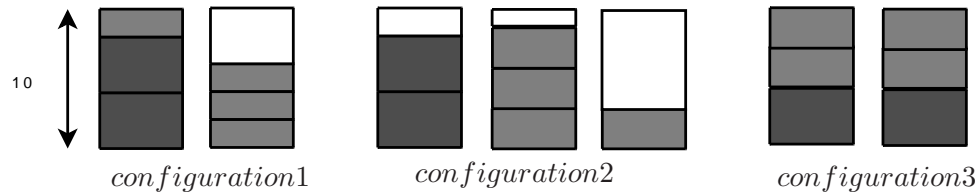


Figure 4.2 Illustration de l'algorithme best fit descending

On va maintenant vérifier que si les demandes des connexions sont toutes multiples les unes des autres et que le nombre de slots sur les porteuses sont encore un multiple du plus grand de ces nombres, la solution bin packing *best fit descending* est toujours optimale.

Prenons le cas où l'on a 4 types de connexions nécessitant 1, 2, 4 ou 8 slots et des porteuses comportant 16 slots (on pourrait prendre 8). On commence par remplir des porteuses avec les connexions nécessitant le plus de slots. Il n'y a aucune place perdue sauf sur la dernière porteuse dans le cas des porteuses de 16 slots (et rigoureusement aucune dans le cas des porteuses de 8 slots). On prend alors les connexions qui ont besoin de 4 slots. On commence par terminer de remplir la porteuse laissée partiellement libre. On n'y laisse potentiellement aucune place libre. On remplit alors autant de porteuses que nécessaire en ne laissant de place que sur la dernière porteuse. En itérant la méthode, on obtient bien un remplissage parfait des porteuses sauf de la dernière éventuellement.

4.2.2 Cas 1 : Porteuses bien dimensionnées

Le terme *porteuses bien dimensionnées* fait référence au cas de figure où le nombre de slots dans la porteuse la plus robuste est proportionnelle au nombre de slots requis par connexion. Dans ce cas, comme illustré dans la section précédente, une politique d'admission de type *complete sharing* sans se soucier de la répartition réelle des slots dans la structure MF-TDMA est suffisante. Ainsi lorsque qu'une connexion de b_k slots arrive, l'algorithme suivant est appliqué :

Si (slots_occupés + $b_k \leq C$) **Alors** la connexion est acceptée
Sinon elle est refusée

La solution de l'étude mathématique de ce cas va conduire à un résultat étonnamment simple qui servira de référence en particulier dans le cas de problèmes de grande taille.

4.2.2.1 Politique d'admission et espace d'état

Dans la terminologie des files d'attente, ce problème a été étudié comme étant une file M/M/C/C multiclasse (arrivées Poissonniennes, services exponentielles, C ressources, pas d'attente). Le caractère multiclasse provient des différents types de connexion. Une connexion nécessite plusieurs ressources pour être acceptée qu'elle relâchera simultanément lorsqu'elle se terminera.

Les résultats qui suivent sont rappelés pour servir de base pour la suite des calculs.

Soit $n(t) = (n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_M)$ le vecteur des connexions à l'instant t . ($n(t)$, $t \geq 0$) constitue une chaîne de Markov à temps continu dans la mesure où les arrivées sont poissonniennes, les durées des connexions sont exponentielles et que la politique d'acceptation des connexions est très simple. L'espace d'états, Ω , est simplement de la forme (équation (4.2)) :

$$\Omega = \left\{ n = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_M) / n_i \geq 0, \sum_{i=1}^M n_i b_i \leq C \right\} \quad (4.2)$$

Dans ce cas, sous les hypothèses faites, la distribution limite stationnaire est à **forme produit** (équation (4.3))

$$\pi_n = G \prod_{i=1}^M \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (4.3)$$

où $G = (\sum_{n \in \Omega} \pi_n)^{-1}$ est une constante de normalisation.

Force est de constater que les termes relatifs à la classe i sont les mêmes que ceux d'une file M/M/C/C. La démonstration [87, 124] de cette solution rappelée en annexe (section B.1) ressemble en tout point aux démonstrations des théorèmes de Jackson ou de Gordon et Newell [89]. Par ailleurs, ces auteurs font les remarques suivantes :

1. **P1** : La solution à forme produit (equation (4.3)) reste valable pour toute politique d'acceptation *convexe*. Une politique d'acceptation sera dite convexe si, dans un état donné, une connexion de type i se termine, elle peut être remplacée par une connexion du même type. En gros cela se traduit par le fait que s'il y a un taux de transition non nul entre n et n_i^+ , il en est de même entre n_i^+ et n . Ici $n_i^+ = (n_1, n_2, \dots, n_i + 1, \dots, n_M)$

correspond au cas où une connexion de type i arrive lorsque le système est dans l'état n .

2. **P2** : La solution reste valable pour toute distribution de la durée des connexions. On peut relâcher la contrainte de durée exponentielle du moment que la durée moyenne reste finie. Pour ce faire, on s'appuie sur les propriétés de réversibilité de Burke [24].

La propriété P1 sera utilisée dans la suite. La propriété P2, très intéressante, a fait en partie le succès des fameuses formules d'Erlang.

4.2.2.2 Critères de performances

Les performances de la politique CAC seront déterminées au travers des *probabilités de blocage* des connexions.

Soit B_i la probabilité de blocage de la classe i , il vient simplement que :

$$B_i = \sum_{n \in \Omega} \pi_n \mathbf{1}_{\{n_i^+ \neq \Omega\}} \quad (4.4)$$

Soit q_j la probabilité marginale que j ressources soient occupées. Il vient donc que :

$$B_i = \sum_{j=C-b_i+1}^C q_j \quad (4.5)$$

La difficulté essentielle dans ce genre de cas provient de la taille de l'espace d'état et donc de la détermination de la constante de normalisation. On peut alors avoir recours à la méthode brutale qui revient sensiblement à faire des produits de convolution. Cependant, **la méthode dite de Kaufman-Roberts** permet de déterminer les q_j de manière itérative et donc de réduire les calculs. On démontre en effet (voir l'annexe B.2) dans le cas de la politique Complete Sharing que :

$$q_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^M b_i \rho_i q_{j-b_i} \quad (4.6)$$

4.2.3 Cas 2 : Porteuses mal dimensionnées

Le terme *porteuses mal dimensionnées* fait référence à la configuration où la taille des porteuses n'est plus multiple des nombres de slots nécessaires par connexion. L'étude précédente va toutefois nous servir largement pour mettre en œuvre un modèle analytique exact.

Dans le cas présent, l'objectif pour l'admission des connexions est de s'assurer que l'on saurait placer ces connexions sur les différentes porteuses et non de les placer effectivement. En effet, les porteuses sont reconfigurables à

l'échelle de temps des trames de la couche physique, ce qui correspond précisément à la granularité nécessaire pour réaliser les acceptations potentielles de connexion. On dissocie donc bien dans le présent problème la fonction CAC de la fonction DAMA qui elle s'occupe réellement de l'allocation des ressources aux connexions.

Pour l'admission, une fonction de *bin packing*, BP , qui calcule pour un état du système le nombre minimal de porteuses nécessaires pour placer les différentes connexions est utilisée. Cette fonction n'est utile qu'à l'arrivée des nouvelles connexions pour la fonction CAC et ne gère absolument pas l'état courant de la configuration comme indiqué précédemment. Le vecteur n étant l'état courant du système, une connexion de type i sera acceptée si l'état futur $n_i^+ = (n_1, n_2, \dots, n_i + 1, \dots, n_M)$ vérifie l'équation (4.7) :

$$BP(n_i^+) \leq N \quad (4.7)$$

où N est le nombre de porteuses dans chaque trame MF-TDMA. L'algorithme d'admission s'écrit donc comme suit :

Si (nbre_porteuses_nécessaires $\leq N$) **Alors** la connexion est acceptée
Sinon elle est refusée

4.2.3.1 Politique d'admission et espace d'état

Ici encore le vecteur $(n(t), t \geq 0)$ constitue une chaîne de Markov à temps continu. En effet, la seule connaissance de l'état courant du système suffit à prévoir :

- Les fins de connexion entre t et $t + dt$; les durées de connexion étant exponentielles ;
- Les arrivées de nouvelles connexions ; les arrivées étant poissonniennes pour chaque classe de trafic ;
- Les acceptations de ces connexions.

Avec les notations précédentes, l'espace d'état, Ω est donnée par l'équation (4.8)

$$\Omega = \{n = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_M) / n_i \geq 0, BP(n) \leq N\} \quad (4.8)$$

La politique d'acceptation reste encore convexe et, par conséquent en utilisant la propriété (P1), la solution à *forme produit* (équation (4.3)) est conservée.

4.2.3.2 Critères de performances

Les performances s'évaluent encore ici, par le biais des *probabilités de blocage* des connexions. Sa valeur est identique à celle exprimée à l'équation (4.4).

Malheureusement on perd, ici, l'élégance de la méthode de Kaufman-Roberts. Il faut donc de façon itérative déterminer l'ensemble des états de l'espace d'états, en déterminant s'ils satisfont la condition évoquée dans l'équation (4.8) et sommer leurs probabilités. Pour chacun des états ainsi construits, il faudra regarder pour chacune des classes de débit si la condition de l'équation (4.7) est remplie. Sinon, on ajoute la probabilité de l'état à la probabilité de blocage de la classe i considérée.

D'un point de vue algorithmique, on rappelle que les calculs des factorielles sont délicates et que l'on préférera calculer de façon itérative et tabuler les quantités $\pi_i = \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!}$.

4.2.4 Analyse des résultats

Deux familles de résultats sont données dans cette section. Dans la première, les problèmes de performances potentiellement posés par les mécanismes de *bin packing* et la perte de ressource en raison des slots résiduels sur les porteuses potentiellement morcelés sont mis en évidence. La seconde concerne une étude avec des valeurs de simulations correspondant à un cas de système réel.

4.2.4.1 Premier scénario

Description du modèle

Devant la grande diversité des trafics possibles, 4 classes de trafic nécessitant des débits, respectivement, de 1, 2, 4 ou 8 slots par trame sont considérés. L'analyse de plusieurs scénarios de trafic conduit à prendre des connexions d'une durée moyenne $\mu_i^{-1} = 5$ minutes.

La deuxième caractérisation des trafics porte sur les débits d'arrivée des différents types de connexion. Pour pouvoir effectuer des comparaisons sur l'impact de ces répartitions de trafic, la notion de charge normalisée est prise en compte; elle se traduit par l'équation (4.9).

$$\rho_n = \frac{\sum_{i=1}^M \rho_i b_i}{N_s} \quad (4.9)$$

Deux types de répartition sont à considérer :

- Dans le premier, tous les ρ_i sont identiques; cela traduit que le débit d'arrivée des connexions est identique pour toutes les classes de trafic. Ainsi

$$\rho_i = \frac{\rho_n N_s}{\sum_{i=1}^M b_i} \quad (\text{variante I}) \quad (4.10)$$

- Dans le deuxième, les $\rho_i b_i$ sont identiques; ce qui veut dire que la contribution à la charge normalisée est identique pour tous les types de trafic. Par conséquent en terme de débit, le débit d'arrivée des

4 classes de trafic	Nom des classes	slots/ trame (b_i)
	C1	1
	C2	2
	C3	4
	C4	8
μ_i^{-1}	5 minutes	
C=120 slots	Nb porteuses (N)	s
	15	8 (porteuse P8)
	12	10 (porteuse P10)
	10	12 (porteuse P12)

Table 4.1 Paramètres d'évaluation pour le scénario 1

connexions est inversement proportionnel au nombre de ressources dont elles ont besoin. La charge de chaque classe est ainsi donnée par :

$$\rho_i = \frac{\rho_n N s}{M b_i} \quad (\text{variante II}) \quad (4.11)$$

La taille du système est choisie de sorte à avoir $C = 120$ slots en tout. Trois configurations sont choisies ; dans chacune la porteuse la plus robuste a respectivement 8, 10 et 12 slots. Le nombre de porteuses dans la trame s'en déduit donc : 15, 12 et 10.

La configuration dans laquelle $s = 8$ slots par porteuse correspond au cas où le *bin packing* est optimal et où la solution *complete sharing* est utilisable.

Ce scénario, dans chacune des deux variantes, est évalué par la présentation du taux de blocage obtenu en fonction de la charge normalisée pour chacun des types de trafic et pour chaque taille de porteuses. Le tableau 4.1 résume le choix des paramètres pour la simulation.

Analyse de la variante I

Ici, toutes les classes de trafics ont le même débit d'arrivée des connexions. Ainsi en terme de charge normalisée, les classes de trafic correspondant au nombre de slots les plus élevés sont prépondérantes.

Les courbes de la figure 4.3, obtenues par l'étude théorique, montrent que plus une classe nécessite de slots, plus elle sera pénalisée dans le cas de la méthode proposée ici. Ce phénomène, qui apparaît clairement dans le cas du Complete Sharing avec des porteuses bien dimensionnées (porteuse à 8 slots, courbe (c)), est plus accentué avec les porteuses moins bien dimensionnées (courbes (a) et (b)) pour lesquelles les porteuses sont mal utilisées par les connexions nécessitant un plus fort débit. Ce résultat est bien évidemment connu, depuis fort longtemps, dans le domaine des réseaux multiservices.

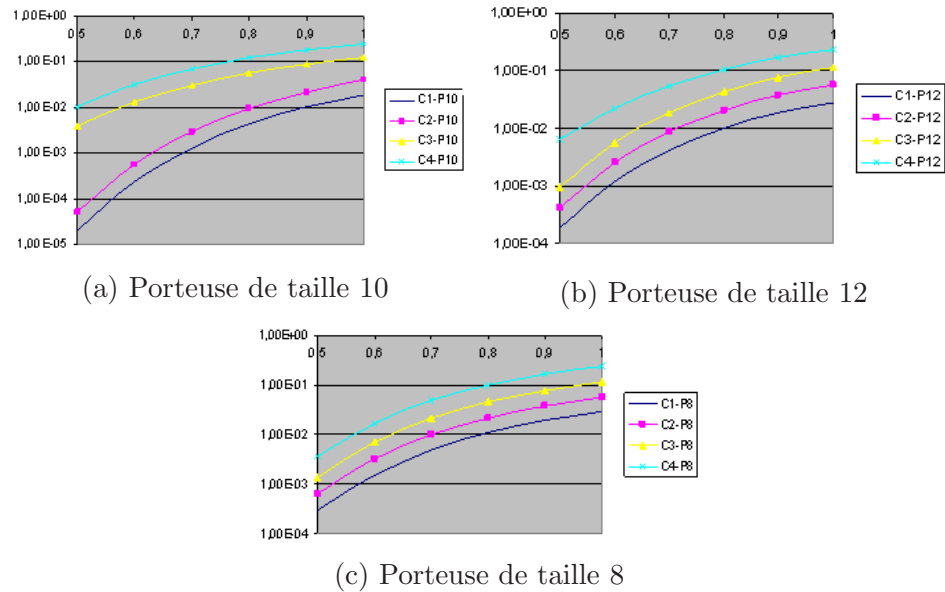


Figure 4.3 Probabilité de blocage (théorique) des différentes classes de trafic en fonction de la charge normalisée (variante I)

La figure 4.4⁵ démontre que la méthode brutale dans laquelle tous les états sont parcourus pour estimer la probabilité de blocage donne les mêmes résultats que le modèle analytique proposé par Kaufman et Roberts [87,124] (au moins les 5 premiers chiffres significatifs).

L'influence des porteuses sur les différentes classes de débit est illustrée sur la figure 4.5.

On constate que la classe C4 qui a besoin de 8 slots obtient les meilleures performances quand les porteuses sont de taille 8. Bien que les porteuses de taille 10 et 12 slots ne soient pas bien dimensionnées pour la classe C4, une différence de performance apparaît. Cette différence s'explique par le fait que les porteuses de taille 12 conviennent très bien aux connexions de classe C3. Par conséquent, les porteuses de taille 12 sont les plus pénalisantes pour les connexions de classe C4. Pour la classe C3, on constate que les porteuses de taille 8 et 12 sont bien dimensionnées mais les porteuses de taille 10 ne leur conviennent pas. Les porteuses de taille 12 pénalisant les connexions de classe C4 sont donc les plus favorables pour ces connexions.

L'analyse pour les connexions des classes C1 et C2 est la même. Elles sont moins favorisées par les porteuses de taille 8 qui vont à tout le monde, et elles sont partiellement favorisées par les porteuses de taille 12 qui ne

5. Cette courbe a été obtenue par simulation d'une file M/M/C/C multiclass avec le logiciel de simulation QNAP [141] qui est particulièrement adapté à ce type de situation; d'autant plus que le modèle de la fonction CAC, ici, est une simple file d'attente.

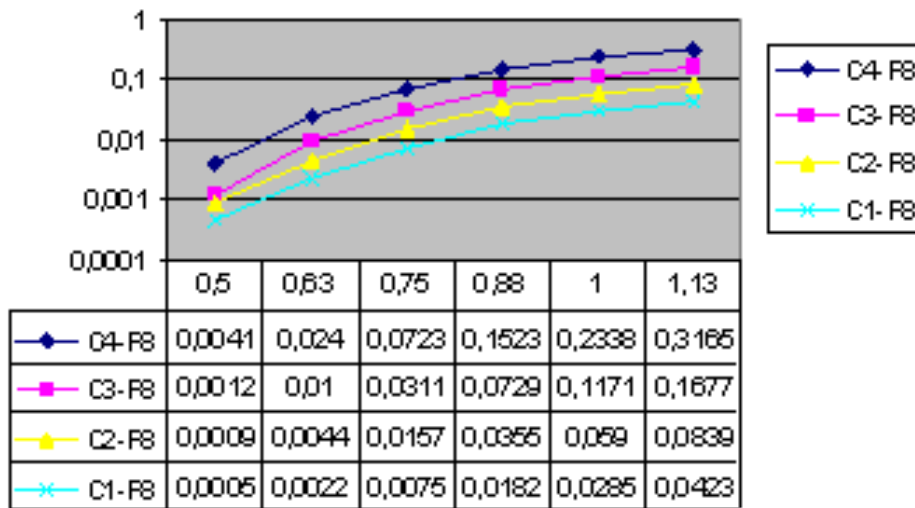


Figure 4.4 Probabilité de blocage (par simulation) des différentes classes de trafic en fonction de la charge normalisée pour la porteuse de taille 8 (variante I)

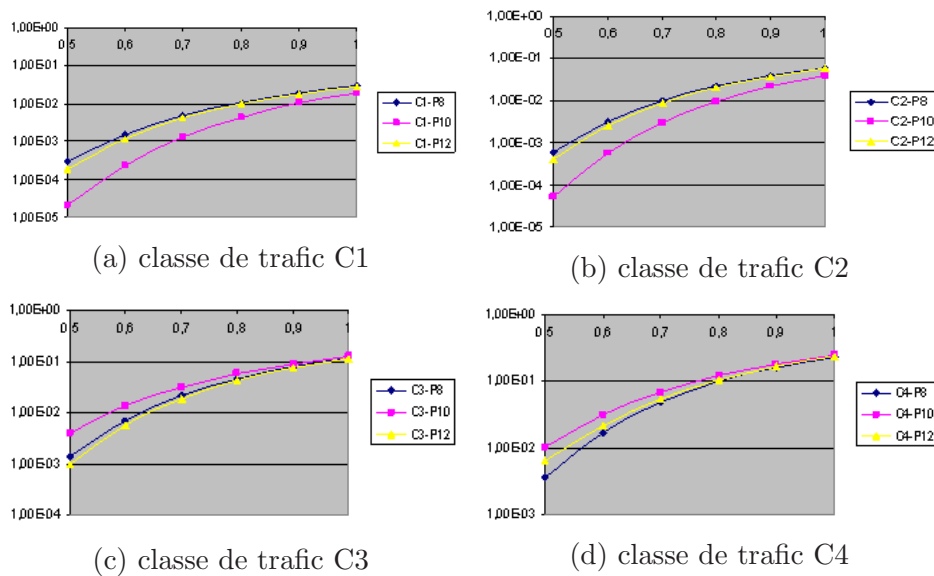


Figure 4.5 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge normalisée pour des porteuses de taille différente (variante I)

conviennent pas bien aux connexions nécessitant 8 slots, et finalement, leur taux de blocage est minimal pour le cas des porteuses de taille 10 qui ne conviennent pas bien aux deux autres classes de trafic.

Analyse de la variante II

Dans la variante II, les différents trafics ont une contribution identique à la charge normalisée, ce qui se traduit par des débits d'arrivées d'autant plus faibles que le nombre de slots demandés est important.

Dans ce cas, il est à constater sur la figure 4.6 qu'il n'y a plus du tout d'influence de la taille des porteuses sur les performances des différentes classes.

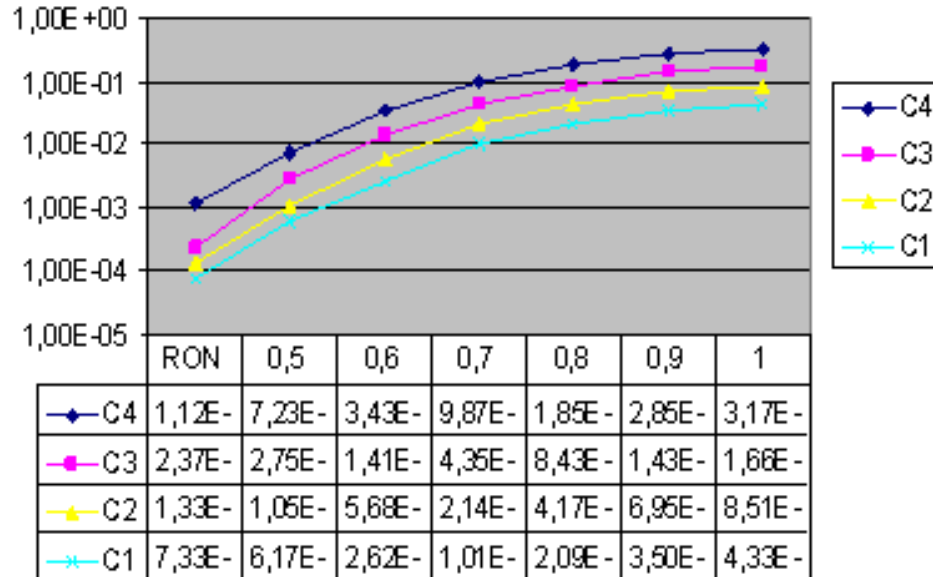


Figure 4.6 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge normalisée (variante II)

Ce résultat est dû au fait que les débits d'arrivée des connexions nécessitant le plus de slots sont beaucoup plus faibles et que donc la probabilité qu'il y ait beaucoup de connexions de ce type à un instant donné devient très négligeable. Les états de blocage étant majoritairement dus à des configurations dans lesquelles il y a beaucoup de connexions de classe C3 et C4, il vient donc le problème de bin packing est moindre.

On observe le même type de courbe que dans le cas de la variante (I) et du Complete Sharing (figure 4.3 courbe (c)). On observe en particulier, qu'en échelle logarithmique, les différences entre les classes de trafic n'augmentent pas avec la charge. Si l'on compare cette variante de trafic par rapport à la précédente, on constate que les performances globales sont bien meilleures en raison de la prépondérance des connexions nécessitant des débits faibles (C1 et C2 notamment).

C=552 slots	Nb porteuses (N)	s
	6	92 (porteuse P92)
	3	184 (porteuse P184)

Table 4.2 Configuration des porteuses -scénarios 2

4.2.4.2 Deuxième scénario

Pour le second scénario, l'évaluation des performances de la fonction CAC s'est faite avec une configuration réaliste issue du projet SATSIX [76] dont l'architecture globale est décrite dans l'annexe C. Seuls les paramètres (cf. le tableau 4.2) de ce système relatifs au pire cas de propagation où les utilisateurs sont amenés à utiliser le mode FMT le plus robuste (hypothèse du cas pessimiste) sont rappelés ici. La deuxième ligne de ce tableau n'appartient cependant pas en vrai à la configuration de base du projet SATSIX : il a pour intérêt de permettre l'utilisation du *Complete Sharing*.

Indépendamment des deux variantes précédentes, vu les grandes tailles des porteuses, aucune influence de la dispersion des ressources en raison du *bin packing* n'est observée (voir figure 4.7). Cette remarque est valable à la fois pour les porteuses à 92 slots et celles à 184 slots. Cependant, il y a un accroissement notable de l'espace d'états qui dans le cas du complete Sharing (porteuses de taille 184) comporte 64.000.000 d'états.

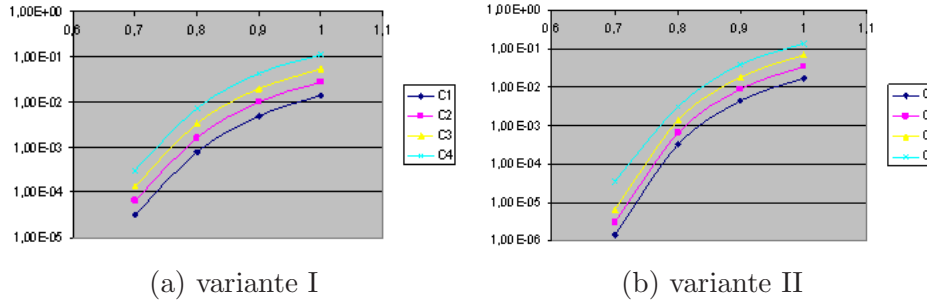


Figure 4.7 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge normalisée

L'allure globale des courbes est identique dans les deux variantes et les mêmes types de résultats que dans le scénario 1 sont observés : les connexions nécessitant les plus forts débits sont pénalisées par rapport aux connexions nécessitant les débits les plus faibles. Les rapports des probabilités de blocage restent constants avec l'augmentation de la charge. De nouveau, la variante II conduit à de meilleurs résultats que la variante I en raison de la sous-représentation des connexions de type 4.

L'ensemble de ces travaux concernant la politique d'acceptation pessimiste conduit alors à essayer de trouver des solutions moins pénalisantes

pour les connexions nécessitant le plus fort débit.

4.2.5 Amélioration de l'équité entre les connexions

Le problème d'équité dans le traitement des différents types de connexion est bien connu dans le cadre des réseaux multi-services [146]. Certaines politiques ont été proposées dans la littérature pour rétablir l'équilibre. Mais elles présentent toutes l'inconvénient de moins utiliser les ressources que les politiques *Complete Sharing*. Pour paramétrer et évaluer ces nouvelles politiques, plusieurs solutions sont alors possibles :

- On favorise le paramètre d'équité : parmi toutes les configurations pour lesquelles la différence entre la classe la plus favorisée et la classe la moins favorisée est inférieure à un certain seuil, on choisit la solution qui minimise la probabilité de blocage globale ;
- On définit une fonction de revenus : les connexions ayant le plus de contraintes peuvent être plus fortement tarifées. On essaye alors d'optimiser cette fonction.

Dans le présent travail nous allons discuter de l'adaptation dans le contexte particulier du bin-packing qui juste là n'a pas été combiné avec ces techniques et allons privilégier le premier type de paramétrage (paramètre d'équité). Dans ce cas, les techniques de partage de la capacité globale peuvent être envisagées, comme le *trunk reservation* ou les *politiques à seuils* (voir la section 3.2 pour plus de détails sur ces techniques).

La technique de *trunk reservation* est optimale quand on n'a que deux classes de trafic (en terme de compromis entre équité et occupation des ressources). Pour mémoire, on peut aussi citer la technique de *Complete Partitionning* qui consiste à séparer les ressources entre les différentes classes. Cette technique préserve l'ensemble des trafics mais est très pessimiste quant aux performances globalement obtenues.

Si l'on essaye de comparer, les mécanismes à seuil et les solutions de *trunk reservation*, on peut dire que les mécanismes à seuil sont restrictifs : on essaye d'empêcher les connexions quand on approche de la saturation alors que *trunk reservation* vise à protéger les trafics les uns par rapport aux autres.

D'un point de vue de l'analyse mathématique, dans le cas où les porteuses sont bien dimensionnées, on peut constater que :

1. Dans les deux cas de figure, le vecteur composé des nombres de connexions en cours est une chaîne de Markov à temps continu.
2. Trunk Reservation conserve la solution à forme produit. En effet sa politique d'acceptation est convexe, i.e. si une connexion d'un type donné se termine, elle peut être remplacée par une connexion du même type.

Configuration	T=(531-536-541-544)		T=(536-541-543-544)	T=544-544-544-544	
Classe	analytique	simulation	simulation	analytique	simulation
C 1	1.85 E-2	1.80 E-2	1.35 E-2	6.05 E-3	5.300 E-3
C 2	1.27 E-2	1.19 E-2	8.48 E-3	6.05 E-3	5.315E-3
C 3	8.95 E-3	8.10 E-3	5.22 E-3	6.05 E-3	5.316 E-3
C 4	3.56 E-3	2.85 E-3	4.30 E-3	6.05 E-3	5.302 E-3

Table 4.3 Mécanisme à seuil -scénario 2 ; variante I charge normalisée de 0.8

3. Les mécanismes à seuil font perdre la solution à forme produit. En effet, considérons le cas où l'on a 10 ressources et deux types de connexion, les unes nécessitant 1 slot, les autres 2. On place le seuil à 8 pour les deux types de connexion. Une connexion de type 1 qui arrive et qui trouve 7 slots occupés est acceptée. On passe dans l'état 8 slots occupés. Si une connexion de type 2 arrive, elle est acceptée, on passe à 10 slots occupés. Si maintenant une connexion de type 1 se termine, on repasse à 9 slots occupés mais les nouvelles connexions de type 1 ne peuvent plus la remplacer du fait du seuil fixé à 8.

Cette dernière propriété (point 3) est particulièrement désavantageuse pour la définition de modèles mathématiques exacts. On a donc recours aux simulations par ordinateur pour appréhender les performances des CAC avec mécanisme à seuil.

Néanmoins Ritter et Tran-Gia [123] ont proposé une méthode approchée pour déterminer les probabilités de blocage de ces mécanismes à seuil. Cette méthode, particulièrement simple, consiste à repartir de la méthode de Kaufman-Roberts. Elle est rappelée à toute fin utile à la section B.3 des annexes. Cette méthode suggère d'opter pour un seuil commun égal à celui de la classe la plus gourmande afin d'obtenir une solution optimale.

Dans le tableau 4.3, nous présentons dans le cas du second scénario et de la variante (I) du trafic quelques résultats numériques (modèles analytiques et simulations) pour les mécanismes à seuil.

On constate dans ce tableau que le modèle analytique a un comportement très sain. L'erreur commise est, en effet, assez faible. On peut donc considérer que la dernière colonne correspond à la solution optimale.

4.3 Etude de la politique optimiste

4.3.1 Présentation

Pour rappel, ici, l'état du canal est supposé suffisamment stable devant la durée de la connexion. Par conséquent, pour mettre en œuvre une fonction CAC, il suffit de regarder l'état courant du système à l'établissement de la

connexion. En effet, les modes FMT requis à chaque requête de connexion sont supposés ne pas varier pendant toute la durée de la connexion.

En dépit des problèmes d'équité éventuels, seules les solutions de type *complete Sharing* avec potentiellement du *bin packing* sont analysées ici. A chaque requête de connexion d'une classe de trafic, on regarde la qualité du signal associée. Cela se traduira par un mode FMT optimal et par conséquent à un type donné de porteuse. Une fois le couple (nombre de slots nécessaires, type de porteuse) trouvé, l'algorithme d'admission de connexion est déroulé.

Deux algorithmes sont proposés :

1. Dans la première, l'utilisateur ne peut être pris en charge que par une porteuse qui lui correspond parfaitement bien (celle qu'il a sollicitée). Cette variante est dite **sans déclassement** ;
2. Dans la deuxième, en fonction de l'état de l'utilisation des ressources, les modes FMT requis peuvent être dégradés ; ainsi les utilisateurs peuvent être placés sur une porteuse correspondant à un mode FMT plus robuste. Cette variante est appelée **avec déclassement**.

Il faut noter que ces deux algorithmes peuvent s'appliquer indifféremment dans les cas de figure où l'on accepte une connexion si l'on trouve une porteuse adéquate pouvant la satisfaire complètement ou bien si l'on autorise l'utilisation de plusieurs porteuses équivalentes.

Il est rappelé, en tout état de cause, que l'algorithme proposé n'est pas un algorithme d'allocation de ressources (en particulier la deuxième variante) mais une fonction de CAC. Cependant les deux variantes évoquées peuvent être utilisées comme méthode d'allocation des slots. Mais, et c'est particulièrement vrai pour la seconde variante où l'on aura forcément tendance à charger de préférence toutes les fréquences porteuses utilisées, on peut aboutir à une acceptation de connexion favorable mais à une toute autre planification des slots. L'algorithme CAC proposé vise à trouver une façon d'utiliser les différentes porteuses disponibles pour accepter toutes les connexions en cours plus la nouvelle connexion qui se présente.

4.3.2 Cas du Bin Packing

Le système est caractérisé par un certain nombre de porteuses (N) qui ont la même bande passante⁶ et qui seront donc caractérisées, en fonction du mode FMT retenu par les usagers qui l'utilisent, par un certain nombre de slots. K modes FMT différents étant possibles, une porteuse configurée pour fonctionner sur un niveau de codage k , $1 \leq k \leq K$, disposera de C_k slots.

6. Les modes FMT avec réduction de débit ne sont pas pris en compte ici.

A un instant donné, le système est caractérisé par les nombres de connexion en cours par classe de trafic et par mode FMT. La nouvelle connexion se présente avec une classe de trafic et un mode FMT souhaité.

Soit n_{ik} le nombre de connexions en cours de la classe de trafic i , $1 \leq i \leq M$, et de mode FMT k . L'état courant sur les porteuses de type k sera noté $n_k = (n_{1k}, \dots, n_{ik}, \dots, n_{Mk})$ et l'état global du système $E = (n_1, \dots, n_k, \dots, n_K)$.

De même, les notations suivantes sont considérées $n_{ik}^+ = (n_{1k}, \dots, n_{ik} + 1, \dots, n_{Mk})$, $E_{ik}^+ = (n_1, \dots, n_{ik}^+, \dots, n_K)$.

Soit $BP(n_k, C_k)$ le nombre minimal de porteuses nécessaires pour placer les connexions sur les porteuses de type k obtenu par un algorithme de *bin packing*, le *best fit descending* par exemple.

4.3.2.1 Variante sans déclassement

Dans le cas de la solution *sans déclassement*, la fonction CAC se traduit simplement par l'algorithme suivant :

Si $(\sum_{k=1}^K BP(n_k, C_k) \leq N)$ **Alors** la connexion est acceptée
Sinon elle est refusée

illustration

Soit un système avec deux modes FMT possibles et deux classes de trafic. Les valeurs numériques suivantes sont utilisées :

$$N = 6, b_1 = 1, b_2 = 3, C_1 = 5 \text{ et } C_2 = 7.$$

$E = ((2, 3), (5, 4))$, i.e. sur les porteuses de type 1 (resp. type 2) 2 (resp. 5) connexions de la classe 1 et 3 (resp. 4) connexions de la classe 2 sont requises.

L'algorithme de *bin packing* placera les trois connexions de la classe 2 qui nécessitent chacune $b_2 = 3$ slots sur chacune des porteuses à $C_1 = 5$ slots (porteuse de type 1). Les connexions de la classe 1, nécessitant chacune $b_1 = 1$ slot, sont ensuite placées dans les cases restantes ; la première porteuse suffit donc à contenir les deux connexions de la classe 1.

Ensuite, les porteuses de type 2 sont utilisées. Le même principe y est appliqué.

L'illustration de l'utilisation de l'algorithme décrit plus haut est donnée sur la figure 4.8.

4.3.2.2 Variante avec déclassement

Pour la solution *avec déclassement*, le problème est un peu plus compliqué dans la mesure où des connexions peuvent être mises sur des porteuses utilisant un mode FMT différent de leur mode FMT optimal. Néanmoins,



Figure 4.8 Illustration de l'algorithme sans déclassement

l'algorithme de la solution précédente peut être généralisé de la façon suivante :

1. Les connexions sont rangées par mode FMT décroissant du moins favorable au plus favorable en terme de capacité, i.e. du plus robuste (atténuation forte) au moins robuste (atténuation faible)
2. L'algorithme de bin packing précédent, qui donne le nombre minimal de porteuses pour satisfaire toutes les connexions et leur remplissage respectif, est ensuite appliqué aux connexions avec le mode FMT le plus robuste
3. Les classes successives des connexions sont ensuite traitées en incluant dans les porteuses pouvant être utilisées, les porteuses déjà partiellement utilisées par les connexions de mode FMT plus robuste.

Ce deuxième algorithme n'est pas forcément optimal même dans sa conception, car il faudrait se poser la question de l'optimisation du remplissage des porteuses partiellement utilisées en remettant éventuellement en cause l'allocation déjà établie dans la mesure où globalement on n'applique plus l'algorithme bin packing évoqué : on ne traite plus les connexions par nombre de slots décroissants mais par mode FMT favorables. Cela dit, le problème est ardu dans la mesure où l'on ne sait pas, *a priori* le nombre de connexions de chaque type que l'on peut/doit utiliser pour terminer de remplir de façon optimale les porteuses déjà partiellement utilisées par des connexions nécessitant un mode FMT moins favorable.

Illustration

L'exemple de la figure 4.9 suivant illustre l'utilisation de l'algorithme *avec déclassement* dans les mêmes conditions de celui de l'algorithme *sans déclassement* : Le remplissage des slots se fait à l'identique pour les porteuses de type 1 (mode FMT moins favorable) que dans le cas *sans déclassement*. Ensuite les connexions qui requièrent les porteuses de type 2 sont utilisées pour combler les places libres sur les porteuses de type 1. Puis l'algorithme de *bin packing* est déroulé sur les porteuses de type 2.

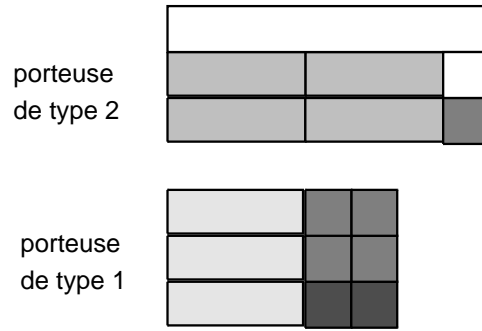


Figure 4.9 Illustration de l'algorithme avec déclassement

4.3.2.3 Critères de performances

En tout état de cause, les hypothèses de trafic relativement analogues au cas précédent (politique pessimiste) sont prises. Les arrivées sont supposées poissonniennes par classe de trafic i et par mode FMT optimal associé k (taux d'arrivée λ_{ik}). Ici encore, les durées de connexions sont prises exponentielles (de taux μ_i par classe). Cependant, cette dernière hypothèse peut être relâchée dans la plupart des configurations retenues dans cette étude ; en fait toutes celles pour lesquelles la politique d'acceptation est convexe (propriété **P1**).

Soit $\rho_{ik} = \frac{\lambda_{ik}}{\mu_i}$ la charge de la classe (i, k) . Il devient délicat d'utiliser la notion de charge normalisée dans la mesure où le nombre de slots par porteuse dépend du mode FMT utilisé. La notion de charge en Erlangs pour laquelle on pondère les charges par classe par le nombre de slots requis par les connexions de cette classe est préférée. Elle est traduite suivant l'équation (4.12) :

$$\rho = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K \rho_{ik} b_i \quad (4.12)$$

La charge par classe de trafic peut être aussi définie par $\rho_i = \sum_{k=1}^K \rho_{ik}$.

Pour des raisons complètement analogues à celles évoquées pour le cas de la politique pessimiste, il peut être montré que dans le cadre de la politique optimiste, le vecteur composé par les nombres de connexions en cours de chaque classe et de chaque niveau de codage constitue un processus markovien.

On note $N(t) = (N_1(t), \dots, N_i(t), \dots, N_K(t))$ le vecteur des états pour chaque mode FMT où $N_k(t) = (N_{1k}(t), \dots, N_{ik}(t), \dots, N_{Mk}(t))$ correspond aux nombres de connexions de chaque classe de trafic pour un mode FMT, k , donné.

Le problème vient alors essentiellement de la détermination de l'espace d'état et de sa taille. Pour les mêmes raisons que dans le cas de la politique

pessimiste, la solution à forme produit qui permet d'éviter de résoudre le système linéaire relatif au générateur infinitésimal est conservée. Elle est donnée, pour les deux algorithmes d'allocation (avec ou sans déclassement) par l'équation (4.13) :

$$\pi_E = G^{-1} \prod_{i=1}^M \prod_{k=1}^K \frac{\rho_{ik}^{n_{ik}}}{n_{ik}!} \quad (4.13)$$

Le critère de performance, déterminé par l'évaluation de la probabilité de blocage, est donc rigoureusement identique aux méthodes proposées dans le cadre de la politique pessimiste.

Pour l'évaluation numérique des performances, la véritable contrainte est représentée par la taille de l'espace d'état. Par conséquent, quelques méthodes numériques ont été proposées pour négliger les probabilités dès qu'elles sont jugées petites. La solution retenue consiste à négliger tous les termes dont la contribution relative est inférieure à un certain seuil [139].

4.3.3 Cas MF-TDMA pur

Dans les algorithmes précédents, les ressources allouées à une même connexion étaient placés sur une seule fréquence porteuse. Ainsi, les slots d'une même connexion étaient contigus. Dans le cas d'un système classique, denoté ici comme le **MF-TDMA pur**, les slots d'une même connexion peuvent être placés sur n'importe laquelle des porteuses conforme au mode FMT requis. Il n'existe plus la contrainte de réserver sur une même porteuse donnée tous les slots requis par une connexion. Néanmoins, il faut s'assurer que les slots réservés sur deux porteuses différentes ne coïncident pas dans le temps car les terminaux sont supposés avoir une seule chaîne de démodulation.

4.3.3.1 Variante sans déclassement

En reprenant les même notations que précédemment, une connexion de type i sur une porteuse de type k sera acceptée si

$$E_{ik}^+ = (n_1, \dots, n_k^{i+}, \dots, n_K) \in \Omega \quad (4.14)$$

où l'espace d'état Ω est obtenu suivant l'équation (4.15)

$$\Omega = \left\{ E = (n_1, \dots, n_k, \dots, n_K) \mid \left[\sum_{k=1}^K \frac{n_k \bar{b}}{C_k} \right] \leq N \right\} \quad (4.15)$$

Ici $n_k \bar{b} = \sum_{i=1}^M n_{ik} b_i$ représente le nombre de slots demandés sur la porteuse de type, k

Les fonctions CAC et DAMA sont en partie décorréées. Ainsi l'évaluation de la condition de l'équation (4.14) ne désigne pas les ressources qui

seront attribuées réellement à une connexion. La fonction d'admission reste donc parfaitement convexe et la solution à forme produit, introduite à l'équation (4.13), perdure. Cela facilite l'évaluation des probabilités de blocage des connexions.

De plus, la simplicité de l'espace d'états incite à chercher des solutions appropriées en étendant la formule de Kaufman-Roberts [87, 124]. Ainsi, en notant Q_I la probabilité non normalisée d'avoir $I = (i_1, \dots, i_K)$ ressources occupées, il peut être montré que :

$$Q_I = \prod_{i=1}^K q_{k,i_k} \quad \text{où} \quad q_{k,i_k} = \frac{1}{i_k} \sum_{j=1}^M \rho_{jk} q_{k,i_k-b_j} \quad (4.16)$$

Preuve: L'idée consiste à décomposer l'espace d'états et à considérer les états qui correspondent à un vecteur I de ressources occupées. Ce sous-ensemble est noté Ω_I :

$$\Omega_I = \{E = (n_1, \dots, n_k, \dots, n_K) \mid n_k b = i_k, 1 \leq k \leq K\}$$

Il vient donc que :

$$Q_I = \sum_{E \in \Omega_I} G^{-1} \prod_{i=1}^M \prod_{k=1}^K \frac{\rho_{ik}^{n_{ik}}}{n_{ik}!}$$

Chacun des types de porteuses peut ensuite être isolé successivement :

$$Q_I = G^{-1} \sum_{n_1 \in \Omega_{i_1}} \prod_{i=1}^M \frac{\rho_{i1}^{n_{i1}}}{n_{i1}!} \dots \sum_{n_K \in \Omega_{i_K}} \prod_{i=1}^M \frac{\rho_{iK}^{n_{iK}}}{n_{iK}!}$$

En changeant de constante de normalisation l'équation (4.16) est retrouvée. ■

4.3.3.2 Variante avec déclassement

La variante avec déclassement permet encore une fois de conserver la solution à forme produit. On rappelle en effet que l'acceptation des connexions n'est pas liée à l'allocation précise des ressources. Par conséquent, la politique d'acceptation reste convexe : si une connexion se termine, elle peut être immédiatement remplacée par une connexion du même type.

Malheureusement, il n'existe pas de solution simple comme présentée dans le cas *sans déclassement*. L'algorithme obtenu ressemble alors beaucoup à celui détaillé dans la solution avec déclassement et bin-packing. En effet, pour dénombrer l'espace d'état, on va commencer par les connexions à positionner sur les porteuses correspondant aux modes FMT les moins favorables. La place résiduelle peut alors être réutilisée par les connexions de niveau supérieur et ainsi de suite.

Encore une fois la taille de l'espace d'état explose rendant difficile une exploration complète. De nouveau pour une évaluation numérique, certains états dont la contribution relative est faible sont négligés. On compte donc le nombre de porteuses nécessaires pour occuper les connexions de chacun des niveaux. Ce nombre est beaucoup plus simple à calculer que dans le cas du bin packing étudié dans le cas classique. En effet, s'il ne reste plus de place sur les porteuses de niveau inférieur, ce nombre vaut exactement $\left\lceil \frac{n_k \bar{b}}{C_k} \right\rceil$.

4.3.4 Analyse des résultats

La configuration suivante est utilisée pour analyser les algorithmes utilisés : Un ensemble de $N=15$ porteuses forme la structure MF-TDMA. Trois types de porteuses, et donc trois modes FMT, sont utilisés : à 8, 12 et 16 slots (cf. tableau 4.4).

N	slots par porteuse	Taux d'occurrence
15	8	1 %
	12	90 %
	16	9 %

Table 4.4 Configuration du système, politique optimiste

Ici, la notion de charge normalisée est inopportune dans la mesure où les porteuses sont reconfigurables et où, par conséquent, le nombre total de slots n'est pas constant. En revanche, la notion de charge en Erlangs, $\rho = \sum_{i=1}^M \rho_i b_i$, est encore valable.

L'analyse des résultats est donc faite en représentant les probabilités de blocage pour chaque classe de débit en fonction de ρ pour les deux variantes (variante I : $\rho_i = \text{constante}$ et variante II $\rho_i b_i = \text{constantes}$). Ces deux variantes de répartition de trafic sont identiques à celles retenues dans le scénario pessimiste. De la même façon, les mêmes classes de débit sont utilisées.

4.3.4.1 Cas du Bin packing

Les figures 4.10 et 4.11 représentent les probabilités de blocage obtenues pour les quatre classes de trafic en fonction de la charge respectivement sans et avec déclassement des modes requis.

Les résultats auxquels on aboutit sont sensiblement conformes à ceux obtenus précédemment. Pour une charge en Erlangs donnée, la configuration avec des débits identiques (variante I) conduit à l'arrivées de nombreuses connexions nécessitant un fort débit qui sont donc plus difficiles à placer. Les performances moyennes sont donc moins bonnes. Avec la variante II, les connexions nécessitant un fort débit sont très pénalisées mais comme elles

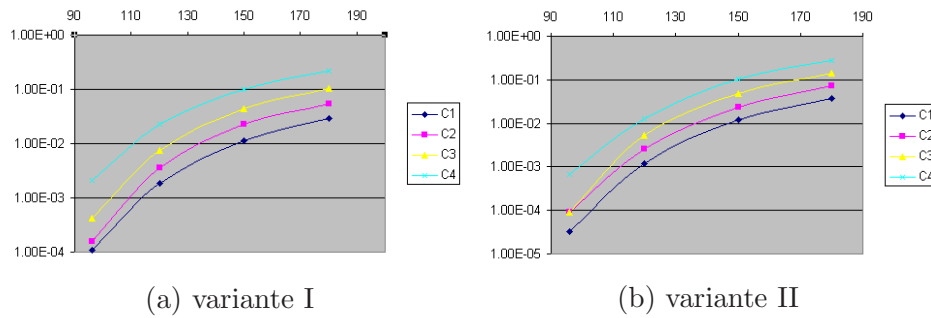


Figure 4.10 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - Bin packing sans déclassement

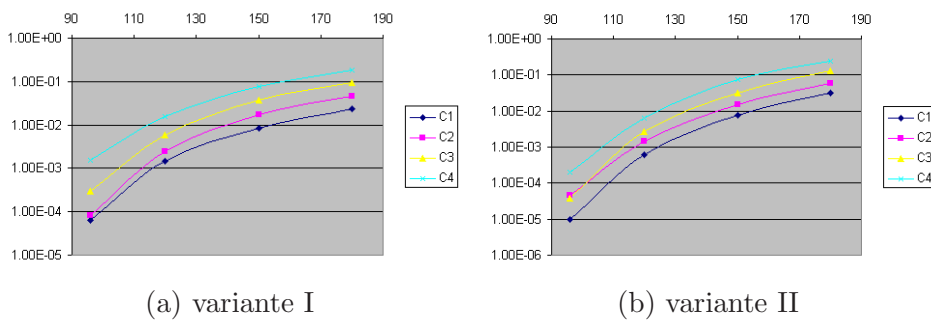


Figure 4.11 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - Bin packing avec déclassement

sont beaucoup moins nombreuses, les performances moyennes sont améliorées.

4.3.4.2 Cas du MF-TDMA pur

Les résultats présentés (figure 4.12 et 4.13) sont issus de l'analyse mathématique présentée précédemment.

Les mêmes observations faites dans le cas du *bin packing* sont valables ici aussi : la variante II donne de meilleures performances moyennes que la variante I.

4.3.5 Etude dans un cas de grande taille

4.3.5.1 Configuration système

Les études précédentes ont été menées avec un modèle théorique de configuration système. Le but étant de valider le comportement des algorithmes proposés en terme de performances. Afin de prendre en compte une configuration plus réaliste de système, nous avons étudié des résultats issus du

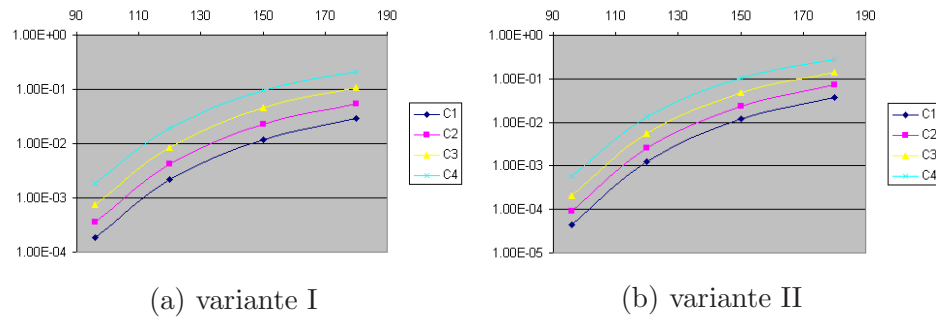


Figure 4.12 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - MF-TDMA pur sans décalassement

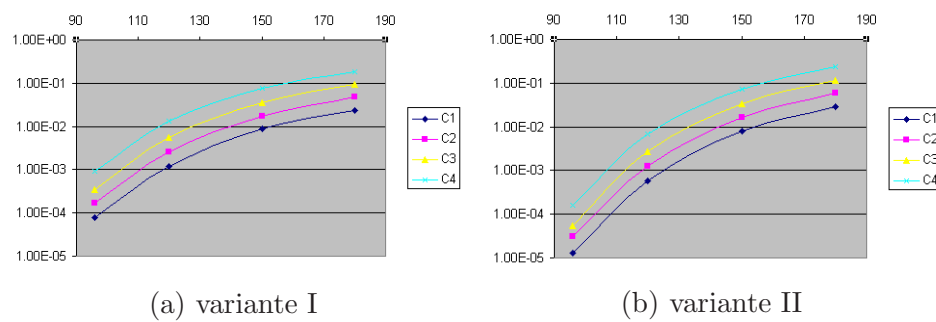


Figure 4.13 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - MF-TDMA pur avec décalassement

projet SATSIX [76] dont l'architecture globale est décrite dans l'annexe C. On suppose néanmoins que seulement trois modes FMT sont actifs à un instant donné⁷. Dans le cas *ciel clair*, la distribution des terminaux dans un spot est donnée par le tableau 4.5.

En cas de pluie forte, nous avons considéré qu'un utilisateur et les connexions afférentes ne pouvaient être dégradées de plus de 2 niveaux de modes FMT, ce qui revient à décaler vers le bas les modes FMT à prendre en considération pour la politique de CAC, comme illustré dans le tableau

7. En réalité, dans le projet SATSIX 11 modes FMT sont préselectionnés ; mais la simulation menée à la section 5.4 pour évaluer la capacité offerte par le système a montré que seuls 4 ou 5 modes FMT sont utilisés à un moment donné ; la grande majorité des terminaux n'utilisant en réalité que 3 modes.

N	slots par porteuse	Taux d'occurrence
15	1040	22.7 %
15	1300	57.3 %
15	1300	20%

Table 4.5 Configuration du système - ciel clair

N	slots par porteuse	Taux d'occurrence
30	416	22.7 %
30	520	57.3 %
15	1040	20 %

Table 4.6 Configuration du système - pluie forte

4.6.

L'augmentation du nombre de porteuses (de 15 à 30) provient du fait que, dans le système SATSIX, le mécanisme de réduction de débit est utilisé. Par conséquent, il y a une variation de la bande passante allouée aux porteuses, et donc une variation du nombre de porteuses dans la structure MF-TDMA. La réduction de débit est choisie de sorte à avoir un rapport de proportionnalité à la fois entre les débits offerts et la bande passante des porteuses. Ainsi, une porteuse à 1040 slots peut être remplacée à l'identique en terme de bande de fréquence par deux porteuses à 520 slots.

4.3.5.2 Analyse mathématique

Le modèle analytique présenté en section 4.3.3 s'applique encore dans le cas sans déclassement. On peut donc appliquer notre extension de l'algorithme de Kaufman-Roberts dans le cas où toutes les porteuses utilisent la même bande passante. C'est le cas de la configuration optimiste.

En revanche, lors de la mise en œuvre, on se rend compte que les probabilités non normalisées de l'équation (4.16) sont très dissemblables les unes des autres, rendant un calcul direct impossible même en double précision.

Au fur et à mesure des calculs, on élimine les termes dont la contribution est marginale :

$$q_k \approx (0, 0, \dots, q_{k,i_m}, \dots, q_{k,i_M}, 0, \dots, 0)$$

Si l'on note $q_k^{MAX} = \text{Max}(q_{k,j}, 0 \leq j \leq K * C_k)$, cela revient à éliminer l'ensemble des termes tels que $\frac{q_{k,j}}{q_k^{MAX}} < \epsilon$.

Le choix de ce seuil ϵ pose quelques problèmes car il faut suffisamment de termes pour que les calculs soient significatifs mais pas trop pour ne pas avoir des temps de calcul trop grands.

Un autre problème qui survient, en particulier à forte charge, c'est qu'en éliminant les termes avec des probabilités trop faibles, on ne conserve que des états "impossibles" c'est-à-dire avec des nombres de porteuses occupées plus grands que N . On doit donc encore raffiner nos calculs et éliminer des boucles l'ensemble des états impossibles (ils ne faussent pas les calculs mais ils les ralentissent).

Pour le cas pessimiste où toutes les porteuses n'utilisent pas la même bande passante, nous avons considéré un modèle approché dans lequel on ne reprend que des porteuses de même taille (en l'occurrence $N = 15$) ce qui

donne de bons ordres de grandeur sur les taux de blocage de connexion mais avec des écarts plus importants que dans le cas optimiste.

4.3.5.3 Résultats de simulation

On considère encore les deux variantes de trafic : $\rho_i = \text{constante}$ pour la variante I et $\rho_i b_i = \text{constante}$ pour la variante II, ainsi que les deux politiques avec ou sans déclassement. En revanche, comme nous l'avons indiqué précédemment, vu les tailles des porteuses, on ne s'est pas préoccupé de savoir si l'on avait la possibilité de mettre tous les slots d'une connexion sur la même porteuse, on suppose que oui.

Les figures 4.14 et 4.15 représentent les probabilités de blocage dans les deux cas de figure (sans et avec déclassement) lorsque le système est en condition *ciel clair*. De même les figures 4.16 et 4.17 représentent les probabilités de blocage des connexions mais en condition de pluie forte. On remarque qu'on aboutit sensiblement aux mêmes analyses dans les deux cas (pluie et ciel clair) : l'intérêt du déclassement apparaît surtout quand la charge n'est pas trop élevée.

Les résultats de simulation en condition de pluie forte peuvent être interprétés comme l'application de la politique pessimiste. En effet, les valeurs de probabilité obtenues sont celles où la décision d'admission se fonde sur le pire cas de propagation qui peut survenir dans le système.

Par ailleurs pour atteindre des performances identiques en condition ciel clair et pluie, il faut enlever de l'ordre de 4000 Erlangs, soit environ 20% de la charge. C'est tout à fait concordant dans la mesure où le cas pessimiste (pluie forte) correspond sensiblement à une diminution de la capacité du système de l'ordre de 20%.

Dans l'étude du cas de grande taille se pose le problème de la charge de trafic et de la durée de simulation. En effet pour obtenir des résultats significatifs, les charges sont importantes, ce qui se traduit par des durées de simulation assez longues et une charge de calcul qui devient pénalisante. Pour s'affranchir de telles difficultés, il conviendrait de diviser la capacité globale en sous-capacité sur lesquelles les décisions d'admission seraient prises de manière individuelle. Ainsi l'on se ramènerait au scénario précédent de petite taille où la charge de calcul serait partagée.

4.3.6 Avec ou Sans déclassement ?

On constate, sur la figure 4.18, que quand le système est peu chargé, la solution consistant à autoriser la dégradation d'une connexion permet d'améliorer les performances d'ensemble du système.

A plus forte charge, les bénéfices d'une telle technique sont moins nets. En effet à très forte charge, les probabilités de blocage deviennent très élevées et

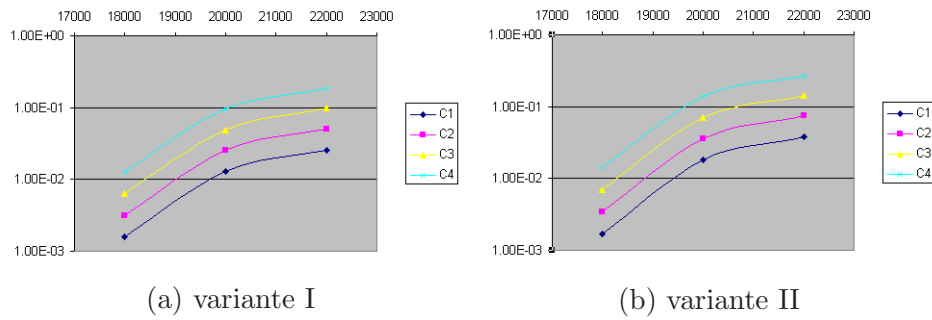


Figure 4.14 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - Politique Optimiste sans déclassement : cas ciel clair

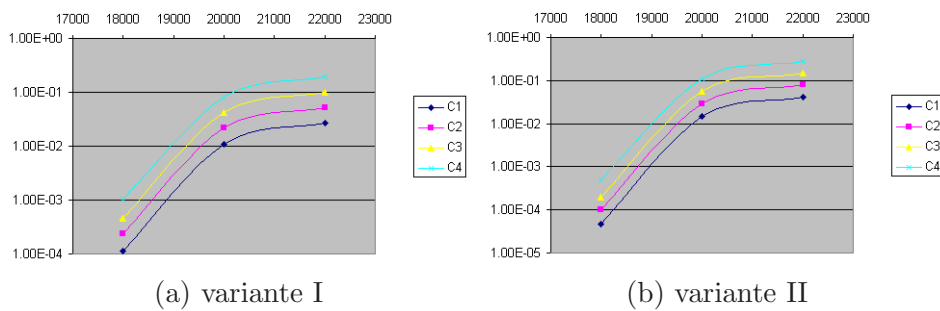


Figure 4.15 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - Politique Optimiste avec déclassement : Cas ciel clair

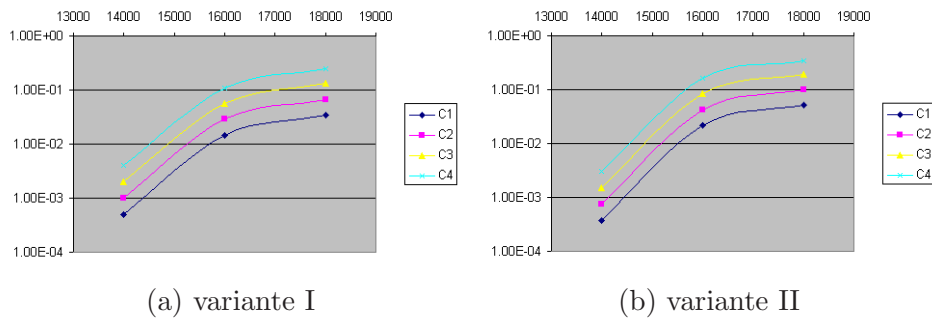


Figure 4.16 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - Politique Optimiste sans déclassement : Cas pluie forte

l'on trouve la limite du déclassement qui aura tendance à accepter finalement trop de connexions pour les utilisateurs défavorisés en termes de conditions climatiques et donc à monopoliser trop de porteuses pour eux rendant le déclassement moins intéressant.

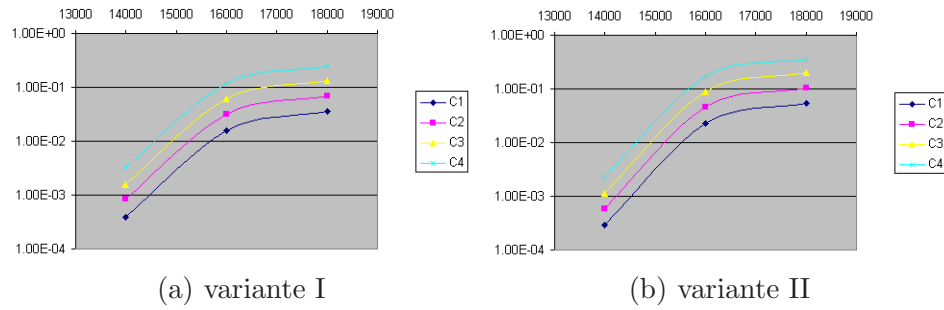


Figure 4.17 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge - Politique Optimiste avec déclassement : Cas pluie forte

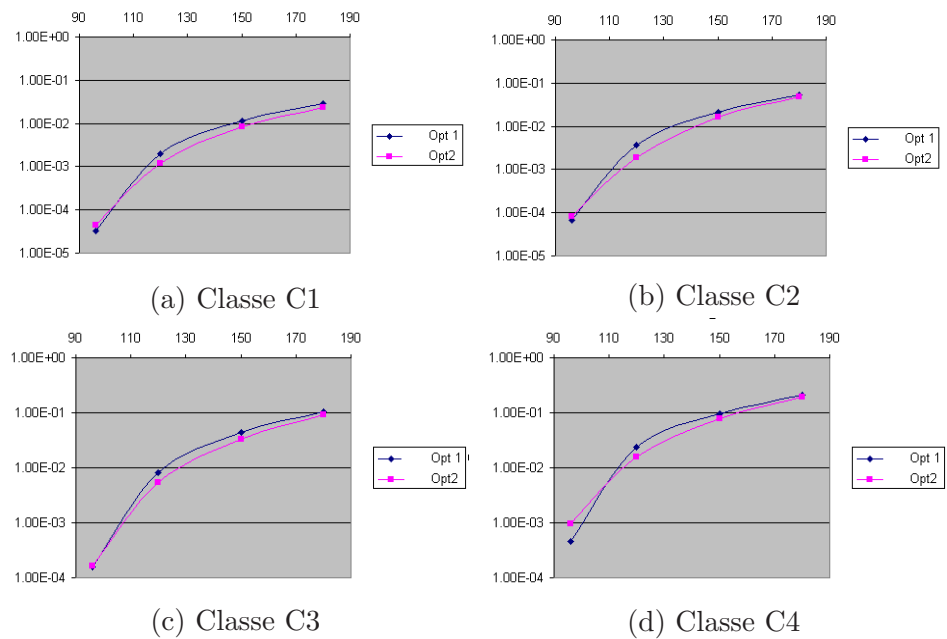


Figure 4.18 Probabilité de blocage des différentes classes de trafic en fonction de la charge $\rho_i = \text{constante}$ (variante I) -Opt :sans déclassement et Opt2 : avec déclassement

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à des mécanismes de CAC pour des systèmes DVB-RCS dans lesquels on peut dynamiquement reconfigurer le système en fonction des variations de l'état du canal. Ce problème est très original et reste très compliqué.

Nous nous sommes, dans ce travail préliminaire, concentrés sur deux familles de solutions : (1) celles adaptées au cas où la qualité du support varie très rapidement ; (2) celles où le support est suffisamment stable devant

la durée des connexions.

Pour les premières, qui sont les plus compliquées, nous avons étudié simplement un cas pessimiste pour lequel, on suppose que tous les utilisateurs peuvent se retrouver simultanément dans des conditions de propagation très perturbées. On place alors la fonction CAC dans ce cas très pessimiste ; ce qui garantit de manière ferme les ressources à l'utilisateur.

Pour les secondes, on peut fonder l'admission de connexion sur des hypothèses plus simples : il suffit de regarder l'état du système à l'établissement des connexions tout en reconfigurant la structure de la trame MF-TDMA en fonction des modes FMT requis par les terminaux.

Nous avons mis en place des politiques d'admission simples dans lesquelles, l'admission se fait sur un paramètre de type débit crête ou débit équivalent sans se préoccuper de sa détermination. De la même façon, nous n'avons pas défini de niveaux de priorités entre les trafics qui ont été modélisés sous la forme de classes de débits (la granularité correspondant à un nombre entier de slots attribués par trame).

Par ailleurs, nous nous sommes concentrés sur la modélisation et l'évaluation de la fonction CAC sans nous préoccuper de la signalisation, ni des protocoles permettant de les implanter ; les mécanismes/protocoles sont présents et ils se déroulent à une échelle de temps qui n'est pas compatible avec les études que nous avons menées.

Dans le même ordre d'idée, nous avons décorrélé la fonction CAC de l'allocation de ressources effectuées par le DAMA. Dans notre cas de figure, les algorithmes de CAC utilisés peuvent être retenus en partie pour le DAMA mais ils peuvent être notablement sous-optimaux.

Enfin, le problème a été modélisé en s'affranchissant de la notion de terminaux émettant des requêtes et en ne retenant que des demandes de connexions survenant au niveau du NCC devant être satisfaites en fonction des paramètres systèmes.

Cependant ces simplifications ne font perdre aucun caractère de généralité à l'étude mais permettent désormais de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu et d'entrevoir des améliorations.

Dans notre étude, nous avons aussi souvent que possible essayé de mettre en œuvre des solutions mathématiques exactes ou approchées qui permettent de dimensionner de façon plus rapide les paramètres systèmes. Nous avons par ailleurs validé certains de ces résultats, en particulier ceux pour lesquels nous avons dû faire des simplifications dans les modèles analytiques, par des simulations sur ordinateur. Pour obtenir des résultats satisfaisants, il est nécessaire de faire des simulations suffisamment longues. Cela n'a été possible qu'au vu des simplifications que nous avons apportées dans notre étape de modélisation (en s'affranchissant par exemple des problèmes de

DAMA et de signalisation).

Notre méthode *pessimiste* a pu être analysée de façon exacte et elle a montré l'impact potentiel du dimensionnement des porteuses par rapport aux connexions soumises. Nous avons des pistes pour essayer de rétablir une équité entre les connexions. Ces travaux ont été commencés pour certaines valeurs des paramètres et peuvent être poursuivis.

Notre méthode *optimiste* a été également étudiée à l'aide d'études mathématiques où l'on a commencé à être vraiment confronté à des problèmes de taille. Nous avons su proposer des méthodes numériques approchées simples et assez robustes. Nous avons par ailleurs constaté qu'il était largement préférable d'essayer d'utiliser au mieux les ressources du système quitte à dégrader les modes FMT de certaines connexions. Ces travaux peuvent également être poursuivis assez facilement pour essayer de nouveau de régler des problèmes d'équité.

La notion de CAC adaptative reste un problème encore largement ouvert dans la mesure où nous n'avons abordé que deux cas un peu extrêmes de la variation de la capacité qui constituent des bornes quant aux travaux que nous pouvons mener.

Par conséquent ces mécanismes adaptatifs devront s'accompagner de travaux de modélisation de l'évolution de l'état du canal prenant en compte potentiellement des corrélations spatiales et/ou temporelles. Les chapitres suivants s'attarderont sur l'évolution de l'état du canal ainsi que de la modélisation de la capacité qui en résultera.

Chapitre 5

Vers un CAC adaptatif : un peu plus loin...

5.1	Vue générale d'une fonction CAC adaptative	101
5.1.1	Introduction	101
5.1.2	Architecture d'un CAC adaptatif.	102
5.2	Canal de propagation et atténuations atmosphériques .	103
5.2.1	Méthodologie d'estimation du niveau d'atténuation. . .	103
5.2.2	Dynamiques des phénomènes d'affaiblissement	105
5.2.3	Conclusion	109
5.3	Prédiction de l'évolution du canal.	110
5.3.1	Evolutions spatiale et temporelle des affaiblissements . .	110
5.3.2	Méthodes de prédiction : état de l'art	112
5.3.3	Conclusion	116
5.4	CAC adaptatif : Recommandations	117
5.4.1	CAC et localisation du phénomène d'affaiblissement . .	118
5.5	Cas pratique : pluie sur la Gateway/NCC.	120
5.5.1	Modélisation	120
5.5.2	Evaluation des capacités	120
5.5.3	Analyse	121
5.5.4	Politique d'admission	121
5.6	Conclusion	124

La plupart des fonctions CAC décrites dans la littérature (cf. [114,129] et leurs nombreuses références) ne considère que la version d'un système de communication à capacité constante et connue; et les quelques rares qui se penchent sur les systèmes de communication à capacité variable font des hypothèses assez fortes sur l'évolution de la capacité et sa connaissance.

Siwko et Rubin [131,133] présentent des fonctions CAC pour les systèmes de communication par satellite non géostationnaire où la capacité offerte par le système varie dans le temps de manière périodique et connue. En effet dans ces types de système, du fait du défilement des satellites, les empreintes au sol et donc la capacité du système, varient dans le temps. De plus, à un instant donné, la puissance du satellite varie du centre vers les périphéries du spot, offrant du coup différentes capacités aux terminaux éclairés en même temps. Néanmoins cette variation de capacité est déterministe car périodique dans le temps et dans l'espace.

Les mêmes auteurs décrivent dans [132] un système dont la capacité varie de manière stochastique mais avec la contrainte que les instants de changement de capacité sont suffisamment séparés de sorte que la probabilité d'avoir plus d'un changement de capacité pendant la durée de vie d'une connexion soit très faible. On aboutit dès lors à l'idée que la capacité reste suffisamment constante pendant la durée de vie des connexions comme décrite dans les références [139] et reprise dans le chapitre précédent.

De plus, chez ces auteurs, les instants de changement de capacité suivent une loi stochastique connue qui permet de les évaluer. La même idée est appliquée par Sun et Williamson [136] pour évaluer les performances de différentes politiques d'abandon de connexion.

Les références [15,31,65,112] traitent, quant à elle, des fonctions CAC dans les systèmes de communication à capacité variable utilisant des procédures de contre-mesure adaptatives. Pour appréhender l'évolution de la capacité offerte par le système, différentes méthodes sont proposées :

Park et al [112] utilisent une chaîne de Markov pour suivre l'évolution de la capacité : à chaque requête de connexion, une chaîne de Markov à ($N = 80$) états est utilisée pour déterminer le pire cas de propagation qui peut survenir pendant la durée de vie de la connexion avec un seuil de probabilité donné et une durée de connexion supposée connue. Ce pire cas de propagation est ensuite utilisé pour évaluer la capacité à réserver pour la connexion. Les probabilités de transition de cette chaîne de Markov sont déterminées par une séquence d'apprentissage *hors ligne* qui permet de compter les fréquences relatives de transitions entre les différents états.

Bolla et al [15] associent à chaque terminal, en fonction de sa position géographique, la probabilité *a priori* de subir une valeur d'atténuation donnée suivant la recommandation ITU-R P. 618 [79]. Ils ne tiennent donc pas compte de l'état réel des terminaux, mis à part l'information binaire pour

le terminal d'être ou non en condition de transmission ciel clair. Celandroni et al [31], en parallèle à ce principe, décrivent un modèle dynamique de l'évolution de la capacité : chaque terminal détermine la valeur réelle de l'atténuation qu'il subit, et la fonction CAC suppose que cette valeur reste valable sur une longue période de temps, comparée aux périodes de requêtes et d'allocation des ressources. Cette méthodologie est reprise par Gotta [65] qui regroupe, lui, les valeurs d'atténuation en classe d'atténuation. Ainsi la probabilité de demeurer dans un même état d'affaiblissement est accrue.

Ces différents travaux soulignent la nécessité de disposer de modèles de l'évolution de la capacité offerte par le système. Notamment l'évaluation de la valeur de l'atténuation, la durée de celle-ci ainsi que son sens de variation lorsque des techniques de contre-mesure adaptatives sont adoptées.

Il convient dès lors de se poser la question de la pertinence de ces hypothèses : de quoi relèvent-elles ? Où en est l'état de la recherche ? Quels sont les modèles à disposition ?

5.1 Vue générale d'une fonction CAC adaptative

5.1.1 Introduction

Au chapitre précédent, nous avons présenté deux types d'algorithmes de CAC adéquats vis à vis de la variation de qualité du canal de communication : un canal variant rapidement et un autre variant lentement eu égard à la durée des connexions. Lorsque la variation de capacité est beaucoup plus rapide que la durée des connexions, une politique pessimiste a été proposée. Elle consiste à évaluer, pour l'admission, la capacité égale à celle où tous les terminaux sont dans les pires cas de propagation. Lorsque la variation de la capacité est lente pendant la durée des connexions, une politique optimiste qui consiste à évaluer la capacité en fonction de l'état de transmission des terminaux au moment de la requête de connexions est appliquée.

Pour améliorer ces algorithmes, il est impératif d'évaluer la qualité du canal de propagation, d'en prédire si possible l'évolution dans le temps et dans l'espace. La fonction CAC adaptative prendra ainsi en compte l'évolution des conditions de propagation vécues par les terminaux pour affiner sa politique d'admission ; cela permettra de n'admettre une connexion que si la capacité requise reste disponible pour une période de temps assez longue. En outre, tenir compte de la prédiction de trafic permet d'accroître les performances de ces CAC adaptatifs. Ainsi un module d'estimation de la qualité du canal de transmission d'une part, et d'autre part un module de prédiction de l'évolution à la fois de la capacité du système et du trafic des usagers

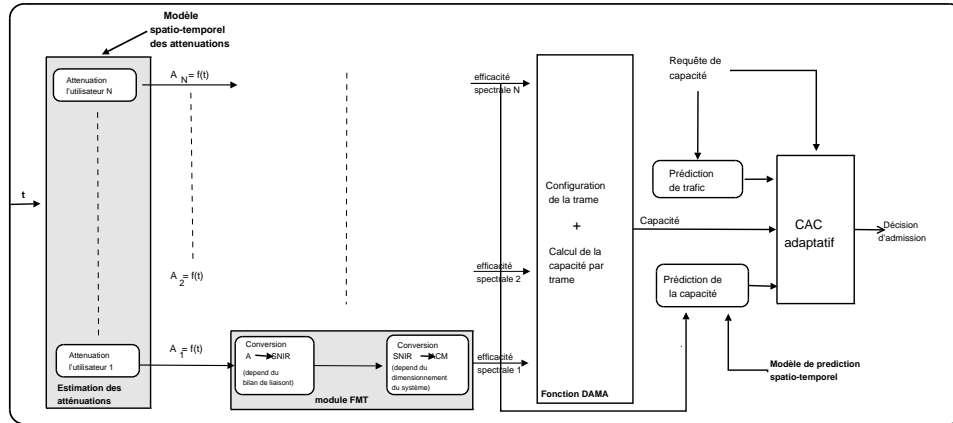


Figure 5.1 Architecture d'un CAC adaptatif et ses entrées

doivent être insérés dans l'architecture de la fonction CAC.

On tient toutefois à mettre en garde contre les fonctions de prédiction de trafic. A l'échelle de temps de mise en place des connexions, les modèles classiques utilisés pour la planification et le dimensionnement des réseaux sont raisonnables. On rappelle que l'on n'est pas à l'échelle de temps des paquets pour laquelle des fonctions d'allocation des ressources fondées sur des modèles de prédiction de trafic peuvent être déplorables [11].

5.1.2 Architecture d'un CAC adaptatif

La conjonction d'une prédiction de canal et d'une prédiction de trafic permet de conférer le caractère *adaptatif* à la fonction CAC. Par conséquent nous proposons le schéma de la figure 5.1 pour l'architecture globale d'un CAC adaptatif.

Il faut néanmoins séparer le cas général qu'est la prédiction de canal du cas particulier de la prédiction de trafic. En effet, la possibilité de prédiction de trafic pour la fonction CAC est largement tributaire des modèles adoptés, comme en témoignent les références [15, 31, 65]. En revanche, la prédiction de canal, de manière générale, est indépendante des paramètres du système de télécommunication mis en place.

Selon cette architecture (figure 5.1), le niveau d'atténuation est évalué pour chaque terminal. La raison en est que, étant sous des conditions météorologiques différentes, les terminaux subissent des valeurs d'atténuation également différentes. La valeur d'atténuation ainsi évaluée terminal par terminal est traduite en rapport signal à bruit (SNIR) par le module FMT selon le bilan de liaison du système de communication. Le module FMT choisit ensuite le mode FMT adéquat pour chaque terminal. Cette dernière opération permet d'évaluer la valeur d'efficacité spectrale de chaque lien radio et d'estimer la capacité globale (en terme de capacité de transmission) du

système de communication. La valeur de la capacité ainsi obtenue est une entrée de la fonction CAC, tout comme le sont les requêtes de connexion par les terminaux. Les deux dernières entrées pour la fonction CAC adaptative sont les modules de prédiction d'évolution de trafic et de la capacité offerte par le système.

Les sections qui suivent décrivent les mécanismes mis en jeu pour l'évaluation des niveaux d'atténuation (section 5.2) et les modèles de prédiction de la capacité (section 5.3).

5.2 Canal de propagation et atténuations atmosphériques

Nous avons déjà souligné l'importance de la prise en compte de l'évolution de la capacité du système lorsque l'on veut implanter une fonction CAC pour les systèmes en bande Ka et au-delà. En effet, les fortes dégradations pouvant survenir, si elles n'étaient pas anticipées, conduiraient à un repli significatif de la qualité de service. Pour ce faire, il convient donc d'étudier le canal de propagation afin d'en déduire les statistiques des phénomènes d'affaiblissement du lien de communication. Les méthodes de prédiction de la capacité pourront alors être mises en œuvre.

Cette section décrit, dans un premier temps, les différents phénomènes d'affaiblissement pouvant affecter le canal de propagation ainsi que les méthodologies qui permettent d'évaluer le niveau et l'importance de l'atténuation. Dans un second temps, les éléments caractéristiques de la dynamique des ces événements d'affaiblissements sont rappelés.

5.2.1 Méthodologie d'estimation du niveau d'atténuation

5.2.1.1 Les phénomènes d'affaiblissement

Les phénomènes atmosphériques affectent les radiocommunications par satellite pour des bandes de fréquences au-delà de 10GHz. L'affaiblissement qu'un signal de communication peut subir est la conjonction de plusieurs facteurs [79, 110] listés ci-après :

- atténuation due aux précipitations comme la pluie, la neige ou la grêle ;
- absorption par les éléments constitutifs de l'atmosphère (gaz notamment) ;
- atténuation due aux nuages ;
- atténuation due à la couche de neige ou de glace en fusion dans l'atmosphère ;

- atténuation due au bruit thermique de l’atmosphère ;
- atténuation due aux effets de convergence et divergence des ondes électromagnétiques ;
- perte du gain d’antenne due à l’incohérence du front d’onde ;
- scintillation et multi-trajets ;
- tornades de sable et poussière.

Chacun de ces facteurs d’atténuation a ses propres caractéristiques fonction de la fréquence, de la zone géographique concernée, de l’angle d’élévation.

De tous ces phénomènes d’affaiblissement, l’événement de pluie représente le facteur dominant de la dégradation que subissent les signaux radio pour les bandes de fréquences considérées [41]. Par conséquent, l’étude des phénomènes d’affaiblissement peut se réduire à celle des événements de pluie. En plus des éléments caractéristiques communs aux phénomènes d’atténuation (fréquence, angle d’élévation...), les affaiblissements dus à la pluie dépendent aussi de l’intensité et du type de pluie (température, taille des gouttes, ...). Ainsi l’intensité d’atténuation due à la pluie varie-t-elle d’une région à l’autre. En effet, les atténuations de plus de 20 dB causées par la pluie surviennent au moins pendant 0.1% du temps dans les zones de pluie subtropicales, et 0.01% du temps dans les zones de pluie sèche. Par ailleurs, la pluie est le seul phénomène de la liste ci-dessus qui exhibe une inhomogénéité spatiale pour les distances usuelles des systèmes de communications pas satellite [79].

5.2.1.2 Estimation des niveaux d’atténuation

La détection des atténuations en bande Ka est faite, en général, à la cadence de 1 Hz (une mesure par seconde) ; ce qui est suffisant pour caractériser la dynamique des événements d’affaiblissements dans cette bande de fréquence [66].

Il existe trois méthodes d’estimation [27, 91] de la qualité des liens de communications : la technique en *boucle ouverte*, la technique en *boucle fermée* et celle qui combine les deux précédentes techniques dite technique en *boucle hybride*.

La technique *boucle ouverte* s’appuie sur l’estimation, par une station terrestre du niveau d’atténuation qu’elle subit sur son lien montant. Pour ce faire, la station terrestre mesure l’atténuation sur une fréquence balise transmise dans la bande descendante (du satellite vers la station terrestre) ; puis un algorithme de conversion (*frequency scaling*) est utilisé pour traduire, en temps réel, l’atténuation mesurée en atténuation pour la fréquence montante.

La technique *boucle fermée*, quant à elle, emploie une mesure du niveau d’atténuation sur le lien de bout en bout (liaison montante + liaison descen-

dante). Pour séparer l'atténuation du lien montant de celle du lien descendant, on pourra encore utiliser l'algorithme du *frequency scaling* qui permet de traduire l'atténuation subie par une fréquence en celle d'une autre.

Enfin la technique *boucle hybride*, qui est une combinaison des deux méthodes précédentes, permet de s'affranchir de l'utilisation de l'algorithme de *frequency scaling*.

Des informations supplémentaires sur le gain de chacune de ces méthodes sont décrites au chapitre 5 de la revue finale COST 255 [18].

Le niveau d'atténuation détecté par l'une des méthodes précédentes est en général traduit en des critères de qualité de canal tels que le niveau nominal de la puissance de transmission, le rapport signal à bruit (SNIR), le taux d'erreur binaire (BER) ou le taux d'erreur paquet (PER). Les trois premiers critères traduisent la qualité du canal au niveau de la couche physique et le PER est un critère au niveau de la liaison de données.

5.2.2 Dynamiques des phénomènes d'affaiblissement

Pour la conception des systèmes de télécommunication par satellite il est nécessaire de connaître les caractéristiques dynamiques des effets atmosphériques d'atténuation ; cela afin d'optimiser la capacité du système et de satisfaire au mieux les critères de qualité et de fiabilité du système de communication.

Pour un niveau d'atténuation donné (i.e. pour les valeurs d'atténuation supérieures à un seuil donné), les éléments caractéristiques des niveaux d'affaiblissement sont [42, 78] : la *durée d'affaiblissement* c'est à dire la durée pendant laquelle le niveau d'atténuation est au-dessus du seuil admissible, la *durée d'inter-affaiblissement* qui représente la durée qui sépare deux événements consécutifs d'atténuation et la *pente d'atténuation* qui traduit la variation du changement d'atténuation en fonction du temps.

5.2.2.1 Durée d'affaiblissement

Description

Sa statistique permet d'estimer les périodes d'indisponibilité du système et donne ainsi une idée de la fiabilité du système. Elle est notamment utile pendant la phase de conception du système. En effet, elle est d'une importance capitale pour la conception d'un système de télécommunication par satellite. Elle influe directement sur plusieurs paramètres listés ci-après :

- La *période d'indisponibilité du satellite* : la statistique des durées d'affaiblissement permet de déterminer les périodes pendant lesquelles le système est susceptible d'être inopérant. Elle donne ainsi une idée de la fiabilité et de la continuité de service.

Une distinction est néanmoins faite entre les durées d'affaiblissement plus grandes et celles plus faibles que dix secondes. En effet selon Grémont et al [66] qui citent les recommandations CCIR/CCIT, une durée d'affaiblissement de moins de 10 secondes contribue à la *coupure* du réseau, et si la durée est au-delà des 10 secondes, on dit que le système est *indisponible*. Les courtes durées d'affaiblissement sont le plus général associées aux phénomènes de scintillation (leur durée est de l'ordre de la seconde) [78]; et les longues durées sont associées aux phénomènes tels que les orages [66].

- *Choix des modes FMT* : pour les systèmes de communication par satellite, le canal de propagation produit des erreurs en bloc ; ainsi la statistique des durées d'affaiblissement permet de choisir la taille appropriée des paquets à transmettre, et donc le choix du couple modulation et codage.
- *Evaluation de la capacité moyenne* : la statistique des durées d'affaiblissement permet d'évaluer la proportion de temps pour laquelle un mode FMT est actif et donc de déterminer les efficacités spectrales offertes par le système pour une période de temps donnée.

Modélisation

La durée d'affaiblissement peut être modélisée par deux différentes fonctions de distribution cumulative :

- La probabilité d'occurrence pour une atténuation de seuil A excédant un temps D donné, $P(d > D | a > A)$. Cette probabilité est évaluée en calculant le ratio entre le nombre d'atténuations de durées d plus grandes que D sur le nombre total d'atténuations observées, pour une valeur d'atténuation excédant un seuil A fixé.
- La probabilité cumulative de la fraction de temps pour qu'une atténuation de seuil A excède un temps D donné, $F(d > D | a > A)$. Ce nombre peut être vu comme le ratio de la proportion de temps lorsque la durée d'atténuation excède le temps D sur le temps total pendant lequel les atténuations surviennent, étant donné que le seuil A est excédé.

La première fonction tient compte du nombre de fois où le seuil d'atténuation est excédé et la seconde fonction traduit la proportion de temps pendant laquelle le seuil est dépassé par le niveau d'affaiblissement.

Ces deux fonctions sont décrites par des fonctions de distribution de type *puissance* si la durée D est inférieure à un seuil D_t (on parle d'affaiblissement de faible durée) et par une fonction de type *log-normal* au delà de ce seuil D_t (on parle d'affaiblissement de longue durée). Le seuil entre ces deux lois est voisin de 30s selon le rapport final de COST 205 [3].

Selon Van de Kamp et Castanet [42], les distributions statistiques obtenues pour les deux types d'affaiblissement (longue et courte durées) sont identiques pour toute région du globe terrestre; elles sont donc indépen-

dantes des conditions météorologiques. En revanche, elles dépendent du niveau d'atténuation.

Quelques statistiques

Les recommandations ITU-R P.618 [79] et ITU-R P.1623 [78] permettent d'avoir les statistiques des durées d'atténuation pour toutes les zones géographiques en se fondant sur le modèle de Paraboni et Riva [111]. Ces statistiques donnent le temps total pendant lequel un seuil d'atténuation est excédé comme illustré sur la figure 5.2. Elles donnent également la probabilité d'avoir une certaine durée d'atténuation (tableau 5.1). Sur cette figure, on peut lire, par exemple, que les atténuations de plus de 6 dB surviennent pendant 0.1% du temps d'une année moyenne.

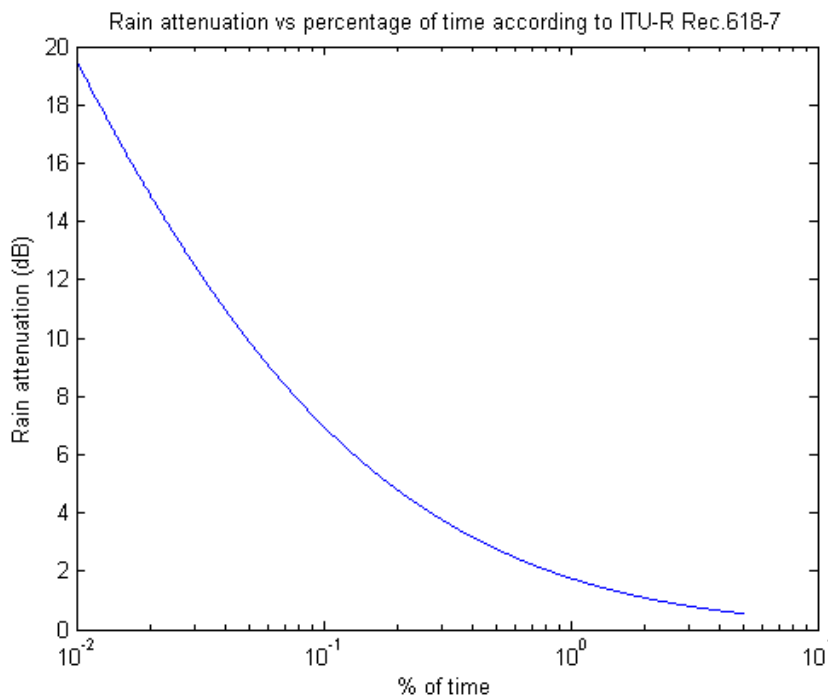


Figure 5.2 Exemple du CDF de l'atténuation due à la pluie sur la voie montante ($f=20\text{GHz}$ latitude= 43.6° , élévation= 30.68° , $R_{0.01} = 35\text{mm/h}$)

Par ailleurs les remarques suivantes peuvent être soulignées :

- Les phénomènes d'atténuation de longue durée sont plus rares que ceux de faible durée pour une fréquence donnée.
- Comme le montre la courbe de la figure 5.2, la fraction de temps pendant laquelle une atténuation survient diminue lorsque le niveau de l'atténuation augmente.
- Les faibles atténuations ont des durées plus grandes que les fortes atténuations.

	20 GHz	30 GHz	40 GHz
10 s	0.4	0.3	0.25
1 min	0.2	0.13	0.085
5 min	0.055	0.05	0.032
10 min	0.024	0.022	0.017
30 min	0.004	0.005	0.005
1 heure	0.0012	0.0017	0.0017

Table 5.1 Exemple de probabilités d'occurrence de durées pour une atténuation de 10 dB à différentes fréquences

5.2.2.2 Durée d'inter-affaiblissement

Cette statistique caractérise la durée entre la fin d'un affaiblissement de seuil A et le début d'un autre affaiblissement qui excède le même seuil. Cela renseigne sur la probabilité d'occurrence du même niveau d'atténuation.

Des expérimentations tendent à montrer que cette statistique suit une distribution *log_normale* ; cependant la durée d'inter-affaiblissements dus aux scintillations suit une loi *puissance* [78].

5.2.2.3 La pente d'affaiblissement

Description

La pente d'atténuation traduit la variation du niveau d'atténuation sur une période de temps. Elle est définie suivant l'équation (5.1) :

$$\zeta(t) = \frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} \quad (5.1)$$

où $A(t)$ est la valeur d'atténuation à l'instant t .

La connaissance de la valeur de la pente d'atténuation est utile à la fois pour définir la boucle de contrôle FMT qui servira à suivre les variations de la courbe d'atténuation pour un signal donné, et pour permettre une meilleure prédiction à court terme des conditions de propagation nécessaire en raison du temps de propagation important intrinsèque aux systèmes satellitaires.

Pour le calcul de la pente, seules les variations lentes des atténuations sont utiles ; les variations rapides notamment celles dues aux phénomènes de scintillation sont gommées par filtrage [42, 78].

La pente de la courbe d'atténuation dépend de paramètres climatiques (la distribution de la taille des gouttes de pluie, le type de pluie, la vitesse horizontale du vent..), l'angle d'élévation et le temps d'intégration du récepteur.

Modélisation

Plusieurs modèles empiriques des pentes d'atténuation sont donnés dans la littérature et listés dans [42]. Cependant, c'est le modèle de Van de Kamp [41] qui donne les fonctions de distribution cumulative (CDF) et de densité de

probabilité (PDF) des pentes d'atténuation qui est le plus utilisé. Ce modèle a été approuvé par le groupe d'étude sur la propagation de l'ITU -ITU-R Study Group 3- pour être publié dans la recommandation ITU-R P.1623 [78].

Quelques statistiques

L'analyse des pentes d'atténuations permet d'aboutir aux remarques suivantes :

- Plus le niveau d'atténuation est élevé plus la pente devient forte [42], i.e. les pentes les plus fortes apparaissent pour les fortes valeurs d'atténuation. Ainsi le calcul d'une forte pente d'atténuation renseigne sur la valeur potentiellement forte de l'atténuation qui survient.
- "Le niveau d'atténuation croît plus vite qu'il ne décroît en moyenne" [126, 127]. Cela s'explique par le fait que les pluies fortes, génératrices de fortes atténuations, se déclenchent plus rapidement qu'elles ne s'arrêtent. Ainsi les chutes de qualités sont plus abruptes que les améliorations des conditions de propagation (le niveau d'atténuation chute plus vite qu'il ne remonte).
- Selon Schnell et Fiebig [126], à 40 GHz, les pentes d'atténuations peuvent atteindre 3.2 dB/s. Cependant pour 99.9% du temps pendant lequel survient les atténuations, les pentes d'atténuations sont inférieures à 1.9 dB/s; et pour 90% du temps, ces pentes n'excèdent pas 0.9 dB/s. Du reste, le pic d'atténuation survient pour moins de 0.001% du temps et n'apparaît que sur un seul et même événement de pluie.

Ces résultats couvrent la période de l'été, de juin à août, qui renferme les plus forts affaiblissements atmosphériques comparés aux autres périodes de l'année. Les événements d'atténuation, au nombre de 127, couvrent 43 jours sur 92 jours, pour un temps total de 59.4 heures (sur un total de 2208 heures soit 2.7% du temps total). Il est à noter que bien évidemment les pentes d'atténuation rencontrées sont plus fortes que si l'on considérait un système en bande Ka [122].

- Dans la référence [42] des valeurs typiques pour les atténuations en bande Ka sont données :
 - ★ moyenne des pentes d'atténuation en Europe ~ 0.3 dB/s;
 - ★ Valeur maximale pour 0.01% d'une année moyenne 0.6 dB/s;
 - ★ Les valeurs maximales absolues excèdent 1 dB/s;
 - ★ Durant les études OPEX, les pentes maximales obtenues ont été de l'ordre de 1.8 dB/s.

5.2.3 Conclusion

Pour une fonction CAC, la stabilité de la capacité offerte par le système est un atout majeur. Malheureusement, les études menées ont montré que les valeurs des pentes d'atténuation conduisent à une chute en très peu de

temps des valeurs de capacité. En effet, entre deux modes FMT, il est de coutume d'avoir 2 ou 3 dB de marge ; avec la valeur de pente moyenne de 0.3 dB/s, le changement de mode peut se faire en moins de 10 secondes. Cela est très faible par rapport aux durées conventionnelles des connexions.

Par ailleurs, il est intéressant d'avoir une vision globale du phénomène d'atténuation afin de non seulement réduire le niveau d'interférence entre les terminaux mais aussi d'adapter la décision d'admission en fonction du comportement global.

Ainsi devient-il obligatoire d'anticiper les baisses de capacité, à la fois pour le terminal individuel et pour l'ensemble des terminaux dans la zone de service, pour une politique de décision adéquate pour la fonction CAC.

5.3 Prédiction de l'évolution du canal

Le caractère adaptatif d'une fonction CAC provient de sa capacité à prendre en compte les conditions présentes et futures de propagation et/ou de trafic dans sa politique d'admission. Pour ce faire, tout comme pour les procédures FMT, il est nécessaire d'anticiper les moments d'apparition des affaiblissements, d'évaluer leurs niveaux et d'en prévoir si possible les durées. Ainsi la décision d'admission des connexions ne dépendra pas uniquement de l'instant courant, mais de ce qui pourra survenir pendant la durée de vie de la connexion.

Une fonction CAC adaptative a donc besoin de modèles statistiques et dynamiques, dans le temps et dans l'espace, des variations de la capacité offerte par le système. Ces informations doivent concerner à la fois la qualité du canal vue par l'utilisateur individuel et celle au niveau du spot global. En effet, les décisions d'admission de connexion sont prises en se fondant sur la capacité globale de la zone de service (pour l'ensemble des terminaux) mais elles sont limitées par les conditions particulières de transmission de chaque terminal.

5.3.1 Evolutions spatiale et temporelle des affaiblissements

L'étude des variations spatio-temporelles des affaiblissements permet de définir la corrélation qui peut exister dans le temps et dans l'espace entre les valeurs d'atténuation observées à la fois sur l'ensemble de la zone de service et sur le lien de transmission individuel de chaque terminal.

5.3.1.1 Affaiblissement et variabilité spatiale

L'analyse de la variabilité spatiale des phénomènes d'atténuation permet d'estimer l'état du canal de propagation pour une zone de service donnée à un

instant donné. On obtient ainsi une vue à grande échelle des affaiblissements qui surviennent et donc les besoins des terminaux au niveau du spot en entier. Ainsi peut-on tenir compte de l'ensemble des terminaux pour les procédures de gestion de ressources.

De plus, une vue globale des qualités de transmission des terminaux permet d'harmoniser le niveau d'interférence mutuelle née des différents choix de mode FMT [46]. En effet, une augmentation de puissance pour un terminal peut résulter en une hausse d'interférence pour les terminaux adjacents et dégrader leurs conditions de transmission. La vue globale des niveaux d'atténuation permet donc d'optimiser le choix des modes FMT alloués aux terminaux dans une même zone géographique, notamment l'adaptation de puissance.

Les affaiblissements dus à la pluie sont prépondérants dans les phénomènes d'atténuation que subissent les liens de communications. La variabilité spatiale est donc, en général, étudiée pour une zone donnée en ne considérant que l'évolution des cellules de pluie¹.

Plusieurs modèles de variations spatiales sont décrits dans la littérature. On trouve des approches stochastiques [10], des approches à base de fractales [95] et des approches cellulaires (modèle Excell [64] et Hycell [58]). Ces modèles présentent l'inconvénient de nécessiter plusieurs paramètres et d'être donc très complexes à mettre en œuvre.

Une autre approche est l'utilisation de l'imagerie par radars météorologiques pour suivre les mouvements des nuages [46]. Cette approche donne des résultats satisfaisants pour de petites surfaces de la zone de service. Pour appréhender l'évolution des cellules de pluie sur toute la zone de service, un réseau de radars est nécessaire. Mais cette solution présente l'inconvénient de ne pas donner d'informations fiables sur l'intensité effective des atténuations.

De plus les informations sur l'état du canal sont remontées par les radars toutes les 15 à 30 minutes ; entre deux remontées, l'état du canal n'est pas connu. C'est un inconvénient pour la fonction CAC car un affaiblissement fort entre les deux instants de remontée peut ne pas être anticipée. Il est donc nécessaire de développer des modèles d'interpolation pour estimer l'état du canal sur des échelles de temps proches des durées classiques des connexions (quelques minutes).

5.3.1.2 Affaiblissement et variabilité temporelle

La variabilité temporelle consiste à se focaliser sur le terminal individuel, sur l'état de son canal sans se préoccuper de l'état des autres terminaux. Cette information permet donc d'adapter la décision d'admission à l'état réel

1. La prise en compte de tous les phénomènes d'atténuation est un problème ardu ; une tentative d'approche est donnée par Panagopoulos et al [110].

du canal vu par le terminal individuel. Elle est utile pour les prises de décision à la fois pour l'allocation des modes FMT et les décisions d'admission des nouvelles connexions.

Les caractéristiques de l'évolution temporelle des atténuations ont été étudiées surtout pour améliorer les décisions d'attribution des modes FMT. Ainsi de nombreux modèles de prédiction très court-terme, de l'ordre quelques secondes, ont été développés. Des exemples de ces modèles sont donnés dans les références suivantes [35, 66, 86].

La variation temporelle des affaiblissements se traduit en général en série chronologique d'atténuation, i.e. la donnée des valeurs du rapport $Eb/N_{orequis}$ au cours du temps. Cette génération de série temporelle exploite notamment la prédiction des pentes d'atténuation (voir la section 5.3.2 pour plus de détails).

5.3.1.3 Affaiblissement et variabilité spatio-temporelle

Les modèles d'évolution spatio-temporelle permettent d'évaluer la probabilité d'une requête simultanée des mêmes besoins par l'ensemble des terminaux dans la zone de service (par exemple la proportion d'utilisateurs nécessitant un mode FMT donné). Ainsi connaît-on l'évolution de la capacité globale nécessaire pour les décisions d'admission de connexions. Les modèles spatio-temporels permettent donc de tirer grand bénéfice de la couche physique adaptative.

Plusieurs travaux de recherches s'attellent à développer des modèles d'évolution spatio-temporelles [73, 107]. Malheureusement ces modèles exhibent des charges de calcul assez importantes ce qui les rend difficilement exploitables dans un contexte temps-réel. Pour exemple, le NWP met environ deux heures pour la première prédiction du fait de l'assimilation des données initiales [46].

De plus, ces modèles ont une échelle spatiale très grande par rapport aux zones de réception des terminaux individuels. Ils ne tiennent, par conséquent, pas compte des petites cellules de pluie qui conduisent malheureusement à de fortes atténuations. Ainsi les valeurs d'atténuations prédites sont le plus souvent très différentes des valeurs réelles.

Les améliorations proposées par Watson et Hodges [73] consistent à y inclure plus de paramètres et donc à augmenter la charge de calcul. C'est donc un frein pour la fonction CAC qui est une application quasi temps réel.

5.3.2 Méthodes de prédiction : état de l'art

Les méthodes de prédiction décrites dans la littérature consistent à définir, en avance, les caractéristiques des paramètres des phénomènes d'atténuation, notamment l'instant de survenue des atténuations et les durées correspondantes. Deux types de prédiction sont le plus souvent utilisés : les

prédictions statistiques qui traitent des évolutions à long terme des phénomènes d'atténuation et les prédictions dynamiques qui caractérisent, en temps-réel, l'évolution des affaiblissements.

5.3.2.1 Prédictions Statistiques

Traditionnellement les méthodes de prédiction telles que le modèle d'atténuation due à la pluie développé à la fois dans les recommandations ITU-R P.618 [79] et ITU-P.1623 [78] et dans les références suivantes [21, 23, 94] traduisent des statistiques à long terme (statistiques sur une ou plusieurs années).

Ces statistiques, comme illustrées sur la figure 5.2, donnent en général les proportions de temps pendant lesquelles un niveau d'atténuation est excédé (la durée d'un phénomène d'atténuation sur une année moyenne) ou la probabilité qu'un seuil d'atténuation soit dépassé pour une zone donnée. Elles sont le plus souvent obtenues en comptant les niveaux d'atténuation survenus dans une zone géographique donnée. Braten et al. [21] traduisent les statistiques obtenues, sur une période de cinq ans, par la mesure du niveau de puissance d'une fréquence balise avec le système ACTS².

Ces statistiques servent surtout au choix des paramètres pour l'ingénierie système afin d'évaluer les valeurs de disponibilité et les performances à offrir, ainsi que le choix des modes FMT. En effet, du fait de leur manque de "dynamique", elles ne renseignent pas sur l'état réel du canal et sont donc difficilement exploitables par la fonction CAC. Néanmoins, on trouve des exemples d'utilisation [97] de ces statistiques pour l'implantation d'une fonction CAC.

Il est de ce fait nécessaire de se pencher sur les caractéristiques dynamiques des phénomènes d'atténuation et d'en évaluer les paramètres (pente d'atténuation, durée d'atténuation et la durée d'inter-affaiblissement) dès que l'on doit mesurer la qualité des liens de communication et d'activer en temps réel, au besoin, les techniques de contre-mesure comme décrites dans [68], d'une part, et d'adapter la politique d'admission des connexions d'autre part.

5.3.2.2 Prédictions Dynamiques

La prédiction dynamique servira notamment à définir la prochaine valeur d'atténuation et la durée de celle-ci afin d'anticiper les moments de réduction de la capacité. Cette anticipation est nécessaire du fait du long délai de propagation des systèmes de télécommunication par satellite. Ainsi les décisions d'allocation de ressources sont prises au moment opportun. D'autre

2. ACTS (Advanced Communications Technology Satellite) est un programme de mesure de l'influence des phénomènes atmosphériques et évaluation des niveaux d'atténuation, déployé à Vancouver, au CANADA, pour les systèmes satellitaires.

part, cette anticipation permet d'éviter des allers-retours intempestifs entre différents modes, ce qui est préjudiciable en terme de performance.

Pour ce faire, l'utilisation des pentes d'atténuation pour générer des séries chronologiques est communément admise.

Prédiction et pente d'atténuation

En général, trois techniques de calcul de pentes d'atténuation sont utilisées [27, 42] :

- La technique dite de *translation* : $A(t + \delta t) = A(t)$; on suppose que l'atténuation reste constante sur une durée donnée ; en générale cette durée est prise faible.
- La technique dite de *pente constante* où l'on suppose une variation linéaire des valeurs d'atténuations pendant la durée de prédiction. Ainsi $A(t + \delta t) = A(t) + \delta t * \frac{A(t) - A(t - \Delta t)}{\Delta t}$. La pente est remise à jour au fur et à mesure ;
- Le *modèle ONERA-ESA* à deux paramètres qui donne la densité de probabilité de l'atténuation prédite en tenant compte de deux valeurs précédentes $p(A) = p(A(t + \Delta t) | A(t), A(t - \Delta t), \Delta t)$. Ce modèle est celui qui donne le moins d'erreur de prédiction [13, 27, 41] . Il est de ce fait le plus utilisé.

Génération de séries chronologiques

La série chronologique consiste à traduire les valeurs d'atténuations subies en paramètres de qualité de la liaison comme le rapport $\frac{E_b}{N_0}$. Plusieurs références traitent de ce problème :

- Kastamonitis et al. [86] ont montré qu'en prenant une pente constante moyennée sur trois échantillons (un échantillon par seconde) on aboutit à une bonne estimation de la valeur d'atténuation. Ils soutiennent par ailleurs que prendre plus de trois secondes pour "moyenner" la pente n'améliore pas les résultats. Enfin ils montrent que l'utilisation de la modélisation de la pente ONERA-ESA permet une estimation fiable jusqu'à 14 secondes.
- Choi et Chan [35] ont montré une estimation des valeurs d'atténuation par une prédiction autorégressive : ils prédisent l'échantillon à 1 seconde avec une marge d'erreur à $\pm 0.5dB$ et à 4 secondes avec une marge d'erreur à $\pm 1dB$.
- Grémont et al [66] présentent une méthodologie de génération de série temporelle qui repose sur un modèle autorégressif à moyenne mobile (ARMA). Ce modèle de prédiction court terme de type MMSE prédit à une seconde près la valeur d'atténuation. Si on la couple avec une approche de minimisation de la variance, on obtient une prédiction au-delà de la seconde. Bien évidemment l'erreur d'estimation augmente avec la période d'estimation.

- Les universités de Bath et de Portsmouth [69] ont développé un modèle de prédiction des atténuations qui combine l'analyse numérique de prédiction météorologique (Numerical Weather Prediction- NWP) avec des données de surveillance radar des atténuations. Le NWP [73] est un modèle à grande échelle (plusieurs km) qui comporte des données météorologiques spatio-temporelles de zones géographiques étudiées. Son inconvénient principal est qu'il n'intègre pas les pluies convectives qui sont à petite échelle et qui conduisent aux plus grandes baisses du niveau de qualité des liens radios. Pour combattre cette faiblesse, des informations radars, qui ont une meilleure résolution spatiale, sont utilisées. Hodges et Watson [73] utilisent le NWP pour prédire à un jour, voire deux jours, près les instants d'affaiblissement. Cependant les valeurs d'atténuation annoncées sont loin de celles réellement connues. A une échelle de temps plus courte, la série chronologique générée est conforme à la réalité (erreur de prédiction faible) [69].

Malheureusement la plupart des modèles de génération de série chronologique d'atténuation exhibent une échelle de prédiction de quelques secondes insuffisante pour la fonction CAC qui agit sur des échelles de temps de plusieurs minutes. Ces prédictions, dites prédictions à court terme, servent surtout à l'activation des modes FMT [66, 67]. Elles permettent d'annihiler l'effet du temps de propagation dans les réseaux de communication par satellite.

Prédiction des durées d'atténuation

La durée d'atténuation donne le temps pendant lequel un niveau d'atténuation est subi par un lien radio avant que la valeur nominale de cette atténuation ne dépasse un seuil défini. La prédiction des durées d'atténuation est primordiale pour une fonction CAC, comme nous l'avons démontré dans le chapitre précédent.

Cependant il est très difficile de déterminer ce paramètre en temps réel. Les exemples trouvés dans la littérature reposent essentiellement sur les statistiques de la durée d'atténuation obtenues par les recommandations ITU-R.P618 [79] et décrit par Paraboni et Riva dans [111].

Par exemple, Malagyn et Filip [97] enregistrent dans une table les durées statistiques espérées pour chaque niveau défini d'atténuation. Puis à chaque fois qu'un seuil est atteint, la durée afférente est lue et utilisée pour adapter la politique d'admission. Pour corriger les éventuelles différences entre les deux valeurs (valeur réelle de la durée d'atténuation et valeur statistique), ils suggèrent d'enregistrer la valeur réelle de la durée d'atténuation et de corriger au besoin les données du tableau par le biais d'un réseau de neurone.

Une méthode communément admise est de supposer que la variation de

l'atténuation est constante sur de courtes durées (de l'ordre de la seconde) [41, 86].

5.3.3 Conclusion

De l'étude des méthodes de prédiction menée dans ce chapitre, il ressort plusieurs points que nous reprenons ici.

Tout d'abord, il ressort que les méthodes de prédictions statistiques sont très utiles pour l'ingénierie système quant aux choix des paramètres tels que les types de terminaux, les débits à offrir, la QoS à fournir (BER, disponibilité...), les modes FMT à implanter, etc. Cependant, du fait de leur manque de dynamique, elles ne procurent qu'une faible valeur ajoutée pour la fonction CAC qui est un mécanisme quasi temps réel.

En ce qui concerne les méthodes de prédictions dynamiques, l'étude des fonctions d'autocorrélation des principaux facteurs d'affaiblissement menée dans [27] a montré que les phénomènes de scintillation étaient totalement décorrélés au bout de 3 secondes, les rendant du coup non prédictibles. Cette étude a aussi montré que l'atténuation due à la pluie est encore corrélée jusqu'à 30 secondes, mais que ces corrélations chutaient assez vite au-delà [27], rendant du coup l'atténuation difficilement prédictible pour des durées de plusieurs minutes.

Cela souligne ainsi que les échelles de temps pour la prédiction des valeurs d'atténuation sont de quelques secondes. Elles sont donc difficilement exploitables pour la fonction CAC qui agit sur une échelle de temps de l'ordre de quelques minutes. Néanmoins, elles sont très utiles pour le contrôleur FMT qui agit à une échelle de temps de l'ordre de la période de formation de trames (26.5 ms ou 53 ms selon le standard DVB-RCS).

Cette faible échelle de temps implique aussi qu'il n'est pas aisé de prédire de manière dynamique la durée d'une valeur d'atténuation, et donc de la capacité qui en découle. Ceci est préjudiciable pour l'implantation d'une fonction CAC adaptative.

En réalité, pour la fonction CAC c'est l'estimation de l'évolution de la capacité offerte par le système en fonction des valeurs d'atténuations subies par les terminaux qui importe. Malheureusement, à grande échelle, cette transcription de la valeur d'atténuation en valeur de capacité n'est pas triviale.

En effet, il faut noter que deux valeurs différentes d'atténuation peuvent conduire au choix d'un seul et même mode FMT, et donc à une seule efficacité spectrale. En outre, une même valeur d'atténuation mesurée par deux terminaux différents peut conduire au choix de modes FMT distincts en fonction des terminaux. Par ailleurs, le choix d'un mode FMT pour un terminal donné, surtout en ce qui concerne le contrôle de puissance, peut influencer

sur celui des terminaux adjacents. Une vue globale de la zone de service est donc nécessaire.

Cependant, les modèles spatio-temporels, qui tentent d'appréhender cette vue globale du comportement des terminaux en cas d'atténuation, nécessitent des puissances de calcul élevées du fait du très grand nombre de leurs paramètres et/ou offrent une granularité spatiale très grande comparée à la taille des terminaux individuels.

De plus, ces modèles d'évolution spatio-temporelle des cellules de pluie s'attachent généralement à la description de modèles hydrologiques qui donnent les niveaux de pluie ou d'atténuation à la surface de la zone de service. Il convient donc d'y introduire une fonction de transfert des niveaux d'atténuation en paramètres de qualité du lien de communication. Cela permettra, par la suite, de déterminer les efficacités spectrales des porteuses du système. Cette fonction n'est pas simple à implanter, car les terminaux partant de conditions initiales différentes ne réagissent pas de la même manière à une valeur d'atténuation donnée.

En définitive, il n'existe pas en l'état actuel de la recherche de modèles spatio-temporels adéquats pour l'implantation de fonctions CAC adaptatives.

Ces remarques soulignent la difficulté d'évaluer de manière dynamique les évolutions de la capacité offerte par le système, et donc d'implanter de manière efficace un CAC adaptatif dans un système réel. La vue générale présentée sur la figure 5.1 pour la fonction CAC devient donc assez difficile à implanter en l'état actuel de la recherche. Il convient dès lors d'adopter une approche plus simple pour la fonction CAC.

5.4 CAC adaptatif : Recommandations

La section précédente a permis de relever les difficultés liées à l'implantation d'une fonction CAC adaptative telle que illustrée sur la figure 5.1 : temps de prédiction très court des valeurs d'atténuation, absence de modèles de variations spatio-temporelles adéquats pour la fonction CAC, pente d'atténuation très forte de sorte que les chutes de capacité peuvent être drastiques en très peu de temps, etc.

Afin de pallier ce manque d'information il convient, néanmoins, d'adopter une démarche assez simple qui sépare le cas de figure où les atténuations interviennent sur la Gateway/NCC et celui où les phénomènes d'affaiblissement dégradent les performances d'un groupe restreint de terminaux [138]. La politique de la fonction CAC s'adaptera donc à l'une des deux configurations.

5.4.1 CAC et localisation du phénomène d'affaiblissement

La localisation de l'événement d'affaiblissement sur un des équipements du système de communication a des répercussions différentes sur le niveau d'atténuation globale de la capacité. En effet une pluie sur une gateway et une pluie sur un ensemble localisé de terminaux n'ont pas la même influence sur la capacité offerte par le système. Ainsi, pour une fonction CAC adaptative, deux configurations se présentent : la première correspond à une atténuation sur la Gateway et la seconde correspond à l'atténuation sur des terminaux satellites. Une atténuation sur la Gateway a une influence sur l'ensemble des terminaux du réseau de communication, alors que dans l'autre cas, seuls quelques terminaux sont influencés.

5.4.1.1 Pluie sur la Gateway/NCC

L'architecture de référence (figure 4.1) adoptée pour cette étude suggère que toutes les communications des terminaux satellites transitent par une passerelle, la Gateway/NCC. Cette dernière joue donc le rôle d'interface entre le réseau satellitaire et le réseau des fournisseurs de données et d'application, et plus globalement Internet. Ainsi tous les bilans de liaisons pour les liens de la voie retour partagent en commun les performances de la liaison descendante (satellite vers Gateway/NCC).

Par conséquent, lorsqu'un événement d'atténuation survient sur la Gateway/NCC, tous les terminaux subissent le contrecoup en terme de bilan de liaison, et se voient alors allouer des modes FMT dégradés : la capacité globale offerte par le système s'en trouve alors fortement modifiée. Il convient alors d'adopter une politique de CAC assez restrictive qui prenne en compte cette baisse de capacité globale et individuelle ressentie par tous les terminaux de la zone de service.

Néanmoins, il est bon de remarquer que du fait de la disparité du bilan de liaison initial, la dégradation des modes FMT n'est pas vécue de la même façon par tous les terminaux de la zone de couverture. En effet, les modes FMT initiaux sont dégradés suivant la position de chaque terminal dans la zone de couverture et suivant le niveau de l'atténuation vécue par la Gateway/NCC. Ainsi cette dégradation de la capacité globale peut être atténuée par la qualité de transmission des terminaux qui se trouvaient initialement dans les meilleures conditions de transmission.

5.4.1.2 Pluie sur les terminaux

Les cellules de pluie, de par leur rayon d'action conventionnel, ne couvrent qu'une partie, de 10 à 15%, de la surface d'un spot [59, 104]. Par conséquent, la survenue d'une cellule de pluie dans la zone de service des

terminaux usagers n'affectera qu'une faible portion de terminaux ; et donc qu'une faible partie de la capacité globale offerte par le système. La politique d'admission de la fonction CAC s'en trouve alors moins influencée que dans le cas précédent : la plupart des terminaux se trouvant en mode *ciel clair*, la politique d'admission de la fonction CAC peut rester insensiblement inchangée. Cependant, les terminaux qui se trouvent sous la cellule pluie doivent avoir une attention particulière de la part de la fonction CAC. Pour ces terminaux, une politique restrictive qui se fonde sur la variation court-terme des qualités du lien de transmission peut être mise en place.

Néanmoins, Il est bon de noter que ce ne sont pas les mêmes terminaux qui se trouvent sous la cellule de pluie. En effet, du fait du déplacement des cellules de pluie dans la zone de service, un terminal ne subit le contrecoup des atténuations que pour une durée de temps fonction de la vitesse de la cellule de pluie [59]. Aussi la politique restrictive n'est-elle valable, pour un terminal donné, que pendant cette durée restrictive et non pendant la durée globale, typiquement une heure, du phénomène atmosphérique qui occasionne ces atténuations.

5.4.1.3 Récapitulatif

L'algorithme de la fonction CAC est récapitulé sur le schéma de la figure 5.3.

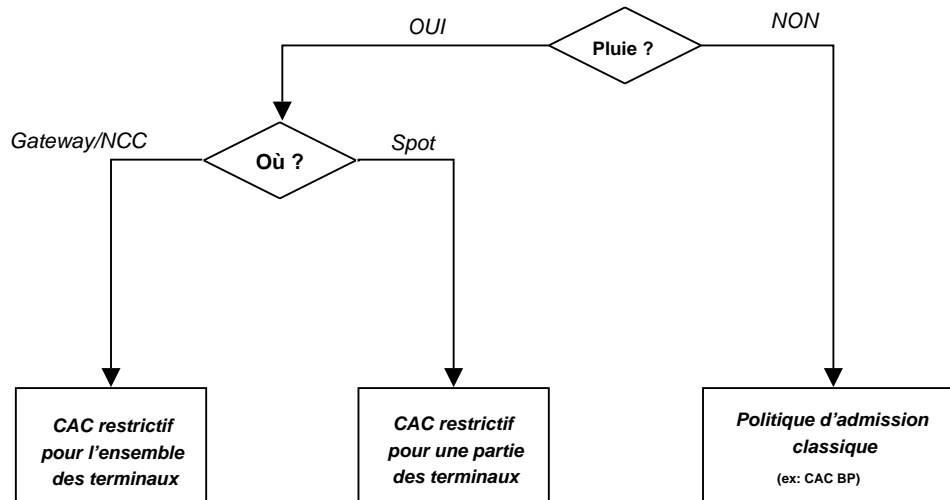


Figure 5.3 Algorithmie générale pour une fonction CAC adaptative

Le choix des politiques d'admission dans chacun des trois cas de figure, ciel clair, pluie sur la Gateway/NCC et pluie sur un ensemble de terminaux, doit obéir aux critères tels que spécifiés à la section 3.3.1.

5.5 Cas pratique : pluie sur la Gateway/NCC

Pour l'étude d'un cas pratique, nous avons décidé d'évaluer pour chaque niveau d'atténuation qui survient sur la Gateway/NCC, la capacité globale qu'un système de télécommunications fournit aux usagers dans un spot.

Le système SATSIX [76] décrit dans l'annexe C sert de base pour cette évaluation de capacité.

5.5.1 Modélisation

Le système est composé de M modes FMT. On note p_i^a , $i = 1 \dots M$, la proportion de terminaux éligibles³ pour le mode i d'efficacité spectrale eff_i lorsque la Gateway/NCC subit une atténuation de a dB.

Dans un système multispot une bande passante totale B est allouée par spot. Cette bande de fréquence est subdivisée en plusieurs porteuses avec des fréquences de gardes entre les porteuses. Aussi, une portion de cette bande B est-elle utilisée pour les procédures de "logon" comme le spécifie le standard DVB-RCS [48]. On définit dès lors la bande utile par spot, B_{utile} , comme la proportion de B réellement dévolue aux trafics usagers :

$$B_{utile} = B - (B_{garde} + B_{logon})$$

La capacité $C_a(t)$ lorsque la Gateway subit une atténuation de niveau a à l'instant t est donnée en débits utiles ou débits ATM par l'équation (5.2).

$$C_a(t) = \left(\sum_{i=1}^M p_i^a * eff_i \right) B_{utile} \quad (5.2)$$

5.5.2 Evaluation des capacités

La valeur de disponibilité à atteindre pour le système donne la valeur maximum d'atténuation à couvrir pour le système. Pour 99.9% de disponibilité, une marge de 15.3 dB est à couvrir.

Pour avoir les différentes valeurs de $C_a(t)$ nous avons fait varier au niveau de la Gateway/NCC, la perte due à la pluie de $a = 0$ à $a = 15.5$ dB en dénombrant à chaque fois le nombre de terminaux, dans chaque spot, éligibles pour le mode i . Ces proportions permettent de calculer les capacités offertes par le système suivant l'équation (5.2).

La disparité au niveau de la taille et des positions est de sorte que trois types de spot sont identifiables : les spots à capacité haute, ceux à capacité basse et enfin ceux à capacité moyenne. Des 40 spots qui permettent de

3. Un terminal est éligible pour un mode donné lorsque ses conditions de transmission donnent la meilleure efficacité spectrale avec les paramètres du mode donné

Atténuation (dB)	0	5	9	11.5	13.5	15.5
Spot 8	100	95.58	89.73	85.17	80.68	76.98
Spot 23	100	96.69	91.97	87.79	84.66	79.30
Spot 17	100	97.81	93.5	89.68	84.77	77.26

Table 5.2 Proportion (en %) de capacité par rapport à la capacité *ciel clair* pour différentes valeurs d’atténuation sur la Gateway/NCC

couvrir la surface de la zone de couverture, nous avons les trois représentants suivants : spot 8 (meilleur spot), spot 23 (spot moyen) et spot 17 (spot à capacité basse).

Les valeurs de capacité trouvées, pour quelques valeurs d’atténuation, sont données dans le tableau 5.2. Ces valeurs sont présentées comme la proportion restante de la capacité initiale à 0 dB (condition *ciel clair*) pour différents niveaux d’atténuation. Ces résultats ont été obtenus en ne considérant que les terminaux de type collectifs et donc très performants.

5.5.3 Analyse

Les plus fortes chutes potentielles de capacité sont de l’ordre de 20 à 25% de la capacité offerte en condition *ciel clair*. Cette “faiblesse” relative des chutes de capacité pour de fortes atténuations sur la Gateway/NCC s’explique par deux aspects du système. D’une part, le lien montant (lien terminal utilisateur vers satellite) qui est le lien dimensionnant est en condition *ciel clair*. D’autre part, les terminaux collectifs sont assez performants et offrent de ce fait de grands débits même en condition de pluie.

Néanmoins, les valeurs de capacité obtenues lors des phénomènes d’affaiblissement représentent les pires capacités. En effet, lorsque la pluie se déclenche dans la zone de service des terminaux utilisateurs, cela laisse la majorité des terminaux en condition ciel clair ; la baisse de capacité y est encore plus faible.

5.5.4 Politique d’admission

Nos deux politiques d’admission, pessimiste et optimiste, peuvent être adoptées ici selon le niveau de qualité de service que le gestionnaire de système veut offrir aux usagers.

5.5.4.1 Politique pessimiste

Si l’on veut assurer à toutes les connexions admises qu’elles se déroulent sans que leurs critères de qualité soient entravés, il suffit d’adopter la politique pessimiste d’admission. Cette position peut être justifiée par la “fai-

blesse” de la chute de capacité offerte par le système en cas de pluie forte sur la Gateway/NCC.

Ainsi les 80% de capacité valable dans le pire cas de propagation servent à la décision d’admission des connexions ; et les 20 à 25 % de capacité non prises en compte par la fonction CAC, pourraient notamment servir aux connexions non temps réel et non prioritaires.

Cependant, il convient de souligner que cette solution souffre de la sous-utilisation de la capacité, car en général (pour environ 90% du temps) la Gateway/NCC est en condition ciel clair.

5.5.4.2 Politique optimiste

Pour augmenter le taux d’utilisation de la capacité, on peut adopter notre politique de CAC optimiste. Pour ce faire, on définit de manière fixe des valeurs de capacité sur lesquelles les décisions d’admission seront prises à chaque requête de connexion. En effet, il suffit de considérer des paliers de capacité correspondant à des valeurs typiques de la capacité telle que calculée précédemment.

Chaque palier de capacité peut être vu comme la prise en compte d’une marge dans l’évaluation de la capacité. En effet, les paliers choisis seront valables non pas pour une seule et unique valeur d’atténuation sur la Gateway/NCC mais pour une gamme de niveau d’affaiblissement. Ainsi, deux valeurs différentes d’atténuation peuvent conduire au choix d’un seul et même palier de capacité. Par conséquent, la valeur de capacité sur laquelle les décisions d’admission sont prises reste *relativement* constante pour une durée plus longue : l’hypothèse pour le CAC optimiste peut donc être vérifiée.

Choix des paliers

Les seuils de référence doivent être assez distants les uns des autres. Sun [136] montre que les paramètres tels que la moyenne, la variance, le taux de changement entre modes et la corrélation ont de grandes influences sur les performances de la fonction CAC lorsque l’on considère un système à capacité variable : de rapides variations entre paliers de capacité et une grande variance ont des répercussions négatives sur les performances des mécanismes CAC ; tandis que la corrélation sur les valeurs de la capacité est bénéfique pour la fonction CAC. Par conséquent, il faut choisir des paliers de capacité assez éloignés les uns des autres. On évitera ainsi des allers-retours intempestifs entre les valeurs de capacité seuil, ce qui est un inconvénient pour la fonction CAC. Pour ce faire, il faudra tenir compte des statistiques des pentes d’atténuation.

Si on définit C_{max} et C_{min} comme étant respectivement les valeurs maximale et minimale de la capacité que le système peut offrir, chaque palier de capacité $C(i)$ peut être donné par l’équation (5.3).

$\alpha(i)$	$C(i)$
1 si $0 < a \leq 6$	C_{max} (capacité ciel clair)
$\alpha(1)$ si $0 < a \leq 6$	$C(1) \approx 0.95 * C_{max}$
$\alpha(2)$ si $6 < a \leq 10$	$C(2) \approx 0.90 * C_{max}$
$\alpha(3)$ si $10 < a \leq 13$	$C(3) \approx 0.85 * C_{max}$
0 si $13 < a \leq 15.5$	$C(4) \approx 0.80 * C_{max} = C_{min}$

Table 5.3 Paliers de capacité pour le spot 23

$$C(i) = \alpha(i)C_{max} + (1 - \alpha(i))C_{min} \quad (5.3)$$

où $\alpha(t)$ est une fonction discrète à valeur dans $[0; 1]$.

Les valeurs de $\alpha(t)$ peuvent être liées soit aux valeurs d'atténuation, soit à la proportion de terminaux dans un mode donné. Nous faisons le choix de lier $\alpha(t)$ aux valeurs d'atténuation. Ainsi chaque palier correspondra à une classe de valeurs d'atténuation.

Le tableau 5.3 donne un exemple de choix de palier de capacité. Les valeurs de ce tableau sont obtenues en se fondant sur le spot moyen (spot n° 23) présenté plus haut. Les valeurs $\alpha(i)$ sont choisies de sorte que la réduction de capacité se fassent par pas d'environ 5%. Si on veut augmenter le nombre de palier, on aura beaucoup de fluctuations entre les capacités, ce qui est néfaste pour les performances de la capacité. Par contre, séparer davantage des paliers augmente la variance des fluctuations ; ce qui est aussi un inconvénient. Il faut donc trouver un compromis pour le choix des paliers de capacité.

Paliers et série d'atténuation

Les figures 5.4 et 5.5 donnent les variations de la capacité sur la base des paliers de capacité choisis pour deux phénomènes d'atténuation distincts, un à valeur maximale de 10 dB et l'autre à valeur maximale de 15 dB.

Sur ces figures, on peut voir que les valeurs de capacité restent assez constantes sur des périodes de temps plus grandes que les valeurs d'atténuation. ici, le basculement d'un palier à l'autre est obtenu en comparant la valeur courante de l'atténuation à la plage de validité d'un palier de capacité.

Bien évidemment, on peut prendre en compte les prédictions court-termes pour basculer en avance les paliers de capacité. Cela permettra d'éviter de relâcher des connexions admises lorsque une plus forte valeur d'atténuation est prédite.

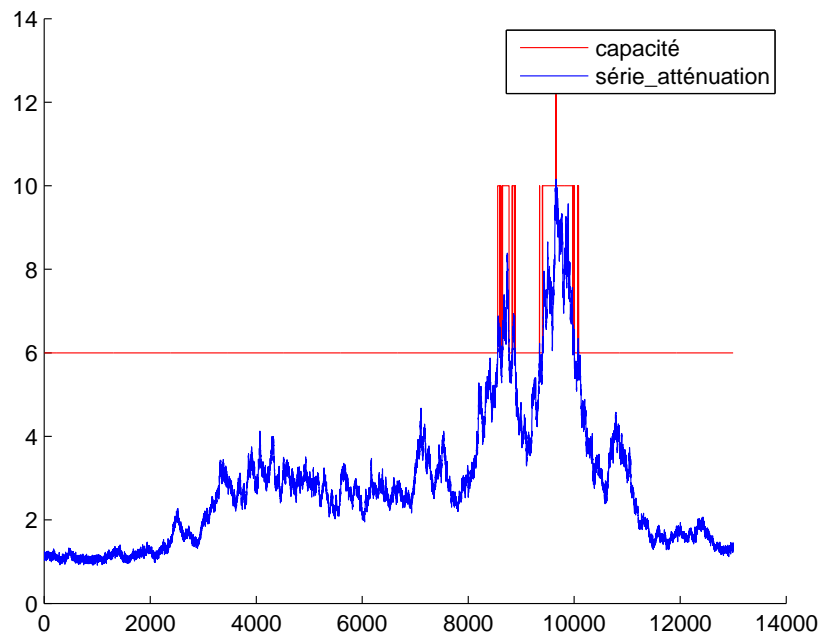


Figure 5.4 Variation de la capacité pour la voie retour - cas pluie de valeur maximale 10 dB sur la Gateway/NCC

5.6 Conclusion

Nous avons souligné encore dans ce chapitre la nécessité de disposer de modèles de prédiction de l'évolution temporelle et spatiale des atténuations atmosphériques (notamment celles dues à la pluie).

Malheureusement, les temps de prédiction obtenus ou les modèles développés dans l'état actuel de la recherche, ne permettent pas d'intégrer ces variables pour l'implantation d'une fonction CAC adaptative dans un système réel. En effet, les temps de prédiction, de l'ordre de la seconde, sont inadéquats avec l'échelle de temps caractéristique de la fonction CAC ; et les modèles d'évolution sont soit trop complexes à cause de leur paramétrage, soit trop gourmands en charge de calcul ; ce qui les rend inexploitable pour un mécanisme temps-réel comme la fonction CAC.

Cependant, nous avons proposé une solution simplifiée qui permet, dans un premier temps, de s'affranchir de ce manque de données : séparer le cas de la pluie sur la Gateway/NCC de celui de la pluie sur les terminaux utilisateurs. La raison principale en est que l'impact sur la capacité globale n'est pas la même dans l'un ou l'autre cas. Ainsi peut-on adopter une politique d'admission plus ou moins restrictive en fonction du cas de figure qui survient.

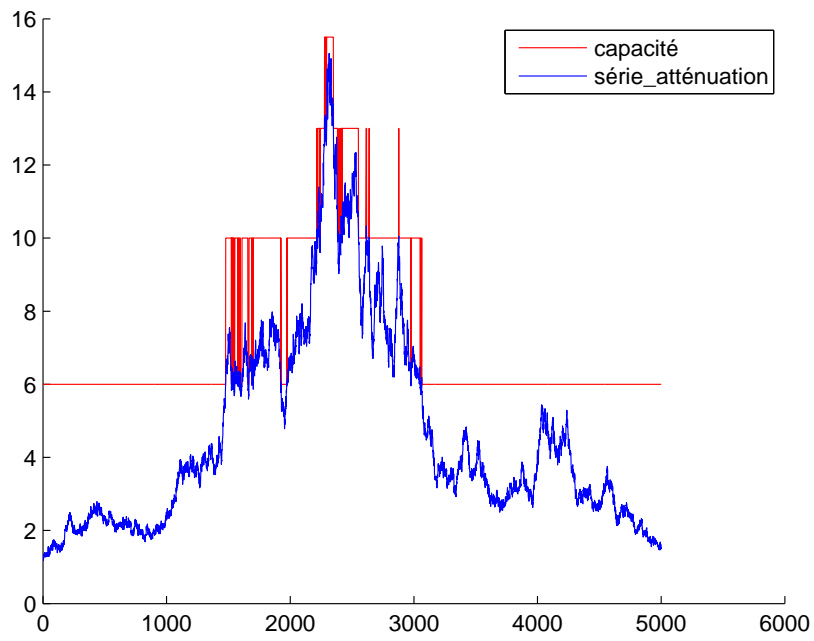


Figure 5.5 Variation de la capacité pour la voie retour - cas pluie de valeur maximale 15 dB sur la Gateway/NCC

Conclusion générale

Ce document a tracé dans les grandes lignes l'étude des mécanismes de contrôle d'admission des connexions (CAC) pour les systèmes de télécommunication par satellite pour lesquels les liaisons physiques s'adaptent en fonction des conditions de propagation.

Les techniques FMT ont été adoptées comme procédures de contre-mesure dynamique des affaiblissements au niveau des liaisons physiques. Ces techniques se traduisent par l'adaptation de la puissance de transmission ou du taux de codage, ou de la forme de modulation ou encore du débit de transmission en fonction des conditions de propagation. Malheureusement elles conduisent à avoir une capacité variable dans le temps. L'objectif poursuivi par cette étude consistait donc à répondre à la question suivante :

“Comment implanter une fonction CAC dans les systèmes satellitaires lorsque la capacité offerte varie dans le temps ?”

La philosophie classique qui consiste à adopter une marge statique pour contrecarrer les phénomènes d'atténuation devient insoutenable pour les hautes bandes de fréquence telles que la bande Ka où des atténuations de plusieurs dizaines de dB surviennent. Les techniques FMT introduites comme solution à ce problème conduisent à des améliorations au niveau de la couche physique et des performances des antennes émettrices (taille, poids, consommation...). Cependant, elles induisent sur les couches hautes, notamment sur les fonctions de gestion de ressources de la couche de liaison, des difficultés d'implantation.

En effet, comme nous l'avons montré au chapitre 2, l'utilisation des modes FMT peut résulter en une configuration de trame variable dans le temps au niveau des protocoles MAC. Cela conduit à la variation de la capacité offerte par le système et contraint dès lors à des modifications pour l'implantation des mécanismes de gestion de ressource, et donc en ce qui nous concerne, pour l'implantation de la fonction CAC.

La fonction CAC a pour but de prendre des décisions d'admission lors de requêtes de connexion. Elle est utile à la fois pour favoriser un partage équitable des ressources du système entre les différentes connexions, et pour

assurer que les connexions établies se déroulent sans que leurs critères QoS soient enfreints. Cette deuxième propriété est très utile pour toutes les applications qui nécessitent un respect strict de leurs critères de qualité, comme cela devient de plus en plus le cas pour les applications multimédia.

Pour les systèmes satellitaires sans FMT, cet attribut de la fonction CAC, i.e. le fait d'assurer que les connexions admises se déroulent parfaitement durant leur durée de vie, est vérifié dès l'admission des connexions.

En revanche, pour les systèmes de télécommunication par satellite où des procédures FMT sont implantées, la variation de la capacité peut conduire à rejeter a posteriori des connexions en cours. Nous avons alors souligné l'importance d'ajouter à la taxonomie classique en trois dimensions des fonctions CAC, un quatrième pendant qu'est la politique d'interruption de connexions. Quelques exemples de politiques d'interruption de connexion sont ainsi donnés au chapitre 3 de ce manuscrit.

Par ailleurs, du fait de la variation de la capacité née de l'utilisation en amont des techniques FMT, la politique d'admission de la fonction CAC se trouve modifiée. Comme nous le soulignons, dans cette étude, la fonction CAC doit tenir compte de l'état futur de la capacité lors de l'admission des connexions ; autrement, des connexions admises pourraient être relâchées, ce qui serait un motif d'insatisfaction de la part des utilisateurs.

La nouvelle taxonomie à quatre dimensions établie combinée aux critères de performance nous a poussés à discuter de l'adoption d'un CAC réactif ou d'un CAC préventif. La différence entre ces deux grandes familles de fonctions CAC se fait sur les critères de performance mis en avant, lesquels critères peuvent être antagonistes. Le CAC réactif assure un fort taux d'acceptation des connexions. En contrepartie, il conduit à un fort taux d'interruption des connexions. Le CAC préventif assure un plus faible taux d'acceptation de connexions et un faible taux d'interruption des connexions admises. Le CAC préventif, qui apparaît donc plus conservateur que le CAC réactif, nécessite, pour être plus performant, d'inclure des informations sur la variation de la capacité.

En fonction du type d'information disponible sur la capacité, notamment sa vitesse de variation comparée aux durées des connexions, nous avons défini, au chapitre 4, deux types de fonctions CAC adaptatives : un CAC pessimiste et un CAC optimiste. Le CAC pessimiste est utilisé lorsque la variation de la capacité est rapide par rapport à la durée de la connexion. Dans ce cas, toute connexion peut potentiellement utiliser le mode de transmission le plus robuste durant sa durée de vie. Ainsi, la politique CAC pessimiste consiste à admettre les connexions sur la base de l'allocation du mode FMT le plus robuste à tous les terminaux. Cette politique donne bien évidemment de fortes probabilités de blocages des connexions, mais présente l'avantage d'assurer aux connexions admises de se poursuivre sans enfreindre leurs critères QoS durant toute leur durée de vie.

Le CAC optimiste, quant à lui, exploite l'idée que la capacité du système reste assez stable durant la durée de vie des connexions. Dans ce cas, la décision d'admission est prise pour les connexions en fonction de l'état courant de la capacité. Cette politique a été définie en considérant soit le mode requis par les connexions au moment des requêtes de connexion (politique sans déclassement) soit en choisissant le meilleur mode FMT en terme de gestion de ressources (politique avec déclassement). Les performances obtenues nous ont rassurés sur l'idée d'adopter des politiques de CAC adaptatives.

Il est bon de remarquer, que ces études ont été menées en séparant la politique d'admission des connexions de la politique d'allocation réelle des ressources. En effet, les deux mécanismes se situent à des échelles de temps différentes. Néanmoins, nous restons fortement convaincus du lien entre les fonctions CAC et DAMA.

L'axe d'amélioration que nous avons proposé pour ces algorithmes a consisté à affiner l'hypothèse sur la variation de la capacité. Les études menées et relayées au chapitre 5 se sont focalisées sur les phénomènes d'atténuations et les possibilités de prédiction. Cependant les échelles de temps de prédiction, de l'ordre de quelques secondes, exhibées par les modèles actuels ne sont pas adéquates pour une utilisation au niveau de la fonction CAC.

Ce résultat est malheureusement très important. La littérature est particulièrement abondante en termes d'algorithmes de CAC (ou d'allocation de ressources) fondés sur les modèles de prédiction d'évolution de capacité et/ou de trafic. Malheureusement ces modèles de prédiction ne sont pas exploitables par la fonction CAC du fait des faibles échelles de temps de prédiction exhibées et des complexités de mise en œuvre. En outre, ces modèles renferment le plus souvent des informations disponibles par simulation mais qui ne le sont pas dans un cas de système réel. A contrario, des informations disponibles dans un cadre de système réel, par exemple les modes FMT réellement utilisés par les terminaux à un instant donné, ne sont pas donnés par les modèles de prédiction.

Une de nos contributions aura donc été de mettre en évidence leur inadéquation en l'état actuel de la recherche sur les modèles de la couche physique.

Dès lors, nous avons proposé, au chapitre 5, une procédure simplifiée pour l'implantation de la fonction CAC.

Cette procédure simplifiée consiste à séparer le cas de la pluie sur des terminaux usagers de celui de la pluie sur la Gateway/NCC. En effet, comme nous l'avons démontré, l'une ou l'autre configuration n'a pas la même influence sur la capacité globale au niveau de la zone de service et donc sur la politique d'admission. Dans le premier cas, seuls quelques terminaux subissent le contrecoup des affaiblissements, et dans le second cas tous les

terminaux se voient allouer des modes FMT dégradés et disposent donc d'une capacité moindre.

Nous avons apporté une réponse pour le cas de la pluie sur la Gateway/NCC. La politique d'admission adoptée dans ce cas repose soit sur le pire cas de propagation soit sur des paliers de capacité. Ces derniers correspondent à une plage d'atténuation survenant sur la Gateway/NCC.

Il reste bien entendu beaucoup de possibilités d'améliorations à cet algorithme. Une première étape consisterait à utiliser les méthodes de prédiction court terme fondées sur l'évaluation des pentes d'atténuation afin d'anticiper les moments de basculement entre les paliers de capacité. Une autre étape consisterait à regarder de plus près le cas des terminaux individuels moins performants que les terminaux collectifs utilisés pour illustrer l'exemple de la pluie sur la Gateway/NCC.

Aussi, faudra-t-il se pencher sur la politique d'admission à adopter pour les terminaux qui subissent le contrecoup des atténuations lorsque les cellules de pluie surviennent sur le spot. On pourrait, dans ce cas, définir une architecture CAC à plusieurs niveaux : un CAC global pour l'ensemble du spot et un CAC particulier au sein des terminaux individuels. Ainsi, les requêtes de connexion pourraient se faire selon une distribution hiérarchisée, d'abord au sein des terminaux individuels et ensuite au niveau de la Gateway/NCC qui renferme le CAC global. Dans ce cas de figure, il sera intéressant de se pencher sur les modalités de communication entre les deux CAC.

Dans cette étude, nous avons défini des fonctions CAC essentiellement tournés vers le débit (équivalent ou maximal). Une perspective de recherche serait d'enrichir ces modèles de CAC avec la prise en compte d'autres paramètres comme la gigue ou le délai à l'instar de ce que l'on voit apparaître dans les études sur le Wimax.

En outre, nos modèles de fonctions CAC ne prennent que des décisions "dures" : acceptation, refus ou interruption de connexions. On peut envisager de faire mieux pour certaines applications ou certaines classes de trafic en relâchant certaines contraintes. Par exemple, on pourrait tirer bénéfice des mécanismes de *cross-layer* pour renégocier les débits requis, par exemple avec SIP. Cela permettrait d'assouplir les décisions d'admission et d'augmenter les performances des CAC.

Une autre perspective de recherche serait bien évidemment, le développement de modèles spatio-temporels dont la granularité spatiale et l'échelle de temps seraient adéquates pour la fonction CAC.

Annexe A

Les Systèmes DVB

L'ETSI - European Telecommunications Standards Institute - , soit Institut des Standards de Télécommunication Européens [47], a standardisé le principe de diffusion de la vidéo par les normes DVB issues de la norme MPEG-2 [103]. Ces normes DVB définissent les standards de transmission de la télévision sur différents supports; les trois principaux étant le câble (DVB-C, DVB by Cable), l'hertzien terrestre (DVB-T, DVB by Terrestrial) et le satellite (DVB-S, DVB by Satellite).

La première génération des standards de diffusion par le satellite est donc le DVB-S [54]. L'ajout de certaines particularités à la norme DVB-S, notamment de nouvelles modulations et de nouveaux types de codage, a conduit à la standardisation par le même organisme de la norme de diffusion de seconde génération, le DVB-S2 [50]. A la voie aller classique de diffusion, l'ETSI a ajouté une voie retour par satellite au travers de la norme DVB-RCS [48] afin de fournir des services interactifs aux usagers des systèmes de communication par satellite.

Ce chapitre s'attelle à décrire dans les grandes lignes les normes DVB relatives aux satellites en relevant les points ayant trait aux procédures de gestion de ressource.

A.1 Systèmes DVB-S

A.1.1 Présentation

Le service prépondérant des systèmes de communication par satellite demeure encore la diffusion de données et de vidéos. Digital Video Broadcasting ou DVB, soit *Diffusion Vidéo Numérique* est une norme de télévision numérique édictée par le consortium européen *DVB Project* qui comprend plus de 260 membres mais largement utilisée dans le monde entier.

Le DVB-S est le standard de transmission de la télévision numérique via

le satellite. Ce standard regroupe des informations concernant les protocoles utilisés pour multiplexer les données en se fondant sur le standard MPEG-2, des méthodes d'accès et enfin sur le codage canal ainsi que la modulation du signal. Le DVB-S est un standard ouvert dont la première publication date de 1993. Il s'est enrichi tout au long de la dernière décennie au gré des innovations technologiques, et même des besoins des usagers, devenant un standard mondial. Le DVB-S est utilisé par environ 90 millions de personnes à travers le monde entier [118].

A.1.2 La pile protocolaire

La pile protocolaire du DVB-S s'appuie sur la norme MPEG-2. La figure A.1 propose un aperçu de cette pile protocolaire dans le plan utilisateur et dans le plan de contrôle/gestion [54, 56]. Cette pile fait apparaître deux traitements différents en fonction du type d'information à convoyer, soit les flux MPEG-2, soit la signalisation afférente.

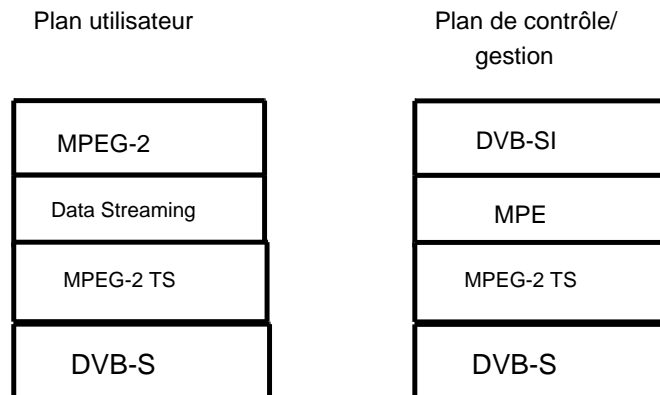


Figure A.1 Piles protocolaires du DVB-S

A.1.2.1 Plan utilisateur

Dans le plan utilisateur, la norme utilise la compression vidéo MPEG-2 [103] et le MPEG-2 TS (*MPEG-2 Transport Stream*) comme flux de transport des paquets. Les paquets MPEG-2 sont multiplexés dans des paquets MPEG2-TS via une méthode dénommée *Data Streaming* avant d'être transmis sur le lien radio comme décrit à la section A.1.3. Les paquets MPEG2-TS formés sont de taille constante, de 188 octets.

A.1.2.2 Plan de contrôle/gestion

Le plan de contrôle/gestion représente la pile protocolaire pour la signalisation. Cette dernière est constituée des tables PSI (Program Specific

Information) propres au standard MPEG-2 [103] et son complément DVB décrit dans la norme DVB-SI (DVB - System Information) [53]. La table PSI décrit les différents éléments présents dans les flux MPEG2-TS, et la table SI indique aux terminaux les différents services offerts par le système.

Ces tables de signalisation sont multiplexées dans des sections MPE (*Multi Protocol Encapsulation*), qui sont elles mêmes encapsulées dans des paquets MPEG2-TS et multiplexées avec les paquets de données. Le MPE, contrairement au *Data Streaming*, peut encapsuler plusieurs flux MPEG-2 dans les paquets MPEG2-TS.

A.1.3 La couche physique

Après la formation des paquets MPEG2-TS, ces derniers sont transmis vers le satellite, puis vers les usagers, par la couche DVB-S. La chaîne de transmission au niveau de la couche physique est celle décrite sur la figure A.2 extraite de [52].



Figure A.2 Chaîne de codage du DVB-S

La chaîne de transmission fait apparaître une seule modulation (QPSK). La norme prévoit que le système puisse utiliser cinq taux de codage, $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ et $7/8$. Mais pour chaque système, un seul code doit être sélectionné, ne donnant ainsi qu'une seule chaîne de transmission. La diversité des codes permet au système DVB-S de pouvoir s'adapter aux évolutions technologiques futures et d'offrir différents débits.

A.1.4 Les principes d'accès

Le DVB-S, comme son nom l'indique est un système de diffusion, unidirectionnel. Ainsi les seules stations qui ont accès au système satellitaire sont les Gateways ou passerelles qui jouent le rôle d'interface entre le réseau satellitaire et les diffuseurs de contenus. Les Gateways émettent donc les contenus vidéo vers le satellite qui les diffuse aux terminaux des usagers dans la zone de service.

Le nombre de Gateways par système est assez restreint, et est souvent réduit à un. Toutefois, il peut exister des cas où plusieurs Gateways accèdent au réseau satellitaire. Dans ce cas, les techniques d'accès se limitent souvent à une simple division fréquentielle ou temporelle de la bande passante. On parle alors d'accès FDM (Frequency Division Multiplex) ou TDM (Time Division Multiplex). La taille des multiplex est choisie en fonction du nombre de programmes de télévision à diffuser.

A.2 Systèmes DVB-S2

A.2.1 Présentation

La norme DVB-S2 (Digital Video Broadcasting - second generation) [50] est la seconde génération des spécifications DVB pour les applications satellites à large bande. Elle a été standardisée par l'ETSI en mars 2005.

Le standard DVB-S spécifié en 1994, sur lequel repose le DVB-S2, utilise la seule modulation QPSK et la concaténation d'un code convolutif et d'un code Reed-Solomon comme décrit sur la figure A.2. Une première évolution du système DVB-S s'est traduite par le standard DVB-DSNG (DVB - Digital Satellite News Gathering) en 1997 en ajoutant aux spécifications du DVB-S, l'utilisation des modulations 8-PSK et 16-QAM.

Le DVB-S2 a profité, quant à lui, des avancées technologiques en terme de codage canal, de modulation et de codage correcteur d'erreurs pour mettre en œuvre un système dont les performances approchent la limite théorique de Shannon. Il augmente, ainsi, la capacité offerte par le DVB-S de plus de 30%. Le DVB-S2 est donc capable de fournir de nouveaux services bien au delà des possibilités du DVB-S avec une grande qualité de service. Par exemple, lorsque combiné avec les dernières techniques de compression de vidéo, le DVB-S2 permet d'offrir une large diffusion des services HDTV (High Definition TeleVision).

A.2.2 Particularités techniques

Le DVB-S2 est une évolution du standard DVB-S. Il présente les caractéristiques techniques suivantes :

- Quatre constellations pour la modulation : QPSK, 8-PSK, 16-APSK et 32-APSK.
- Un puissant système de correction d'erreur reposant sur la concaténation des codes BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquengham) et LDPC (Low Density Parity Check) avec 11 différents taux de codage (de 1/4 à 9/10).
- Un mode adaptatif : la chaîne de transmission varie en fonction du taux de codage et de la modulation sélectionnés. Cela permet de changer les paramètres de transmission en fonction des conditions de propagation de chaque lien unicast. Ainsi, le système DVB-S2 peut fonctionner pour un rapport signal à bruit allant de -2 dB avec une modulation QPSK jusqu'à $+16$ dB en utilisant la modulation 32-APSK.
- Une compatibilité avec le DVB-S en offrant une augmentation de capacité de plus de 30% en terme de débit offert et de nombre de canaux de télévision numérique. Il présente ainsi quasiment la même pile protocolaire que le DVB-S et les mêmes méthodes d'accès.

- Une variété de source d'entrée : le DVB-S2 n'est plus limité au standard de compression vidéo et audio MPEG-2. Il s'adapte à une large gamme de compression audio et vidéo comme le MPEG-4/H.264. Le DVB-S2 tolère à la fois des flux continus de bits, des multiplex MPEG-TS, des paquets IP et des cellules ATM.

Le DVB-S2 apparaît donc comme un standard très flexible et qui peut répondre à une variété d'applications par satellite : il pourra à la fois prendre en compte des services DTH, de télévision haute définition, et de services interactifs comme l'accès à Internet.

A.3 Systèmes DVB-RCS

A.3.1 Présentation

Il n'existe pas de recommandation dans les normes DVB-S et DVB-S2 concernant l'implantation d'une voie retour. Ainsi, pour les services interactifs, un lien doit être établi soit par des liaisons terrestres via des lignes téléphoniques, soit par le satellite. La norme traduisant le choix du satellite pour la voie retour est le DVB-RCS (Return Channel by Satellite) [48].

Le DVB-RCS est donc un standard qui répond au besoin d'un lien retour pour les applications interactives, dans le cadre des systèmes DVB-S ou S2 actuels. Il est donc présenté comme un apport au DVB-S avec lequel il fonctionne en étroite corrélation. En effet, ce sont les flux aller DVB-S qui contiennent les différentes informations pour régir le système global en termes d'accès, de signalisation, de synchronisation des terminaux... Le système DVB-RCS définit donc un système large bande bidirectionnel par satellite pour des terminaux de type VSAT où la voie aller suit la norme DVB-S (ou DVB-S2) et la voie retour suit les spécifications techniques pour l'interface air comme décrites dans le standard DVB-RCS [48]. Les avantages des deux technologies sont ainsi réunis en un seul système.

A.3.2 Architecture DVB-RCS

L'architecture DVB-RCS, illustrée sur la figure A.3 est de type *étoile* où tout le trafic engendré par les terminaux utilisateurs (appelés RCST, Return Channel Satellite Terminal) transite par une grande station sol, la Gateway/NCC qui agit comme une passerelle entre les RCST et les fournisseurs d'accès à Internet.

Les RCST sont capables de recevoir et d'émettre des données. Ainsi des méthodes de gestion du réseau, comme l'accès au système et aux ressources, doivent être définies. Il existe donc, dans l'architecture DVB-RCS, des entités responsables des opérations de contrôle, de supervision, de gestion du

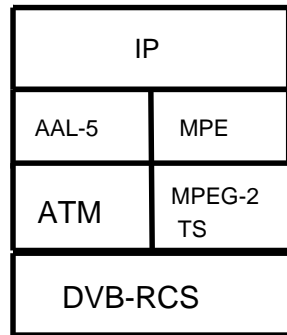


Figure A.4 Pile protocolaire du DVB-RCS

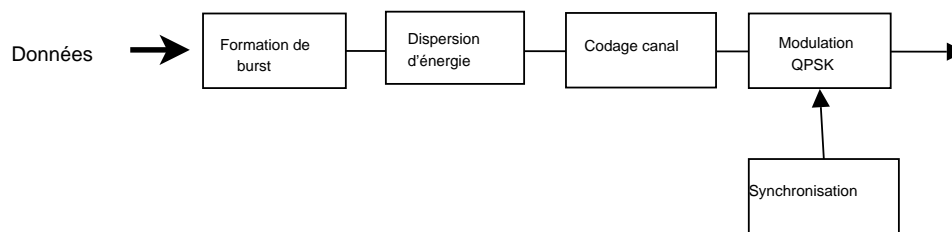


Figure A.5 Chaîne de codage du DVB-RCS

- Le *burst* TRF de trafic contient les données, soit ATM soit MPEG-2, de l'utilisateur.
- Le *burst* CSC (Common Signaling Channel) permet l'identification des terminaux pendant la phase de *log-on*
- Le *burst* ACQ (ACQuisition) sert à une synchronisation grossière des terminaux
- Le *burst* SYNC (SYNChronisation) sert à une synchronisation plus fine des terminaux et transporte les informations telles que les demandes de connexion, les requêtes de capacité...

Les *bursts* formés sont ensuite embrouillés afin de disperser l'énergie, puis protéger des erreurs par un codage canal adéquat avant d'être transmis par une modulation QPSK. Le codage des *bursts* peut être fait de deux manières différentes : soit ils sont codés suivant la concaténation des codages Reed-Solomon et convolutifs, de manière identique à celle de la chaîne de transmission du DVB-S, soit ils sont codés à l'aide d'un turbo-code.

A.3.5 La méthode d'accès

A.3.5.1 Le partage de la ressource

A l'opposé du DVB-S, où seul un nombre très restreint de Gateways accède au réseau, dans le DVB-RCS un grand nombre de terminaux doivent se partager les ressources du réseau. Le partage de la bande passante par la technique MF-TDMA (Multi Frequency Time Division Multiple Access), qui assure une bonne efficacité spectrale et la prise en compte de terminaux multiples, a été ainsi préconisé par le standard DVB-RCS.

Il existe deux types de partage MF-TDMA : un mode *statique* et un mode *dynamique*. Le mode *statique* utilise une même configuration MF-TDMA trame par trame ; alors que dans le mode *dynamique*, la structure MF-TDMA peut varier d'une période à l'autre du fait de l'utilisation de plusieurs types de codages. Cet aspect est décrit plus en détails dans la section 2.3

A.3.5.2 L'allocation de la ressource

Du fait du grand nombre de terminaux, une allocation fixe et constante des ressources par terminal n'est pas viable. Ainsi des procédures de requêtes dynamiques de connexions doivent être mises en place : chaque terminal envoie vers la Gateway/NCC des messages contenant ses besoins en terme de capacité afin de satisfaire aux critères de qualité de service (QoS) de ses applications. Le NCC, en réponse aux requêtes, alloue à chaque groupe de terminaux une *supertrame* qui contient plusieurs *trames* ; chaque trame étant ensuite divisée en *time-slots* qui transportera les *bursts* des usagers. Les *time-slots* alloués à chaque usager sont spécifiés au travers du message de signalisation TBTP (Terminal Burst Time Plan), qui décrit la structure d'allocation de la supertrame allouée au groupe de terminaux.

L'allocation est faite à deux niveaux : au niveau connexion, par la fonction CAC (Contrôle d'Admission des connexions) et au niveau 2 par la fonction DAMA (Demand Assignment Multiple Access). La fonction CAC permet d'assurer l'accès au support pendant toute la durée de la connexion en réservant une partie des ressources du système. La fonction DAMA s'assure de l'allocation effective des *time-slots* à l'utilisateur afin de toujours vérifier les paramètres de QoS tels que le débit, la gigue, le temps de transfert. Ces deux fonctions, agissant sur deux niveaux de temps différents, sont décrites au chapitre 2.

Annexe B

Etude mathématique des algorithmes de CAC

B.1 Solution à forme produit

L'espace d'état est donné par l'équation (B.1) dans le cadre des porteuses bien dimensionnées.

$$\Omega = \left\{ n = (n_1, \dots, n_i, \dots, n_M) / n_i \geq 0, \sum_{i=1}^M n_i b_i \leq C \right\} \quad (\text{B.1})$$

La distribution limite stationnaire est à forme produit et donnée par l'équation (B.2) :

$$\pi_n = G \prod_{i=1}^M \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (\text{B.2})$$

Preuve: La démonstration est la suivante [87, 124] :

On note $n_i^+ = (n_1, \dots, n_i + 1, \dots, n_M)$ et $n_i^- = (n_1, \dots, n_i - 1, \dots, n_M)$. On écrit ensuite les équations (B.3) de Chapman et Kolmogorof pour chacun des états :

$$\pi_n \left(\sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{1}_{\{n_i^+ \in \Omega\}} + \sum_{i=1}^M n_i \mu_i \mathbf{1}_{\{n_i^- \in \Omega\}} \right) = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{1}_{\{n_i^- \in \Omega\}} \pi_{n_i^-} + \sum_{i=1}^M (n_i + 1) \mu_i \mathbf{1}_{\{n_i^+ \in \Omega\}} \pi_{n_i^+} \quad (\text{B.3})$$

Plutôt que de vérifier que la distribution proposée satisfait toutes ces équations de balance globale, on vérifie simplement qu'elle satisfait toutes les équations (B.4) de balance locale entre tout couple de vecteurs n et n_i^+ :

$$\lambda_i \mathbf{1}_{\{n_i^+ \in \Omega\}} \pi_n = (n_i + 1) \mu_i \mathbf{1}_{\{n_i^+ \in \Omega\}} \pi_{n_i^+} \quad (\text{B.4})$$

Ces équations sont trivialement vérifiées dans la mesure où soit n_i^+ n'appartient pas à l'espace d'état auquel cas l'équation (B.4) se résume à $0 = 0$ qui est vraie, ou bien n_i^+ appartient à Ω et dans ce cas l'équation (B.4) se transforme en l'équation (B.5) qui est aussi vraie.

$$\lambda_i \pi_n = (n_i + 1) \mu_i \pi_n \frac{\lambda_i}{(n_i + 1) \mu_i} \quad (\text{B.5})$$

■

B.2 Méthode de Kaufman-Roberts

Preuve: On part de l'équation (B.4) réécrite pour n_i^- et n pour tout vecteur n appartenant à Ω_j en multipliant les deux termes de l'égalité par b_i . On obtient l'équation (B.6) :

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i} b_i \mathbf{1}_{\{n_i^- \in \Omega\}} \pi_{n_i^-} = n_i b_i \mathbf{1}_{\{n_i^- \in \Omega\}} \pi_n \quad (\text{B.6})$$

En constatant que dans la partie droite de l'équation (B.6) le terme n_i vaut 0 quand n_i^- n'est pas dans l'espace d'états, on peut faire la somme sur toutes les classes et sur tous les états de Ω_j :

$$\sum_{n \in \Omega_j} \sum_{i=1}^K \rho_i b_i \mathbf{1}_{\{n_i^- \in \Omega\}} \pi_{n_i^-} = j \sum_{n \in \Omega_j} \pi_n = j q_j \quad (\text{B.7})$$

En réécrivant la partie gauche de l'équation (B.7), on obtient

$$\sum_{i=1}^K \sum_{n \in \Omega_j / n_i^- \in \Omega} \rho_i b_i \pi_{n_i^-} = j q_j \quad (\text{B.8})$$

On note alors que dans l'état n_i^- , il y a $j - b_i$ ressources. Il faut alors vérifier que l'on couvre bien l'ensemble des états de Ω_{j-b_i} .

Notons $\Gamma_{j-b_i} = \{n_i^- \in \Omega / n \in \Omega_j\}$. On procède par double inclusion.

Prenons un état m de Ω_{j-b_i} . La politique d'acceptation étant de type *Complete Sharing*, on peut accepter une connexion de type i et par conséquent $m_i^+ \in \Omega$, donc $m \in \Gamma_{j-b_i}$. On vient de montrer que $\Omega_{j-b_i} \subseteq \Gamma_{j-b_i}$.

Dans l'autre, la preuve est encore plus simple. Comme nous l'avons fait remarquer, dans l'état n_i^- , il y a $j - b_i$ ressources utilisées. Ceci n'a de sens que pour $j - b_i \geq 0$. Par conséquent tout état de Γ_{j-b_i} appartient à Ω_{j-b_i} .

On obtient par conséquent

$$q_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^M b_i \rho_i q_{j-b_i}$$

CQFD.

■

B.3 Méthode de Ritter et Tran-Gia

Preuve: De l'équation

$$q_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^M b_i \rho_i q_{j-b_i}$$

on fait on fait disparaître les termes correspondant aux états du système pour lesquels les différentes classes de trafic sont bloquées en raison des seuils imposés.

Si on note T_i le seuil de la classe i , i.e. jusqu'à T_i inclus, les connexions de type i sont acceptées, l'équation se transforme en :

$$\tilde{q}_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^M b_i \rho_i \mathbf{1}_{\{j-b_i \leq T_i\}} \tilde{q}_{j-b_i}$$

Les probabilités de blocage se calculent alors très aisément selon l'équation (B.9)

$$B_i = \frac{\sum_{j=T_i+1}^C \tilde{q}_j}{\sum_{j=0}^C \tilde{q}_j} \quad (\text{B.9})$$

Un des intérêts de cette méthode est de voir que sur l'équation (B.9), qu'en choisissant un seuil identique pour toutes les classes, on obtient rigoureusement les mêmes probabilités de blocage pour toutes les classes. Attention toutefois car cette méthode n'est qu'une méthode approchée.

Pour choisir ce seuil de façon optimale, il suffit de regarder la classe l qui nécessite le plus fort débit, elle sera bloquée, par manque de ressources dès que $C - b_l + 1$ ressources sont occupées. Le seuil optimal est donc atteint en

$$T_{opt} = C - \text{Max}_i(b_i)$$

■

Annexe C

Projet SATSIX

C.1 Présentation

C.1.1 Définition et Objectifs

SATSIX [76] (SATellite-based communication System within IPv6 networks) est un projet européen appartenant au 6ème programme cadre qui vise à améliorer les performances et services offertes par les systèmes satellites large bande tout en intégrant ceux-ci dans des réseaux terrestres de type WiFi et WiMAX.

C'est un projet de collaboration entre 14 partenaires : 2 constructeurs de satellites (Thalès Alénia Space France et Espagne), 2 opérateurs satellites (Hispasat et Telespazio), 2 opérateurs de télécommunication (Telefonica et Hungaro Digital Plc), 2 centres de recherches (CNRS/LAAS et SINTEF), 4 universités (Aberdeen, La Sapienza de Rome, Surrey et Valladoid) et 2 PME (B2I et Systek).

Les principaux objectifs de ce projet sont listés ci-après :

- Réduire les coûts d'accès aux systèmes satellitaires à large bande en développant de nouvelles techniques d'accès au réseau par satellite et en intégrant des boucles locales sans fil (WiFi et Wimax) pour connecter les utilisateurs finaux ;
- Consolider les standards européen de télécommunication à accès large bande DVB-S2 et DVB-RCS ;
- Définir des recommandations, implanter des bancs de test et simuler des réseaux pour évaluer l'intégration, dans les réseaux satellites à large bande, des réseaux de nouvelles générations fondées sur l'IPv6 pour la délivrance de services multimédias.

Le projet SATSIX a donc pour ambition de démontrer que les systèmes de télécommunication par satellite peuvent, d'une part, non seulement être un bon vecteur mais aussi jouer un rôle clé pour le développement d'IPv6 dans l'Internet ; d'autre part, fournir une solution rapide à bas coût pour les fournisseurs de services internet pour l'implantation de services fondés sur l'IPv6 à des utilisateurs sur une large zone géographique.

En définitive le projet SATSIX promeut l'introduction du protocole IPv6 dans les systèmes de communication par satellite et encourage l'utilisation du satellite comme moyen d'accès universel aux services Internet.

C.1.2 Architecture globale

Le projet SATSIX s'appuie sur les standards DVB-S, S2, RCS pour la définition de son architecture réseau.

Trois types d'accès sont proposés dans le projet SATSIX : un accès de type MESH qui nécessite un satellite régénératif pour une connectivité totale, un accès en ÉTOILE avec un satellite transparent et une architecture hybride qui utilise un satellite hybride combinant des fonctions de satellites régénératifs et transparents. Pour la connexion des utilisateurs finaux au cœur de réseau, des boucles locales sans fils sont implantées avec le Wimax et/ou le WiFi. L'architecture globale est donnée dans la référence [55].

Cependant pour l'étude menée dans ce document, nous ne nous sommes intéressés qu'à l'accès en étoile avec un satellite transparent. Quelques caractéristiques techniques de cette architecture sont décrites dans la section suivante.

C.2 Caractéristiques techniques

L'architecture en étoile repose sur un satellite géostationnaire avec une couverture multi-spot (40 spots) en bande Ka sur toute l'Europe. La bande Ka est utilisée à la fois pour les liens montants (30 GHz) et pour les liens descendants (20 GHz). Un facteur classique de réutilisation de fréquence 1 : 4 est utilisé pour assurer toute la couverture ; ce facteur induit un fort rapport signal à interférence $\frac{C}{I}$ qui doit être pris en compte.

Du fait de la topologie en étoile, toutes les communications des terminaux utilisateurs transitent par une passerelle la Gateway/NCC qui utilise une antenne de 5.6m de diamètre.

La disponibilité de bout en bout à offrir est fixée à 99.9%.

C.2.1 Terminaux utilisateurs

Deux types de terminaux usagers sont utilisés dans le projet SATSIX ; des terminaux individuels pour les accès de type résidentiel, et des termi-

naux collectifs utilisés soit par des entreprises ou des groupes de terminaux connectés par un VPN ou un réseau de type WiFi ou Wimax.

Les terminaux de type collectif ont un diamètre de 1.2 *m* et une puissance 2 W à la sortie d'un amplificateur HPA. Les terminaux individuels, quant à eux, sont dotés d'une antenne de diamètre 0.67 *m* avec une puissance de 1 W qui utilise encore un amplificateur HPA.

C.2.2 Couche physique

Une bande passante totale de 500 MHz est adoptée avec un facteur de réutilisation de 1 : 4. Le lien retour utilise un accès de type MF-TDMA comme convenu par le standard DVB-RCS. Le lien aller utilise, quant à lui, un accès de type TDM fondé sur le standard DVB-S2.

Lorsque l'on considère des terminaux de type individuel, l'accent est mis sur la capacité globale offerte par le système. Ainsi, deux polarisations sont utilisées. On a donc l'équivalent de 500 MHz de bande passante par spot. Le niveau d'interférence dans ces cas est alors très important.

Dans le cas des terminaux collectifs, l'accent est plutôt mis sur les débits crêtes offerts aux terminaux. Ainsi une seule polarisation est utilisée conduisant à une bande totale de 125 MHz par spot.

On rappelle que les performances évaluées dans cette étude repose sur l'utilisation des terminaux collectifs.

C.2.3 Modes FMT

Les modes FMT choisis vont de l'adaptation de la forme d'onde (modulation et codage) à la réduction de débit.

Sur le lien aller, les modes FMT sont fondés sur ceux développés dans le standard DVB-S2.

Sur le lien retour, les modes FMT sont inspirés de ceux proposés pour la norme DVB-RCS. Cependant, en plus de la modulation QPSK, l'on considère les modulations 8-PSK et BPSK afin d'offrir la disponibilité de 99 % à tous les terminaux de la zone de couverture.

La contrainte sur le choix définitif des modes (augmentation d'efficacité spectrale, 2 à 3 dB de gain entre deux modes FMT successifs, débit offert par mode...) ont conduit à adopter 11 modes FMT pour la voie retour de la QPSK 1/2 à 64 kbps à la 8PSK 4/5 à 1024 kbps. Le détail des modes FMT sera trouvé dans les documents du site du projet SATSIX [76].

Bibliographie

- [1] Technical Proposal AO4135 : Adaptive Coding-Modulation Techniques for Ka/Q-Band Systems. Departement Electromagnétique et Radar de l'ONERA.
- [2] Definition of the Differentiated Service field (DS field) in the IPv4 and IPv6 headers. RFC 2474, IETF, December 1998.
- [3] COST Project 205. Influence of the atmosphere on radiopropagation on satellite earth paths at frequencies above 10 GHz. Technical report, Report EUR 9923 EN, ISBN 92-825-5412-0, 1985. Sections 5.3 and 5.6.
- [4] N. Abramson. The ALOHA system -Another alternative for computer communications. In *Proc. AFIPS Fall Joint Comput. Conference*, volume 37, 1970.
- [5] I.F. Akyldiz and S.H. Jeong. Satellite ATM network : a survey. *IEEE communication magazine*, pages 30–43, juillet 1997.
- [6] I.F. Akyldiz, G. Morabito, and S. Palazzo. TCP-Peach : a New Congestion Control Scheme for Satellite IP Networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 9 :307–321, 2001.
- [7] S.M. Alamouti and S. Kallel. Adaptive treillis-coded multiple phased-shift keying for Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. Communication*, 42 :2305–2314, June 1994.
- [8] M. Allman, V. Paxons, and W. Stevens. TCP Congestion Control. RFC 2581, IETF, April 1999.
- [9] P. Barsocchi, N. Celandroni, E. Ferro, A. Gotta, F. Davoli, G.i Giambene, F. J. G. Castaño, J. I. Moreno, and P. Todorova. Radio resource management across multiple protocol layers in satellite networks : A tutorial overview. Technical report, European Commission in the framework of the "SatNEx" NoE project(contract No. 507052), 2005.
- [10] T.L Bell. A Space-Time Stochastic Model of Rainfall for Satellite Remote Sensing Studies. *Journal of Geophy. Res.*, 92 :9631–9643, 1987.
- [11] A.-L. Beylot, R. Dhaou, and C. Baudoin. Resource Allocation in DVB-RCS Satellite Systems. In *IFIP Networking, NETWORKING'07*, pages 511–521, Atlanta, Georgia, May 2007. Springer.

- [12] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. An Architecture for Differentiated Services. RFC 2475, IETF, Decembre 1998.
- [13] A. Bolea-Alamañac. *Conception et mise en œuvre de Méthodes de Compensation des Effets du Canal de Propagation pour Optimiser les Ressources Radio*. PhD thesis, École Nationale Supérieure de l'aéronautique et de l'espace SUPAERO, 2004.
- [14] A. Bolea-Alamañac, M. Bousquet, L. Castanet, and M. Van De Kamp. Implementation of Short-term Prediction models in Fade Mitigation Techniques Control Loops. In *Joint COST 272 / 280 Workshop*, Noordwijk, The Netherlands, May 2003. ESA/ESTEC.
- [15] R. Bolla, N. Celandroni, F. Davoli, E. Ferro, and M. Marchese. Bandwidth allocation in a multiservice satellite network based on long-term weather forecast scenarios. *Computer Communications*, 25 :1037–1046, 2002.
- [16] R. Bolla, F. Davoli, and M. Marchese. Complete Partitioning Schemes for Call Access Control in ATM Networks. In *IEEE International Conference Conference ICC'96*, 1996.
- [17] L. Boukhatem. *Le Handover dans les Constellationns de Satelite LEO*. PhD thesis, Université de Paris VI, 2001.
- [18] M. Bousquet, L. Castanet, M. Filip, P. Gallois, B. Grémont, L. de Haro, J. Lemorton, A. Paraboni, and M. Schnell. Impairment Mitigation and Performance Restoration. In *COST Action255 : Radioware Propagation Modeling for Satcoms Services at Ku-band and Above*. ESA, 2002.
- [19] Khaleb Boussetta. *Méthodes Numériques et Protocoles pour le Support du Multicast dans les Réseaux Fixes et Mobiles*. PhD thesis, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines, 2003.
- [20] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture : an Overview. RFC 1633, IETF, June 1994.
- [21] L.E. Braten, C. Amaya, and D.V. Rogers. Fade and Inter-Fade Duration at Ka-Band on Satellite-Earth Links : Modeling and System Implications. In *19th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, number 140, Toulouse, France, April 2001.
- [22] Lee Breslau, Sugih Jamin, and Scott Shenker. Comments on the Performance of Measurement-Based Admission Control Algorithms. In *IEEE INFOCOM*, 2000.
- [23] G. Brussaard. Extreme-Value Analysis of Outage Durations due to Rain in Satellite Communication Systems. In *Proc. 7th URSI Commission F Open Symposium*, pages 13–16, Ahmedabad, India, November 1995.

- [24] P.J Burke. The output of a queueing system. *Operation Research*, 4 :699–704, 1956.
- [25] C. Caini and F. Firrincieli. TCP Hybla : a TCP Enhancement for Heterogeneous Networks. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 22 :547–566, 2004.
- [26] C. Casetti, M. Gerla, S. Mascolo, M.Y. Sanadidi, and R. Wang. TCP Westwood : End-to-end Congestion Control for Wired/Wireless Networks. *Wireless Networks Journal*, 8 :467–479, 2002.
- [27] L. Castanet, A. Bolea-Alamanac, and M. Bousquet. Fade Mitigation Techniques for Ka and Q/V Band Satcom Systems :Implementation Issues. In *COST 280 Third International Workshop*, Praha, Czech Republic, June 2005.
- [28] L. Castanet, J. Lemorton, T. Konefal, A.K. Shukla, P.A. Watson, and C.L Wrench. Comparaison of various methods for combining propagation effects and prediction loss in low-availability system in the 20-50 GHz frequency range. *Inter. Journal on satellite communication*, 19, 2001.
- [29] L. Castanet, M.Bousquet, and D. Mertens. Influence of Propagation Effects on the Performance of a Generic Ka-band VSAT Videoconferencing System. In *18th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, volume 2, Oakland, CA, April 2000.
- [30] J.K. Cavers. Variable-rate transmission for Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. Communication*, COM-20 :15–22, February 1972.
- [31] N. Celandroni, F. Davoli, and E. Ferro. Static and Dynamic resource Allocation in a Multiservice Satellite Network with Fading. *Inter. Journal of satell. Commun. and Network.*, 21 :469–487, 2003.
- [32] Nedo Celandroni, Franco Davoli, Erina Ferro, and Gotta Alberto. Complete Partitioning Allocation Policies in a Rain Faded Satellite Environment. Technical report, March 2003.
- [33] L. Chisci, R. Fantacci, and T. Pecorella. Predictive bandwidth control for GEO satellite networks. In *Proc. IEEE Int. Conference on Communications 2004*, Paris, France, June 2004.
- [34] F. Chiti, R. Fantacci, T. Pecorella, L. Giacomelli, M. Poggese, and F. Poggianti. An Improved Dynamic Bandwidth Allocation Scheme Based On Traffic Prediction for DVB-RCS Systems. In *Proc. of the 1st Intern. Conf. on Advanced Satellite Mobile Systems ASMS*. ESA, July 2003.
- [35] J.P Choi and V.W.S Chan. Prediction and Adaptation of Satellite Channels with weathe-Induced Impairments. *IEEE Trans. on Aeros. and elec. Systems*, 38 :779–790, 2002.

- [36] G. Choudhury, K. Leung, and W. Whitt. An Algorithm to Compute Blocking Probabilities in Multi-rate Multi-class Multi-resource Loss Models. *Advances in Applied Probability*, 27 :1104–1143, 1995.
- [37] F. Christophe, L. Castanet, J. Lemorton, and M. Bousquet. Military satellite communications at EHF : availability improvement by space diversity. In *NATO/RTO Space Science and Technology Advisory Group (SSTAG), Specialist Meeting on "Emerging and Future Technologies for Space Based Operations Support to NATO Military Operations"*, Bucharest, Romania, September 2006.
- [38] Yuan-Sun Chu, Ruey-Bin Yang, Cheng-Shong Wu, and Ming-Cheng Liang. Partial Sharing and Partial Partitioning Buffer Management Scheme for Shared Buffer Packet Switches. *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, 85 :79–88, 2002.
- [39] EUTELSAT COMMUNICATIONS. Le Guide du Satellite des Télécommunications. <http://www.eutelsat.com>.
- [40] Luiz A Dasilva. Unit 4 : Admission Control. ECPE 6504, 2001.
- [41] M.M.J.L Van de Kamp. Rain Attenuation as a Markov Process : the Meaning of Two Samples. In *1st International Workshop "Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems"*, Malvern, UK. COST Action 280, July 2002.
- [42] V. de Kamp and L. Castanet. Fade Dynamics Review. In *COST Action 280 : Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave radio Systems*, july 2002.
- [43] Myriam Delaire and Gerard Hebuterne. Call blocking in multi-services systems on one transmission link. In *Modelling and Evaluation of ATM Networks*, pages 253–270, 1997.
- [44] Khaled Elsayed and Harry Perros. *A Comparative Performance Analysis of Call Admission Control Schemes in ATM Networks*, chapter 5, pages 113–140. Springer, 2000.
- [45] A. Elwalid and D. Mitra. Effective Bandwidth of General Markovian Traffic Sources and Admission Control of High Speed Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1 :329–343, 1993.
- [46] L.D. Emiliani, A. Paraboni, J. Lemorton, L. Castanet, L. Feral, and M. Bousquet. Short- And Mid-Term Prediction Techniques Of Propagation Conditions From Weather Radar Observations. Application to resource management in SATCOM systems. In *International Workshop on Satellite and Space Communications*, pages 237–241, September 2006.
- [47] ETSI. www.etsi.org.
- [48] ETSI. DVB ; interaction channel for satellite distribution systems. EN 301-790.

- [49] ETSI. DVB; Interaction Channel for satellite distribution systems; Guideline for the use of EN 301 790. 101 790.
- [50] ETSI. DVB : Second generation framing Structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other satellite applications. ETSI EN 302 307.
- [51] ETSI. Digital Audio Broadcasting (DAB); DAB to mobile, portable and fixed receivers . ETS 300 401, February 1995.
- [52] ETSI. Digital Video Broadcasting; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for 11/12 GHz Satellite Services. ETSI EN 301 421, August 1997.
- [53] ETSI. Digital Video Broadcasting; Specification for Service Information in DVB systems. ETSI EN 300 468, June 2004.
- [54] ETSI. Digital Video Broadcasting : DVB specification for Data Broadcasting. ETSI EN 301 192, June 2004. final draft.
- [55] L. Fan, C. Baudoin, L. Liang, A. Yun, G. Fairhurst, A. Sathiaselan, I. Melhus, S. Iyengar, J.A. Guerra, A. Ramos, D. Perez, R. Castellot, E. Callejo, M. Catalán de Domingo, H. Cruickshank, and Z. Sun. The SATSIX architecture for next-generation Satellite Systems with IPv6 and DVB. In *25th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, ICSSC'07, Seoul, Korea, 10/04/07-13/04/07*, 2007.
- [56] Julien Fasson. *Étude d'une Architecture IP intégrant un Lien Satellite Géostationnaire*. PhD thesis, INP-Toulouse, 2004.
- [57] P. Feldman. *An Overview and Comparison of Demand Assignment Multiple Access (DAMA) Concepts for Satellite Communications Networks*. RAND Corporation, September 1996.
- [58] L. Féral, H. Sauvageot, L. Castanet, and J. Lemorton. HYCELL : A new Hybrid Model for the rain Horizontal Distribution for Propagation Studies.Part1 : Modeling of the Rain Cell. *Radio Science*, 38 :1056, 2003.
- [59] L. Feral, H. Sauvageot, L. Castanet, J. Lemorton, F. Cornet, and K. Leconte. Methodology to Simulate Rain and Attenuation Fields Spatially Correlated at Mid and Large Scale. In *Space communications : Propagation modelling for space radio frequency links Workshop on Propagation No2, Toulouse*, volume 20, pages 85–95, 2006.
- [60] P. Ferguson and G. Huston. *Quality of Service : Delivering QoS on the Internet and in Corporate Networks*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [61] The ATM Forum. Traffic Management Specification Version 4.1, March 1999.
- [62] F. Gargione, T. Iida, F. Valdoni, and F. Vatalaro. Services, Technologies and Systems at Ka band and beyond : A Survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(2) :133–143, 1999.

- [63] R.J Gibbens and F.P Kelly. Measurement-Based Connection Admission Control. In *15th International Teletraffic Congress Proceedings*, June 1997.
- [64] J. Goldhirsch. Two-Dimension Visualization of Rain Cell Structures. *Radio Science*, 35 :713–729, 2000.
- [65] Alberto Gotta. Resource Partitioning and Call Admission Control in a Rain Faded Satellite Channel with Real-Time Connections. In *2nd International Symposium on Wireless Communication Systems*, pages 865– 869, september 2005.
- [66] B. Grémont, M. Filip, P. Gallois, and S. Bate. Comparative Analysis and Performance of Two Predictive Fade Detection Schemes for Ka-band Fade Countermeasures . *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, 17(2) :180–192, February 1999.
- [67] B.C Grémont. Event Detection and Performance Modelling. In *The second International Workshop of the COST Action 280*, Noordwijk, Holland, may 2003.
- [68] B.C. Grémont and M. Filip. Spatio-temporal rain attenuation model for application to fade mitigation techniques. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(5) :1245–1256, May 2004.
- [69] B.C Grémont, R.J. Watson, P.A. Watson, and D.D. Hodges. Modelling And Detection of Rain Attenuation For MF-TDMA Satellite Networks Utilizing Fade Mitigation Techniques. In *The second International Workshop of the COST Action 280*, Noordwijk, Holland, may 2003.
- [70] R. Guerin, H. Ahmadi, and M. Naghshineh. Equivalent Capacity and its Application to Bandwidth Allocation in High Speed Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 9 :968–981, 1991.
- [71] J.F. Hayes. Adaptive feedback communications. *IEEE Trans. Communication Technology*, COM-16 :29–34, February 1968.
- [72] D.D. Hodges and R.J. Watson. An Attenuation Time Series Model for Propagation Forecasting. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 54(6) :1726–1733, June 2006.
- [73] D.D Hodges and R.J Watson. The application of NWP techniques for the forecasting of attenuation time series at 30/40GHz . In *3rd CNES workshop on Earth-Space propagation*, Toulouse, France, September 2006.
- [74] F. Hubner and P. Tran-Gia. An Analysis of Multi-Service Systems with Trunk Reservation Mechanisms, April 1992. Research Report Series : Report No. 40.
- [75] P.J. Hunt and C. N. Laws. Optimization via Trunk Reservation in Single Resource Loss Systems under Heavy Traffic . *The annals of Applied Probability*, 7 :1058–1079, 1997.

- [76] IST. <http://www.ist-satsix.org>.
- [77] ITU. www.itu.int.
- [78] ITU-R. Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths, 2003. Recommendation ITU-R P.1623.
- [79] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunications systems, 2003. Recommendation P.618-8.
- [80] ITU-R. Methodologies for determining the availability performance for digital multi programme BSS systems, and their associated feeder links operating in the planned bands, 2005. ITU R BO.[Doc. 6/67].
- [81] S. Jamin, P.B Danzig, and S Schenker. A measurement-based admission control algorithm for integrated service packet networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5 :56–70, 1997.
- [82] D.S. Johnson. Approximation Algorithms for Combinatorial Problems. In *Proceedings of the Fifth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 38–49, Austin, Tex, 1973. ACM New York.
- [83] Jaime Prieto Jr, Scott L Wilkinson, and Jason R. Kincaid. Throughput Analysis of a Broadband Multimedia Satellite Fast-Packet Switch. <http://www.st.northropgrumman.com/capabilities/technology/TechLibrary.html>.
- [84] Y. Kamio, S. Sampei, H. Sasaoka, and N. Morinaga. performance of modulation-level-controlled adaptive-modulation under limited transmission delay time for land mobile communications. In *Proc. IEEE VTC'95*, pages 221–225, July 1995.
- [85] Mark J. Karol, Kai Y. Eng, and Zhao Liu. An efficient demand-assignment multiple access protocol for wireless packet (atm) networks. *Wireless Network*, 1(3) :269–279, 1995.
- [86] K. Kastamonitis, B. Grémont, and M. Filip. Short-term Prediction of Rain Attenuation based on Fade Slope. *Electronic Letters*, 39 :687–689, 2003.
- [87] J.S. Kaufman. Blocking in shared resource environment. *IEEE Transactions on Communications*, 29(10) :1474–1481, 1981.
- [88] P.B. Key. Optimal Control and Trunk Reservation in Loss Networks. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 4 :203–242, 1990.
- [89] L. Kleinrock. *Queuing Systems, Vol. 1 : Theory*. 1975.
- [90] S. Kota, K. Pahlavan, and P. Leppanen. *Broadband Satellite Communications for Internet Access*. 2004.
- [91] K. Leconte. Adaptive Coding-Modulation Techniques for Ka/Q-Band Systems : Physical and MAC Layer Specifications. Departement Electromagnétique et Radar de l'ONERA.

- [92] K.D. Lee, Y.H. Cho, H.J. Lee, and D.G. Oh. Improving Efficiency of Timeslot Assignment for non-real time data in a DVB-RCS return link : Modeling and Algorithm. *ETRI J*, 25 :211–218, 2003.
- [93] Teck Kiong Lee. *Connection Admission Control in Multi Service Networks : Simplicity versus Efficiency*. PhD thesis, University of Melbourne, 2002.
- [94] R. Lekkla, K. S. McCormick, and D. V. Rogers. 12-GHz Fade Duration Statistics on Earth-Space Paths in South-East Asia. In *Proc. URSI CLIMPARA '98*, pages 167–170, Ottawa, Canada, April 1998.
- [95] S. Lovejoy and B.B Mandelbrot. Fractal Properties of Rain and a Fractal Model. *Tellus*, 37A :209–232, 1985.
- [96] Rani Makke. *Qualité de Service et Performances des Protocoles de Transport dans l'UTRAN*. PhD thesis, ENST, juillet 2003.
- [97] A. Malygin and M. Filip. Deployment Strategy for a Fade Countermeasure System : A Generic Fade Countermeasure Controller. In *First International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ka band and Above*, pages 219–226, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Oct 1998. ESA WPP-146.
- [98] G. Maral. *VSAT networks*. Wiley Edition, 1995.
- [99] G. Maral and M. Bousquet. *Satellite Communications Systems*. Wiley Edition, 2006.
- [100] H. Matsuoka, S. Sampei, N. Morinaga, and Y. Kamio. Symbol rate and modulation level controlled adaptive modulation/TDMA/TDD for personal communications systems. In *Proc. IEEE VTC'96*, pages 487–491, April 1996.
- [101] P.D. Mitchell, D. Grace, and T.C. Tozer. Burst targeted demand assignment multiple-access for broadband Internet service delivery over geostationary satellite. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22 :546–558, April 2004.
- [102] D. Mitra and I. Ziedins. Virtual partitioning by dynamic priorities : Fair and efficient resource-sharing by several services. In *International Zurich Seminar on Digital Communications*, pages 173–185, 1996.
- [103] MPEG. Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information. ISO/IEC 13818-16.
- [104] H Sauvageot L. Castanet J. Lemorton K. Leconte F. Lacoste N. Jeanin, L. Feral. Modeling of Rain Fields and Attenuation Fields Spatially Correlated over Europe and USA. In *3rd CNES workshop on Earth-Space propagation*, Toulouse, France, September 2006.
- [105] A. Nillson, M. Perry, A. Gersht, and V.B. Iversen. On Multi-rate Erlang b Computations. In *16th International Teletraffic Congress*, pages 1051–1060, 1999.

- [106] E. Noussi, B. Gremont, and M. Filip. Integration of Fade Mitigation Technique within centrally managed MF-TDMA networks. *International Journal of Space Communications*, 2007. Special Issue on advances in Satellite Network Protocols & Performances.
- [107] A. Núñez, V. Pastora, P. Mariño, F.P. Fontán, and U.C Fiebig. Modelling of the Rain Radar Image Space-Time Dynamics with Cellular Automata . In *3rd CNES workshop on Earth-Space propagation*, Toulouse, France, September 2006.
- [108] Yaw Opoku. Measurement-based Admission Control, March 2001. ECPE.
- [109] S. Otsuki, S. Sampei, and N. Morinaga. Square-QAM adaptive modulation/TDMA/TDD systems using modulation level estimation with walsh function. *Electronics Letters*, 31 :169–171, February 1995.
- [110] A.D. Panagopoulos, P.-D. M. Arapoglou, and P.G. Cottis. Satellite communications at Ku, Ka, and V bands : Propagation impairments and mitigation techniques. *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, 6(3) :2–14, 2004.
- [111] A. Paraboni and C. Riva. A New Method for the prediction of fade duration statistics in satellite links above 10 GHz. *International Journal of Satellite Communications*, 12 :387–394, 1994.
- [112] J.M. Park, U. Savaongakarand E.KP. Chong, H.J.Siegel, and S.D. Jones. Allocation of QoS Connections in MF-TDMA Satellite Systems : a Two Phase Approach. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 54 :177–190, 2005.
- [113] Ponia Pech. *Incidence de la prise en compte des effets de mécanismes de lutte contre les affaiblissements (FMT) en bande Ka sur la gestion de ressources dans un système d'accès multimédia par satellite géostationnaire*. PhD thesis, Sup'aéro (ENSAE), 2003.
- [114] Harry G. Perros and Khaled M. Elsayed. Call Admission Control Schemes : a review. *IEEE communication magazine*, pages 82–91, november 1996.
- [115] Dionysia K. Petraki, Markos P. Anastasopoulos, Athanasios D. Panagopoulos, and Panayotis G. Cottis. Dynamic Resource Calculation Algorithm in MF-TDMA Satellite Networks. In *16th IST Mobile & Wireless Communications Summit*, Budapest, Hungary, July 2007. Satnex project.
- [116] Alain Pirovano. *Contrôle d'Admission et Allocation de ressources dans les réseaux ATM par Satellite*. PhD thesis, ENST Paris, 2002.
- [117] R. Polonia and C. Riva. ITALSAT Propagation Experiment at 18.7, 39.6 and 49.5 GHz at Spino d'Adda : three years of CPA statistics. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 46(5) :631–635, May 1998.

- [118] DVB Project. DVB Project- An introduction. www.dvb.org.
- [119] TWISTER PROJECT. <http://www.twister-project.net/>.
- [120] COST project 255 Final Report. Radiowave Propagation Modelling for new Satellite Communication Services at Ku-band and Above. Technical report, ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1998.
- [121] G. Pujolle. *Les Réseaux*. Eyrolles, 2005.
- [122] F. Rücker. Frequency and Attenuation dependent Fade Slope Statistics. *Electronic Letter*, 29 :744–746, 1993.
- [123] M. Ritter and P. Tran-Gia. Multi-rate models for dimensioning and performance evaluation of ATM networks. In *COST 242*, June 1994.
- [124] J. W. Roberts. A service system with heterogeneous user requirements : application to multiservice telecommunication systems. In G. Pujolle, editor, *Proceedings of Performance of data communication systems and their applications*, pages 423–431. North Holland, 1981.
- [125] L. G. Roberts. Dynamic Allocation of Satellite Capacity through Packet Reservation. In *Proc. Nat. Computer Conference*, pages 711–716, 1973.
- [126] M. Schnell and U-C. Fiebig. Fade Slope Statistics of 40Ghz beacon signals. *Electronics letters*, 33(21) :1819–1821, October 1997.
- [127] M. Schnell, U-C. Fiebig, E. Vilar, and C. Catalan. Propagation Impairments and Impact on System Design. In *COST Action 255 :Final Report*, page Part 5.2, March 2002.
- [128] S-M Senouci, A-L Beylot, and G. Pujolle. Call Admission Control in cellular Networks : a Reinforcement Learning Solution. *Intern. Journal of Network Management*, 14 :89–103, 2004.
- [129] Kohei Shiimoto, Naoaki Yamanaka, and Tatsuro Takahashi. Overview of Measurement-Based Connection Admission Control Methods in ATM networks. *IEEE Commications Surveys*, 1999.
- [130] William M. Shvodian. *A new media Access Control for Broaband Satellite*. PhD thesis, George Washington University, January 1999.
- [131] J. Siwko and I. Rubin. Call Admission Control for non-Geostationary Orbit Satellite Networks and Other Capacity Varying Networks. *International Journal of Satellite Communications*, (18) :87–106, 2000.
- [132] J. Siwko and I. Rubin. CAC for Capacity-Varying Networks with Stochastic Capacity Change Times. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9(3) :351–360, June 2001.
- [133] J. Siwko and I. Rubin. Call Admission Control for Capacity-Varying Networks. *Telecommunications Systems*, 16(1) :15–40, 2001.

-
- [134] R. Stevens. *TCP/IP Illustrated : vol. 1, The protocols*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.
- [135] ITU-T study group 13. Traffic Control and Congestion Control in B-ISDN. Recommendation I.371, February 2000.
- [136] H. Sun and C. Williamson. Simulation Evaluation of Call Dropping Policies for Stochastic Capacity Networks. In *Proceedings of SCS SPECTS 2005*, pages 327–336, Philadelphia, PA, July 2005.
- [137] A. Testoni, M. Bousquet, L. Féral, N. Jeannin, and L. Castanet. Testing analysis of prediction methods of Site Diversity at Ku and Ka bands. In *25th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, ICSSC'07, Seoul, Korea, 10/04/07-13/04/07*, 2007.
- [138] F. Tra, C. Baudoin, K. Leconte, and A-L. Beylot. Adaptive CAC in Satellite Communications Systems with Fade Mitigation Techniques : an Overview. In *25th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, ICSSC'07, Seoul, Korea, 10/04/07-13/04/07*, 2007.
- [139] F. Tra, B. El Khattar, and A-L. Beylot. CAC mechanisms for Sat-Com Systems with Adaptive Links : Performance Evaluation . In *ICLAN'2007 International Conference on the Latest Advances in Networks*, Paris, France, December 2007.
- [140] T. Ue, S. Sampei, and N. Morinaga. Symbol rate and modulation level controlled adaptive modulation/TDMA/TDD for personal communications systems. In *Proc. IEEE VTC'95*, pages 306–310, July 1995.
- [141] M. Véran and D. Potier. QNAP-2 : A Portable Environment for Queueing Network Modelling Techniques and Tools for Performance Analysis. In *International Conference on Modelling Techniques Tools and Performance Analysis*, North Holland, 1985.
- [142] F. Vieira and M.A. Vazquez-Castro. Dynamic Price-based Resource Allocation Mechanisms for ACM Systems. In *25th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, ICSSC'07, Seoul, Korea, 10/04/07-13/04/07*, 2007.
- [143] B. Vucetic. An adaptive coding scheme for time-varying channels. *IEEE Trans. Communication*, 39 :653–663, May 1991.
- [144] W. Webb and R. Steele. Variable rate QAM for mobile radio. *IEEE Trans. Communication*, 43 :2223–2230, July 1995.
- [145] J. ZHIFENG and V. LEUNG. A predictive demand assignment multiple access protocol for Internet access over broadband satellite networks. *International journal of satellite communications and networking*, 21 :451–467, 2003.
- [146] A. Ziram. *Mécanismes de contrôles d'accès des connexions dans un commutateur ATM multi-étage et multi-chemin*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, November 1998.

- [147] M. Zukermann and T.K Lee. A Framework for Real-Time Measurement-Based Connection Admission Control in Multi-Service Netwprks. In *IEEE Globecom'98*, pages 2983–2988, Sydney, November 1998.