

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 : INFORMATIQUE ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

SPÉCIALITÉ : Télécommunications spatiales

par

Ponia PECH

Incidence de la prise en compte des effets de mécanismes de lutte contre les affaiblissements (FMT) en bande Ka sur la gestion des ressources dans un système d'accès multimédia par satellite géostationnaire.

Soutenue le 19 décembre 2003 devant le jury :

MM.	G. MARAL	Président
	M. BOUSQUET	Directeur de thèse
	S. COMBES	
	B. EVANS	Rapporteur
	C. FRABOUL	
	S. TOHMÉ	Rapporteur
	L. CASTANET	Membre invité



THESE

Présentée en vue de
l'obtention du titre de

DOCTEUR

de

**L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE**

SPECIALITE: TELECOMMUNICATIONS SPATIALES

Par

Ponia PECH

**Incidence de la Prise en Compte des Effets de
Mécanismes de Lutte Contre les Affaiblissements (FMT) en Bande Ka
sur la Gestion des Ressources
dans un Système d'Accès Multimédia par Satellite Géostationnaire**

Janvier 2004

Soutenue le 19 décembre 2003 devant la Commission d'Examen :

Gérard Maral
Michel Bousquet
Barry Evans
Samir Tohmé
Christian Fraboul
Stéphane Combes
Laurent Castanet

Président
Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Membre invité

*« Du reste, mon fils, tire instruction de ces choses ;
On ne finirait pas, si l'on voulait faire un grand nombre de livres,
et beaucoup d'étude est une fatigue pour le corps. »*

Salomon^(*)

^(*) Roi d'Israël de 970 à 931 av. J.-C., fils de David et de Bethsabée. Il consolida le royaume de son père. Allié au roi Hiram I^{er} de Tyr, il fit venir de Phénicie bois et métaux pour bâtir le Temple et le palais royal de Jérusalem, construire et équiper une flotte sur la mer Rouge ; il fit exploiter les mines du Néguev et créa les fonderies de cuivre d'Ezion Gèber. Mais son autoritarisme, ainsi que la lourde fiscalité qu'il imposa, suscitèrent de vives oppositions, qui aboutirent après sa mort, au schisme du royaume. Les tribus du Nord du royaume se séparèrent de Juda et de Benjamin pour fonder le royaume d'Israël avec pour capitale Samarie. Dès l'Antiquité, Salomon a joui d'une grande réputation de sagesse, illustrée par l'épisode biblique d'un célèbre jugement (1 Rois 3:16) : deux femmes affirmant être la mère d'un même enfant, Salomon ordonna qu'on le coupât en deux, pour en donner une moitié à chacune d'elles ; la femme qui refusa ce partage était, bien entendu, la vraie mère.

A ma chère épouse, *Guech*, pour son amour continu
Et sa tendre présence qui est un parfum de rose dans ma vie ;

A mon fils aîné, *Sophonie*, dont la joie et l'innocence de l'enfance
Réjouissent mon cœur de père ;

A *Néhémie* qui, aujourd'hui caché dans le sein maternel,
A cinq mois d'existence,
Est le fruit d'une grande promesse ;

A mes chers parents, dont le sens du sacrifice et l'amour,
M'ont frayé le chemin vers ma carrière professionnelle ;

A mes frères et sœurs, *Frédéric*, *Sangwanida* et *Victor*,
Dont l'affection, malgré la distance et les distances,
A déposé un discret baume dans ma vie ;

A mes beaux-parents, dont le cœur de serviteurs
Parle mieux que des mots ;

Je dédie ce mémoire, reflet de trois années de ma vie.

*Même si les mots peuvent leur sembler incompréhensibles,
Qu'ils déchiffrent plutôt les paroles non-écrites...*

**INCIDENCE DE LA PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE
MECANISMES DE LUTTE CONTRE LES AFFAIBLISSEMENTS
(FMT) EN BANDE KA SUR LA GESTION DES RESSOURCES
DANS UN SYSTEME D'ACCES MULTIMEDIA PAR SATELLITE
GEOSTATIONNAIRE**

PREAMBULE

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche est le fruit d'une collaboration entre SUPAERO/TéSA et l'Unité Antenne et Propagation Radioélectrique du Département ElectroMagnétisme (DEMR) de l'ONERA, et de l'expertise d'Alcatel Space, Toulouse. Il n'aurait pas pu voir le jour ni arriver à terme sans l'encadrement chaleureux et bienveillant de Michel BOUSQUET, Directeur des Programmes Aérospatiaux et Professeur à SUPAERO, qui a été mon Directeur de thèse, et qui m'a proposé cette opportunité insoupçonnée de travailler sur une problématique que je ne connaissais pas alors que je travaillais comme ingénieur dans l'industrie du spatial. Je lui suis infiniment reconnaissant, outre de ses perspicacités techniques et sa qualité pédagogique que j'ai pu pleinement apprécier lorsque j'ai bénéficié de ses nombreux conseils avisés lors des préparations de présentations à des congrès internationaux ou à une réunion de travail, de tout l'aspect profondément humain et relationnel qu'il a soigneusement veillé à me manifester tout au long de ces trois années passées : il m'a prodigué beaucoup d'encouragements, a exprimé une grande compréhension à mon égard par rapport à des questionnements personnels, et s'est toujours efforcé de créer les conditions adéquates aussi bien morales que matérielles pour que cette étude s'achève convenablement. Je ne pense donc pas trop exagérer en disant qu'il a été pour moi un véritable catalyseur capable de me propulser en avant dans cette aventure qui est arrivée durant mon parcours de vie, et qui, j'en suis certain, contribuera à façonner mon orientation à la fois professionnelle et personnelle d'une façon décisive, bien que je ne le mesure pas bien encore.

Je tiens à remercier également Laurent CASTANET, Ingénieur de Recherche à l'ONERA, qui a été mon correspondant technique privilégié pour toutes les questions concernant les modèles de propagation en bande Ka, et qui m'a fourni de précieuses aides et une expertise solide, le tout avec un enthousiasme et une convivialité qui ont rendu mon travail agréable.

Je veux aussi exprimer ma reconnaissance à José RADZIK, Professeur Associé en Réseaux à SUPAERO, qui m'a apporté son regard critique et son excellente maîtrise du domaine des réseaux et du logiciel OPNET. Sa rigueur méthodologique, sa perspicacité scientifique et ses exigences techniques m'ont plus que souvent repris et permis d'affiner mes réflexions, de poursuivre des contraintes plus élevées de qualité et de clarté théorique ; ses remarques ciblées et pertinentes, ses silences quelquefois, de me remettre en cause et d'avancer bon vent, mauvais vent.

Ma reconnaissance va également tout droit vers l'équipe d'Alcatel Space qui a suivi mon travail, et notamment vers Laurent ROULLET, anciennement Chef des Etudes Avancées Amont du Département Communications par Satellite, Stéphane COMBES et Benoît FABRE, tous deux Ingénieurs de Recherche à Alcatel Space, lesquels m'ont patiemment et amicalement orienté, guidé, conseillé, et ont suivi mon travail en lui donnant des impératifs et une teneur industriels, ce qui n'a pas manqué d'en faire ressortir un relief autre, pour mon propre enrichissement. Leur connaissance du projet SAGAM et leurs compétences techniques affinées m'ont été d'un apport essentiel et ont largement contribué à aiguiller progressivement mon travail jusque vers la forme qu'il a maintenant épousée. J'ai eu le privilège d'entamer avec Laurent ROULLET des discussions dépassant le domaine technique mais non moins enthousiasmantes ni essentielles.

Je ne saurais omettre non plus tous ceux qui ont été présents sur mon parcours de doctorant, soit à SUPAERO, soit à TéSA, et qui d'une façon ou d'une autre m'ont prodigué conseils, suggestions, encouragements, paroles, sourires, aides diverses : Vincent CALMETTES, Jean FARRE, Jungpil YU, Ana BOLEA, etc.. Ils sont trop nombreux pour que je puisse les nommer tous un par un, mais ma profonde reconnaissance va aussi droit vers eux.

Enfin, étrangement, je ne peux m'empêcher d'avoir une pensée pleine de gratitude envers mon professeur de mathématiques de Première et Terminale au lycée Van Gogh à Ermont (Val d'Oise), Maurice OLLITRAULT. Il a joué, dans ces années critiques de ma vie, un rôle déterminant dans ma formation académique, en me donnant le goût pour les sciences mathématiques. Sa clarté pédagogique ponctuée d'enthousiasme et de larges sourires, allée à un amour particulier pour sa discipline, ainsi qu'à une grande sensibilité d'âme qui est souvent l'apanage des scientifiques émérites, ont autant contribué à former mon esprit que mon cœur. En particulier, c'est lui qui, je n'oublierai jamais, un beau jour, déçu de mes résultats dans sa matière, m'a fait une suggestion qui, sur le moment, m'a laissé pantois : "*Ne voulez-vous pas faire une prépa littéraire plutôt ?*". Ainsi, c'est sans doute à lui en partie que je dois aujourd'hui cette découverte que, quoique j'aie beau avoir embrassé une carrière scientifique, j'ai plutôt l'étoffe d'un métaphysicien - écho d'un appel plus lointain qui ne cesse de faire jour au plus profond de mon cœur. Ce que je sais depuis, c'est que tous ces efforts laborieux auxquels je me suis livré dans ce travail de recherche m'ont conforté plus que jamais dans une plus vaste *Recherche*, une *Poursuite* plus grande qui a commencé plus de vingt années en arrière et m'a mené sur un chemin que je ne regretterai guère...

1 ECHOS VENANT DES SIECLES

Par Salomon, roi d'Israël, surnommé l'Ecclésiaste

Car tel homme a travaillé avec sagesse et science et avec succès, et il laisse le produit de son travail à un homme qui ne s'en est point occupé. C'est encore là une vanité et un grand mal.

Que revient-il, en effet, à l'homme de tout son travail et de la préoccupation de son cœur, objet de ses fatigues sous le soleil ?

Il y a un temps pour tout, un temps pour toute chose sous les cieux :

un temps pour naître, et un temps pour mourir ; un temps pour planter, et un temps pour arracher ce qui a été planté ;

un temps pour tuer, et un temps pour guérir ; un temps pour abattre, et un temps pour bâtir ;

un temps pour pleurer, et un temps pour rire ; un temps pour se lamenter, et un temps pour danser ;

un temps pour lancer des pierres, et un temps pour ramasser des pierres ; un temps pour embrasser, et un temps pour s'éloigner des embrassements ;

un temps pour chercher, et un temps pour perdre ; un temps pour garder, et un temps pour jeter ;

un temps pour déchirer, et un temps pour coudre ; un temps pour se taire, et un temps pour parler ;

un temps pour aimer, et un temps pour haïr ; un temps pour la guerre, et un temps pour la paix.

Quel avantage celui qui travaille retire-t-il de sa peine ?

Car il y a pour toute chose un temps et un jugement, quand le malheur accable l'homme.

Mais il ne sait point ce qui arrivera, et qui lui dira comment cela arrivera ?

L'homme n'est pas maître de son souffle pour pouvoir le retenir, et il n'a aucune puissance sur le jour de la mort ; il n'y a point de délivrance dans ce combat, et la méchanceté ne saurait sauver les méchants.

Lorsque j'ai appliqué mon cœur à connaître la sagesse et à considérer les choses qui se passent sur la terre, -car les yeux de l'homme ne goûtent le sommeil ni jour ni nuit, j'ai vu toute l'œuvre de Dieu, j'ai vu que l'homme ne peut pas trouver ce qui se fait sous le soleil ; il a beau se fatiguer à chercher, il ne trouve pas ; et même si le sage veut connaître, il ne peut pas trouver.

Oui, j'ai appliqué mon cœur à tout cela, j'ai fait de tout cela l'objet de mon examen, et j'ai vu que les justes et les sages, et leurs travaux, sont dans la main de Dieu, et l'amour aussi bien que la haine ; les hommes ne savent rien : tout est devant eux.

Pour tous ceux qui vivent il y a de l'espérance ; et même un chien vivant vaut mieux qu'un lion mort.

Les vivants, en effet, savent qu'ils mourront ; mais les morts ne savent rien, et il n'y a pour eux plus de salaire, puisque leur mémoire est oubliée.

Et leur amour, et leur haine, et leur envie, ont déjà péri ; et ils n'auront plus jamais aucune part à tout ce qui se fait sous le soleil.

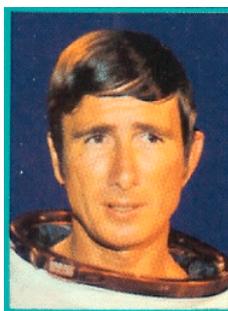
Souviens-toi de ton créateur pendant les jours de ta jeunesse, avant que les jours mauvais arrivent et que les années s'approchent où tu diras : Je n'y prends point de plaisir ; avant que s'obscurcissent le soleil et la lumière, la lune et les étoiles, et que les nuages reviennent après la pluie, temps où les gardiens de la maison tremblent, où les hommes forts se courbent, où celles qui moulent s'arrêtent parce qu'elles sont diminuées, où ceux qui regardent par les fenêtres sont obscurcis, où les deux battants de la porte se ferment sur la rue quand s'abaisse le bruit de la meule, où l'on se lève au chant de l'oiseau, où s'affaiblissent toutes les filles du chant, où l'on redoute ce qui est élevé, où l'on a des terreurs en chemin, où l'amandier fleurit, où la sauterelle devient pesante, et où la câpre n'a plus d'effet, car l'homme s'en va vers sa demeure éternelle, et les pleureurs parcourent les rues ; avant que le cordon d'argent se détache, que le vase d'or se brise, que le seau se rompe sur la source, et que la roue se casse sur la citerne ; avant que la poussière retourne à la terre, comme elle y était, et que l'esprit retourne à Dieu qui l'a donné.

Vanité des vanités, dit l'Ecclésiaste, tout est vanité.

Extrait du Cantique des Cantiques, Ancien Testament, la Bible

2 ECHOS VENANT DE L'ESPACE⁽¹⁾

Par James Irwin⁽²⁾

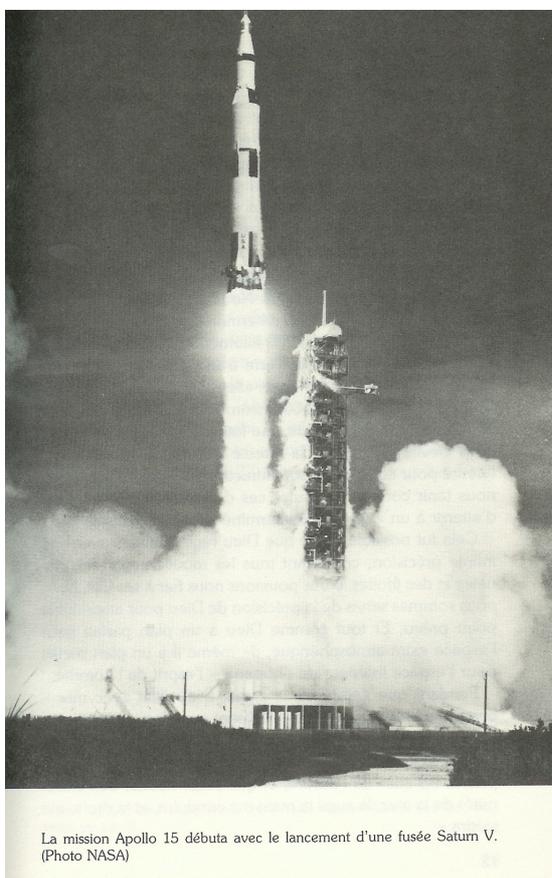


Je suis désormais plus qu'un simple terrien puisque j'ai marché sur la Lune. D'y avoir été a eu des répercussions spirituelles profondes sur ma vie.

Les yeux de l'homme sont insatiables

Lorsque nous avons décollé, j'avais comme seule préoccupation la réalisation d'un vol parfait. Je n'avais en tête que son aspect scientifique. Jamais je n'aurais imaginé qu'il n'allait pas me satisfaire, que j'allais revenir sur Terre un autre homme, prêt à faire un vol plus haut encore.

Mon but avant le vol était d'aller haut et vite, et, je l'espérais, d'aller dans l'espace. Et si j'avais vraiment de la chance, d'atteindre peut-être la Lune. Je pensais que ce serait le summum de ma carrière. Mais après que tout fut terminé, je me rendis compte que cela ne me satisfaisait guère. «Le séjour des morts et l'abîme sont insatiables ; de même, les yeux de l'homme sont insatiables. » (Proverbes 27:20)



Certains de ceux qui sont allés sur la Lune sont revenus en proie à un profond abattement, et l'un d'eux a même fait une dépression nerveuse. Il ne voyait plus de sens à sa vie après avoir atteint la Lune. Celle-ci était le point ultime. Il ne pouvait plus faire mieux.

L'Evangile de Matthieu (16:26) dit : «Que servirait-il à un homme de gagner tout le monde, s'il perdait son âme ? »

Ce qui satisfait *vraiment* l'homme est de connaître l'amour de Dieu et d'être en sa proximité pour qu'il le guide. Je me

(1) Extraits sélectionnés de son livre "Plus que de simples terriens - Leçons de l'espace", éditions EBV

(2) Le colonel Irwin est le 8^{ème} être humain à avoir foulé le sol lunaire. Dans le cadre de la mission Apollo 15 qui eut lieu du 26 juillet au 7 août 1971, il fut le pilote du module lunaire. Durant cette mission, le colonel Irwin passa 295 heures et 11 minutes dans l'espace, dont 19 heures et 46 minutes hors du vaisseau spatial.

rendis peu à peu compte que le vol vers la Lune n'était qu'un début. Ce n'était qu'une étape qui débouchait sur des possibilités de service encore plus grand, un service consacré à Dieu et aux hommes sur toute la Terre.

Dostoïevski fit la remarque que tout un chacun passe sa vie entière à se demander en quoi ou en qui croire. Certains trouvent la réponse. Mais beaucoup ne la trouvent pas. Je crois que Jésus-Christ est la réponse appropriée pour chaque individu.

Ce fut un choc terrible, en revenant sur Terre, de devenir instantanément une célébrité, un héros, une sorte de «Superman». Lorsque je demandai à ma femme ce qu'elle attendait de mon premier livre *To Rule the Night*, elle me répondit sans hésiter : «Je veux qu'il détruise le mythe selon lequel les astronautes sont infaillibles. Ce ne sont pas des dieux. Ce sont des êtres humains. Ils ont une famille ; ils ont une femme et des enfants. Ils éprouvent les mêmes émotions, les mêmes besoins et les mêmes sentiments que tout un chacun ressent. »

Au moment du départ pour la Lune, nous aurions pu penser que tout se liguaient contre nous. Nous projetions d'atterrir sur une parcelle de terrain bien déterminée, située sur un objectif mobile éloigné de 380 000 kilomètres. Non seulement la Lune tourne autour de la Terre à la vitesse de 3 680 kilomètres à l'heure, mais la Terre elle-même tourne autour du Soleil à la vitesse de 106 000 kilomètres à l'heure. En outre, la Terre tourne sur son axe une fois toutes les 24 heures, et nous devons atteindre la vitesse de 40 000 kilomètres à l'heure pour échapper à son attraction. Comment pouvions-nous tenir compte de toutes ces données et faire en sorte d'atterrir à un endroit prédéterminé sur le sol lunaire ?

Autant il semblait impossible d'atteindre un minuscule point sur la Lune, autant il semble impossible de vivre sans heurt sur Terre. Alvin Toffler écrit dans *The Third Wave* (La troisième vague), décrivant l'état actuel de l'humanité : «Une vague puissante balaie actuellement la majeure partie du monde, créant un environnement nouveau, souvent bizarre, dans lequel on travaille, joue, se marie, élève des enfants et prend sa retraite. Dans ce contexte déroutant, les hommes d'affaires nagent contre des courants économiques désordonnés ; les politiciens voient leur indice de popularité passer follement d'un extrême à l'autre ; les universités, les hôpitaux et les autres institutions sociales se battent désespérément contre l'inflation» !

Durant notre voyage vers la Lune, nous pouvions regarder derrière nous et voir la Terre, cette belle planète. Elle ressemblait à une boule d'arbre de Noël suspendue dans l'espace, immobile. Elle était essentiellement bleue, enveloppée dans des bancs de nuages blancs, mais nous pouvions cependant voir les couleurs chaudes et naturelles telles que le brun des déserts et des montagnes et le vert des vastes jungles.

Cependant il nous était impossible de voir une seule des œuvres de l'homme : pas de villes, pas de lumières, pas de monuments, pas d'excavations - rien. C'était comme si l'homme n'existait pas. Toutes les richesses, la puissance et tous les efforts de l'homme étaient imperceptibles depuis l'espace.

Ici-bas, parce que nous sommes si proches des œuvres de l'homme, elles nous impressionnent. Nous sommes sensibles à sa puissance. Nous recherchons les richesses. Tout cela semble tellement vrai - et tellement enviable ! Mais dans le psaume 49 (versets 17 à 21), nous lisons l'avertissement suivant :

*«Ne sois pas dans la crainte parce qu'un homme s'enrichit,
Parce que les trésors de sa maison se multiplient ;
Car il n'emporte rien en mourant,
Ses trésors ne descendent point après lui.
Il aura beau s'estimer heureux pendant sa vie,
On aura beau te louer des jouissances que tu te donnes,
Tu iras néanmoins au séjour de tes pères,
Qui jamais ne reverront la lumière.
L'homme qui est en honneur, et qui n'a pas d'intelligence,
Est semblable aux bêtes que l'on égorge. »*

Le terrien moyen aspire continuellement à posséder davantage, et souvent ce «davantage» appartient à quelqu'un d'autre. Cette envie est à l'origine de tensions et d'anxiétés superflues, d'un stress qui ne devrait pas être.

La réalité des choses invisibles

Des particules cosmiques, qui n'atteignent pas la Terre grâce à la couche protectrice de l'atmosphère et à la ceinture de radiations Van Allen, nous bombardaient constamment dans l'espace. Elles pénétraient le vaisseau spatial et nos combinaisons, et nous traversaient le corps. Mais la seule fois où nous les «voyions» était lorsqu'elles nous passaient à travers la rétine, au fond des yeux.

Un jour, alors que Dave, Al et moi-même étions assis l'un à côté de l'autre, une particule d'énergie extrêmement puissante pénétra le module de commandement du côté gauche et nous traversa tous les trois. Chacun de nous la perçut, car elle laissa un trait lumineux sur la rétine avant de sortir de l'autre côté de la capsule.

Lorsque nous nous couchions le soir pour dormir, au lieu de compter les moutons, nous comptions les éclairs ou les traits de lumière. On voyait un trait lumineux lorsque la particule venait de côté, et un éclair lorsqu'elle fonçait directement sur nous. Nous étions constamment plongés dans un océan de particules, mais nous ne «voyions» que celles qui atteignaient la rétine. Même si nous ne voyions pas les milliards d'autres, elles n'en étaient pas moins réelles.

Nous tombons souvent dans le piège qui consiste à croire que seules sont réelles les choses que nous pouvons voir, telles que la célébrité, les richesses, la puissance, les postes élevés, l'approbation d'autrui et les récompenses. Toutes ces choses sont attirantes. Nous en avons envie. Ou alors nous convoitons la place occupée par un autre ou ses capacités. La deuxième lettre aux Corinthiens nous montre une voie bien meilleure : «Nous regardons, non point aux choses visibles, mais à celles qui sont invisibles ; car les choses visibles sont passagères, et les *invisibles* sont éternelles. » (4:18) Nous devons veiller à ce que les choses qui ont vraiment de la valeur ne passent pas inaperçues, du fait qu'elles ne touchent pas la rétine de nos yeux spirituels.

La fragilité de l'homme

En tant qu'astronaute : l'homme est étonnamment fort, et en même temps incroyablement fragile. Il est suffisamment fort (et intelligent) pour faire parvenir un vaisseau spatial sur une planète hostile, et pourtant il doit se protéger de cette hostilité même (plus de 100° C à midi sur la Lune, et la nuit, le thermomètre descend à moins de -150° C) par un scaphandre lunaire. Si le mien s'était déchiré, mon sang aurait bouilli ! Nous avons besoin de cette armure qu'était notre tenue spatiale.

En tant qu'homme : je n'aurais jamais imaginé que, pilote d'essai émérite et astronaute ayant marché sur la Lune, je serais victime d'une crise cardiaque. Je pensais que c'était le lot de ceux qui mangeaient et buvaient excessivement, qui fumaient ou ne faisaient pas d'exercices. Il m'a été difficile d'accepter que cela m'ait soit arrivé à moi. J'étais terriblement gêné. Mais cette attaque m'a rendu plus dépendant du Seigneur et m'a fait accepter ma faiblesse humaine. J'avais besoin de l'armure de muscles cardiaques renforcés par un régime et des exercices appropriés.

L'homme est plus petit qu'un grain de poussière

Un jour, sur la Lune, je levai la main de façon à placer la Terre entre le pouce et l'index, comme on le fait pour mesurer un petit objet ; elle avait la taille d'une bille. L'homme, sur cette magnifique bille bleue, était bien plus petit qu'un grain de poussière.

William Beebe, le remarquable naturaliste, a rapporté l'histoire d'un petit rituel astronomique auquel Theodore Roosevelt et lui-même se livraient parfois après une soirée d'intenses réflexions. Ils sortaient et observaient le ciel. «Nous cherchions, disait Beebe, jusqu'à ce que nous trouvions, avec ou sans lunettes, la tache légère dans le ciel située au-delà du coin gauche du Carré de Pégase ; l'un de nous se mettait alors à réciter :

*"Voici la Grande Galaxie d'Andromède,
Elle est aussi grande que la Voie Lactée,
Elle est une des cent millions de galaxies.
Elle est à sept cent cinquante mille années-lumières,
Elle est composée de cent millions de soleils,
Tous plus grands que notre Soleil."*

Après une pause, le colonel Roosevelt me souriait et disait : "A présent il me semble que nous sommes assez petits. Allons nous coucher. »

Le psalmiste demandait (Psaume 8:4 et 5) : «Quand je contemple les cieux, ouvrage de tes mains, la Lune et les étoiles que tu as créées : qu'est-ce que l'homme pour que tu te souviennes de lui ? Et le fils de l'homme, pour que tu prennes garde à lui ? »

James Irwin

L'homme a marché sur la Lune. Neil Armstrong⁽¹⁾ en juillet 1969 lors du vol d'Apollo 11 y a même laissé son empreinte.

Il dira : "Je marche. Je n'ai aucune difficulté à marcher. Tout est plat autour de moi. Dieu que c'est bon ! C'est un petit pas pour l'homme que je viens de faire, mais c'est un bond géant pour l'humanité." L'astronaute va lire le Psaume 8 de la Bible : "Eternel, notre Dieu, quand je contemple les cieux, ouvrage de tes mains, la Lune et les étoiles que tu as créées : qu'est-ce que l'homme pour que tu te souviennes de lui ?"

Le 26 juillet 1971, c'est le tour d'Apollo 15, une nouvelle mission au cours de laquelle James Irwin sera le premier à rouler sur la Lune. Il s'exclamera : "Dieu marchant sur la terre, c'est plus important que l'homme marchant sur la Lune."

Au cours de la mission Apollo 16, le 16 avril 1972, Charles Duke⁽²⁾ dira : "Marcher sur la Lune fut pour moi une expérience extraordinaire. Mais marcher avec Jésus-Christ, Fils de Dieu, voilà ce qui remplit vraiment ma vie, maintenant et pour l'éternité."

N'y a-t-il pas quelque chose de solennel dans ces voix qui ont rompu le silence de l'espace au travers de leur foi ?

⁽¹⁾ En 1969, Armstrong fut le commandant d'Apollo 11, la première mission humaine d'atterrissage lunaire, et conquiert la distinction d'être le premier homme à avoir fait atterrir un engin sur la Lune, et le premier homme à avoir marché sur sa surface.

⁽²⁾ Duke fut un des 19 astronautes sélectionnés par la NASA en avril 1966. Il pilota le module lunaire d'Apollo 16, mission qui eut lieu du 16 au 27 avril 1972. A la fin de son premier vol spatial, Duke accumulait 265 heures passées dans l'espace et plus de 21 heures d'activités hors du véhicule.

RESUME / ABSTRACT

Du fait de la congestion des bandes de fréquence conventionnelles, le recours aux très hautes fréquences (EHF) devient une nécessité. En particulier, la bande Ka pour les communications satellitaires a été l'objet d'un immense intérêt ces dernières années. Les concepteurs de systèmes satellitaires se trouvent ainsi confrontés à une double contrainte : la première émane des effets troposphériques importants en bande Ka, notamment une forte atténuation du signal due à la pluie et à la scintillation d'amplitude, qui peut atteindre jusqu'à 20 dB pendant 0.01 % d'une année moyenne. Ceci oblige à employer des techniques de contre-mesure (*Fade Mitigation Techniques* ou FMT) pour compenser l'atténuation dans le but d'assurer une disponibilité suffisante au système ; la seconde est directement liée à la nature même du satellite pour lequel les ressources radio et à bord sont limitées et coûteuses. Cette dernière contrainte impose de rendre la gestion des ressources la plus rationnelle, efficace et optimale possible à partager entre les différents utilisateurs, tout en leur assurant les Qualités de Service (QoS) requises.

Les présents travaux de recherche empruntent l'architecture du projet SAGAM initié par le RNRT (*Réseau National de Recherche en Télécoms*) visant à étudier un système de troisième génération d'accès multimédia par satellite régénératif géostationnaire à commutation ATM. Leur contribution spécifique consiste en l'analyse de procédures de gestion des ressources au niveau de la couche accès, en tenant compte des contraintes et modifications d'architecture apportées par l'introduction dans le système d'informations issues du canal et des FMT. Dans une première partie, le contexte SAGAM de l'étude sera précisée dans ses grandes lignes, eu égard à l'architecture système retenu. Ensuite, dans une deuxième partie, la problématique propre à la modélisation du canal Ka sera exposée, et appliquée directement à l'analyse des performances des couches supérieures, avec une description détaillée de plusieurs approches possibles : approches statistiques par modélisation statique ou modélisation dynamique, analyse par méthodes normalisées IUT, et méthode de conversion prédictive du TEB en paramètres QoS. Une troisième partie est dédiée aux problématiques et performances propres à la contre-mesure. La quatrième partie est axée sur la problématique de la gestion des ressources combinée à une FMT à bande variable. Les protocoles MAC de contrôle d'accès aux ressources radio de type DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*) sont premièrement examinés ; ensuite, les propriétés recherchées pour un contrôle d'admission des connexions (CAC) adapté au système décrit sont passées en revue avant la description d'un modèle prédictif de CAC à capacité variable exploitant la connaissance statistique des instants de réduction de capacité dans le système. Une dernière mais nécessaire partie est consacrée entièrement à la description de la plate-forme de simulation réseau développée au cours de la thèse, et basée sur le logiciel commercial OPNET[®]. L'aspect innovant de cette plate-forme est d'intégrer des informations de propagation, sous la forme à la fois de séries chronologiques d'atténuation du canal, et de cartes radar représentant le champ de précipitation sur une zone géographique délimitée. Cette partie se clôt avec un certain nombre de résultats de simulation obtenus à partir de la plate-forme présentée.

Les perspectives d'amélioration de la plate-forme de simulation en termes d'affinement des modèles de propagation et de formalisation mathématique plus poussée du CAC prédictif à capacité variable, viennent en conclusion.

Due to a congestion of conventional frequency bands, Extremely High Frequencies (EHF) are required. In particular, Ka band has been the subject of an ever-growing, wide interest in the recent years in the field of satellite communications. Thus satellite system designers have been led to facing a twofold constraint : the first one stems from significant tropospheric effects in Ka band which in a high degree translates into strong signal impairments due to rain and amplitude scintillation mainly – up to 20 dB for 0.01 % of the time. This compels one to utilise specific Fade Mitigation Techniques (FMT) to mitigate such impairments in order to ensure satisfactory system link availability. The second constraint introduced directly is related to the very nature of the satellite which possesses limited and costly radio and on-board resources, which leads to implementing efficient, optimised and cost-effective resource management protocols, when sharing resources to various users while guaranteeing them their requested Qualities of Service (QoS).

The framework of the present research work was based on the system architecture of the SAGAM project initiated by the RNRT (*French National Network for Telecommunications Research*) for the purposes of studying a third generation multimedia access system via a regenerative geostationary satellite with on-board ATM switching. Its specific contribution lies in an analysis of resource management protocols located at the access layer, while taking into account the constraints and impacts on the system architecture due to an incorporation of channel and FMT information.

With this in view, in a first chapter, the main system characteristics of the SAGAM project will be described in an overall manner. Then, in a second chapter, the peculiar issue of Ka-band channel modeling will be discussed with an insight into a straightforward application to the analysis of higher layers performance. Indeed several distinct approaches are expounded, namely, statistical approaches with static or dynamic modeling, ITU-oriented analyses, and a channel-predictive BER conversion method specifically developed here. The third chapter is wholly dedicated to the key issues and the performance of FMTs. Then, a fourth chapter tackles the plain issue of resource management combined with the use of a bandwidth-varying FMT. First and foremost, DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*)-oriented MAC (*Medium Access Control*) protocols for controlling access to the radio resource are thoroughly examined; then, various facets of the required properties for an efficient Connection Admission Control (CAC) algorithm fitted to multimedia services via satellite at Ka-band are reviewed. This consistently leads to defining a predictive capacity-varying CAC which exploits an empirical, statistical knowledge of future capacity reduction times. A last but necessary chapter is entirely dedicated to a more technical presentation of the network simulation platform itself which was designed during the research work. The core of this platform is the COTS OPNET[®] network software, and its main innovative aspect lies in its integrating propagation information both in the form of signal attenuation time-series and radar maps representing the rain intensity field over a given limited geographical area.

Some prospects into ways of enhancing the simulation tool in terms of refinement in the propagation models used and more advanced mathematical formulation of the predictive capacity-varying CAC algorithm, come as a conclusion.

SOMMAIRE

PREAMBULE	7
REMERCIEMENTS	9
1 ECHOS VENANT DES SIECLES	10
2 ECHOS VENANT DE L'ESPACE	11
RESUME / ABSTRACT	15
SOMMAIRE	17
GLOSSAIRE	21
1 CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLEME	25
INTRODUCTION	27
1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE : LE PROJET SAGAM	29
1.1.1 <i>Objectifs techniques</i>	29
1.1.2 <i>Architecture du système SAGAM</i>	29
1.2 FORMULATION DE LA PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE.....	31
2 CHAPITRE 2 : PROBLÉMATIQUE DE LA COUCHE PHYSIQUE - MODELISATION DU CANAL DE PROPAGATION ET APPLICATION A L'ANALYSE DES PERFORMANCES DES COUCHES SUPERIEURES	35
2.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES PHÉNOMÈNES TROPOSPHÉRIQUES MAJEURS EN BANDE KA.....	37
2.1.1 <i>Distribution statistique de l'atténuation due à la pluie</i>	38
2.1.2 <i>Distributions statistiques de la scintillation d'amplitude</i>	38
2.1.3 <i>Distribution statistique de l'atténuation globale</i>	39
2.2 APPROCHE STATISTIQUE PAR MODÉLISATION DYNAMIQUE.....	40
2.2.1 <i>Modélisation bidimensionnelle à l'aide d'une variabilité temporelle et d'une variabilité spatiale</i>	40
2.2.2 <i>Modélisation de la variabilité temporelle à l'aide de séries chronologiques d'atténuation</i>	41
2.2.2.1 <i>Séries chronologiques expérimentales d'atténuation</i>	41
2.2.2.2 <i>Génération automatique de séries temporelles</i>	42
2.2.2.3 <i>Le modèle de van de Kamp à deux échantillons</i>	42
2.2.3 <i>Modélisation de la variabilité spatiale par des images radar du champ de précipitation</i>	43
2.2.3.1 <i>Modélisations du champ de précipitation</i>	43
2.2.3.2 <i>Génération de scènes dynamiques</i>	45
2.2.4 <i>Application du modèle dynamique du canal aux simulations</i>	45
2.2.4.1 <i>Application au déploiement de techniques FMT et à l'étude de leurs performances</i>	45
2.2.4.2 <i>Application aux simulations réseau</i>	45
2.3 MODÉLISATION DES ERREURS SUR LES COUCHES SUPÉRIEURES À PARTIR DES ERREURS DU CANAL	50
2.3.1 <i>Justification de l'approche</i>	50
2.3.2 <i>Modèles analytiques paramétriques</i>	51
2.3.3 <i>Méthodologie d'évaluation des performances d'erreur de l'ATM par satellite d'après la recommandation IUT-R Rec. S.1062-1 WP-4B</i>	51
2.3.3.1 <i>Modèles d'erreur</i>	52
2.3.3.2 <i>Analyse des performances d'erreur sur la couche physique suivant la recommandation IUT-T Rec. G.826</i>	53
2.3.3.3 <i>Analyse des erreurs de performances QoS de bout en bout suivant la recommandation IUT-T Rec. I.356</i>	55
2.3.3.4 <i>Gabarit d'erreur S.1062</i>	62
2.3.4 <i>Méthodologie de conversion de statistiques du canal en statistiques de performances QoS</i>	64
2.3.4.1 <i>Distribution statistique du TEB</i>	65
2.3.4.2 <i>Distribution du taux de perte de cellules instantané CLR</i>	66
2.3.4.3 <i>Taux de perte de cellules long terme (\overline{CLR})</i>	66
2.3.4.4 <i>Distribution du taux d'erreur de paquets PER</i>	67
2.3.4.5 <i>Application à l'évaluation des performances de la contre-mesure</i>	67
2.3.5 <i>Modélisation de la qualité perceptive</i>	68
3 CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUES ET PERFORMANCES LIÉES À LA CONTRE-MESURE	69
3.1 PRINCIPE DES FMT	71
3.2 CONFIGURATIONS FMT DE SAGAM	72
3.3 RELATIONS ENTRE LE CANAL ET LA CONTRE-MESURE COMBINÉS, ET LA GESTION DES RESSOURCES.....	73
3.3.1 <i>Techniques de contre-mesure à bande transmise constante</i>	73
3.3.2 <i>Techniques de contre-mesure à bande transmise variable</i>	74
3.3.3 <i>Différenciation des échelles de temps</i>	74
3.3.4 <i>Interactions entre les mécanismes et informations liés au canal et les couches supérieures</i>	74
3.4 PERFORMANCES DES TECHNIQUES DE CONTRE-MESURE.....	75

3.4.1	<i>Prédiction de la disponibilité long terme de la liaison</i>	76
3.4.2	<i>Performances FMT liées à la couche physique</i>	79
3.4.2.1	Configurations FMT.....	79
3.4.2.2	Configuration FMT 2.....	81
3.4.2.3	Configuration FMT3.....	82
3.4.2.4	Résultats comparés des cinq configurations FMT.....	83
3.4.3	<i>Performances en termes de qualité de service</i>	84
3.4.3.1	Distribution statistique du TEB.....	85
3.4.3.2	Distribution statistique du taux de perte de cellules CLR.....	87
3.4.3.3	Distributions statistiques du taux d'erreur de paquets.....	87
3.4.3.4	Apport apporté par la contre-mesure en temps réel.....	88
3.4.3.5	Apport sur le long terme de la contre-mesure.....	88
4	CHAPITRE 4 : MECANISMES DE GESTION DES RESSOURCES AVEC FMT A BANDE VARIABLE	93
4.1	PRINCIPES ET FONCTIONS DE BASE DE GESTION DES RESSOURCES.....	95
4.1.1	<i>Survol d'un gestionnaire de ressources</i>	95
4.1.2	<i>Points critiques dans la gestion des ressources en contexte satellitaire</i>	97
4.1.2.1	Temps de propagation et réactivité des protocoles.....	97
4.1.2.2	Imbrication multinodale et multi-niveau des fonctions de gestion des ressources.....	97
4.1.3	<i>Interdépendance entre la couche physique et les couches supérieures</i>	98
4.2	LE CONTRÔLE D'ACCÈS MULTIPLE MAC À L'INTERFACE AIR.....	99
4.2.1	<i>Classification synoptique des protocoles MAC</i>	99
4.2.2	<i>Principe des protocoles orientés DAMA</i>	102
4.2.2.1	Principe général.....	102
4.2.2.2	Principe du DAMA générique normalisé DVB-RCS de type CFDAMA.....	103
4.3	CAC.....	105
4.3.1	<i>Etat de l'art et classification des mécanismes CAC</i>	105
4.3.1.1	Stratégies conventionnelles de contrôle d'admission.....	106
4.3.1.2	CAC basé sur l'intelligence de calcul artificielle.....	107
4.3.2	<i>Propriétés recherchées pour un CAC optimisé</i>	107
4.3.2.1	Indépendance vis-à-vis des modèles de trafic.....	108
4.3.2.2	Adaptabilité par rapport aux profils de trafic futurs.....	108
4.3.2.3	Prédictibilité.....	108
4.3.3	<i>Autres problématiques liées au CAC</i>	108
4.3.3.1	Effet de saturation.....	108
4.3.3.2	Gestion d'un trop grand nombre d'arrivées simultanées dépassant les ressources disponibles.....	109
4.3.3.3	Dépendance du CAC vis-à-vis des autres entités de gestion des ressources et du canal.....	109
4.4	OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESSOURCES DANS LE CAS D'UNE CONTRE-MESURE À BANDE TRANSMISE VARIABLE.....	109
4.4.1	<i>Effets d'une bande transmise variable due au codage adaptatif et à la réduction de débit</i>	109
4.4.1.1	Réduction du débit.....	109
4.4.1.2	Changement du taux de codage.....	110
4.4.2	<i>Modifications du plan de fréquence</i>	110
4.4.2.1	Plans de fréquence statique à forme d'onde variable.....	110
4.4.2.2	Plans de fréquence dynamiques à forme d'onde variable.....	111
4.5	ELABORATION D'UN CAC PRÉDICTIF À CAPACITÉ VARIABLE EXPLOITANT LA CONNAISSANCE DU CANAL.....	112
4.5.1	<i>Motivations et contexte</i>	112
4.5.2	<i>Principe général d'un CAC à capacité variable</i>	112
4.5.3	<i>Principales hypothèses et notations</i>	113
4.5.4	<i>Stratégie de rejet</i>	114
4.5.4.1	Stratégie de rejet LCFD (<i>Last Come First Dropped</i>).....	114
4.5.4.2	Stratégie de rejet uniforme URD (<i>Uniform Random Dropping</i>).....	115
4.5.5	<i>Stratégie d'admission</i>	115
4.5.5.1	Définitions.....	115
4.5.5.2	Calcul de la probabilité de rejet.....	115
4.5.6	<i>Courbe de limite d'admission (ALC)</i>	116
4.5.6.1	Définitions préliminaires.....	116
4.5.6.2	Frontière séparant la région admissible et la région inadmissible.....	117
4.5.6.3	Définition de l'ALC.....	119
4.5.6.4	Propriétés de l'ALC.....	119
4.5.6.5	Exemple d'ALC avec une stratégie de rejet uniforme.....	120
4.5.7	<i>CAC à instants de changement de capacité aléatoires (RCCT) basé sur l'ALC</i>	120
4.5.7.1	Caractéristiques du CAC RCCT.....	120
4.5.7.2	Principe du CAC RCCT.....	120
4.5.7.3	Extension multi-classe du CAC RCCT.....	121

5 CHAPITRE 5 : PLATE-FORME DE SIMULATION RESEAU INCORPORANT DES INFORMATIONS DE PROPAGATION	125
5.1 PRINCIPE FONCTIONNEL DE LA PLATE-FORME	127
5.2 DESCRIPTION DE L'ARCHITECTURE DE LA PLATE-FORME	128
5.2.1 <i>Modules réseau</i>	129
5.2.1.1 Modèle de station terrestre	129
5.2.1.2 Modèle de satellite	133
5.2.1.3 Nœud Interface	133
5.2.1.4 Modèle de centre de contrôle réseau (NCC)	133
5.2.2 <i>Modules propagation</i>	137
5.2.2.1 Fichiers d'informations radar et de séries chronologiques d'atténuation	138
5.2.2.2 Emulateur FMT	139
5.2.2.3 Emulateur de la variabilité spatiale des cellules de pluie	140
5.3 SIMULATIONS	145
5.3.1 <i>Description des scénarii proposés</i>	145
5.3.2 <i>Canal statique, sans FMT</i>	146
5.3.2.1 Configuration du simulateur	146
5.3.2.2 Tableaux de résultats	146
5.3.2.3 Courbes des délais de bout en bout et des gigues	147
5.3.3 <i>Canal variable en configuration de pluie normale, avec ou sans FMT</i>	148
5.3.3.1 Configuration des simulations	148
5.3.3.2 Validation du mécanisme FMT	149
5.3.3.3 Comparaison des performances avec et sans FMT	157
5.3.4 <i>Canal variable avec FMT en configuration de pluie extrême</i>	158
5.3.4.1 Configuration de la simulation	158
5.3.4.2 Effets de la contre-mesure sur le vidage des cellules	159
CONCLUSION	163
PERSPECTIVES	165
1 APERÇU DES LIMITATIONS DE LA PLATE-FORME DE SIMULATION ET DE SES AMÉLIORATIONS IMMÉDIATES	167
1.1 AMÉLIORATION ET EXTENSION DES ENTRÉES DU SIMULATEUR	167
1.2 INTRODUCTION DE MODÈLES DE TRAFIC PLUS COMPLEXES	167
1.3 DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION D'UN CAC PRÉDICTIF À CAPACITÉ VARIABLE	168
1.4 MODÈLE D'ERREURS DANS LA MÉTHODOLOGIE PRÉDICTIVE DE CONVERSION DU TEB EN CRITÈRES DE PERFORMANCES QoS	168
1.5 MODÈLES AMÉLIORÉS DU CHAMP DE PRÉCIPITATION	168
1.6 ÉTUDE DE LA SIGNALISATION INDUITE PAR L'INTRODUCTION D'UN DISPOSITIF FMT DANS LE SYSTÈME	169
2 EXTENSIONS PROSPECTIVES	169
2.1 AMÉLIORATIONS LIÉES AUX TECHNIQUES ADAPTATIVES DE CONTRE-MESURE	169
2.1.1 <i>Techniques adaptatives sur la liaison descendante</i>	169
2.1.2 <i>Optimisation de la commutation des modes FMT</i>	170
2.1.2.1 Commutation des modes FMT suivant un critère QoS réseau	170
2.1.2.2 Commutation des modes FMT suivant un objectif de maximisation de l'efficacité du canal	170
2.2 ÉVALUATION DE MÉTRIQUES DE QUALITÉ PERCEPTIVE	171
2.2.1 <i>Qualité perceptive pour la voix</i>	172
2.2.2 <i>Qualité perceptive pour la vidéo</i>	172
2.3 CAC COMBINANT PRÉDICTION DE CANAL ET PRÉDICTION DE TRAFIC	173
2.4 PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE IMMÉDIATE DE TYPE "NOWCASTING"	174
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	175
ANNEXE	185
1 BILANS DE LIAISON SAGAM	187
1.1 LIAISON MONTANTE	187
1.1.1 <i>Configurations FMT 1</i>	187
1.1.2 <i>Configuration FMT 2</i>	188
1.1.3 <i>Configuration FMT 3</i>	189
1.2 LIAISON DESCENDANTE	190
2 ARCHITECTURE DE LA BOUCLE DE DÉTECTION FMT DE L'ONERA	190

3	CARACTERISATION STATISTIQUE DU CANAL KA.....	192
3.1	DISTRIBUTIONS DE L'ATTÉNUATION DUE À LA PLUIE ET DE L'ATTÉNUATION DUE À LA SCINTILLATION D'AMPLITUDE	192
3.1.1	<i>Distribution de l'atténuation due à la pluie en liaison montante.....</i>	192
3.1.2	<i>Distribution de l'atténuation due à la pluie en liaison descendante</i>	193
3.1.3	<i>Distribution de la scintillation d'amplitude.....</i>	196
3.1.3.1	Le modèle de Mouldsley-Vilar.....	197
3.1.3.2	Le modèle de van de Kamp.....	197
3.1.3.3	Choix d'un modèle statistique pour la scintillation.....	198
3.2	DISTRIBUTION DE L'ATTÉNUATION DUE À LA PLUIE ET DE LA SCINTILLATION COMBINÉES	199
3.3	DISTRIBUTION DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT	200
3.3.1	<i>Liaison descendante.....</i>	200
3.3.2	<i>Liaison montante.....</i>	201
3.3.2.1	Configuration sans FMT et configurations FMT SAGAM n°1 et n°2.....	202
3.3.2.2	Configuration FMT SAGAM n°3.....	202
3.4	DISTRIBUTION DU TEB	202
3.5	EFFET DE LA SCINTILLATION DE PHASE	204
3.5.1	<i>Modélisation de la scintillation de phase due à la propagation.....</i>	204
3.5.2	<i>Impact du bruit de phase sur une boucle de synchronisation porteuse</i>	204
3.6	MODÈLES STATISTIQUES DES DURÉES D'AFFAIBLISSEMENT	205
3.6.1	<i>Comparaison des performances des distributions.....</i>	206
3.6.2	<i>Choix d'une distribution des durées d'affaiblissement.....</i>	207
3.7	LE MODÈLE DE PLUIE EXCELL.....	208
4	MODÉLISATION DES STATISTIQUES D'ORDRE SUPÉRIEUR DE LA COUCHE PHYSIQUE ET DU TRAFIC COMBINÉS.....	210
5	CARACTÉRISATION STATISTIQUE DES SALVES D'ERREUR.....	213
5.1	CARACTÉRISATION PAR LA DISTRIBUTION DE CONTAGION DE NEYMAN-A.....	213
5.2	CARACTÉRISATION PAR LA FONCTION DE TRANSFERT.....	214
6	TEB EN SORTIE DU DÉCODEUR REED-SOLOMON.....	215
7	PROBABILITÉ DE PERTE DE CELLULES ATM (CLR) DANS LE CAS D'ERREURS ALÉATOIRES	217
8	DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DE PARAMETRES QOS DANS LE CAS DU TURBO-CODE DVB-RCS 2/3 EN LIAISON MONTANTE	219
9	MISE EN ŒUVRE DU CAC PREDICTIF DE TYPE RCCT ADAPTE A SAGAM	221
9.1	CONFIGURATIONS DE SIMULATION.....	221
9.1.1	<i>CAC étalon fictif sur une liaison montante unique.....</i>	221
9.1.2	<i>Approximation d'un CAC réel pour une architecture multi-station.....</i>	221
9.2	ARCHITECTURE DU CAC RCCT	222
9.3	DESCRIPTION DES ALGORITHMES.....	222
9.3.1	<i>Estimation de l'instant futur de changement de capacité</i>	222
9.3.2	<i>Classification des connexions suivant les classes de service ATM.....</i>	222
9.3.3	<i>Processeur central de calcul de capacité</i>	222
9.3.3.1	Modes de calcul de la capacité	222
9.3.3.2	Calcul de la dimension système et des capacités C_0 et C_1	223
9.3.4	<i>Superposition des connexions d'une même classe.....</i>	223
9.3.5	<i>Sous-processeurs d'admission</i>	223
9.3.6	<i>Processeur de rejet.....</i>	224
9.3.6.1	Rejet global avec priorité sur les classes de service	225
9.3.6.2	Rejet global avec sélection aléatoire de la classe de service	226
9.3.6.3	LCFD avec prise en compte des modes FMT.....	226

GLOSSAIRE

AAL	:	ATM Adaptation Layer
ABR	:	Available Bit Rate
AC	:	Adaptive Coding
ACM	:	Adaptive Coding and Modulation
ALC	:	Admission Limit Curve
AMT	:	Aggregate Measurement Table
ANN	:	Artificial Neural Network
ARQ	:	Automatic Repeat reQuest
ASN	:	ATM Switching Node
ATM	:	Asynchronous Transfer Mode
BAC	:	Block Acceptance Control
BBE	:	Background Block Error
BBER	:	Background Block Error Ratio
BDC	:	Booked Dynamic Capacity
BER	:	Bit Error Rate
BLC	:	Burst Length Criterion
BPSK	:	Binary Phase Shift Keying
BS	:	Burst Size
BT	:	Burst Tolerance
BTP	:	Burst Time Plan
CAC	:	Call Admission Control
CBR	:	Constant Bit Rate
CC	:	Concatenated Coding
CCITT	:	Comité Consultatif International pour le Téléphone et le Télégraphe
CDF	:	Cumulative Density Function
CDV	:	Cell Delay Variation
CDVT	:	Cell Delay Variation Tolerance
CEC	:	(Code de) Correction d'Erreur Directe
CER	:	Cell Error Ratio
CFDAMA	:	Combined Free/Reservation Demand Assignment Multiple Access
CFDAMA-PA	:	Combined Free/Reservation Demand Assignment Multiple Access - Pre-Assigned
CFDAMA-PB	:	Combined Free/Reservation Demand Assignment Multiple Access - Piggy-Backed
CFDAMA-RA	:	Combined Free/Reservation Demand Assignment Multiple Access - Random Access
CI	:	Computational Intelligence
CLP	:	Cell Loss Priority
CLP	:	Cell Loss Probability
CLR	:	Cell Loss Ratio
CMR	:	Cell Misinsertion Rate
CNFR	:	Conduit Numérique Fictif de Référence
COTS	:	Commercial On The Shelf
CRA	:	Continuous Rate Assignment
CRC	:	Cyclic Redundancy Code
CS	:	Control Station
CSC	:	Common Signalling Channel
CSMA	:	Carrier Sense Multiple Access
CTD	:	Cell Transfer Delay
CVGH	:	Capacity-Varying Greedy Heuristic
DAMA	:	Demand Assignment Multiple Access
DLPC	:	DownLink Power Control
DM	:	Detection Margin
DRR	:	Data Rate Reduction
DVB	:	Digital Video Broadcasting
DVB-RCS	:	Digital Video Broadcasting- Return Channel via Satellite
DVB-S	:	Digital Video Broadcasting over Satellite
EB	:	Equivalent Bandwidth
EFT	:	Error Free Throughput
EHF	:	Extremely High Frequency

EPD	:	Early Packet Discard
ER	:	Explicit Rate
ES	:	Errored Second
ESR	:	Errored Second Ratio
FAMA	:	Fixed Assignment Multiple Access
FCA	:	Free Capacity Assignment
FCR	:	Frame Configuration Report
FDM	:	Fixed Detection Margin
FEC	:	Forward Error Correction
FER	:	Frame Error Rate
FIFO	:	First-In First-Out
FL	:	Fuzzy Logic
FM	:	Frequency Modulation
FMT	:	Fade Mitigation Technique
FSP	:	Fractal of Simple Pulses
FTP	:	File Transfer Protocol
GBN	:	Go Back N
GCRA	:	Generic Cell Rate Algorithm
GEO	:	Geostationary Earth Orbit
GFR	:	Guaranteed Frame Rate
GPS	:	Generalized Processor Sharing
GRI	:	Gestionnaire des Ressources Intégré
HDLC	:	High-level Data Link Control
HDR	:	High Data Rate
HDTV	:	High Definition TeleVision
HEC	:	Header Error Control
HF	:	High Frequency
HM	:	Hysteresis Margin
HRP	:	Hypothetical Reference Path
HRX	:	Hypothetical Reference Connection
IBR	:	In-Band Request
IBT	:	Intrinsic Burst Tolerance
ICI	:	Interface Control Information
ICI	:	Inter Carrier Interface
IFR	:	Increasing Failure Rate
IIP	:	International Interoperator Portion
IP	:	Internet Protocol
ITU	:	International Telecommunications Union
ITU-R	:	International Telecommunications Union – Radio Standardization Sector
ITU-T	:	International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector
LAN	:	Local Area Network
LAP-B	:	Link Access Protocol-B
LB	:	Leaky Bucket
LCFD	:	Last Come First Dropped
LEO	:	Low Earth Orbit
LF	:	Low Frequency
LIFO	:	Last In First Out
LLC	:	Logical Link Control
LQ	:	Listening Quality
LRD	:	Long Range Dependence
MAC	:	Multiple Access Control
MBAC	:	Measurement-Based Admission Control
MBS	:	Maximum Burst Size
MCR	:	Minimum Cell Rate
MDR	:	Medium Data Rate
MF	:	Medium Frequency
MF-TDMA	:	Multiple Frequency - TDMA
MKP	:	Multiple Knapsack Problem
MMDP	:	Markov-Modulated Deterministic Process
MMP	:	Markov-Modulated Process
MMPP	:	Markov-Modulated Poisson Process
MOS	:	Mean Opinion Score

MPEG	:	Motion Picture Expert Group
MPQM	:	Moving Pictures Quality Metric
MQAM	:	Multi-QAM
MTC	:	MAC Transfer Capability
MTC-AS	:	MAC Transfer Capability - ATM Signalling
MTC-HP	:	MAC Transfer Capability - High Priority
NBDC	:	Non-Booked Dynamic Capacity
NCC	:	Network Control Center
NFCAC	:	Neural Fuzzy CAC
NGN	:	Next-Generation Network
NNI	:	Network to Network Interface
Nrt-VBR	:	Non Real-Time Variable Bit Rate
NVFM	:	Normalised Video Fidelity Metric
OBBS	:	On-Board Beam Shaping
OBR	:	Out-Band Request
OSI	:	Open System Interconnection
PCR	:	Peak Cell Rate
PDF	:	Probability Density Function
PDH	:	Plesiochronous Digital Hierarchy
PDMA	:	Polarization Division Multiple Access
PDU	:	Protocol Data Unit
PER	:	Packet Error Ratio
PESQ	:	Perceptual Evaluation of Speech Quality
PIRE	:	Puissance Isotropique Rayonnée Effective
PLL	:	Phase Lock Loop
PMF	:	Probability Masss Function
PSD	:	Power Spectrum Density
PSK	:	Phase Shift Keying
PSNR	:	Peak Signal to Noise Ratio
QoS	:	Quality of Service
QAM	:	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	:	Quaternary Phase Shift Keying
RBDC	:	Rate-Based Dynamic Capacity
RC	:	Reserved Capacity
REM	:	Rate-Enveloppe Multiplexing
RM	:	Resource Management
RMA	:	Random Multiple Access
RMS	:	Root Mean Squared
RNIS	:	Réseau Numérique à Intégration de Services
RNRT	:	Réseau National de Recherche en Télécoms
RRMA	:	Reservation Random Multiple Access
Rt-VBR	:	Real-Time Variable Bit Rate
RSM	:	Rate-Sharing Multiplexing
RTD	:	Round Trip Delay
RX	:	Receiver
SAGAM	:	SATellite Géostationnaire d'Accès Multimédia
SCD	:	Selective Cell Discard
SDMA	:	Space Division Multiple Access
SCPC	:	Single Channel Per Carrier
SCR	:	Sustainable Cell Rate
SDH	:	Synchronous Digital Hierarchy
SECB	:	Severely Errored Cell Block
SECBR	:	Severely Errored Cell Block Ratio
SES	:	Severely Errored Second
SESR	:	Severely Errored Second Ratio
SMAQ	:	Statistical Match And Queueing tool
SNR	:	Signal to Noise Ratio
SONET	:	Synchronous Optical NETWORKS
SPD	:	Selective Packet Discard
SPP	:	Switched Poisson Process
SRD	:	Short Range Dependence
SVC	:	Switched Virtual Channel

TCM	:	Trellis-Coded Modulation
TCP	:	Transmission Control Protocol
TDM	:	Time Division Multiplex
TDMA	:	Time Division Multiple Access
TEB	:	Taux d'Erreur par Bit
TWTA	:	Travelling Wave Tube Amplifier
UBR	:	Unspecified Bit Rate
UDLPC	:	Uplink and DownLink Power Control
UES	:	User Earth Station
ULPC	:	UpLink Power Control
UNI	:	User to Network Interface
UPC	:	Usage Parameter Control
URD	:	Uniform Random Dropping
VBDC	:	Volume-Based Dynamic Capacity
VBDC-LP	:	Volume-Based Dynamic Capacity - Low Priority
VBDC-HP	:	Volume-Based Dynamic Capacity - High Priority
VBR	:	Variable Bit Rate
VC	:	Virtual Channel
VCI	:	Virtual Channel Identifier
VDM	:	Variable Detection Margin
VoIP	:	Voice over IP
VP	:	Virtual Path
VPI	:	Virtual Path Identifier
VSAT	:	Very Small Aperture Terminal
WFQ	:	Weighted Fair Queuing

1 CHAPITRE 1 :

INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLEME

INTRODUCTION

Fondé par le Ministère de l'Industrie dans le but de promouvoir les technologies liées aux télécommunications en France, le Réseau National de Recherche en Télécommunications (RNRT) a approuvé le projet SAGAM en 1998. Son objectif principal était d'élaborer des solutions opérationnelles pour des services d'accès multimédia à partir d'un satellite géostationnaire.

SAGAM s'inscrit dans une tendance dans les télécommunications marquée par le développement rapide du large bande qui a entraîné une demande croissante de bande passante du fait de la montée en débit. Cette demande a été fortement consolidée par l'explosion du multimédia qui consiste en la convergence sur un même système de services de tous types : voix, images, transferts de données, vidéo, etc.. Toutefois, en raison de la congestion des bandes de fréquence conventionnelles, le recours à des fréquences extrêmement élevées (Ku/Ka et au-delà) est devenu indispensable. Face à ce défi à multiples facettes, le satellite dont le déploiement est aisé et peu coûteux et qui permet une couverture globale même dans des zones peu accessibles, en concurrence avec les technologies terrestres (la fibre optique), a pris une large part dans les discussions et les études de ces dernières années qui se sont focalisées sur différents systèmes : l'ATM par satellite, les architectures régénératives avec traitement à bord (en particulier la commutation de paquets de taille fixe ou variable), le DVB-S/RCS. Des points critiques ont été clairement identifiés : manque de flexibilité, contraintes de masse et de consommation à bord poussant vers des technologies appropriées ; limitations des ressources à bord et radio nécessitant une gestion optimisée tenant compte du canal engendrant, dans ces bandes de fréquence, de forts affaiblissements.

La présente étude s'insère à la frontière des deux sous-projets "Gestion des Ressources" et "Terminal Utilisateur" de SAGAM.

Ce document analyse la gestion des ressources dans un système satellitaire géostationnaire régénératif calqué sur l'architecture SAGAM et opérant en bande Ka pour des applications multimédia, et présente la réalisation d'une plate-forme de simulation réseau à l'aide du logiciel OPNET^{®.a} permettant d'évaluer les performances. L'étude s'appuie sur l'architecture du Gestionnaire de Ressources Intégré (GRI) du projet SAGAM, et est motivée par l'introduction dans le système d'une technique de lutte contre les affaiblissements (FMT ou *Fade Mitigation Technique*) basée sur un contrôle de puissance sur la voie montante (ULPC : *UpLink Power Control*), un codage adaptatif (AC : *Adaptive Coding*) et une réduction du débit d'information (DRR : *Data Rate Reduction*). L'impact de ces techniques sur la gestion des ressources d'un tel système n'a pas été jusqu'à présent examiné en détail. La prise en compte de la modélisation des effets d'atténuation due à la pluie dans le canal Ka se situe à trois niveaux distincts et complémentaires :

- ✓ Modélisation de la variabilité spatiale des cellules de pluie permettant d'estimer les ressources consommées en vue par exemple d'établir un contrôle plus centralisé et plus optimal des dispositifs FMT des stations agglomérées dans un faisceau donné ;
- ✓ Impact du changement de taux de codage et de débit de transmission en cours de communication sur la gestion des ressources en termes de plan de fréquence, et d'allocation des intervalles de temps (BTP : *Burst Time Plan*), et de modification de certaines fonctions clé de gestion des ressources ;
- ✓ Modélisation des effets de la dynamique du canal de propagation sur les performances de qualité de service QoS des couches supérieures (couche ATM et couche réseau), en particulier au niveau des files d'attente de la couche accès.

L'étude débouche sur une proposition d'un mécanisme amélioré dit « prédictif » de contrôle d'admission des connexions (CAC) qui prend en compte l'information de l'état du canal dans sa stratégie d'admission, en vue de minimiser les probabilités de rejet d'appels a posteriori. L'apport du travail réside également dans la mise au point d'une plate-forme de simulation réseau intégrant des informations relatives au comportement du canal et des techniques de contre-mesure.

^a OPNET[®] (OPTimum NETwork performance) est une marque déposée d'OPNET Technologies, Inc.

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE : LE PROJET SAGAM

SAGAM, signifiant **S**ATellite **G**éostationnaire d'**A**ccès **M**ultimédia [98,99], est un projet du Réseau National de Recherche en Télécoms (RNRT) qui avait pour objectifs de fournir des solutions aux opérateurs désirant offrir des accès aux services multimédia à partir de satellites dédiés de troisième génération. Il a permis de valider certains concepts novateurs et de démontrer aux opérateurs potentiels de tels systèmes que les architectures et les solutions proposées sont matures.

Le projet SAGAM comportait trois axes complémentaires répondant chacun à une difficulté technique particulière, articulés autour d'un référentiel technique commun identifiant les caractéristiques génériques d'un système d'accès multimédia par satellite géostationnaire, de façon à ne garder qu'un minimum de caractères spécifiques, et garantissant la cohérence de l'ensemble :

- Le sous projet "**Gestion des ressources**" ;
- Le sous projet "**Récepteur bord**" ;
- Le sous-projet "**Terminal Utilisateur**".

La démarche proposée reposait sur des études système, des simulations et un maquetage de quelques-unes des fonctions dont la faisabilité devait permettre l'industrialisation puis la commercialisation de produits satisfaisant aux contraintes inhérentes aux télécommunications par satellite ou aux produits grand public.

1.1.1 Objectifs techniques

La quasi-totalité des projets de satellites multimédia présente des caractéristiques communes, comme l'utilisation de la bande Ka, le traitement numérique embarqué ou la multiplicité des faisceaux, car ils ont besoin de beaucoup de bande passante et servent des utilisateurs avec des stations faible coût. La logique du projet SAGAM consistait donc à se fixer un référentiel technique basé sur les caractéristiques communes prévisibles des différents systèmes, afin d'être en mesure de réagir vite avec une solution adaptée lorsque les spécificités de chaque programme seraient connues. Les points durs particuliers ont fait l'objet de sous-projets à part entière, débouchant sur la réalisation de démonstrateurs destinés à valider une solution. Les trois principaux points durs identifiés étaient :

- ✓ La gestion des ressources : c'est elle qui assure la meilleure utilisation des ressources entre tous les utilisateurs, c'est à dire l'affectation maximale des ressources pour une qualité de service donnée. Elle est donc directement liée au nombre d'utilisateurs potentiels du système, c'est à dire à sa rentabilité.
- ✓ La démodulation bord à faible rapport signal à bruit : pour un système s'adressant au grand public, la puissance de la station utilisatrice est limitée pour être compatible de coûts raisonnables. Il est donc important d'imaginer des formes d'onde adaptées à une démodulation avec un signal faible, et compatibles d'une réalisation bord.
- ✓ La station utilisatrice doit pouvoir tenir les performances pour un coût minimal, ce qui représente une innovation importante dans la bande Ka, où les conditions de propagation sont plus défavorables que dans les bandes de fréquences plus basses.

1.1.2 Architecture du système SAGAM

Le système SAGAM est un système d'accès multimédia par satellite géostationnaire basé sur de la commutation ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) embarquée [24]. Le système est fondé sur trois segments [24,105,106,110,123] :

- ✓ Le **segment spatial** est composé d'un satellite géostationnaire avec un nœud de commutation ATM appelé *ASN (ATM Switching Node)*.
- ✓ Le **segment usager** est composé de stations terrestres appelées *UES (User Earth Stations)*.
- ✓ Le **segment de contrôle** ATM qui contient un processeur de traitement d'appel ou contrôleur *SVC (Switched Virtual Channel controller)*, une station de contrôle (*CS ou Control Station*) et le contrôleur radio, tous situés dans un centre de contrôle réseau *NCC (Network Control Centre)*. Le contrôleur radio aujourd'hui centralisé dialogue avec des agents radio répartis par *UES*. Le contrôleur radio comprend deux entités, l'une appelée *DAMA (Demand Assignment Multiple Access)* gère le partage de la ressource radio montante et l'autre appelée *BAC (Block Acceptance Control)* prévient les risques de congestion sur les liens descendants pour les connexions de type non-temps réel sporadiques. Le *BAC* complète ainsi l'allocation faite par le contrôleur *DAMA* en ajoutant des contraintes liées à l'occupation des liens descendants. En effet, il est inutile de faire monter du trafic s'il peut être anticipé qu'il ne pourra pas redescendre et risque donc de créer une situation de congestion dans la matrice embarquée.

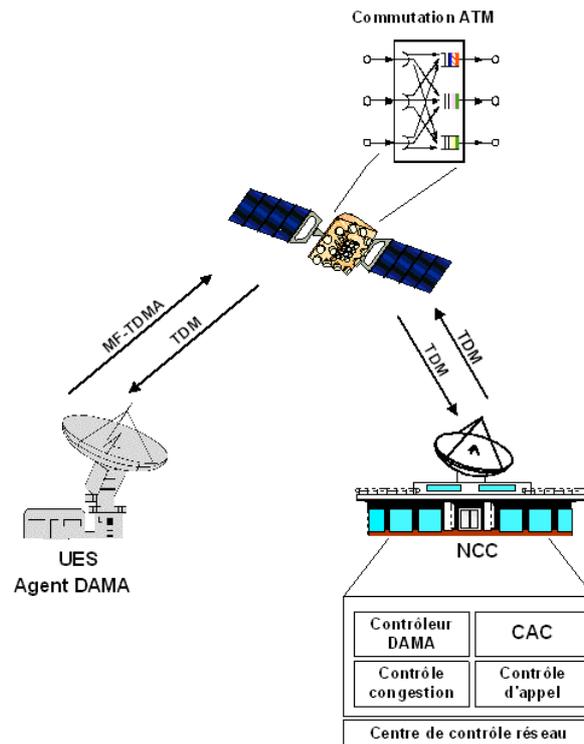


Figure 1 : Architecture du système SAGAM

Les principales caractéristiques du système SAGAM sont les suivantes [24] :

- ✓ L'orbite est géostationnaire, ce qui introduit un délai de transit sol-bord-sol RTD (*Round Time Delay*) minimal d'environ 250 ms ;
- ✓ Le système opère en bande Ka qui offre des bilans de liaison très sensibles aux perturbations atmosphériques. Ceci entraîne de fortes atténuations sur le signal et limite la disponibilité de la ressource radio. Ces affaiblissements doivent être compensés par la mise en place de codages spécifiques suffisamment performants ;
- ✓ Le système est multifaisceaux (la couverture géographique sol est découpée en zones circulaires appelées faisceaux) permettant une réutilisation des fréquences d'émission/réception par faisceau. En outre, grâce à la matrice embarquée offrant une connectivité totale, cette structure permet à une station sol quelconque appartenant à un faisceau montant quelconque, de joindre n'importe quelle autre station sol dans n'importe quel faisceau descendant ;
- ✓ Les faisceaux montants et descendants sont congruents : ils couvrent la même surface. D'autres faisceaux peuvent également être congruents par type de stations desservies ;
- ✓ Les stations terrestres sont de deux types : soit des stations de réseaux résidentiels de petite capacité, soit des stations de réseau passerelle d'interconnexion vers des réseaux terrestres existants ;
- ✓ Accès montant MF-TDMA (*Multiple Frequency - Time Division Multiple Access*) pour les stations de type résidentiel : différentes stations se partagent les mêmes ressources radio sur la voie montante. En fonction du trafic qu'elles hébergent, les stations résidentielles reçoivent des affectations de ressources exprimées en nombre de créneaux par trame TDMA montante ;
- ✓ Accès descendant en diffusion TDM (*Time Division Multiplex*) pour les stations de type résidentiel : toutes les stations d'un faisceau reçoivent toutes les informations destinées à l'ensemble des stations du faisceau et détruisent celles qui ne les concernent pas ;
- ✓ Accès SCPC (*Single Channel Per Carrier*) montant et descendant pour les stations de type passerelle. Dans ce cas, il n'y a aucun partage radio : une porteuse est entièrement dédiée à une station réseau passerelle ;
- ✓ Système mono opérateur : en première approche, l'opérateur satellite est également opérateur télécoms. Autrement dit, une seule entité gère les ressources satellite et les ressources télécoms ;
- ✓ Commutation de type ATM embarquée dans un satellite régénératif, offrant différents niveaux de qualité de service QoS (*Quality of Service*).

Les fonctions de supervision du réseau sont réalisées dans la station de contrôle puisque le réseau ne comporte qu'un seul nœud.

Les UES pour les résidentiels ou groupes de résidentiels offrent une interface UNI (*User to Network Interface*) et/ou IP (*Internet Protocol*). De la même manière, les UES passerelle peuvent relier le système satellite à des réseaux soit ATM,

soit IP, soit autres, via, dans ce dernier cas, une fonction d'adaptation chargée de la connexion ATM et de la signalisation associée.

Par ailleurs, les types de connexion possibles sur le système sont : des connexions résidentiel à résidentiel, des connexions résidentiel à passerelle, des connexions passerelle à résidentiel ou encore des connexions passerelle à passerelle. Ces connexions peuvent en outre être point à point ou point à multipoint.

Une hypothèse fondamentale dans la définition du système SAGAM est que toutes les données échangées entre utilisateurs finaux ou avec le centre de contrôle du réseau transitent par le satellite. Autrement dit, les données utiles, la signalisation, la gestion des équipements réseaux, les informations de maintenance passent par le satellite, il n'y a aucune liaison sol-sol.

Du point de vue système, les critères qui orientent la définition et le dimensionnement des protocoles d'accès sont les suivants :

- ✓ Maximisation de l'utilisation de la ressource radio ;
- ✓ Adaptation des différentes QoS et des paramètres de trafic aux différentes capacités de transfert ATM (catégories de services) et aux autres types de protocoles (piles TCP/IP par exemple) ;
- ✓ Dissimulation des problèmes de gestion des ressources aux couches hautes (couche ATM et service) ;
- ✓ Dissimulation des problèmes de gestion des ressources aux interfaces externes UNI, NNI (*Network to Network Interface*), ICI (*Inter Carrier Interface*) ;
- ✓ Minimisation de la complexité induite sur la charge utile.

1.2 FORMULATION DE LA PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

Ces dernières années, l'intérêt majeur pour le satellite à accès large bande pour les services multimédia a donné une impulsion très significative à l'étude d'architectures géostationnaires multifaisceaux, régénératives, opérant en bande Ku/Ka mettant en œuvre le protocole DVB-S/RCS (*Digital Video Broadcasting by Satellite / Return Channel via Satellite*) [ETSI EN 300 421 v1.1.1.2, ETSI EN 301 790 v1.2.2;152] comme l'une des solutions phares comme en témoignent les différents projets européens suivants, outre SAGAM : GEOCAST [182,183] (projet de l'Information Society Technology, dont l'objectif était de répondre aux problématiques relatives aux services multicast déployés sur les satellites multimédia existants ou de nouvelle génération en vue d'une normalisation), DIPCAST [184] (DVB comme support de l'IP multiCast par SaTellite pour des applications de types divers : données, voix et vidéo), DOMINO2 [5] (analyse de systèmes satellitaires géostationnaires multimédia en bande Ka). Ces solutions ne cessent de foisonner de par l'attrait exercé par cette bande de fréquence en tant que solution alternative aux constellations en orbite basse (LEO ou *Low Earth Orbit*) ainsi qu'en raison des avantages obtenus par les stations VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) à faible coût.

Dans le cadre propre du projet SAGAM, le découpage du projet en trois sous-projets distincts illustre bien la démarche dominante dans lesquelles s'est inscrite la grande majorité des études et recherches liées aux nombreuses problématiques des systèmes satellitaires en bande Ka : dès le départ, la couche physique (elle-même subdivisée ici suivant un axe propagation pur et un axe forme d'onde) et les couches supérieures (en particulier ATM, accès et réseau) ont été décorrélées, ce qui revient à postuler implicitement que le système dans sa totalité doit être étudié par blocs indépendants.

Cette démarche a largement prévalu dans les très récents travaux sur les systèmes satellitaires en bande Ka tels que ceux cités plus haut. En effet, deux approches distinctes ont nettement émergé :

- ✓ Une première approche axée entièrement sur la couche physique et plus spécialement sur les aspects liés à la propagation, c'est-à-dire sur les phénomènes troposphériques rencontrés dans la bande Ka, principalement l'atténuation due à la pluie et à la scintillation d'amplitude, soit en terme de description physique, soit en terme de caractérisation et modélisation statistiques [25,29-31,43,51,55,71,97,102,121,122,126-128,131,133,137,139-150]. Un deuxième volet important de cette orientation suivant la couche physique a été l'étude approfondie des techniques de contre-mesure, de leur optimisation, de leur déploiement dans certains cas par hybridation, appliquées à la liaison physique pour contrecarrer la forte atténuation rencontrée, et de leurs performances, en particulier leur impact sur la qualité de la liaison en termes de disponibilité et de capacité [187,26,57,68,72-75,77-80,84-86,95,100,101].
- ✓ Une seconde approche se concentre de façon quasi exclusive sur des études des performances réseau, en particulier au niveau de la couche accès ou au niveau cellules avec toute l'étendue des problématiques associées à la gestion des ressources.

Il convient de remarquer qu'à ce stade, si les études foisonnent de part et d'autre de cette limite des couches suivant une vue de type OSI (*Open System Interconnection*), relativement peu de travaux jusqu'à présent ont été menés suivant une

approche essentiellement *multicouche* consistant spécifiquement à lier intrinsèquement les deux couches mentionnées, dans le cadre spécifique de la liaison satellitaire dans le canal Ka.

Or, le recours à des bandes de fréquences élevées telles que la Ka est inévitable pour décongestionner les bandes de fréquences traditionnelles. Les contraintes troposphériques du canal de propagation deviennent dès lors très sensibles et préjudiciables aux liaisons terre / satellite, ce qui oblige inéluctablement à employer des techniques de contre-mesure pour contrebalancer la forte atténuation expérimentée par ces liaisons.

C'est dans ce contexte qu'intervient l'étude présente sur l'incidence de la prise en compte des effets de mécanismes de lutte contre les affaiblissements en bande Ka sur la gestion des ressources dans un système d'accès multimédia par satellite géostationnaire, avec la particularité suivante : l'introduction des FMT à *bande transmise variable* due au codage adaptatif et des débits de transmission variables de manière à augmenter la marge de compensation statique des affaiblissements est une donnée nouvelle qui n'a pas été à ce jour examinée dans ses effets. Les chapitres suivants abordent la problématique de l'affectation de différents modes FMT sur les trafics transmis en liaison montante, et des contraintes et effets de cette affectation sur l'architecture des fonctions de gestion des ressources, jusqu'ici opérant implicitement à bande transmise constante, et sur les performances système. Un accent particulier est mis sur les mécanismes CAC et DAMA qui constituent deux mécanismes essentiels d'affectation des ressources, le premier au niveau connexion (partage grossier des ressources) et l'autre au niveau créneaux de trame (partage affiné des ressources). Ces deux mécanismes requièrent d'être optimisés de manière à être plus adaptés à cette bande de transmission variable, et plus étroitement liés au caractère prédictif introduit dans le système du fait de la prise en compte de l'évolution du canal, ce qui amène à faire interagir des processus ayant chacun son échelle de temps spécifique : la minute (niveau appel), la seconde (phénomènes de propagation), la milliseconde (niveau créneaux temporels et trame).

Cette problématique est abordée à l'aide d'un outil de simulation qui permet de quantifier les résultats obtenus avec ces nouveaux algorithmes. C'est ainsi qu'a été développée une plate-forme de simulation du système décrit, modélisant l'effet du canal de propagation, au sein d'un environnement propre à un logiciel de commerce orienté réseau, en l'occurrence OPNET. Plus précisément, le comportement du canal a été reproduit par l'intermédiaire de séries chronologiques empiriques ou générées automatiquement, et des images radar permettant de corréler spatialement des évolutions d'atténuation subies par différentes stations situées dans une même couverture, et un émulateur FMT à base d'un principe simplifié de détection du signal. L'outil complet forme une plate-forme de simulation « tout intégrée » permettant d'analyser le comportement au niveau ATM, accès, MAC, avec la finesse et la pondération apportées par la composante propagation.

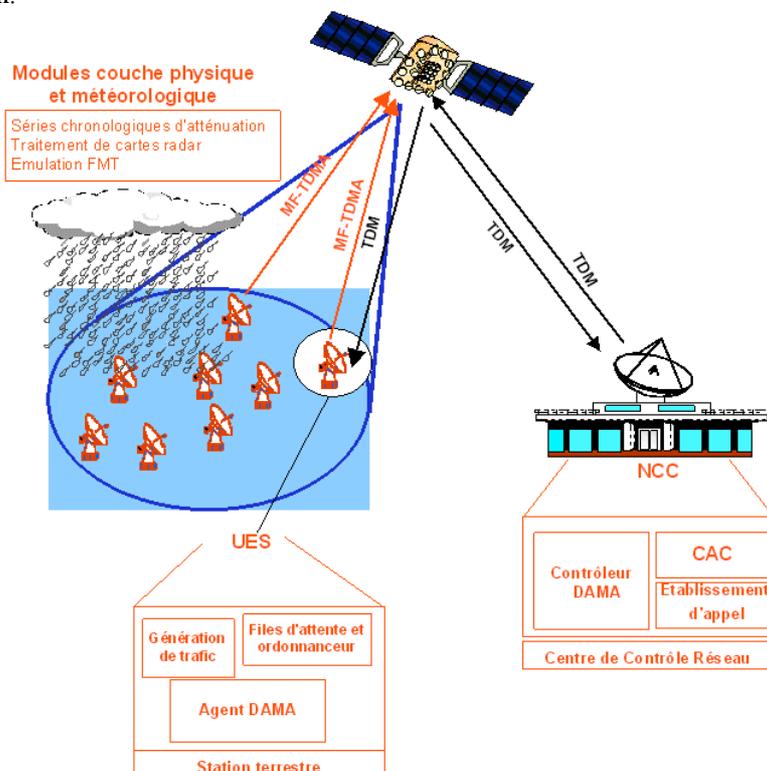


Figure 2 : Analyse combinée des phénomènes du canal Ka et de la gestion des ressources

La résolution de cette problématique s'appuie sur un faible nombre de choix de directions parmi toutes celles possibles et/ou existantes, qui seront justifiés tout au long de ce mémoire, et entend donner un certain nombre de réponses utiles au carrefour des divers domaines mentionnés.

Les présents travaux se calquent sur une architecture système de référence qui reprend les caractéristiques principales du système SAGAM décrit précédemment, mais avec un degré de finesse beaucoup moins élaboré et sans que tous les éléments aient été modélisés. Les éléments essentiels retenus sont :

- ✓ La décomposition du système [106,110] en trois segments distincts :
 - Le segment sol comprenant 10000 stations par faisceau et des stations passerelle ;
 - Le segment de contrôle constitué par un centre de contrôle réseau qui contient les principales fonctions de contrôle réseau et de gestion de ressources ;
 - Le segment spatial représenté par un satellite géostationnaire régénératif, multifaisceaux et avec commutation ATM embarquée.
- ✓ Les stations partagent une ressource radio commune sur la liaison montante au moyen d'un accès multiple MF-TDMA selon un protocole d'allocation de capacité à la demande combinée à une allocation libre appelée communément DAMA, tandis que toute l'information diffusée en liaison descendante est multiplexée dans une trame TDM.
- ✓ Pour les stations résidentielles à débit moyen MDR (*Medium Data Rate*) qui sont les seules à être considérées, les formes d'onde ATM sur DVB-S sont utilisées sur l'interface air montante et les cellules ATM sont encapsulées dans des paquets de transport MPEG-2 (TS ou *Transport Stream*) dans le flot descendant en conformité avec la norme DVB-RCS (ETSI EN 301 790 v1.2.2) [116].
- ✓ La liaison est asymétrique, le trafic est dominé par la liaison descendante (voie directe dans la configuration SAGAM), c'est-à-dire dans le sens du satellite vers les stations terrestres. Seule la liaison retour fait l'objet de l'étude présente.
- ✓ La boucle de contrôle de la contre-mesure dans SAGAM est construite sur la base d'une architecture centralisée comme préconisé par le DVB-RCS, dans laquelle les mesures de la puissance du signal en liaison montante sont effectuées par les démodulateurs localisés à bord du satellite, et envoyées au centre de contrôle réseau dans une table de mesures agrégées (AMT ou *Aggregate Measurement Table*). Dans cette architecture, le NCC a une visibilité totale sur l'état du système (puissance du signal sur les liaisons, interférences de puissance entre les stations, etc.) et est par conséquent capable d'orchestrer toutes les actions de contre-mesure. Il peut notamment décider d'enclencher une même action FMT (par exemple une commutation vers un même taux de codage) sur différentes stations regroupées, confinées dans un certain voisinage géographique.
- ✓ Le système fonctionnant uniquement avec une gestion de puissance ULPC a été dimensionné de manière à pouvoir compenser une atténuation admissible maximale de 6.1 dB pour un taux de codage de 1/2 (configuration FMT 1A, voir bilan de liaison en *Annexe, §1.1.1*), ce qui correspond à une disponibilité globale de la liaison de 99.8444%. Les bilans de liaison prévus pour la configuration système correspondant à une configuration FMT appelée n°3 (voir §3.2) garantissent une atténuation admissible maximale de 10.3 dB, soit une disponibilité de la liaison de 99.9498%. Les chiffres de disponibilité ont été obtenus à partir de la recommandation Rec. P.618-7 de l'IUT [185], en supposant une liaison montante à 29.66 GHz, une station située à Louvain la Neuve en Belgique (latitude : 50.67° et taux de précipitation pour 0.01% du temps : 22 mm/h), un angle d'élévation de 65° et un angle d'inclinaison de polarisation de 45°.

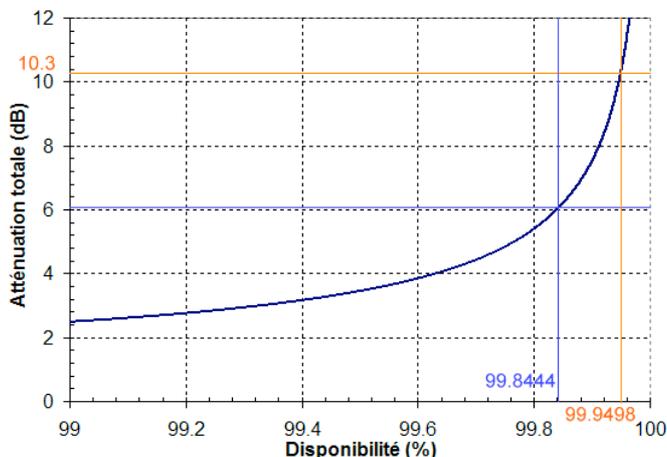


Figure 3 : Atténuation totale calculée sur le site de Louvain la Neuve (Belgique) pour une liaison montante à 29.66 GHz, en fonction de la disponibilité

- ✓ Les bilans de liaison ont été établis pour trois configurations système distinctes avec ou non un dispositif de contre-mesure. Ils sont présentés dans l'annexe, dans la section §1.1.
- ✓ Les bilans de liaison choisis (cf. : *Annexe, §1.1*) permettent d'obtenir les chiffres théoriques suivants pour la capacité système :

Configuration FMT	Configuration n°1 (B) (ULPC, taux de codage 3/4)	Configuration n°2 (FMT à 2 modes)		Configuration n°3 (FMT à 3 modes)		
Capacité système (bit/s par Hz de bande passante)	0.706	Mode 1 0.706	Mode 2 0.471	Mode 1 0.805	Mode 2 0.69	Mode 2 0.46

Tableau 1 : Valeurs de la capacité système obtenues par les bilans de liaison SAGAM dans les configurations FMT SAGAM

- ✓ L'objectif de TEB (taux d'erreur par bit) à satisfaire est de 10^{-9} .

2 CHAPITRE 2 :

PROBLEMATIQUE DE LA COUCHE PHYSIQUE

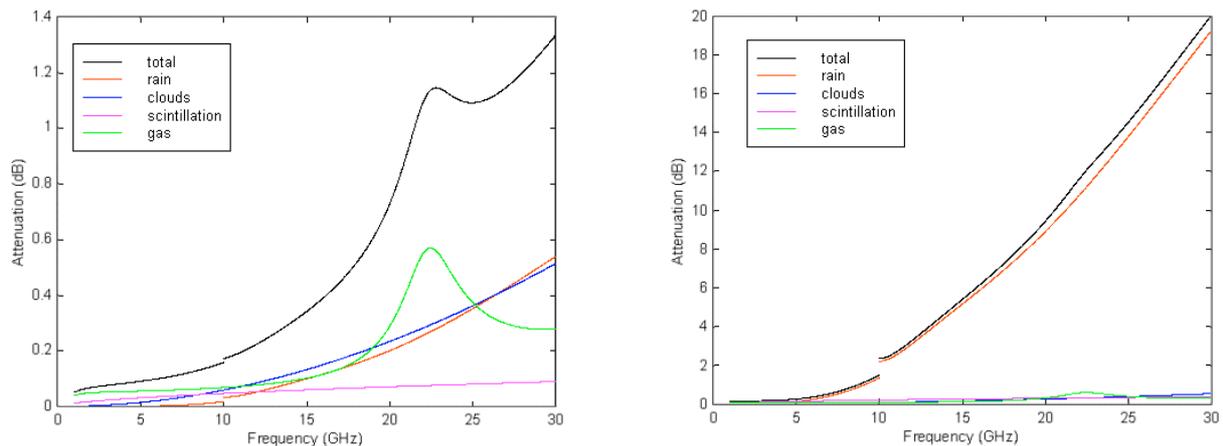
MODELISATION DU CANAL DE PROPAGATION ET APPLICATION A L'ANALYSE DES PERFORMANCES DES COUCHES SUPERIEURES

2.1 GENERALITES SUR LES PHENOMENES TROPOSPHERIQUES MAJEURS EN BANDE KA

Dans la bande Ka, les effets troposphériques à considérer peuvent être classés en trois catégories principales [70,74,100]:

- ✓ L'atténuation atmosphérique due aux gaz, à la vapeur d'eau, aux nuages, à la couche de fusion et à la pluie, la pluie étant de loin la composante prédominante pour des pourcentages de temps inférieurs à 1% (soit pour de fortes disponibilités, voir figures 4). Cette dernière est à l'origine des variations lentes de l'affaiblissement du signal et peut atteindre 20 dB pendant 0.05 % d'une année moyenne. Elle représente la plus sérieuse limitation pour les performances des liaisons de communications satellitaires dans le domaine millimétrique. L'atténuation due à la pluie est causée par la diffraction et l'absorption du signal par des gouttelettes de pluie. L'atténuation spécifique due à la pluie (en dB/km) croît avec la quantité d'eau et peut être déterminée à partir du taux de précipitation R exprimé en mm/h.
- ✓ La scintillation d'amplitude et de phase provenant des inhomogénéités à petite échelle de l'indice de réfraction de l'atmosphère induites par les turbulences atmosphériques qui se manifestent le long du chemin de propagation par des discontinuités de température, d'humidité et de pression. L'intensité de la scintillation d'amplitude augmente avec la fréquence, de faibles angles d'élévation et la diminution du diamètre de l'antenne de réception. Les effets de relèvement ou d'affaiblissement causés par la scintillation sont beaucoup plus faibles que ceux dus à la pluie pour des angles d'élévation supérieurs à 15° et sont donc négligeables dans le bilan de liaison. Mais pour des angles d'élévation inférieurs à 10° et des pourcentages de temps supérieurs à 1%, l'amplitude de la scintillation devient comparable à celle de l'atténuation due à la pluie. La scintillation peut alors influencer de façon prédominante sur la disponibilité long terme du système (pourcentages de temps supérieurs à 1%). Par ailleurs, la scintillation d'amplitude est responsable des fluctuations rapides des caractéristiques du signal (amplitude, phase et angle d'arrivée). De ce fait, elle est susceptible de perturber un dispositif FMT.
- ✓ La dépolarisation : pour augmenter la bande disponible, deux canaux indépendants peuvent être transmis sur la même fréquence sur des polarisations orthogonales. Des interférences apparaissent entre les deux canaux à cause des imperfections des antennes et de l'équipement du satellite ainsi que des effets de dépolarisation sur le chemin de propagation. La dépolarisation en propagation a plusieurs causes : l'absorption et la diffusion par les hydrométéores de la troposphère (principalement les orages de pluie qui provoquent des atténuations et des dérives de phase différentes sur les deux plans principaux d'une onde, ce qui change la polarisation de l'onde incidente) et les cristaux de glace dans les nuages de haute altitude qui entraînent des décalages de phase.

Les seuls phénomènes troposphériques qui seront pris en compte dans le modèle de canal développé dans cette étude en vue de simulations réseau seront l'atténuation due à la pluie ainsi que la scintillation d'amplitude.



Figures 4 : Composantes de l'atténuation atmosphérique en fonction de la fréquence respectivement pour 5% [à gauche] et 0.01% du temps respectivement [à droite]

Pour caractériser les phénomènes troposphériques, plusieurs approches différentes mais plus ou moins complémentaires ont été envisagées dans la littérature et certaines mises en œuvre en partie dans les présents travaux.

L'approche statistique par modélisation statique sur le long terme est supposée ne prendre en compte que la pluie et la scintillation d'amplitude, et négliger les autres effets de propagation comme la dépolarisation et la scintillation de phase.

Atténuation due à la pluie et scintillation d'amplitude sont ici modélisées par des statistiques valables sur le long terme. Ces modèles sont souvent des modèles empiriques construits à partir de l'analyse statistique d'une large banque de mesures collectées.

2.1.1. Distribution statistique de l'atténuation due à la pluie

L'atténuation due à la pluie A_r (dB) sur la liaison montante est simplement déterminée par une densité de probabilité log-normale [70] :

$$p_{A_{r,ul}}(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma u \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - m)^2}{2\sigma^2}\right) & \text{pour } u \geq 0 \\ 0 & \text{pour } u < 0 \end{cases}$$

Équation 1 : Densité de probabilité de l'atténuation due à la pluie sur la liaison montante, où σ et m sont deux paramètres dépendant de la région climatique

En revanche, pour la liaison descendante, l'atténuation exprimée en dB est liée à β qui représente la dégradation du facteur de mérite et un indicateur de la qualité du récepteur. Une valeur élevée de β signifie que le récepteur est de bonne qualité (la température de bruit du récepteur est faible), tandis qu'une valeur faible dénote un récepteur de mauvaise qualité.

La fonction de densité de probabilité de l'atténuation due à la pluie sur la liaison descendante s'écrit alors comme suit :

$$p_{A_{r,dl}}(A) = \begin{cases} \frac{\frac{A}{10^{10}}}{\frac{A}{10^{10}} + \beta} \frac{1}{10\sigma \cdot \sqrt{2\pi} \log \frac{10^{10} + \beta}{1 + \beta}} \exp\left(-\frac{\left(\ln \left[10 \log \frac{10^{10} + \beta}{1 + \beta}\right] - m\right)^2}{2\sigma^2}\right) & \text{pour } A > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 2 : Densité de probabilité de l'atténuation due à la pluie en liaison descendante, où σ et m sont deux paramètres dépendant de la région climatique

Les développements conduisant à l'obtention de cette expression sont détaillés dans l'annexe, dans les sections §3.1 et §3.2.

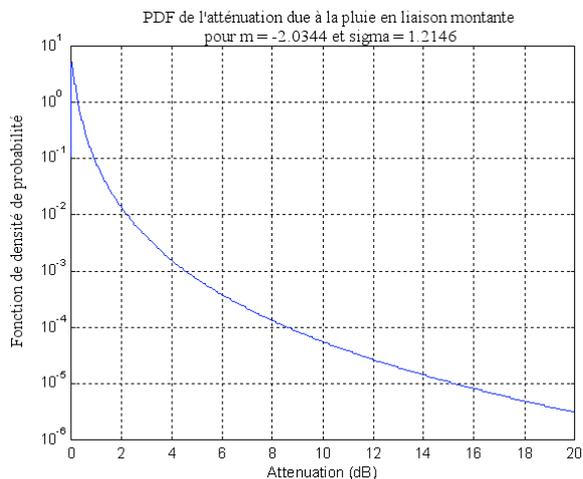


Figure 5 : PDF de l'atténuation due à la pluie en liaison montante

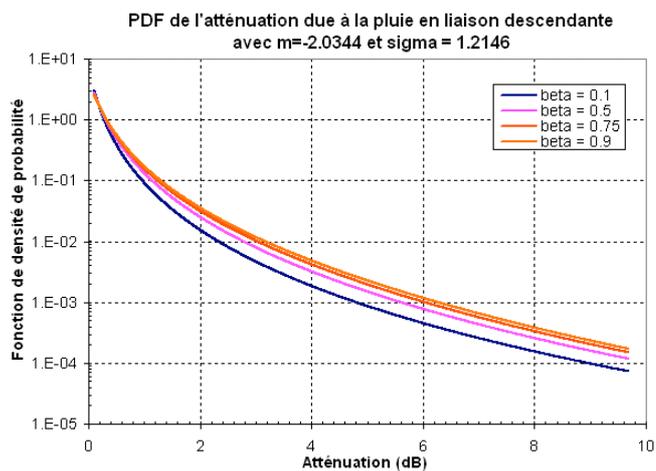


Figure 6 : PDF de l'atténuation due à la pluie en liaison descendante

2.1.2. Distributions statistiques de la scintillation d'amplitude

Il existe un certain nombre de modèles statistiques rendant compte du processus χ d'atténuation due à la scintillation d'amplitude, mais c'est le modèle de Moulslay-Vilar qui a été retenu ici (les raisons de ce choix suite à une comparaison avec le modèle de van de Kamp sont données dans Annexe, §3.1.3). L'expression de Moulslay-Vilar de la densité de probabilité long terme de χ est donnée par [70] :

$$p_{\chi}(\chi) = \frac{1}{\pi\sigma_{\sigma}} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sigma_{\chi}^2} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2\sigma_{\chi}^2} - \frac{\left(\ln\frac{\sigma_{\chi}^2}{\sigma_m^2}\right)^2}{2\sigma_{\sigma}^2}\right) d\sigma_{\chi}$$

Équation 3 : Densité de probabilité de la scintillation d'amplitude, où σ_m et σ_{σ} sont deux paramètres

Les deux paramètres σ_m et σ_{σ} sont définis par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \sigma_{\sigma} = a(\sin E)^b, \text{ avec } a = 0.515 \text{ et } b = -0.2424 \\ \sigma_m^2 = \bar{\sigma}_{\chi}^2 \exp\left(-\frac{\sigma_{\sigma}^2}{2}\right) \end{cases} \quad \text{et:}$$

$$\begin{cases} \sqrt{\bar{\sigma}_{\chi}^2} = 0.0165 \frac{f^{7/12}}{(\sin E)^{11/12}} \text{ dB} & \text{si } f \sin E > 2.25^{\circ} \\ \sqrt{\bar{\sigma}_{\chi}^2} = 0.0141 \frac{f}{\sqrt{\sin E}} \text{ dB} & \text{si } f \sin E \leq 2.25^{\circ} \end{cases}$$

Équations 4 : Paramètres de la densité de probabilité de la scintillation d'amplitude d'après Mousley-Vilar

où E est l'angle d'élévation en degrés et f la fréquence de la liaison en GHz.

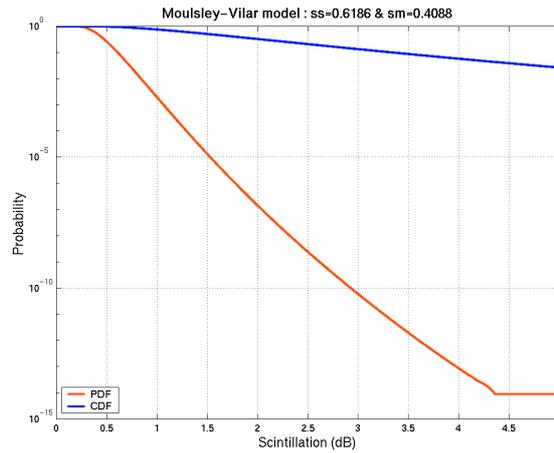


Figure 7 : Exemple de courbes de la PDF et de la CDF de la scintillation d'amplitude avec le modèle de Mousley-Vilar

2.1.3 Distribution statistique de l'atténuation globale

La dégradation globale Δ_i , avec $i=ul, dl$ respectivement pour la liaison montante et la liaison descendante, est définie comme suit [70] :

$$\Delta_i = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{i,0,dB} - \left(\frac{C}{N_0}\right)_{i,dB} \quad (\text{dB}) \quad \text{with } i = ul, dl$$

où l'indice 0 dénote la valeur en conditions d'air clair.

Les fonctions de densité de probabilité des atténuations globales Δ_i , $i = ul, dl$, respectivement sur la liaison montante et sur la liaison descendante, sont données par :

$$p_{\Delta_{ul}}(l) = \int_0^{+\infty} p_{\chi}(l-u) p_{A_{r,ul}}(u) du$$

$$p_{\Delta_{dl}}(l) = \int_0^{+\infty} p_{\chi}(l-u) p_{A_{r,dl}}(u) du$$

Équations 5 : Fonctions de densité des atténuations globales respectivement sur la liaison montante et sur la liaison descendante

Il en découle que les fonctions de distribution du processus d'atténuation globale s'expriment de la façon suivante :

$$P_{\Delta_i}(x) = P[\Delta_i \leq x] = \int_{-\infty}^x p_{\Delta_i}(u) du, \quad i = ul, dl$$

Équation 6 : Fonction de distribution de l'atténuation globale sur les liaisons satellitaires

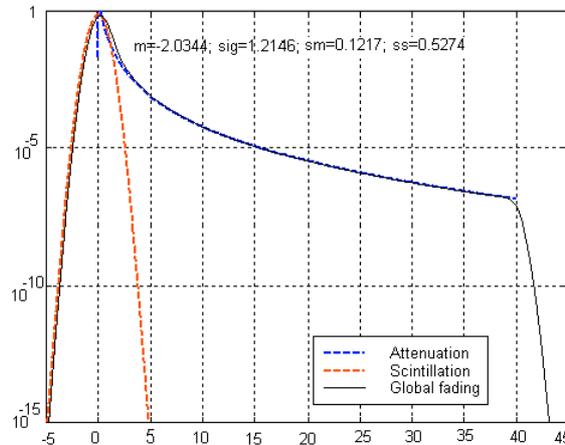


Figure 8 : Fonction de densité de probabilité de l'atténuation globale utilisant le modèle de Mousley-Vilar pour la scintillation d'amplitude, et la loi log-normale pour l'atténuation due à la pluie, avec les paramètres $m = -2.0344$, $\sigma = 1.2146$, $\sigma_m = 0.1217$ et $\sigma_\sigma = 0.5274$

2.2 APPROCHE STATISTIQUE PAR MODELISATION DYNAMIQUE

2.2.1 Modélisation bidimensionnelle à l'aide d'une variabilité temporelle et d'une variabilité spatiale

L'approche statistique précédente s'appuyant sur l'utilisation de distributions long terme du canal, quoique attrayante par sa simplicité de mise en œuvre, présente néanmoins des lacunes. Elle est fondamentalement *statique* dans la mesure où elle relève de moyennages sur le long terme à la fois dans le temps (distributions statistiques du canal représentatives d'une année moyenne) et dans l'espace (région climatique caractérisée par des paramètres représentatifs de phénomènes pluviométriques moyens), et ne permet donc aucunement d'inférer une quelconque dynamique ni temporelle ni spatiale capable de mieux rendre compte de l'évolution instantanée du canal réel.

Or la variabilité temporelle du canal sur une échelle de temps aussi réduite que la seconde est utile et requise dans un simulateur qui prend en compte des processus réseau dont la dynamique peut être d'un ordre inférieur à la seconde. La connaissance fine et précise de cette évolution sur le court terme peut permettre en particulier d'analyser la réactivité des dispositifs de contre-mesure et de leurs interactions avec les fonctions de la couche d'accès (durée des connexions, périodicité des requêtes de capacité dans le protocole d'allocation des créneaux, etc.) par rapport à l'évolution quasi-temps réel du canal. Il devient possible ainsi d'analyser le comportement du réseau vis-à-vis des changements de mode FMT. C'est à travers l'utilisation de séries chronologiques d'affaiblissement E_b/N_0 que cette variabilité temporelle est reproduite.

La variabilité spatiale du canal, quant à elle, reflète sa dynamique à plus moyen terme dans une zone géographique limitée sur une échelle de temps plus longue (plusieurs minutes, voire l'heure) et sa connaissance s'avère des plus précieuses pour une étude par exemple des effets d'interférences du signal entre plusieurs stations ou des effets de corrélation et de diffusion spatiale des événements de propagation d'une station à une autre. Il a été choisi de reproduire cette dynamique spatiale en prenant en compte le mouvement des cellules de pluie à l'intérieur de la couverture du système - leur topologie pouvant dans une première approche rester stable - à partir de l'exploitation d'images radar du champ de réflectivité. Ceci permet d'évaluer de façon plus réaliste la capacité induite par le déploiement simultané de FMT dans plusieurs stations appartenant à un même faisceau donné, et partant de mieux dimensionner le système.

Chacun de ces deux aspects dynamiques est lié à des outils de modélisation du canal spécifiques qui sont décrits ci-après. La combinaison de séries chronologiques et d'images radar forme un nouvel outil de modélisation dynamique du canal de propagation Ka qui a été réalisé dans un simulateur OPNET.

2.2.2 Modélisation de la variabilité temporelle à l'aide de séries chronologiques d'atténuation

2.2.2.1 Séries chronologiques expérimentales d'atténuation

Une manière d'obtenir une composante microscopique (ou sur le court terme) du modèle de canal consiste à faire usage d'échantillons de E_b/N_o empiriques obtenus lors de campagnes de mesure formant une série chronologique. Trois événements de propagation typiques correspondant à un climat européen tempéré modéré sont considérés. Le premier (cf. : Figure 9) correspond à un événement de forte scintillation en air clair (caractérisée par une atténuation atteignant 1 dB) qui se produit généralement le plus souvent dans de bonnes conditions climatiques en été, aux moments les plus chauds, c'est-à-dire lorsque la turbulence atmosphérique est forte. Cet événement permet de réaliser des simulations réseau en présence de conditions de propagation calmes ou non perturbantes. Dans ce cas précis, il est possible de considérer qu'il n'y a pas d'effet de propagation et qu'ainsi les résultats de la simulation dépendront uniquement de la configuration du trafic. Le deuxième événement (cf. : Figure 10) est celui d'une faible précipitation de printemps atteignant une atténuation maximale de 7.5 dB ; il est généré généralement par une grande structure de pluie stratiforme d'étendue mesurant entre plusieurs dizaines et plusieurs centaines de kilomètres, et qui a lieu en hiver ou au printemps. Enfin, le troisième événement (cf. : Figure 11) est un événement de pluie forte typique, avec un pic d'atténuation de 28 dB, généré lors d'un orage ou plus généralement par une cellule de pluie convective. Ce type d'événement se rencontre souvent à la fin du printemps, en été ou en automne.

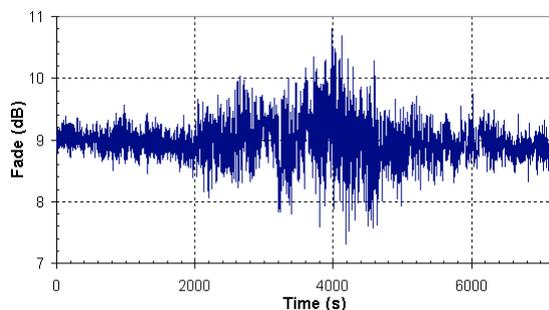


Figure 9 : Événement de forte scintillation sur la liaison montante

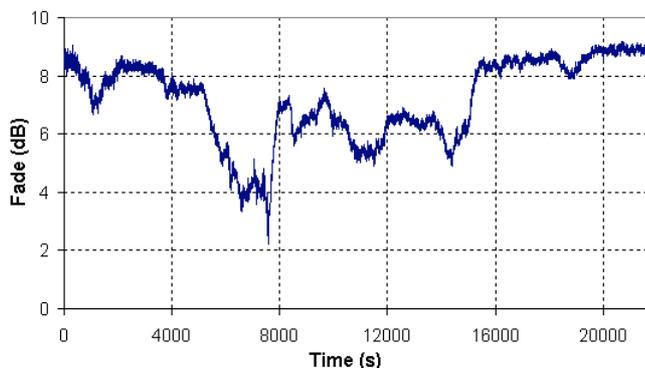


Figure 10 : Événement de pluie légère sur la liaison montante

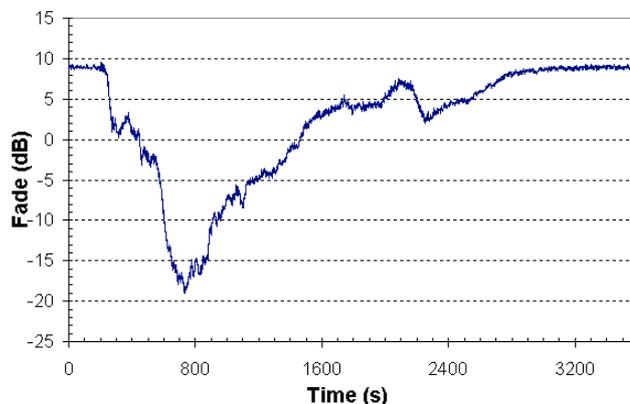


Figure 11 : Événement de pluie forte sur la liaison montante

La figure ci-après donne un aperçu du comportement d'un canal de propagation calme, qui exhibe de très lentes variations causées essentiellement par l'atténuation due aux gaz (oxygène et vapeur d'eau) sur la durée d'une journée entière. A la fin de la journée, les variations moins lentes observées peuvent être dues à la présence de quelques nuages dispersés sur la liaison. En dehors de cette composante à variations lentes, des fluctuations rapides sont observées ; elles sont dues aux turbulences atmosphériques qui engendrent un effet de faible scintillation.

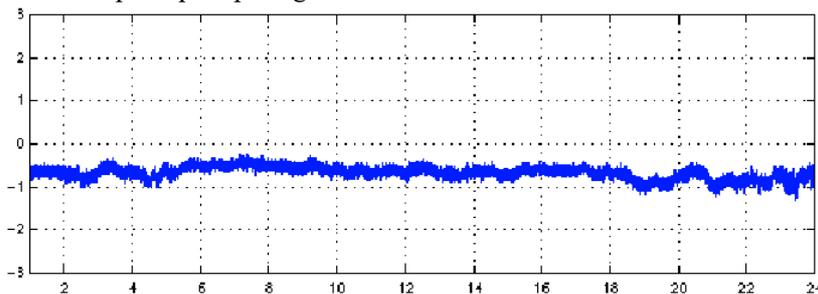


Figure 12 : Evolution calme du canal de propagation

De telles séries chronologiques permettent de modéliser la liaison montante d'une station particulière localisée à l'intérieur de la couverture système. La modélisation dynamique du canal utilisée dans la plate-forme de simulation développée (décrite au chapitre 5), met en œuvre une unique série chronologique d'atténuation de référence, stockée en mémoire, laquelle série chronologique est ensuite transformée à la fois en amplitude, en phase et en durée, pour donner lieu à des séries chronologiques dites filles qui correspondraient à l'image de l'évolution temporelle de E_b/N_0 en tenant compte de la variabilité spatiale introduite telle que vue par d'autres stations se trouvant à proximité de la première station.

2.2.2.2 Génération automatique de séries temporelles

Les simulations du comportement des dispositifs de contre-mesure ainsi que les simulations au niveau réseau nécessitent des profils d'événements de pluie particuliers qui dépendent de la climatologie caractérisant une région géographique déterminée, et de divers autres paramètres tels que la durée de l'événement, la valeur du pic d'atténuation, etc.. A l'évidence, il n'est pas aisé d'extraire d'une vaste banque de données la bonne série chronologique possédant les caractéristiques souhaitées. En outre, le développement d'algorithmes de contre-mesure adaptative requiert des informations sur le comportement dynamique de l'atténuation due à la pluie, par exemple pour estimer la vitesse nécessaire à laquelle le système peut suivre les changements d'atténuation. C'est pourquoi, face à ce besoin croissant de disposer de séries chronologiques aisément paramétrables en vue de simulations des techniques de contre-mesure, l'ONERA travaille depuis plusieurs années sur des générateurs automatiques de séries chronologiques. Trois types de générateurs différents ont été développés [97].

Le premier a été développé par Audoire et al, utilisant une approche spectrale, et incorporant les caractéristiques géométriques, radioélectriques et climatiques de la liaison à l'aide d'une fonction de répartition de l'atténuation due à la pluie, pour générer à la fois la composante à variations lentes (atténuation due à la pluie et aux nuages) et la composante à variations rapides (scintillation en air clair, et variations rapides de l'atténuation due à la pluie). Ce générateur inclut aussi une corrélation entre l'atténuation due à la pluie et la scintillation et est issu d'un travail collaboratif entre l'ONERA et le CNES [71].

Le deuxième a été récemment développé par Texier et al. Il s'appuie sur des chaînes de Markov à N états [153]. Il permet de générer des événements de propagation de canal caractérisés par une durée et une atténuation maximale qui est définie par N niveaux. Le processus est alors modélisé par une chaîne de Markov dont chaque état renvoie à un niveau d'atténuation parmi les N . La matrice de transition sous-jacente a ses probabilités calculées à partir de la pente de l'atténuation.

Le dernier générateur est basé sur le modèle à deux échantillons développé par van de Kamp, et c'est ce dernier qui a été retenu ici [186].

2.2.2.3 Le modèle de van de Kamp à deux échantillons

Le comportement dynamique de l'atténuation due à la pluie sur les liaisons satellitaires dans les bandes Ka et V a été étudié par van de Kamp [186] en utilisant des données mesurées dans le but de développer un modèle dynamique d'atténuation due à la pluie en tant que processus de Markov. Les mesures recueillies proviennent de différentes stations terrestres, obtenues à partir des signaux issus des satellites Olympus et Italsat. Les relations données plus bas découlent des mesures effectuées par Olympus à Eindhoven, aux Pays-Bas. Les balises de propagation sont à 12.5, 20 et 30 GHz avec les deux polarisations à 20 GHz. Tous les signaux des balises ont été reçus par une antenne Cassegrain 5.5. L'angle d'élévation d'Olympus à Eindhoven était de 26.78° . L'analyse était réalisée sur une période allant du 1^{er} janvier 1991 au 30 juin 1992. Sur cette période, 104 événements ont été sélectionnés couvrant toute la période en dehors de celle allant du 29 mai au 15 août 1991. Les signaux ont été échantillonnés à la fréquence de 3 Hz et moyennés sur chaque seconde. Ensuite, le niveau du signal a été moyenné sur chaque bloc de 10 secondes, de manière à enlever les effets de scintillation.

Ce modèle devrait être en mesure de prédire la densité de probabilité de l'atténuation due à la pluie peu de temps après une valeur mesurée. Dans ce but, les caractéristiques de la distribution de l'atténuation sont déterminées de façon conditionnelle à des valeurs d'atténuation antérieures. Van de Kamp a montré que la connaissance d'une seule valeur antérieure d'atténuation n'est pas suffisante pour prédire la distribution de l'atténuation ; deux échantillons sont alors utilisés. La moyenne et l'écart type de la distribution dépendent de façon significative des deux échantillons.

Les relations obtenues sont les suivantes :

L'écart type de l'atténuation peut être modélisé comme suit :

$$\sigma_A(A_0, A_{-1}, \Delta t) = A_0 \sqrt{\beta_2 \Delta t + \gamma_2 |A_0 - A_{-1}|} \quad (\text{Équation 7})$$

avec :

$$A = A(t + \Delta t), A_0 = A(t), A_{-1}(t - \Delta t) \text{ et } \Delta t = 10 \text{ s}$$

et les valeurs observées de β_2 et γ_2 sont similaires pour toutes les fréquences et tous les sites.

La moyenne m_A de l'atténuation A conditionnelle aux valeurs A_0 et A_{-1} pour les données d'Eindhoven à 20 GHz est représentée par la relation suivante : $m_A = A_0 + C_1(A_0 - A_{-1}) + C_2$ (Équation 8)

où C_1 croît avec A_0 et $C_2 = 0$ dB.

La moyenne et l'écart type dépendent tous les deux de l'atténuation, ainsi que de la différence avec l'échantillon antérieur de l'atténuation. La forme mesurée de la distribution exhibe une similitude avec la fonction appelée « distribution cosinus hyperbolique ». La résolution temporelle des données après le moyennage par bloc et le rééchantillonnage est d'un échantillon toutes les 10 secondes. L'utilisation de deux échantillons pour prédire la distribution de probabilité du prochain échantillon permet d'utiliser la dérivée première de l'atténuation due à la pluie, c'est-à-dire la pente d'atténuation, sur une échelle de temps de 20 secondes, ce qui est plus faible que l'espérance du temps de corrélation de l'atténuation due à la pluie.

Des exemples de séries chronologiques générées en utilisant ce modèle sont donnés dans la section §2.2.4.2.2.

2.2.3 Modélisation de la variabilité spatiale par des images radar du champ de précipitation

2.2.3.1 Modélisations du champ de précipitation

L'objectif est de simuler un champ de précipitation à structure horizontale bidimensionnelle sur une zone géographique allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres carrés (soit à peu près la dimension d'un faisceau d'un satellite de communication). Ce type d'information est fourni par les radars météorologiques. Du fait que peu de régions du monde sont équipées de radars météorologiques correctement configurés pour être opérationnels sur de longues périodes, le développement de modèles est nécessaire. Les modèles de structure horizontale des champs de précipitation peuvent être classés principalement en deux approches différentes : soit stochastiques, soit cellulaires [138].

2.2.3.1.1 Approches stochastiques

Dans les approches stochastiques, le taux de précipitation R est considéré comme une variable aléatoire et le champ de précipitation comme une réalisation de R dans le plan horizontal (Oxy). Le champ est alors modélisé sous la contrainte de plusieurs propriétés statistiques observées dans les champs de précipitation réels. Dans cette catégorie des approches stochastiques, deux types de modèles principalement peuvent être nommés :

a) Les modèles à base de fractales

Une fractale est une forme non homogène qui apparaît sans changement lorsqu'elle est examinée à différentes échelles. Plusieurs auteurs [139-142] ont montré que les champs de précipitation sont à structure fractale et que la structure temporelle et spatiale de la pluie possède des caractéristiques hyperboliquement distribuées. Un modèle fractal stochastique de pluie a été proposé [143] produisant des champs hyperboliquement intermittents et à structure fractale en utilisant la somme fractale des impulsions simples (processus FSP, [144]). Trois paramètres caractérisent le modèle : l'échelle, l'intermittence et la lacunarité. Les auteurs ont montré par la suite la possibilité de transformer ce modèle spatial en modèle spatio-temporel et leurs scènes générées par simulation sont capables de reproduire des caractéristiques réalistes de la pluie, avec une hiérarchie en structure fractale des bandes, des fronts et des groupes. Le comportement fractal des champs d'intensité de pluie apparaît alors comme suivant une loi de puissance segmentée. Des statistiques spatio-temporelles des champs d'intensité de pluie aléatoires ont été calculées à partir de cette propriété observée. Une procédure récente [145] utilisant l'algorithme d'addition aléatoire successive de Voss a été proposée pour générer des champs de précipitation avec la même dimension fractale et les mêmes fonctions de densité spectrale que celles observées dans les champs de précipitation réels.

b) Les modèles basés sur la covariance spatiale ou spatio-temporelle des précipitations

Bell [146] a proposé un modèle spatio-temporel stochastique de champs de précipitation basé sur la covariance spatio-temporelle des précipitations. Ce modèle permet de générer, sur un domaine d'observation A_o , un champ d'intensité de pluie R bidimensionnel dont la corrélation spatiale est $C_r(X)$ et la densité de probabilité de R log-normale, de paramètres $\mu_{\ln R}$ et $\sigma_{\ln R}$. Ce modèle s'appuie sur la génération de champs aléatoires $g(X)$ qui ont des statistiques gaussiennes, sont corrélés spatialement et représentés par une série de Fourier.

2.2.3.1.2 Approches cellulaires

Contrairement aux approches stochastiques qui considèrent le champ de précipitation comme une entité unique, les approches cellulaires partagent le champ en régions individuelles - les cellules de pluie - définies comme les contours délimitant les zones où l'intensité de pluie R dépasse une valeur seuil τ . Ces approches cellulaires sont d'autant plus intéressantes que des modèles déterministes de cellules de pluie sont disponibles, décrivant la structure interne des

cellules à partir d'un nombre réduit de paramètres. Dans toute approche cellulaire, la génération d'un champ d'intensité de pluie à partir de cellules modélisées requiert la détermination d'un paramètre clé : la densité spatiale des cellules, exprimée comme une fonction des paramètres du modèle.

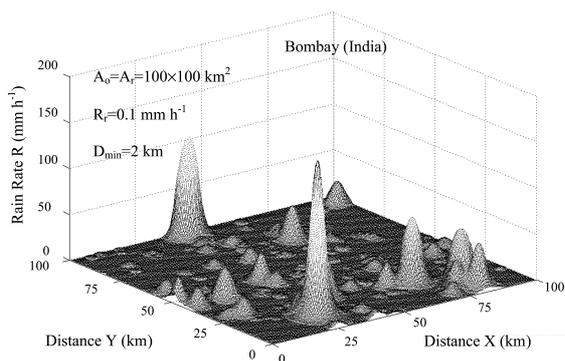
a) Le modèle de Goldhirsh

Goldhirsh [112] a proposé une méthode pour simuler des champs d'intensité de pluie bidimensionnels typiques en n'importe quel lieu géographique, à partir de la connaissance de la fonction de répartition de l'intensité de pluie [147,148]. La méthode repose sur la modélisation de la cellule de pluie par EXCELL [149] et permet de remplir le domaine d'observation A_o d'une population de cellules à profil exponentiel et à symétrie rotationnelle pour laquelle les positions des barycentres des cellules de pluie sont générées de façon aléatoire. Pour déterminer la densité spatiale des cellules de pluie sur A_o , Goldhirsh utilise la formulation de [149], légèrement corrigée par [150].

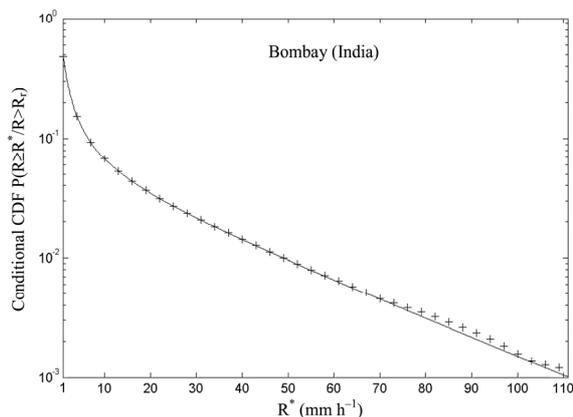
b) Modélisation du champ de précipitation avec HYCELL

Le modèle HYCELL [118] vise à décrire de façon optimale la distribution horizontale de l'intensité de précipitation à l'intérieur des cellules de pluie. La définition mathématique du modèle s'appuie sur la combinaison d'une fonction gaussienne et d'une fonction exponentielle, les cellules ayant une section horizontale de forme elliptique. Du point de vue conceptuel, la composante gaussienne décrit le cœur convectif de la cellule d'intensité de pluie élevée tandis que la composante exponentielle rend compte de la faible intensité de pluie stratiforme sur les bords de la cellule. A partir de ce modèle HYCELL, Féral et al [119] ont développé une méthodologie permettant de simuler des champs de précipitation bidimensionnels typiques sur un domaine d'observation A_o allant de quelques dizaines jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres carrés. Cette méthodologie fait intervenir un conglomerat de cellules de pluie modélisées par HYCELL et deux expressions analytiques de la densité spatiale des cellules de pluie, toutes les deux déduites de la distribution statistique de la taille des cellules de pluie, un paramètre largement décrit dans la littérature par de nombreux auteurs et à des latitudes variées. La génération de scènes requiert comme paramètre d'entrée la fonction de répartition locale de l'intensité de précipitation. Le champ d'intensité de pluie est alors généré numériquement, suivant un algorithme itératif, sous la contrainte de reproduire avec précision la fonction de répartition locale intrinsèque au domaine de simulation A_o , et de suivre rigoureusement la densité spatiale des cellules de pluie. La scène bidimensionnelle ainsi générée est donc composée de cellules hybrides, gaussiennes et exponentielles, et rend compte des caractéristiques de la climatologie locale.

La figure 13(a) est issue d'une modélisation statistique du champ de précipitation dans la région de Bombay en Inde (climat tropical comportant des périodes de moisson) pour 0.001 % d'une année moyenne. 156 cellules sont générées sur A_o , dont 126 sont hybrides, 3 purement gaussiennes et 27 purement exponentielles. La figure 13(b) montre les fonctions de répartition conditionnelles $P(R \geq R^* / R > R_c)$ de Bombay, issues de [147] et calculées à partir de la scène générée dans la figure 13(a). La figure 13(b) souligne la capacité de la modélisation hybride à rendre compte de la climatologie locale.



(a) Modélisation statistique d'un champ de précipitation dans la région de Bombay, en Inde ($A_o = A_r = 100 \times 100 \text{ km}^2$, $R_c = 0.1 \text{ mm h}^{-1}$, $D_{\min} = 2 \text{ km}$) pour 0.001% d'une année moyenne.



(b) Fonction de répartition conditionnelle $P(R \geq R^* / R > R_c)$ pour Bombay issue de la Recommandation IUT-R P.837-1 [147] (trait plein) et calculée pour la scène générée montrée plus haut dans la figure 13(a) (croix)

Figures 13 : Modélisation statistique du champ de précipitation dans la région de Bombay, Inde

Si le modèle hybride et celui de Goldhirsh sont attrayants pour des simulations système dans la mesure où ils fournissent des descriptions analytiques du champ de précipitation, plusieurs hypothèses simplificatrices représentant des sources d'erreurs doivent être gardées à l'esprit. Il doit être remarqué que les positions des cellules des pluies sont supposées être distribuées uniformément sur le domaine de simulation A_o . Les champs générés doivent donc être en

réalité réorganisés en prenant en compte l'organisation interne des champs de pluie réels (distances intercellulaires, distances de corrélation, etc.).

2.2.3.2 Génération de scènes dynamiques

Contrairement aux modèles stochastiques, les modèles cellulaires ne permettent pas de générer des scènes dynamiques. Cependant, ces modèles, une fois combinés à une description statistique de l'évolution temporelle de la structure interne de la cellule de pluie, depuis sa naissance jusqu'à sa mort, à partir des paramètres EXCELL [112,149] ou HYCELL, constituent une première tentative élégante de génération de scènes dynamiques.

Une autre solution est de coupler ces modèles cellulaires (composante moyen terme ou macroscopique) avec des séries chronologiques d'atténuation (composante court terme ou microscopique) dans le but de synthétiser des séries chronologiques d'atténuation *spatialement corrélées*. C'est cette solution qui a été adoptée ici et sa mise en œuvre algorithmique dans la plate-forme de simulation est présentée en détail dans la section §5.2.2.3. La corrélation spatiale a été considérée sur une échelle moyenne seulement, sur un domaine de moins de 500 kilomètres de diamètre. Une variante de l'algorithme de génération dynamique de scène, différente de celui réalisé dans le simulateur OPNET (tout en lui étant analogue dans son principe), a été développée en environnement Matlab et est décrite en §2.2.4.4.2. Elle suit la procédure suivante :

- **1^{ère} étape** : Génération d'un champ de précipitation statique à mi-échelle avec le modèle HYCELL.
- **2^{ème} étape** : Allocation d'une série chronologique dédiée obtenue à partir d'un modèle de canal à chaque cellule de pluie de la couverture. Chaque série chronologique est spécifiée par son atténuation maximale, sa durée totale (rapport entre le diamètre de la cellule et la vitesse du vent) et la distance parcourue par la station à l'intérieur de la cellule, dans la direction du vent.
- **3^{ème} étape** : Synthèse d'une série chronologique spatialement corrélée utilisant un modèle de canal prenant en compte la variabilité de l'atténuation à l'intérieur de la cellule suivant le champ initial d'atténuation due à la pluie.

Cette méthodologie repose sur les hypothèses suivantes :

- ✓ La corrélation à grande échelle est négligée ;
- ✓ Seule la corrélation à moyenne échelle est modélisée ;
- ✓ La dynamique des cellules de pluie est introduite par une unique série chronologique générée pour le centre de la cellule.

2.2.4 Application du modèle dynamique du canal aux simulations

2.2.4.1 Application au déploiement de techniques FMT et à l'étude de leurs performances

Les propriétés statistiques et spatiales de la pluie interviennent dans le système à plusieurs niveaux :

- (a) La variabilité spatiale des cellules de pluie intervient dans le déploiement de la FMT sur différentes stations affectées par un affaiblissement. En effet, en cas de corrélation spatiale du même événement de pluie vu par les stations, les comportements de contre-mesure sur ces stations peuvent aussi être corrélés, ce qui peut faciliter l'anticipation ou le regroupement des commutations de mode FMT sur ces stations.
- (b) Cette variabilité spatiale intervient aussi dans le calcul des interférences C/I.
- (c) Enfin, la caractérisation spatiale de la cellule de pluie peut être utile à la mise en œuvre d'une technique de diversité de site lorsqu'un affaiblissement très sévère se présente sur un lien donné. Les expérimentations ont montré, en effet, que les cellules de pluie intense sont limitées en étendue, et qu'ainsi, en remplaçant une station avec une station séparée de la première de quelques kilomètres, il est possible de réduire l'indisponibilité du système [Recommandation IUT-R Rec. P.618-7, 185]. Néanmoins, la diversité de site n'est pas prévue dans le projet SAGAM.

2.2.4.2 Application aux simulations réseau

2.2.4.2.1 Modèle dynamique de canal intégré à un simulateur réseau

Le modèle dynamique du canal décrit plus haut associant des séries chronologiques et un champ de précipitation modélisé par HYCELL/EXCELL à partir d'une image radar a été le modèle de propagation retenu dans la présente étude et utilisé dans des simulations réseau réalisées sous OPNET. Sa mise en œuvre dans un simulateur événementiel est aisée et ne nécessite pas beaucoup de ressources. Ce modèle offre une solution à la fois élégante et relativement simple de prise en compte des effets d'atténuation due à la pluie sur les liaisons, aussi bien en termes d'évolution temporelle sur la durée d'un événement de pluie qu'en terme de corrélation spatiale entre différentes stations sur une couverture donnée. L'utilisation de séries chronologiques permet également d'émuler au plus près les variations du

comportement temps réel de la boucle de contrôle de contre-mesure. La procédure complète d'intégration de ce modèle de canal (à l'aide du modèle EXCELL) dans le simulateur OPNET est décrite plus en détail dans la section §5.2.2.

2.2.4.2.2 Utilitaire Matlab de génération de séries chronologiques spatialement corrélées

Pour les besoins de la plate-forme de simulation réseau sous OPNET, un utilitaire de génération automatique de séries temporelles spatialement corrélées sur une couverture de 240 km×240 km, a été développé sous Matlab en collaboration avec l'ONERA. Cet utilitaire permet à partir d'une image radar du champ de réflectivité sur Karlsruhe (Allemagne) enregistrée le 2 juin 1999 à 16h14 mn 35 s (cf. : Figures 14 et 15) d'obtenir tout d'abord la modélisation HYCELL correspondante des cellules de pluie avec la description complète de leurs paramètres (cf. : Figure 16) puis une claire indexation des cellules de pluie identifiées (cf. : Figure 17). La carte du champ de réflectivité est représentée ci-après et les barycentres des cellules de pluie elliptiques sont identifiés par des croix noires :

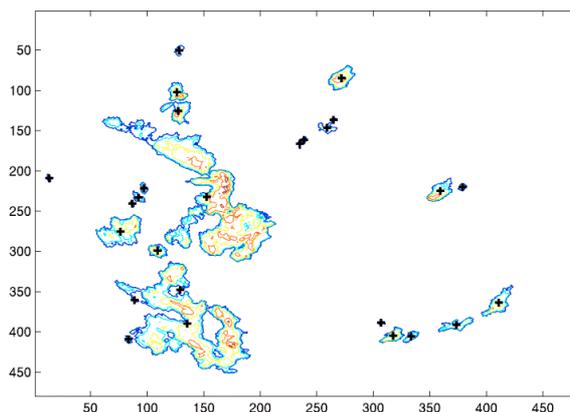


Figure 14 : Carte du champ de réflectivité sur Karlsruhe enregistrée le 2 juin 1999 à 16h14mn35s

L'utilisateur peut ensuite placer manuellement sur la couverture des stations représentées par des croix. L'advection (ou déplacement uniforme des cellules de pluie) étant supposée dans le sens positif (Ox), l'utilitaire calcule alors, d'après la procédure décrite plus haut, chacune des séries chronologiques d'atténuation due à la pluie subies par les différentes stations, en utilisant le modèle de van de Kamp à deux échantillons, ces séries temporelles d'atténuation étant soumises à une corrélation spatiale. Un exemple de série chronologique centrée d'atténuation définie par sa durée (3600 secondes) et son maximum d'atténuation (-15 dB), et générée par le modèle de van de Kamp est donné par la figure 18.

Deux exemples sont traités ci-après.

1^{er} cas : Deux stations affectées par une même cellule de pluie

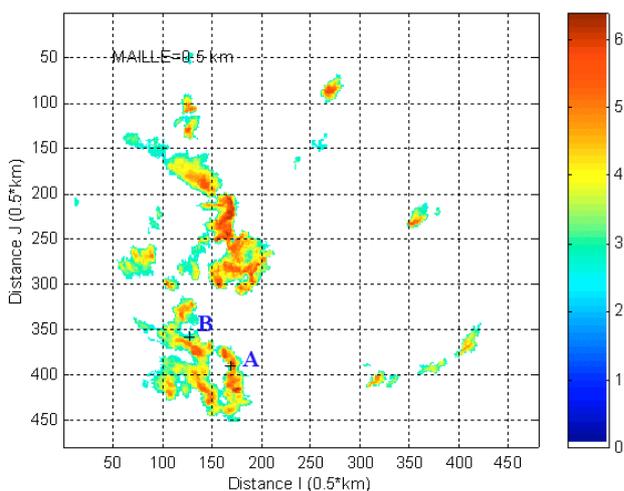


Figure 15 : Image radar du champ de réflectivité à Karlsruhe

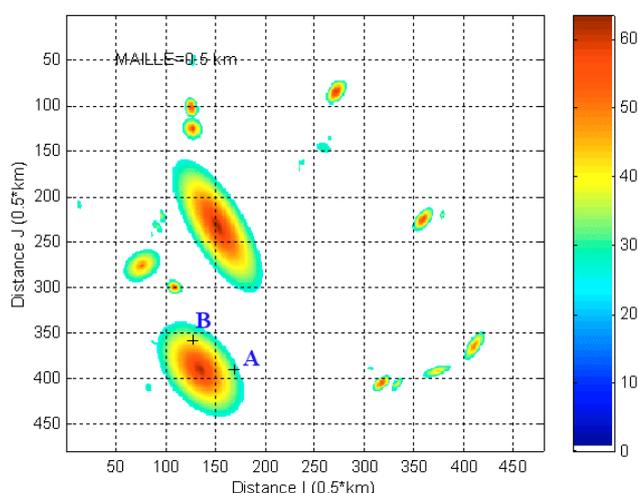


Figure 16 : Modélisation HYCELL du champ de réflectivité à Karlsruhe de la figure 15

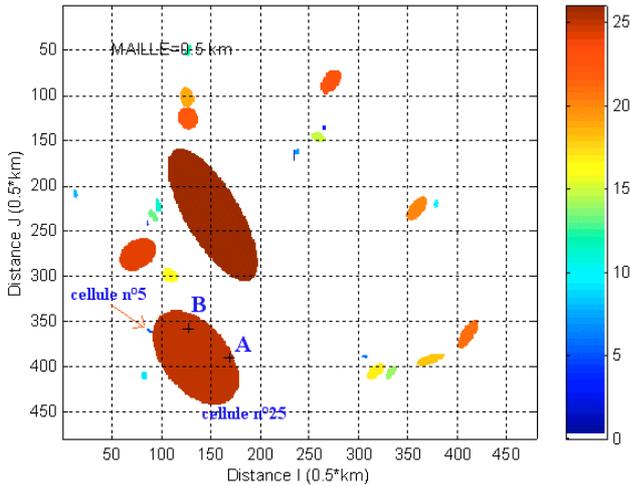


Figure 17 : Modélisation HYCELL indexée du champ de réflectivité à Karlsruhe (24 cellules de pluie déterminées)

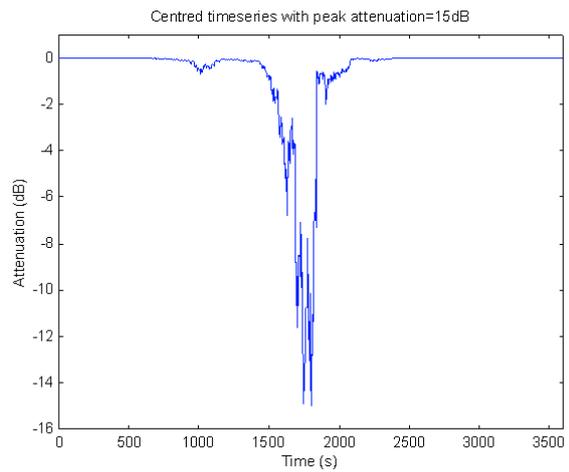


Figure 18 : Exemple de série chronologique d'atténuation centrée due à la pluie, généré d'après le modèle à 2 échantillons de van de Kamp

Les stations A et B sont localisées à l'intérieur de la même cellule de pluie n°25 comme représenté sur les figures 15, 16 et 17 par les croix bleues. Les caractéristiques géométriques et les paramètres HYCELL de cette cellule de pluie sont résumés sur le tableau suivant :

a_g	b_g	R_g	a_e	b_e	R_e	R_1	R_2	Coordonnées du barycentre G^1	
								I_G	J_G
0.00 km	0.00 km	374.70 mm/h	2.97 km	5.02 km	374.70 mm/h	374.70 mm/h	1.09 mm/h	135.24	389.58

Tableau 2 : Caractéristiques géométriques et HYCELL de la cellule de pluie n°25

L'enchaînement des interactions entre les cellules de pluie et les stations A et B est décrit ci-après :

- ✓ Station A : touchée uniquement par la cellule de pluie n°25 à $t=0$ s
- ✓ Station B :
 - affectée par la cellule de pluie n°5 à partir de $t = 2864.22$ s
 - affectée par la cellule de pluie n°25 dès $t = 0$ s.

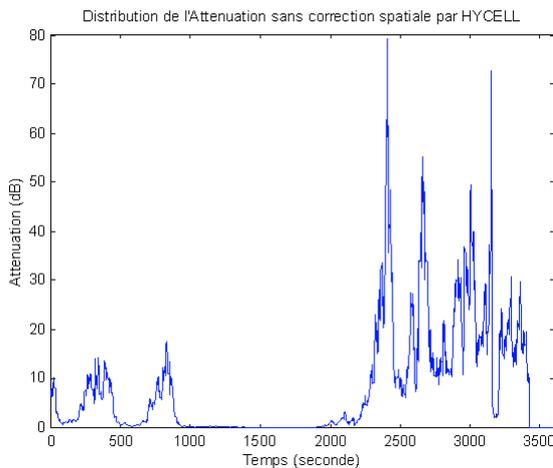


Figure 19 : Distribution de l'atténuation sans correction spatiale pour la station A au contact de la cellule de pluie n°25

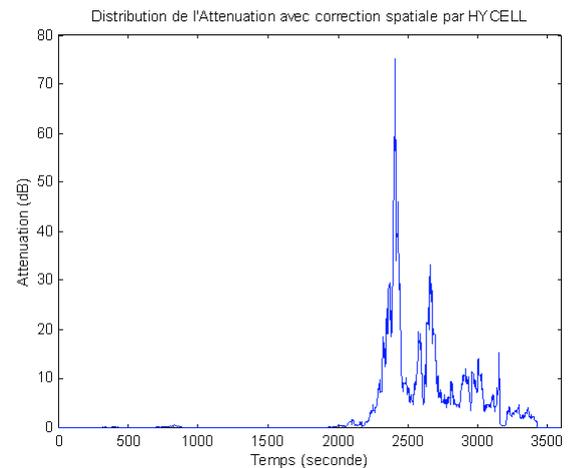


Figure 20 : Distribution de l'atténuation avec correction spatiale pour la station A au contact de la cellule de pluie n°25

¹ Maille du repère de 0.5 km

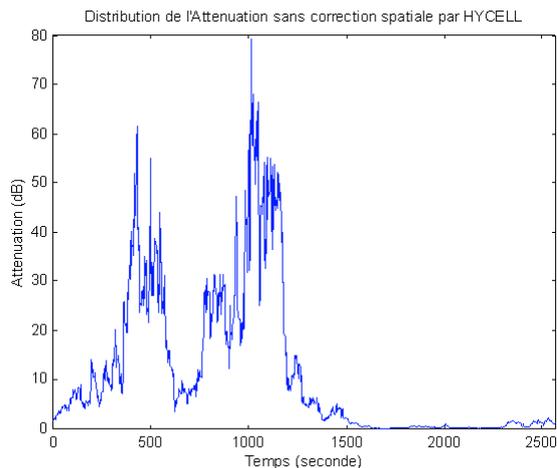


Figure 21 : Distribution de l'atténuation sans correction spatiale pour la station B au contact de la cellule de pluie n°25

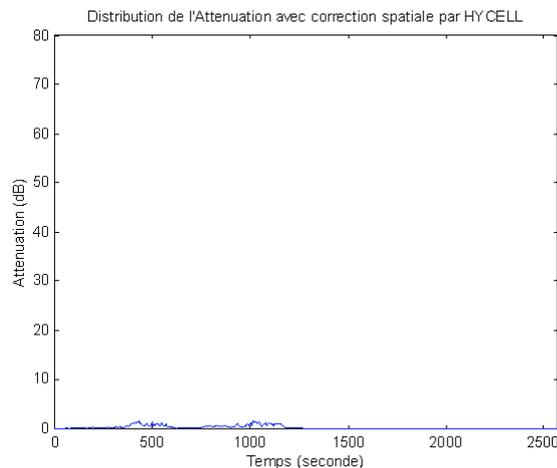


Figure 22 : Distribution de l'atténuation avec correction spatiale pour la station B au contact de la cellule de pluie n°25

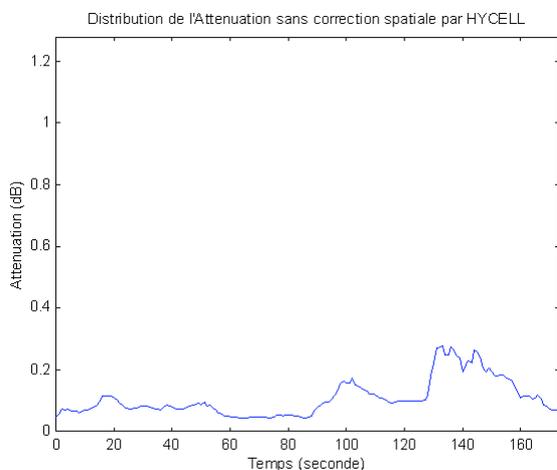


Figure 23 : Distribution de l'atténuation sans correction spatiale pour la station B au contact de la cellule de pluie n°5

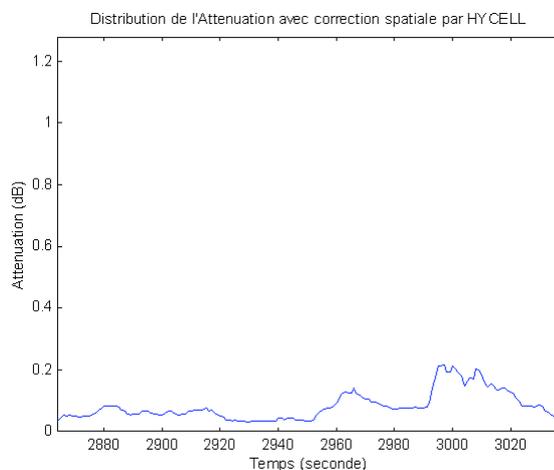


Figure 24 : Distribution de l'atténuation avec correction spatiale pour la station B au contact de la cellule de pluie n°5

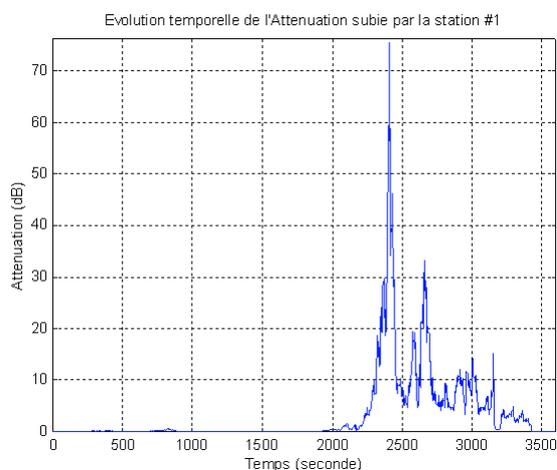


Figure 25 : Evolution temporelle de l'atténuation subie par la station A

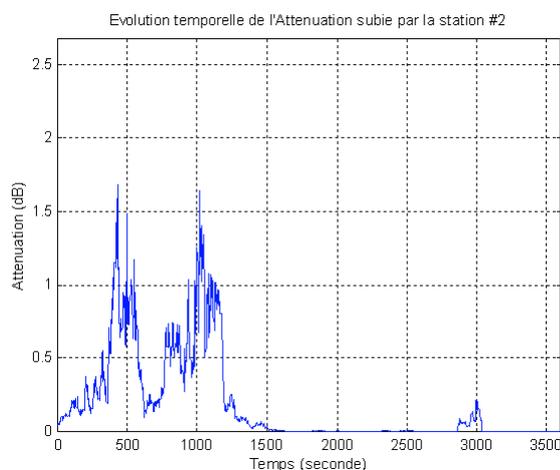


Figure 26 : Evolution temporelle de l'atténuation subie par la station B

2^{ème} cas : Une station affectée successivement par deux cellules de pluie différentes

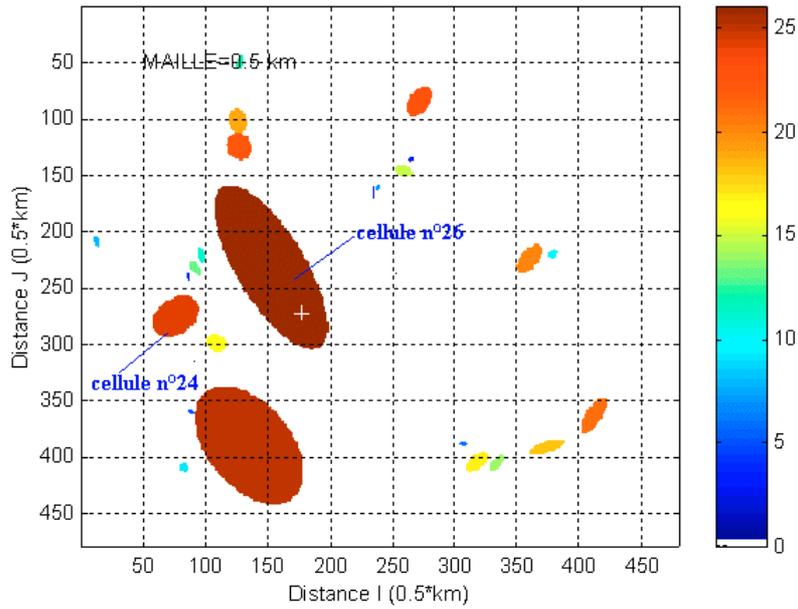


Figure 27 : Localisation de la station dans le repère de la carte radar

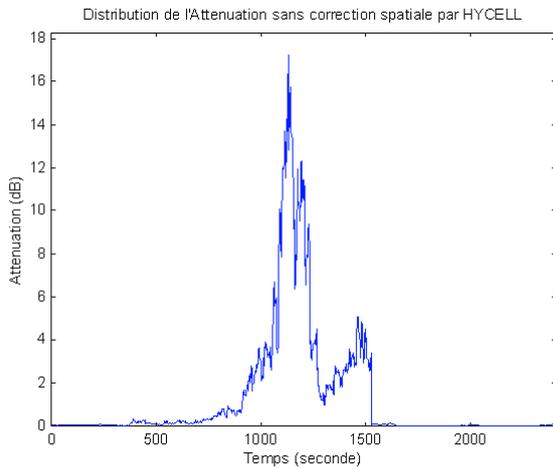


Figure 28 : Distribution de l'atténuation due à la cellule de pluie n°24 sans correction spatiale

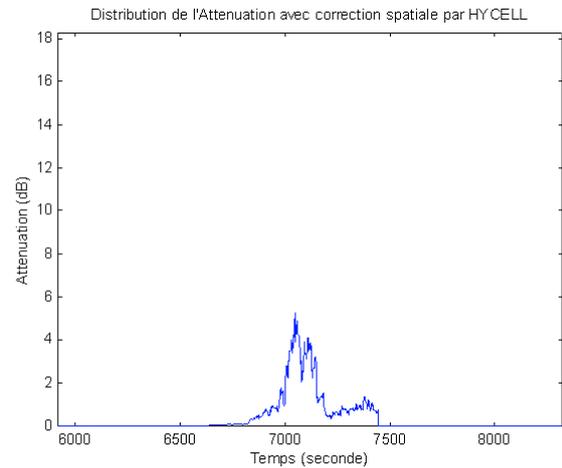


Figure 29 : Distribution de l'atténuation due à la cellule de pluie n°24 avec correction spatiale

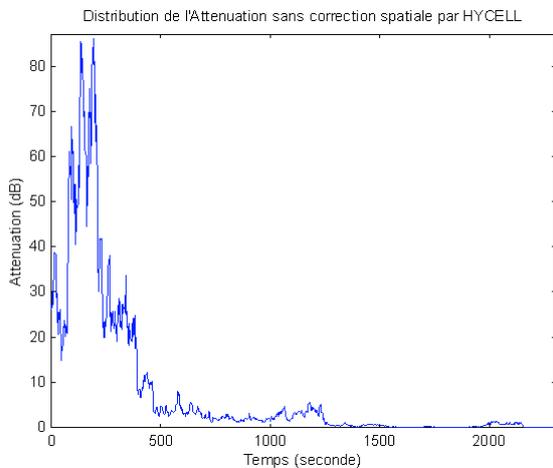


Figure 30 : Distribution de l'atténuation due à la cellule de pluie n°26 sans correction spatiale

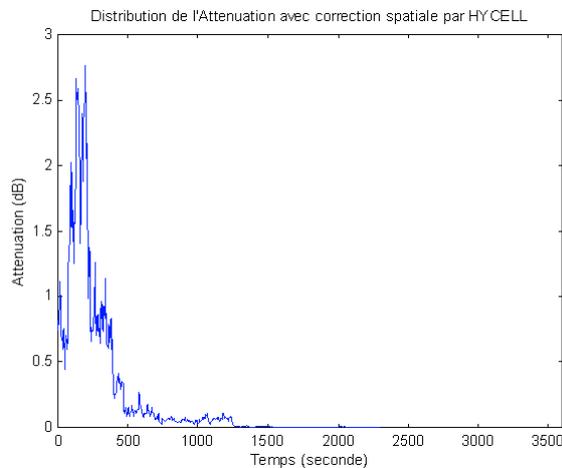


Figure 31 : Distribution de l'atténuation due à la cellule de pluie n°26 avec correction spatiale

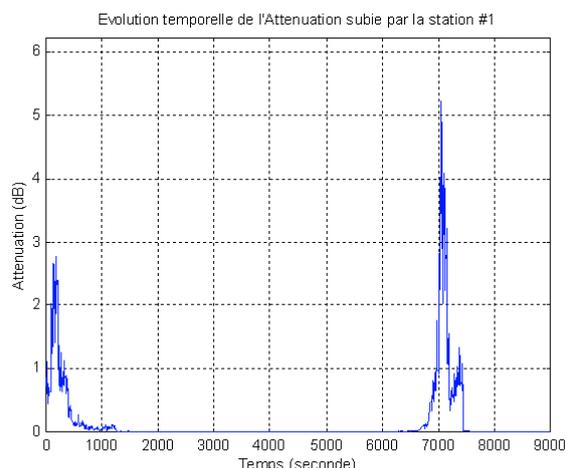


Figure 32 : Evolution temporelle de l'atténuation

Une station localisée dans le repère de la carte radar aux coordonnées (177; 273) est située à l'intérieur de la cellule de pluie n°26 dès le départ. A partir de $t=5919$ s, elle est affectée en outre par la cellule de pluie n°24. Les caractéristiques et les paramètres HYCELL de ces cellules sont donnés dans le tableau 3.

Cellule	a_g	b_g	R_g	a_e	b_e	R_e	R_1	R_2	Coordonnées du barycentre ¹	
									I_G	J_G
24	0.80 km	1.12 km	84.25 mm/h	1.99 km	2.77 km	49.88 mm/h	33.99 mm/h	1.09 mm/h	76.46	275.44
26	0.00 km	0.00 km	406.53 mm/h	2.39 km	6.86 km	406.53 mm/h	406.53 mm/h	1.09 mm/h	152.72	232.19

Tableau 3 : Paramètres géométriques et HYCELL des cellules de pluie n°24 et 26

2.3 MODELISATION DES ERREURS SUR LES COUCHES SUPERIEURES A PARTIR DES ERREURS DU CANAL

Dans le but d'étudier les performances des protocoles des couches supérieures, en termes de métriques spécifiques suffisamment significatives, plusieurs approches ont été proposées dans la littérature en vue de fournir un modèle mathématique aisément manipulable qui lie les erreurs du canal aux métriques désirées. Dans un premier temps, ces différentes approches sont tout d'abord passées en revue ; ensuite, une nouvelle méthode de prédiction développée spécifiquement au cours de la présente étude pour les besoins propres de simulation, sera présentée : cette méthodologie permet de convertir des distributions de propagation en statistiques de performances de QoS.

2.3.1 Justification de l'approche

Aujourd'hui, de nombreux modèles de propagation pour les bandes de fréquences supérieures à la bande Ku existent dans la littérature, mais jusqu'à présent pratiquement tous ceux-ci se réfèrent exclusivement à des considérations physiques liées aux phénomènes d'atténuation (due aux gaz, aux nuages et à la pluie), de scintillation (due aux turbulences en air clair ou dans les nuages) ou de dépolarisation (due à la pluie ou la glace). Ils ont été comparés de manière exhaustive avec des données empiriques de propagation et il a été trouvé qu'ils concordent relativement bien avec ces dernières avec des erreurs moyennes de l'ordre de 30% pour des calculs d'affaiblissement total dans des climats tempérés.

Ces modèles statistiques permettent de calculer des paramètres de propagation (atténuation, scintillation, dépolarisation) qui à leur tour rendent possible l'estimation de la dégradation sur une liaison donnée en termes de perte C/N_0 . Néanmoins, pour les nouveaux systèmes en bande Ka, la perte en terme de C/N_0 ne correspond pas directement à la dégradation de la QoS offerte à l'utilisateur final, à cause de la complexité des architectures système offrant une large palette de services multimédia. Pour obtenir une estimation judicieuse de cette information de QoS, les paramètres découlant des modèles actuels de propagation ne sont pas suffisamment significatifs et il devient nécessaire de recourir à des méthodes mettant en évidence le lien du canal avec les mécanismes des couches supérieures ou avec des paramètres plus sensiblement orientés QoS dont l'estimation des distributions statistiques peut s'avérer utile.

¹ Maille du repère de 0.5 km

2.3.2 Modèles analytiques paramétriques

Une première approche allant dans ce sens s'appuie sur des modèles analytiques paramétriques. De nombreuses études ont été effectuées sur le canal à évanouissement en environnement sans fil. La plupart des modèles utilisés dans ce cadre là font appel à des chaînes de Markov à amplitude discrète et à temps discret, parmi lequel le modèle bien connu de Gilbert à deux états [88].

Il a été mis en évidence que le profil d'erreur peut avoir un impact considérable sur les performances des protocoles de couches supérieures tels que le TCP ou les mécanismes de retransmission du type ARQ (*Automatic Repeat Request*) [154], tout particulièrement quand les erreurs surviennent en salve. Combinés à une définition élargie des événements de coupure, qui diffère de la définition usuelle d'un dépassement de seuil par une statistique de premier ordre telle que le taux d'erreur de bit ou le taux d'erreur paquets [87] ou encore à une prise en compte de stratégies de tramage (entrelacement par exemple) [88], les modèles markoviens à N états permettent de capturer la corrélation intrinsèque des erreurs de bit dans le canal et d'obtenir des prédictions précises de la performance lorsque N croît. Toutefois, ces modèles deviennent alors hautement complexes.

2.3.3 Méthodologie d'évaluation des performances d'erreur de l'ATM par satellite d'après la recommandation IUT-R Rec. S.1062-1 WP-4B

La méthodologie d'évaluation des performances de l'ATM par satellite transparent d'après la recommandation IUT-R Rec. S.1062-1 WP-4B [66,136] constitue une deuxième approche d'étude des performances d'erreur sur les couches supérieures. Du fait de son importance, cette méthodologie est exposée en détail [38].

Détenir des objectifs de performance d'erreur est essentiel dans la conception de systèmes de transmission. L'ATM utilisant la technique de transmission numérique continue d'être la technique fondamentale de commutation et de multiplexage pour le Réseau Numérique à Intégration de Services (RNIS) large bande. Les cellules ATM sont transmises par des techniques numériques de transmission dont la plus courante est la hiérarchie numérique synchrone SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*). Les performances d'erreur sur des chemins de transmission numérique sont l'objet de la recommandation G.826 de l'IUT-T [34]. Comme la faisabilité de l'ATM par satellite a été démontrée avec notamment la possibilité d'opérer avec des taux d'erreur de bit suffisamment faibles ainsi que la résolution des problèmes liés à l'impact négatif des salves d'erreur, le groupe de travail WP-4B du secteur de normalisation des radiocommunications de l'IUT (l'IUT-R) a produit la recommandation S.1062 qui ébauche une méthodologie spécifique de conception des systèmes satellitaires satisfaisant aux exigences de G.826. Ainsi, la recommandation S.1062 est la toute dernière recommandation dédiée aux performances des mécanismes de transport des cellules ATM dans les systèmes satellitaires transparents.

Pour l'ATM néanmoins, les seuls objectifs de performance existants se situent au niveau de la couche ATM et ont été énoncés dans la recommandation IUT-T I.356 [35]. Il est donc attendu que les spécifications de performances données dans S.1062 permettent également de garantir les objectifs de performance ATM de I.356, question toujours à l'étude à l'IUT et qui doit être l'objet d'une attention particulière. Or, malgré leur importance primordiale, les performances d'erreur au niveau de la couche physique et de la couche ATM ne représentent qu'une partie de l'ensemble des paramètres de QoS. Le développement du RNIS large bande se trouve en effet confronté à la nécessité de définir une notion de spécification de QoS intégrée. Ceci requiert à l'évidence une mise en correspondance mutuelle des paramètres QoS de différentes couches. C'est pourquoi l'établissement de liens entre les paramètres QoS de I.356 et de G.826 représente une tâche très importante. Il peut être accompli de manière analytique pour un certain nombre de paramètres pour autant qu'un modèle réalisable de statistiques d'erreur soit supposé. Tous ces aspects sont l'objet d'une nouvelle recommandation du groupe de travail WP-4B.

Etant donné un modèle de couches de type OSI, l'applicabilité dans un système des deux recommandations G.826 et I.356 peut être illustrée par la figure suivante :

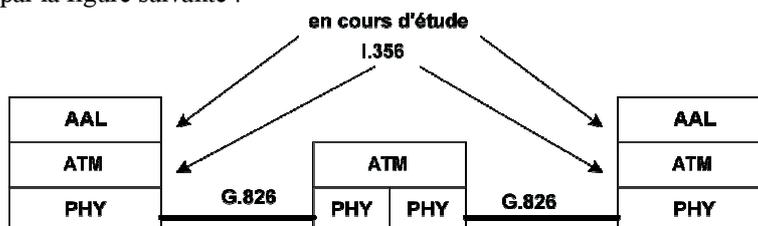


Figure 33 : Domaine d'applicabilité des recommandations G.826 et I.356 de l'IUT

Enfin, une insistance particulière doit être placée sur le fait que la recommandation S.1062 ATM ne traite que le cas du satellite transparent, les performances du satellite régénératif étant en cours d'étude à l'IUT. Néanmoins, la

méthodologie S.1062 demeure valide dans le cas régénératif et les objectifs de performances indiqués peuvent constituer une première base de référence.

2.3.3.1 Modèles d'erreur

L'étude de performances d'erreur requiert un modèle valide de statistiques d'erreur. Le modèle le plus courant est incontestablement le modèle d'erreurs aléatoires dans lequel une séquence de bits statistiquement indépendants est observée à partir de tirages de Bernoulli dont les deux résultats possibles sont le cas "erreur" et le cas "non-erreur". Le nombre d'erreurs dans l'intervalle d'observation suit alors une distribution binomiale, mais si l'intervalle d'observation est très long et la probabilité d'erreur de bit très faible, il peut aussi être caractérisé par une distribution de Poisson.

Il sera supposé dans une approximation grossière mais utile, du fait même de la présence d'un entrelaceur dans le système de transmission DVB-RCS, que le codage concaténé induit des erreurs aléatoires.

2.3.3.1.1 Caractérisation statistique des salves par diagramme en treillis

Le modèle aléatoire devient inadéquat lorsque des erreurs en salve surviennent du fait principalement de la mémoire introduite par les techniques de traitement du signal en communication. Ceci est vrai en particulier pour les systèmes de transmission satellitaires typiques qui emploient un codeur convolutionnel ou des modulations codées en treillis (*Trellis-Coded Modulation* ou TCM) dans le but d'améliorer les performances d'erreur et de réduire ainsi la puissance d'émission des antennes au sol. L'algorithme de Viterbi, généralement utilisé dans le décodage des séquences, produit des erreurs en salves en sortie du décodeur. Les profils de ces salves d'erreur dépendent des paramètres du codeur et des caractéristiques de la structure du décodeur, comme la longueur de la mémoire du chemin de décodage. Une caractérisation statistique des profils des salves d'erreur (tailles et temps d'inter arrivée des salves) en sortie du décodeur peut être obtenue au moyen du diagramme en treillis du codeur, en faisant intervenir le concept de fonction de transfert (Viterbi) du code convolutionnel, et au moyen d'un algorithme qui collecte systématiquement et exhaustivement tous les profils d'erreur en salve associés aux séquences codées admissibles correspondant à une valeur donnée de la distance de Hamming. Cette distance varie entre la distance minimale du codeur et une valeur qui dépend du taux d'erreur de bit (ou du rapport signal sur bruit) à l'entrée du décodeur. Pratiquement tous les paramètres statistiques des salves peuvent être obtenus en utilisant ces profils d'erreur significatifs ainsi collectés.

Il est possible de considérer une extension de cette approche pour caractériser l'effet d'embrouilleur, de désembrouilleur, de l'entrelacement et de codage concaténé qui sont habituellement employés en vue d'atteindre une qualité de transmission proche de celle de la fibre optique dans les liaisons satellitaires.

Les statistiques des erreurs en salve d'un mécanisme de transmission particulier peuvent également être obtenues par des mesures ou des techniques de simulation.

2.3.3.1.2 Modèles génériques d'erreur en salve

Il convient de noter que les deux dernières approches mentionnées de caractérisation des profils d'erreur en salve peuvent consommer un temps excessif de calcul et produisent en outre des résultats qui sont spécifiques d'une stratégie de codage particulière. Par conséquent, elles présentent un intérêt limité dans l'évaluation globale des paramètres de performances des chemins numériques et paraissent inappropriées pour être incorporées dans des outils de planification système. De ce fait, il sera préféré des modèles plus génériques s'appuyant sur un faible nombre de moyennes statistiques telles que typiquement la longueur moyenne des salves L et le nombre moyen d'erreurs par salve α , dont les valeurs ont été trouvées entre respectivement 10 et 50, et 5 et 15.

Les erreurs en salve sont généralement supposées suivre une distribution de contagion Neyman-A. Cette distribution est construite sur les hypothèses suivantes :

- Une salve est un événement discret dans le temps caractérisé par une durée exprimée en nombre de bits et une distribution d'erreur.
- Le nombre de salves dans un intervalle d'observation de longue durée T est une variable aléatoire suivant une distribuant de Poisson de moyenne λT .
- Le nombre d'erreurs dans une salve quelconque admet une distribution de Poisson de moyenne α .

Alors que le modèle d'erreur aléatoire n'est pas affecté par la durée de l'intervalle d'observation, les hypothèses sous-jacentes à la distribution de contagion Neyman-A impliquent un intervalle d'observation dont la durée est longue par rapport à la longueur moyenne des salves. Par conséquent, dans le cas où la période d'observation devient courte, cette distribution Neyman-A n'est plus valide, et il peut être raisonnablement supposé que pas plus d'une seule salve a des chances d'être capturée dans l'intervalle d'observation. La probabilité d'avoir un nombre donné de bits erronés peut alors être obtenue tout d'abord en calculant la probabilité qu'une salve unique touche l'intervalle d'observation, puis en analysant la distribution d'erreur dans l'intervalle chevauché.

2.3.3.2 Analyse des performances d'erreur sur la couche physique suivant la recommandation IUT-T Rec. G.826

La recommandation ITU-T Rec. G.826 a été élaborée au moment où le besoin d'obtenir des exigences de performances plus contraignantes s'est fait sentir après le développement des normes liées au RNIS. Elle considère un chemin numérique international d'une portion physique d'une connexion ATM à débit constant égal ou supérieur au débit primaire de 1.544/2048 kbit/s, et définit de nouveaux paramètres de performances indépendants du réseau de transport. Tous les chiffres spécifiés dans la recommandation sont donnés pour un chemin hypothétique de référence HRP (*Hypothetical Reference Path*) de 27 000 km de bout en bout, sur lequel les fonctions de connexion croisée et de multiplexage ne sont pas prises en considération. Pour les réseaux ATM, la recommandation G.826 doit être appliquée suivant une allocation des performances octroyée au niveau de deux points terminaux de connexion croisée ou de multiplexage du HRP. Les paramètres G.826 reposent sur la définition d'un bloc de bits. Le nombre de bits par bloc est défini pour différents débits binaires et peut être associé avec la taille de la trame SDH.

2.3.3.2.1 Paramètres de performances G.826

Les paramètres de performance G.826 sont :

- *Bloc Erroné (EB ou Errored Block)* : bloc contenant au moins un bit erroné.
- *Seconde Erronée (ES ou Errored Second)* : période d'une seconde avec un bloc erroné ou plus ou au moins un défaut.
- *Seconde Sévèrement Erronée (SES ou Severely Errored Second)* : période d'une seconde avec plus de 30% de blocs erronés ou au moins un défaut.
- *Erreur de Bloc Résiduel (BBE ou Background Block Error)* : bloc erroné ne se produisant pas comme faisant partie d'une SES.
- Le rapport du nombre de secondes erronées sur le nombre total de secondes sur la période de disponibilité durant un intervalle de mesure fixe (ESR ou *Errored Second Ratio*).
- Le rapport de SES sur le nombre total de secondes sur la période de disponibilité durant un intervalle de mesure fixe (SESR ou *Severely Errored Second Ratio*).
- Le rapport du BBE sur le nombre total de secondes sur la période de disponibilité durant un intervalle de mesure fixe, les blocs durant les SES étant exclus (BBER ou *Background Block Error Ratio*).

Une période *indisponible* est définie comme une période commençant après 10 événements SES consécutifs.

2.3.3.2.2 Relations entre le TEB et les paramètres de performances G.826

Les relations mathématiques liant les paramètres de performance G.826 aux statistiques de TEB proviennent d'une dépendance fonctionnelle entre les probabilités d'occurrence des événements de performance G.826 et une valeur donnée du TEB supposé rester constant dans l'intervalle d'observation. Il peut être montré que la probabilité d'occurrence d'un bloc erroné $P_{EB}(TEB)$ peut être approximée, en supposant une distribution d'erreur Neyman-A, par l'expression suivante :

$$P_{EB}(TEB) = 1 - e^{-N \frac{TEB}{\alpha}}$$

Équation 9 : Probabilité d'occurrence d'un bloc erroné à t

où N est le nombre de bits dans le bloc observé, et α le nombre moyen de bits erronés dans une salve d'erreurs. Les valeurs de N pour divers débits binaires sont données ci-dessous :

Pour un TEB donné et des salves d'erreur avec un nombre moyen α de bits erronés par salve, la probabilité EB est donc la même que celle qui serait obtenue avec la distribution de Poisson et TEB/α .

Les autres paramètres de G.826 peuvent être déduits de la probabilité EB en supposant que $P_{EB}(TEB)$ reste constante durant la seconde observée et que le nombre de blocs erronés dans un intervalle de durée 1 seconde suit une distribution de Poisson.

- La probabilité $P_{ES}(TEB)$ d'occurrence d'un événement ES pour un système déterminé par n bloc/s, est donnée par :

$$P_{ES}(TEB) = 1 - e^{-nP_{EB}(TEB)} \quad (\text{Équation 10}).$$

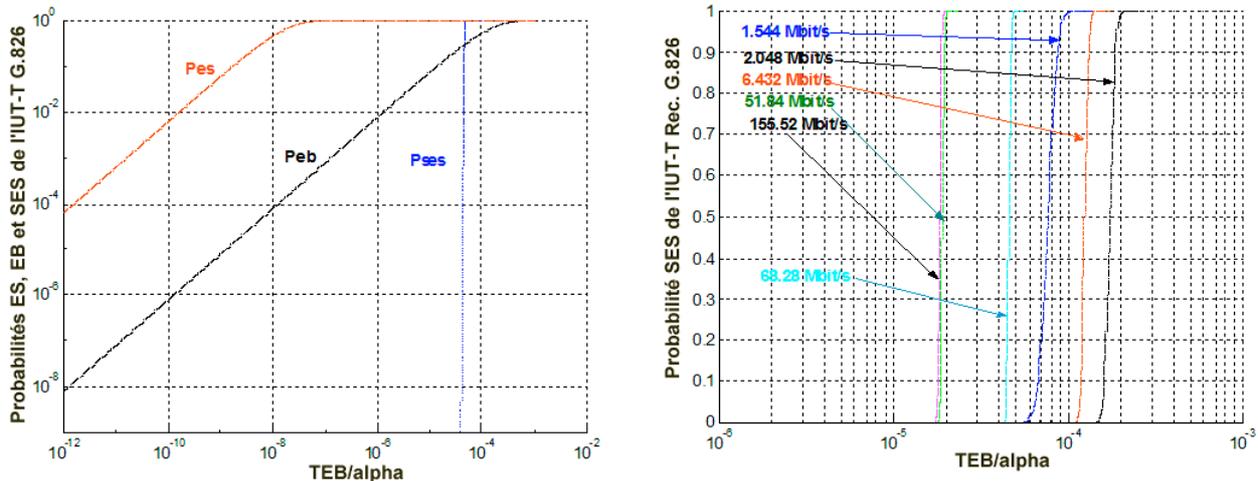
- La probabilité $P_{SES}(TEB)$ d'occurrence d'un événement SES pour un système avec n bloc/s, est donnée par :

$$P_{SES}(TEB) = \sum_{k=0.3n}^n P_{n,k}(TEB) \quad (\text{Équation 11})$$

où $P_{n,k}(TEB)$ est la probabilité d'occurrence de k blocs erronés parmi n blocs ($k < n$) :

$$P_{n,k}(TEB) = \frac{n!}{(n-k)!k!} (1 - P_{EB}(TEB))^{n-k} P_{EB}^k(TEB) \quad (\text{Équation 12})$$

La figure 34(a) est un exemple de courbes liant $P_{EB}(TEB)$, $P_{ES}(TEB)$ et $P_{SES}(TEB)$ à TEB/α , pour un débit de 68.28 Mbit/s (correspondant au débit de la liaison descendante TDM de SAGAM), un nombre de 1000 bloc/s et une taille de bloc de 6770 bits. Conformément aux prévisions, les probabilités des paramètres G.826 augmentent monotoniquement avec TEB/α . P_{SES} a un comportement en échelon différent du comportement en rampe de P_{EB} et P_{ES} . La figure 34(b) présente les probabilités de SES en fonction de TEB/α pour différents débits normalisés ainsi que pour un débit de 68.28 Mbit/s. Le nombre de blocs par seconde ainsi que la taille des blocs correspondant à ces débits sont donnés dans le tableau 4.



Figures 34 : 34(a) : P_{ES} , P_{EB} et P_{SES} en fonction de TEB/α pour un débit de 68.28 Mbit/s (à gauche) - 34(b) P_{SES} en fonction de TEB/α pour différents débits binaires normalisés (à droite)

Débit binaire (Mbit/s)	Taille des blocs	Nombre de blocs par seconde
1.544	4632	333 1/3
2.048	2048	1000
6.432	3156	2000
44.736	4760	9398 63/119
51.84	6480	8000
68.28	6770	1000
155.52	19440	8000

Tableau 4 : Taille des blocs et nombre de blocs par secondes pour différentes valeurs du débit binaire

2.3.3.2.3 Performances d'erreur moyennes

Les autres paramètres ESR, SESR et BBER de G.826 peuvent être considérés comme des estimations des probabilités conditionnelles suivantes :

- ESR (*Errored Second Ratio*) : probabilité d'occurrence d'une seconde erronée (ES) étant donnée une disponibilité ;
- SESR (*Severely Errored Second Ratio*) : probabilité d'occurrence d'une seconde gravement erronée (SES) étant donnée une disponibilité ;
- BBER (*Background Block Error Ratio*) : probabilité d'occurrence d'une erreur de bloc résiduelle (BBE) étant donnée une disponibilité.

Ces probabilités sont en principe des probabilités moyennées sur l'intervalle d'observation. Cependant, dans la pratique, le moyennage est réalisé sur le temps de disponibilité. Si le TEB est supposé prendre une valeur aléatoire sur chaque seconde d'observation, il est possible de définir des probabilités dépendant du temps pour les événements d'erreur du G.826 pour ensuite les moyenner sur le temps. Ces moyennes temporelles peuvent être calculées par l'intermédiaire de la fonction de distribution de TEB/α . Pour ESR et SESR, c'est la fonction de distribution conditionnelle à la disponibilité qui doit être utilisée. Cette fonction de distribution établie à partir de mesures doit exclure les périodes d'indisponibilité.

Ceci conduit aux deux séries d'expressions équivalentes suivantes :

ESR	SESR	BBER
$ESR = \frac{\int P_{ES}(t)dt}{T_a}$	$SESR = \frac{\int P_{SES}(t)dt}{T_a}$	$BBER = \frac{\sum_{k=1}^{0.3n} \left(\frac{1}{T_a} \int P_{n,k}(t)dt \right) \cdot k}{n(1 - SESR)}$
$ESR = \frac{\int_{0.9T_{th}}^{100} P_{ES}(t)dt}{100 - 0.9T_{th}}$	$SESR = \frac{\int_{0.9T_{th}}^{100} P_{SES}(t)dt}{100 - 0.9T_{th}}$	$BBER = \frac{\sum_{k=1}^{0.3n} \left(\frac{1}{100 - 0.9T_{th}} \int_{0.9T_{th}}^{100} P_{n,k}(t)dt \right) \cdot k}{n(1 - SESR)}$

Tableau 5 : Expressions des paramètres de performances moyennes G.826

où :

- La variable t désigne le pourcentage de temps du pire mois ;
- T_a est le nombre total de secondes disponibles ;
- T_{th} est la valeur seuil de t en dessous de laquelle le système devient indisponible.

2.3.3.3 Analyse des erreurs de performances QoS de bout en bout suivant la recommandation IUT-T Rec. I.356

La recommandation ITU-T Rec. I.356 a trait spécifiquement à la couche ATM avec une application directe au réseau RNIS. Elle se réfère à une Connexion Hypothétique de Référence HRX (*Hypothetical Reference Connection*), définit les quatre classes de service ATM normalisées pour lesquelles les valeurs maximales admissibles des paramètres de performances QoS de bout en bout sont spécifiées, parmi lesquels le taux de perte de cellules (*Cell Loss Ratio* ou CLR), le taux d'erreur de cellules (*Cell Error Ratio* ou CER), le taux d'erreur d'insertion de cellules (CMR ou *Cell Misinsertion Rate*), le rapport SECBR (*Severely Errored Cell Block Ratio*) entre le nombre de blocs de cellules sévèrement erronées et le nombre total de blocs de cellules.

Les relations entre les paramètres de performances QoS I.356 et le TEB sont décrites dans la recommandation S.1062-1 et ont été exploitées dans d'autres contextes et études [58,155]. Bien que l'approche ne rende pas compte des erreurs dues aux effets du canal (par exemple la corrélation temporelle des erreurs de bit existant sur des événements d'affaiblissement de longue durée), ce type de modèle s'avère satisfaisant en termes de simplicité.

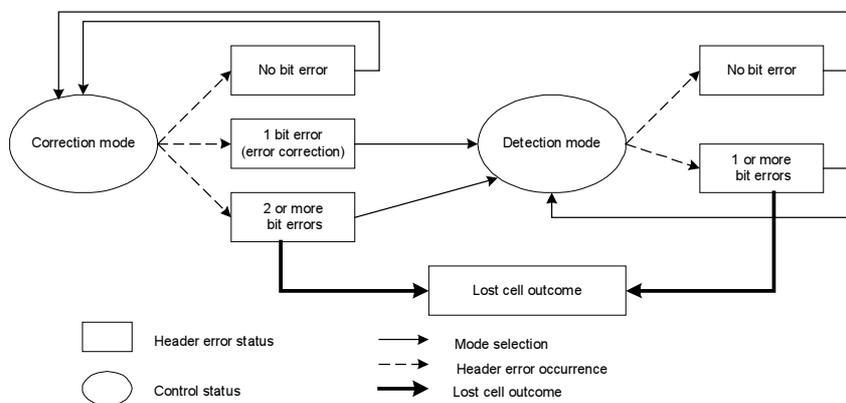
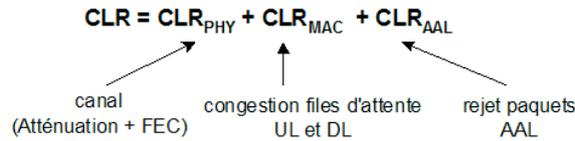


Figure 35 : Machine d'état ATM de correction des erreurs d'en-tête (HEC)

Moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices élémentaires, les paramètres de performance QoS peuvent être directement déduits à partir du paramètre de TEB de la couche physique. Les formules donnant la conversion du TEB en paramètres IUT-T Rec. I.356 dépendent du profil d'erreur (erreurs aléatoires ou erreurs en salve) et s'appuient sur le principe de la machine d'état de correction des erreurs d'en-tête des cellules ATM, dont le fonctionnement est décrit dans la recommandation CCITT I.432 [188].

2.3.3.3.1 Taux de perte de cellules (CLR ou *Cell Loss Ratio*)

Le CLR global de bout en bout correspond au paramètre CLR₀₊₁ de la recommandation I.356 défini comme le rapport entre le nombre total de cellules perdues sur le nombre total de cellules générées. Trois causes de perte de cellules ATM peuvent être identifiées :



- ✓ Perte de cellules ATM due aux affaiblissements trop importants sur le canal, lesquels engendrent un TEB élevé sur les liaisons, qui dépasse la capacité de correction des codes correcteurs d'erreur FEC (*Forward Error Correction*). La contribution de ces cellules perdues au CLR total est donnée par la composante CLR_{PHY} .
- ✓ Perte de cellules ATM due aux phénomènes de congestion dans les files d'attente. Les cellules correspondantes donnent lieu à la composante CLR_{MAC} .
- ✓ Perte de cellules ATM du fait du rejet de paquets IP effectué par la couche AAL (composante CLR_{AAL}). Cette composante est détaillée dans la section §2.3.3.3.5.

Les formules données dans cette section ne tiennent compte que des pertes de cellules dues au mécanisme HEC et correspondent en réalité à la composante CLR_{PHY} . Le fonctionnement du mécanisme HEC est déterminé par les hypothèses suivantes :

1. En mode *correction*, toutes les erreurs multiples donnent lieu à une perte des cellules. La probabilité que des erreurs multiples soient incorrectement corrigées et considérées comme des erreurs uniques est négligée.
2. En mode *détection*, toutes les erreurs uniques ou multiples résultent en une perte de cellules.

De ceci, il découle les expressions suivantes :

$$\text{CLR} = 1 - p_{o,CLR} - p_{o,CLR} \times p_{1,CLR}$$

Équation 13 : Formule générique du CLR

avec :

$$\begin{cases} p_{0,CLR} = P[\text{pas d'erreur dans l'en-tête}] \\ p_{1,CLR} = P[1 \text{ erreur dans l'en-tête}] \end{cases}$$

Dans le cas d'erreurs aléatoires :

$$\begin{cases} p_{0,CLR \text{ aléatoire}} = (1 - \text{TEB})^{40} \\ p_{1,CLR \text{ aléatoire}} = 40 \times \text{TEB} (1 - \text{TEB})^{39} \end{cases} \text{ et par conséquent : } \text{CLR}_{\text{aléatoire}} \approx 2380 \times \text{TEB}^2,$$

Équation 14 : CLR exprimé comme une fonction du TEB pour des erreurs aléatoires

tandis que dans le cas des erreurs en salve, ce sont les équations suivantes qui sont de rigueur :

$$\begin{cases} p_{0,CLR \text{ salve}} = 1 - \frac{\text{TEB}}{N} (L - 1 + 40) \\ p_{1,CLR \text{ salve}} \approx \left(\frac{\text{TEB}}{N} \right) \times 2 \sum_{i=0}^{\min(L-1,39)} (1 - P(\text{EB}))^i \end{cases}$$

Équation 15 : Equations du CLR dans le cas des erreurs en salve

où $P(\text{EB}) = \frac{N-2}{L-2}$ est la probabilité d'occurrence d'un bit erroné entre le premier bit et le dernier bit de la salve. L et N sont respectivement la longueur moyenne des salves et le nombre moyen de bits erronés dans une salve.

Typiquement, $N, L \gg 1$ et $p_{1,CLR \text{ salve}}$ se réduit alors simplement à : $p_{1,CLR \text{ salve}} \approx \frac{\text{TEB}}{N} \times \frac{2}{P(\text{EB})}$. Il en résulte une expression du CLR de la forme suivante :

$$\text{CLR}_{\text{salve}} = A \times \text{TEB}^2 + B \times \text{TEB} = H_{\text{CLR}_{\text{salve}}}(\text{TEB})$$

avec $A = \frac{L+39}{N^2} \sum_{i=0}^{\min(L-1,39)} \left(1 - \frac{N-2}{L-2} \right)^i$

et $B = \frac{L+39}{N} - \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{\min(L-1,39)} \left(1 - \frac{N-2}{L-2} \right)^i$.

Équation 16 : Expression typique du CLR en fonction du TEB dans le cas des erreurs en salve

$H_{\text{CLR}_{\text{salve}}}$ est strictement monotone et admet une fonction réciproque $H_{\text{CLR}_{\text{salve}}}^{-1}$ définie par :

$$H_{CLR_{salve}}^{-1}(y) = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4Ay}}{2A}$$

Équation 17 : Fonction réciproque de $H_{CLR_{salve}}$

Pour un code convolutionnel normalisé de longueur de contrainte $K=7$, de rendement r , en supposant qu'un modèle générique d'erreurs en salve est utilisé - dont les caractéristiques statistiques sont déterminées en *Annexe, §5.2* -, les valeurs de A et B sont comme suit :

Taux de codage	A	B
3/4	$A_{3/4} = 1.46134207945$	$B_{3/4} = 5.4187660102$
1/2	$A_{1/2} = 6.778575381$	$B_{1/2} = 10.95890082$

Tableau 6 : Valeurs des constantes A et B de la formule du CLR dans le cas des erreurs par salve

Il convient de remarquer que puisque la quantité CLR dont il a été fait référence jusqu'ici ne reflète que la part de CLR due à la dégradation du canal qui engendre un dépassement de la capacité de détection/correction de la machine d'état HEC, et que les pertes de cellules liées aux autres causes mentionnées (débordement des files d'attente, rejet de paquet au niveau de la couche AAL) n'ont pas été prises en compte dans les équations précédentes, **le CLR obtenu par la formule déduite de la machine d'état ATM sous-estime la valeur du CLR réelle de bout en bout.**

2.3.3.3.2 Taux d'erreur de cellules (CER ou *Cell Error Ratio*)

Les formules de conversion du TEB en CER sont légèrement plus complexes que pour le CLR. La recommandation IUT-T Rec. I.356 définit le CER comme le rapport entre le nombre de cellules ATM erronées et le nombre total de cellules transférées :

$$CER = \frac{\text{nombre de cellules erronées}}{\text{nombre total de cellules transférées}} \quad (\text{Équation 18}).$$

Une cellule est dite *erronée* si l'une des conditions suivantes est réalisée :

- Son en-tête contient des erreurs détectées.
- Le mécanisme HEC a corrigé des erreurs de bit multiples comme une erreur unique, ce qui a donné lieu à une valeur incorrecte de VPI/VCI.
- Son en-tête est correct mais sa charge utile contient plus d'un bit erroné.

Le CER peut être exprimé au moyen de la formule générique suivante :

$$CER = P[\text{erreur dans la charge utile} | \text{correction}] \times (p_{0,CER} + p_{1,CER}) \times p_{0,CER} + P[\text{erreur dans la charge utile} | \text{détection}] \times p_{0,CER} \times (1 - p_{0,CER})$$

Équation 19 : Formule générique du CER

Pour un profil d'erreurs aléatoires :

$$\begin{aligned} p_{0,CER_{aléatoire}} &= (1 - TEB)^{40} \\ p_{1,CER_{aléatoire}} &= 40 \times TEB \times (1 - TEB)^{39} \\ P[\text{erreur dans la charge utile} | \text{correction}] &= P[\text{erreur dans la charge utile} | \text{détection}] \\ &= 1 - (1 - TEB)^{384} \end{aligned}$$

Équation 20 : Formules du CER dans le cas des erreurs aléatoires

Dans le cas du profil d'erreurs en salves caractérisées par les paramètres L et N :

$$\begin{aligned} p_{0,CER_{salve}} &= 1 - \frac{TEB}{N} (L - 1 + 40) \\ p_{1,CER_{salve}} &\approx \frac{TEB}{N} \left[\sum_i^{\min(L-1, 40-1)} (1 - P(EB))^i + \sum_i^{\min(L-1, 40-1)} (1 - P(EB))^{39-i} \right] \text{ avec } P(EB) = \frac{N-2}{L-2}, \\ P[\text{erreur dans la charge utile} | \text{correction}] &\approx p_{0,CER_{salve}} \times PB + p_{1,CER_{salve}} \times (0.5 + 0.5 \times PB) \\ P[\text{erreur dans la charge utile} | \text{détection}] &\approx p_{0,CER_{salve}} \times PB \end{aligned}$$

Équation 21 : Formules du CER dans le cas d'erreurs en salves

où $PB \approx 384 \frac{TEB}{N}$ est la probabilité d'occurrence d'une erreur en salve dans la charge utile.

2.3.3.3.3 Taux d'erreur d'insertion de cellules (CMR ou *Cell Misinsertion Rate*)

Le calcul du CMR n'est pas abordé dans la recommandation I.356 mais peut être obtenu de manière très simple [38]. Une erreur d'insertion de cellule ATM est due à une salve d'erreur se produisant dans l'en-tête de la cellule et entraînant la génération d'un mauvais mot de code au niveau du mécanisme HEC. Si une salve d'erreurs est supposée pouvoir générer toutes les séquences possibles de bits dans l'en-tête de 40 bits, le partage suivant prévaut :

- 2^{40} combinaisons de bits possibles ;
- 2^{32} séquences parmi ces 2^{40} sont valides
- 40×2^{32} séquences parmi les 2^{40} peuvent être corrigées et correspondent à des erreurs indétectées. Il s'agit d'erreurs d'insertion qui représentent une proportion de $40 \times 2^{32} / 2^{40} = 0.15625$ des séquences possibles.

L'approximation suivante peut donc être faite : $CMR \approx 0.15625 \times CLR$ (Équation 22).

2.3.3.3.4 Exemples d'évolution des paramètres I.356 en fonction du TEB

Les figures suivantes représentent l'évolution des paramètres I.356 CLR, CER et CMR en fonction du TEB :

✓ En liaison montante :

- Avec un profil d'erreurs aléatoires pour le codage DVB-S (codage concaténé constitué d'un code convolutionnel interne (133,171) de longueur de contrainte $K=7$ et de rendement 1/2 ou 3/4, et d'un code en bloc externe Reed-Solomon (69,53, $T=8$)) ;
- Avec un profil d'erreurs par salve générées par un code convolutionnel pur de mêmes caractéristiques, de rendement soit 1/2 (salves de longueur moyenne $L = 29$ bits, avec un nombre moyen de bits erronés par salve de $\alpha = 11.5$), soit 3/4.

✓ En liaison descendante :

- Avec un profil d'erreurs aléatoires pour le codage DVB-RCS (codage concaténé constitué d'un code convolutionnel interne (133,171) de longueur de contrainte $K=7$ et de rendement 1/2 ou 3/4 et d'un code en bloc externe Reed-Solomon (204,188, $T=8$)) ;
- Avec un profil d'erreurs par salve générées par un code convolutionnel pur de mêmes caractéristiques, de rendement soit 1/2 (salves de longueur moyenne $L = 29$ bits, avec un nombre moyen de bits erronés par salve de $\alpha = 11.5$), soit 3/4.

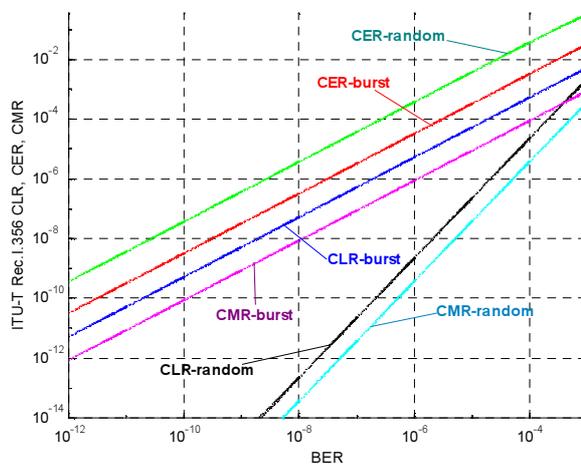


Figure 36 : Paramètres de performance ITU-T Rec. I.356 en fonction du TEB dans les cas d'erreurs aléatoires et d'erreurs en salve

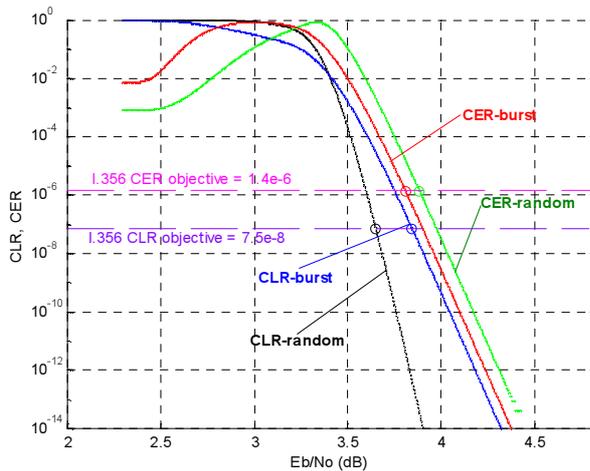


Figure 37 : CER et CLR en fonction de E_b/N_0 , en liaison montante sans FMT dans le cas d'erreurs aléatoires (codage DVB-S, pour $r = 1/2$) et le cas d'erreurs en salve ($L = 29$ bits ; $\alpha = 11.5$)

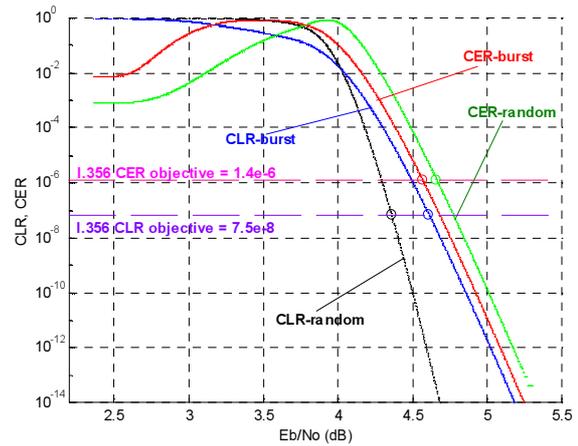


Figure 38 : CER et CLR en fonction de E_b/N_0 , en liaison montante sans FMT dans le cas d'erreurs aléatoires (codage DVB-S, pour $r = 3/4$) et le cas d'erreurs en salve

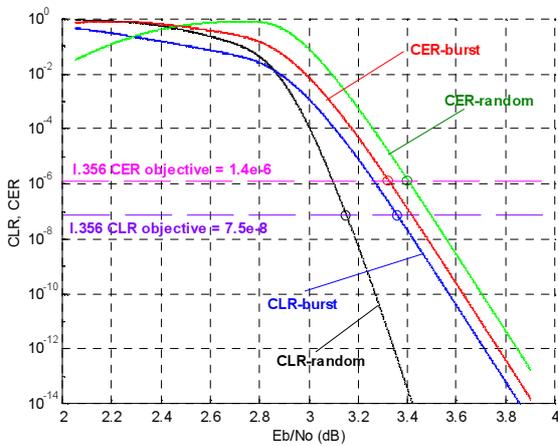


Figure 39 : CER et CLR en fonction de E_b/N_0 , en liaison descendante sans FMT dans le cas d'erreurs aléatoires (codage DVB-RCS, pour $r = 1/2$) et le cas d'erreurs en salve ($L = 29$ bits ; $\alpha = 11.5$)

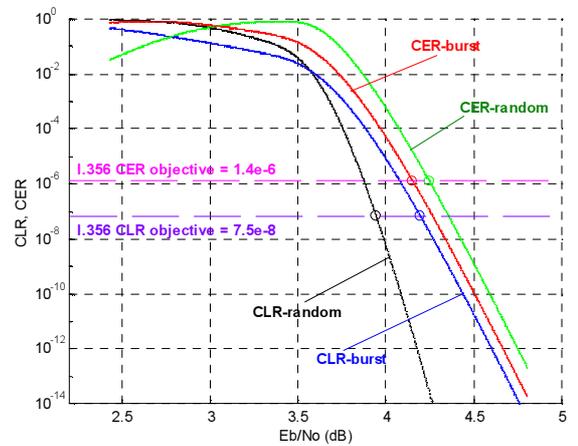


Figure 40 : CER et CLR en fonction de E_b/N_0 , en liaison descendante sans FMT dans le cas d'erreurs aléatoires (codage DVB-RCS, pour $r = 3/4$) et le cas d'erreurs en salve

2.3.3.3.5 Taux d'erreur de paquets (PER ou *Packet Error Ratio*)

Le taux d'erreur de paquets n'est pas à proprement parler un paramètre de performance normalisé par la recommandation I.356, car il ne concerne plus la couche ATM, mais la couche applicative, lorsque des applications IP par exemple sont utilisées au-dessus de l'ATM. Deux causes d'erreur de paquets peuvent être identifiées :

1. Perte de synchronisation du récepteur, soit en rythme soit en fréquence et en phase, quand le rapport signal sur bruit E_b/N_0 est inférieur à un seuil admissible. La synchronisation d'horloge est moins critique que la synchronisation de phase. Pour un décalage de phase typique de $\Delta f_{timeSymbol} < 10^{-3}$ entre deux symboles successifs, le seuil le plus bas de E_b/N_0 déterminé par Alcatel Space pour garantir que le récepteur se synchronise bien en phase est de 2 dB. Par souci de simplification, cette première composante de perte de paquets n'est pas prise en considération dans la formule du PER proposée. Du fait qu'elle fait intervenir une durée pendant laquelle le rapport signal sur bruit demeure en dessous du seuil admissible, tout modèle de taux d'erreur de paquets par perte de synchronisation doit combiner les distributions du canal et les statistiques des durées d'affaiblissement et des durées entre deux affaiblissements. Cet aspect mérite une attention particulière.
2. Dépassement de la capacité de correction du code de correction d'erreur directe (CED) lorsque l'affaiblissement sur la liaison augmente. La perte d'un paquet IP peut survenir :
 - ✓ Quand au moins une de ses cellules ATM est corrompue elle-même, ce qui permet de lier le taux d'erreur de paquets au CLR et donne lieu, en supposant une perte de cellules uniforme, à une probabilité de perte de paquet PER_1 telle que :

$$PER_1 = \sum_{e=1}^{nbCell} C_{nbCell}^e \times CLR^e \times (1-CLR)^{nbCell-e} = 1 - (1-CLR)^{nbCell}$$

Équation 23 : Composante du taux d'erreur de paquets due au dépassement de capacité de correction CED

où $nbCell$ est le nombre de cellules ATM dans un paquet IP dont la taille maximale normalisée IP_length est de 64 Ko. Cependant, sur un lien Ethernet, la taille maximale d'un paquet IP est de 1500 octets. En supposant que la couche d'adaptation AAL5 est utilisée, chaque paquet IP est construit à partir d'un nombre entier de blocs de 48 octets complétés par des bits de bourrage additionnels et d'une information de code de redondance cyclique (CRC ou *Cyclic Redundancy Code*) rajoutée en fin de bloc. En conséquence, chaque paquet IP sera fragmenté en $nbCell = IP_length/48$ cellules. La formule précédente exprime qu'un paquet IP est perdu lorsque au moins une de ses cellules ATM est rejetée par le mécanisme HEC.

- ✓ Quand le paquet contient au moins un bit erroné dans sa charge utile parmi ses $nbBits$. Cette deuxième source de perte de paquets (PER_2) est liée au CRC rajouté par la couche AAL5 dans le but de tester si les cellules ATM issues du décodeur Reed-Solomon se recouvrent ou s'entrelacent. En effet, le CRC n'est capable de détecter qu'une seule erreur uniquement.

$$PER_2 = PER_{AAL5} = \sum_{e=1}^{nbBits} C_{nbBits}^e \times TEB_{RS}^e \times (1-TEB_{RS})^{nbBits-e} = 1 - (1-TEB_{RS})^{nbBits}$$

Équation 24 : Composante AAL5 du taux d'erreur de paquets

où $nbCell$ est le nombre de cellules ATM dans un paquet IP, $nbBits$ le nombre de bits dans un paquet IP et TEB_{RS} le TEB en sortie du décodeur Reed-Solomon.

La formule du taux d'erreur de paquets PER considérée ici ne rend compte que des erreurs de paquets dues à un dépassement de la capacité de correction des codes correcteurs d'erreurs utilisés, dans le contexte d'un codage concaténé de type DVB-S/RCS. Dans le cas d'erreurs aléatoires comme dans SAGAM, étant donné que le CLR est lié au TEB par la formule approximative $CLR = 2380 \times TEB_{RS}^2$, la somme des deux composantes PER_1 et PER_2 peut s'écrire comme une fonction du TEB en sortie du décodeur Reed-Solomon:

$$\begin{aligned} PER_{FEC} &= PER_1 + PER_2 \\ &= H_{PER}(TEB_{RS}) \end{aligned}$$

où $H_{PER}(x)$ est une fonction strictement monotone (cf. : Figure 41 ci-dessous).

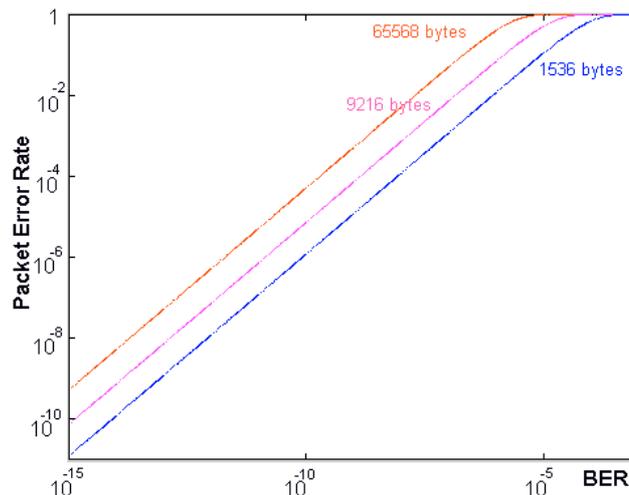
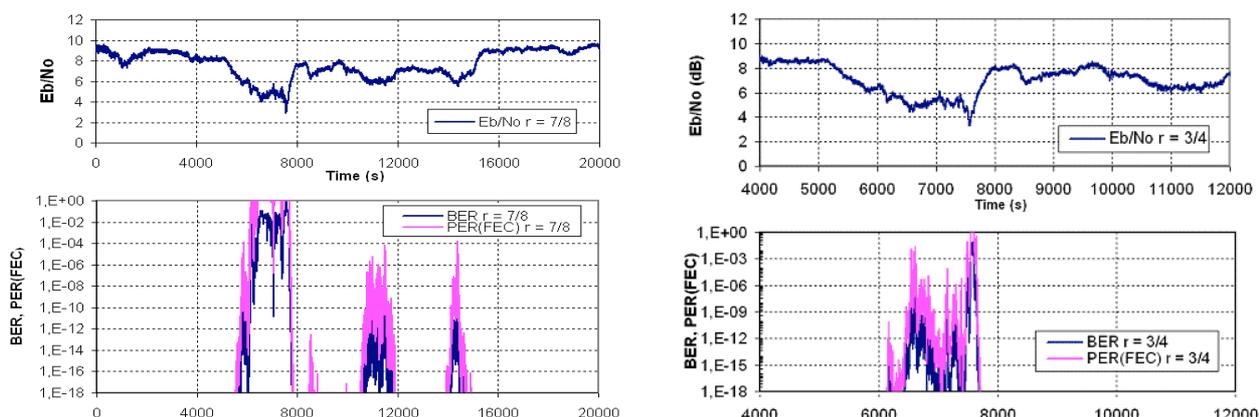


Figure 41 : Fonction H_{PER} en fonction du TEB en sortie du décodeur RS pour différentes longueurs de paquets IP

Les figures 42(a) et 42(b) de la page suivante illustrent la conversion des valeurs d'atténuation E_b/N_o en TEB et en taux d'erreur de paquets PER associées à un événement de pluie légère sur la liaison montante sans utilisation de FMT, pour la forme d'onde DVB-S avec un taux de codage de respectivement 7/8 et 3/4.



Figures 42 : Exemple d'évolution du TEB et du PER durant un événement de pluie légère, en liaison montante sur le site de Louvain la Neuve (Belgique), pour des taux de codage de : 42(a) 7/8 (à gauche) ; et 42(b) 3/4 (à droite)

Il est judicieux de noter qu'avec la couche d'adaptation AAL5, le CLR mesuré tel que vu par l'utilisateur est différent du CLR calculé au niveau réseau (CLR ATM) du fait d'un rejet des paquets SDU (*Service Data Unit*) corrompus par AAL5 (bits erronés dans la charge utile des paquets et non plus dans l'en-tête) : des cellules ATM supplémentaires sont perdues (ce qui donne lieu à la composante CLR_{AAL} définie en §2.3.3.3.1).

En effet, avec un processus de perte de cellules suivant une distribution uniforme (telle que cela a été supposé dans l'équation 24 du taux d'erreur de paquets PER_i , dû au dépassement de la capacité de correction CED), la probabilité d'observer des pertes de cellules multiples est faible, ce qui conduit par conséquent à un nombre élevé de paquets rejetés du fait de pertes de cellules uniques.

Toutefois, la recommandation IUT I.363.5 [189] autorise des SDU AAL5 corrompus (exception faite pour les SDU incomplets c'est-à-dire de longueur incorrecte ou encore ayant des cellules perdues) à être transmis sur les couches supérieures, plutôt que d'être rejetés [66].

La taille des paquets a également une influence directe sur CLR_{AAL} . Plus le paquet est long, plus le risque de perdre les cellules par le mécanisme de rejet de paquets réalisé sur AAL5 est élevé.

2.3.3.3.6 Allocation des performances I.356 à la portion satellitaire

La recommandation S.1602-1 WP-4B suppose que la portion terrestre n'introduise pas d'erreurs de façon significative et que toute l'allocation des performances puisse être attribuée au satellite. La recommandation S.1062 spécifie ainsi l'allocation des performances pour l'ATM par satellite à partir des objectifs de performance de bout en bout de la recommandation I.356. Pour y parvenir, une simple conversion des objectifs de TEB en objectifs de paramètres ATM I.356 sur la liaison satellitaire a été opérée. Il est à noter cependant que cette conversion n'est pas valide dans toutes les configurations de circuit. La portion des objectifs de performance I.356 allouée au système satellitaire est donnée dans le tableau suivant :

	SECBR, CER (Classes 1,2,3)	CLR (Classe 1)	CLR (Classes 2 et 3)
National	42 %	35 %	34.5 %
IIP(0)	35 %	25 %	1 %
IIP(1)	38 %	30 %	11 %
IIP(2)	42 %	33 %	21 %
IIP(3)	48 %	42 %	31 %

Tableau 7 : Allocation des objectifs de performance I.356 au satellite. IIP(x) signifie circuit virtuel pour la Portion Inter Opérateur Internationale avec x pays de transit, chacun offrant des fonctions de commutation VP ou de connexion croisée

Cette allocation des performances se traduit concrètement pour l'ATM par satellite transparent par les objectifs QoS recensés dans le tableau 8 de la page suivante, pour différentes classes de service ATM :

Paramètres	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	I.356	S-ATM	I.356	S-ATM	I.356	S-ATM
CLR ₀₊₁	3×10^{-7}	7.5×10^{-8}	10^{-5}	10^{-7}	/	/
CER	4×10^{-6}	1.4×10^{-6}	4×10^{-6}	1.4×10^{-6}	4×10^{-6}	1.4×10^{-6}
SECBR	10^{-4}	3.5×10^{-3}	10^{-4}	3.5×10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}
CTD _{2-pts}	400 ms	320 ms	/	/	/	/
CDV	3 ms	≈ 0	/	/	/	/
CMR	1/jour	1/72h	1/jour	1/72h	1/jour	
CLR ₀	/	/	/	/	10^{-5}	10^{-7}

Tableau 8 : Objectifs de performances I.356 et ATM par satellite pour IIP(0)

De même, les objectifs de qualité de fonctionnement G.826 pour un Conduit Numérique Fictif de Référence (CNFR) par satellite pour une connexion numérique internationale ou nationale à un débit supérieur ou égal au débit primaire sont donnés dans le tableau ci-dessous, en supposant que 35% des objectifs de bout en bout sont alloués au satellite.

	Débit (Mbit/s)				
	1.5 – 5	> 5 - 15	> 15 – 55	> 55 – 160	> 160 - 3500
ESR	0.014	0.0175	0.0262	0.056	/
SESR	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
BBER	1.05×10^{-4}	0.7×10^{-4}	0.7×10^{-4}	0.7×10^{-4}	0.35×10^{-4}

Tableau 9 : Objectifs de qualité de fonctionnement G.826 pour un CNFR par satellite

2.3.3.4 Gabarit d'erreur S.1062

2.3.3.4.1 Définition du gabarit d'erreur S.1062

Le but poursuivi par la recommandation S.1062 était de concevoir des liaisons satellitaires conformes à la méthodologie de la recommandation G.826, en déterminant un ensemble d'objectifs de TEB qui garantissent la conformité à G.826 si ces valeurs de TEB ne sont pas dépassées pour des pourcentages de temps définis. Ceci a donné lieu à la définition d'un gabarit TEB/α tracé en fonction du pourcentage de temps du pire mois, où α désigne le nombre moyen de bits erronés dans une salve.

Il doit être noté que le pourcentage de temps assigné à une valeur x particulière de TEB/α (voir tableaux 11, 12 et 14) correspond en réalité à la probabilité que cette valeur soit dépassée, probabilité qui est égale à $1-F(x)$ où $F(u)$ est la fonction de distribution de TEB/α .

Les valeurs ciblées comme objectif du tableau 11 ont été calculées par maximisation numérique du TEB sous la contrainte de satisfaire aux objectifs des paramètres G.826. La procédure consiste à fixer arbitrairement des valeurs d'essai de TEB/α , à calculer les valeurs correspondantes des paramètres G.826 et à les comparer avec leurs objectifs respectifs. Au terme de chaque étape de comparaison, une nouvelle valeur de TEB/α est établie et la même procédure est répétée jusqu'à ce qu'une convergence satisfaisante soit atteinte. Cette procédure itérative est précisée ci-après :

1. Fixer les valeurs de TEB/α pour 100%, 10%, 2% et 0.2% du pire mois (points C, D, E, F de la figure 43).
2. Déterminer une valeur TEB_{th}/α correspondant au pourcentage seuil d'indisponibilité T_{th} ($P_{SES} = 0.933$). TEB_{th}/α doit être choisi tel que : $TEB_{th}/\alpha = \min(TEB_{th}^*/\alpha, TEB_{sync}/\alpha)$ où TEB_{sync} est la valeur limite du TEB au-dessus de laquelle le modem perd la synchronisation, et TEB_{th}^*/α est une valeur définie dans le tableau 10, dépendant du débit. Pour la plupart des modems, TEB_{sync} se situe autour de 1×10^{-3} . TEB_{th}/α peut donc être choisi égal à l'une des valeurs spécifiées dans le tableau 10.
3. Choisir une valeur de T_{th} inférieure à 0.2%.
4. Calculer ESR , $SESR$ et $BBER$.
5. Répéter les étapes 3 et 4 jusqu'à ce que les valeurs les plus élevées pour ESR , $SESR$ et $BBER$ soient atteintes. Si les objectifs de performances pour ESR , $SESR$ et $BBER$ pour toutes les valeurs de $T_{th} < 0.2\%$ sont satisfaites, alors le gabarit déterminé par les points C, D, E et F satisfait à la recommandation G.826. Ce gabarit garantit que l'indisponibilité sera inférieure à 0.2% du temps du pire mois.

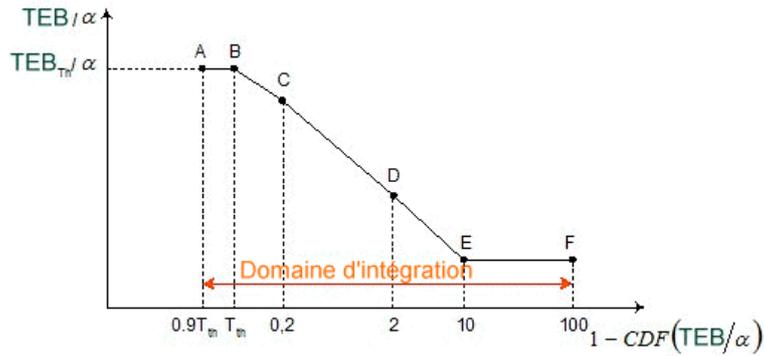


Figure 43 : Gabarit de TEB/α d'après ITU-T Rec. S.1062-1

Bit rate (Mbit/s)	TEB_{th}^*/α
1.544	9.00×10^{-5}
2.048	1.90×10^{-5}
6.432	1.17×10^{-5}
51.84	5.68×10^{-5}
155.52	1.89×10^{-5}

Tableau 10 : Valeurs de TEB_{th}^*/α pour des débits normalisés

La recommandation S.1062 a établi les valeurs de TEB/α pendant le mois le plus défavorable qui permettent de satisfaire aux exigences de la recommandation G.826. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 11 ci-après. Les chiffres limites à garantir pour tout CNFR sont donnés dans le tableau 12.

Débit binaire (Mbit/s)	% de temps du pire mois	TEB/α	TEB ($\alpha = 10$)	TEB ($\alpha = 11.5$)
1.5	0.2	7×10^{-7}	7×10^{-6}	8.05×10^{-6}
	2	3×10^{-8}	3×10^{-7}	3.45×10^{-7}
	10	5×10^{-9}	5×10^{-8}	5.75×10^{-8}
2.0	0.2	7×10^{-6}	7×10^{-5}	8.05×10^{-5}
	2	2×10^{-8}	2×10^{-7}	2.3×10^{-7}
	10	2×10^{-9}	2×10^{-8}	2.3×10^{-8}
6.0	0.2	8×10^{-7}	8×10^{-6}	9.2×10^{-6}
	2	1×10^{-8}	1×10^{-7}	1.15×10^{-7}
	10	1×10^{-9}	1×10^{-8}	1.15×10^{-8}
51.0	0.2	4×10^{-7}	4×10^{-6}	4.6×10^{-6}
	2	2×10^{-9}	2×10^{-8}	2.3×10^{-8}
	10	2×10^{-10}	2×10^{-9}	2.3×10^{-9}
155	0.2	1×10^{-7}	1×10^{-6}	1.15×10^{-6}
	2	1×10^{-9}	1×10^{-8}	1.15×10^{-8}
	10	1×10^{-10}	1×10^{-9}	1.15×10^{-9}

Tableau 11 : Gabarit TEB/α conçu pour satisfaire aux objectifs de la recommandation IUT-T Rec. G.826

% du temps du pire mois	% du temps d'une année moyenne	TEB/α	TEB ($\alpha = 10$)	TEB ($\alpha = 11.5$)
0.2	0.04	1×10^{-7}	1×10^{-6}	1.15×10^{-6}
2	0.6	1×10^{-9}	1×10^{-8}	1.15×10^{-8}
10	4	1×10^{-10}	1×10^{-9}	1.15×10^{-9}

Tableau 12 : Gabarit TEB/α limitée pour tout chemin numérique satellitaire hypothétique

2.3.3.4.2 Exemple de détermination d'un gabarit d'erreur

Le gabarit S.1062 a été testé pour le débit binaire de 68.28 Mbit/s du lien descendant de SAGAM sur le site de Louvain la Neuve (Belgique), et pour $TEB_{th}/\alpha = 4.732 \times 10^{-5}$ correspondant à $P_{SES} = 0.933$. Il a été trouvé que pour ce gabarit, les objectifs de l'ESR et du SESR sont atteints mais l'objectif du BBER ne l'est pas. Des calculs pour différentes valeurs de TEB_{th}/α (voir tableau 13) montrent que BBER n'est satisfait ($< 7 \times 10^{-5}$) que si TEB_{th}/α est pris inférieur à 3.1×10^{-5} .

TEB_{th}/α	BBER
4.732×10^{-5}	1.015×10^{-4}
4×10^{-5}	8.77×10^{-5}
3.5×10^{-5}	7.8×10^{-5}
3×10^{-5}	6.8×10^{-5}
3.2×10^{-5}	7.21×10^{-5}
3.1×10^{-5}	7×10^{-5}

Tableau 13 : Valeurs du BBER en fonction de TEB_{th}/α

En choisissant le gabarit défini dans le tableau 14 suivant, obtenu en effectuant une interpolation linéaire entre les valeurs spécifiées de TEB/α pour les débits normalisés de S.1062, les objectifs de performances de la norme G.826 sont satisfaits :

% de temps du mois le plus défavorable	% de temps d'une année moyenne	TEB/α
T_{th}	T_{th}	3.1×10^{-5}
0.2	0.04	3.5×10^{-7}
2	0.6	1.83×10^{-9}
10	4	1.83×10^{-10}

Tableau 14 : Gabarit S.1062 pour la liaison descendante de SAGAM

2.3.4 Méthodologie de conversion de statistiques du canal en statistiques de performances QoS

Au cours des présents travaux de recherche, une méthode de caractérisation du canal satellitaire en bande Ka par transformation ponctuelle instantanée du TEB en critères de performances QoS au moyen de distributions statistiques long terme du canal, a été développée [96]. Cette approche se démarque de l'approche classique purement orientée propagation par le fait qu'elle propose un modèle de prédiction permettant de relier les statistiques des paramètres de performance QoS relatifs aux couches supérieures au comportement statistique sur le long terme du canal. Elle s'avère d'une grande utilité lorsqu'elle est appliquée aux systèmes de communication par satellite. La procédure a été élaborée pour être appliquée essentiellement aux formes d'onde du projet SAGAM mais a été également appliquée aux formes d'onde du projet GEOCAST, ainsi que dans des applications ATM et IP, mais la méthodologie elle-même est applicable à d'autres systèmes de communication par satellite, sous réserve d'hypothèses système appropriées. Elle est exposée dans ses grandes lignes ci-après (cf. : Figure 44). La méthodologie proposée se décompose principalement en trois étapes successives :

1. La dégradation du bilan de liaison est calculée en termes de densité de probabilité (PDF) de l'affaiblissement global C/N_0 en prenant en compte les effets majeurs de propagation en bande Ka, soit l'atténuation due à la pluie, la scintillation d'amplitude et, pour la liaison descendante, la dégradation β du facteur de mérite de la station terrestre considérée, due à l'accroissement de la température de bruit du ciel. Cette densité de probabilité peut être calculée à partir de distributions obtenues à l'aide de modèles de propagation conventionnels tels que ceux utilisés par les recommandations de l'IUT-R ou les modèles de Moulisley-Vilar ou encore le modèle de van de Kamp. Les modèles de propagation du §2.1 ont été utilisés dans le cas présent.
2. Une procédure particulière est appliquée pour convertir les distributions du bilan de liaison en distribution du TEB, ce qui requiert l'introduction des caractéristiques des formes d'onde employées dans le système. A ce niveau, la

distribution du TEB peut tenir compte du fait qu'une technique de contre-mesure est activée. L'expression de la distribution diffère selon qu'une FMT est utilisée ou non, et également selon la configuration FMT déployée.

- Les paramètres de performances normalisés I.356 étant reliés au TEB par des formules analytiques connues (cf. : §2.3.3.3), et la distribution du TEB étant elle-même connue, déduite des distributions statistiques du canal à l'étape 2, les distributions long terme de ces paramètres peuvent être calculées par une procédure de conversion découlant d'une propriété de transformation des fonctions de distribution, appelée "propriété 1" et énoncée plus bas.

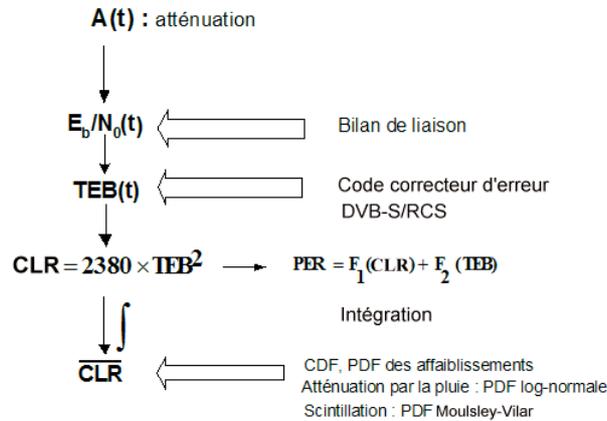


Figure 44 : Méthode de conversion de statistiques du canal en distributions de QoS

Cette approche est bien adaptée à l'environnement ATM et constitue une alternative simple à la méthodologie S.1062 mais il n'est pas exclu de les combiner. En particulier, les distributions du TEB, du CLR et du PER obtenues par cette approche sont exprimées sur une année moyenne qui, une fois converties en pourcentages de temps sur le pire mois, peuvent être introduites directement comme entrées dans la méthodologie S.1062.

La méthodologie repose essentiellement sur une propriété régissant deux distributions statistiques liées par une relation de dépendance strictement monotone. De cette propriété, découle toute la procédure de transformation des distributions.

Si X et Y sont deux variables aléatoires telles que :

- $Y = h(X)$, h étant strictement monotone ;
- la fonction de distribution $P_X(x) = P[X < x]$ est connue,

alors la fonction de distribution $P_Y(y) = P[Y < y]$ peut être écrite comme suit : $P_Y(y) = P_X(h^{-1}(y))$.

Propriété 1 : Propriété liant les fonctions de distributions de deux variables aléatoires liées par une relation de dépendance strictement monotone

La mise en œuvre de la méthodologie est illustrée en considérant la liaison descendante où la dégradation totale du bilan de liaison s'exprime par la formule :

$$\Delta_{dl} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dl,0,dB} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dl,dB} + 10 \log \frac{R_{b_{dl,0}}}{R_{b_{dl}}}$$

Équation 25 : Formule générale de la dégradation totale sur la liaison descendante

où $R_{b_{dl}}$ et $R_{b_{dl,0}}$ sont les débits binaires respectivement en conditions courantes de fonctionnement et en air clair. S'il est supposé que, comme pour SAGAM, la voie descendante ne dispose que d'un seul lien TDM sans mécanisme de contre-mesure, alors il vient immédiatement $R_{b_{dl}} = R_{b_{dl,0}}$ et Δ_{dl} se réduit à :

$$\Delta_{dl} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dl,0,dB} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{dl,dB} = \gamma_{dl,0,dB} - \gamma_{dl,dB}$$

Équation 26 : Formule de la dégradation totale sur le lien descendant pour un seul TDM fixe

2.3.4.1 Distribution statistique du TEB

Si $T_{dl,\rho}(\gamma_{dB})$ dénote le TEB en fonction du rapport signal sur bruit γ_{dB} exprimé en dB pour la liaison descendante dans un système de codage de taux de codage ρ , la propriété 1 énoncée plus haut permet d'obtenir la fonction de distribution de γ_{dB} :

$$P_{\gamma_{dl,dB}}(\gamma) = P_{\Delta_{dl,dB}}[\gamma_{dl,0,dB} - \gamma] = \int_{\gamma_{dl,0,dB} - \gamma}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{\chi}(v-u) p_{A_{r,dl}}(u) du dv$$

Équation 27 : Fonction de distribution du rapport signal sur bruit en liaison descendante

où $p_{\chi}(x)$ et $p_{A_{r,dl}}(a)$ sont les fonctions de densité de probabilité respectivement de la scintillation d'amplitude et de l'atténuation due à la pluie. La fonction de distribution $P_{TEB_{dl}}(\varepsilon_b) = P[TEB_{dl} < \varepsilon_b]$ du TEB en liaison descendante est donnée alors par :

$$P_{TEB_{dl}}(\varepsilon_b) = P_{\gamma_{dl,dB}}(T_{dl,\rho}^{-1}(\varepsilon_b)).$$

Équation 28 : Fonction de distribution du TEB en liaison descendante

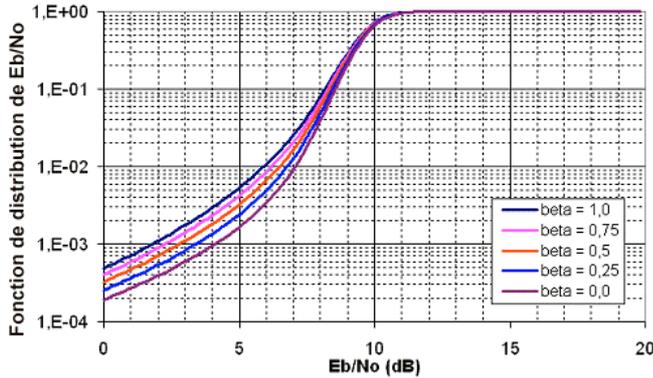


Figure 45 : Fonction de distribution de E_b/N_o en liaison descendante sur le site de Louvain la Neuve avec un codage DVB-S de taux de codage 1/2, et $m_d = -2.0344$, $\sigma_d = 1.2146$, $\sigma_m = 0.752$ et $\sigma_\sigma = 0.5$

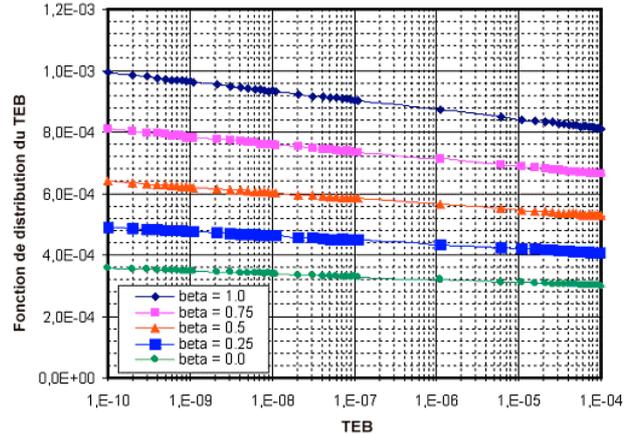


Figure 46 : Fonction de distribution du TEB en liaison descendante sur le site de Louvain la Neuve avec un codage DVB-S $r=1/2$, et $m_d = -2.0344$, $\sigma_d = 1.2146$, $\sigma_m = 0.752$ et $\sigma_\sigma = 0.5$.

2.3.4.2 Distribution du taux de perte de cellules instantané CLR

Par application de la propriété 1 énoncée plus haut, il vient :

- $P_{CLR_{aléatoire}}(C_p) = P_{TEB} \left(\frac{\sqrt{C_p}}{2380} \right)$ dans le cas des erreurs aléatoires ;
- $P_{CLR_{salve}}(C_p) = P_{TEB} (H_{CLR_{salve}}^{-1}(C_p))$ dans le cas d'erreur en salve où la fonction $H_{CLR_{salve}}^{-1}$ a été définie dans la section §2.3.3.3.1.

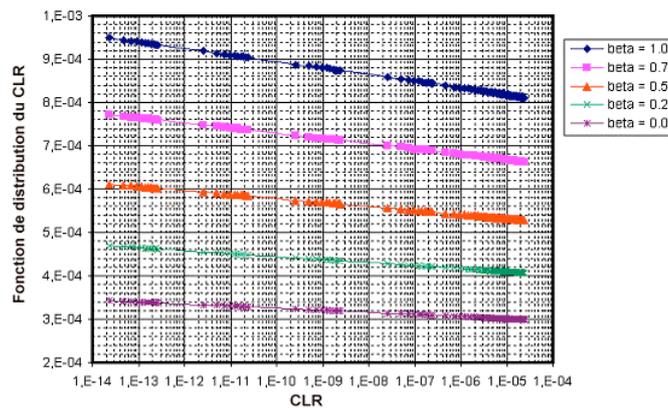


Figure 47 : Fonctions de distribution du CLR sur le site de Louvain la Neuve en liaison descendante pour un taux de codage convolusionnel r de 1/2 et $m_d = -2.0344$, $\sigma_d = 1.2146$, $\sigma_m = 0.752$ et $\sigma_\sigma = 0.5$

2.3.4.3 Taux de perte de cellules long terme (\overline{CLR})

Le taux de perte de cellules long terme noté \overline{CLR} peut se déduire du taux de perte de cellules instantané CLR au moyen d'une intégration sur le long terme de la distribution de CLR sur tout son intervalle de valeurs en excluant le domaine correspondant aux blocs de cellules sévèrement erronées (*Severely Errored Cell Block* ou SECB), soit :

$$\overline{CLR} = \frac{1}{1 - T_{C_0}} \int_0^{C_0} P_{CLR}(C_p) dC_p$$

Équation 29 : Taux de perte de cellules long terme obtenu par intégration du taux de perte de cellules instantané

où :

- C_p dénote une valeur du taux de perte de cellules instantané CLR ;
- C_0 est la valeur maximale du taux de perte de cellules instantané ;
- $T_{C_0} = P_{CLR}(C_0)$ où P_{CLR} est la fonction de répartition de CLR, soit : $P_{CLR}(C_p) = P[CLR < C_p]$.

Un SECB est défini comme un bloc de N cellules ATM consécutives qui contient plus de $M < N$ cellules erronées (c'est-à-dire des cellules qui ont au moins un bit erroné). Ces cellules sont rejetées du côté récepteur. La recommandation IUT-T Rec. I.356 spécifie les valeurs de N et M pour un certain nombre de débits binaires utiles.

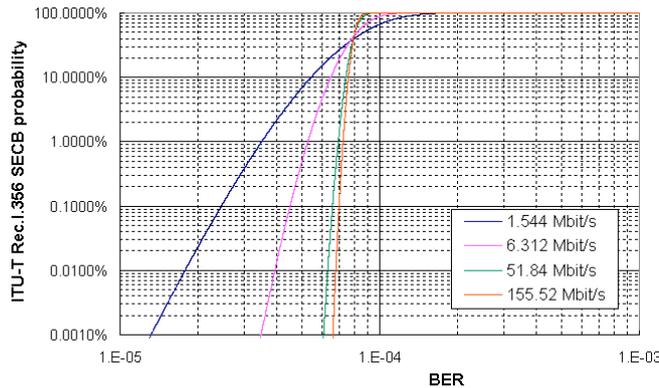


Figure 48 : Probabilités SECB de l'IUT-T Rec. I.356 SECB en fonction du TEB pour divers débits binaires utiles

Le tracé des probabilités d'occurrence des blocs de cellules sévèrement erronées en fonction du TEB pour divers débits binaires utiles normalisés montre que la région SECB équivaut à des TEB supérieurs à 2×10^{-4} pour lesquels les probabilités SECB sont proches de 1 [58]. Il en résulte ainsi :

$$C_0 = \begin{cases} C_{0,aléatoire} = 9.52 \times 10^{-5} & \text{pour des erreurs aléatoires} \\ C_{0,salve 1/2} = 2.19 \times 10^{-3} & \text{pour des erreurs en salve et un taux de codage 1/2} \\ C_{0,salve 3/4} = 1.08 \times 10^{-3} & \text{pour des erreurs en salve et un taux de codage 3/4} \end{cases}$$

2.3.4.4 Distribution du taux d'erreur de paquets PER

C'est la distribution du taux d'erreur de paquets tel que défini en §2.3.3.3.5 qui est considérée ici :

$$PER_{FEC} = PER_1 + PER_2 \\ = H_{PER}(TEB_{RS})'$$

où $H_{PER}(x)$ est une fonction strictement monotone. L'utilisation une nouvelle fois de la propriété 1 de transformation d'une fonction de distribution permet d'aboutir à l'expression recherchée de la fonction de distribution de PER_{FEC} .

$$P_{PER_{FEC}}(PER) = P[PER_{FEC} < PER] = P_{TEB}(H_{PER}^{-1}(PER))$$

Équation 30 : Expression de la fonction de distribution de PER_{FEC}

Un exemple de courbe de fonction de distribution du taux d'erreur de paquets obtenue lorsqu'une technique FMT est utilisée et pour diverses longueurs de paquets IP, est donné au chapitre 3, en §3.4.3.3.

2.3.4.5 Application à l'évaluation des performances de la contre-mesure

Ce modèle de prédiction s'avère d'une grande utilité et constitue une approche aisément manipulable pour les concepteurs de systèmes satellitaires basés sur l'ATM en bande Ka. Ses applications sont multiples et un exemple en est donné au chapitre 3, section §3.4.3 avec l'évaluation des performances sur le long terme du système étudié avec adjonction d'une technique de contre-mesure en termes de QoS selon la recommandation IUT-T Rec. I.356.

Le modèle souffre toutefois de deux limitations principales. Premièrement, il repose sur un grand nombre d'hypothèses simplificatrices sous-jacentes, ce qui en particulier peut rendre imprécis le procédé de conversion du TEB en CLR, laquelle conversion se trouve au cœur de la méthodologie. Deuxièmement, le modèle ne prend pas en compte la

corrélation temporelle des erreurs pouvant exister à l'intérieur de longs événements d'affaiblissement. Des modélisations à partir de chaînes de Markov comme préconisé par Zorzi et al. [43,87-89,154] sont susceptibles de remédier à cette limitation, mais au profit d'une complexité calculatoire accrue.

2.3.5 Modélisation de la qualité perceptive

Un affinement supplémentaire de la notion de QoS consiste à élaborer des paramètres ou métriques d'erreur *perceptive* permettant de quantifier de façon objective la qualité d'une application multimédia perçue de manière *subjective* par un utilisateur final.

En effet, dans un système multimédia, la satisfaction de l'utilisateur final qui bénéficie des services proposés est un objectif primordial. La translation du TEB en paramètres normalisés par l'IUT (G.826, I.356 et S.1062-1) de performances orientées QoS constitue une première étape significative permettant de mener à terme vers une quantification objective de la qualité des applications transportées par le système *perçue* par l'utilisateur final. Mais lorsque des applications telles que la vidéo ou l'audio sont concernées, le TEB ou même les paramètres de QoS conventionnels ne suffisent plus à l'évidence à mesurer la qualité perceptive de ces mêmes applications. Des métriques plus appropriées doivent être élaborées. De telles nouvelles métriques ainsi définies doivent être éprouvées quant à leur robustesse et leur précision dans un système pourvu d'un dispositif de contre-mesure. Cette approche s'avère hautement complexe d'autant plus que chaque type d'application est susceptible de donner lieu à des métriques spécifiques. Adanez a brillamment ouvert la voie à ce type de problématique en proposant un aménagement des couches réseau et AAL par l'élaboration de nouveaux protocoles capables de gérer les contraintes propres des applications multimédia multipoint interactives à débit variable dans un réseau à haut débit, et en présentant les correspondances qui peuvent exister entre les paramètres QoS réseau et utilisateur, ainsi que l'impact de pertes de cellules sur la vidéo [64], l'étude se faisant par simulation OPNET. Ce genre d'approche dépasse largement le cadre de cette thèse. Elle mérite à elle seule, cependant, des investigations minutieuses et un nécessaire examen quand la contre-mesure est introduite dans le système. Elle est proposée comme un élargissement prospectif de la présente étude. Quelques modèles de qualité perceptive pour la voix et la vidéo sont donnés également dans le chapitre *Perspective*, §2.2.

Il ne serait pas possible de clore cette section sans mentionner les expérimentations menées récemment au Japon par Yoshimura et al. [191], visant à déterminer de façon subjective la qualité des images HDTV reçues par des utilisateurs finaux, et transmises sur une liaison satellitaire utilisant l'ATM à haut débit : 500 abonnés étaient interrogés. Les résultats montrent que la perception de la qualité des images dépend bien de la qualité de la liaison. Des expériences supplémentaires sont à réaliser afin de vérifier si le taux de perte de cellules CLR n'influe pas sur cette perception. Il a été trouvé néanmoins que l'utilisation du TCP/IP standard dégrade fortement la qualité de la transmission du fait des délais de transmission.

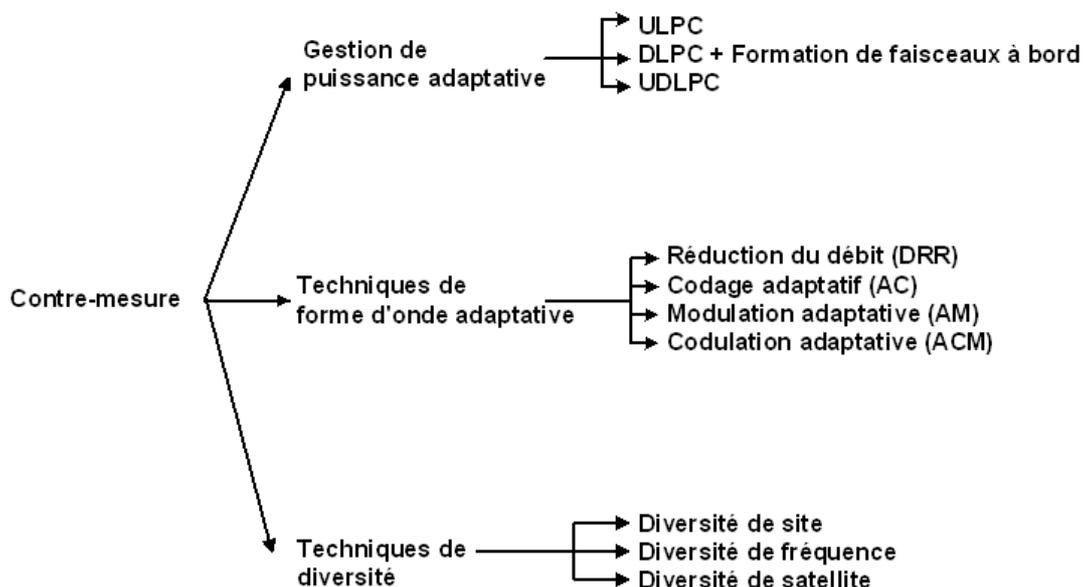
3 CHAPITRE 3 :

PROBLEMATIQUES ET PERFORMANCES LIEES A LA CONTRE-MESURE

3.1 PRINCIPE DES FMT

Le canal en bande Ka pour une liaison satellitaire souffre des effets de fortes atténuations dues principalement à la pluie, à la scintillation troposphérique et au bruit gaussien, lesquels effets limitent considérablement la disponibilité de la liaison lorsqu'une marge statique faible est introduite dans les bilans de liaison, et partant les performances du système. Or, l'alternative qui consiste à compenser ces atténuations en s'autorisant une marge statique élevée pour contrecarrer les conditions de propagation extrêmes, crée d'autres problèmes. 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 très faible, ce qui équivaut à un gaspillage inutile et à une gestion inefficace des ressources. En deuxième lieu, un tel surdimensionnement conduit à élaborer de grosses stations terrestres capables d'émettre de fortes puissances, ce qui va à l'inverse de la logique du faible coût qui a amené à privilégier les petites stations de type VSAT. Ainsi, la conception d'un système de communication optimisé requiert impérativement le déploiement de techniques de contre-mesure permettant de lutter de façon adaptative contre les dégradations du canal de propagation. Ces techniques améliorent sensiblement et la disponibilité de la liaison et le taux d'utilisation du canal, pourvu que le dispositif de contrôle soit efficace.

Les techniques de contre-mesure appartiennent à différentes catégories. Elles peuvent être classées comme suit [25,84-86,100,187] :



✓ **Contrôle de puissance adaptatif** : La gestion de puissance consistant à adapter le niveau de sortie du signal suivant l'évolution des conditions de propagation est une technique efficace dans le cas de faibles précipitations (à cause des marges limitées à bord comme au sol), soit pendant un pourcentage de temps élevé. Elle se matérialise par les diverses méthodes suivantes :

- Contrôle de puissance sur la liaison montante (ULPC ou *UpLink Power Control*) qui permet d'atteindre un gain entre 5 dB (VSAT) et 15 dB (nœud concentrateur) ;
- Contrôle de puissance sur la liaison descendante (DLPC ou *DownLink Power Control*) qui exhibe un gain de 3 dB en sortie de l'amplificateur TWTA (*Travelling Wave Tube Amplifier*) du satellite ;
- Contrôle de puissance par formation de faisceaux à bord avec utilisation d'antennes actives (OBBS ou *On Board Beam Shaping*) réalisant 5 dB de gain.

✓ **Techniques de forme d'onde adaptative** : Cette appellation désigne essentiellement le codage adaptatif (AC ou *Adaptive Coding*), la modulation adaptative ou les deux procédés combinés (le néologisme "codulation" adaptative est utilisé dans la littérature anglo-saxonne), et enfin la réduction du débit (DRR ou *Data Rate Reduction*). Le gain d'énergie par bit apporté par ce type de techniques de contre-mesure varie entre 10 et 15 dB.

Le principe des techniques de forme d'onde adaptative consiste à réduire progressivement le rapport E_b/N_0 requis à mesure que les conditions de propagation se dégradent, en activant la commutation du dispositif FMT vers un ordre ou état toujours plus élevé. Par exemple, l'introduction de codage ajoute des bits de redondance aux bits d'information, ce qui permet de détecter et de corriger les erreurs produites par la dégradation du canal. Lorsque le codage adaptatif est employé, en air clair, le système démarre au point de fonctionnement PT_0 sur un taux de codage r_0 qui définit une première courbe de TEB et constitue le mode FMT en air clair. Lorsque l'atténuation sur le canal augmente jusqu'à dépasser, au point PT_1 , la marge M_0 déterminée par le mode FMT en air clair, le dispositif FMT commute vers le taux de codage suivant $r_1 < r_0$. Une deuxième courbe de TEB est alors

sélectionnée. Le procédé se poursuit avec les différents taux de codage successifs $r_k < r_{k-1}$ et conduit ainsi à la réduction souhaitée du rapport E_b/N_o requis (cf. : Figure 49). En cas d'amélioration du canal, le procédé est déroulé dans le sens inverse.

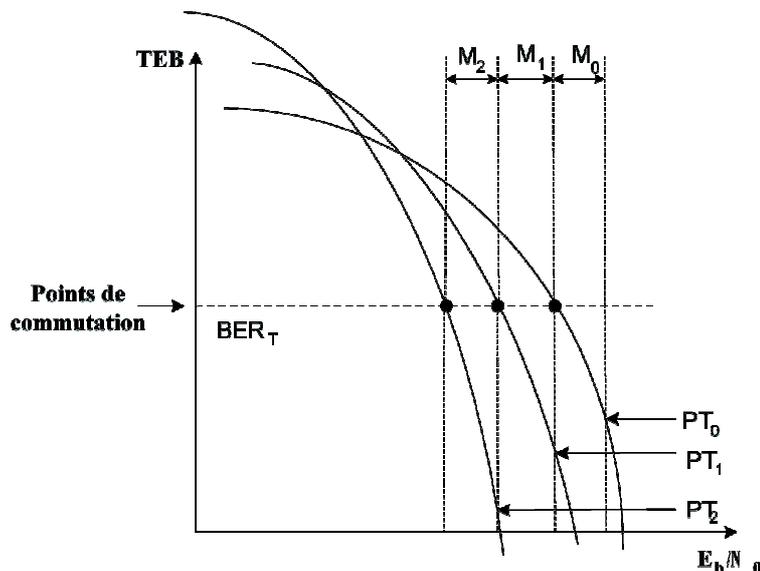


Figure 49 : Principe du codage adaptatif ou de la modulation adaptative

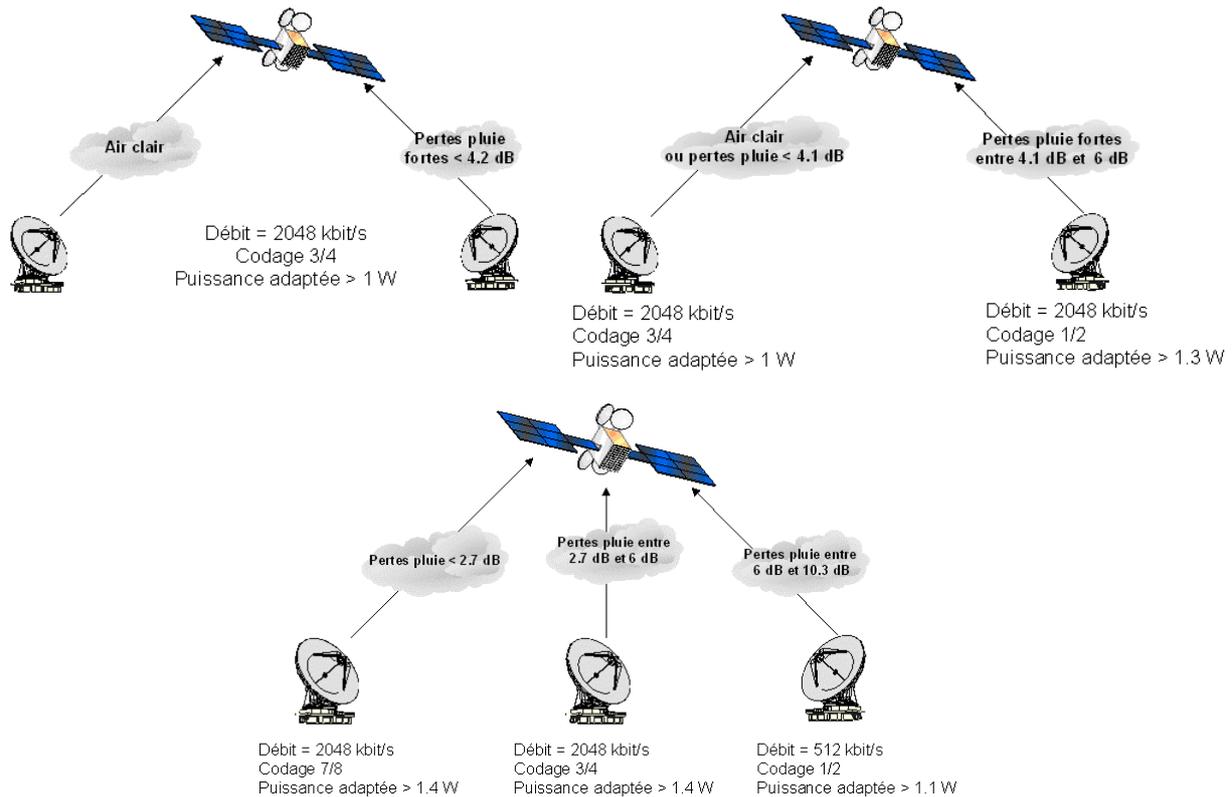
Ces techniques de forme d'onde adaptative modifient la forme d'onde du signal et leurs impacts sur les performances et l'architecture du système doivent donc être minutieusement évalués. En particulier, les performances des modems sont affectées par ces techniques. En effet, une forme d'onde conditionne les performances des récepteurs (bord, sol) en terme de taux d'erreur de bit, de temps de synchronisation de la porteuse (fréquence et phase) et de l'horloge, de sensibilité à la gigue de phase, aux interférences entre symboles et à d'autres types d'interférences. Ces techniques FMT conduisent ainsi à étudier l'architecture même des récepteurs (en technologie numérique la plupart du temps) qui doivent être réalisés. Il est en outre primordial de bien étudier les points de fonctionnement des amplificateurs non-linéaires de puissance (fonctionnement dans la zone linéaire ou en saturation, points de recul) partagés entre le sol et le bord qui ont un impact sur la qualité de la liaison et peuvent pousser à avantager certaines modulations mieux adaptées, comme par exemple les modulations à enveloppe constante peu sensibles aux non-linéarités, dans le but de minimiser les distorsions.

- ✓ **Techniques de diversité** : Elles se classent en trois grandes catégories :
 - Diversité de site (gain entre 10 et 30 dB dans les cellules convectives en bande Ka) ;
 - Diversité de satellite (gain entre 3 et 10 dB) ;
 - Diversité de fréquence (jusqu'à 30 dB en bande Ka).

3.2 CONFIGURATIONS FMT DE SAGAM

Alors que le projet SAGAM ne fait pas intervenir des techniques de contre-mesure, il est supposé tout au long de cette étude que trois configurations FMT de référence sont considérées et appliquées au système SAGAM [106,110,123] :

- ✓ **Configuration 1** : FMT à "1 mode" utilisant uniquement le contrôle de puissance en liaison montante (ULPC) avec un taux de codage unique de 7/8 (1C), 3/4 (1B) ou 1/2 (1A) et un débit constant de 2048 kbit/s (cf. : Figure 50(a));
- ✓ **Configuration 2** : FMT à deux modes faisant intervenir un contrôle de puissance ULPC et un codage adaptatif avec un débit constant de 2048 kbit/s, et les taux de codage 3/4 (mode 1) et 1/2 (mode 2) (cf. : Figure 50(b)) ;
- ✓ **Configuration 3** : FMT à trois modes à base des mécanismes ULPC, AC et réduction de débit (DRR) avec les débits et taux de codage suivants : 2048 kbit/s et 7/8 (mode 1) ; 2048 kbit/s et 3/4 (mode 2) et 512 kbit/s et 1/2 (cf. : Figure 50(c)).



Figures 50 : Configurations FMT SAGAM : 50(a) : Configuration 1B (en haut à gauche) - 50(b) : Configuration 2 (en haut à droite) - 50(c) : Configuration 3 (en bas)

La configuration FMT n°1 avec uniquement un contrôle de puissance sur la liaison montante consiste tout simplement à adapter la puissance de transmission du signal lorsque celui-ci subit un affaiblissement.

Lorsqu'une liaison expérimente un affaiblissement, la configuration FMT n°3 active successivement et dans cet ordre les dispositifs suivants :

- ✓ Le codage adaptatif (détermination d'un taux de codage parmi les trois disponibles 7/8, 3/4 et 1/2) ;
- ✓ La réduction de débit d'un facteur quatre lorsque l'affaiblissement est au plus fort et que le taux de codage est déjà de 1/2. Le couple (taux de codage, débit) constitue un *mode* du dispositif FMT.
- ✓ Le contrôle de puissance par palier de 0.5 W entre 1 W (puissance nominale) et 3 W (puissance maximale) à l'intérieur de chaque mode. La puissance est ramenée à sa valeur nominale à chaque nouvelle commutation de taux de codage.

3.3 RELATIONS ENTRE LE CANAL ET LA CONTRE-MESURE COMBINES, ET LA GESTION DES RESSOURCES

Les sections qui suivent visent à parcourir les principales problématiques suscitées par le déploiement de techniques de contre-mesure dans un système satellitaire, suivant une vue orientée multicouche telle qu'elle a été mise en avant. Les points abordés sont loin d'être exhaustifs ; ils se limitent aux points critiques intervenant dans la présente étude. D'autres aspects sont mentionnés dans le chapitre *Perspectives*.

3.3.1 Techniques de contre-mesure à bande transmise constante

Les techniques de contre-mesure à *bande transmise constante* ne modifient en rien les formes d'ondes. Dans cette catégorie, la technique la plus couramment utilisée est celle du contrôle de puissance en liaison montante qui consiste à adapter par pas réguliers ou par facteurs multiplicatifs la puissance transmise par les stations terrestres en fonction des conditions de propagation rencontrées. Cette solution amène à dimensionner les stations par rapport aux conditions de propagation les plus défavorables, ce qui conduit inéluctablement à un surdimensionnement. En effet, la marge système dans le bilan de liaison doit être élevée de manière à absorber toute l'amplitude de l'atténuation de manière à atteindre une disponibilité du système élevée. Cette approche induit un gaspillage des ressources qui ne sont utilisées au maximum de leur capacité que lors de très forts affaiblissements, c'est-à-dire durant un pourcentage de temps relativement faible. L'intérêt des techniques FMT à bande transmise constante réside toutefois dans le fait significatif

qu'elles n'ont pas d'incidence sur les protocoles de gestion des ressources (l'allocation des créneaux et le contrôle d'admission des connexions) au niveau de la couche accès, ce qui autorise l'utilisation d'algorithmes connus et matures.

3.3.2 Techniques de contre-mesure à bande transmise variable

Les techniques de contre-mesure à *bande transmise variable*, telles que la configuration appelée FMT n°3 présentée en §3.2, quant à elles, reposent sur l'hybridation du contrôle de puissance avec des procédés FMT à forme d'onde adaptative tels que le codage adaptatif ou la modulation adaptative ou encore la réduction de débit. Elles modifient par conséquent les formes d'ondes en fonction des conditions météorologiques. Ces solutions améliorent la disponibilité du système et optimisent la gestion des ressources mais génèrent, en revanche, des problèmes nouveaux : complexité accrue de réalisation matérielle au niveau des modems tant sol qu'embarqués, modification possible de la structure nominale des trames montante et descendante, adjonction de signalisation supplémentaire, altération des délais au cœur des processus DAMA et notamment dans les files d'attente, et enfin introduction d'une notion de prédictibilité dans la procédure CAC. Certaines de ces problématiques nouvelles avec leurs impacts induits sur l'architecture du gestionnaire des ressources, sont décrites dans le chapitre 4 consacré aux méthodes de gestion de ressource à mettre en œuvre dans un système employant une technique contre-mesure à bande transmise variable.

3.3.3 Différenciation des échelles de temps

D'emblée apparaît à ce stade une ségrégation d'échelles de temps entre différentes techniques de prédiction du canal. Ces diverses échelles de temps doivent être liées non seulement aux phénomènes de propagation concernés, mais également aux réactivités et temps de traitement des dispositifs de gestion des ressources depuis la couche physique jusqu'à la couche accès. Le tableau suivant met en évidence ces différentes échelles de temps :

Type de prédiction	Echelle de temps	Nature de la prédiction	Application
Temps réel	1 seconde	Prédiction de l'affaiblissement	Contrôle de puissance (ULPC)
Court terme	1 minute	<ul style="list-style-type: none"> Evolution de l'état du dispositif FMT face aux variations rapides du canal Prédiction obtenue à l'aide de modèles de distributions statistiques des phénomènes de propagation (atténuation due à la pluie et scintillation d'amplitude) 	CAC et DAMA à capacité variable
Moyen terme	Dizaine de minutes, 1 heure	<ul style="list-style-type: none"> Prédiction de l'évolution spatiale des cellules de pluie par utilisation d'images radar Prévision météorologique court terme (sur quelques heures) de type <i>nowcasting</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Gestion globale de la ressource Calcul des interférences Stratégies de déploiement des FMT sur diverses stations
Long terme	Jour, mois, année	Données et statistiques climatologiques globales à partir des modèles météorologiques conventionnels	Dimensionnement du système, définition des marges statiques des bilans de liaison

Tableau 15 : Différentes échelles de prédiction des affaiblissements en relation avec les mécanismes de gestion des ressources

A ces différentes échelles de temps liées à la propagation et la contre-mesure, doivent s'ajouter maintenant les diverses échelles de temps liées aux mécanismes situés sur les couches supérieures :

- ✓ Synchronisation (couche physique) : 1 ms
- ✓ Accès trame par trame (DAMA, rapport de configuration FCR (*Frame Report Configuration*)) : 10 - 100 ms
- ✓ Contrôle de puissance : 1 s
- ✓ Connexion (CAC) : 1 mn
- ✓ Niveau IP (non connecté) : l'échelle de temps est le flot entre deux adresses IP établies point à point, sur la durée duquel les paramètres sont à peu près constants.
- ✓ Couche planification qui attribue les ressources radio dans une configuration et une zone données : 1 heure (échelle de temps plus étendue)

3.3.4 Interactions entre les mécanismes et informations liés au canal et les couches supérieures

Les impacts de la boucle de contre-mesure et de l'exploitation d'informations liées au canal sur le fonctionnement du système doivent maintenant être clarifiés. Les différents points d'interaction avec les couches supérieures sont énumérés ci-après :

- 1) Le contrôle de puissance sur la liaison montante peut se traduire principalement par l'apparition d'interférences entre différentes stations situées à proximité, ce qui affecte les bilans de liaison à cause du terme C/I modifié.
- 2) L'exploitation de la prédiction des affaiblissements sur différentes échelles de temps (temps réel, court terme, moyen terme et long terme) permet un degré de contrôle supplémentaire dans les mécanismes de gestion de ressources ainsi qu'une analyse plus fine des performances réseau menée en corrélation avec l'évolution du canal. Le taux de commutation des modes FMT est relativement élevé à cause des variations rapides (de l'ordre de la seconde) du signal dues au phénomène de scintillation d'amplitude. Cette échelle de temps qui est celle de la prédiction en temps réel n'est pas compatible avec le processus du contrôle d'admission des connexions. La prédiction en temps réel ne peut pas être utilisée dans l'élaboration d'un CAC prédictif, tout du moins de façon brute. En revanche, l'échéance court terme des prédictions (de l'ordre de la minute) est compatible des durées des connexions. Il convient ainsi d'exploiter ces informations (par un filtrage approprié ou tout autre traitement mathématique) en vue d'un calcul de la capacité disponible à la fois pour la station expérimentant des atténuations sur sa liaison, et pour les autres stations du réseau. Les prédictions, en particulier, des instants de franchissement des seuils de commutation FMT, et l'estimation des durées d'affaiblissement peuvent s'avérer utiles. En ce qui concerne le DAMA, c'est le processus des files d'attente qui est le plus exposé aux impacts de la variabilité court terme du canal. Cette problématique a été discutée par San-qi Li dans des études des impacts combinés du canal et du trafic sur les files d'attente, conduisant à des analyses spectrales et de lourds développements analytiques. Cette approche n'est pas traitée ici, car elle dépasse le cadre de la présente étude, mais elle est présentée en annexe, dans la section §4.
- 3) La modélisation des cellules de pluie introduit une information de variabilité spatiale des précipitations, qui peut permettre d'optimiser la gestion des ressources, à la fois en termes de choix de plan de fréquence (attribution des porteuses à un ensemble de stations d'un même faisceau) et d'allocation des créneaux, grâce à un contrôle plus centralisé et plus optimal des FMT au niveau des stations. Une autre application est l'utilisation d'une technique de diversité de site - non envisagée dans SAGAM.
- 4) La prise en compte de la couche physique dans la gestion des ressources telle qu'elle est présentée dans les points précédents induit une signalisation supplémentaire qui doit être véhiculée par l'intermédiaire d'une entité plus ou moins centralisée du gestionnaire de ressources, et dont l'influence sur la capacité globale du réseau sur le long terme doit être quantifiée.
- 5) Aux interactions précédentes, s'ajoute la contrainte fondamentale inhérente à l'orbite géostationnaire, qui consiste en un délai minimal incompressible d'environ 125 ms pour un seul aller Terre-satellite. Ce délai peut avoir des conséquences sur l'architecture des protocoles d'allocation des ressources ainsi que sur leur réactivité. En particulier, il risque de devenir un facteur limitant à forte charge pour un protocole MAC comportant une allocation de capacité à la demande (de type DAMA), car alors les délais dans les échanges relatifs à la signalisation système (par exemple les requêtes de capacité effectuées par les stations) peuvent ne plus être compatibles avec les contraintes du canal.
- 6) Si les débits de transmission des stations peuvent être rendus variables, des réductions de la capacité disponible dans le système peuvent survenir (certaines stations ayant basculé sur des porteuses à débit réduit du fait de très forts affaiblissements), ce qui affecte les mécanismes de gestion de ressources. Parmi les effets les plus significatifs, viennent en premier lieu une modification du débit de service des files d'attente avec un rallongement des délais dans l'ordonnancement des cellules, voire la possibilité de congestion ; et au niveau du CAC, les rejets d'appels a posteriori. Afin de limiter la dégradation de la QoS due à ces effets, l'architecture du gestionnaire de ressources doit être modifiée. Ces modifications comprennent entre autres un remaniement de la structure de la trame montante MF-TDMA (voir section §4.4.2) et l'élaboration d'un CAC à capacité variable (voir section §4.5). Par ailleurs, un débit de transmission variable a des conséquences sur l'architecture du démodulateur et du décodeur bord qui doivent être capables de se synchroniser à des rythmes variables. Les impacts induits spécifiquement par les mécanismes de codage adaptatif et de réduction de débit sur les fonctions de gestion des ressources sont décrits plus en détail dans le chapitre suivant.

3.4 PERFORMANCES DES TECHNIQUES DE CONTRE-MESURE

Les performances des configurations FMT envisagées peuvent être obtenues par trois méthodes différentes :

- ✓ Par le simulateur FMT de l'ONERA : les performances étudiées sont exclusivement orientées couche physique et sont inhérentes au mécanisme de contrôle de l'affaiblissement. Elles se traduisent par des paramètres tels que :
 - Le taux de commutation de mode ;
 - La durée totale de coupure de la liaison ;
 - La disponibilité selon la définition de l'IUT, etc..

Ces performances sont données sur la base d'événements de pluie sous la forme de séries chronologiques de E_b/N_0 qui sont injectées dans le simulateur. L'architecture du simulateur de la boucle de détection et de contrôle FMT développé par l'ONERA est présentée en annexe, dans la section §2.

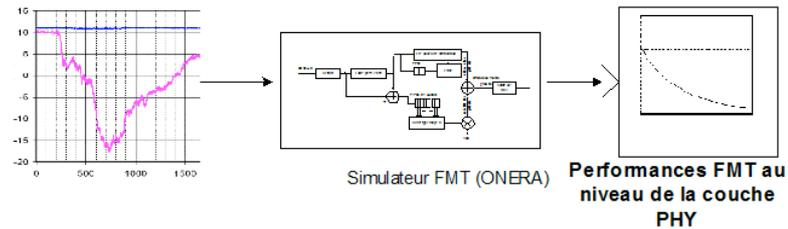


Figure 51 : Etude de performances à l'aide du simulateur FMT de l'ONERA

- ✓ Par la méthode dite prédictive à partir des distributions du canal, qui a été décrite dans la section §2.3.4 : cette méthode permet d'évaluer les performances long terme du système, soit en termes de paramètres QoS (distributions du TEB, du taux de perte de cellules, du taux d'erreur de paquets ; valeur CLR long terme, etc.), soit en termes de disponibilité ou de débit utile. Des variantes simplifiées de la méthode prédictive du §2.3.4 existent. Une de ces variantes est utilisée dans la section §3.4.1 pour estimer la disponibilité long terme de la liaison avec la configuration FMT n°3.

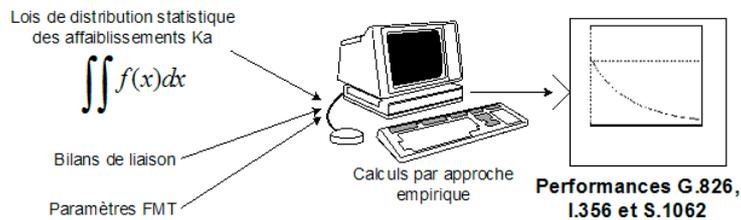


Figure 52 : Méthode prédictive à l'aide de distributions statistiques empiriques du canal

- ✓ Par la plate-forme de simulation réseau OPNET développée spécifiquement dans cette thèse, qui intègre les informations du canal et émule le comportement de la boucle de détection et de contrôle FMT. Cette plate-forme permet d'aboutir de nouveau aux performances relatives à l'opération de la boucle FMT, orientées couches physiques, comme avec le simulateur de l'ONERA, mais dans un environnement de simulation réseau. Elle permet en outre d'étudier l'effet de la pluie sur les performances réseau dans une configuration multi-station. Quelques résultats obtenus par ce simulateur sont présentés dans la section §5.3.

3.4.1 Prédiction de la disponibilité long terme de la liaison

Le groupe de travail WP-4B de l'IUT-R étudie actuellement les objectifs de disponibilité totale d'un système satellitaire régénératif à base d'ATM en bande Ka. Il a défini cette disponibilité totale A comme étant composée de trois facteurs :

$$A = A_{sat} \times A_{lien} \times A_{stations}$$

avec :

- A_{sat} : disponibilité liée au satellite, tenant compte de l'indisponibilité due aux éclipses ;
- A_{lien} : disponibilité sur les liaisons montante et descendante quand l'atténuation due à la pluie et les effets d'interférence sont pris en compte ;
- $A_{station}$: disponibilité liée à l'ensemble des équipements terrestres de transmission et réception, cette disponibilité comprenant l'interférence due au soleil, la part de disponibilité due aux équipements ATM ainsi que la part de disponibilité liée à la congestion de trafic et aux files d'attente au sol comme à bord.

Dans un système sans contre-mesure, la disponibilité de la liaison est limitée à une valeur déterminée par la marge statique introduite dans le bilan de liaison, marge qui a été calculée de manière à absorber une amplitude maximale d'affaiblissement pour assurer une certaine disponibilité fixée de la liaison. D'après la recommandation I.357 de l'IUT [190], l'indisponibilité de la liaison correspond à la somme totale des intervalles de temps de durée supérieure à dix secondes sur lesquels cette marge est dépassée ou sur lesquels, de façon équivalente, la valeur du TEB associé est dépassée (10^{-9} en l'occurrence dans SAGAM). Cette valeur de disponibilité peut être estimée au moyen par exemple de la recommandation P.618-7 de l'IUT-R [185] comme l'illustre la figure suivante :

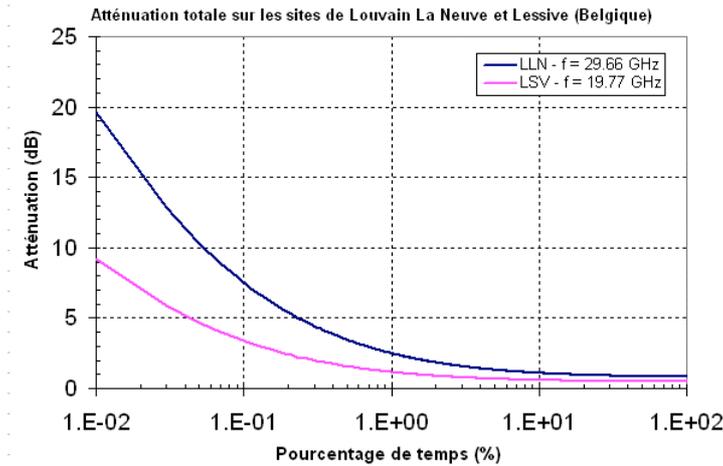


Figure 53 : Atténuation totale dépassée sur les sites de Louvain la Neuve et Lessive (Belgique) en fonction du pourcentage de temps d'une année moyenne (CDF complémentaire de l'atténuation totale)

Cette courbe montre que de fortes atténuations sévissent sur les liaisons durant de faibles portions du temps. Sans contre-mesure, le concepteur système est contraint de dimensionner les stations et les taux de codage par rapport aux conditions de propagation extrêmes. Cela entraîne un surdimensionnement des stations, qui ne sont utilisées à pleines ressources (en terme de lutte contre les affaiblissements) que pendant une portion du temps relativement faible. L'utilisation de techniques de contre-mesure permet justement d'éviter de dimensionner le système en permanence par rapport à ces cas extrêmes, tout en accroissant la disponibilité de la liaison. Les tableaux de la section §3.4.2 montrent bien que pour un événement de pluie forte d'une heure, un gain substantiel de disponibilité a été obtenu lorsque les configurations 1, 2 ou 3 sont employées par rapport au cas sans contre-mesure.

Une estimation de la disponibilité cette fois sur le long terme (par exemple sur une année moyenne) de la liaison ne peut pas être obtenue à l'aide du simulateur FMT de l'ONERA qui n'opère que sur la base d'événements de pluie. En effet, il faudrait dérouler un nombre phénoménal de séries chronologiques de durée limitée pour obtenir une quantité suffisante d'échantillons du rapport E_b/N_0 . Une méthodologie exploitant des distributions statistiques sur le long terme du canal est par conséquent une solution alternative simple et incontournable. Une telle méthodologie facile à mettre en œuvre a été proposée par Grémont et al. de l'université de Portsmouth dans un mécanisme de détection prédictive de l'affaiblissement du signal par marge de détection soit fixe (*Fixed Detection Margin* ou FDM), soit variable (*Variable Detection Margin* ou VDM) [57]. La méthodologie de Grémont et al, dans le cas FDM, emploie la distribution log-normale de l'atténuation due à la pluie pour calculer les "poids" des modes FMT, ce qui permet alors d'obtenir la disponibilité globale et le débit long terme. La méthodologie est appliquée aux configurations FMT n°2 et n°3 et aux bilans de liaison SAGAM en liaison montante, pour différents objectifs de TEB (de 10^{-2} à 10^{-13}) et donne lieu à la figure 54 ci-dessous. Les valeurs du TEB y sont indiquées à côté des points de fonctionnement (débit, disponibilité) par leurs exposants.

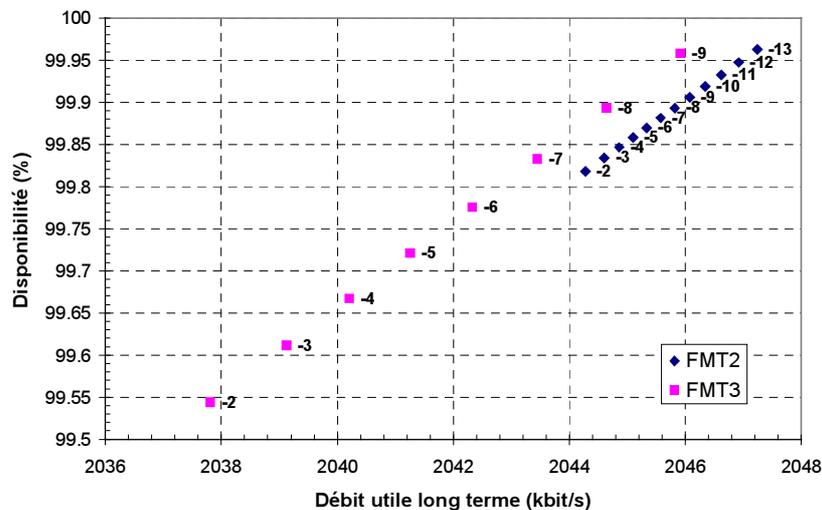


Figure 54 : Disponibilité TEB et débit utile long terme de la configuration FMT n°3

Il ressort de cette figure que :

- ✓ A mesure que l'objectif de TEB devient plus contraignant (c'est-à-dire que le TEB diminue), le débit utile moyen et la disponibilité long terme augmentent tous les deux, ce qui est conforme au bon sens, car pour garantir une liaison plus robuste, les ressources de contre-mesure doivent être déployées avec un degré d'utilisation plus élevé.
- ✓ La FMT2 surclasse la FMT3 au niveau des performances de débit utile long terme pour toutes les valeurs de TEB. Ceci s'explique par le fait qu'une réduction de débit de quart intervient dans la FMT3. L'écart des performances entre les deux configurations FMT tend néanmoins à diminuer lorsque le TEB diminue. Par exemple, pour un TEB de 10^{-2} , le débit utile long terme est de 2044.28 kbit/s pour la FMT2 et de 2037.81 kbit/s pour la FMT3, ce qui représente un écart de 6.5 kbit/s environ, tandis que pour un TEB de 10^{-9} , le débit utile long terme passe de 2046.07 kbit/s pour la FMT2 à 2045.92 kbit/s pour la FMT3 : l'écart n'est plus que de 0.15 kbit/s. Les tableaux 16 permettent d'en comprendre la cause. Pour les deux configurations FMT, les valeurs du débit utile moyen long terme dans chacun des modes restent identiques quel que soit l'objectif de TEB visé. Mais ce sont les poids de ces modes qui varient lorsque l'objectif de TEB varie. En particulier, pour la FMT3, le poids du mode 2 (taux de codage de 3/4 et débit de 2048 kbit/s) passe de 0.31% à 0.70% pour des TEB de 10^{-2} et 10^{-9} respectivement : le mode 2 où le codage est plus fort qu'en mode 1 (air clair et faibles atténuations) a un poids plus important lorsque le TEB est de 10^{-9} car le mode 2 devient plus sollicité, ce qui permet ainsi d'atteindre un meilleur débit utile global long terme, étant donné que le mode 2 est caractérisé par un débit utile moyen plus élevé que le mode 1 (2046.12 kbit/s contre 2031.08 kbit/s).
- ✓ En ce qui concerne la disponibilité long terme, la FMT2 atteint de meilleures performances que la FMT3 pour des TEB compris entre 10^{-2} et 10^{-8} , les valeurs de disponibilité étant pratiquement égales dans ces deux configurations FMT pour 10^{-8} (99.8934% et 99.8931% pour FMT2 et FMT3 respectivement). A partir de 10^{-9} , les disponibilités long terme atteintes par la FMT3 dépassent celles de la FMT2 : 99.958% contre 99.906% pour un TEB de 10^{-9} . Ces tendances peuvent interpréter de la façon suivante : lorsque les objectifs de TEB sont lâches, la contre-mesure se contente de demeurer dans son mode air clair, sans commuter vers ses modes dégradés. Or la FMT2 est capable de compenser jusqu'à 4.1 dB en mode air clair alors que la FMT3 ne parvient qu'à compenser 2.7 dB dans ce même mode (cf. : bilans de liaison donnés dans *Annexe, §1.1.2 et §1.1.3*), ce qui signifie que, tant que l'atténuation reste faible (fortes disponibilités), la FMT2 est plus efficace. En revanche, lorsque l'objectif de TEB se resserre dans le système (à partir de 10^{-9}), la contre-mesure doit faire appel à ses modes FMT dégradés lorsque surgissent des affaiblissements plus forts dans le canal. Or la FMT2 est limitée à 6 dB, tandis que la FMT est capable de compenser jusqu'à 10.3 dB.
- ✓ Pour des objectifs de TEB de 10^{-2} (donné à titre de comparaison) et 10^{-9} (valeur nominale), les résultats suivants sont obtenus :

FMT n°2 (deux modes) - TEB = 10^{-2}				
Mode FMT	Poids (%)	Débit utile moyen (kbit/s)	Débit utile global moyen (kbit/s)	Disponibilité globale moyenne (%)
1 (3/4 et 2048 kbit/s)	99.73	2042.38	2044.28	99.82
2 (1/2 et 2048 kbit/s)	0.09	2046.08		

FMT n°3 (trois modes) - TEB = 10^{-2}				
Mode FMT	Poids (%)	Débit utile moyen (kbit/s)	Débit utile global moyen (kbit/s)	Disponibilité globale moyenne (%)
1 (7/8 et 2048 kbit/s)	99.17	2031.08	2037.81	99.544
2 (3/4 et 2048 kbit/s)	0.31	2046.12		
3 (1/2 et 512 kbit/s)	0.05	511.91		

FMT n°2 (deux modes) - TEB = 10^{-9}				
Mode FMT	Poids (%)	Débit utile moyen (kbit/s)	Débit utile global moyen (kbit/s)	Disponibilité globale moyenne (%)
1 (3/4 et 2048 kbit/s)	99.73	2042.38	2046.07	99.906
2 (1/2 et 2048 kbit/s)	0.18	2046.08		

FMT n°3 (trois modes) - TEB = 10^{-9}				
Mode FMT	Poids (%)	Débit utile moyen (kbit/s)	Débit utile global moyen (kbit/s)	Disponibilité globale moyenne (%)
1 (7/8 et 2048 kbit/s)	99.17	2031.08	2045.92	99.958
2 (3/4 et 2048 kbit/s)	0.70	2046.12		
3 (1/2 et 512 kbit/s)	0.08	511.91		

Tableaux 16 : Performances long terme prédites des configurations FMT n°2 et n°3 pour des TEB de 10^{-2} et 10^{-9}

Pour la configuration FMT n°3 et un TEB à 10^{-9} , la disponibilité obtenue (99.958%) est relativement proche de la disponibilité calculée au moyen de la recommandation P.618-7 [185] de l'IUT (99.949%) dans la section §1.2. Par ailleurs, il peut être constaté que le débit utile global long terme reste proche du débit nominal de 2048 kbit/s malgré l'emploi d'une réduction de débit. Ceci provient du fait que, sur une année moyenne, la probabilité de séjour de la FMT en mode 3 (débit réduit) est faible (0.08 %) par rapport aux probabilités afférant aux autres modes (99.17% et 0.70% respectivement pour les modes 1 et 2) qui sont au débit nominal, ce qui est conforme aux prévisions, car les très fortes atténuations nécessitant le mode 3 sont très rares.

3.4.2 Performances FMT liées à la couche physique

Les performances d'une technique FMT au niveau de la couche physique se traduisent par des paramètres tels que :

- le taux de commutation de mode ;
- la durée totale de coupure de la liaison ;
- la disponibilité selon la définition de l'IUT, etc..

Ces performances sont déterminées sur la base de l'événement de pluie fort dont le profil a été présenté dans la section §2.2.2.1. Elles ont été obtenues non par méthode de conversion prédictive du TEB en paramètres QoS (présentée en §2.3.4) comme pour l'estimation de la disponibilité long terme du système, mais par l'intermédiaire du simulateur FMT développé par l'ONERA.

3.4.2.1 Configurations FMT

Paramètres	Sans FMT	FMT1C ($r = 7/8$)	FMT1B ($r = 3/4$)	FMT1A ($r = 1/2$)
Nombre de coupures de durée $T > 10$ s	1	1	1	1
Nombre de coupures de durée $T < 10$ s	10	8	5	15
Durée de coupure de durée $T > 10$ s	2496 s	1012 s	1009 s	767 s
Durée de coupure de durée $T < 10$ s	20 s	10 s	8 s	26 s
Fraction de temps représentée par les coupures de durée $T > 10$ s	69.333 %	28.111 %	28.028 %	21.306 %
Fraction de temps représentée par les coupures de durée $T < 10$ s	0.556 %	0.278 %	0.222 %	0.722 %
Nombre total de coupures	11	9	6	16
Durée totale de coupure	2516 s	1022 s	1017 s	793 s
Fraction totale de temps représentée par les coupures	69.889 %	28.389 %	28.250 %	22.028 %
Nombre total de périodes de disponibilité	4	7	6	10
Durée totale des périodes de disponibilité	1086 s	2582 s	2590 s	2832 s
Disponibilité IUT-T	30.167 %	71.722 %	71.944 %	78.667 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité ⁽¹⁾	1	1	1	1
Durée totale d'indisponibilité ⁽¹⁾	2513 s	1017 s	1009 s	767 s
Indisponibilité IUT-T ⁽¹⁾	69.806 %	28.25 %	28.0278 %	21.3056 %
Nombre de périodes de retour	2	2	2	2
Durée totale des périodes de retour	1104 s	2588 s	2591 s	2833 s
Fraction de temps représentée par les périodes de retour	30.667 %	71.889 %	71.972 %	78.694 %
Durée moyenne des périodes de coupure	3.812 mn	1.893 mn	1.147 mn	1.147 mn
Durée moyenne des périodes de disponibilité	0.074 h	0.102 h	0.119 h	0.077 h
Durée moyenne des périodes d'indisponibilité ⁽¹⁾	41.600 mn	16.867 mn	16.817 mn	12.783 mn
Durée moyenne des périodes de retour	0.153 h	0.359 h	0.360 h	0.393 h

Tableau 17 : Performances événementielles des configurations FMT n°1A, 1B et 1C

⁽¹⁾ Une période d'indisponibilité est définie par la recommandation IUT-T I.357 comme une succession d'au moins 10 secondes sévèrement erronées.

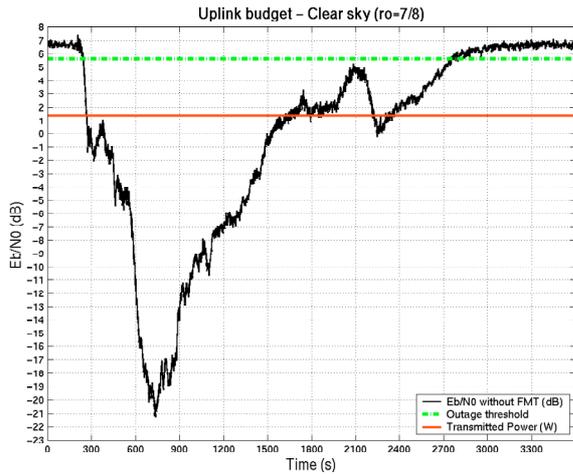


Figure 55 : Evénement de pluie forte avant correction FMT, configuration FMT1C

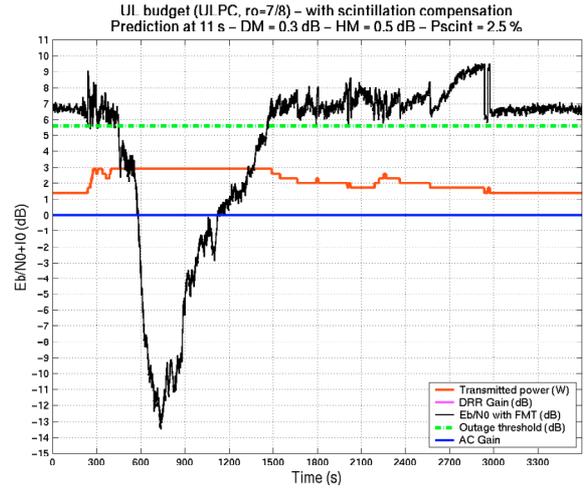


Figure 56 : Evénement de pluie forte après correction FMT, configuration FMT1C

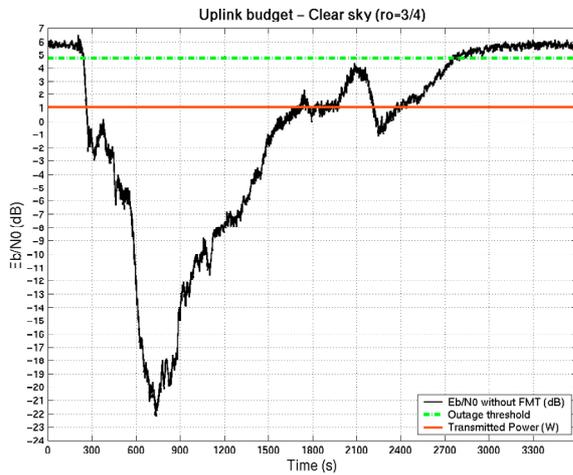


Figure 57 : Evénement de pluie forte avant correction FMT, configuration FMT1B

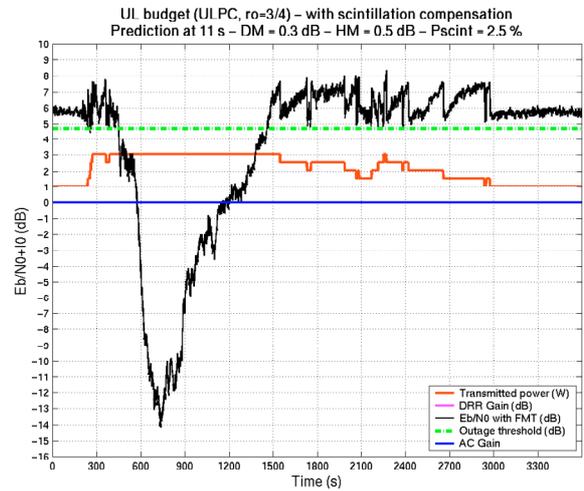


Figure 58 : Evénement de pluie forte après correction FMT, configuration FMT1B



Figure 59 : Evénement de pluie forte avant correction FMT, configuration FMT1A

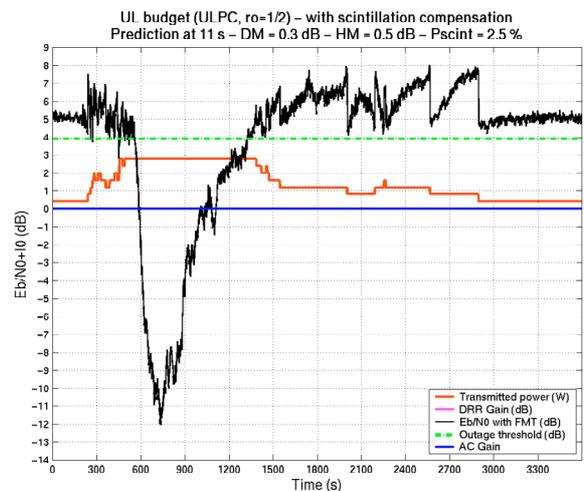


Figure 60 : Evénement de pluie forte après correction FMT, configuration FMT1A

3.4.2.2 Configuration FMT 2

Les figures 61 et 62 ci-dessous montrent l'événement de pluie forte respectivement avant et après correction FMT.

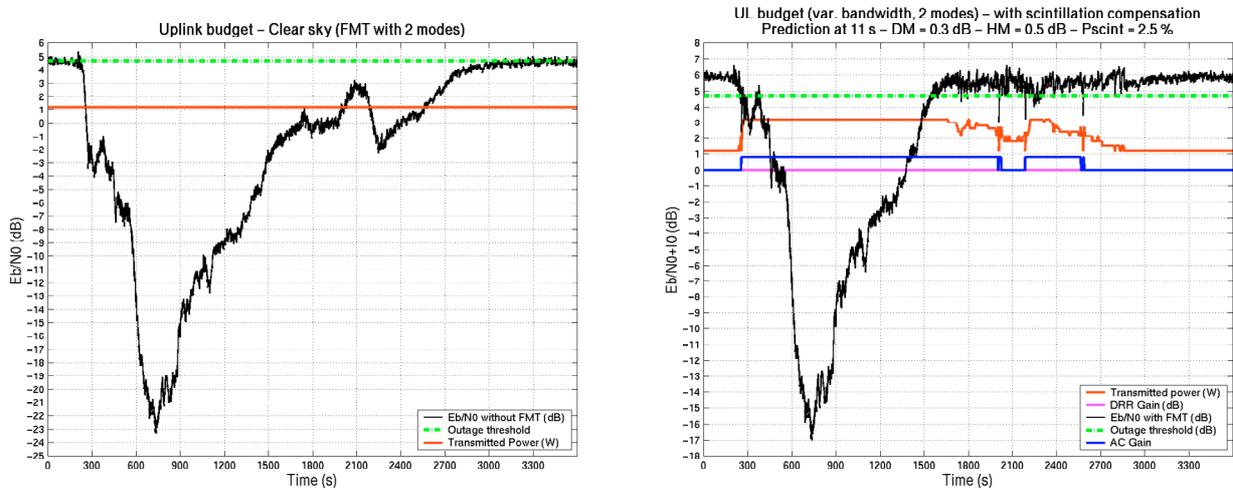


Figure 61 : Evénement de pluie forte avant correction FMT, configuration FMT2, Figure 62 : Evénement de pluie forte après correction FMT, configuration FMT2

Les performances du mécanisme FMT2 sont rassemblées dans le tableau suivant :

Paramètres	Sans FMT	FMT2
Nombre de coupures de durée T>10 s	22	3
Nombre de coupures de durée T<10 s	70	40
Durée de coupure de durée T>10 s	3186 s	1246 s
Durée de coupure de durée T<10 s	220 s	102 s
Fraction de temps représentée par les coupures de durée T>10 s	88.500 %	34.611 %
Fraction de temps représentée par les coupures de durée T<10 s	6.111 %	2.833 %
Nombre total de coupures	92	43
Durée totale de coupure	3406 s	1348 s
Fraction totale de temps représentée par les coupures	94.611 %	37.444 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité	0	13
Durée totale des périodes de disponibilité	0 s	2294 s
Disponibilité IUT-T	0.0 %	63.722 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité	22	3
Durée totale d'indisponibilité	3600 s	1305 s
Indisponibilité IUT-T	100 %	36.25 %
Nombre de périodes de retour	22	4
Durée totale des périodes de retour	409 s	2354 s
Fraction de temps représentée par les périodes de retour	11.36 %	65.389 %
Durée moyenne des périodes de coupure	0.624 mn	0.522 mn
Durée moyenne des périodes de disponibilité	0.0 h	0.047 h
Durée moyenne des périodes d'indisponibilité	2.414 mn	6.922 mn
Durée moyenne des périodes de retour	0.005 h	0.163 h

Tableau 18 : Performances événementielles de la configuration FMT n°2

3.4.2.3 Configuration FMT3

Les figures 63 et 64 ci-dessous montrent l'événement de pluie forte respectivement avant et après correction FMT.

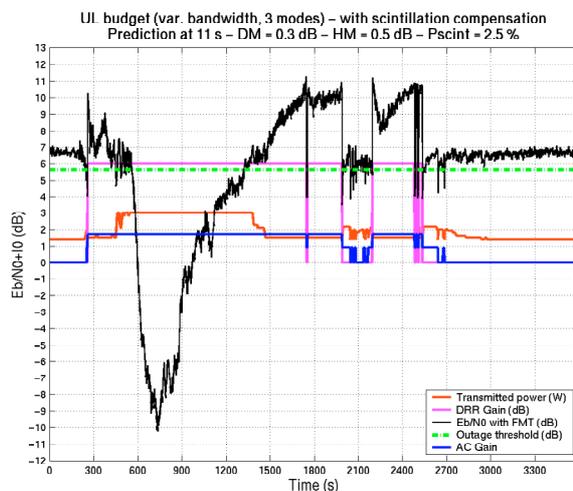
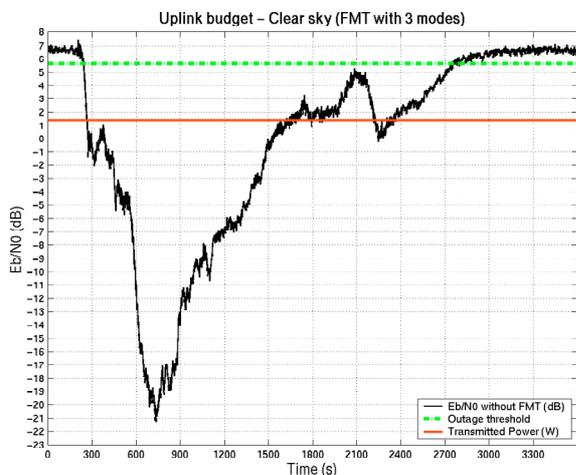


Figure 63 : Evénement de pluie forte avant correction FMT, configuration FMT3, Figure 64 : Evénement de pluie forte après correction FMT, configuration FMT3

Les performances du mécanisme FMT3 sont rassemblées dans le tableau suivant :

Paramètres	Sans FMT	FMT3
Nombre de coupures de durée T>10 s	1	3
Nombre de coupures de durée T<10 s	10	41
Durée de coupure de durée T>10 s	2496 s	781 s
Durée de coupure de durée T<10 s	20 s	126 s
Fraction de temps représentée par les coupures de durée T>10 s	69.333 %	21.694 %
Fraction de temps représentée par les coupures de durée T<10 s	0.556 %	3.5 %
Nombre total de coupures	11	44
Durée totale de coupure	2516 s	907 s
Fraction totale de temps représentée par les coupures	69.889 %	25.194 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité	4	20
Durée totale des périodes de disponibilité	1086 s	2809 s
Disponibilité IUT-T	30.167 %	78.02778 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité	1	3
Durée totale d'indisponibilité	2513 s	790 s
Indisponibilité IUT-T	69.806 %	21.944 %
Nombre de périodes de retour	2	4
Durée totale des périodes de retour	1104 s	2819 s
Fraction de temps représentée par les périodes de retour	30.667 %	73.306 %
Durée moyenne des périodes de coupure	0.624 mn	0.344 mn
Durée moyenne des périodes de disponibilité	0.074 h	0.036 h
Durée moyenne des périodes d'indisponibilité	41.600 mn	4.339 mn
Durée moyenne des périodes de retour	0.153 h	0.196 h

Tableau 19 : Performances événementielles de la configuration FMT n°3

3.4.2.4 Résultats comparés des cinq configurations FMT⁽¹⁾

Paramètres	FMT1C <i>r = 7/8</i>	FMT1B <i>r = 3/4</i>	FMT1A <i>r = 1/2</i>	FMT2	FMT3
Nombre de coupures de durée T>10 s	1	1	1	3	3
Nombre de coupures de durée T<10 s	8	5	15	40	41
Durée de coupure de durée T>10 s	1012 s	1009 s	767 s	1246 s	781 s
Durée de coupure de durée T<10 s	10 s	8 s	26 s	102 s	126 s
Fraction de temps représentée par les coupures de durée T>10 s	28.111 %	28.028 %	21.306 %	34.611 %	21.694 %
Fraction de temps représentée par les coupures de durée T<10 s	0.278 %	0.222 %	0.722 %	2.833 %	3.5 %
Nombre total de coupures	9	6	16	43	44
Durée totale de coupure	1022 s	1017 s	793 s	1348 s	907 s
Fraction totale de temps représentée par les coupures	28.389 %	28.250 %	22.028 %	37.444 %	25.194 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité	7	6	10	13	20
Durée totale des périodes de disponibilité	2582 s	2590 s	2832 s	2294 s	2809 s
Disponibilité IUT-T	71.722 %	71.944 %	78.667 %	63.722 %	78.028 %
Nombre total de périodes d'indisponibilité	1	1	1	3	3
Durée totale d'indisponibilité	1017 s	1009 s	767 s	1305 s	790 s
Indisponibilité IUT-T	28.250 %	28.0278 %	21.3056 %	36.25 %	21.944 %
Nombre de périodes de retour	2	2	2	4	4
Durée totale des périodes de retour	2588 s	2591 s	2833 s	2354 s	2819 s
Fraction de temps représentée par les périodes de retour	71.889 %	71.972 %	78.694 %	65.389 %	73.306 %
Durée moyenne des périodes de coupure	1.893 mn	1.147 mn	1.147 mn	0.522 mn	0.344 mn
Durée moyenne des périodes de disponibilité	0.102 h	0.119 h	0.077 h	0.047 h	0.036 h
Durée moyenne des périodes d'indisponibilité	16.867 mn	16.817 mn	12.783 mn	6.922 mn	4.339 mn
Durée moyenne des périodes de retour	0.359 h	0.360 h	0.393 h	0.163 h	0.196 h
Puissance de sortie maximale pour le contrôle de puissance ULPC (%)	71.128	72.903	46.548	73.846	64.398
Débit si codage adaptatif et réduction de débit activés (%)	100	100	100	100	57.479
Nombre de commutations pour le contrôle de puissance (durant la période valide de 3600 s)	28	24	28	98	183
Nombre de commutations pour le codage adaptatif (durant la période valide de 3600 s)	0	0	0	8	22
Nombre de commutations pour la réduction de débit (durant la période valide de 3600 s)	0	0	0	0	10
Nombre total de commutations (durant la période valide de 3600 s)	28	24	28	106	215
Taux de commutation par heure pour le contrôle de puissance (durant la période valide de 3600 s)	28	24	28	98	183
Taux de commutation par heure pour le codage adaptatif (durant la période valide de 3600 s)	0	0	0	8	22
Taux de commutation par heure de la réduction de débit (durant la période valide de 3600 s)	0	0	0	0	10
Taux de commutation total par heure (durant la période valide de 3600 s)	28	24	28	106	215
Comparaison entre l'atténuation prédite et l'atténuation réelle en liaison montante :					
<i>Moyenne quadratique</i>	0.08947437	0.08947437	0.08947437	0.08947437	0.08947437
<i>Moyenne</i>	0.06384341	0.06384341	0.06384341	0.06384341	0.06384341
<i>Ecart type</i>	0.06268717	0.06268717	0.06268717	0.06268717	0.06268717

Tableau 20 : Performances événementielles comparées des trois configurations FMT SAGAM

⁽¹⁾ Il convient de noter que la comparaison entre ces différentes configurations FMT ne part pas nécessairement des mêmes conditions en air clair.

Au vu de ces différents tableaux, les observations suivantes peuvent être émises :

- ✓ La FMT n°3 est en général plus performante que l'ULPC seule sur de longues périodes :
 - La disponibilité IUT est de 78.028% au lieu de 71.722% pour FMT1C.
 - La durée totale des coupures de durée supérieure à 10 s passe de 1012 s pour FMT1C à 1246 s pour FMT2 et jusqu'à 781 s pour FMT3, tandis que la durée totale des coupures de durée inférieure à 10 s passe de 10 s à 102 s et 126 s respectivement pour FMT2 et FMT3.
 - La fraction de temps représentée par la durée totale des coupures est de 21.694% pour FMT3 au lieu de 28.111% pour FMT1C.
 - La FMT3 apporte un gain substantiel dans l'utilisation des ressources de puissance (la puissance est à son niveau maximal 64.398% du temps contre 71.128% du temps pour FMT1C), du fait qu'elle gère de façon plus réactive le contrôle de puissance (183 commutations de puissance pour FMT3 contre 28 pour FMT1C).
- ✓ Les méthodes FMT évoluées (FMT2 et FMT3) favorisent l'instabilité très localisée du signal du fait de l'augmentation du nombre de commutations rapides dues au codage adaptatif et à la réduction de débit : 32 commutations par heure pour la FMT3 et 8 pour la FMT2, ce qui augmente par conséquent le nombre et la durée de coupures de courte durée, sans nécessairement augmenter la durée totale des coupures :
 - 3 coupures de durée supérieure à 10 s, et environ 40 pour FMT2 et FMT3 au lieu respectivement d'une et 8 coupures pour ULPC seule ;
 - La durée totale des coupures de durée inférieure à 10 s passe de 10 s à 102 s et 126 s respectivement pour FMT2 et FMT3.

Ce réajustement plus fréquent du signal par rapport au cas ULPC seule, par la commutation de mode, augmente aussi également la probabilité d'observer des commutations erratiques dues en particulier au comportement en hystérésis de la boucle de contrôle FMT. Plus la FMT possède de modes de commutation, plus fréquemment ce type de comportement est observé. Ainsi, paradoxalement, l'utilisation de techniques FMT à nombre d'états élevé peut être néfaste sur le temps réel et de façon localisée tandis que sur le moyen terme de l'ordre de la durée d'un événement de pluie, elle améliore les performances globales de disponibilité de la liaison.

- ✓ Les performances de la FMT2 sont médiocres par rapport à la FMT3 et n'apportent en général pas de réelle amélioration significative par rapport au cas ULPC seule. A titre d'exemple :
 - La durée totale des coupures est de 1348 s (soit 37.444% du temps sur la durée de l'événement de pluie), ce qui est plus élevé que les 1022 s (soit 28.389% du temps) pour la FMT1 et les 907 s pour la FMT3.
 - La disponibilité selon l'IUT-T I.357 de la liaison est de 63.722% au lieu de 78.028 pour FMT3 et 71.722% pour la FMT1C.
 - La puissance de sortie du signal est à son niveau maximal 73.846% du temps pour la FMT2, ce qui est proche des 71.128% pour FMT1C, contre seulement 64.398% pour FMT3.

Ceci peut sans doute être interprété par le fait qu'une commutation à deux modes seulement soit trop catégorique et pas assez souple pour suivre l'évolution de l'affaiblissement. Mais un autre facteur limitant ici est fixé par l'utilisation d'un événement de pluie forte dont le pic d'atténuation dépasse de loin la capacité de compensation de la FMT2. La pertinence de cet argument ne peut se vérifier qu'en déroulant des simulations avec un événement de pluie légère ou moyenne.

3.4.3 Performances en termes de qualité de service

Cette section présente quelques résultats de performance de QoS sur le long terme obtenus dans plusieurs configurations FMT déployées en liaison montante, en utilisant la méthodologie de conversion du TEB en paramètres QoS décrite en §2.3.4, ainsi que les bilans de liaison du projet SAGAM présentés dans l'annexe, dans la section §1.1. Le détail de la procédure complète est présenté dans l'annexe, dans les sections §3.2 à §3.4. La dégradation du bilan de liaison sur la liaison montante est définie par la formule :

$$\Delta_{ul} = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{0,ul,dB} - \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{ul,dB} = \gamma_{0,ul,dB} - \gamma_{ul,dB}$$

Équation 31 : Formule de la dégradation totale du canal en liaison montante pour les configurations FMT n°1 et 2

Cette formule n'est cependant valide que dans la mesure où le débit utile reste constant sur la liaison montante. Ceci n'est vrai que pour les configurations FMT n°1 n°2. Quant à la configuration n°3, il faut rajouter dans l'équation le gain introduit par la réduction de débit survenant en mode 3 :

$$\Delta_{ul\ FMT3} = \begin{cases} \gamma_{ul,0,dB} - \gamma_{ul,dB} & \text{en modes 1 et 2} \\ \gamma_{ul,0,dB} - \gamma_{ul,dB} + C_\gamma & \text{en mode 3} \end{cases}$$

Équation 32 : Formule de la dégradation totale du canal en liaison montante pour la configuration FMT n°3

avec $C_\gamma = 10 \log \left(\frac{2048}{512} \right) \approx 6 \text{ dB}$.

3.4.3.1 Distribution statistique du TEB

La distribution du TEB s'obtient à l'aide de la distribution du rapport signal sur bruit γ_{dB} exprimé en dB, grâce à la propriété 1 énoncée en §2.3.4. L'expression de cette dernière distribution dépend de la configuration FMT déployée, et plus précisément de ce qu'elle a une incidence ou non sur la capacité du système. Ainsi, plusieurs cas distincts sont examinés, et les notations suivantes sont adoptées :

- $T_{ul,\rho}(\gamma_{dB})$ dénote le TEB en fonction de γ_{dB} pour la liaison montante dans un système à base de codage convolutionnel de rendement ρ .
- $P_{TEB_{ul}}(\varepsilon_b) = P[TEB_{ul} < \varepsilon_b]$ est la fonction de distribution du TEB en liaison montante.

3.4.3.1.1 Cas sans FMT et cas FMT n°1

Le cas sans FMT et le cas de la configuration FMT SAGAM n°1 sont identiques au sens où ils n'ont pas d'incidence sur la capacité du système.

La fonction de distribution du rapport signal sur bruit s'exprime alors de la façon suivante :

$$P_{\gamma_{ul,dB}}(\gamma) = \int_{\gamma_{ul,0,dB}-\gamma}^{+\infty} \int_0^{+\infty} P_{A_r,ul}(u) p_\chi(v-u) du dv$$

Équation 33 : Fonction de distribution du rapport signal sur bruit $(E_b/N_0)_{dB}$

et la fonction de distribution du TEB, d'après la propriété 1, est donnée par : $P_{TEB_{ul}}(\varepsilon_b) = P_{\gamma_{ul,dB}}(T_{ul,\rho}^{-1}(\varepsilon_b))$, puisqu'un seul taux de codage est utilisé.

3.4.3.1.2 Configuration FMT n°3

Dans les modes $i = 1$ ou 2 , les expressions suivantes s'appliquent :

$$P_{\gamma_{ul,dB} | \text{mod } e_{i_{FMT3}}}(\gamma) = P_{\gamma_{ul,dB}}(\gamma) = \int_{\gamma_{ul,0,dB}-\gamma}^{+\infty} \int_0^{+\infty} P_{A_r,ul}(u) p_\chi(v-u) du dv$$

Équation 34 : Fonction de distribution du rapport signal sur bruit en configuration FMT n°3 pour les modes 1 et 2

Toutefois, dans le mode 3, l'expression devient :

$$P_{\gamma_{ul,dB} | \text{mod } e_{3_{FMT3}}}(\gamma) = \int_{\gamma_{ul,0,dB}+C_\gamma-\gamma}^{+\infty} \int_0^{+\infty} P_{A_r,ul}(u) p_\chi(v-u) du dv$$

Équation 35 : Fonction de distribution du rapport signal sur bruit en liaison montante en configuration FMT n°3 en mode 3

L'expression de la fonction de distribution du TEB en liaison montante lorsqu'une FMT est employée diffère légèrement de celle obtenue précédemment dans le cas de la liaison descendante sans FMT. En effet, elle devient conditionnelle aux probabilités pour le détecteur FMT de demeurer dans chacun de ses modes :

$$P_{TEB_{ul,FMT3}}(\varepsilon_b) = P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode } 1_{FMT3}] P[\text{mode } 1_{FMT3}] \\ + P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode } 2_{FMT3}] P[\text{mode } 2_{FMT3}] \\ + P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode } 3_{FMT3}] P[\text{mode } 3_{FMT3}]$$

où les fonctions de distribution conditionnelles sont :

$$P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode } i_{FMT3}] = \begin{cases} P_{\gamma_{ul,dB}}(T_{ul,7/8}^{-1}(\varepsilon_b)) & \text{pour } i = 1 \\ P_{\gamma_{ul,dB}}(T_{ul,3/4}^{-1}(\varepsilon_b)) & \text{pour } i = 2 \\ P_{\gamma_{ul,dB} | \text{mod } e_{3_{FMT3}}}(T_{ul,1/2}^{-1}(\varepsilon_b)) & \text{pour } i = 3 \end{cases}$$

Équation 36 : Fonctions de distribution conditionnelles du TEB en liaison montante dans la configuration FMT n°3 dans les modes 1 (36(a)), 2 (36(b)) et 3 (36(c))

Les probabilités $P[\text{mode } i_{\text{FMT}3}]$ que le prédicteur FMT soit dans les modes $i, i \in \{1,2,3\}$ s'obtiennent grâce à une connaissance du mécanisme de prédiction FMT utilisé.

En supposant que la boucle de contrôle FMT utilise le même mécanisme que celui du simulateur FMT de l'ONERA [41,85,100], il vient :

$$\begin{aligned} P[\text{mode } 1_{\text{FMT}2}] &= P[\hat{A} \leq M_{1,2_{\text{FMT}3}} - d] \\ P[\text{mode } 2_{\text{FMT}2}] &= P[M_{1,2_{\text{FMT}3}} - d \leq \hat{A} \leq M_{2,2_{\text{FMT}3}} - d] \\ P[\text{mode } 3_{\text{FMT}2}] &= P[M_{2,2_{\text{FMT}3}} - d \leq \hat{A} \leq M_{3,2_{\text{FMT}3}}] \end{aligned}$$

Équation 37 : Probabilités d'état du dispositif FMT n°3

où \hat{A} est l'affaiblissement prédit, $M_{1,2_{\text{FMT}3}} = 2.7$ dB, $M_{2,2_{\text{FMT}3}} = 6$ dB et $M_{3,2_{\text{FMT}3}} = 10.3$ dB sont les seuils d'atténuation dans la configuration FMT n°3 (cf. : bilan de liaison dans *Annexe*, §1.1.3) et $d = 0.3$ dB la marge de détection. Ces probabilités peuvent être calculées en utilisant le modèle particulier d'affaiblissement global défini dans la section §2.1.3.

3.4.3.1.3 Configuration FMT n°2

Pour la configuration FMT n°2, seuls deux taux de codage sont utilisés, et par conséquent la fonction de distribution du TEB devient :

$$P_{\text{TEB}_{ul,\text{FMT}2}}(\varepsilon_b) = P[\text{TEB} < \varepsilon_b | \text{mode } 1_{\text{FMT}2}] \times P[\text{mode } 1_{\text{FMT}2}] + P[\text{TEB} < \varepsilon_b | \text{mode } 2_{\text{FMT}2}] \times P[\text{mode } 2_{\text{FMT}2}]$$

avec :

$$P[\text{TEB} < \varepsilon_b | \text{mode } i_{\text{FMT}2}] = \begin{cases} P_{\gamma_{ul,\text{dB}}} \left(T_{ul,3/4}^{-1}(\varepsilon_b) \right) & \text{pour } i = 1 \\ P_{\gamma_{ul,\text{dB}}} \left(T_{ul,1/2}^{-1}(\varepsilon_b) \right) & \text{pour } i = 2 \end{cases}$$

Équation 38 : Fonction de distribution du TEB en liaison montante en configuration FMT n°2

et:

$$\begin{cases} P[\text{mode } 1_{\text{FMT}2}] = P[\hat{A} \leq M_{1,1_{\text{FMT}2}} - d] \\ P[\text{mode } 2_{\text{FMT}2}] = P[M_{1,1_{\text{FMT}2}} - d \leq \hat{A} \leq M_{2,1_{\text{FMT}2}}] \end{cases}$$

Équation 39 : Probabilités d'état pour la configuration FMT n°2

où $M_{1,1_{\text{FMT}2}} = 4.1$ dB et $M_{2,1_{\text{FMT}2}} = 6$ dB sont les seuils d'atténuation du prédicteur FMT dans la configuration FMT n°2 (cf. : bilan de liaison pour la configuration FMT n°2, dans *Annexe*, §1.1.2).

Les expressions sont similaires à celles qui apparaissent dans la configuration FMT n°3, et par conséquent ne sont pas développées. Les courbes des fonctions de distribution du TEB obtenues pour les trois configurations FMT de SAGAM en liaison montante avec la forme d'onde DVB-S à base d'un codage concaténé sont données sur la figure 65 ci-après :

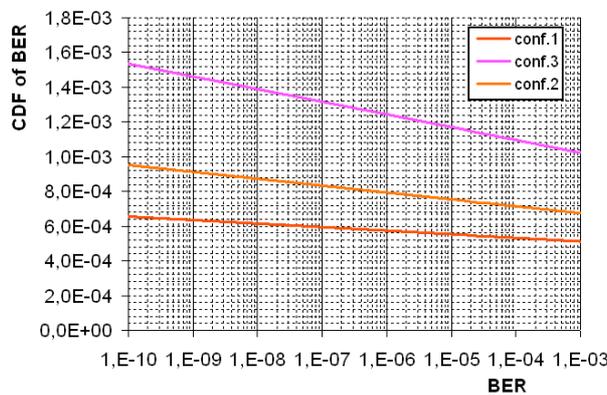


Figure 65 : Fonctions de distribution du TEB pour la liaison montante dans trois configurations FMT différentes

3.4.3.2 Distribution statistique du taux de perte de cellules CLR

Les courbes des fonctions de distribution du taux de perte de cellules dont les équations ont été données en §2.3.3.3.1 ont été obtenues pour les trois configurations FMT de SAGAM en liaison montante et sont données sur la figure 66 ci-dessous :

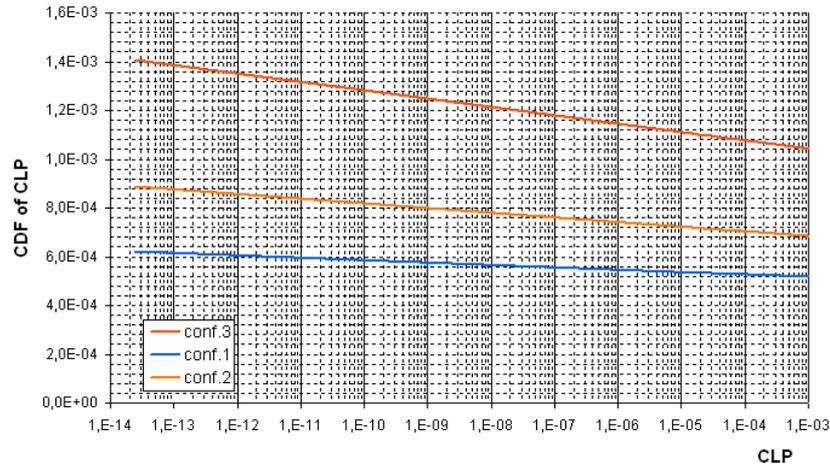


Figure 66 : Fonctions de distribution du CLR pour la liaison montante dans les trois configurations FMT SAGAM

3.4.3.3 Distributions statistiques du taux d'erreur de paquets

Les fonctions de distribution du taux d'erreur de paquets tel que défini en §2.3.4.4 en liaison montante respectivement pour la configuration FMT n°2 et pour la configuration FMT n°3 sont comparées pour différentes longueurs de paquet IP.

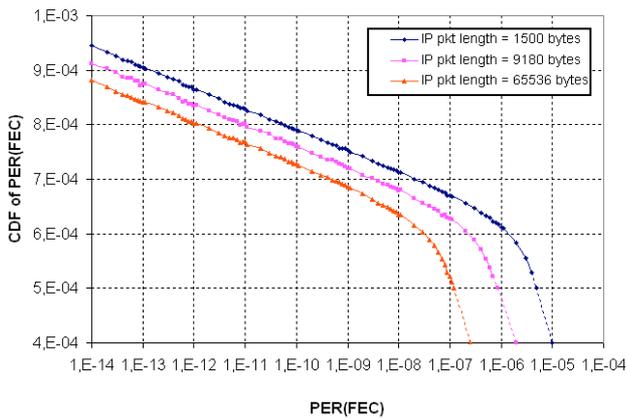


Figure 67 : Fonctions de distribution du taux d'erreur de paquets IP (due au code correcteur d'erreurs) en configuration FMT SAGAM n°2, pour différentes longueurs de paquets IP en liaison montante

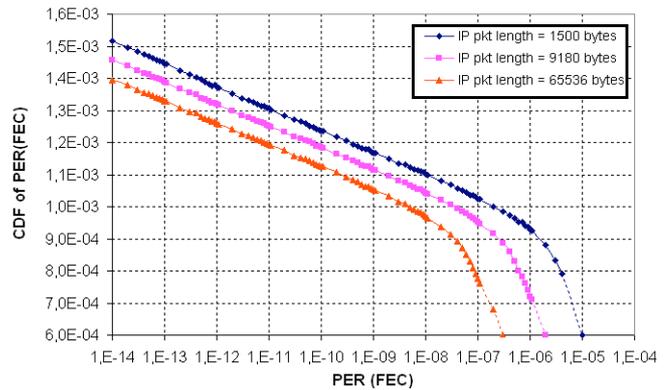


Figure 68 : Fonctions de distribution du taux d'erreur de paquets IP (due au code correcteur d'erreurs) en configuration FMT SAGAM n°3, pour différentes longueurs de paquets IP en liaison montante

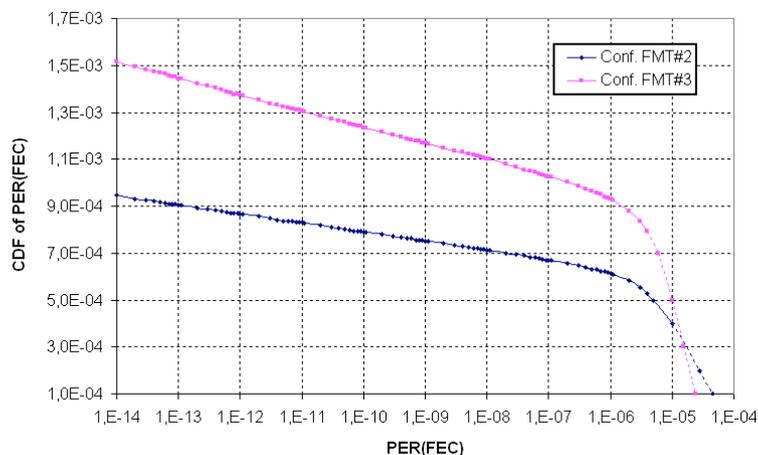


Figure 69 : Fonctions de distribution du taux d'erreur de paquets IP (due au code correcteur d'erreurs) en configurations FMT n°2 et 3, pour une longueur de paquets IP de 1500 octets en liaison montante

3.4.3.4 Apport apporté par la contre-mesure en temps réel

Une série chronologique d'atténuation survenant lors d'une pluie forte est déroulée et les valeurs correspondantes du TEB, du CLR instantané (noté aussi CLP signifiant *Cell Loss Probability*) et du PER sur la liaison montante sont calculées échantillon par échantillon d'après la procédure décrite en §2.3.3.3. Ces valeurs sont représentées en logarithme décimal ($-x$ représente 10^{-x}) - par souci de meilleure lisibilité des courbes - aussi bien dans le cas où aucune FMT n'est utilisée (courbes en bleu) que dans le cas où la configuration FMT n°3 est activée (courbes en rouge). Sur la figure montrant les TEB, le trait en vert indique le seuil de coupure du signal ($TEB > 10^{-9}$). Ces courbes font bien ressortir la diminution de la durée de coupure durant l'événement de pluie lorsque la contre-mesure est activée.

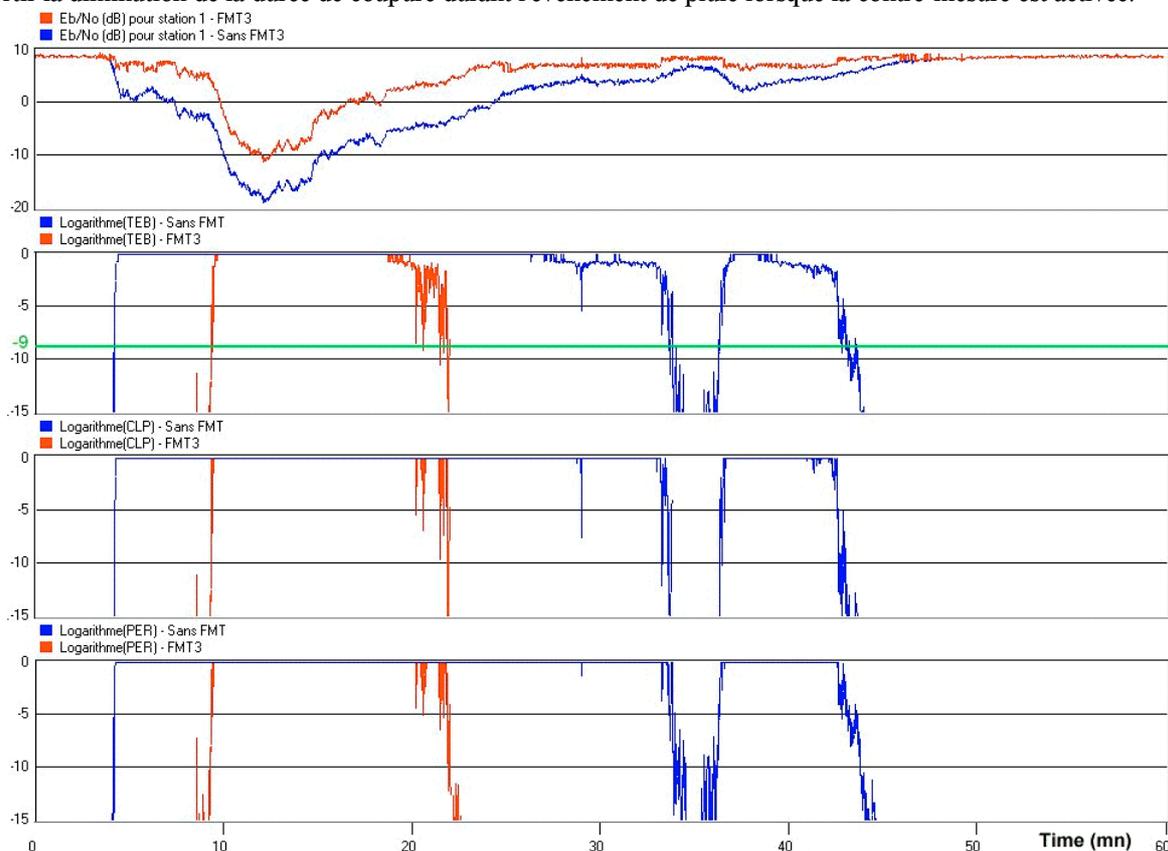


Figure 70 : Evolution du TEB, du CLR et du PER sans FMT et avec la configuration FMT n°3 en liaison montante

3.4.3.5 Apport sur le long terme de la contre-mesure

Le déploiement de techniques de contre-mesure dans un système satellitaire utilisant l'ATM soulève à ce stade une question cruciale : le système est-il rendu compatible des exigences de qualité de fonctionnement des recommandations de l'IUT précédemment mentionnées (ITU-T G.826, ITU-T I.356 et ITU-R S.1062-1) qui définissent des paramètres de performances normalisées ? Cette question est examinée dans la section §3.4.3 sous l'angle de la méthode de conversion prédictive du TEB en paramètres QoS introduite dans la section §2.3.4.

3.4.3.5.1 Mesures expérimentales dans le cas d'un système satellitaire sans contre-mesure

Les mesures de QoS obtenues par Ivancic et Bobinsky [124] à partir d'une expérimentation menée en laboratoire émulant une liaison satellitaire sont données ci-après à titre indicatif. Quatre paramètres QoS ont été mesurés : le TEB, le SECBR, le CLR et le CER, par boucle de retour dans un système de débit 45 Mbit/s (DS3 SONET) en fréquence intermédiaire. L'expérimentation a été conduite dans le but d'anticiper les performances d'applications MPEG-1 et MPEG-2 sur l'ATM par satellite.

L'équipement de test était configuré de la façon suivante :

- Le générateur de trafic ATM fonctionne uniquement dans le mode détection des erreurs d'en-tête ATM, c'est-à-dire que les erreurs simples dans l'en-tête des cellules ne sont pas corrigées. Les cellules ATM détectées comme étant erronées sont donc immédiatement rejetées. Le CLR mesuré ne correspond pas par conséquent à celui issu d'une opération nominale de la machine d'état de correction des erreurs d'en-tête des cellules ATM, et toute valeur obtenue est forcément surestimée.

- Le codage convolutionnel de taux de codage 3/4 a été utilisé, associé à une modulation QPSK : les erreurs sont ainsi générées en salve lorsque la capacité de correction du code est dépassée.
- La taille des blocs de cellules a été choisie égale à 100, et le seuil minimal d'erreur SECB a été fixé à 5 cellules erronées par bloc.

Le tableau suivant recense les valeurs des paramètres QoS obtenues :

TEB (générateur de trafic)	SECBR	CLR	CER
3.0829×10^{-3}	6.0113×10^{-2}	4.6903×10^{-3}	1.6476×10^{-2}
7.2861×10^{-4}	5.5323×10^{-3}	1.1125×10^{-3}	4.6065×10^{-3}
1.7183×10^{-4}	1.1221×10^{-3}	2.6895×10^{-4}	1.1216×10^{-3}
3.6528×10^{-5}	3.4092×10^{-4}	5.6695×10^{-5}	2.6771×10^{-4}
6.1549×10^{-6}	1.2348×10^{-5}	9.1380×10^{-6}	5.4582×10^{-5}
1.2213×10^{-6}	1.0000×10^{-99}	2.0047×10^{-6}	8.5537×10^{-6}
1.2432×10^{-7}	1.0000×10^{-99}	1.7328×10^{-7}	1.5514×10^{-6}
5.7464×10^{-8}	1.0000×10^{-99}	1.0850×10^{-7}	2.4413×10^{-7}
3.4513×10^{-9}	Erreur	6.6853×10^{-9}	2.3065×10^{-8}

Tableau 21 : Mesures en laboratoire de QoS ATM

Ces valeurs sont rassemblées sur la figure 71. Les points obtenus par l'émulation satellite sont représentés en rouge. En bleu sont représentés les points de CLR et CER théoriques obtenus à partir d'une conversion du TEB telle que présentée dans la recommandation S.1062. Le cas d'erreurs aléatoires (*random*) désigne l'utilisation du code concaténé normalisé du DVB-S en liaison montante. Le cas d'erreurs en salve (*burst*) désigne l'utilisation du code convolutionnel normalisé du DVB-S à taux de codage 3/4, avec une longueur moyenne de salve de 29 bits et un nombre moyen de bits erronés par salve de 11.5.

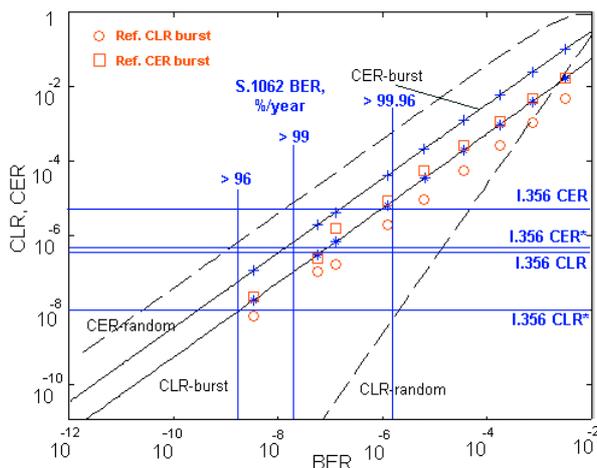


Figure 71 : Comparaison de performances QoS I.356

Les contraintes pour toutes les classes de service ATM telles que proposées dans la recommandation I.356 peuvent ne pas être satisfaites pour des services de transmission conçus uniquement dans le but de satisfaire à G.826.

Il faut remarquer que les méthodes de la recommandation S.1062 pour prédire les performances du système ont été développées pour des systèmes fonctionnant en dessous de la bande Ka. Il est donc nécessaire d'appliquer la méthode de la recommandation S.1062 à la bande Ka. La NASA étudie actuellement une extension ou une validation des méthodes de la recommandation S.1062 pour la bande Ka.

3.4.3.5.2 Analyse des liaisons montante et descendante par la méthodologie prédictive

a) Performances en liaison montante

La figure 72 représente la fonction de distribution (CDF) du TEB en liaison montante, la figure 73 la CDF du CLR (ou CLP) en liaison montante. La figure 74 constitue le tracé des CDF du PER pour des longueurs de paquets IP de 1500, 9180 et 65536 octets.

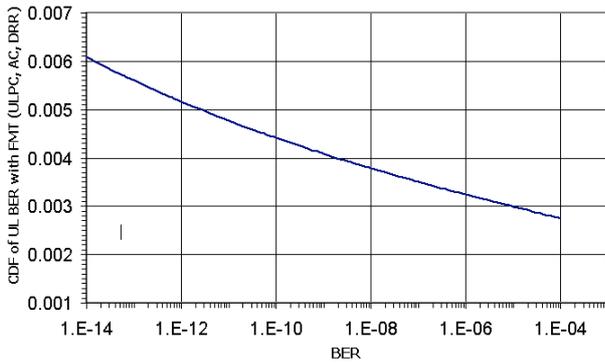


Figure 72 : Fonction de distribution du TEB en liaison montante en configuration FMT n°3

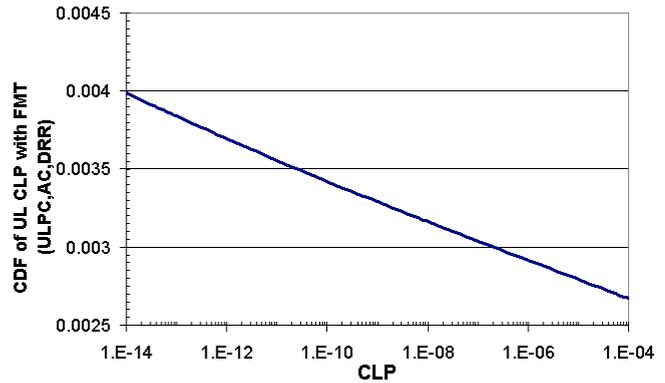


Figure 73 : Fonction de distribution du CLP en liaison montante en configuration FMT n°3

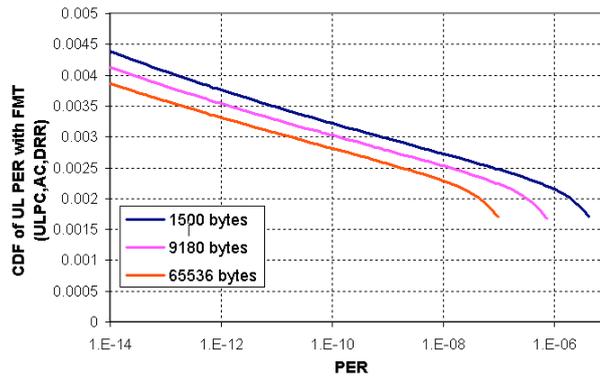


Figure 74 : Fonction de distribution du taux d'erreur de paquets en liaison montante pour différentes longueurs de paquets IP avec la configuration FMT n°3

Les configurations FMT sont comparées dans le tableau 22 en termes de performances de taux de perte de cellules long terme (\overline{CLR}) espérée en liaison montante. La formule donnant le CLR long terme est rappelée (cf. : Equation 29, section §2.3.4.3) ci-après :

$$\overline{CLR} = \frac{1}{1-T_{C_0}} \int_0^{C_0} P_{CLR}(C_p) dC_p$$

Configuration FMT en liaison montante	\overline{CLR}
1A (sans FMT, taux de codage 1/2)	2.74×10^{-7}
1B (sans FMT, taux de codage 3/4)	2.67×10^{-7}
1C (sans FMT, taux de codage 7/8)	2.48×10^{-7}
Conf. no.2 (FMT à 2 modes)	7.5×10^{-7}
Conf. no.3 (FMT à 3 modes)	2.6×10^{-7}

Tableau 22 : Performances de taux de perte de cellules long terme comparées des configurations FMT SAGAM

Il apparaît tout d'abord que, pour les configurations FMT 1 avec uniquement une gestion de la puissance, le meilleur résultat est obtenu pour le taux de codage 7/8 (configuration 1C), contrairement au bon sens ! Ensuite, les FMT évoluées n'apportent pas de changement suffisamment significatif sur les performances de qualité de service CLR long terme. L'effet de la configuration 2 semble même être néfaste, à première vue, sur les performances réseau, puisque le taux de perte de cellules ATM long terme est dégradé au passage de la configuration 1A (2.74×10^{-7}) à la configuration 2 (7.5×10^{-7}). La configuration 3 exhibe un \overline{CLR} plus bas égal à 2.6×10^{-7} et surclasse ainsi la configuration 2 à deux modes et très légèrement les configurations FMT élémentaires 1A et 1B, mais pas la configuration 1C à taux de codage 7/8.

En réalité, pour bien interpréter ces résultats, il convient de constater que ce qui importe semble être le rapport E_b/N_o en air clair et non pas le taux de codage lui-même (sauf à E_b/N_o égal). Vus sous cet angle, les résultats sont conformes : **plus élevé sera le rapport E_b/N_o en air clair, et plus faible sera le taux de perte de cellules long terme, indépendamment de la technique FMT utilisée.** C'est pourquoi la configuration FMT n°3, quoique la plus complexe

et la plus évoluée, s'apparente fortement aux configurations FMT n°1A et 1B, car les rapports E_b/N_o en air clair utilisés dans ces deux configurations sont très proches (9 dB pour la configuration n°3, et 9.2 dB pour la configuration 1A, et 8.7 dB pour la configuration FMT 1B, cf. : *Annexe, §1.1.1 et §1.1.3*).

Et ceci est d'autant plus vrai qu'il est nécessaire de remarquer que pour les FMT à modes multiples (2 et 3), c'est bien le premier mode (air clair) qui domine sur les autres modes et impose ainsi sa caractéristique sur le long terme en terme de CLR. Ceci est très logique vu que les modes FMT dégradés surviennent avec des probabilités de loin plus faibles. A titre d'exemple, en configuration FMT n°3 à 3 modes, les probabilités d'occurrence des différents modes sont :

	Mode 1 (ciel clair)	Mode 2	Mode 3
Poids (%)	89.916	9.86	0.182

Tableau 23 : Poids des modes de la configuration FMT n°3

Le rapport des probabilités entre le mode 1 et le mode 2 est d'environ 9 tandis qu'il est de 494 entre le mode 1 et le mode 3, ce qui montre que la probabilité d'occurrence du mode 3 est négligeable par rapport à celles du mode 2 et du mode 1, et que celle du mode 2 l'est également par rapport à celle du mode 1. C'est pourquoi la configuration 3 affiche une performance en CLR long terme similaire à celle de la configuration 1B, déployant uniquement une gestion de puissance en voie montante, et utilisant un taux de codage de 3/4.

L'interprétation finale à retenir de tous ces résultats est la suivante :

Ce sont les conditions en ciel clair qui prédominent, et celles-ci par conséquent déterminent les performances QoS long terme.

L'apport des FMT sur les performances QoS (CLR et PER) sur le long terme reste donc minime. Le véritable intérêt des FMT se trouve davantage au niveau de la couche physique (coupures réduites sur la liaison, utilisation moindre des ressources surtout de puissance). En revanche, le débit d'information utile long terme est amélioré avec des FMT sophistiquées, ce qui maximise aussi les revenus des opérateurs par une transmission plus efficace (voir section §3.4.3.5).

b) Performances en liaison descendante

Les performances en termes de CLR long terme sur la liaison descendante sont maintenant présentées.

Pour la liaison descendante, le terme T_{C_0} intervenant dans l'équation 29 de \overline{CLR} dépend non seulement du taux de codage, mais également du facteur β de dégradation du facteur de mérite. Le tableau suivant établit les valeurs de T_{C_0} obtenues pour les taux de codage 1/2, 3/4 et 7/8 pour différentes valeurs de β .

Taux de codage convolusionnel r	$T_{C_{0,r}} = P_{CLR_{DL,r}} (9.52 \times 10^{-5})$				
	$\beta = 0.0$	$\beta = 0.25$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.75$	$\beta = 1.0$
1/2	2.96×10^{-4}	4.02×10^{-4}	5.21×10^{-4}	6.54×10^{-4}	8.01×10^{-4}
3/4	6.61×10^{-4}	9.29×10^{-4}	1.24×10^{-3}	1.59×10^{-3}	1.98×10^{-3}
7/8	1.37×10^{-3}	1.96×10^{-3}	2.66×10^{-3}	3.44×10^{-3}	4.32×10^{-3}

Tableau 24 : Valeurs de $T_{C_{0,r}}$ en liaison descendante pour $r = 1/2, 3/4$ et $7/8$ et différentes valeurs de β

Les résultats obtenus pour \overline{CLR} sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Taux de codage convolusionnel r	\overline{CLR}				
	$\beta = 0.0$	$\beta = 0.25$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.75$	$\beta = 1.0$
1/2	2.8×10^{-8}	3.8×10^{-8}	5.0×10^{-8}	6.3×10^{-8}	7.7×10^{-8}
3/4	6.3×10^{-8}	8.9×10^{-8}	1.2×10^{-7}	1.5×10^{-7}	1.9×10^{-7}
7/8	1.3×10^{-7}	1.9×10^{-7}	2.6×10^{-7}	3.3×10^{-7}	4.2×10^{-7}

Tableau 25 : Valeurs de \overline{CLR} en liaison descendante pour $r = 1/2, 3/4$ et $7/8$ et différentes valeurs de β

La figure 75 représente l'évolution du taux de perte de cellules long terme en liaison descendante en fonction du facteur de dégradation β pour un système de codage DVB-S (erreurs aléatoires) avec les taux de codage $1/2$, $3/4$ et $7/8$ sans FMT, d'après les valeurs du tableau 25. Il peut être constaté que plus le codage est fort, plus la performance en termes de perte de cellules est améliorée.

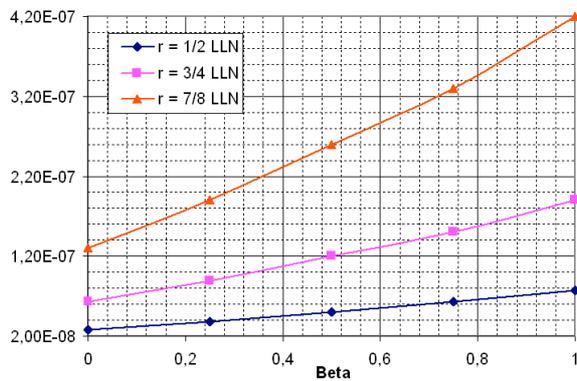


Figure 75 : CLR en liaison descendante en fonction de β pour le DVB-S avec $r = 1/2, 3/4$ et $7/8$, avec $m_d = -2.0344$, $\sigma_d = 1.2146$ (Louvain La Neuve, Belgique), $\sigma_m = 0.752$, $\sigma_\sigma = 0.5$

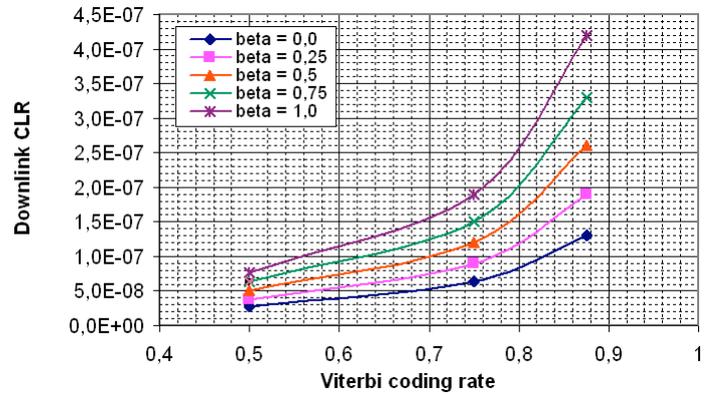


Figure 76 : CLR en liaison descendante en fonction du taux de codage convolusionnel pour différentes valeurs de β , avec $m_d = -2.0344$, $\sigma_d = 1.2146$ (Louvain La Neuve, Belgique), $\sigma_m = 0.752$, $\sigma_\sigma = 0.5$.

4 CHAPITRE 4 :

**MECANISMES DE GESTION DES
RESSOURCES AVEC FMT A BANDE
VARIABLE**

4.1 PRINCIPES ET FONCTIONS DE BASE DE GESTION DES RESSOURCES

4.1.1 Survol d'un gestionnaire de ressources

Le Gestionnaire des Ressources Intégré (GRI) de SAGAM permet d'illustrer les principales fonctions de gestion des ressources réparties sur les trois segments (spatial, contrôle et usager) dans un contexte de système satellitaire géostationnaire régénératif à commutation ATM [1,2,4,24].

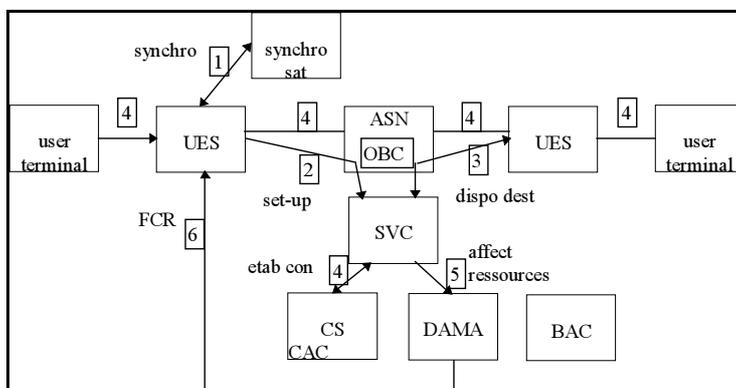


Figure 77 : Interactions des entités du GRI en mode connecté

Ces fonctions peuvent être énumérées de la façon suivante :

- ✓ **Procédure d'établissement d'un canal virtuel (VC ou *Virtual Channel*)** entre une station appelante et une station appelée. Une station, désirant transmettre du trafic transitant d'abord par le satellite via la trame montante MF-TDMA, pour atteindre la station destinataire via la trame descendante TDM, émet des requêtes de connexion (ou appels) au moyen d'une signalisation appropriée (soit par la procédure ATM normalisée Q.2931 dans le cas des terminaux utilisateurs ATM, soit alors à travers une fonction d'adaptation ATM pour des terminaux utilisateurs non-ATM) qui est acheminée vers le processus SVC (*Switched Virtual Channel*) du NCC.

Le traitement des requêtes de connexions est réalisé par le SVC sur le mode demi-appel, c'est-à-dire en interrogeant d'abord l'appelant et le nœud de commutation embarquée ASN (*ATM Switching Node*) dans le satellite, puis l'ASN et l'appelé.

- ✓ **Procédure de contrôle d'admission des connexions :**
Une fois la liaison physique établie entre la station appelante et le satellite, l'algorithme du CAC (*Connection Admission Control*) est déroulé, ce qui constitue la phase de contrôle d'admission proprement dite. En cas de succès, la connexion est établie : le VC est constitué. Le CAC peut être défini comme un mécanisme de contrôle préventif statique de congestion instauré au niveau des connexions. Cet organe vérifie si une requête de connexion qui arrive peut être acceptée étant donné les connexions déjà en place, de telle sorte que les contrats négociés de ces connexions soient respectés (en terme de délai, bande allouée et taux de perte de cellules) et que le réseau soit capable de supporter la charge de trafic supplémentaire induite.

La fonction CAC s'appuie généralement, comme dans SAGAM, sur un calcul de bande (ou capacité) équivalente aux nœuds de multiplexage et aux points de réduction de débit sujets à congestion, pour chaque type de trafic en utilisant notamment le SCR (*Sustained Cell Rate* ou débit moyen), le PCR (*Peak Cell Rate* ou débit crête) et le MCR (*Minimum Cell Rate* ou débit minimal) donnés comme descripteurs de trafic, et avec un objectif de perte de cellules CLR fixé. Deux calculs séparés de la bande équivalente sont menés, l'un pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante. Cette bande équivalente est comparée à la bande disponible. Une table de bandes passantes équivalentes stockées et mises à jour dans le NCC est utilisée par la fonction CAC pour décider d'accepter ou non une connexion entrante. D'autres méthodes d'admission existent, faisant intervenir des quantités ou des critères différents de la bande équivalente.

- ✓ **La prise en charge du trafic**, au niveau des stations terrestres, depuis sa génération jusqu'à sa transmission sous forme de cellules ATM par salves dans des créneaux temporels de la trame montante, représente une part prépondérante de la gestion des ressources.

Suivant une approche ATM, les trafics sont regroupés par catégories de services :

- Trafics temps réel (sensibles au délai) : CBR (*Constant Bit Rate*), rt-VBR (*real time Variable Bit Rate*) ;
- Trafics non-temps réel (peu sensibles au délai) : nrt-VBR (*non real time Variable Bit Rate*) et ABR (*Available Bit Rate*) ;
- Trafics non spécifiés : UBR (*Unspecified Bit Rate*).

Dans SAGAM, ces classes de service sont également dénommées "capacités de transfert MAC" (MTC ou *MAC Transfer Capability*) qui permettent de catégoriser les divers traitements. L'ordre de priorité de ces services est le suivant : CBR > rt-VBR > nrt-VBR > ABR > UBR. La signalisation est considérée comme une classe de MTC particulière appelée MTC-AS (*ATM Signalling*).

Ailleurs, la littérature emploie aussi une autre terminologie qui ne distingue que deux groupes de trafic [3]. Il s'agit des :

- **Trafic V** ou isochrone (CBR et rt-VBR). Ce type de trafic :
 - N'est pas soumis à un multiplexage statistique ;
 - Se voit allouer le débit crête PCR comme capacité équivalente valable pendant toute la durée de la connexion (ce qui équivaut à une émulation de commutation de circuit). Le rt-VBR est traité comme le CBR.
 - Est prioritaire par rapport au trafic D.
- **Trafic D** ou non-isochrone (nrt-VBR, ABR, UBR) qui :
 - Présente un caractère sporadique ;
 - Est soumis à un multiplexage statistique au niveau du CAC : les demandes de capacité ne se font pas connexion par connexion mais de façon globale, les trois types de services ABR, UBR et nrt-VBR étant agrégés.

Le trafic généré est tamponné en file d'attente avant d'être transmis dans la trame montante. La gestion des files d'attente et leur discipline de service ou encore leur mécanisme de vidage en liaison avec l'accès des cellules aux ressources radio, constituent le cœur du mécanisme dit *d'ordonnancement* des cellules. De nombreux modes de gestion et de fonctionnement des files d'attente existent. Le projet SAGAM en a envisagé deux :

- **Stratégie par priorité stricte** : Les files d'attente sont différenciées suivant leurs catégories QoS MTC et la destination des cellules. Chaque cellule ATM est acheminée vers la file correspondant à sa classe de service MTC. Les files d'attente opèrent en mode FIFO (*First In First Out*). Elles sont vidées suivant une gestion par priorité stricte CBR > rt-VBR > nrt-VBR > ABR > UBR.
- **Stratégie par WFQ** (*Weighted Fair Queueing*) : L'algorithme WFQ est une stratégie de gestion des ressources équitable allouant un poids prédéterminé à chaque connexion d'une station. Les poids sont calculés de façon à respecter les contrats de trafic. L'algorithme utilisé dans SAGAM repose sur le concept d'espacement virtuel qui consiste à attribuer à chaque cellule venant d'arriver un label et à servir les cellules dans l'ordre croissant des labels. Cet algorithme se décompose en trois processus :
 1. **Un processus de réception** qui se charge de calculer le label à affecter à la cellule venant d'arriver à la station.
 2. **Un processus d'émission de l'ordonnanceur** qui repère la cellule stockée en files d'attente, ayant le label de plus faible valeur, et l'envoie à la file d'attente de réémission vers la trame montante.
 3. **Un processus de réémission** qui réémet les cellules en fonction de la valeur de leur label mais aussi en fonction de leur destination. Quand une destination est congestionnée, le processus réémet des cellules ayant un label plus élevé tandis que les cellules dédiées à la destination saturée sont bloquées.

Le contrôleur d'accès (*scheduler*) à la trame montante, encore appelé ordonnanceur, a ainsi plusieurs rôles :

- ✓ Il détermine, à partir du rapport de configuration de trame FCR les positions et les tailles des créneaux temporels alloués à la station dans la trame montante ;
- ✓ Il gère l'accès des cellules tamponnées dans les files d'attente à ces créneaux par une stratégie de vidage spécifique ;
- ✓ Il vérifie la destination sur liaison descendante des cellules afin de faire respecter les indications du processus de prévention de congestion dynamique BAC qui spécifie la capacité maximale à ne pas dépasser pour éviter une congestion en voie descendante.

L'ordonnanceur est de ce fait étroitement lié à un protocole d'accès à l'interface air, appelé protocole MAC, qui effectue, au niveau du NCC, l'allocation de créneaux temporels dans la trame montante.

- ✓ **La fonction centrale MAC d'allocation des ressources.** Pour faciliter la description, un protocole MAC de type DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*) ou par affectation à la demande est supposé. Les caractéristiques de ces protocoles sont détaillées dans la section §4.2.2.

La fonction DAMA est partagée entre un organe centralisé appelé contrôleur DAMA situé au niveau du centre de contrôle réseau et les agents DAMA délocalisés dans les stations. L'ensemble contrôleur et agents DAMA est chargé d'allouer les créneaux de la trame montante MF-TDMA aux différentes stations et de contrôler l'accès à la trame.

Le rôle du contrôleur DAMA est de répartir la capacité disponible sur les liens montants vers le satellite entre les connexions dont il prend en compte les contrats de trafic. Son rôle est d'allouer une ressource globale à chaque station au travers du FCR généré périodiquement. Cette ressource allouée est spécifiée en termes de fréquence porteuse accordée à chaque station terrestre ainsi qu'en nombre, emplacements et éventuellement tailles des créneaux à occuper par la station dans la trame MF-TDMA montante. Ces allocations se basent sur l'ensemble des requêtes de connexion, ainsi que sur les demandes dynamiques de capacité

L'agent DAMA dans chaque station se charge de contrôler la répartition locale de la capacité qui lui est assignée entre ses différentes connexions, suivant un niveau de priorité MTC. Il transmet également des requêtes de supplément de capacité quand des trafics sporadiques génèrent une charge importante dans la station.

Les agents DAMA et le contrôleur DAMA échangent des messages de signalisation (en particulier demandes de ressources et indications de fin de salves dans le sens des agents vers le contrôleur ; diffusion de FCR du contrôleur vers les agents).

- ✓ **Contrôle de congestion préventif dynamique :**

Dans SAGAM, pour prévenir tout état de congestion sur la liaison descendante, un processus appelé BAC redistribue la capacité aux différents services après connexion, de façon dynamique. Ce contrôle de congestion dynamique permet d'optimiser l'utilisation des ressources en contrôlant pratiquement en temps réel la charge acceptable sur un port de sortie de la matrice de commutation embarquée (c'est-à-dire sur un lien descendant). Pour une station rentrante, le BAC mesure les débits vers les faisceaux destinataires en sortie des files d'attente et transmet ces mesures au NCC. Si un faisceau donné ne peut pas accepter la somme des débits mesurés, le NCC réduit le débit des sources concernées par notification FCR. Ces mesures permettent au BAC de déterminer les débits autorisés aux différentes classes de trafic et de prédire l'évolution du trafic.

- ✓ **Contrôle de congestion réactif :**

Les cellules erronées (non corrigées par le système de codage) peuvent être identifiées à bord afin qu'elles soient éliminées avant tout traitement en file d'attente et transmission vers le TDM descendant et avant situation de congestion détectée. Cette pré-détection permet de moins encombrer le TDM et donc d'augmenter l'utilisation du canal en liaison descendante. Des modes sophistiqués de contrôle réactif autorisent le rejet uniquement de cellules sélectionnées. Ces méthodes sont appelées SCD (*Selective Cell Discard*) ou SPD (*Selective Packet Discard*).

4.1.2 Points critiques dans la gestion des ressources en contexte satellitaire

4.1.2.1 Temps de propagation et réactivité des protocoles

En orbite géostationnaire, le temps de propagation du signal entre la Terre et le satellite est d'environ 125-135 ms. Un aller-retour complet est appelé en anglais *Round Time Delay* (RTD) et ce délai incompressible est source de nombreux impacts sur l'architecture et les performances des protocoles de gestion des ressources. Il influe également sur la réactivité du système lors d'échanges d'information de contrôle. La plupart du temps, ce délai important est pénalisant quand il s'agit de transposer des protocoles originellement à vocation terrestre vers un contexte satellitaire.

4.1.2.2 Imbrication multinodale et multi-niveau des fonctions de gestion des ressources

Il existe une interdépendance si forte, si étroite et si complexe entre les diverses fonctions de gestion de ressources, renforcée par une imbrication multicouche, qu'il n'est pas possible d'optimiser ou de modifier une partie du gestionnaire des ressources sans répercussion sur une autre partie située sur une même couche ou sur une couche différente suivant le modèle OSI.

Cette interdépendance peut exister premièrement soit au sein d'une même entité d'un même segment entre les différents nœuds qui la composent (par exemple, au sein d'une même station, les interdépendances entre les entités suivantes peuvent être identifiées : l'ordonnanceur de cellules, le tamponnage en files d'attente, la fonction de lissage de trafic, la

fonction de rejet de paquets ; à l'intérieur du NCC, interdépendance entre le CAC et le contrôleur DAMA), soit entre des entités distinctes situées sur des segments distincts (station et NCC, station et satellite, NCC et satellite).

L'imbrication peut être vue également comme existant entre plusieurs niveaux ou granularités de trafic :

- ✓ Le niveau appel pour les services connectés ;
- ✓ Le niveau flot pour les services non connectés ;
- ✓ Le niveau cellules ;
- ✓ Le niveau créneau et trame.

Enfin, la difficulté est accrue lorsque plusieurs couches rentrent en ligne de compte, comme c'est le cas dans cette étude des effets de la couche physique (canal et FMT) sur les couches supérieures.

4.1.3 Interdépendance entre la couche physique et les couches supérieures

A travers l'introduction de techniques de contre-mesure à bande transmise variable visant à contrebalancer les effets de l'affaiblissement rencontré dans le canal de propagation, la couche physique qui, jusque là, n'avait une incidence sur les couches supérieures qu'en termes de disponibilité de la liaison ou d'impacts des erreurs, fait apparaître un autre type d'interactions multicouche. Par couche physique, ce sont essentiellement les phénomènes du canal de propagation Ka comme décrits dans la section §2.1 et le comportement des techniques de contre-mesure qui sont considérés.

Il convient à ce stade d'effectuer un survol des études menées sur le couplage entre la couche physique et les couches supérieures. D'emblée, force est de constater que la couche accès a été et est encore l'objet de nombreuses études de performances réseau. L'étendue des problématiques associées à la gestion des ressources est très large. La littérature technique offre une palette étoffée de développements concernant ce type de problématiques dont l'énumération ci-après constitue un infime échantillon :

- ✓ Algorithmes d'ordonnancement du trafic et étude du comportement statistique des files d'attente en terme de remplissage, de délai d'attente (délai moyen, gigue, distributions des délais), de congestion, de pertes de cellules [5,14,21,45-47,49,50,52,196,200,202].
- ✓ Sensibilité des protocoles de gestion des ressources [6,11,14,19,21,67,113,114,166,173-179,202] :
 - A la nature et au profil même du trafic injecté (trafic sporadique ou non, classe QoS ATM, présence d'une composante à dépendance court terme seule (*Short Range Dependance* ou SRD), présence d'une composante à dépendance long terme (*Long Range Dependance* ou LRD), etc.) avec ses multiples effets sur le multiplexage statistique, sur le comportement statistique des files d'attente, etc. ;
 - Aux caractéristiques statistiques des appels ;
 - Aux modèles de trafic utilisés (fractales, Poisson, bruit fractionnaire gaussien, chaînes de Markov, modèles autorégressifs, etc.) ;
 - Au lissage du trafic par des filtres de type Leaky Bucket ou d'autres fonctions ;
 - A la charge de trafic ;
 - A la présence ou non de congestion dans le réseau, et partant de techniques de rejet des paquets, etc..
- ✓ Caractérisation, modélisation et mise en forme du trafic dans des réseaux large bande [173-180].
- ✓ Performances et modélisations du contrôle d'admission des connexions [11,12,13,16-18,53,81,92,107-109,113,115,125,132,194].
- ✓ Un nombre important d'études et d'optimisations des performances des protocoles MAC en contexte satellitaire notamment de type allocation à la demande (DAMA) vis-à-vis [1,2,4,6,20,44,90,103,104,113,170,172,195,206,207] :
 - De l'utilisation de la ressource montante et descendante ;
 - De l'équité entre utilisateurs ;
 - Du délai de transmission de bout en bout ;
 - De l'état de congestion et de la charge de trafic ;
 - Du type de trafic ;

Cette liste est loin d'être exhaustive. Ces divers travaux ont souvent conduit à l'élaboration de protocoles d'accès toujours plus sophistiqués adaptés au cas satellitaire et aux applications telles que TCP/IP [192,193].

Par ailleurs, il est à noter que pour le canal mobile ou le canal sans fil une grande variété de travaux a été entreprise dans le but d'étudier l'interaction entre les effets propres du canal et des techniques de contre-mesure, et les protocoles situés sur les couches supérieures. Les phénomènes de propagation dans un canal mobile sont divers et différents de ceux du canal Ka : diffraction, dispersion, réflexion et réfraction induisent des effets de fluctuations court terme (dues aux multitrajets) ou long terme (fluctuations lentes dues au déplacement du transmetteur ou du récepteur) du niveau du signal reçu, de masquage et d'ombrage [203]. Parmi les travaux existants, peuvent se dénombrer entre autres les études suivantes :

- ✓ San-qi Li a élaboré une méthode d'analyse spectrale unifiée des effets corrélés du canal de propagation et du trafic sur les performances d'une file d'attente. Un simulateur d'analyse spectrale appelé SMAQ (*Statistical Match And Queueing tool*) a été mis au point. Les travaux de San-qi Li, uniques dans la matière, démontrent les effets conjugués du canal mobile et du trafic, au moyen d'un développement algébrique formel précis mettant en œuvre des statistiques du 2^e voire du 3^e ordre [44-47,49,50,52].
- ✓ De très nombreuses études des FMT à base de contrôle de puissance, de débit variable ou de modulation adaptative de type MQAM (*Multi-Quadrature Amplitude Modulation*), en termes de performances de transmission numériques (efficacité spectrale, puissance, etc.) ont été effectuées par Goldsmith et al pour le canal mobile à évanouissement [156-161].
- ✓ Poethi Boedihartono a étudié des procédures de transfert de communication (handover) imprédictibles et leur signalisation associée dans une constellation de satellites non-géostationnaires pour un canal satellitaire avec des utilisateurs mobiles terrestres. Ce canal est représenté soit par un modèle à deux états de Lutz, soit par un modèle à trois états de Karasawa caractérisés chacun par des distributions distinctes (Nagakami-Rice, Loo et Rayleigh). Le canal a été introduit dans ce travail uniquement sous la forme d'une modélisation statique à travers un tirage aléatoire de la puissance reçue d'après une distribution statistique du canal. Cette intégration d'un modèle statique de propagation a été réalisée dans le logiciel OPNET. Cette approche est une des premières de ce type dans le cas d'un système satellitaire, mais non en bande Ka [93].
- ✓ Zorzi et al ont proposé des modèles plus évolués de canal et des erreurs en bloc au moyen de chaînes de Markov, ce qui leur permet d'analyser les impacts sur le délai des paquets transmis, sur le tramage, sur les mécanismes TCP/IP, car ces modèles rendent bien compte de la corrélation temporelle des erreurs lorsque l'événement d'erreur est de longue durée [43,87-89].
- ✓ Ericsson et al ainsi que Hossain et al ont étudié diverses techniques d'ordonnement de trafic dans un canal sans fil mobile pour des réseaux multimédia, certaines de ces études incluant des techniques de contre-mesure de type modulation adaptative. L'originalité des travaux d'Ericsson réside dans le fait que les algorithmes d'ordonnement élaborés de façon prédictive vis-à-vis du canal en prenant en compte les modes FMT sont ramenés à un problème d'optimisation [197-201]. Cette approche a été également suivie par Birmani qui aboutit à la résolution algorithmique d'un problème de "sacs à dos" multiples (MKP ou *Multiple Knapsack Problem*) [90].

Quant à la liaison satellitaire géostationnaire, les études en bande Ka restent timides et très peu nombreuses. Il y a eu certes ces dernières années un intérêt marqué pour l'ATM adapté au satellite [3,6,10,36-38,60,103,105,106,110,113,123,124,132,191,192,206-208], les protocoles DVB-S/RCS [152], les algorithmes à mettre en œuvre pour remédier au délai de propagation important du signal entre la terre et le satellite pour réaliser des protocoles TCP/IP par satellite [192,193].

Mais les études approfondies spécifiques du couplage entre les phénomènes de propagation dans le canal satellitaire et les techniques de contre-mesure de la couche physique destinées à les compenser, et les couches supérieures, en particulier réseau, ATM et accès, demeurent rares [90,204,205]. Or, les impacts des mécanismes FMT et du canal de propagation dans la bande Ka spécifiquement sur une liaison satellitaire géostationnaire, sur les mécanismes et protocoles localisés sur les couches supérieures constituent un domaine d'investigation incontournable. Très peu de travaux ont été effectués pour estimer l'architecture et les performances engendrées par les FMT au niveau de la couche accès, bien que Shvodian de l'Université George Washington aux Etats-Unis, ait tenté dans sa thèse de 2000 sur un nouveau protocole MAC pour un satellite large bande [6], de dresser un rapide inventaire systématique des impacts du codage adaptatif sur la couche accès. Il est toutefois nécessaire de mettre en avant le développement par Malygin et al de l'Université de Portsmouth (Angleterre) d'un modem numérique déployant une FMT adaptative pour stations VSAT en bande Ka [162]. En outre, Vilar, Grémont, Filip et Malygin de la même université ont étudié des stratégies de déploiement de mécanismes de modulation adaptative dans ce type de système, ainsi que leur impact sur l'architecture d'un système de modulation/démodulation et sur les performances de la couche liaison (LLC ou *Logical Link Control*). Leurs travaux ont abouti au développement d'un contrôleur FMT à base d'un réseau de neurones [57,77,78,163-165,187]. Enfin, les efforts particuliers de Celandroni et al qui ont étudié diverses variantes de protocoles d'accès multiple par satellite en bande Ka de type TDMA par allocation à la demande (FODA, IBEA, FEEDERS-TDMA, IBEA-TDMA, DA-TDMA), associés à des techniques de contre-mesure, méritent d'être soulignés, car ces efforts ont conduit à des travaux significatifs sur les impacts du canal et des FMT sur les performances des mécanismes d'accès et de la transmission de trafic VBR [166-171].

4.2 LE CONTROLE D'ACCES MULTIPLE MAC A L'INTERFACE AIR

4.2.1 Classification synoptique des protocoles MAC

Il est possible de faire toutes sortes de regroupements de protocoles. La classification donnée sur la figure 78 reflète un choix fonctionnel [20].

Trois grandes catégories de techniques d'accès multiple peuvent être distinguées :

- ✓ Protocoles à partage fréquentiel (FDMA ou *Frequency Division Multiple Access*) ou temporel (TDMA).
- ✓ SDMA (*Space Division Multiple Access*) : réutilisation de canaux par satellite par concentration de faisceaux sur des régions géographiques déterminées.
- ✓ PDMA (*Polarization Division Multiple Access*) : réutilisation du spectre disponible par transmission sur polarisations orthogonales.

Le SDMA et le PDMA sont des techniques de réutilisation de fréquence et reposent, en grande partie, sur une architecture d'antenne particulière ainsi que sur des propriétés de propagation des ondes électromagnétiques. Elles sortent du cadre de la présente étude. Les protocoles MAC les plus courants sont généralement de type FDMA ou TDMA. Dans cette dernière catégorie, les protocoles d'accès multiple de la couche MAC peuvent être typiquement classés en 4 classes principales :

- **Classes sans conflit :**
 - (i) FAMA (*Fixed Assignment Multiple Access*) : Accès Multiple à Allocation Fixe
 - (ii) DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*) : Accès Multiple avec Allocation à la Demande
- **Classes avec conflit :**
 - (iii) RMA (*Random Multiple Access*) : Accès Multiple Aléatoire
 - (iii) RRMA (*Reservation Random Multiple Access*) : Accès Multiple par Réservation et Accès Aléatoire.

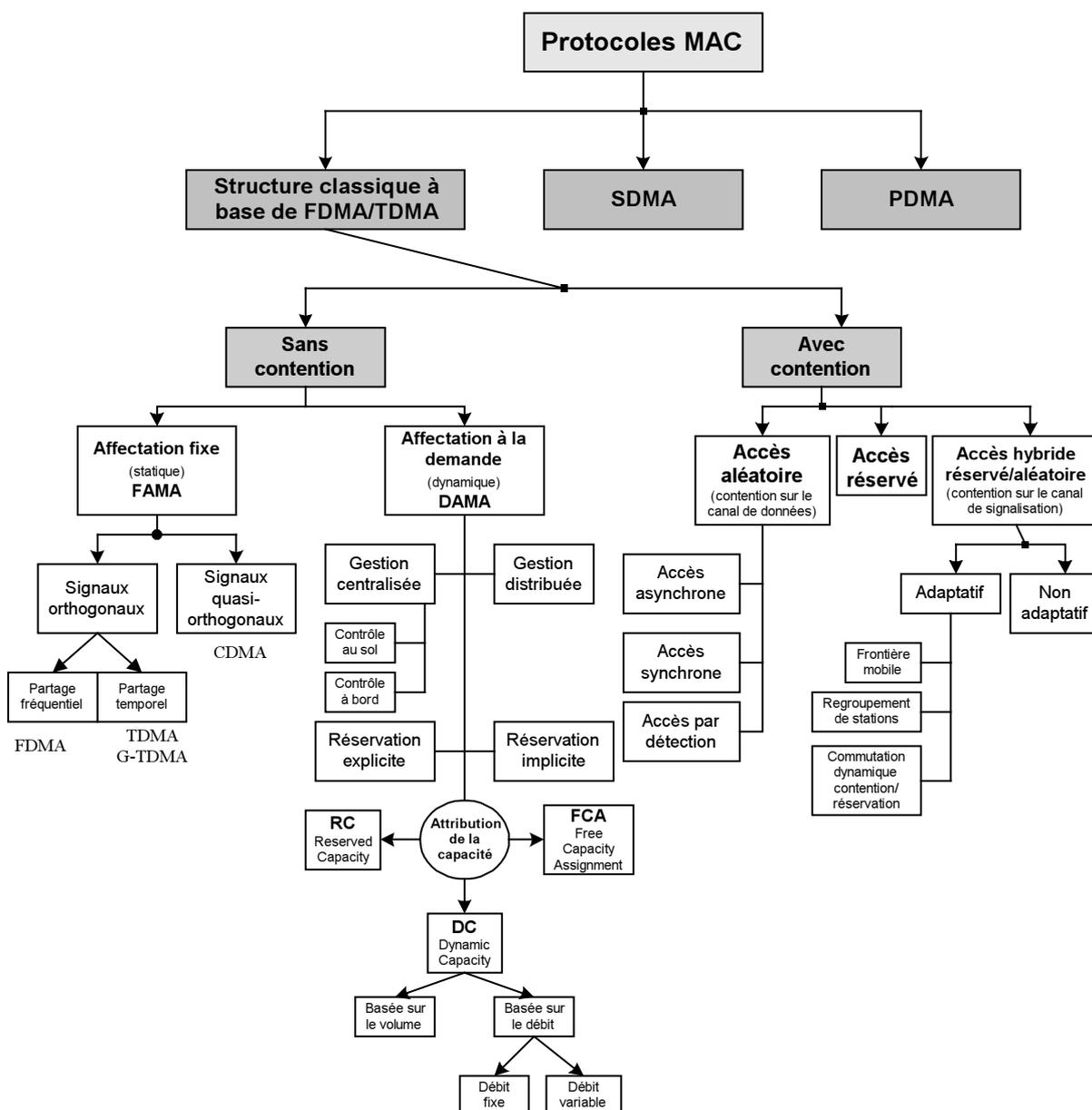


Figure 78 : Schéma synoptique représentant une classification fonctionnelle générale des protocoles MAC

Les techniques appartenant à ces classes ont évolué pour répondre aux besoins :

- ✓ De trafic élevé constant de longue durée (i) ;
- ✓ De trafic sporadique de longue durée (ii) ;
- ✓ De trafic sporadique de courte ou moyenne durée sans contraintes de délai ni perte (iii) ;
- ✓ De trafic sporadique de courte ou moyenne durée avec contraintes de délai ou perte (iv) ;

Pour des protocoles à réservation, plusieurs possibilités de gestion de la capacité existent :

- ✓ **Type d'allocation** (*statique ou dynamique*) :
L'allocation dynamique utilisant une procédure de réservation de capacité par avance, appelée requête, peut accroître le taux d'utilisation de la ressource. L'accès dynamique convient plus aux trafics non-isochrones. L'accès statique offre des capacités fixes à des stations au moment de l'établissement du canal virtuel et permet de courts délais d'accès (trafic régulier).
- ✓ **Méthode de réservation** (*implicite ou explicite*) :
En réservation implicite, la réservation est effectuée au moment même de l'occupation des créneaux. Un créneau occupé par un paquet d'une station donnée reste alloué à cette station dans les trames suivantes. Les stations accèdent aux créneaux de réservation par S-Aloha. La réservation implicite est généralement utilisée dans le cas où le nombre de stations est élevé, dans le but de restreindre le nombre de créneaux de réservation. L'Aloha par réservation est un exemple de protocole à réservation implicite. L'avantage de cette méthode de réservation est l'absence de délai dû à la réservation explicite. Le désavantage est qu'une station peut s'accaparer tous les créneaux.
En réservation explicite, la station envoie une requête pour occuper certains créneaux de temps. Chaque station se voit attribuer un créneau de réservation unique dans une trame. Chaque trame, par conséquent, possède une sous-trame de contrôle avec des bits destinés à la réservation ou à l'annonce d'une transmission. Le désavantage de ces protocoles est le délai induit par une réservation explicite.
- ✓ **Réservation à débit fixe ou réservation à débit variable** :
Dans une trame, un seul créneau de réservation est attribué à chaque station. Pour un nombre réduit de stations (moins de 10), l'allocation à débit fixe fournit une utilisation efficace des capacités de réservation des sous-trames du point de vue des délais d'accès qui sont minimisés.

Les protocoles à accès aléatoire du type Aloha sont efficaces uniquement à faible charge car, dans ce cas, le délai induit par la procédure de réservation est évité. A forte charge, les collisions et donc les retransmissions deviennent excessivement fréquentes, ce qui augmente les délais de transmission. Parmi les protocoles à conflit, seuls ceux à conflit limité combinant des accès par réservation sont plus performants que l'Aloha à forte charge. Idéalement le recours combiné à ces deux types d'accès permettrait d'obtenir un protocole efficace aussi bien à faible charge qu'en forte charge. Dans cette catégorie, se classent par exemple les protocoles à conflit non symétrique où chaque station possède une probabilité d'émission propre.

Incontestablement les méthodes les plus efficaces sont celles qui limitent le nombre de stations en compétition. Dans un scénario où les services temps réels (comme rt-VBR) avec de fortes contraintes de délai prédominent, il apparaît clairement qu'une approche qui implique un tamponnage en file d'attente n'est pas appropriée.

Au-delà de la classification présentée sur la figure 78, trois embranchements majeurs se profilent :

- ✓ Protocoles à vocation terrestre (délais de propagation négligeables) ;
- ✓ Protocoles à vocation applications sans fil / mobile (délais de propagation de l'ordre de la microseconde) ;
- ✓ Protocoles à vocation satellitaire (délais de propagation de l'ordre de la milliseconde).

Le facteur du délai revêt une importance primordiale. Lorsque le délai de propagation est très faible (de 10 à 100 μ s), en environnement terrestre, la classe des protocoles d'accès à détection de porteuse convient (CSMA ou *Carrier Sense Multiple Access*). Cette classe de protocoles n'est pas envisageable en environnement satellitaire. Dans des environnements où les délais de transmission sont supérieurs à 1 ms, des protocoles tels que TDMA, FDMA, à accès aléatoire ou à accès par réservation ou encore à accès hybride réservé/aléatoire, etc. sont généralement employés. Les protocoles à allocation fixe comme TDMA et FDMA allouent les ressources à une station sans se préoccuper de son activité et ceci est à l'origine d'un gaspillage des ressources (excepté lorsque le nombre d'utilisateurs est faible). C'est afin de remédier à cette inefficacité que des protocoles d'accès par réservation ont été proposés. Cependant les protocoles d'accès par réservation pure ont l'inconvénient de générer de longs délais y compris lors d'une faible utilisation des ressources. Pour pallier les longs délais lors de faibles utilisations, des accès aléatoires sont incorporés dans des protocoles d'accès par réservation, ce qui permet ainsi de réduire de 1/3 les délais pour une charge du canal de 10%. Une autre manière de résoudre les problèmes liés aux délais importants est d'associer à un protocole à réservation une possibilité d'allocation de capacité fixe.

Il faut se garder à l'esprit qu'il existe peu de protocoles MAC conçus spécifiquement pour les liaisons par satellite. Beaucoup proviennent d'une adaptation soit de protocoles terrestres, soit de protocoles destinés aux applications mobiles. Parmi toutes les catégories de protocoles MAC existants, ce sont les protocoles de type allocation à la demande (DAMA) ou de type hybride qui sont les plus susceptibles d'être utilisés dans un contexte satellitaire, étant donné que le mode d'accès par conflit est fortement préjudiciable à l'environnement satellitaire quand le nombre de stations devient élevé, et que l'accès à la ressource satellitaire induit un délai supplémentaire de propagation du signal, ce qui resserre les contraintes liées à un protocole DAMA.

Un souci d'optimisation du protocole en terme d'efficacité et de délai semble amener à une forme de protocoles plus ou moins adaptatifs, c'est-à-dire avec des frontières variables séparant leurs différents modes d'allocation :

- ✓ Entre le mode réservation (fixe/variable) et le mode aléatoire ;
- ✓ Entre le mode réservation et le mode à accès fixe.

Eventuellement, il peut être judicieux de disposer d'une méthode d'allocation libre des ressources restantes. [104] et [172] présentent un protocole destiné à des réseaux par satellite large bande desservant un nombre fini d'utilisateurs qui génèrent un trafic sporadique. L'allocation par réservation est combinée à des allocations libres pour garantir des délais plus courts.

Il convient, à ce stade, d'identifier les principaux points critiques liés à la problématique de l'ATM par satellite dans le cadre de protocoles à composante DAMA.

4.2.2 Principe des protocoles orientés DAMA

4.2.2.1 Principe général

Il existe un grand nombre de variantes de protocoles MAC par allocation à la demande. Le choix d'un protocole DAMA dépend fortement de la nature des trafics transportés. Pour un système mono-service, il est aisé de dresser d'ores et déjà un tableau de correspondances entre chaque classe de service et le mode d'accès qui lui est le mieux adapté [208] :

Classe de service	Méthode d'allocation	
	Valeur	Mode
CBR	PCR	DAMA débit fixe
rt-VBR	PCR	DAMA débit fixe
nrt-VBR	Variable	DAMA débit variable
ABR	MCR	DAMA débit fixe
	MCR → 0	Accès aléatoire
UBR	Restante	Accès aléatoire sur créneaux non réservés
GFR (UBR+)	MCR + débit variable	DAMA débit fixe (MCR) et DAMA débit variable (bande variable)

Tableau 26 : Méthode d'allocation DAMA adaptée à chaque classe de service ATM

Pour un trafic multiservices, un mode d'allocation à débit (ou capacité) fixe conduit à une mauvaise utilisation de la capacité du canal (le trafic est aléatoire et non prévisible) et de toute évidence, du fait des nombreuses collisions générées, les accès du type aléatoire sont à proscrire si ce n'est éventuellement pendant la phase de connexion des stations.

Ceci fait de nouveau ressortir tout l'intérêt d'un protocole d'accès de type DAMA dont le principe est d'allouer de la capacité sur demande en réponse à une requête provenant d'une station. Cette allocation évite toute collision.

Néanmoins, le gaspillage de ressources qu'engendre une allocation de la capacité maximale avec un DAMA à capacité fixe peut ne pas être tolérable. L'emploi d'un DAMA à capacité variable peut, quant à lui, engendrer de nombreux problèmes au niveau du processus de négociation, dus au délai aller-retour Terre Satellite.

L'allocation fixe est recommandée dans les réseaux où d'importants volumes de données doivent être routés entre un petit nombre de stations de capacité importante. L'allocation à la demande fournit une meilleure utilisation de la liaison par satellite pour un nombre important de stations de faible capacité avec une variation importante du volume des demandes.

L'allocation de capacité pour le service VBR peut être décrite comme constituée de deux parties, une partie variable et une partie fixe, de sorte qu'il est possible d'écrire la capacité totale allouée ρ_{DAMA} sous la forme :

$$\rho_{DAMA} = \rho_{variable} + \rho_{fixe}$$

Il peut être montré que si le DAMA se rapproche d'un DAMA exclusivement à capacité variable (c'est-à-dire si $\frac{\rho_{variable}}{\rho_{DAMA}} \rightarrow 1$), alors le délai de transmission de bout en bout des cellules tend vers 0.550 s, soit deux allers-retours Terre Satellite, l'un pour la notification de la requête de capacité et l'autre pour la transmission effective des salves de données dans la trame montante de la station source vers la station destinataire via le satellite.

Si le DAMA se rapproche cette fois d'un DAMA exclusivement à capacité fixe (c'est-à-dire si $\frac{\rho_{variable}}{\rho_{DAMA}} \rightarrow 0$), alors le délai de transmission de bout en bout tend vers 1 RTD, soit 0.275 s.

Le choix entre allocation fixe ou allocation à la demande doit tenir compte aussi des aspects suivants :

- ✓ Les spécifications des utilisateurs telles que l'intensité du trafic, le nombre de destinations, la probabilité de blocage, etc. ;
- ✓ Un compromis entre des coûts plus élevés, une faible probabilité de blocage et un débit important (dans le cas de l'allocation à la demande), et des coûts faibles alliés à la simplicité de réalisation (dans le cas de l'allocation fixe) ;
- ✓ Le choix entre une gestion centralisée ou une gestion répartie.

Le protocole d'accès qui a été envisagé dans SAGAM et réalisé dans la plate-forme de simulation développée au cours de la présente étude est du type DAMA orienté CF-DAMA (*Combined Free-Demand Assignment Multiple Access*), dans lequel l'accès à la trame MF-TDMA est partagé entre une méthode d'accès à la demande et l'accès libre. Ce protocole est conforme à la stratégie DAMA générique normalisée par le DVB-RCS [116].

4.2.2.2 Principe du DAMA générique normalisé DVB-RCS de type CFDAMA

4.2.2.2.1 Mécanismes de requêtes de capacité

Les requêtes de capacité peuvent être effectuées suivant trois stratégies de signalisation différentes [104,172] :

- ✓ CFDAMA-PA (*Pre-Assigned*) : Emission des requêtes dans des créneaux de requête pré-assignés ;
- ✓ CFDAMA-RA (*Random Access*) : Emission des requêtes dans des créneaux de requête à accès aléatoire ;
- ✓ CFDAMA-PB (*Piggy-Backed*) : Insertion des requêtes dans les paquets de données.

La stratégie de requête PA suppose que chaque station a un créneau de requête PA. La stratégie de requête RA suppose l'existence d'une zone séparée de créneaux de requêtes accessibles aléatoirement par toutes les stations. Enfin, avec le protocole CFDAMA-PB, les stations envoient leurs requêtes de capacité dans les en-têtes des paquets de données (dans la bande).

Les protocoles CFDAMA-PA et CFDAMA-PB obtiennent d'excellentes performances de délai par rapport au taux d'utilisation du canal lorsque $N\tau < RTD$ où N est le nombre d'utilisateurs, τ la longueur temporelle d'un créneau et RTD le délai de propagation aller-retour Terre-satellite.

Lorsque $N\tau \gg RTD$, leurs performances se dégradent à cause du long délai d'attente pour un créneau de requête (CFDAMA-PA) ou un créneau de trafic (CFDAMA-PB). Dans ce cas, un mécanisme à accès aléatoire peut être un moyen plus rapide pour une station d'envoyer ses requêtes de réservation. Ainsi, pour un grand nombre de stations, le protocole CFDAMA-RA devient plus efficace que le protocole CFDAMA-PA.

Chaque trame est constituée de créneaux CSC (*Common Signaling Channels*) servant à l'établissement initial des requêtes et à une synchronisation grossière, et de plusieurs créneaux de trafic.

Les données sont transmises dans des créneaux au format des cellules ATM qui sont surmontées d'un en-tête de 2 octets destiné à héberger les requêtes de capacité. Ce mode de transmission de requêtes de capacité est appelé IBR (*In Band Requests*), car les requêtes sont transmises "dans la bande" sur voie montante. Chaque créneau de données utiles peut être utilisé par n'importe quel type de connexions temps réel ou non-temps réel. Afin de conserver une architecture simple, et de minimiser sa puissance d'émission, une station ne peut pas transmettre de données dans plus d'une porteuse en même temps.

4.2.2.2.2 Mécanismes d'allocation de la capacité

Plusieurs stratégies d'allocation de la capacité peuvent être utilisées par une connexion pendant sa durée de vie. Comme chaque stratégie est destinée à garantir un niveau de QoS spécifique, le protocole d'accès à la capacité de garantir des QoS adaptées aux besoins des utilisateurs.

Quatre mécanismes d'allocation de capacité sont offerts :

RC	<i>Reserved Capacity</i>	Capacité réservée
RBDC	<i>Rate-Based Dynamic Capacity</i>	Capacité dynamique exprimée en débit
VBDC	<i>Volume-Based Dynamic Capacity</i>	Capacité dynamique exprimée en volume
FCA	<i>Free Capacity Assignment</i>	Attribution de capacité libre

Avec une stratégie d'attribution réservée RC (cette capacité est également appelée CRA ou *Continuous Rate Assignment*), une station annonce ses besoins de capacité montante et descendante lors de l'établissement de la connexion, en indiquant le nombre de créneaux souhaités par trame. Si la connexion est admise, la station se verra attribuer le nombre de créneaux qu'elle a requis dans chaque trame sur toute la durée de la connexion afin que le trafic ne soit pas sujet à un quelconque délai (pas de tamponnage en file d'attente). Le contrôleur réseau doit s'assurer, lors de l'établissement des connexions, que la somme des capacités réservées ne dépasse pas la capacité totale du système. Cette stratégie est adaptée aux connexions temps réel, telles que CBR et rt-VBR qui ne peuvent pas tolérer des giges trop importantes.

Avec une stratégie d'allocation dynamique RBDC exprimée en débit, une station demande explicitement et dynamiquement un nombre variable de créneaux dans chaque trame. Une requête reste effective durant un nombre donné de trames. Aussi la requête est-elle également implicite. La durée périodique de mise à jour, appelée durée de rafraîchissement RBDC, reflète un compromis entre la capacité de l'ordonnanceur de la voie montante à traiter les requêtes, et la capacité de réponse du système. Dans une option de mise en œuvre de la stratégie RBDC, la capacité de la voie montante peut être garantie par l'ordonnanceur jusqu'à la valeur $RBDC_{max}$ négociée à l'établissement de la connexion. Contrairement à la stratégie RC, la stratégie RBDC permet un multiplexage statistique des stations, ce qui permet une meilleure utilisation de la bande passante du satellite. Cependant, le contrôleur réseau doit s'assurer que la somme des RC et des $RBDC_{max}$ de toutes les stations ne dépasse pas la capacité totale disponible de la voie montante et de la voie descendante. La stratégie RBDC peut être utilisée pour les connexions non-temps réel telles que nrt-VBR et ABR.

Dans le cas de la stratégie d'allocation dynamique VBDC de capacité exprimée en volume, une station déclare ses requêtes en précisant le nombre total de créneaux nécessaires sur la liaison montante pour vider sa file d'attente. Le réseau, toutefois, ne garantit pas la disponibilité de la capacité. L'ordonnanceur de la voie montante fera de son mieux pour satisfaire les requêtes de ce type. La requête reste effective tant que les créneaux requis n'ont pas été tous attribués. Cette stratégie est destinée aux connexions tolérantes à la gigue et est particulièrement adaptée aux trafics sporadiques. Elle exploite largement le multiplexage statistique et offre ainsi une utilisation efficace de la capacité du réseau. Deux niveaux de priorité peuvent être associés au mécanisme VBDC :

- VBDC-HP (*VBDC - High Priority*) : stratégie VBDC Haute Priorité
- VBDC-LP (*VBDC - Low Priority*) : stratégie VBDC Basse Priorité

La stratégie VBDC-LP est utilisée pour les services UBR tandis que la stratégie VBDC-HP peut être utilisée pour les services ABR.

Enfin, en ce qui concerne la stratégie d'allocation de capacité libre FCA, l'ordonnanceur cherche à optimiser l'utilisation de la capacité de la voie montante en distribuant la capacité inutilisée entre toutes les stations. Cette stratégie est la moins prioritaire des quatre. Contrairement aux autres stratégies, les stations n'ont aucun pouvoir sur l'obtention de capacité libre. Plusieurs stratégies d'allocation des créneaux libres (non réservés) existent :

- Allocation aux stations en état de repos uniquement ;
- Allocation aux stations actives premièrement ;
- Allocation équitable à toutes les stations qu'elles soient actives ou non.

Du fait que chaque mécanisme d'allocation se destine à un type de trafic particulier, la combinaison de ces quatre stratégies permet de satisfaire aux différentes QoS des utilisateurs. Par exemple, pour satisfaire aux exigences contraignantes de délai et de gigue des applications temps réel, il est d'usage de réserver une capacité PCR en mode RC aux connexions de type rt-VBR. Néanmoins, si pour des raisons économiques, des délais plus importants peuvent être tolérés, il est judicieux d'allouer de la capacité RC à hauteur du débit moyen SCR, et de régler la valeur maximale $RBDC_{max}$ des requêtes de capacité à la différence entre le PCR et le SCR.

Classe de trafic	Stratégie adoptée	Capacité Réservée (RC)	Capacité Dynamique maximale (DC)	Note
CBR	RC	PCR	-	-
rt-VBR	RC	PCR	-	-
nrt-VBR	RC ou RC + DC	SCR	PCR	DC si le trafic peut tolérer des délais programmés
ABR	RC+DC (+FCA)		ACR (jusqu'à PCR)	DC volume/débit
UBR	DC+FCA	-	PCR	DC volume/débit

Tableau 27 : Stratégies d'allocation de la capacité pour le CFDAMA par catégorie de service ATM

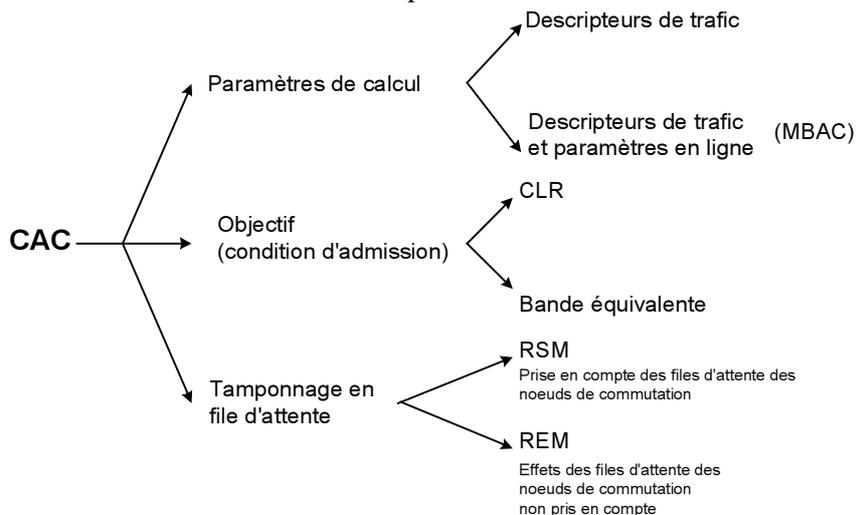
4.3 CAC

Une autre fonction critique de gestion des ressources au niveau de la couche accès est le Contrôle d'Admission des Connexions (CAC) dont l'architecture doit nécessairement subir des modifications afin de mieux prendre en compte les impacts du canal et de la contre-mesure comme abordé plus haut.

Dans l'hypothèse d'un CAC à capacité fixe, de fortes dégradations sur le canal peuvent conduire à un repli des ressources disponibles au cours d'un appel actif. Il apparaît ainsi qu'un caractère adaptatif par rapport aux conditions de propagation doit être introduit dans le CAC. Avant de traiter plus en détail cette problématique, il convient d'établir un état de l'art sommaire des algorithmes CAC, ce qui permettra d'ouvrir la voie à un CAC amélioré.

4.3.1 Etat de l'art et classification des mécanismes CAC

Les algorithmes de contrôle d'admission des connexions peuvent être classés de la manière suivante :



Tout d'abord, un CAC peut utiliser comme paramètres dans ses calculs, soit uniquement les descripteurs de trafic normalisés : PCR, SCR, MBS (*Maximum Burst Size*), CDVT (*Cell Delay Variation Tolerance*), IBT (*Intrinsic Burst Tolerance*), etc.; soit alors des paramètres mesurés en ligne avec ou sans certains descripteurs de trafic. Les CAC qui procèdent à des mesures effectuées en ligne appartiennent à la famille des MBAC (*Measurement-Based Admission Control*). Les CAC s'appuyant sur les descripteurs de trafic sont plus adaptés aux connexions temps réel, tandis que les CAC MBAC aux trafics non-temps réel. Les mesures effectuées requièrent en général un petit nombre de paramètres venant du nouvel appel (le PCR en général).

Ensuite, un CAC se distingue fondamentalement par la nature de son critère d'admission d'une nouvelle connexion. Ce critère est l'objectif de performance visé dans sa stratégie d'admission. Il est tel qu'une nouvelle connexion ne peut être admise que si la valeur mise à jour de ce critère induite par l'acceptation de la connexion arrivante satisfait encore à un objectif global de ce critère de performance fixé pour le système. Deux familles concurrentes existent : le critère d'admission peut être du type bande équivalente (EB ou *Equivalent Bandwidth*) ou un paramètre orienté QoS tel que le taux de perte de cellules CLR. Les stratégies CAC par bande équivalente impliquent en général un contrôle et des calculs plus simples, mais l'obtention de la bande équivalente pour des trafics présentant le caractère de dépendance long terme (LRD ou *Long Range Dependence*) est loin d'être aisée en général. Les CAC par admission sur critère QoS, quant à eux, peuvent calculer ce critère soit à l'aide de formules analytiques exactes, soit par des modèles plus complexes empruntés par exemple à la théorie des files d'attente, soit encore par des mesures en ligne issues d'un processus MBAC. Une formulation des contraintes QoS de type délai et gigue (CDV, CDVT) peut et devrait être prise en compte dans la fonction de décision du CAC, mais ces stratégies n'ont pas reçu la même faveur dans la littérature que les stratégies s'appuyant sur le CLR.

Enfin, le délai total est la somme du temps de propagation aller-retour terre /satellite (RTD) et des délais dus aux interactions du CAC avec les autres fonctions de gestion des ressources, en particulier les files d'attente au sol et à bord. Lorsque le CAC prend en compte les effets des files d'attente le long des chemins virtuels, il s'agit d'un CAC orienté RSM (*Rate-Sharing Multiplexing*). Cette solution est coûteuse en ressources, car elle opère en temps réel, mais elle permet d'obtenir un taux d'utilisation du lien bien plus élevé. En outre, elle est très dépendante des modèles de trafic. La solution REM (*Rate-Envelope Multiplexing*) dans laquelle le CAC ne prend pas en compte les effets des files d'attente, est peu dépendante des modèles de trafic et plus simple à réaliser. Les CAC considérés ici sont uniquement du type REM.

4.3.1.1 Stratégies conventionnelles de contrôle d'admission

Il existe trois stratégies d'admission courantes dans un CAC :

4.3.1.1.1 Allocation du débit crête

Il s'agit ici d'une stratégie d'admission supposant l'allocation à toutes les connexions du débit crête spécifié dans le descripteur de trafic. Cette stratégie garantit des performances déterministes mais s'avère fort conservatrice. Dans SAGAM, en vue d'amoindrir ce caractère conservateur, les trafics temps réel sont traités en deux temps :

- (1) Les connexions CBR et VBR se voient allouer le PCR.
- (2) La capacité allouée est réajustée dynamiquement, pendant la durée de vie des connexions, au moyen des mesures des débits en sortie des files d'attente, effectuées par un mécanisme de contrôle de congestion dynamique en voie descendante, appelé BAC (voir §4.1.1).

4.3.1.1.2 Stratégies d'admission par bande équivalente

Ces stratégies, s'appuyant sur le calcul de la bande équivalente des connexions, permettent de donner une caractérisation des performances du réseau. L'attribution de la bande équivalente tire profit du multiplexage statistique. Cette approche exploite les caractéristiques déclarées du trafic. La réalisation pratique efficace du multiplexage statistique est une tâche ardue car ce dernier nécessite des calculs temps réel rapides et requiert une caractérisation des processus d'arrivée éventuellement mis en forme par les nœuds de multiplexage et de commutation. Le multiplexage du trafic vidéo VBR est l'objet d'un nombre foisonnant d'études particulières.

4.3.1.1.3 Stratégies d'admission à base du taux de perte de cellules CLR

Ces stratégies à base du CLR donnent une caractérisation de la QoS telle que vue cette fois par l'utilisateur. Le critère de CLR traduit une exigence de contrôle de congestion. La QoS est souvent spécifiée en terme de CLR et de délai de bout en bout dans le multiplexeur ATM modélisé couramment par une file d'attente de taille K (cellules) et avec un lien de sortie C . L'admission ou non d'une connexion entrante se ramène au niveau du CAC à vérifier si le critère de CLR pourra toujours être satisfait. Des cellules peuvent être perdues en raison de deux phénomènes distincts :

- ✓ Le taux d'arrivée des cellules en file d'attente est plus élevé que son taux de service, ce qui finit par provoquer un débordement de cette dernière et donc des pertes de cellules ;
- ✓ Les cellules contiennent des erreurs non corrigées par le mécanisme HEC de correction des en-têtes ; elles sont donc perdues en réception. Cette perte est due à l'état du canal de propagation, d'où la nécessité de convertir un indicateur de qualité de la liaison (paramètre de la couche physique) tel que le TEB en indicateurs de performances réseau comme le CLR.

La distinction entre les deux types de perte de cellules est souvent très mal clarifiée. A l'heure actuelle, il n'existe aucun contrôle d'admission introduisant l'effet de la dynamique du canal satellitaire Ka (couche physique), seul le processus d'arrivée des cellules est pris en compte. Une section spéciale a été consacrée à l'étude de la transformation du TEB en paramètres de performances QoS ATM tels que le CLR (cf. : §2.3.3.3.1) et en leurs distributions statistiques (cf. : §2.3.4).

L'estimation du CLR induit par les connexions actives et la connexion entrante peut être réalisée par diverses méthodes comme par exemple suivant une analyse spectrale dans laquelle les statistiques de deuxième ordre des connexions sont prises en compte [48].

4.3.1.1.4 Comparaison et limitations des trois stratégies d'admission

Les méthodes EB et CLR permettent de garantir des bornes QoS en terme probabiliste contrairement à la stratégie d'admission suivant le débit crête qui est déterministe.

Les méthodes EB sont performantes pour les systèmes ATM à haut débit car elles nécessitent moins de paramètres que les méthodes utilisant le CLR, et sont de fait moins complexes à mettre en œuvre. Cependant, l'approche par la bande équivalente souffre d'une limitation fondamentale : elle requiert, pour être précise, une description statistique complète des sources de trafic injectées. Par ailleurs, ces stratégies conventionnelles ne donnent des résultats optimaux qu'en régime permanent. Lorsque l'environnement varie et fluctue, les caractéristiques statistiques du réseau deviennent imprédictibles et les décisions prises sont alors inévitablement entachées d'erreur. Les méthodes conventionnelles s'appuyant sur la bande équivalente sont entachées d'une erreur d'estimation (due à la modélisation indispensable du trafic) et d'une erreur d'approximation (due aux calculs temps réel) [16]. Elles sont donc peu adaptées aux environnements dynamiques. La quasi-totalité des stratégies de contrôle d'admission proposées dans la littérature sépare les deux exigences QoS (CLR) d'une part, et bande équivalente d'autre part. Une approche combinant les deux critères QoS et EB est faite dans [53] en abandonnant la logique binaire en faveur de la logique floue qui introduit la notion d'intelligence de décision. Cette nouvelle approche non conventionnelle mériterait une attention particulière.

4.3.1.2 CAC basé sur l'intelligence de calcul artificielle

Le multimédia incorpore des types de services différents associés à des contraintes QoS hétérogènes, ce qui donne lieu à un grand nombre de combinaisons de profils et accroît considérablement la complexité analytique et algorithmique. La nature multidimensionnelle et évolutive du trafic conduit à introduire, pour pouvoir le caractériser le plus précisément possible, la notion d'intelligence de calcul (CI ou *Computational Intelligence*) comme alternative ou complément des mécanismes CAC utilisés conventionnellement. L'intelligence de calcul peut prendre deux formes principalement :

- ✓ Les réseaux de neurones (ANN ou *Artificial Neural Network*) ;
- ✓ La logique floue (FL ou *Fuzzy Logic*).

La logique floue convient bien pour traiter les problèmes faisant intervenir des grandeurs imprécises qui surviennent dans le monde réel, et possède la capacité de s'adapter à un environnement dynamique, fluctuant et bruité, mais ne dispose pas d'une faculté d'apprentissage lui permettant d'automatiser la construction d'une structure de règles et des fonctions membres de manière à optimiser les performances [16]. Par ailleurs, elle réduit les erreurs de décision rencontrées dans les méthodes CAC conventionnelles. C'est là précisément qu'une structure d'un réseau de neurones peut conférer à la logique floue cette fonction d'apprentissage, utile au CAC pour qu'il soit en mesure de s'adapter à toutes sortes de profils de trafics agrégés ou à des situations de trafics nouveaux, inconnus, sporadiques ou difficilement transcritibles en terme de paramètres de description de trafic. La logique floue permet ainsi, à partir d'un ensemble de règles prédéterminées, d'éviter les erreurs de fonctionnement dues à un apprentissage incorrect et de diminuer le temps d'apprentissage. Elle permet aussi de prendre en compte la variabilité temporelle des trafics temps réel (ce qui peut inclure entre autres la réduction de débit due à un passage dans un état dégradé du canal lorsqu'un mécanisme FMT est utilisé) qui peut se traduire par des événements rares (taux de perte de cellules CLR par exemple) qu'une stratégie CAC par mesure en ligne de type MBAC aurait dû mal à capturer.

Il peut être envisagé d'intégrer la logique floue directement dans un réseau de neurones, ce qui rend la décision CAC probabiliste plutôt que binaire et permet d'incorporer ainsi un ensemble de connaissance de domaine (similaire au raisonnement humain) dans la structure multicouche du réseau de neurones. Un certain nombre de descripteurs de trafic avec de plus, dans un système doté de contre-mesure, les instants de changement de capacité respectivement programmés (due à la couche planification) et stochastiques pourraient agir en tant qu'entrées du réseau de neurones. Un CAC avec une stratégie de décision par logique floue hybridée avec un mécanisme de mesures de type MBAC semble être une solution digne d'intérêt [16,48]. Ce mode de gestion de trafic robuste, non linéaire à contrôle distribué est présenté par exemple dans [11]. L'architecture NFCAC (*Neural Fuzzy CAC*) proposée par [16] constitue une autre variante de CAC hybride doté d'un cœur de décision formé par un moteur à logique floue et à réseau de neurones. Il allie les avantages apportés par les différentes approches mentionnées plus haut, tout en minimisant leurs inconvénients.

Il convient d'émettre les remarques suivantes :

- (a) Il n'existe pas d'études globales démontrant rigoureusement l'avantage des techniques CI sur les techniques traditionnelles.
- (b) Il y a eu très peu de réalisation matérielle de techniques CI et les études menées jusqu'à présent sont souvent parties d'hypothèses réseau simplificatrices.
- (c) Les opérateurs télécoms sont assez réticents vis-à-vis des techniques CI qui émergent, en raison d'un facteur risque évident et non négligeable.
- (d) Le modèle de CAC présenté ci-dessus paraît donner deux directions de recherche particulières :
 - (1) Etude des performances comparées des techniques CI et des techniques conventionnelles ;
 - (2) Etude de l'intégration d'un contrôleur à logique floue et à base de réseau de neurones multi-niveaux avec deux architectures possibles :
 - (i) Architecture complètement nouvelle à logique floue constituée de stratégies spécifiquement étudiées à chaque niveau ;
 - (ii) Assemblage de différentes stratégies isolées supervisées par un unique contrôleur à logique floue.

4.3.2 Propriétés recherchées pour un CAC optimisé

L'objectif ultime est d'élaborer une nouvelle architecture de CAC dynamique à capacité variable, qui soit capable d'effectuer, d'une part, une prédiction de trafic, et d'autre part une prédiction de canal, prenant en compte la variabilité du canal Ka. La prédiction de trafic constitue un volet entier d'investigation et a été abordée de façon extensive dans la littérature selon les angles qui ont été décrits précédemment et qui visent à atteindre les deux propriétés exposées dans les deux sous-sections suivantes. Cet aspect sera délaissé dans ce rapport. Seule la prédiction de canal, dans le contexte d'un système satellitaire en bande Ka muni d'une technique FMT à capacité variable, fera l'objet d'une attention minutieuse, de manière à rendre le CAC "prédictif". Cette propriété constitue la troisième propriété mentionnée ci-après. La réunion de la prédiction de trafic à la prédiction de canal est en revanche un problème nouveau qui peut être abordé soit à travers les méthodes d'intelligence de calcul artificielle, soit à travers l'aide multicritère à la décision [209].

4.3.2.1 Indépendance vis-à-vis des modèles de trafic

La plupart des stratégies CAC conventionnelles utilisent, dans le contrôle d'admission, les descripteurs de trafic normalisés SCR, PCR, IBT, MBS et CDVT, paramètres qui présupposent la possibilité de disposer de modèles bien déterminés pour toutes les sources de trafic utilisées, ce qui est loin d'être trivial pour le multimédia et amène à des développements analytiques très lourds, et ce pour les raisons suivantes :

- ✓ La diversité des modèles disponibles, poissonniens ou stochastiques ou autres ;
- ✓ L'agrégation de sources de trafics dont les comportements se différencient nettement les uns des autres : trafics à dépendance court-terme (SRD ou *Short Term Dependance*) et trafics à dépendance long-terme (LRD) ;
- ✓ L'inadéquation des descripteurs de trafics normalisés vis-à-vis du débit réel moyen, souvent même inconnu des sources ;
- ✓ La difficulté d'élaborer des méthodes précises et efficaces d'estimation en ligne des paramètres des sources de trafic qui permettent de rendre compte de leurs caractéristiques propres. Cette difficulté peut être contournée si la stratégie d'admission s'affranchit de toute caractérisation et de modèles paramétriques a priori des trafics utilisant les descripteurs de trafic, ce qui peut être une des justifications des algorithmes CAC de type MBAC dont le principe est la mesure en temps réel (en ligne) des sources de trafic après connexion pour déterminer leurs caractéristiques instantanées. En revanche, à cause de temps de calcul excessivement longs, des mesures en ligne destinées à estimer la probabilité d'occurrence d'événements rares telle que le taux de perte de cellules CLR, avec un intervalle de confiance raisonnable, ne sont pas préconisées.

4.3.2.2 Adaptabilité par rapport aux profils de trafic futurs

Le multimédia étant en évolution constante et rapide, il n'est pas superflu de considérer les divers types de trafic récents qui sont susceptibles de devenir courants dans un laps de temps très court (MPEG-4, flux audio MP3, etc.) ou d'anticiper sur les nouveaux trafics dont les modèles analytiques ne sont pas connus aujourd'hui. De plus, les flux agrégés peuvent relever de combinaisons de trafics les plus divers. Là encore, un modèle analytique apparaît non seulement lourd formellement mais aussi très consommateur en puissance de calcul. L'adaptabilité du CAC vis-à-vis des profils de trafics semble, dans ce contexte, appropriée. Cette adaptabilité peut être assurée par des techniques d'intelligence de calcul artificielle à base soit de réseau de neurones, soit de logique floue (cf. §4.3.1.2).

4.3.2.3 Prédicibilité

Deux sortes de capacité prédictive au niveau du CAC paraissent utiles dans le contexte de la présente étude.

- ✓ Anticipation sur les instants de réduction de la capacité disponible.
Ce point précis concerne un CAC à capacité non plus fixe mais variable. Il est développé en détail dans la section §4.5.
- ✓ Prédiction et allocation dynamique de la capacité future requise par les flux multimédia.
Il s'agit ici d'une allocation dynamique de bande par renégociation du contrat de trafic en cours de connexion et basée sur la prédiction. Ce mécanisme dynamique [19] se prête surtout aux trafics vidéo qui peuvent être pris en charge au travers du service ABR. Ceci permettrait de mettre en place des actions de rétroaction sur la source vidéo par l'intermédiaire de cellules RM (*Resource Management*) qui peuvent servir à indiquer le débit vidéo autorisé, régulé par des filtres de type LB (*Leaky Bucket*) placés dans l'UNI (*User to Network Interface*). Ce mécanisme est lié à la mise en place d'une couche d'adaptation ATM (AAL) spécifique pour le multimédia (utilisation de codage joint en particulier) comme mentionné dans [10] et traité minutieusement dans [64].

4.3.3 Autres problématiques liées au CAC

4.3.3.1 Effet de saturation

Lorsqu'un appel arrive au CAC, l'admission se déroule en réalité en deux étapes : tout d'abord, l'appel se voit allouer une ressource réservée ; cet appel doit ensuite être accepté par tous les nœuds situés sur le chemin virtuel source – destination établi avant que la ressource mise en réserve ne puisse être utilisée effectivement. Or l'admission peut se solder par un échec dans la deuxième phase. Dans ce cas, la ressource mise en provision doit être relâchée et les appels concernés également. L'accumulation des ressources provisionnées est un problème dans la mesure où leur relâchement engendre des délais supplémentaires ou des conflits de gestion qui peuvent être source de dégradation des performances. C'est ce qui est appelé l'effet de saturation ou « *thrashing* ». Dans SAGAM, la possibilité que le CAC reprenne la main lors d'une renégociation de contrat en cours de communication est envisagée [24], ce qui autorise interruption d'une procédure d'établissement de connexion en cours pour vérifier si la connexion peut être maintenue compte tenu d'un changement de configuration inopiné.

4.3.3.2 Gestion d'un trop grand nombre d'arrivées simultanées dépassant les ressources disponibles

Lorsque cette situation se présente, le CAC peut être amené à choisir une combinaison d'appels parmi ceux qui arrivent. Un tel choix est en général effectué suivant un critère de coût dans le but de maximiser les revenus des fournisseurs de service. Il s'agit là d'un problème d'optimisation de coût sous contraintes QoS qui dépend de la configuration envisagée au niveau de la couche planification.

4.3.3.3 Dépendance du CAC vis-à-vis des autres entités de gestion des ressources et du canal

Le CAC est généralement considéré comme un mécanisme d'admission indépendant des autres fonctions de gestion des ressources. Cette vision est néanmoins restrictive et ne conduit pas à des performances optimales parce que le comportement du CAC est étroitement dépendant des autres processus de gestion de ressources (DAMA, BAC, files d'attente, etc.). En particulier, il s'appuie sur la connaissance des ressources disponibles. Dans un système à capacité variable, le CAC sera donc corrélé dans son fonctionnement à la contre-mesure et à l'évolution du canal de propagation.

4.4 OPTIMISATION DE LA GESTION DES RESSOURCES DANS LE CAS D'UNE CONTRE-MESURE A BANDE TRANSMISE VARIABLE

Une bande transmise variable introduite dans le système par le déploiement de techniques de contre-mesure de type 2 ou 3 (cf. : §3.4.2) a des impacts significatifs sur la couche accès, car elle induit une modification d'architecture principalement au niveau du protocole d'accès multiple ainsi qu'au niveau de l'algorithme CAC. Ces derniers mécanismes doivent alors être conçus de telle manière qu'ils soient capables de remédier aux effets de cette bande transmise variable.

4.4.1 Effets d'une bande transmise variable due au codage adaptatif et à la réduction de débit

4.4.1.1 Réduction du débit

La réduction du débit affecte, tout d'abord, le processus de vidage des files d'attente, car le débit du lien en sortie des files s'en trouve réduit tandis que le débit des sources de trafic n'a pas changé, ce qui peut amener à des situations de débordement des files d'attente, c'est-à-dire à la perte de nombreuses cellules ATM (augmentation substantielle du taux de perte de cellules). En dernier recours, pour l'utilisateur final, une réduction du débit signifie une dégradation de la qualité de service, d'autant plus que certains types de services comme les trafics temps réel ou les trafics à boucle ouverte ne supportent pas bien les réductions du débit auxquelles ils sont très sensibles. Ainsi, une action correctrice particulière au niveau de la gestion de trafic peut s'avérer nécessaire pour minimiser la dégradation de la QoS. Il peut être envisagé, soit une régulation des débits source du côté des stations, par exemple au travers du service ABR qui permet une chaîne de rétroaction pour l'ajustement du débit source au débit autorisé par le réseau, soit un mécanisme adapté de vidage de file d'attente, cette dernière solution ayant des répercussions au niveau du mécanisme de l'allocation des créneaux. En outre, la réduction du débit peut entraîner la rupture des contrats de trafic négociés avec les utilisateurs.

Deuxièmement, une réduction du débit de transmission au niveau d'une station terrestre émettrice rallonge le temps de transmission des cellules à l'interface air, ce qui va avoir une répercussion directe sur le mécanisme d'allocation des créneaux au cœur du DAMA. Face à cette réduction du débit, le DAMA a la possibilité de réagir de deux manières : ou bien la taille des créneaux reste fixe ou bien elle peut varier. Dans le cas où elle reste fixe, cela veut automatiquement dire qu'il est nécessaire que, pour pouvoir transmettre la même quantité d'information utile contenue dans une cellule ATM, une station a besoin non plus d'un seul créneau mais de plusieurs, le nombre dépendant du facteur de réduction du débit. Sinon, la taille temporelle des créneaux dans la trame MF-TDMA requis pour transmettre la même quantité d'information utile peut être amenée à augmenter dans la même proportion que la réduction du débit. Dans les deux cas, la structure de la trame montante est par conséquent modifiée et le plan de fréquence est acculé à être réorganisé par nécessité.

Troisièmement, la réduction du débit impacte directement le mécanisme du CAC. En effet, une connexion caractérisée par un débit réduit requiert une capacité équivalente moins importante. Il est aisé d'anticiper que lorsqu'un nombre suffisant de connexions passe en débit réduit dans le système, la capacité équivalente résultante sera significativement modifiée par rapport à une situation de débit fixe. Ainsi, lorsque inversement un grand nombre de connexions passe inopinément en débit plus élevé, ceci sera perçu comme un événement de réduction agrégée de capacité pour les autres

connexions actives dont le débit n'a pas varié ainsi que pour les nouvelles connexions entrantes. En d'autres termes, ces deux types de connexion verront la capacité disponible dans le système diminuer, ce qui peut avoir des conséquences fâcheuses à la fois sur le maintien des connexions actives, et sur les décisions d'admission des nouvelles connexions. Le CAC opère par conséquent avec une capacité devenue *variable*, ce qui relève d'une logique entièrement différente de celle de la capacité fixe.

4.4.1.2 Changement du taux de codage

Un changement du taux de codage entraîne une variation du débit transmis, comme dans le cas d'une réduction brute du débit décrit précédemment, mais cette variation se fait dans le sens inverse du cas précédent :

- ✓ Une diminution du taux de codage, survenant lorsque les conditions météorologiques se dégradent, équivaut à une augmentation du débit de transmission (le codage devient plus fort, on rajoute de la redondance dans les données) ;
- ✓ Une augmentation du taux de codage intervient lorsque les conditions de propagation s'améliorent, entraînant ainsi une réduction du débit transmis (le codage devient plus faible, moins de symboles de redondance sont introduits dans les données).

Tous les effets sur la gestion des ressources mentionnés dans le paragraphe précédent s'appliquent donc de la même façon, mais il est à noter que, cette fois, l'accroissement ou la diminution de la capacité disponible pour le réseau ou requise par la station expérimentant le changement du taux de codage, intervient dans une moindre proportion.

Comme dans le cas de la configuration FMT n°3 de SAGAM (passage du mode 2 au mode 3), une réduction du débit peut se combiner avec une augmentation du codage (soit une diminution du taux de codage), ce qui pondère ainsi la réduction globale du débit transmis.

Cependant, il apparaît, avec le codage adaptatif, un nouveau facteur de dégradation des performances due à la redondance introduite par le codage. A débit utile égal, lorsque le codage augmente, la part des bits de redondance (*overhead*) augmente aussi, donc l'efficacité de transmission en est réduite d'autant. Ceci est d'autant plus significatif que le nombre de stations expérimentant un affaiblissement sur leur liaison montante est grand. L'inconvénient du codage adaptatif, par conséquent, réside dans le fait qu'il risque de rompre les garanties de bande négociées avec les utilisateurs lorsque la charge du réseau est élevée. Enfin, l'augmentation du codage peut entraîner des situations de congestion sur la liaison descendante [6]. Les trafics de données utilisant le protocole TCP (*Transmission Control Protocol*) ont la possibilité de réagir en cas de congestion, grâce à un mécanisme en boucle fermée. En revanche, les autres types de trafic, notamment les trafics temps réel et plus généralement les trafics en boucle ouverte, eux, ne sont pas adaptés à un changement du taux de codage. C'est à ce niveau qu'en particulier un CAC à capacité variable dont le rôle premier serait de prendre des décisions (allocation de bande) à partir de l'état futur prédit du canal, afin d'éviter le plus possible un rejet futur dû à la dégradation du canal de connexions ayant été préalablement admises, présente un intérêt.

4.4.2 Modifications du plan de fréquence

4.4.2.1 Plans de fréquence statique à forme d'onde variable

Le plan de fréquence originellement conçu pour SAGAM est statique au sens strict, la forme d'onde étant fixe avec des créneaux de taille constante. Ce plan de fréquence est usuellement utilisé dans des systèmes sans contre-mesure ou ne mettant en œuvre que le contrôle de puissance comme dans les configurations FMT n°1 envisagées en première hypothèse dans SAGAM. Il correspond par exemple à une distribution de porteuses comme suit :

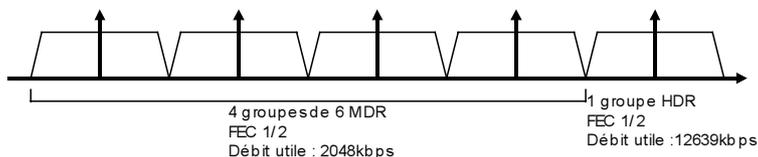


Figure 79 : Plan de fréquence statique à forme d'onde constante - MDR (*Medium Data Rate*) désigne les stations résidentielles à débit moyen, tandis que HDR (*High Data Rate*) désigne les stations à haut débit qui ne sont pas considérées ici.

L'utilisation d'une technique de contre-mesure de type 2 ou 3 introduit une forme d'onde variable ce qui nécessite l'élaboration d'un plan de fréquence approprié. Une méthode prenant en compte ces ajustements est donnée par un plan de fréquence qui reste statique en permanence dans le sens d'une répartition inchangée au cours du temps des différentes porteuses (sous-canaux) à l'intérieur d'un faisceau donné, mais chacune étant affectée d'un triplet (débit utile/taux de codage/PIRE) spécifique choisi parmi n disponibles, n étant le nombre de modes dans le dispositif FMT.

Par exemple, l'utilisation de la configuration FMT n° 3 revient en termes de plan de fréquence à remplacer le mode de codage unique (avec un contrôle de puissance sur les stations) représenté sur la figure 79, par trois triplets (débit

utile/taux de codage/PIRE), attribués aux stations en fonction de leurs conditions de propagation (le contrôle de puissance étant toujours conservé). Le nouveau plan de fréquence adopté est illustré par la figure ci-dessous :

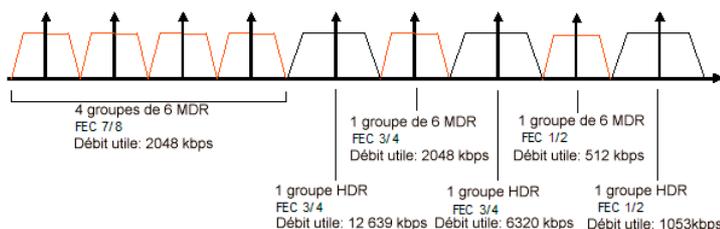


Figure 80 : Plan de fréquence statique à forme d'onde variable pour la configuration FMT n°3

Ce partage des porteuses par mode FMT vise à reproduire la répartition spatiale moyenne à un instant donné, sur la couverture délimitée par un faisceau, des conditions de transmission en termes des taux de codage affectés aux stations sur leur liaison montante, d'après les conditions météorologiques estimées sur une année moyenne, c'est-à-dire qu'il est supposé une répartition moyenne suivante :

- 24/36 \approx 67 % des stations transmettent en conditions d'air clair ;
- 6/36 \approx 17 % des stations expérimentent des conditions de propagation dégradées (l'atténuation sur leurs liaisons est entre 3 et 6.3 dB) ;
- 17 % de stations subissent des conditions de propagation fortement dégradées (l'atténuation se situe entre 6.3 et 10.6 dB).

De toute évidence, ce plan de fréquence statique qui ne correspond qu'à un moyennage sur le long terme sous-optimisera l'allocation fréquentielle des ressources car l'évolution instantanée des conditions de propagation à l'intérieur d'un faisceau peut sensiblement différer de la configuration définie ci-dessus, par exemple dans le cas où la couverture entière serait caractérisée par un temps clair.

Lorsqu'une station transmet à un débit dégradé, la durée de transmission d'une cellule à l'interface air sur la liaison montante augmente et il existe deux moyens élémentaires d'y faire face au niveau du DAMA (cf. : §4.4.1.1) :

- La taille des créneaux dans une trame reste constante, et dans ce cas le nombre de créneaux requis pour transporter une même quantité d'informations utiles varie.
- La taille des créneaux est autorisée à varier, devenant proportionnelle à la taille du créneau de référence (en air clair). Les taux de proportionnalité seront supposés entiers, afin que, dans une trame, le nombre de créneaux nécessaires dans un mode FMT dégradé pour héberger une cellule ATM, soit toujours un nombre multiple entier de créneaux de référence, ce qui suppose un mécanisme artificiel réalisé au niveau de la station, qui change en conséquence le débit de transmission.

La figure suivante illustre le principe pour la configuration FMT à trois modes :

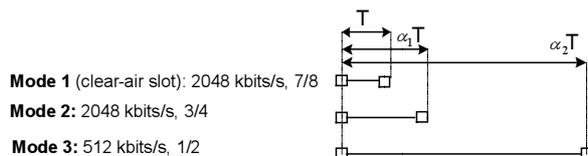


Figure 81 : Stratégie d'allocation adaptative à taille variable des créneaux dans le cas de la configuration FMT n°3. Ici, $\alpha_1 = 2$ (originellement 1.16) et $\alpha_2 = 8$ (originellement 7).

4.4.2.2 Plans de fréquence dynamiques à forme d'onde variable

De ce qui précède, un plan de fréquence *dynamique* avec des créneaux à nombre variable ou de taille variable semble être une solution qui améliorera encore l'allocation des ressources. La répartition des fréquences pour le faisceau ne reste plus statique : périodiquement, avec une période T_{plan} compatible de l'évolution des conditions météorologiques, le NCC détermine un nombre spécifique de porteuses affectées d'un mode FMT donné parmi ceux disponibles dans la configuration FMT choisie, en fonction du profil météorologique rencontré. Ce profil météorologique détermine le nombre plus ou moins grand de stations touchées par la pluie ainsi que les modes FMT à utiliser qui dépendent de l'intensité de la pluie. Ces informations peuvent être rendues disponibles par l'intermédiaire d'un modèle dynamique bidimensionnel du canal comme décrit dans la section §2.2. T_{plan} doit être grand par rapport à la fréquence de génération des FCR et se situe sur une échelle de temps comparable à celle de l'évolution lente de l'atténuation sur les liaisons montantes (de l'ordre de la minute).

Cette stratégie suppose que la capacité totale allouable à un faisceau en voie retour n'est plus considérée comme constante, c'est-à-dire que, dans le cas de la configuration FMT à trois modes, les nombres n_1 , n_2 et n_3 des porteuses (canaux) affectées respectivement des modes 1, 2 et 3 seront tels que :

$$n_1(t) \times 2048 \text{ kbit/s} + n_2(t) \times 2048 \text{ kbit/s} + n_3(t) \times 512 \text{ kbit/s} = C_{UL}(t) \leq C_{UL, \max}, \text{ où } C_{UL}(t) \text{ peut varier.}$$

Équation 40

4.5 ELABORATION D'UN CAC PREDICTIF A CAPACITE VARIABLE EXPLOITANT LA CONNAISSANCE DU CANAL

4.5.1 Motivations et contexte

Les CAC conventionnels décident ou non d'accepter un appel rentrant sur la base des ressources existant dans le système à l'instant *courant* de décision lorsque survient l'appel, *la capacité étant supposée constante* (c'est-à-dire que les ressources disponibles pour le CAC sont invariantes quand la dimension du système, c'est-à-dire le nombre d'appels actifs, ne varie pas). Or il existe des systèmes où la capacité devient variable.

Le réseau suivant illustre une situation de capacité variable : les connexions possèdent une priorité définie par la classe de service auxquelles elles appartiennent, et des connexions prioritaires comme la visioconférence se voient allouer de façon anticipée de la ressource afin d'être certaines de disposer des ressources réseau. Cependant, l'instant réel de début de connexion diffère de l'instant du début de la réservation des ressources. Ainsi, du point de vue des autres connexions de plus basses priorités, les ressources qui leur sont disponibles dans le réseau décroissent à l'instant où démarre réellement la connexion ayant la priorité la plus élevée. Par conséquent, de leur point de vue, l'activation effective de la connexion prioritaire se comporte comme un changement de capacité futur.

Un autre cas important est celui des systèmes incorporant un mécanisme FMT à capacité variable. Les stratégies CAC conventionnelles dans de tels systèmes conduisent à une gestion non optimale des ressources, puisque si des nouvelles connexions sont admises et qu'il survient juste après une réduction de la capacité, ces connexions préalablement admises risquent fort d'être rejetées a posteriori de façon prématurée. Sans action palliative, la probabilité de rejet des connexions ainsi induite peut être inacceptable. En effet, un rejet d'appels après admission est une action drastique, très contraignante pour l'utilisateur dans la mesure où il peut influencer notablement sur la QoS, en dégradant le taux de perte des cellules. La plupart des services ne tolèrent pas une telle procédure, car cette dernière peut conduire même jusqu'à la rupture simple d'un contrat de trafic négocié à la connexion. Une solution moins radicale qu'un rejet d'appels a posteriori serait que le CAC parvienne à prendre des décisions à l'instant courant t basées sur la connaissance d'une réduction *future* de capacité à $T = t + \Delta t$, dans le but de bloquer d'office les appels, sachant qu'ils seraient sinon rejetés à l'instant T^+ (cf. : Figure 82 ci-après).

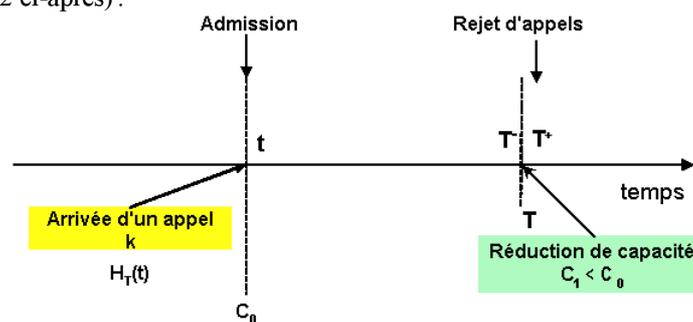


Figure 82 : Rejet a posteriori d'un appel préalablement admis

Dans cette perspective, plusieurs stratégies ont été proposées dans la littérature. Tout d'abord, il a été proposé des CAC prenant des décisions à partir à la fois de la charge de trafic courante et de la charge de trafic future à des instants discrets. Ces CAC supposent toujours la capacité fixe. Leur inconvénient est d'avoir à calculer systématiquement à différents instants la charge du trafic même si aucune variation de capacité n'a lieu. Une autre stratégie proposée est celle d'un CAC réservant des ressources par anticipation pour les connexions, ce qui suppose de pouvoir gérer le problème de « saturation », c'est-à-dire de la rétractation des ressources provisionnées par avance en cas d'échec des connexions (§4.3.3.1). Ces divers CAC opèrent encore à capacité fixe [18].

4.5.2 Principe général d'un CAC à capacité variable

De ce qui précède, un CAC évolué doit tenir compte, par anticipation, de la variabilité de la capacité dans le temps, ce qui introduit un caractère *prédictif* visant principalement à optimiser la probabilité de rejet a posteriori des appels préalablement admis. Il peut être profitable d'élaborer des algorithmes CAC spécifiquement adaptés aux systèmes à

capacité variable, dans lesquels la connaissance des instants anticipés (ou prédits) de changement de mode FMT devient un des critères du contrôle d'admission.

Cette section s'attache à décrire un algorithme CAC à capacité variable dont le principe théorique a été développé et largement décrit par Siwko et Rubin [18,107,108,125], et dont la stratégie d'admission dérive de la courbe de limite d'admission (ALC ou *Admission Limit Curve*) et qui est appliquée à des systèmes où les instants de diminution de la capacité surviennent de façon stochastique. Le cas du changement déterministe a été également abordé par Siwko et Rubin mais ne coïncide pas avec le système étudié. La courbe ALC est la courbe qui définit les conditions sous lesquelles tout CAC conforme doit rejeter un appel rentrant. Elle garantit aussi à tout CAC conforme une borne minimale pour la probabilité de blocage.

La mise en œuvre de ce CAC nécessite la connaissance et l'exploitation des instants de changement futurs de la capacité. La stratégie de CAC à capacité variable à base de l'ALC peut être appliquée moyennant certaines modifications ou adaptations au contexte particulier de la présente étude : les instants de réduction de capacité correspondent, ici, aux instants de commutation vers les modes FMT améliorés.

La stratégie de base présentée dans [18] s'applique à un contexte de satellite défilant à orbite basse (LEO) et possède les principales caractéristiques suivantes :

1. Changement de capacité unique ou multiple, un changement multiple étant la succession de changements uniques suffisamment espacés dans le temps les uns des autres ;
2. Changements de capacité cycliques ;
3. Changements de capacité programmés donc déterministes ;
4. CAC comprenant un contrôle d'admission et une stratégie de rejet a posteriori, la probabilité de rejet étant bornée par une valeur définie par l'utilisateur ;
5. La stratégie de rejet utilisée est fondée sur l'heuristique CVGH (*Capacity-Varying Greedy Heuristic*) ;
6. Les appels sont statistiquement identiques donc maximiser l'utilisation du canal revient à minimiser la probabilité de blocage.

L'hypothèse de satellites en constellation défilante n'intervient pas dans les équations développées dans [18], donc le principe du CAC reste valable dans le cas d'un satellite géostationnaire. Le contexte SAGAM présente les points particuliers suivants :

1. Pour l'ATM par satellite, les QoS négociées suivant les contrats des utilisateurs doivent être garantis. Il sera par conséquent nécessaire de vérifier si le rejet d'appels a posteriori garantit les QoS attendues, et de quantifier la dégradation éventuelle. A cette fin, la QoS requise par chaque classe de connexions doit pouvoir être traduite en termes de probabilité de rejet correspondante, et inversement.
2. Les changements de capacité dans le système sont d'ordre purement stochastique et sont engendrés par des commutations FMT dues aux affaiblissements sur les liaisons montantes.

4.5.3 Principales hypothèses et notations

- La *capacité du système* à l'instant t est définie comme la quantité maximale de ressource disponible pour des connexions nouvelles et les connexions existantes.
- La *dimension du système* est définie comme le nombre de connexions actives.
- Une classe de connexions *homogènes* sujettes à des variations affectant la ressource disponible pour cette classe est considérée.
- Les instants d'arrivée des connexions sont supposés distribués suivant une loi poissonnienne de taux d'arrivée moyen λ .
- Les durées de connexion sont des variables aléatoires indépendantes de fonction de distribution $B(s)$ et de moyenne $1/\mu$.
- Les changements de capacité sont supposés suffisamment éloignés les uns des autres de telle sorte que la probabilité d'observer plus d'un changement de capacité pendant la durée de vie d'une connexion quelconque est négligeable.
- Si la quantité de ressources nécessaires pour servir simultanément n connexions de la même classe est notée $R(n)$, alors $R(n)$ est une fonction monotone non-décroissante. L'inverse de la fonction $R(n)$ est défini par :
$$R^{-1}(r) = \max(n | R(n) < r).$$

Les notations suivantes seront adoptées :

- λ : taux d'arrivée poissonnienne des connexions

- $1/\mu$: durée moyenne de connexion
- $b(s)$: fonction de densité de probabilité (notée aussi PDF par la suite) des durées moyennes de connexion
- $B(s)$: fonction de distribution (notée aussi CDF par la suite) des durées moyennes de connexion
- T : instant de changement de capacité futur
- $g(s)$: PDF de T
- $G(s)$: CDF de T définie sur le support $[l, u]$ avec $l = \inf\{s | G(s) > 0\}$ et $u = \inf\{u | G(u) > 1\}$
- r_0 : capacité du système à t
- r_1 : capacité du système à T^+
- $C_0 = R^{-1}(r_0)$: capacité maximale à t
- $C_1 = R^{-1}(r_1)$: capacité maximale à T^+
- ε : seuil de probabilité de rejet fixé par l'utilisateur, et garanti par le réseau aux connexions individuelles
- $N(t)$: ensemble des connexions actives à t^-
- $\hat{N}(t) = N(t) \cup \{\text{la connexion arrivant à } t\}$:
- $n(t) = |N(t)|$: dimension du système à t^- .

La stratégie employée pour décider d'accepter ou non un appel arrivant à l'instant t consiste à considérer les futurs événements possibles conditionnés par l'admission de cette requête à t , puis à déterminer si ce futur conditionnel conduit à une probabilité de rejet dépassant le seuil limite fixé ε .

Dans les développements qui suivent, la capacité du système est exprimée en nombre de connexions qui peuvent être servies simultanément. Cette équivalence est possible car il a été supposé une classe de connexions homogènes. Pour des connexions hétérogènes, il est nécessaire de se ramener à une unité équivalente (comme par exemple, le nombre de créneaux sur la trame MF-TDMA montante ou le débit exprimé en kbit/s). Mais ce cas se traite comme une adaptation non-triviale de la stratégie originale à connexions homogènes.

4.5.4 Stratégie de rejet

Une stratégie de rejet peut se définir comme un ensemble de règles éventuellement probabilistes qui sélectionnent $\max(0, |N(t)| - C_1)$ connexions spécifiques à rejeter parmi les $|N(T)|$ connexions actives à T^- .

Soit un ensemble $N(T)$ de connexions.

Une stratégie de rejet \mathcal{D} induit une distribution de probabilité de rejet sur l'espace de tous les sous-ensembles de $N(T)$ de dimension $\max(0, |N(T)| - C_1)$. Il est donc possible d'affecter à chaque connexion k la probabilité marginale $P_{\mathcal{D}}(k, N(T))$ d'avoir cette connexion choisie parmi les connexions destinées au rejet. En raison de leur espace de probabilités sous-jacent, il est possible d'écrire :

$$\sum_{k \in N(T)} P_{\mathcal{D}}(k, N(T)) = \max(0, |N(T)| - C_1)$$

Équation 41 : Somme des probabilités marginales de rejet des connexions

Deux stratégies typiques élémentaires sont examinées ci-après. Soit $x = |N(T)| - C_1 > 0$.

4.5.4.1 Stratégie de rejet LCFD (*Last Come First Dropped*)

La stratégie de rejet \mathcal{L} LCFD consiste à rejeter en tout premier la connexion qui est arrivée le plus récemment. La stratégie \mathcal{L} se formalise de la façon suivante :

$$P_{\mathcal{L}}(k, N(T)) = \begin{cases} 1 & \text{si la connexion } k \text{ fait partie des } x \text{ connexions les plus récemment admises dans } N(T) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 42 : Probabilité de rejet d'une connexion dans la stratégie LCFD

Remarque :

Cette stratégie équivaut à pratiquer une politique de priorité chronologique sur le rejet. Lorsque toutes les connexions sont homogènes (même catégorie de service, même capacité requise, même contrainte QoS), si aucun critère de différenciation des connexions n'est envisagé, cette politique semble naturelle. En revanche, en cas de connexions hétérogènes, selon toute vraisemblance, le rejet LCFD risque fort de ne pas respecter les propriétés distinctives des connexions, et par conséquent de ne pas conduire à des performances optimales. Ce point doit faire l'objet d'une étude minutieuse.

4.5.4.2 Stratégie de rejet uniforme URD (*Uniform Random Dropping*)

La stratégie de rejet uniforme \mathcal{U} URD consiste à considérer que toutes les connexions ont la même probabilité d'être rejetées. Cela s'exprime de la façon suivante :

$$\forall k \in N(T) \quad P_{\mathcal{U}}(k, N(T)) = \frac{x}{C_1 + x}.$$

Équation 43 : Probabilité de rejet d'une connexion dans la stratégie URD

4.5.5 Stratégie d'admission

Dans une stratégie d'admission prédictive, outre les critères d'admission habituels (dimension du système à l'instant courant, âge des connexions, etc.), d'autres facteurs sont à considérer, dont certains sont de nature statistique :

- $C_1 = R^{-1}(r_1)$: nombre de connexions actives à T^+
- $g(s)$: PDF de T
- $B(s)$: CDF des durées de connexion
- ε : probabilité de rejet garanti aux connexions individuelles.

Le premier objectif d'un CAC prédictif de ce type est de satisfaire à la condition portant sur la probabilité de rejet. Une fois ce but atteint, le deuxième objectif est de maximiser le taux d'utilisation du CAC. Dans le cas où toutes les connexions sont statistiquement identiques, maximiser le taux d'utilisation revient à minimiser la probabilité de blocage.

4.5.5.1 Définitions

✓ **CAC « sans mémoire » :**

La PDF $g(s)$ de T et la CDF $G(s)$ de T sont supposées données. Alors une stratégie CAC est dite « sans état de connexion » ou « sans mémoire » si les seules informations utilisées dans les décisions d'admission sont :

- r_1 : capacité du système à T^+ ;
- r_0 : capacité du système à t ;
- $n(t) = |N(t)|$.

En d'autres termes, un CAC sans mémoire ne fait pas intervenir l'âge des connexions dans la décision d'admission.

✓ **CAC conforme :**

- Le doublet (C, \mathcal{D}) , où C est une stratégie CAC sans mémoire et \mathcal{D} une stratégie de rejet, est dit « conforme » si la stratégie CAC n'admet aucune connexion si la probabilité de rejeter cette connexion ou toute autre connexion active est plus grande que ε .
- Etant donnée une stratégie de rejet \mathcal{D} , un CAC C est dit « conforme par rapport à \mathcal{D} » si (C, \mathcal{D}) est conforme.
- Une stratégie CAC est dite « conforme » s'il existe une stratégie de rejet \mathcal{D} telle que (C, \mathcal{D}) soit conforme, autrement dit si la stratégie de rejet garantit une probabilité de rejet donnée sur la base des connexions individuelles.

4.5.5.2 Calcul de la probabilité de rejet

L'élaboration d'un CAC conforme requiert de pouvoir calculer la probabilité de rejet d'une connexion à n'importe quel moment. La probabilité de rejet calculée à t dépend du nombre de connexions actives à T qui, à son tour, dépend du nombre de connexions admises survenant après T . La probabilité de rejet d'une connexion k particulière calculée à t est donc telle que :

$$P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}) = \sum_N P[N(T) = N | \hat{N}(t), C] \cdot P_{\mathcal{D}}(k, N).$$

Équation 44 : Probabilité de rejet d'une connexion k calculée à l'instant t

Alors, la condition d'admission d'une connexion à l'instant t est donnée par :

$$\max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}) \leq \varepsilon.$$

Équation 45 : Condition d'admission d'une connexion à t

4.5.6 Courbe de limite d'admission (ALC)

4.5.6.1 Définitions préliminaires

Les notations sont les mêmes que celles définies plus haut. La stratégie ALC s'applique à un CAC conforme et sans mémoire.

- Soient $B(s)$, $G(s)$, C_1 et ε . Soit également une valeur u bornant la période d'observation. Alors un point (n, t) avec $-\infty < t < u$ est dit « admissible » s'il existe un doublet (C, \mathcal{D}) conforme tel qu'une connexion arrivant à l'instant t , le système étant de dimension n , puisse être admise par la stratégie CAC C .
- Les points (n, t) qui ne sont pas admissibles sont dits « inadmissibles. »
- **Région admissible** : ensemble de tous les points admissibles.
- **Région inadmissible** : ensemble de tous les points inadmissibles.
- **Types de connexion** :
Pour un CAC sans mémoire, il existe deux types de connexion à l'instant t :
 - Connexion de type 0 : connexion arrivant à t , en cours de contrôle d'admission ;
 - Connexion de type 1 : connexion précédemment active, encore active à l'instant t .

- **Probabilités de survie des connexions** :

Soit T un instant de changement de capacité. Les probabilités de survie conditionnelles pour les connexions de types 0 et 1 sont définies respectivement par :

$$\text{Type 0 : } q_0 = 1 - B(T - t) \quad (\text{Équation 46})$$

$$\text{Type 1 : } q_1 = \frac{1}{\mu} \int_0^{T-t} (1 - B(s)) ds \quad (\text{Équation 47})$$

q_0 et q_1 sont respectivement la probabilité pour un appel, arrivant et admis à t , d'être encore actif à T , et la probabilité pour un appel actif à t d'être encore actif à T .

- **Fonction de taux d'échec d'une distribution $B(s)$** :

La fonction de taux d'échec $h(x)$ d'une distribution (CDF) des durées de connexion $B(s)$, de PDF $b(s)$ est définie par :

$$h(x) = \frac{b(x)}{1 - B(x)}.$$

Équation 48 : Fonction de taux d'échec d'une distribution $B(s)$

Elle représente la densité de probabilité conditionnelle qu'un appel se termine étant donné qu'il est actif depuis x unités de temps. Si la fonction h est de plus non-décroissante, alors la distribution $B(s)$ est dite « à taux d'échec croissant » (IFR ou *Increasing Failure Rate*).

Les distributions uniformes, exponentielles, Gamma-2 avec $n \geq 1$, et demi gaussiennes sont des exemples de distribution à taux d'échec croissant.

Fonction Gamma-2 : $b(x) = 4\mu^2 x \exp(-2\mu x)$.

Fonction demi gaussienne : $b(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$, $x \geq 0$.

4.5.6.2 Frontière séparant la région admissible et la région inadmissible

La méthode suivante est appliquée : pour chaque point (n, t) , une stratégie de rejet $\mathcal{D}^*(n, t)$ optimisée pour (n, t) qui minimise $\max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D})$, sous l'hypothèse qu'une requête de connexion arrive à t et que $n(t) = n$, est construite. L'objectif est ici de minimiser les probabilités de rejet uniquement pour les connexions appartenant à $\hat{N}(t)$. La stratégie $\mathcal{D}^*(n, t)$ favorise ces connexions par rapport à d'autres connexions.

Soit $H = \hat{N}(t)$ un ensemble de connexions. Une stratégie de rejet \mathcal{D} peut être modifiée en une stratégie de rejet \mathcal{D}_H qui favorise les connexions de H en les rejetant en dernier. Cette stratégie \mathcal{D}_H peut être construite de la façon suivante :

1. \mathcal{D}_H choisit un sous-ensemble V de H de connexions à rejeter de la même façon que \mathcal{D} .
2. V est alors vérifié pour voir s'il y a des connexions de H qui peuvent être favorisées. Si oui, chaque connexion appartenant à H est remplacée par une connexion qui n'appartient pas à H , sous réserve de disponibilité. Un sous-ensemble modifié V^* de connexions à rejeter est ainsi obtenu.
3. V^* est rejeté.

A partir d'une stratégie \mathcal{D} et d'un sous-ensemble H donnés, il existe plusieurs stratégies \mathcal{D}_H possibles. Deux propriétés qui seront utilisées par la suite sont maintenant énoncées :

Propriété (ALC1) :

Soit H un ensemble quelconque de connexions, C une stratégie CAC quelconque, \mathcal{D} une stratégie de rejet et \mathcal{D}_G une modification quelconque de \mathcal{D} construite telle que décrite précédemment. Alors, l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\forall \text{ connexion } k \in H, P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}_G) \leq P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}).$$

Propriété (ALC2) :

Soient x un entier strictement positif, X l'ensemble $X = \{1, 2, \dots, x\}$, a et b deux constantes positives avec $b \leq ax$ et ω une fonction définie sur X telle que :

1. $\forall i \in X \quad 0 \leq \omega(i) \leq a$
2. $\sum_{i=1}^x \omega(i) = b$

Soit Ω l'ensemble de toutes les fonctions ω répondant aux critères ci-dessus. Alors : $\min_{\omega \in \Omega} \max_{i \in X} \omega(i) = \frac{b}{x}$.

La fonction qui réalise ce minimum est notée ω^* : $\forall i \in X, \omega^*(i) = \frac{b}{x}$.

En vertu de la propriété (ALC2), $\max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D})$ est minimisée si toutes les connexions de $\hat{N}(t)$ ont la même probabilité de blocage $P_k(s, \hat{N}(t), C, \mathcal{D})$ en $s = t$.

Or $P_k(s, \hat{N}(t), C, \mathcal{D})$ peut s'écrire : $P_k(s, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}) = \sum_N P[N(T) = N | \hat{N}(s), C] \times P_{\mathcal{D}}(k, N)$ (Équation 49).

Les valeurs que prend $P[N(T) = N | \hat{N}(s), C]$ diffèrent selon le type de connexion (type 0 ou type 1). Pour égaliser ces deux termes obtenus respectivement pour le type 0 et pour le type 1, est construite une stratégie de rejet modifiée $\mathcal{D}^*(n, s)$ qui se charge d'équilibrer les différences. Siwko et Rubin ont montré que l'égalisation est possible si la distribution des durées des connexions satisfait à la condition suivante :

$$\sum_{x=C_1+1}^n q_0 q_1^{x-1} (1-q_1)^{n+1-x} C_n^{x-1} \geq \sum_{x=C_1+1}^n \left[q_0 q_1^{x-1} (1-q_1)^{n+1-x} C_{n-1}^{x-2} \frac{x-1-C_1}{x-1} + q_1^x (1-q_0)(1-q_1)^{n-x} C_{n-1}^{x-1} \frac{x-C_1}{x} \right]$$

Équation 50 : Condition d'égalisation des termes relatifs aux connexions de type 0 et de type 1

Cette condition d'égalisation des probabilités pour les types 0 et 1 est satisfaite pour toutes les distributions des durées de connexion ayant un taux d'échec croissant.

En supposant la condition satisfaite, une approche pour déterminer $\mathcal{D}^*(n, t)$ consiste à effectuer une égalisation terme à terme pour différentes valeurs de x . Cela conduit à calculer plusieurs probabilités de rejet marginales :

✓ $W_{1b}(t, n, x)$: probabilité de rejet marginale calculée à T pour une connexion de type 1 active à t , étant donné que :

- $n(t) = n$, $|\hat{N}(t) \cap N(t)| = x$;
- La connexion est active à T ;
- La connexion de type 0 n'est pas active à T .

✓ $W_{1a}(t, n, x)$: même définition que $W_{1b}(t, n, x)$ excepté que la connexion de type 0 est active à T .

✓ $W_0(t, n, x)$: probabilité de rejet marginale calculée à T pour une connexion de type 0.

avec :

$$W_0(t, n, x) = \begin{cases} \frac{x-C_1}{n+1} + \frac{1-q_0}{q_0} \times \frac{q_1}{1-q_1} \times \frac{n-x+1}{x(n+1)} (x-C_1) & \text{pour } C_1 < x \leq n \\ \frac{n+1-C_1}{n+1} & \text{pour } x = n+1 \end{cases}$$

Équation 51

$$W_{1a}(t, n, x) = \begin{cases} \frac{n(x-C_1)}{(n+1)(x-1)} - \frac{1-q_0}{q_0} \times \frac{q_1}{1-q_1} \times \frac{n-x+1}{x(n+1)} \times \frac{x-C_1}{x-1} & \text{pour } C_1 < x \leq n \\ \frac{n+1-C_1}{n+1} & \text{pour } x = n+1 \end{cases}$$

Équation 52

$$W_{1b}(t, n, x) = \frac{x-C_1}{x} \quad \text{pour } C_1 \leq x \leq n$$

Équation 53

Une stratégie de rejet modifiée $\mathcal{D}^*(n, t)$ est alors construite de la façon suivante :

- $\mathcal{D}^*(n, t)$ rejette premièrement toute connexion admise après t suivant un ordre arbitraire, par exemple l'ordre inverse d'admission ;
- Si la nécessité se présente de rejeter d'autres connexions, un sous-ensemble V de $\hat{N}(t) \cap N(T)$ de dimension $|V| = \max(0, x - C_1)$ est sélectionné. La distribution de probabilité pour choisir V est telle que les probabilités marginales des connexions satisfont aux équations des probabilités marginales W_o, W_{1a}, W_{1b} .

Cette stratégie de rejet $\mathcal{D}^*(n, t)$ satisfait aux propriétés (ALC1) et (ALC2) énoncées précédemment et donc, si $n(t) = n$ et qu'une requête de connexion arrive à t , alors :

$$\max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}^*(n, t)) \leq \max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}) \quad (\text{Équation 54}).$$

De plus, pour toute stratégie CAC C , la probabilité de rejet d'une connexion de type 0 arrivant à t avec $n(t) = n$ peut être calculée au moyen de la formule suivante :

$$P_0(t, \hat{N}(t), \mathcal{D}^*(n, t), C) = \int_t^{+\infty} q_0 \sum_{x=C_1}^n \left[C_n^x q_1^x (1-q_1)^{n-x} W_0(t, n, x+1) \frac{g(T)}{1-G(t)} \right] dG(T)$$

Équation 55 : Probabilité de rejet d'une connexion de type 0, arrivant à t

Cette équation est monotoniquement croissante avec n . L'intégrale peut être calculée analytiquement avec un certain nombre de distributions $B(t)$ des durées de connexion et de distributions $G(t)$ des instants de changement de capacité. Pour d'autres, elle se calcule numériquement.

Ainsi, par construction, pour ce point (n, t) , la stratégie de rejet modifiée $\mathcal{D}^*(n, t)$ est telle que les probabilités de rejet des connexions de type 1 sont égales aux probabilités de rejet des connexions de type 0. Cette stratégie $\mathcal{D}^*(n, t)$ minimise donc $\max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D})$: l'objectif cherché est atteint.

4.5.6.3 Définition de l'ALC

Pour tout $t < T$, la courbe $L(t)$ est définie comme la valeur de n qui minimise le blocage des connexions à t (en maximisant n), tout en satisfaisant au critère de conformité $\max_{k \in \hat{N}(t)} P_k(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{D}) \leq \varepsilon$ pour sa paire (C, \mathcal{D}) optimale.

$$\text{Il vient donc : } L(t) = \max_n \left(n \int_t^{+\infty} q_0 \sum_{x=C_1}^n \left[C_n^x q_1^x (1-q_1)^{n-x} W_0(t, n, x+1) \frac{g(T)}{1-G(t)} \right] dT \leq \varepsilon \right).$$

Équation 56 : Equation de la Courbe de Limite d'Admission

Le lieu des points $(L(t), t)$ est appelé Courbe de Limite d'Admission (ALC).

4.5.6.4 Propriétés de l'ALC

- La courbe ALC $L(t)$ détermine le critère de rejet d'un appel rentrant pour tout CAC conforme. Autrement dit, aucune stratégie CAC conforme ne peut admettre une connexion arrivant à t si la dimension $n(t)$ du système est telle que $n(t) > L(t)$. Tous les points (n, t) avec $n \leq L(t)$ sont donc admissibles.

Cette propriété a des conséquences importantes. Elle signifie que même si l'ALC ne conduit pas à un CAC conforme, elle peut être utilisée comme borne inférieure de la probabilité de blocage de n'importe quel CAC conforme.

- **Notification anticipée de changement de capacité :**

En notant l la borne minimale de la CDF des instants de changement de capacité, si le temps est remonté à partir de l , il peut être constaté que les courbes ALC tendent vers l'infini à l'instant $l - \tau$ qui est à une distance finie de l , avec :

$$\tau = l - \max \left(t \int_{\max(l, t)}^{+\infty} q_t \frac{g(T)}{1-G(t)} dT < \varepsilon \right) \text{ et } q_t = \max(q_0, q_1)$$

Équation 57 : Borne supérieure de l'instant de notification anticipée du changement de capacité

τ peut être considéré comme la borne supérieure d'une notification anticipée de changement de capacité, nécessaire pour dérouler la stratégie CAC en vue de satisfaire à la probabilité de rejet requise, c'est-à-dire que si une réduction future de capacité doit avoir lieu à l'instant T , le CAC doit en être notifié au plus tard à l'instant $T - \tau$, sinon il ne pourra pas réagir à temps. Typiquement, τ est de l'ordre d'un multiple de la durée moyenne de connexion. En général, un changement de capacité peut être notifié par avance avec un temps correspondant à la durée de vie d'une seule connexion. Cette échéance est suffisante.

- **Non-conformité d'un CAC utilisant l'ALC comme frontière d'admission :**

L'ALC peut être utilisée comme base d'une stratégie CAC appelée \mathcal{A} qui admet une connexion à t si et seulement si $n(t) \leq \min(L(t), C_0 - 1)$, c'est-à-dire que cette stratégie utilise par défaut l'ALC comme frontière d'admission, sauf si la restriction apportée par la ressource courante disponible C_0 est plus contraignante. Une telle stratégie \mathcal{A} donne lieu à une probabilité de blocage plus faible que n'importe quelle stratégie CAC conforme.

Mais en réalité \mathcal{A} n'est pas conforme. De plus, le CAC \mathcal{A} s'appuyant sur l'ALC est construit sur la base de multiples stratégies de rejet modifiées $\mathcal{D}^*(n, t)$ pour différents points (n, t) alors qu'un système réel ne peut utiliser qu'une seule stratégie de rejet $\mathcal{D}^*(n, t)$ car il n'est ni imaginable ni possible d'élaborer quasiment en temps réel une stratégie de rejet adaptée à chaque point (n, t) . Par voie de conséquence, bien que \mathcal{A} soit une stratégie de CAC très attrayante puisqu'elle garantit une borne minimale pour la probabilité de blocage, elle ne peut pas être utilisée en tant que telle.

4.5.6.5 Exemple d'ALC avec une stratégie de rejet uniforme

Soient des valeurs fixées des paramètres C_1, T, μ et ε . La stratégie de rejet aléatoire uniforme \mathcal{U} (URD ou *Uniform Random Dropping*) est supposée utilisée. Soit $t < T$ donné. Soit enfin une stratégie CAC C_t qui autorise des admissions à $s < t$ si $n(s) < n$ et n'autorise pas des admissions après t , soit :

- Pour $s \leq t$, les appels sont admis si et seulement si $n(s) \leq n$.
- Pour $s > t$, pas d'appels admis.

Pour un CAC ainsi formé, le blocage est réduit lorsque n augmente. La valeur maximale de n est limitée par la contrainte que le CAC doit être conforme par rapport à \mathcal{U} . La probabilité de rejet la plus élevée pour (C_t, \mathcal{U}) est obtenue pour une connexion arrivant à $s = t$ avec $n(t) = n$ connexions encore actives. Après t , aucune autre connexion n'est admise et, par conséquent, la probabilité de rejet à t pour une connexion active à t est donnée par :

$$\begin{aligned} P_k(t, \hat{N}(t), \mathcal{U}, C_t) &= P[\text{appel } k \text{ actif à } T | \text{appel } k \text{ actif à } t] \times \\ &\sum_{x=C_1}^n P[x \text{ autres appels seront actifs à } T | n \text{ autres appels actifs à } T] \times \\ &P[\text{appel } k \text{ rejeté} | \text{appel } k \text{ actif à } T, x \text{ autres appels actifs à } T, \mathcal{U}] \\ &= p_t \sum_{x=C_1}^n C_n^x p_t^x (1-p_t)^{n-x} \frac{x+1-C_1}{x+1} \end{aligned}$$

Équation 58 : Probabilité de rejet uniforme d'une connexion active à t

où p_t est la probabilité de survie d'un appel (probabilité qu'un appel actif ou admis à t soit encore actif à T).

Pour des durées de connexion exponentiellement distribuées de moyenne $1/\mu$, $p_t = \exp(-\mu(T-t))$.

Dans ce cas, l'ALC est définie par :

$$L(t) = \max_{n \in \mathbb{N}} \left(n \left| \sum_{x=C_1}^n C_n^x p_t^{x+1} (1-p_t)^{n-x} \frac{x+1-C_1}{x+1} \leq \varepsilon \right. \right).$$

Équation 59 : Equation de l'ALC avec une stratégie de rejet uniforme et une distribution exponentielle des durées de connexion

4.5.7 CAC à instants de changement de capacité aléatoires (RCCT) basé sur l'ALC

La stratégie RCCT (*Random Capacity Change Time*) est utilisée en lieu et place de la stratégie CAC \mathcal{A} basée sur l'ALC définie plus haut et admettant une nouvelle connexion si et seulement si $n(t) \leq \min(L(t), C_0 - 1)$, car la stratégie \mathcal{A} n'est pas conforme.

4.5.7.1 Caractéristiques du CAC RCCT

Le CAC RCCT est caractérisé par les éléments suivants :

- ✓ Il utilise une stratégie de rejet \mathcal{L} de type LCFD.
- ✓ Les distributions des durées de connexion sont supposées à taux d'échec croissant (IFR).
- ✓ Les instants de réduction de la capacité sont supposés stochastiques.
- ✓ Sa courbe d'admission est très proche de l'ALC.
- ✓ Ses performances en terme de blocage sont proches de celles obtenues avec le CAC \mathcal{A} .

4.5.7.2 Principe du CAC RCCT

Soit a une requête de connexion arrivant à l'instant t (connexion de type 0 à t). $n(t)$ appels sont supposés actifs juste avant l'arrivée de l'appel a à t (appels de type 1). Pour toute stratégie CAC C , sous la stratégie de rejet \mathcal{L} , comme les distributions des durées de connexion sont à taux d'échec croissant, alors le maximum $\max_{k \in \hat{N}(s)} P_k(s, \hat{N}(s), C, \mathcal{L})$ en $s = t$ est réalisé pour la connexion a .

Du fait que les connexions sont rejetées dans l'ordre inverse de leur arrivée, le rejet d'une connexion ne dépend que des facteurs suivants :

1. La distribution des instants de réduction de capacité T , étant donné $T > t$;
2. L'état d'activité de la connexion a à T ;
3. Le processus de départ sur l'intervalle de temps (t, T) des $n(t)$ connexions de type 1.

Il en résulte, en utilisant ces trois conditions, que :

$$\begin{cases} P_a(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{L}) = 0 & \text{pour } n < C_1 \\ P_a(t, \hat{N}(t), C, \mathcal{L}) = \int_t^{+\infty} \sum_{x=C_1}^n C_n^x q_0 q_1^x (1-q_1)^{n-x} \frac{g(T)}{1-G(t)} dT = P_{a_drop}(n) & \text{pour } n \geq C_1 \end{cases}$$

Équation 60 : Probabilité de rejet d'une connexion a arrivant à t

L'intégrale peut être calculée analytiquement pour un certain nombre de distributions de T . Pour d'autres, le recours à une résolution numérique est nécessaire.

La courbe de frontière d'admission du CAC RCCT est définie par :

$$M(t) \equiv \max(m | P_{a_drop}(m) \leq \varepsilon)$$

Équation 61 : Courbe de frontière d'admission du CAC RCCT

Le CAC RCCT admet une connexion au temps t , si et seulement si :

$$n(t) \leq \min(M(t), C_0 - 1)$$

Équation 62 : Critère d'admission d'une connexion dans un CAC RCCT

Les courbes de la figure 83 ci-après illustrent les performances en nombre d'appels servis de l'ALC et de la stratégie RCCT pour une distribution exponentielle des durées de connexion et trois distributions différentes des instants de réduction de capacité : distributions exponentielle, demi-gaussienne ou hyper-exponentielle à deux termes. La capacité C_1 à l'instant T^+ juste après une réduction de capacité a été choisie égale à 50, et la probabilité de rejet fixée à 10^{-2} . Siwko et Rubin ont montré que la stratégie RCCT suit de très près les performances du CAC ALC dans les conditions de fonctionnement les plus usuelles.

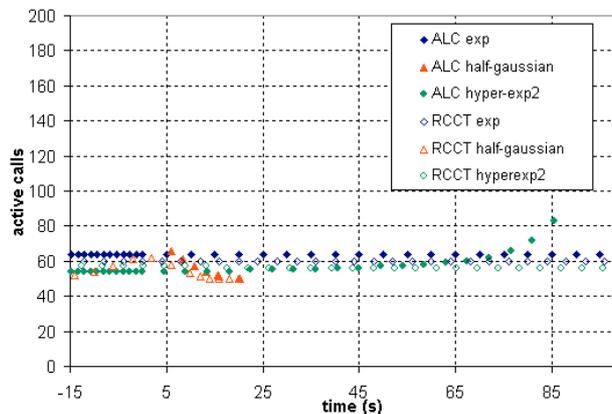


Figure 83 : Courbes ALC et RCCT pour une distribution exponentielle des durées de connexion ($\mu = 0.1$) et diverses distributions d'instant de réduction de capacité, avec $C_1 = 50$ et un objectif de probabilité de rejet fixé à $\varepsilon = 0.01$.

4.5.7.3 Extension multi-classe du CAC RCCT

4.5.7.3.1 Analyse de l'applicabilité du CAC basé sur l'ALC à SAGAM

Parmi les diverses variantes de CAC basées sur l'ALC qui ont été décrites précédemment, il convient de remarquer que la stratégie RCCT, qui correspond au cas d'instant de réduction de capacité stochastiques, présente un algorithme relativement aisément réalisable dans OPNET, et est par ailleurs applicable à la configuration SAGAM moyennant des adaptations qui font l'objet de cette section.

4.5.7.3.2 Hypothèses fondamentales du modèle RCCT

Le CAC RCCT repose sur les hypothèses sous-jacentes impératives suivantes :

(HYP1)	Le CAC opère sur une <u>classe de connexions homogènes</u> .
(HYP2)	Les connexions sont supposées <u>distribuées suivant une loi poissonnienne</u> de taux d'arrivée moyen λ .
(HYP3)	Les durées de connexion sont des variables aléatoires <u>indépendantes</u> de CDF $B(s)$ et de moyenne $1/\mu$.
(HYP4)	Les instants de réduction de capacité sont supposés suffisamment éloignés les uns des autres de telle sorte que la probabilité d'observer plus d'un changement de capacité pendant la durée de vie d'une connexion quelconque est négligeable.

4.5.7.3.3 Adaptations à SAGAM

La confrontation de ces hypothèses fondamentales requises par le modèle du CAC RCCT basé sur l'ALC à la configuration SAGAM montre qu'elles ne sont pas toutes satisfaites par cette dernière. L'objectif visé et donc de proposer une architecture de CAC qui permette d'appliquer l'algorithme RCCT, par le biais d'extensions aménagées et d'adaptations nécessaires.

a) Approximation multi-classe du CAC RCCT

La première hypothèse, celle d'un CAC mono-classe opérant sur un même et unique type de connexions requiert à l'évidence une extension du CAC RCCT au cas multi-classe, c'est-à-dire au cas de connexions appartenant à des classes de service ATM différentes, et ayant des caractéristiques statistiques différentes.

Il existe dans la littérature un grand nombre de modèles mathématiques [114,115] de systèmes multi-services à capacité constante, dans lesquels les connexions sont représentées par un modèle de Poisson de taux d'arrivée moyen λ et dont les durées suivent une distribution exponentielle négative. Ces modèles permettent de calculer les probabilités de blocage soit à l'aide d'une formule analytique en forme de produit, soit à l'aide d'une méthode récursive [113,114]. Une solution élégante serait de coupler de façon formelle cette approche avec la stratégie CAC RCCT pour rendre cette dernière parfaitement multi-classe. Etant donné que cette dernière approche nécessite des développements formels supplémentaires qui peuvent être lourds et délicats, elle est laissée comme axe de développement théorique futur du CAC.

La solution proposée consiste plutôt à découper le CAC en sous-modules CAC virtuels notés CAC_i affectés chacun à une catégorie de service ATM spécifique, notée $MTC_i, 1 \leq i \leq 5$ - ces services étant CBR, rt-VBR, nrt-VBR, ABR et UBR dans cet ordre de priorité décroissante. Par ailleurs, une autre hypothèse forte est imposée : pour chaque classe de service ATM, toutes les sources de trafic doivent être identiques et leurs générateurs d'appel également.

Il est à noter que l'hypothèse de sources de trafic toutes identiques statistiquement pour chaque catégorie de service est très forte et bien sûr irréaliste. Elle relève d'un souci de simplification supplémentaire. Mais l'étude n'étant pas tournée vers la sensibilité du simulateur en termes de performances à la nature du trafic, cette hypothèse est amplement suffisante et permettra déjà de dégager des résultats pertinents sur les performances du système.

Chaque sous-CAC $CAC_i, 1 \leq i \leq 5$ ne traite que les appels générés par les M_i sources de trafic $j, 1 \leq j \leq M_i$, actives dans le réseau - M_i est supposé invariant ici, alors qu'en réalité, ce nombre est une variable stochastique -, appartenant tous au même type de service MTC_i . Les appels relatifs à la source de trafic j sont modélisés par des arrivées poissonniennes de taux d'arrivée λ_{ij} et des durées distribuées suivant une loi exponentielle décroissante de moyenne $1/\mu_{ij}$: $F_{ij}(t) = 1 - \exp(-\mu_{ij}t)$ pour $1 \leq j \leq M_i$. L'agrégation de ces appels homogènes à l'entrée de chaque sous-CAC CAC_i peut être vue comme une superposition en parallèle de M_i distributions exponentielles décroissantes [130] telle que le représente la figure ci-après :

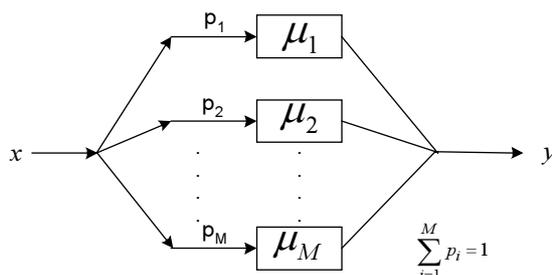


Figure 84 : Superposition en parallèle de M distributions exponentielles

L'agrégation de ces distributions équivaut à considérer les variables aléatoires représentant les durées des connexions comme combinées en parallèle, avec pour chacune d'elle la probabilité p_j , $1 \leq j \leq M_i$ d'apparaître.

La variable stochastique résultante pour la totalité des appels issus des M_i sources de trafic de la classe MTC_i a alors comme distribution :

$$F_i(t) = \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} F_{ij}(t) = 1 - \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} \exp(-\mu_{ij}t)$$

Équation 63

car $\sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} = 1$.

La durée moyenne résultante des connexions est : $\frac{1}{\mu_i} = \sum_{j=1}^{M_i} \frac{p_{ij}}{\mu_{ij}}$ (Équation 64).

En supposant que dans les simulations OPNET, les stations sont actives en permanence, il est naturel de considérer que les probabilités d'activation des appels relatives aux M_i sources de trafic sont aussi uniformes, soit :

$$\forall i \in \{1,2,3,4,5\} p_{ij} = \frac{1}{M_i}, \text{ pour tout } j / 1 \leq j \leq M_i$$

Donc :

$$F_i(t) = 1 - \sum_{j=1}^{M_i} \frac{1}{M_i} \exp(-\mu_{ij}t) \text{ et } \frac{1}{\mu_i} = \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} \frac{1}{\mu_{ij}} \text{ (Équation 65).}$$

La distribution résultante des durées de connexion devient hyper-exponentielle au lieu d'être exponentielle.

Il est important de noter que le processus d'appels agrégés de classe MTC_i ainsi formé n'est plus un processus de Poisson, car la distribution des durées de connexion n'est pas exponentielle de taux d'arrivée moyen λ_i . L'hypothèse fondamentale (HYP2) n'est donc pas vérifiée. **Il convient par conséquent de vérifier à travers les simulations le degré de dépendance du CAC par rapport à l'hypothèse poissonnienne des appels.**

b) Filtrage des instants de réduction de capacité

Les courbes (cf. chapitre 5) montrant le déclenchement du mécanisme FMT durant un événement de pluie, pour une seule station donnée (donc pour une seule liaison montante) laissent entrevoir que les instants de réductions de capacité sont bien suffisamment éloignés les uns des autres, de telle sorte que l'hypothèse fondamentale (HYP4) se trouve vérifiée. En revanche, lorsque plusieurs stations interviennent, compte tenu du facteur de variabilité spatiale des cellules de pluie, de la dépendance de la contre-mesure vis-à-vis des conditions météorologiques dans le faisceau considéré, ainsi que de la localisation des différentes stations, il devient dans la pratique très difficile de prédire la distribution résultante des événements de réduction de capacité. Ceci est d'autant plus vrai que le nombre de stations augmente.

Une fonction de filtrage des événements de réduction de capacité, dans le but d'avérer l'hypothèse (HYP4), afin de rendre valide le CAC RCCT dans le système SAGAM étudié, est ainsi à prévoir. Le rôle d'une telle fonction est d'émuler un contrôle des changements intempestifs et trop fréquents de capacité, qui doit en principe être réalisé par la couche physique. Lorsqu'une connexion est active, cette fonction filtre des requêtes de réduction inopinées de capacité afin que la probabilité qu'il y ait plus d'un événement réduction de capacité sur la durée de vie de la connexion soit très faible. Ce filtrage peut se faire selon un critère de priorité ou de coût qui peut conduire par exemple à éliminer au niveau du CAC les requêtes de commutation vers un mode FMT amélioré à partir des modes les moins dégradés qui s'avèrent les moins nocifs pour les performances du système.

5 CHAPITRE 5 :

**PLATE-FORME DE SIMULATION RESEAU
INCORPORANT DES INFORMATIONS DE
PROPAGATION**

5.1 PRINCIPE FONCTIONNEL DE LA PLATE-FORME

La plate-forme de simulation OPNET développée dans le cadre de cette thèse et décrite dans ce chapitre présente l'aspect innovant suivant : elle est construite dans un environnement de simulation réseau mais intègre des données issues de la propagation et émule aussi bien l'évolution du canal sur le moyen terme (une heure) avec une granularité temporelle court terme (la seconde) que le comportement d'une technique de contre-mesure adaptative à bande transmise variable dénommée configurations FMT n°3.

Le principe général de la plate-forme de simulation est représenté sur la figure suivante :

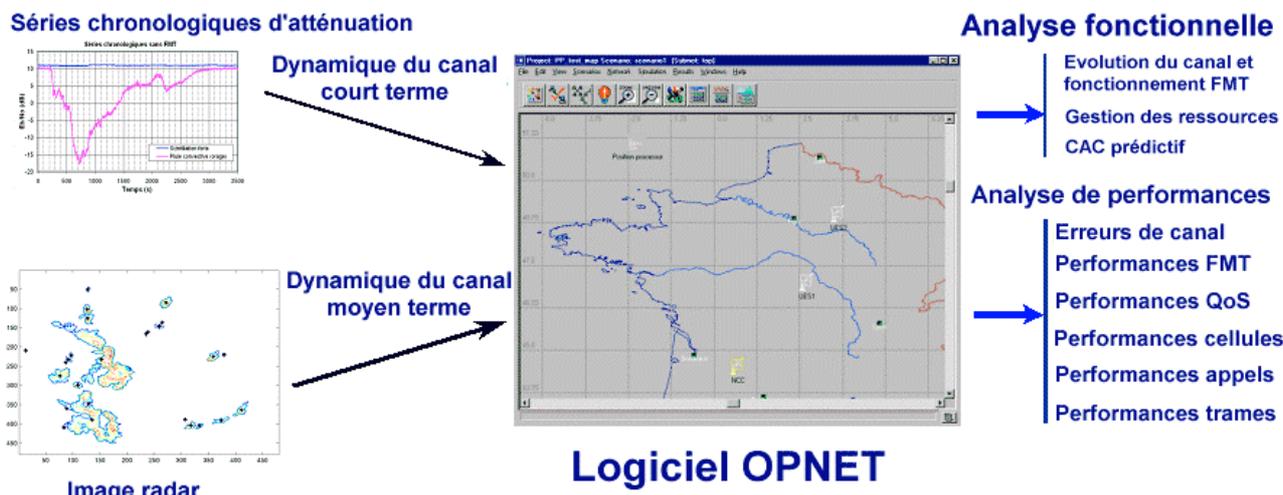


Figure 85 : Principe fonctionnel de la plate-forme de simulation OPNET

Les informations relevant du canal sont des entrées injectées dans la plate-forme. Elles sont de deux types :

- ✓ Des séries chronologiques d'atténuation E_b/N_0 stockées sous forme de fichiers ASCII à deux entrées (cf. : Figure 86 ci-dessous). Ces séries chronologiques cadencées à 1 Hz sur une heure ou plus permettent de reconstituer une dynamique court terme (quasi-temps réel) du canal, formée par les variations lentes du canal dues à la pluie, et par les variations rapides dues à la scintillation d'amplitude. Les fichiers sont lus par le simulateur OPNET en début de simulation, et les échantillons d'atténuation sont stockés en mémoire.

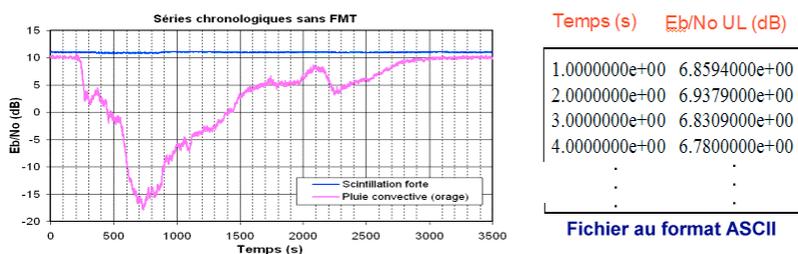


Figure 86 : Format d'un fichier de séries chronologique d'atténuation

- ✓ Une image radar représentant un champ de réflectivité (ou d'intensité de précipitation de façon équivalente) sur une zone géographique définie, image à partir de laquelle sont extraites les caractéristiques topologiques des cellules de pluie (positions et paramètres EXCELL [112,149]). Cette information radar permet d'extrapoler la dynamique moyen terme du canal au moyen de la variabilité spatiale de la pluie traitée par le modèle de propagation bidimensionnelle décrit dans la section §2.2.

5.2 DESCRIPTION DE L'ARCHITECTURE DE LA PLATE-FORME

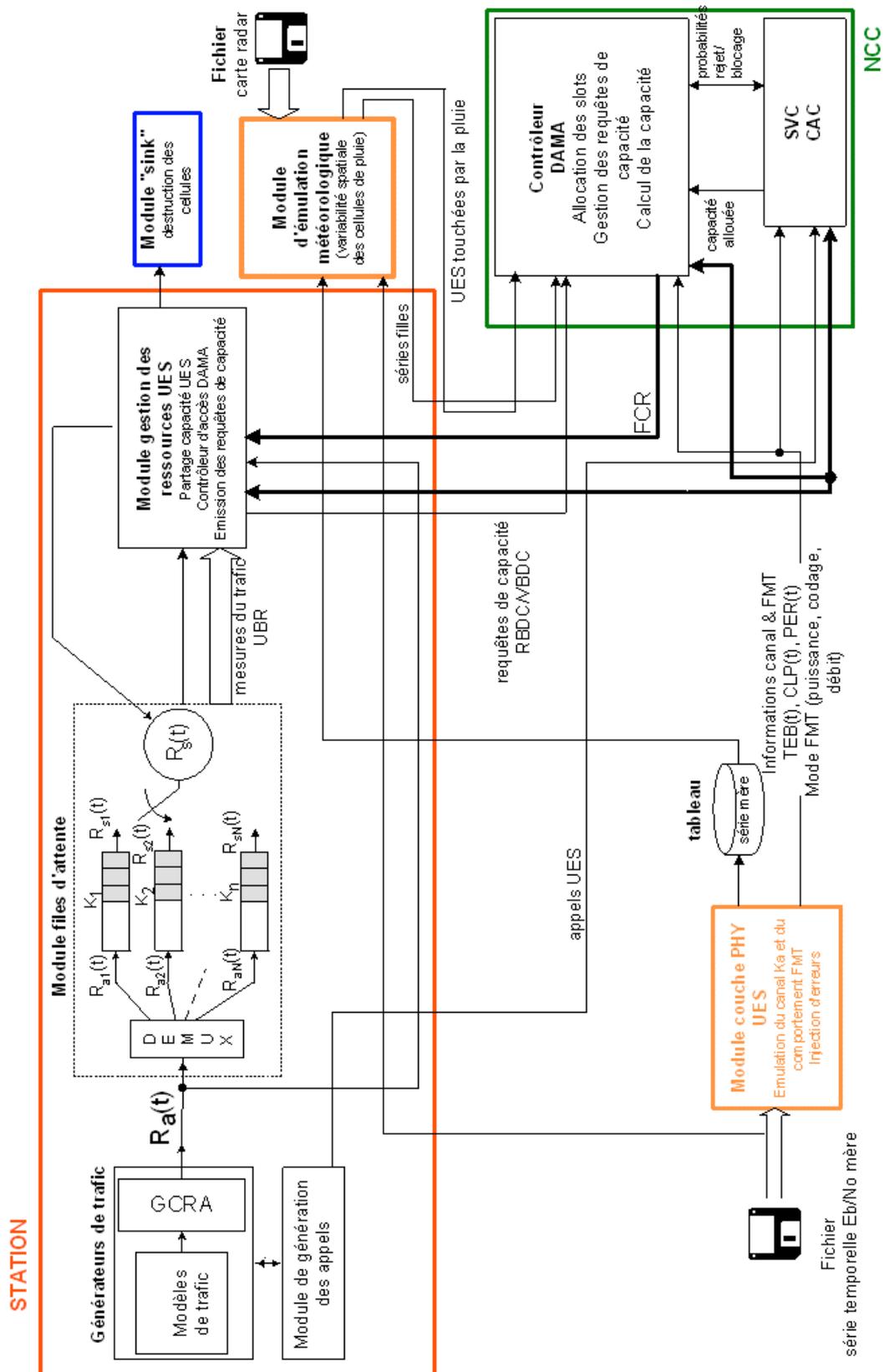


Figure 87 : Schéma synoptique de l'architecture du simulateur OPNET

La figure précédente présente une vue synoptique de l'architecture de la plate-forme de simulation développée. Cette plate-forme de simulation est constituée de cinq modèles de nœuds (*node*) au sens d'OPNET qui peuvent être classés sous deux catégories de modules interdépendants :

- ✓ Un ensemble orienté réseau constitué des modules suivants :
 - N nœuds stations terrestres (UES), tous identiques, N étant variable suivant le scénario sélectionné. Une seule station a été représentée sur le schéma synoptique (bloc rouge).
 - Le nœud centre de contrôle réseau (NCC) qui gère le contrôle d'accès aux ressources radio (MAC) et les procédures d'établissement et de contrôle d'admission des connexions (SVC et CAC). Ce nœud est représenté par le bloc vert.
 - Un nœud de destruction (*sink*) des cellules ATM générées par les sources de trafic (bloc bleu).
- ✓ Un ensemble composé de deux modules orientés couche physique :
 - Le module "Couche PHY UES" dont le rôle est d'émuler l'évolution court terme du canal Ka au moyen d'une série chronologique dite "mère" du rapport signal sur bruit E_b/N_0 et le comportement associé de la FMT dont l'affectation effective de mode (taux de codage et débit) est réalisée de façon centralisée au niveau du contrôleur DAMA du NCC.
 - Le module météorologique qui émule la variabilité spatiale de la pluie en exploitant les informations issues d'une carte radar définissant les positions et les paramètres géométriques et EXCELL des cellules de pluie. Ce module permet de dupliquer la série chronologique mère d'atténuation en autant de séries chronologiques dites "filles" d'atténuation affectant les liaisons montantes qu'il y a de stations. Il permet également de rendre compte d'une évolution à plus moyen terme du canal, à mesure que le front de pluie se déplace.

Les différents modules et leur fonctionnement sont détaillés dans les sections qui suivent.

5.2.1 Modules réseau

Dans tous les modules réseau réalisés au sein du simulateur, les fonctions de traitement des cellules sont uniquement localisées au niveau de la couche ATM en tenant compte, pour certaines fonctions, des interactions avec des processus ou informations situés sur la couche physique. En particulier, les traitements au-dessus de la couche ATM (entre autres la couche AAL) ne sont pas modélisés.

5.2.1.1 Modèle de station terrestre

Le nœud OPNET PP_UES_MDR2 modélisant une station terrestre MDR de type résidentiel à débit moyen est constitué des processus suivants qui émulent la génération de trafic et d'appels, et certaines fonctions de la couche accès :

- ✓ Deux processus distincts de génération de trafic appartenant à deux classes de service ATM différents :
 - Une source de trafic téléphonique de classe CBR modélisée par une source markovienne classique à deux états PP_onoff_source_MDR2 ;
 - Une source de trafic de classe UBR de nature sporadique émulant du trafic FTP et des transferts de données au-dessus de TCP(UDP)/IP sur ATM, modélisée par un processus MMPP à 2 états (SPP) PP_SPP_datasource_simp.

Chacune de ces sources peut être activée ou désactivée séparément et leurs caractéristiques de trafic sont paramétrables.

- ✓ Deux générateurs d'appels (un associé à chaque source de trafic) dont les durées suivent une distribution exponentielle négative et dont les arrivées sont des événements poissonniens. Ces générateurs sont réalisés par des sources tout ou rien classiques réalisées dans le processus PP_CallGen1.

La gestion des ressources est effectuée par le processus PP_sat_access_MDR2 qui comprend l'agent DAMA et effectue les fonctions suivantes :

- ✓ Tamponnage des cellules générées par les sources de trafic en file d'attente constituée de deux sous files d'attente dédiées respectivement aux catégories de service ATM CBR et UBR.
- ✓ Vidage des files d'attente par un ordonnanceur des cellules suivant un mécanisme de priorité stricte dans l'ordre CBR > UBR, qui autorise les cellules à accéder aux créneaux qui leur ont été alloués dans la trame montante MF-TDMA.
- ✓ Réception et lecture du rapport de configuration de trame FCR provenant du contrôleur DAMA, qui détermine l'allocation de capacité octroyée à la station au moyen des informations suivantes : nombre de créneaux et instant de début de transmission du bloc de créneaux alloué, et en cas d'activation de la FMT, mode FMT autorisé.
- ✓ Calcul des requêtes de capacité RBDC en dynamique à partir d'une mesure du nombre de cellules ATM UBR arrivant en file d'attente à l'intérieur d'une fenêtre temporelle de longueur paramétrable, cette capacité RBDC étant calculée de telle sorte que la file d'attente puisse être vidée. Les requêtes sont ensuite transmises au contrôleur

réseau NCC par voie OBR dans un créneau de synchronisation (SYNC) alloué à la station suivant une périodicité paramétrable fixée par défaut à 30 trames (soit 900 ms pour une trame de 30 ms).

5.2.1.1.1 Sources de trafic

Les caractéristiques des deux types de sources de trafic utilisées dans chaque station sont données dans le tableau ci-dessous :

Type de trafic	Modèle utilisé
Trafic voix téléphonique (CBR)	Source tout ou rien avec des périodes d'activité et de silence distribuées suivant une loi exponentielle décroissante, de durées moyennes respectives $T_{ON} = 3.52$ s et $T_{OFF} = 0.65$ s. La sporadicité de la source est donc de 1.185. Le débit PCR est paramétrable. Il est de 64 kbit/s par défaut.
Trafic sporadique généré par FTP et des transferts de données au-dessus de TCP(UDP)/IP sur ATM (UBR)	MMPP à 2 états, de paramètres : - Taux d'arrivée respectifs dans les états 1 et 2 : λ_1 et λ_2 (taux d'arrivée) ; - Durées moyennes des états 1 et 2 : μ_1^{-1} et μ_2^{-1} . Par défaut, la source est à PCR = 256 kbit/s et SCR = 21.33 kbit/s (sporadicité de 12), soit : $\lambda_1 = 256$ kbit/s ; $\lambda_2 = 2094.65$ bit/s ; $\mu_1^{-1} = 0.04$ s et $\mu_2^{-1} = 10.44$ s .

Tableau 28 : Caractéristiques des sources de trafic

a) Source de trafic téléphonique

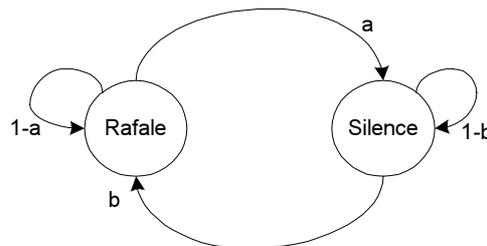


Figure 88 : Modèle de source markovienne à deux états

Les paramètres caractérisant la source sont donnés dans le tableau suivant :

Durée moyenne d'une rafale (égale à MBS)	$T_{ON} = \frac{1}{a}$
Durée moyenne d'un silence	$T_{OFF} = \frac{1}{b}$
Temps d'inter arrivée moyen des cellules émises suivant une distribution de Poisson	$T = \frac{1}{PCR}$
Débit crête de la source	PCR
Nombre de paquets moyen par rafale	$\frac{1}{aT}$
SCR	$SCR = m = \frac{a^{-1}}{T(a^{-1} + b^{-1})}$
Sporadicité de la source	$\gamma = \frac{a^{-1} + b^{-1}}{a^{-1}} = \frac{PCR}{SCR}$
Facteur d'activité de la source	$\beta = \frac{SCR}{PCR}$

Tableau 29 : Paramètres de la source téléphonique markovienne à deux états

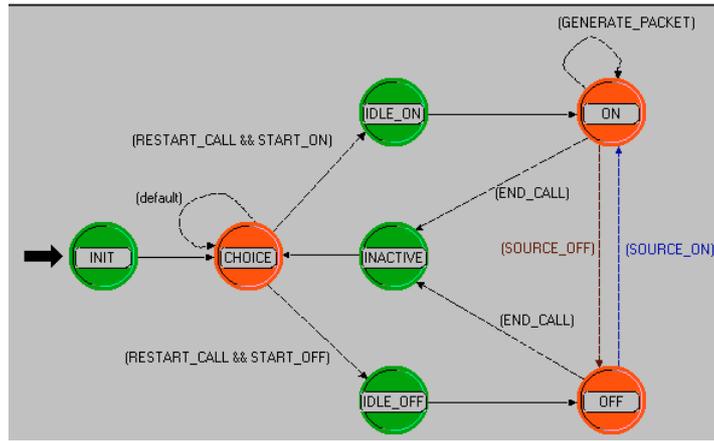


Figure 89 : Processus OPNET PP_onoff_source_MDR2 modélisant une source de trafic téléphonique de type markovien à deux états

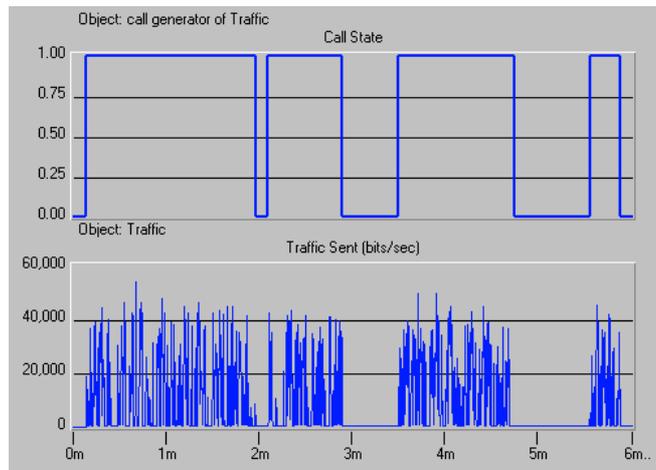


Figure 90 : 90(a) : Etat des appels [1 se réfère à l'état actif et 0 à l'état de repos] d'une source de trafic téléphonique (figure du haut) - 90(b) : Evolution de son débit binaire (figure du bas)

b) Source de trafic de données

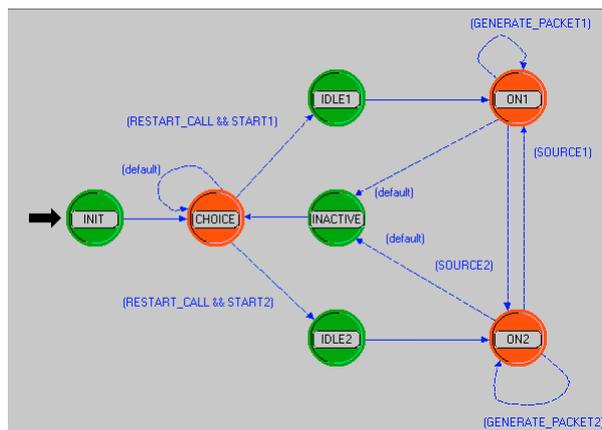


Figure 91 : Processus OPNET PP_SPP_datasource_simp modélisant une source de trafic de données de type MMPP-2

5.2.1.1.2 Générateurs d'appels

Les générateurs de trafic et les générateurs d'appels sont placés dans les nœuds UES. A chaque générateur de trafic est associé un générateur d'appels.

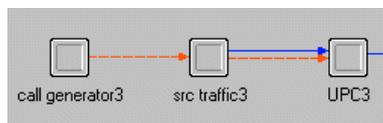


Figure 92 : Processus de génération d'appels, de génération de trafic et GCRA

Les appels sont générés avec des arrivées poissonniennes de taux λ paramétrable et des durées d'appel distribuées suivant une loi exponentielle décroissante de moyenne μ^{-1} également paramétrable.

5.2.1.1.3 Organe de contrôle des paramètres du trafic (UPC)

A chaque source de trafic temps réel téléphonique est associé un organe de contrôle des descripteurs du trafic (débit crête et tolérance sur la gigue) déroulant l'algorithme GCRA (*Generic Cell Rate Algorithm*) réalisé au niveau UPC (*Usage Parameter Control*).

5.2.1.1.4 Agent MAC DAMA

L'agent MAC DAMA, délocalisé dans le nœud station terrestre, fait partie de l'ensemble DAMA. Il comprend plusieurs fonctions de traitement au niveau cellules ATM qui sont décrites ci-après.

a) Files d'attente

L'ensemble file d'attente est constitué de deux files d'attente distinctes, une par classe de service ATM, avec la priorité d'ordonnancement des cellules suivante : CBR > UBR.

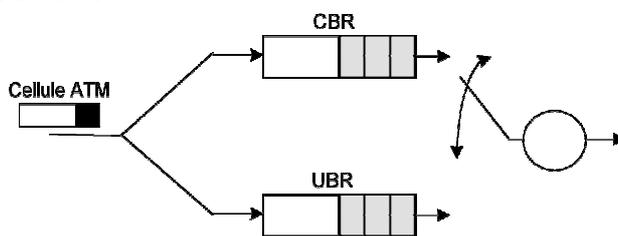


Figure 93 : Files d'attente servies par priorité stricte

Le trafic de cellules ATM généré par les sources de trafic est orienté vers l'une des deux sous-files d'attente suivant sa classe de service ATM.

Le vidage des files d'attente est assuré suivant une priorité stricte, c'est-à-dire que la file d'attente CBR doit être servie avant la file d'attente UBR à hauteur de la capacité n (exprimée en cellules transmissibles) allouée à la station, cette capacité représentant l'ensemble formé par la capacité continue souscrite (CRA ou *Continuous Rate Assignment*) égale au débit crête de la source téléphonique et de la capacité RBDC allouée en dynamique grâce aux requêtes de capacité mesurant le débit des cellules UBR. Plus explicitement, si le nombre n_{CBR} de cellules dans la file CBR est inférieur à n , alors n_{CBR} cellules sont servies, et la file UBR pourra transmettre au maximum $n - n_{CBR}$ cellules. Sinon, si n_{CBR} est plus grand que n , seules n cellules CBR seront transmises dans la trame montante, et aucune cellule de la file UBR ne pourra être transmise. Ce fonctionnement est conforme aux spécifications du DVB-RCS.

Les dimensions des files sont calculées par la méthode de la capacité équivalente de manière à garantir un taux de perte de cellules (CLR) inférieur à une valeur paramétrée par l'utilisateur.

b) Ordonnanceur des cellules

Les fonctions de l'ordonnanceur des cellules sont les suivantes :

1. Orienter les cellules contenues dans le trafic généré par les sources de trafic dans la sous-file d'attente correspondant à la classe de service appropriée.
2. Réceptionner et lire les FCR reçus du contrôleur réseau NCC toutes les supertrames, puis mémoriser les informations relatives à l'allocation octroyée à la station pour la supertrame (nombre total de créneaux, positions et modes FMT des créneaux alloués à la station).
3. Vider les files d'attente suivant une stratégie de priorité stricte et à hauteur de la capacité allouée à la station.
4. Transmettre des cellules dans la trame montante MF-TDMA dans les créneaux spécialement alloués à la station.
5. Compter les cellules ATM stockées dans la file d'attente UBR à l'intérieur d'une fenêtre temporelle de longueur paramétrable, dans le but de mesurer le débit du trafic rentrant dans la file d'attente UBR afin de calculer la valeur des requêtes de capacité RBDC. Cette mesure est associée à l'activation d'un compteur RBDC_Timer donnant le temps mesuré depuis la dernière mesure. Le paramètre RBDC_period définit le temps moyen nécessaire (100 ms par défaut) pour obtenir une estimation de la requête RBDC.
6. Générer des requêtes de débit en dynamique RBDC par mode OBR uniquement (dans un mini-créneau SYNC de synchronisation). Un contrôle sur l'émission des requêtes RBDC est effectué : aucune requête n'est émise si

la demande n'a pas assez évolué par rapport à la demande précédente, l'écart minimal étant un paramètre fixé par défaut à 16 kbit/s. La valeur de capacité transmise via la requête correspond au débit mesuré du trafic UBR nécessaire pour vider la file d'attente UBR.

c) Calcul et transmission des requêtes de capacité

Pour les modes VBDC et RBDC d'allocation de capacité, la norme DVB-RCS définit deux possibilités de signalisation pour transmettre les requêtes de capacité : soit par mode « requêtes dans la bande » (IBR), soit par mode « requêtes hors bande » (OBR). Le mode IBR se décline en plusieurs variantes dont la méthode dite de « piggybacking » (littéralement : *porter quelqu'un sur le dos*) dans laquelle la requête de capacité est rajoutée à un champ SAC au début d'une salve. En mode OBR, chaque station se voit périodiquement (par exemple, toutes les 30 trames, soit 900 ms) attribuer un créneau SYNC qu'elle peut utiliser pour transmettre une requête de capacité si nécessaire. Les requêtes de capacité sont calculées à l'intérieur d'une fenêtre temporelle à partir des mesures du débit des cellules à l'entrée des files d'attente UBR des stations, de telle sorte que leurs valeurs permettent de vider ces files d'attente tout en garantissant un délai CTD (*Cell Transfer Delay*) maximal de transfert de cellules de bout en bout. Le simulateur ne prend en charge actuellement que le mode OBR.

5.2.1.2 Modèle de satellite

Le traitement embarqué et la liaison descendante n'étant pas étudiés ici, le satellite n'est pas modélisé.

5.2.1.3 Nœud Interface

Ce nœud appelé PP_interface réalise deux fonctions :

- ✓ Destruction des cellules ATM transmises par les stations (processus dit "sink") afin de ne pas encombrer la ressource mémoire.
- ✓ Définition des variables globales de la plate-forme.

Il possède la priorité (définie comme un attribut du modèle) la plus élevée.

5.2.1.4 Modèle de centre de contrôle réseau (NCC)

Le nœud NCC PP_NCC_MDR2 comprend deux sous-modules :

- ✓ Le contrôleur DAMA (processus PP_DAMA_Cller_MDR2) ;
- ✓ Le module CAC (processus PP_CAC_ext).

5.2.1.4.1 Processus contrôleur DAMA

Ce module gère l'affectation des ressources à l'ensemble des stations actives dans le système. Il s'appuie essentiellement sur le DAMA développé par Alcatel Space dans le cadre du projet SAGAM et conforme aux spécifications de la norme DVB-RCS.

a) Modes d'allocation de la capacité

Le contrôleur DAMA utilise un mécanisme d'allocation de créneaux normalisé DVB-RCS permettant dans le cas présent deux modes d'allocation de capacité sur les quatre spécifiés par le DVB-RCS :

- ✓ Allocation CRA
- ✓ Allocation RBDC (*Rate-Based Dynamic Capacity*)

avec l'ordre de priorité CRA > RBDC.

• Allocation CRA

L'allocation de capacité continue (ou réservée) CRA à hauteur du débit crête est destinée au service CBR. Dans la réalité, l'allocation CRA est prise en compte au moment de l'entrée dans le réseau de la station, et s'appuie sur la souscription CRA de cette dernière. Le CRA est défini comme la somme des débits crête des sources de trafic de la station. Dans le cas présent, le CRA se réduit au débit crête de la source téléphonique. Le contrôle suivant est alors effectué :

$$\sum_{UES \in \text{faisceau (UL + DL)}} CRA(UES) < \text{Capacité}_{\text{totale}}(\text{faisceau}).$$
 Dans le simulateur toutefois, la phase du contrôle d'entrée

des stations dans le réseau n'est pas réalisée, les stations étant supposées actives dès le départ et pendant toute la durée de la simulation.

- **Allocation RBDC**

L'allocation dynamique de capacité exprimée en débit RBDC concerne le service UBR et est effectuée à partir des requêtes de capacité RBDC envoyées par les stations, et stockées en tampon dans le NCC. Un mécanisme de compteur permet de limiter dans le temps la durée de vie des requêtes. Chaque requête i stockée en tampon contient les informations suivantes :

Requête i : UES_ID (identificateur de l'UES), Nb_Rstd_Créneaux (nombre de créneaux requis)

La capacité RBDC, contrairement à la capacité CRA, n'est pas totalement garantie. Elle n'est garantie, pour une station donnée, qu'à hauteur d'un paramètre BDC (*Booked Dynamic Capacity*). L'allocation RBDC se décompose ainsi en deux sous-allocations :

- ✓ Allocation de capacité garantie BDC dans la trame courante : elle est égale à la valeur de la requête RBDC lorsque cette dernière est inférieure à BDC. Cette capacité garantie aux stations dépend de la souscription BDC de chaque utilisateur et est un paramètre défini comme un attribut des nœuds stations. La valeur de BDC pour les sources de trafic de données est fixée à la valeur de leur débit moyen SCR.
- ✓ Allocation effectuée en *round robin* de capacité non-garantie dans la trame courante (NBDC ou *Non-Booked Dynamic Capacity*).

avec comme ordre de priorité BDC > NBDC.

La procédure d'allocation des créneaux aux différentes stations est déroulée par le contrôleur DAMA à chaque période d'allocation de la façon suivante :

- ✓ Les paramètres BDC et maxRBDC (débit maximal autorisé pour une allocation RBDC) de l'allocation RBDC sont mis à jour d'après les souscriptions des stations, et en respectant la condition suivante :

$$\sum_{UES \in \text{faisceau}} BDC(UES) < \text{Capacité}_{\text{totale}} - \sum_{UES \in \text{faisceau}} CRA(UES)$$

Équation 66 : Contrôle effectué sur la somme totale des BDC

- ✓ Comme à chaque période d'allocation, seul un nombre entier de créneaux par trame est alloué, la partie décimale du BDC appelée "crédit" est cumulée sur plusieurs trames avant d'être convertie en valeur réelle d'allocation RBDC.
- ✓ La capacité RBDC allouée restante au-dessus de BDC (NBDC) est partagée de façon équitable entre les différentes stations.
- ✓ La durée de vie des requêtes RBDC pour chaque station est de RBDC_timeout trames, où RBDC_timeout est un nombre entier. Cette période est plus longue que la durée d'une supertrame (par défaut RBDC_timeout = 36). Un compteur se met en marche dans une station chaque fois que celle-ci envoie une requête RBDC ; lorsque le compteur atteint la durée de vie spécifiée, la requête RBDC en cours est remise à zéro. Si le contrôleur DAMA reçoit, avant la fin du compteur, une autre requête de capacité provenant de la même station, la valeur précédente mémorisée en file d'attente est mise à jour avec la nouvelle valeur. Au niveau des stations, un contrôle est effectué sur les valeurs des mesures de débit utilisées pour former les requêtes de capacité RBDC : ce n'est que lorsque la nouvelle mesure diffère du débit mesuré précédent d'un écart minimal RBDC_threshold (par défaut fixé à 16 kbit/s) que cette mesure est envoyée dans une requête RBDC au NCC. Le paramètre RBDC_threshold permet d'économiser des requêtes en diminuant leur fréquence d'émission quand le trafic n'a pas suffisamment évolué. Un dernier paramètre RBDC_period détermine la longueur de la fenêtre de mesure du débit RBDC dans les stations. Il est fixé par défaut à RBDC_period = 160 ms. Dans une station donnée, le débit RBDC est estimé en calculant le nombre de cellules UBR dans la file d'attente UBR pendant l'intervalle de temps RBDC_period.
- ✓ Les allocations RBDC et NBDC non nulles sont transmises dans le FCR généré à chaque période d'allocation.

b) Algorithme de remplissage des créneaux dans une trame

Le remplissage d'une trame montante est supposé "linéaire" au sens que le mécanisme cherche avant tout à allouer tous les créneaux d'une porteuse i , avant d'allouer ceux de la porteuse suivante $i+1$, et ceci sans retour en arrière possible après l'allocation réussie d'un bloc de créneaux, ni sur les porteuses (fréquence) ni sur les créneaux (temps).

Dans le but d'accélérer les durées de simulation, une configuration réduite de porteuses et de capacité a été considérée, comme décrit dans la section §5.3.1. Le nombre de créneaux disponibles dans chaque trame varie selon la configuration utilisée et l'activation ou non de la FMT.

La configuration des créneaux dépend de l'activation ou non de la contre-mesure. Le plan de fréquence est supposé fixe mais sa configuration varie également suivant que la contre-mesure est activée ou non.

• **Contre-mesure désactivée et créneaux de taille fixe unique**

Les créneaux conservent la même taille unique qui est celle d'une porteuse à 2048 kbit/s (soit 128 créneaux dans une trame de 30 ms). Tous les créneaux d'une trame ont le même taux de codage. Pour chaque trame montante, dans le cas d'une configuration système normale, 30 porteuses à 2048 kbit/s sont disponibles pour l'ensemble des stations du faisceau, ce qui porte à 60 Mbit/s la capacité totale par faisceau dans une trame montante MF-TDMA, soit encore 3840 créneaux. Dans la configuration de capacité "réduite" envisagée, le nombre de porteuses ainsi que la capacité disponible totale par trame sont définis dans la section §5.3.1.

Les créneaux SYNC réservés à la transmission des requêtes de capacité par voie OBR sont assignés en début de trame avec une périodicité SYNC_period fixée par défaut à 30 trames.

• **Contre-mesure n°3 activée et créneaux de taille variable**

Dans ce mode de fonctionnement, le plan de fréquence reste statique en permanence, mais avec une répartition des porteuses par faisceau caractérisées par des formes d'onde variables, définie comme suit :

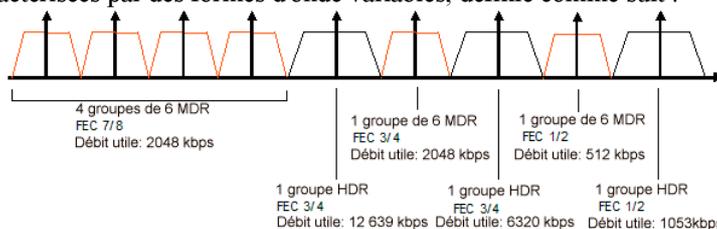


Figure 94 : Plan de fréquence statique avec créneaux de durée variable pour la configuration FMT n°3

Ce plan de fréquence se traduit concrètement par les caractéristiques suivantes pour chaque trame (en supposant une durée de trame de 30 ms) :

- 128 créneaux en mode 1 de durée $T = 0.234375$ ms par porteuse, avec 24 porteuses à 2048 kbit/s dédiées affectées du taux de codage 7/8, soit une capacité de 48 Mbit/s ;
- 109 créneaux en mode 2 de durée $T = 0.2734375$ ms par porteuse, avec 6 porteuses à 2048 kbit/s dédiées affectées du taux de codage 3/4, soit une capacité de 12 Mbit/s.
- 18 créneaux en mode 3 de durée $T = 1.640625$ ms par porteuse, avec 6 porteuses à 512 kbit/s dédiées affectées du taux de codage 1/2, soit une capacité de 3 Mbit/s.

Ces chiffres sont résumés dans le tableau suivant :

Mode FMT	Nombre de porteuses	Débit (kbit/s)	Taux de codage	Nombre de créneaux par porteuse	Durée de créneau (*) ($T = 30 \text{ ms}/128$)	Capacité (Mbit/s)
1	24	2048	7/8	128	T	48
2	6	2048	3/4	109	1.167T	12
3	6	512	1/2	18	7T	3
Capacité totale par trame (Mbit/s)						63

Tableau 30 : Plan de fréquence fixe à créneaux de taille variable pour la configuration FMT n°3

c) **Génération du plan d'allocation FCR**

A la fréquence des supertrames, chacune formées de allocation_period (par défaut 4) trames, le contrôleur DAMA génère un plan d'allocation (FCR) transmis à toutes les stations afin de les informer de la capacité qui leur est allouée et des instants où elles peuvent transmettre leurs cellules dans les créneaux de la trame MF-TDMA, ainsi que du mode FMT dans lequel elles sont autorisées à transmettre, lorsque le mécanisme FMT est activé.

Chaque FCR ne décrit qu'une trame de chaque période d'allocation. Les autres trames suivantes de la période d'allocation se voient appliquer la même allocation.

d) **Algorithme d'affectation du mode FMT**

Seul le mécanisme FMT SAGAM à trois modes tel que décrit dans la section §3.2 a été réalisé dans le simulateur. En cas d'activation de la FMT, le NCC détermine, à la fréquence de mise à jour d'une supertrame, les modes FMT à

(*) Ici, les durées des créneaux dans les modes FMT dégradés ne sont pas des multiples entiers de la durée T du créneau en air clair. Idéalement, comme présenté dans §4.4.2.1 cela devrait être le cas, mais nécessiterait une mise en forme artificielle des débits de transmission au niveau des stations.

attribuer aux stations actives dans le réseau. Ces modes seront utilisés par ces dernières pour transmettre leurs cellules de trafic dans la trame montante. L'affectation du mode FMT est réalisée :

- en exploitant l'information de mode FMT requis par l'état du canal de propagation, information transmise par le module d'émulation météorologique (la boucle de contrôle de contre-mesure étant en architecture centralisée comme préconisé par le DVB-RCS, le NCC a une visibilité totale sur l'état du système) ;
- en tenant compte du nombre de créneaux disponibles dans la trame dans chacun des modes FMT.

Deux stratégies d'affectation de mode FMT sont envisagées :

(i) **Stratégie dure**

Cette stratégie met en œuvre l'algorithme suivant pour allouer un mode FMT en configuration 3 :

1. Si le mode i est requis, et si la capacité en mode i est suffisante, ce mode est alloué.
2. Dans le cas contraire, si $i \neq 3$, le contrôleur DAMA examine s'il reste assez de capacité en mode $i+1$, et ainsi de suite. Si, arrivé au mode 3, le contrôleur ne possède pas un nombre de créneaux suffisant, alors, dans ce cas, aucun mode FMT ne peut être alloué à la station qui a par conséquent sa liaison coupée.
3. L'allocation de mode FMT se fait donc dans le sens du mode FMT en conditions les plus favorables vers le mode FMT le plus dégradé, mais pas dans l'autre sens. Par exemple, si le mode $i \neq 1$ est requis, la capacité en mode $i-1$ (ou éventuellement $i-2$) n'est même pas examinée.

(ii) **Stratégie souple**

La stratégie souple intègre les deux premières options de la stratégie dure, avec en complément la possibilité de dériver vers un mode moins dégradé (c'est-à-dire dans le sens $i \rightarrow i-1$).

5.2.1.4.2 Procédure SVC

La procédure SVC (*Switched Virtual Channel*) est modélisée par un simple retard temporel entre l'envoi d'un appel par un générateur d'appels et l'acceptation de cette requête de connexion notifiée au générateur. Ce retard est supposé constant égal à 3 secondes, ce qui constitue une borne minimale estimée du délai d'établissement d'une connexion dans une procédure SVC. La procédure SVC est intégrée dans le processus CAC.

5.2.1.4.3 Processus CAC

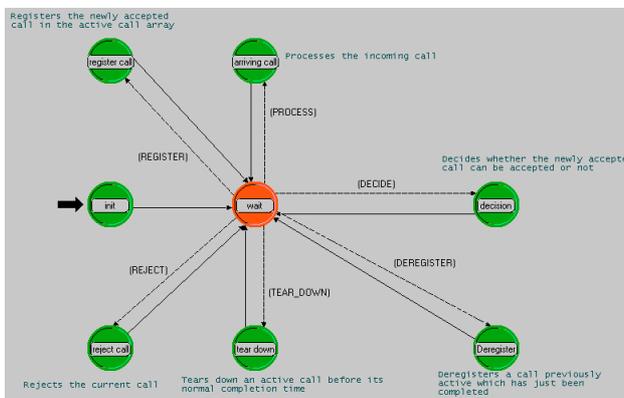


Figure 95 : Processus CAC PP_CAC dans OPNET

Le processus CAC peut opérer suivant deux stratégies d'admission distinctes :

- (a) Une première stratégie élémentaire basée sur un contrôle opérant exclusivement sur la somme des PCR et la somme des SCR des connexions ;
- (b) Une stratégie plus élaborée reposant sur le principe de la bande équivalente tel qu'utilisé dans le projet SAGAM.

Une troisième stratégie d'admission dite "prédictive" basée sur la variante RCCT de l'algorithme ALC de Siwko et Rubin a été étudiée en détail dans ses principes théoriques dans la section §4.5. Cette variante RCCT doit être soumise à un certain nombre d'adaptations pour être applicable à l'environnement SAGAM. Une mise en œuvre algorithmique du RCCT modifié est présentée en annexe (§9), mais doit faire l'objet de travaux ultérieurs complémentaires. La stratégie prédictive permet de munir le CAC du qualificatif "à capacité variable".

a) Stratégie d'admission élémentaire

Un nouvel appel entrant a de débit crête pcr_a est accepté si et seulement si : $\sum_{\{\text{appels actifs}\}-a} pcr + pcr_a \leq C_{ul}$ (Équation 67), où

C_{ul} est la capacité maximale disponible en liaison montante. L'hypothèse simplificatrice selon laquelle la capacité sur le lien descendant est toujours disponible a été choisie en première approche, étant donné que seule la voie retour était étudiée.

b) Stratégie basée sur la bande équivalente

Cette stratégie opère clairement une distinction entre des petites files d'attente de multiplexage pour les services CBR et rt-VBR, et les grandes files d'attente pour les autres services, ce qui conduit à des formules distinctes de bande équivalente selon la classe de service ATM :

	Liaison montante	Liaison descendante
CBR	EB = PCR	EB = PCR
rt-VBR	EB = EB ₁ (PCR,SCR,LR)	EB = EB ₁ (PCR,SCR,LR)
nrt-VBR	EB = EB ₂ (PCR,SCR,BS,LR)	EB = EB ₁ (PCR,SCR,LR)
ABR, UBR	EB = MCR	EB = MCR

Tableau 31 : Formules de la bande équivalente pour chaque classe de service. EB: Equivalent Bandwidth ; LR: Link Rate (débit du lien montant) ; PCR: Peak Cell Rate ; SCR: Sustained Cell Rate ; BS: Burst Size ; MCR: Minimum Cell Rate

Les formules EB₁ et EB₂ sont la propriété d'Alcatel Space et ne peuvent donc pas être reproduites ici.

5.2.2 Modules propagation

Un autre ensemble de modules ayant un rôle significatif dans le simulateur OPNET a pour rôle d'émuler l'environnement de propagation du système, plus précisément :

- ✓ les conditions météorologiques à travers une modélisation de la distribution géographique des cellules de pluie et de leur mouvement ;
- ✓ l'activation et le déroulement supervisés par le NCC de la contre-mesure sur chaque liaison montante individuelle des stations ;
- ✓ les variations de l'affaiblissement dans le canal sur toutes les liaisons montantes d'un même faisceau.

Le modèle de canal développé dans OPNET à des fins d'étude des relations entre le canal de propagation et les couches supérieures entrelace les deux approches complémentaires exposées dans la section §2.2, la première étant une approche macroscopique à moyen terme (de l'ordre de l'heure) sous la forme d'une carte radar de réflectivité du champ de précipitation ; et la deuxième une approche microscopique court terme (de l'ordre de la seconde) s'appuyant sur une série chronologique d'atténuation rencontrée dans le canal de propagation Ka.

L'ensemble propagation se décompose en deux sous-modules :

- ✓ le module d'émulation météorologique ;
- ✓ le module couche physique.

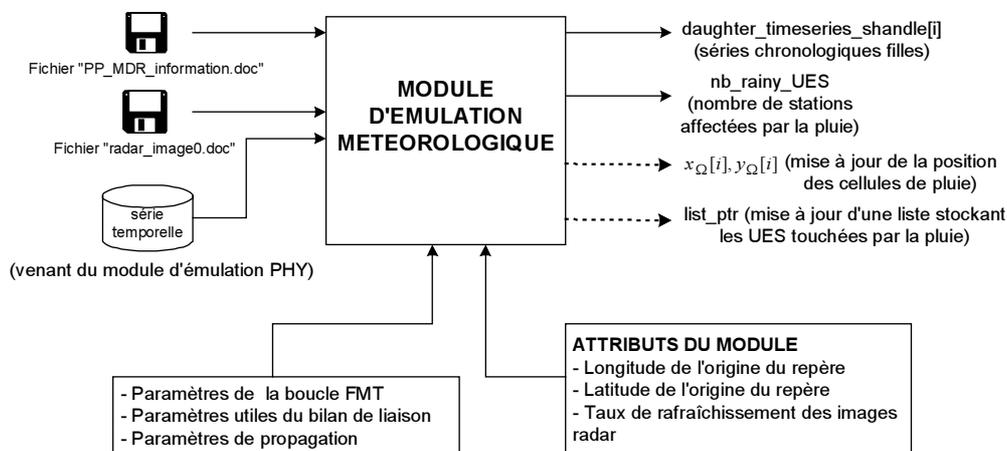


Figure 96 : Module d'émulation météorologique

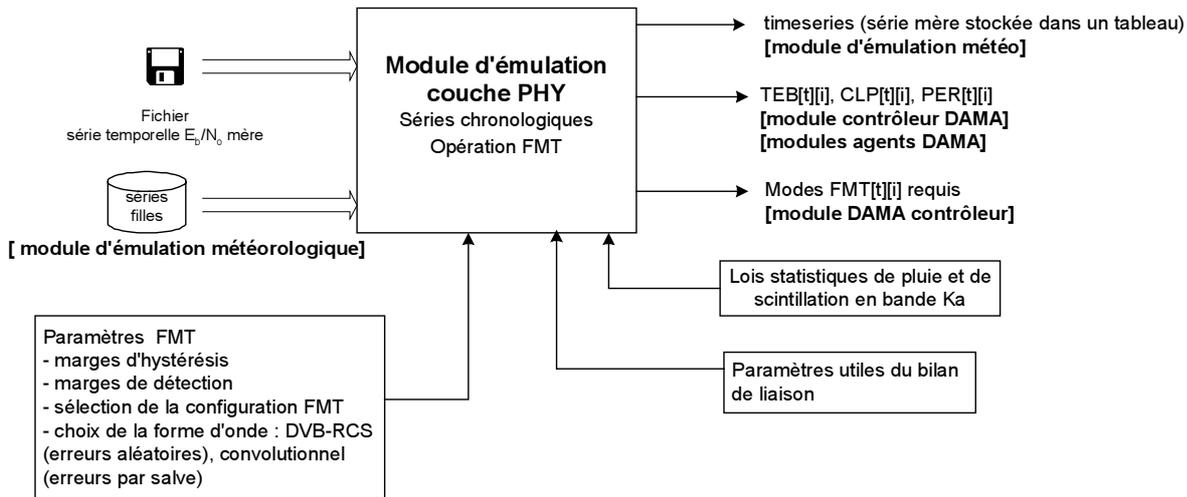


Figure 97 : Module "Couche PHY" d'émulation du canal Ka et du comportement FMT

5.2.2.1 Fichiers d'informations radar et de séries chronologiques d'atténuation

Le simulateur propose une carte radar sous la forme d'un fichier ASCII radar `image0.doc`, qui est utilisée comme information d'entrée par le module d'émulation météorologique. Cette carte radar sert de configuration météorologique de référence pour l'ensemble des simulations.

Elle est constituée de trois cellules de pluie soumises à un certain nombre de contraintes. Cette carte radar est utilisée à des fins de test et ses trois cellules de pluie ont des positions initiales et des caractéristiques EXCELL (intensité de précipitation maximale au centre des cellules, rayon) fixées de façon arbitraire sans référence à une quelconque configuration réelle. La définition de cette carte radar a été, par ailleurs, soumise à l'hypothèse forte mais irréaliste suivante, sans laquelle les traitements opérés sur les séries chronologiques ne sont pas valides :

Il est supposé que, parmi les trois cellules de pluie, la cellule numérotée 1 est celle de plus grand rayon et dont la position relative par rapport à une station identifiée comme étant la première et celle de référence (UES₁) est telle que cette station expérimente entièrement l'événement de pluie de référence pendant toute sa durée (1 heure). De façon pratique, il est supposé que la position de la station à l'instant initial coïncide avec l'un des deux points d'intersection de la cellule de pluie avec le diamètre parallèle à la direction du déplacement de la cellule, mais qui est situé dans le sens opposé au déplacement.

La figure 99 offre un aperçu de la carte radar modélisée par EXCELL : en traits pleins sont représentées les cellules de pluie dans leur position initiale (début de l'événement de pluie) ; en traits pointillés, leur position au bout d'une heure (fin de l'événement de pluie) ; les croix rouges représentent les positions des stations. La vitesse de déplacement des cellules est de 92 km/h. Les axes sont exprimés en km.

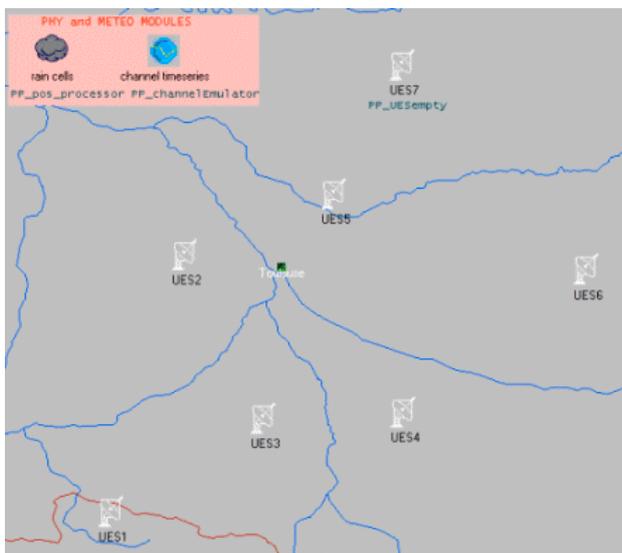


Figure 98 : Exemple de scénario à 5 stations

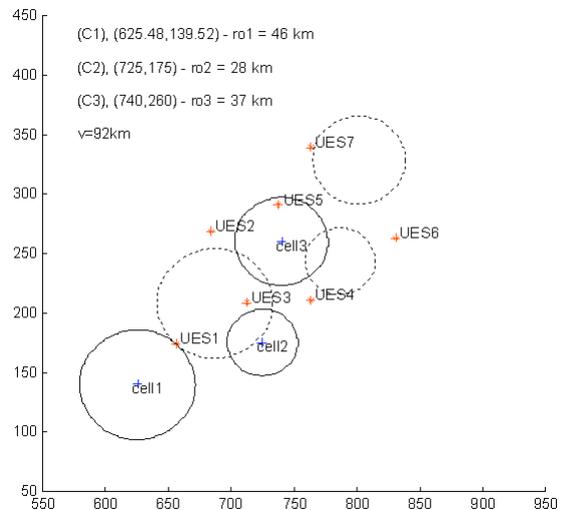


Figure 99 : Configuration géométrique sous-jacente pour le scénario à 5 stations (figure 98)

Les événements de pluie sous forme de séries chronologiques du rapport signal sur bruit E_b/N_0 sont fournis au simulateur via des fichiers ASCII unicolonne contenant les n échantillons ($n = 3600$ pour l'événement de pluie forte de référence durant 1 heure) de l'atténuation sur le canal à la fréquence de 1 Hz.

5.2.2.2 Emulateur FMT

Ce module utilise comme entrée des séries chronologiques d'atténuation E_b/N_0 stockées en fichier, et lit les échantillons en temps réel au rythme de 1 Hz. A partir d'une valeur d'atténuation, il émule le comportement d'une gestion de puissance adaptative couplée à un variateur de taux de codage et de débit, et fournit ainsi une valeur d'atténuation corrigée par FMT.

Il fournit en sortie :

- ✓ une indication sur le mode FMT en cours requis par le canal, par l'intermédiaire des informations (taux de codage, débit) ;
- ✓ des valeurs calculées en temps réel de paramètres renseignant sur la qualité de service offerte par la liaison : taux de perte de cellules CLR(t), et taux d'erreur de paquets PER(t). Le calcul de ces paramètres dépend du choix de la configuration FMT et de la forme d'onde utilisée. Ces paramètres sont obtenus au moyen des formules de conversion statique du TEB qui ont été décrites dans la section §2.3.3.3. Un exemple de sorties statistiques est donné sur la figure 101.

L'émulateur de la contre-mesure à trois modes opère comme suit : pour chaque liaison, les séries chronologiques filles d'atténuation corrigées par FMT sont obtenues par application directe de l'algorithme FMT configuration n°3 (contrôle de puissance, codage adaptatif et réduction de débit) sur les séries chronologiques non-corrigées correspondantes déduites d'une même série chronologique de référence.

La figure ci-dessous montre une comparaison des comportements du codeur adaptatif d'OPNET et du simulateur FMT de l'ONERA sur un événement de pluie forte. Les deux simulateurs présentent à certains moments des transitions erratiques entre deux taux de codage successifs, mais il est à noter que ces moments ne coïncident pas toujours. L'émulateur FMT sous OPNET partage globalement le choix de commuter en mode 3 (rendement 1/2) du simulateur ONERA entre environ $t = 200$ s et $t = 1500$ s. A partir de $t = 2700$ s, les deux simulateurs retournent en mode air clair. La période comprise entre $t = 1500$ s et $t = 2500$ s environ donne lieu à un comportement nettement différencié de part et d'autre, le simulateur FMT de l'ONERA ayant tendance à surestimer trop fréquemment l'atténuation sur la liaison et donc à rester dans les modes les plus défavorables. La divergence de comportement entre les deux simulateurs a de fortes chances d'être due en grande partie à un réglage différent des marges de détection et d'hystérésis pour l'émulateur FMT sur OPNET, où elles ont été choisies égales à 0, par souci de simplification.

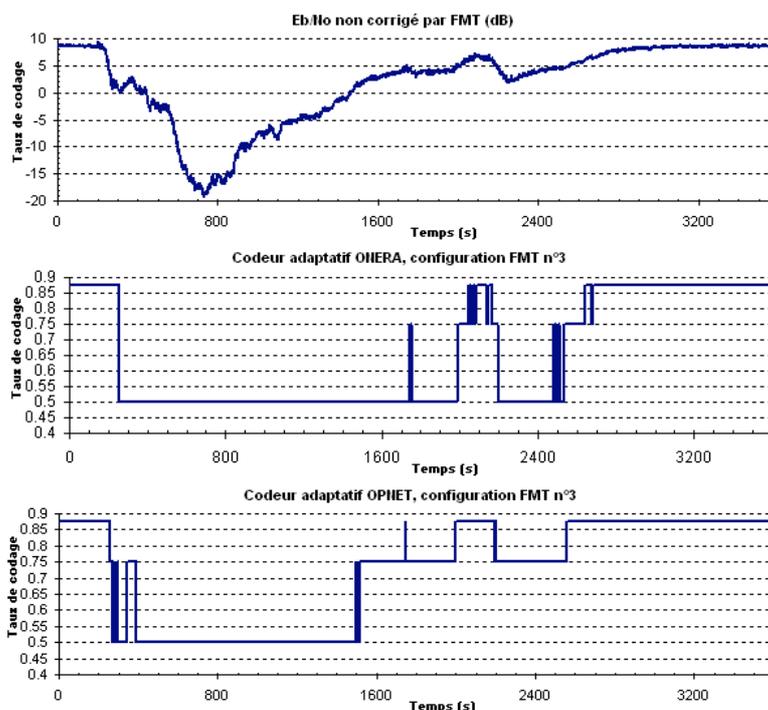


Figure 100 : Comparaison des comportements FMT de l'émulateur de codage adaptatif sur OPNET et du simulateur FMT orienté couche physique de l'ONERA

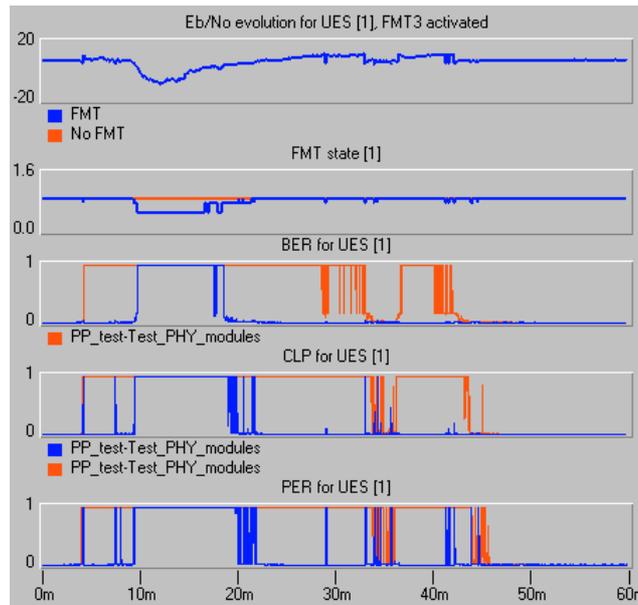


Figure 101 : Exemple de sorties statistiques (TEB, taux de perte de cellules, taux d'erreur de paquets IP) du simulateur OPNET associées à l'évolution du canal et du taux de codage, pour la station de référence quand le mécanisme FMT n°3 est activé

L'émulateur FMT dépend de quelques paramètres qui permettent de configurer les marges d'hystérésis et de détection, de sélectionner la configuration FMT et un certain nombre de paramètres du bilan de liaison. En première approche, le contrôleur FMT OPNET commute d'un mode à un autre lorsque des seuils d'atténuation sur la liaison considérée sont franchis. Dans l'avenir, comme discuté en tant qu'extension prospective dans la section *Perspectives*, d'autres types de paramètres pourraient être utilisés comme critère de détection et contrôle FMT.

5.2.2.3 Emulateur de la variabilité spatiale des cellules de pluie

5.2.2.3.1 Déplacement des cellules de pluie

Le déplacement des cellules de pluie à partir de leurs positions initiales définies dans une carte radar est géré de la façon suivante :

- ✓ Le nombre, les coordonnées (longitude, latitude) initiales des cellules de pluie (à l'instant $t=0$ de début de simulation) ainsi que leurs paramètres EXCELL ($R_{M,\rho}$) sont contenus dans un fichier ASCII.

Le format du fichier est le suivant :

Rg_im_radar Nb_cell Vitesse_deplacement Angle_deplacement x_{Ω_1} y_{Ω_1} R_{M_1} ρ_1 x_{Ω_2} y_{Ω_2} R_{M_2} ρ_2 ...

avec :

- $(x_{\Omega_i}, y_{\Omega_i})$: coordonnées en km des centres des cellules de pluie ;
- R_{M_i} : intensité de pluie maximale au centre de la cellule de pluie i (en mm/h) ;
- ρ_i : rayon EXCELL de la cellule de pluie i .

Le fichier comporte autant de lignes qu'il y a d'images radar utilisées pendant la durée de la simulation. Dans une première approche, une seule image radar est utilisée, mais à l'avenir n images radar peuvent être utilisées, ce qui permettra de rafraîchir périodiquement la configuration des cellules de pluie.

- ✓ Un processus OPNET exploite ce fichier pour connaître le nombre de cellules de pluie et leur position. Il calcule alors les coordonnées variables des centres des cellules, qui sont stockées dans un tableau. Ce processus a accès, en outre, aux coordonnées fixes de toutes les stations. Il effectue un test à la cadence des échantillons de la série chronologique d'atténuation en cours de lecture (1 Hz) pour vérifier si une station i est affectée ou non par une cellule de pluie j . Si tel est le cas, il calcule la distance radiale séparant la station i de la cellule j .
- ✓ Ce processus opère un traitement approprié pour convertir une série chronologique d'atténuation de référence en série d'atténuation applicable à la station i touchée par la cellule j , par l'intermédiaire d'une fonction homothétique appliquée à la valeur des échantillons, d'un décalage de phase ainsi que d'une décimation bien définie.

Toutes les cellules de pluie sont supposées se mouvoir de façon uniforme à la vitesse v (km/h) suivant une même direction fixe définie par l'angle qu'elle forme par rapport à l'axe horizontal (Ox).

Le modèle géométrique sous-jacent introduit dans le simulateur OPNET, résultant de l'utilisation combinée d'image radar et d'une modélisation EXCELL, est représenté sur la figure 102 ci-après :

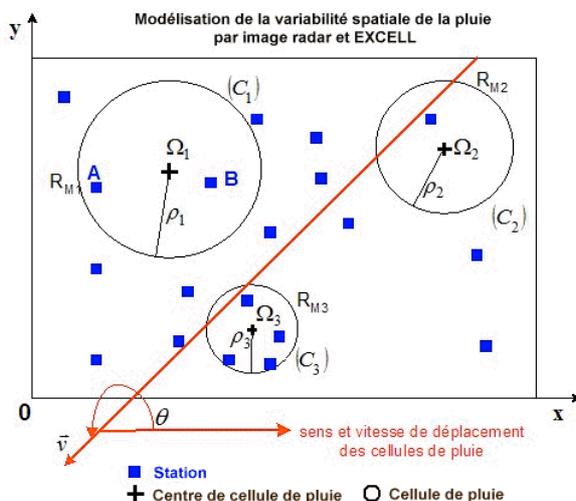


Figure 102 : Modèle géométrique de variabilité spatiale par image radar et modélisation EXCELL

5.2.2.3.2 Génération de séries chronologiques filles d'atténuation

La variabilité spatiale de la pluie affectant l'atténuation du signal d'une liaison à une autre est émulée au moyen d'un traitement conjoint de séries chronologiques d'atténuation et d'informations d'images radar. Une série chronologique E_b/N_o unique est utilisée à partir d'un fichier d'entrée choisi par le simulateur en fonction de la configuration déterminée par l'utilisateur (choix de l'événement de pluie, choix du mécanisme FMT ; activation ou non de la contre-mesure). Elle est supposée être représentative de l'atténuation subie sur la liaison montante de la station dite de référence qui est localisée sur la couverture de telle sorte qu'elle expérimente la série chronologique sur toute sa durée, sans décalage temporel ni conversion d'amplitude.

Ensuite, une procédure de transformation est appliquée afin de dupliquer cette même série chronologique sous la forme de séries dites « filles » de manière à ce que ces dernières conviennent aux autres stations. Cette procédure est détaillée ci-après avec ses principes sous-jacents :

- ✓ A chaque cellule de pluie $(C_i)_{1 \leq i \leq n}$ est associée une sous-série chronologique « mère » $S_i(t)$ d'atténuation E_b/N_o qui découle de l'unique série chronologique mère de référence associée à la cellule de pluie de référence n°1.
- ✓ Chaque station UES_j affectée par une cellule de pluie (C_i) donnée se voit affecter une série chronologique « fille » spécifique $S_{i,j}(t)$ découlant de la même série chronologique $S_i(t)$, mais d'abord modifiée en amplitude par le facteur α_i (ce qui donne la série fille intermédiaire unique $S_{i,UES}(t)$ pour toutes les stations UES_j), puis décalée dans le temps d'une quantité Δt_j (qui est positive ou égale à zéro).
- ✓ Pour calculer le coefficient homothétique variable α_i , le modèle de décroissance exponentielle EXCELL du taux de précipitation R pour un point situé à l'intérieur de la cellule de pluie (C_i) est appliqué, cette fonction décroissance du taux de précipitation étant ramenée à une fonction de décroissance de l'atténuation (rapport signal sur bruit) :

$$S_{i,UES}(t) = \alpha_i \times S_i(t)$$

avec :

$$\begin{aligned} \alpha_i &= T_{R,ENR} \left[\frac{R(r_{ij})}{R_{M_j}} \right] \\ &= T_{R,ENR} \left[\exp \left(-\frac{r_{ij}}{\rho_j} \right) \right] \end{aligned}$$

où r_{ij} est la distance de la station UES_j au centre de la cellule (C_i) à l'instant initial, et $T_{R,ENR}$ la fonction liant le taux de précipitation (ou intensité de pluie) R (mm/h) à la valeur correspondante de l'atténuation E_b/N_o (dB). Cette transformation est rendue possible au moyen d'une procédure normalisée ITU-R Rec. P.838 [122] :

$$A = KR_E^\alpha L \quad (\text{dB}) \quad (\text{Équation 68})$$

où R_E est le taux de précipitation effectif (mm/h), α et K sont des paramètres fonction de la configuration géométrique de la station et de la fréquence de la liaison, et L est le chemin oblique (km).

✓ Dans le cas où une station est touchée par la cellule de pluie de référence (C_1, R_{M_1}, ρ_1) :

- Le pic d'atténuation de la série est recalculé si la station n'est pas située à l'intérieur du diamètre contenant la station de référence UES₁ et parallèle à la direction de déplacement de la cellule (cf. : Figure 103 ci-dessous). La correction d'amplitude est obtenue en utilisant le rapport constant ρ_j/r_j où r_j est la distance qui reste à être « parcourue » à l'intérieur de la cellule pour la station UES_j considérée (cf. : UES₃ et UES₄ sur la figure 104). Cette notion de « distance parcourue » est issue du fait que, pour simuler le déplacement des cellules de pluie, il est possible d'imaginer conceptuellement que les cellules sont fixes et que ce sont plutôt les stations qui se déplacent dans la même direction mais dans le sens opposé. Une station UES_j donnée dans une cellule (C_i)_{1 ≤ i ≤ n} « parcourt » ainsi une distance rectiligne totale d_{ij} à l'intérieur de la cellule avant qu'elle n'en sorte, le déplacement se faisant par incrémentation à un pas constant h (km). Ce pas h peut être fixé arbitrairement de manière à suivre au mieux les variations de la série chronologique d'affaiblissement sans forcément nécessiter une lecture point par point à la fréquence d'échantillonnage originelle (1 Hz). Dans ce cas, les séries chronologiques résultantes $S_{i,j}(t)$ pour la cellule de pluie (C_i)_{1 ≤ i ≤ n} sont des versions décimées de la sous-série chronologique mère $S_i(t)$. Sinon, si la fréquence de 1 Hz est conservée, le pas h devient :

$$h = \frac{v}{3600} \quad (\text{km}) \quad (\text{Équation 69}).$$

Quant aux stations situées à l'intérieur de la même cellule sur le diamètre de direction parallèle au déplacement de la cellule, elles expérimentent des séries d'atténuation qui ne sont pas modifiées en amplitude, mais seulement décalées dans le temps (exemple : UES₁ et UES₂ sur la figure 103).

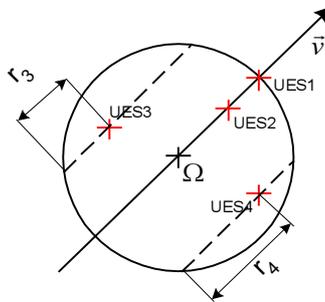


Figure 103 : Configuration géométrique où les stations sont touchées par la cellule de pluie de référence

- La série chronologique obtenue est décalée dans le temps suivant la position initiale de la station. L'instant t_0 est l'instant sur la série chronologique initiale $S_i(t)$ à partir duquel la pluie commence à affecter la station considérée. t_0 dépend de la distance initiale r_0 séparant la station du centre de la cellule de pluie. Soient par exemple la cellule de pluie (C_1) et la station A représentées sur la figure 104. La droite (D) représente la direction de déplacement de la cellule de pluie. (Δ) est définie comme la droite perpendiculaire à (D) passant par Ω , le centre de la cellule de pluie. (Δ) partage le plan en deux régions (P_1) et (P_2).

Le décalage temporel est obtenu à partir de la distance séparant la station considérée et le centre initial de la cellule de pluie, ainsi que de sa position par rapport aux droites ($\Omega_1\Omega_2$) et (Δ). En d'autres termes, l'instant de déclenchement de la sous-série chronologique mère $S_{i,UES}(t)$ sur la station A est repéré en fonction de :

- la distance initiale de A au centre Ω de la cellule : r_0 ;
- sa localisation géographique : dans le demi-plan (P_1) ou le demi-plan (P_2).

Si elle se trouve dans le demi-plan (P_1) , le point de départ t_0 sur la sous-série chronologique mère a lieu **avant** le point T pour lequel l'affaiblissement est maximal ($t_0 < T$). Si elle se trouve dans le demi-plan (P_2) , t_0 a lieu **après** T ($t_0 > T$). En d'autres termes, la série chronologique fille subie par la station A est telle que :

$$S_{i,A}(t) = \alpha_i \times S_i(t + t_0)$$

avec :
$$\begin{cases} t_0 < T & \text{si } A \in (P_1) \text{ à } t = 0 \\ t_0 > T & \text{si } A \in (P_2) \text{ à } t = 0 \end{cases}$$

Équation 70 : Transformation en amplitude et en phase de la sous-série chronologique mère d'une cellule de pluie en série chronologique fille affectant une station A à l'intérieur de cette cellule

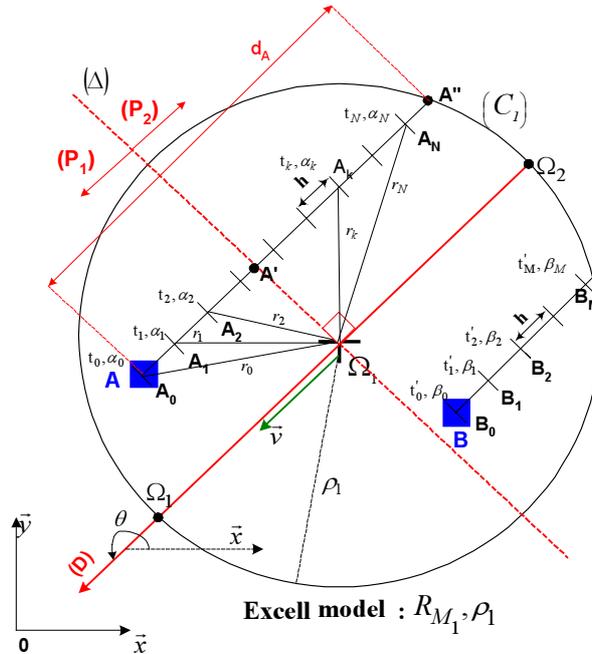


Figure 104 : Configuration géométrique permettant de calculer les paramètres utilisés pour décaler dans le temps les séries chronologiques filles subies par deux stations A et B localisées à l'intérieur d'une même cellule de pluie.

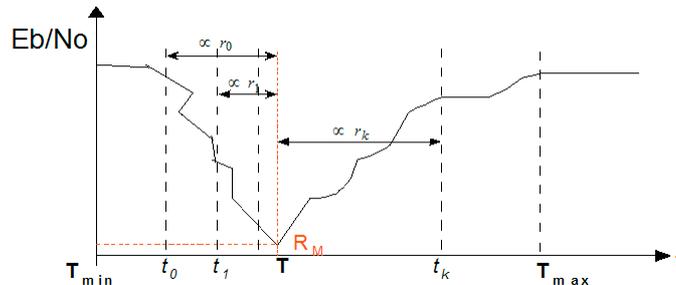


Figure 105 : Décalage temporel des séries chronologiques filles par rapport à une sous-série mère

Ainsi, une station située au point Ω_1 à l'instant initial se verrait subir une série chronologique « fille » d'atténuation dont la valeur initiale serait celle (à un coefficient homothétique près) que prendrait la série chronologique mère à $t = T_{min}$ exactement ; et une station située en Ω_2 (extrême limite de couverture de la cellule de pluie) aurait sa série chronologique fille associée qui se déclencherait sur la valeur (à un coefficient homothétique près) de la série chronologique mère en T_{max} (cette dernière station n'est donc pas du tout touchée par la pluie, en fait).

Pour la station A au point initial A_0 , l'instant t_0 est déterminé par la distance d_A qui lui reste à parcourir à l'intérieur de la cellule (C_1) au moyen de la relation de proportionnalité suivante :

$$\frac{T - T_{\min}}{T - t_0} = \frac{2\Omega\Omega_1}{d_A} \quad (\text{Équation 71})$$

$$= \frac{2\rho_1}{d_A}$$

où ρ_1 est le rayon de la cellule de pluie (C_1), et $\Delta t_A = T - t_0$ est le décalage temporel de la série chronologique fille.

Le coefficient de pondération homothétique α_1 de la série chronologique « fille » pour la station A est fonction de la distance radiale r_0 initiale de la station à la cellule de pluie (C_1).

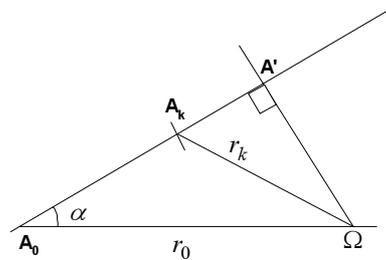


Figure 106 : Calcul des distances radiales r_k

En définitive, la série chronologique subie par la station A à l'intérieur de la cellule de pluie (C_1) est déterminée par la formule :

$$S_{1,A}(t) = T_{R,ENR} \left[\exp\left(-\frac{r_0}{\rho_1}\right) \right] \times S_1(t + \Delta t_A)$$

Équation 72 : Expression de la transformation en amplitude et en phase de la série chronologique de référence en série chronologique fille affectant une station A à l'intérieur de la cellule de pluie de référence

- Les valeurs d'atténuation A sont converties en valeurs E_b/N_o corrigées par FMT par une routine OPNET qui émule le codeur adaptatif avec éventuellement une réduction de débit ; ces nouveaux échantillons servent ensuite d'entrée à une autre routine qui émule cette fois le contrôle de puissance en liaison montante.

La figure qui suit présente la translation temporelle d'une série chronologique de référence telle que vue par une autre station localisée au voisinage de la station de référence.

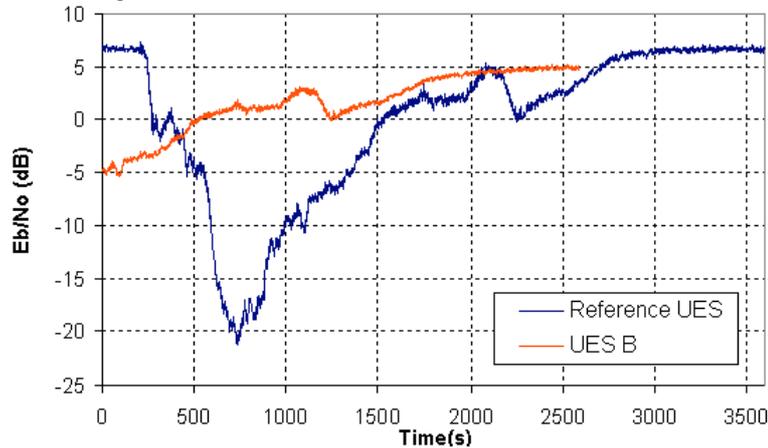
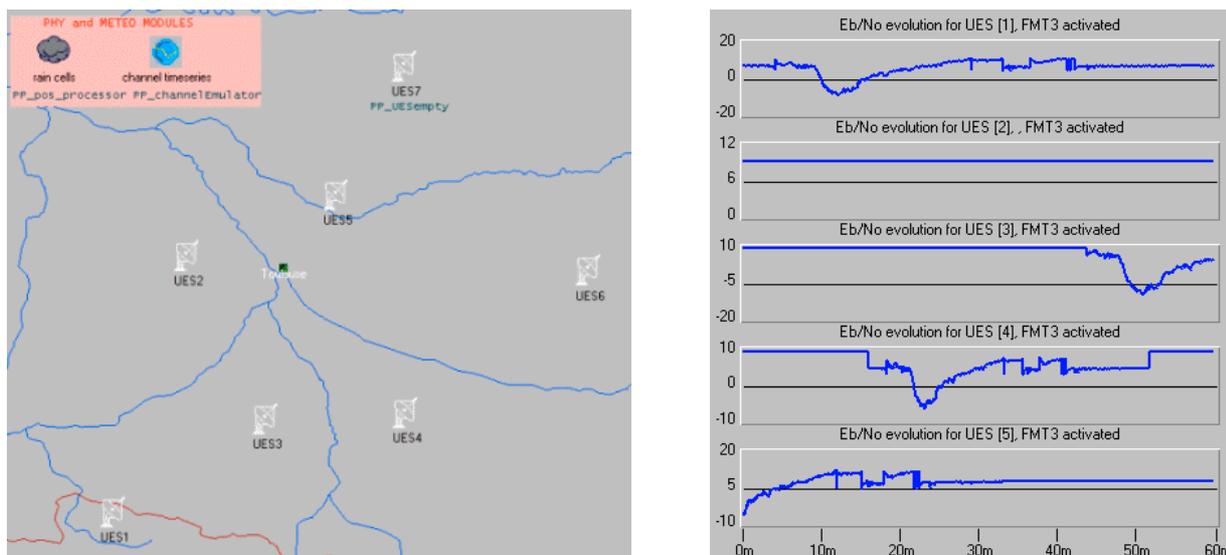


Figure 107 : Conversion d'une série chronologique de référence en série fille pour une station B(540 km, 810 km) localisée au voisinage d'une station de référence A (500 km, 800 km) toutes les deux touchées par la même cellule de pluie (C) (482.679 km, 782.679 km).

- ✓ Dans le cas où une station est touchée par une cellule de pluie (C_i) différente de la cellule de pluie de référence (C_1), la même procédure est appliquée mais avec une étape supplémentaire : la série résultante est décimée avec un taux approximant le rapport $\rho_i/\rho_1 < 1$ à une décimale près après la virgule.

La figure 108(b) de la page suivante illustre toute la procédure de génération des séries chronologiques ainsi que l'émulation FMT, appliquées à cinq stations dont les positions sont représentées sur la figure 108(a).



Figures 108 : Evolution de l'atténuation E_b/N_0 sur les liaisons montantes de 5 stations (figure de droite, 108(b)) dont les positions sont montrées sur la figure de gauche (108(a))

5.3 SIMULATIONS

5.3.1 Description des scénarii proposés

Trois scénarii significatifs ordonnés suivant un ordre progressif de complexité semblent nécessaires pour démontrer que la plate-forme fonctionne :

- ✓ *Scénario 1* : Canal statique (air clair), sans FMT
- ✓ *Scénario 2* : Canal variable en configuration de pluie normale (quantité normale de stations affectées), sans ou avec FMT
- ✓ *Scénario 3* : Canal variable en configuration de pluie extrême (toutes les stations sont simultanément touchées par la pluie pendant plus de 50% de la durée simulée), avec FMT

Les hypothèses suivantes sont adoptées pour restreindre le champ des simulations et leur durée :

- ✓ Un seul événement de pluie sera utilisé au lieu de deux disponibles : pluie forte se produisant typiquement lors d'un orage (cf. : §2.2.2.1).
- ✓ Les positions des stations sont arbitraires mais choisies de telle sorte que l'impact du canal puisse être bien mis en relief.
- ✓ Le CAC est supposé comme étant désactivé.
- ✓ Le seul mécanisme FMT utilisé est la FMT n°3 à trois modes.
- ✓ Si la FMT n'est pas utilisée, les simulations pour l'étude de charge sont déroulées sur une durée simulée de 20 minutes seulement au lieu d'une heure, soit un facteur de réduction de 3 en supposant que la durée de simulation est liée par un rapport linéaire à la durée simulée, ce qui n'est pas le cas (la fonction semble plutôt de type exponentiel).
- ✓ Du fait de la durée excessive des simulations⁽¹⁾, un sous-ensemble système dans lequel les ressources disponibles et à gérer sont réduites, est considéré.

Configuration "réduite"	
Sans FMT	5 porteuses à 2048 kbit/s et à taux de codage 7/8, soit une capacité totale de 10 Mbit/s ou encore $128 \times 5 = 640$ créneaux disponibles par trame.
FMT3	<ul style="list-style-type: none"> • 4 porteuses à 2048 kbit/s et un taux de codage de 7/8 (512 créneaux par trame en mode 1) • 1 porteuse à 2048 kbit/s et un taux de codage à 3/4 (109 créneaux par trame) • 1 porteuse à 512 kbit/s et un taux de codage de 1/2 (18 créneaux par trame) ☞ Capacité totale de 10 Mbit/s ou 639 créneaux par trame

Tableau 32 : Configuration réduite pour les simulations OPNET

Le facteur de réduction de la capacité disponible est donc de 6 en configuration dite "réduite".

⁽¹⁾ A titre d'exemple, sur un PC avec un processeur Pentium III à 866 MHz, en utilisant une configuration complète, pour une simulation comprenant 50 stations atteignant une charge d'environ 40%, 72 heures sont nécessaires pour obtenir 6 valeurs scalaires sur une durée simulée d'une heure complète. Par extrapolation à partir d'une courbe de tendance de type puissance, en considérant une charge entre 20 stations et 120 stations, soit 11 points en tout, une durée de simulation totale de 1019 heures est estimée pour obtenir les courbes de délai CTD et de gigue CDV en fonction de la charge pour les trafics CBR, rt-VBR et UBR, soit 42 jours et quelques!

5.3.2 Canal statique, sans FMT

Ce premier scénario de base dresse le cadre d'une étude des délais de bout en bout (CTD) et des giges (CDV) des cellules ATM en fonction de la charge et pour les deux types de service CBR et UBR.

5.3.2.1 Configuration du simulateur

5.3.2.1.1 Hypothèses générales

Les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- ✓ Toutes les simulations sont déroulées en temps clair.
- ✓ Les positions des stations sont arbitraires.
- ✓ Le mécanisme de contre-mesure est désactivé.
- ✓ Pour chaque source de trafic, un seul appel est généré et actif sur toute la durée de la simulation, ce qui revient à dire que le CAC est court-circuité dans le simulateur.
- ✓ Chaque scénario correspondant à un nombre donné de stations est déroulé sur une durée simulée de 20 minutes.
- ✓ Le sous-ensemble système considéré est celui défini dans le tableau 32 par une capacité réduite de 10 Mbit/s.

5.3.2.1.2 Configuration de trafic

Les caractéristiques complètes des sources de trafic sont données dans le tableau 33.

- ✓ La sporadicité de la source UBR est de 12.
- ✓ Comme un seul appel est généré et actif pour chaque source, la valeur d'Erlang est ramenée à 1.
- ✓ Souscription CRA = 64 kbit/s pour chaque source de trafic CBR.

	PCR (kbit/s)	T _{on} (s)	T _{off} (s)	SCR (kbit/s)	Capacité équivalente (kbit/s)	Valeur Erlang
CBR	64	3.52	0.65	54	64	1
UBR	256	0.04	10.44	21.33	21.33	1
Capacité équivalente totale (Erlang kbit/s) = 85.33						

Tableau 33 : Caractéristiques des sources de trafic des stations (modèle PP_UES_MDR2)

5.3.2.1.3 Paramètres RBDC

L'allocation RBDC opère en mode dit dynamique dans lequel les agents DAMA des stations calculent la valeur de la capacité (exprimée en débit) à requérir pour vider leurs files d'attentes UBR.

Mécanisme de requêtes	Souscription BDC	Maximum RBDC	Ecart RBDC minimal pour transmission de requête	Période de mesure RBDC	Durée d'expiration des requêtes
OBR	256 kbit/s	256 kbit/s	16 kbit/s	160 ms	36 trames

Tableau 34 : Paramètres RBDC

5.3.2.2 Tableaux de résultats

Le tableau 35 présente la charge théorique de trafic correspondant au taux d'occupation de trame⁽¹⁾ calculé d'après l'allocation des créneaux effectuée par le contrôleur DAMA, pour un nombre de stations égal à 10 (charge d'environ 9.4%) et 110 (pleine charge).

Nombre de stations	Débit total (Erlang kbit/s)	Charge théorique ⁽¹⁾ (%)
10	853.33...	9.41
110	9386.63	99.26

Tableau 35 : Taux d'occupation de trame théorique

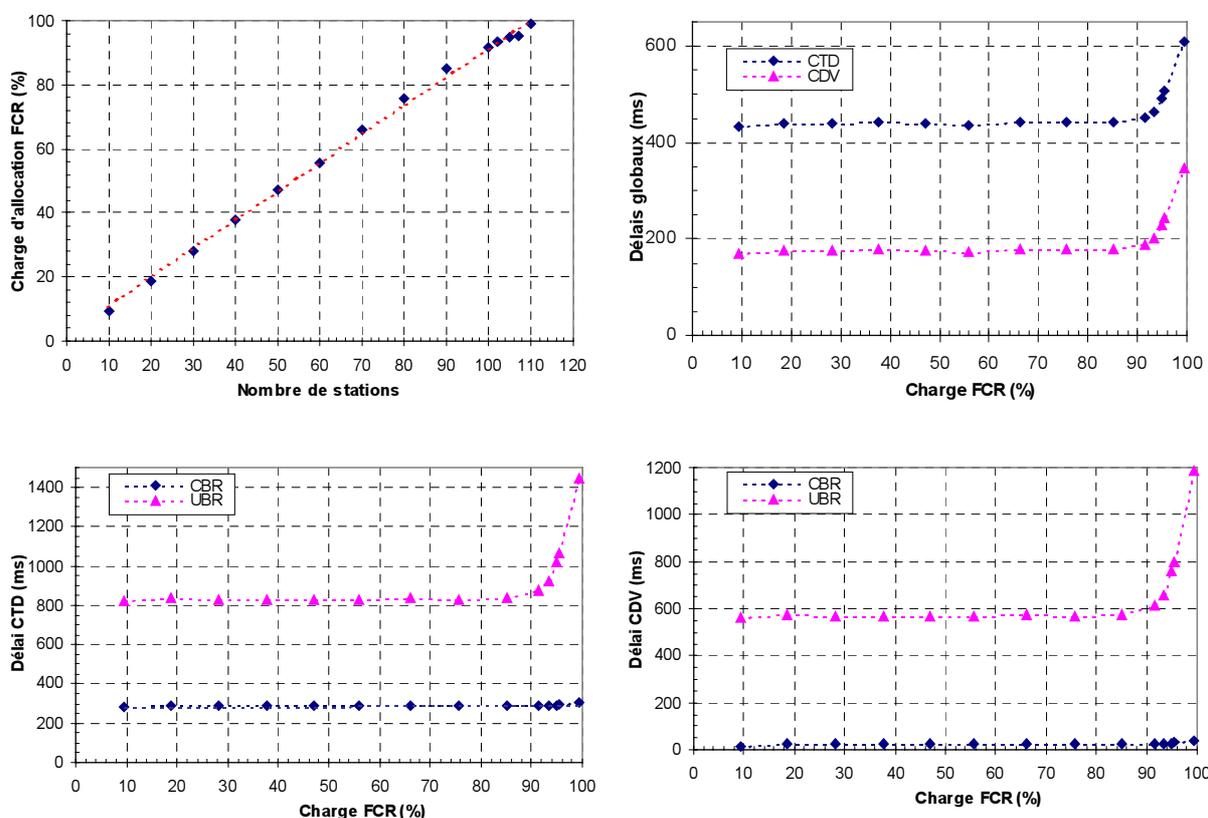
⁽¹⁾ Correspond au taux d'allocation de trame (égal au rapport entre le nombre total de créneaux alloués et le nombre total de créneaux) calculée à partir du plan d'allocation fourni par le FCR.

Nombre UES	Charge (%)	CTD CBR (ms)	CDV CBR (ms)	CTD UBR (ms)	CDV UBR (ms)	CTD global (ms)	CDV global (ms)
10	9.41	279.154	15.919	823.132	559.894	434.187	170.95
20	18.65	285.592	22.364	839.843	576.594	439.029	175.795
30	28.26	286.161	22.93	833.646	570.414	440.57	177.335
40	37.74	286.821	23.59	833.356	570.141	441.587	178.362
50	46.97	286.279	23.05	831.546	568.317	439.051	175.821
60	55.82	287.414	24.185	833.224	569.994	436.767	173.538
70	66.12	287.128	23.893	834.559	571.326	441.713	178.478
80	75.64	287.372	23.91	833.011	569.538	441.566	178.01
90	85.08	287.844	24.61	835.094	571.864	442.836	179.603
100	91.48	287.672	24.205	873.879	610.41	451.261	187.794
102	93.32	288.056	24.586	920.522	657.048	465.098	201.327
105	94.84	288.756	25.29	1 022.30	758.83	492.968	229.501
107	95.45	294.611	31.137	1063.688	800.21	507.44	243.965
110	99.26	302.077	38.592	1 448.01	1184.53	609.589	346.106

Tableau 36 : Tableau récapitulatif rassemblant les résultats de l'étude de charge

5.3.2.3 Courbes des délais de bout en bout et des giges

Les valeurs des délais CTD et CDV du tableau précédent sont reproduites sous forme de courbes.



Figures 109 : 109(a) : Charge d'allocation de trame en fonction du nombre de stations (en haut, à gauche) ; 109(b) : Délais de bout en bout et giges globaux (en haut, à droite) ; 109(c) : Délais de bout en bout pour les trafics CBR et UBR ; 109(d) : Giges pour les trafics CBR et UBR

Ces courbes de délai montrent qu'à charge élevée, les délais des services prioritaires CBR ne sont pas affectés. Ils restent à peu près constants autour de la valeur d'un délai RTD de propagation aller-retour Terre-satellite (270 ms), tout en lui étant légèrement supérieurs. Ceci est dû au fait que les trafics CBR se voient toujours allouer par le contrôleur DAMA une capacité continue (CRA) dans la trame montante. Le très faible dépassement d'environ 17 ms du délai de bout en bout (CTD) par rapport à la durée de propagation aller-retour Terre-satellite reste toujours inférieur à la durée de trame (30 ms). Il est dû aux variations des positions des créneaux alloués au trafic CBR à l'intérieur d'une trame. La gigue des délais de bout en bout pour les cellules CBR reste, elle, à peu près constante autour de la valeur de 22 ms, avec une légère augmentation à partir d'une charge de 95% (31.137 ms), mais même au-delà, jusqu'à la pleine charge (99.26%), l'augmentation de la gigue reste circonscrite, avoisinant à peine 40 ms.

Les délais de bout en bout du trafic UBR restent à peu près constants jusqu'à une charge de 90 % environ, leurs valeurs avoisinant les 830 ms, soit trois fois le délai RTD plus un supplément de délai dû aux temps de séjour dans la file d'attente et à la variabilité de la localisation des créneaux alloués dans la trame. Ces 830 ms correspondent grossièrement à la somme du délai de réservation (2 RTD) inhérent aux requêtes de capacité RBDC par voie OBR, et du temps de propagation effectif des cellules d'une station émettrice vers une station destinataire (1 RTD).

Mais, les délais de bout en bout UBR augmentent de façon substantielle et divergente quand la charge s'accroît au-delà de 90%. A pleine charge, ce délai atteint déjà 1.450 s environ. Ceci montre bien que le trafic UBR moins prioritaire est désavantagé par rapport au trafic CBR. La gigue de délai UBR suit la même évolution, avec une valeur à peu près stable autour d'un RTD pour une charge allant jusqu'à 90%, et une valeur d'environ 1.190 s à pleine charge.

5.3.3 Canal variable en configuration de pluie normale, avec ou sans FMT

Cette section est destinée à présenter un certain nombre de résultats illustrant le fonctionnement du DAMA associé au mécanisme de contre-mesure par temps de pluie forte, dans une configuration normale (nominale) de pluie où la proportion de stations affectées simultanément par la pluie reste suffisamment faible pour ne pas entraîner des phénomènes de congestion.

Un scénario comprenant 10 stations qui ne chargent que faiblement le système (moins de 10%) et qui se voient en permanence allouer de la ressource par le DAMA est considéré.

5.3.3.1 Configuration des simulations

Les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- ✓ L'événement de pluie forte est utilisé.
- ✓ Les positions des stations ont été arbitrairement choisies de telle sorte que la commutation progressive vers les modes FMT dégradés à mesure qu'évolue le canal et à mesure que se déplacent les cellules de pluie, puisse être bien mise en évidence.
- ✓ Un faible nombre de stations (10) est considéré.
- ✓ Chaque source de trafic ne génère qu'un seul appel qui est actif pendant toute la durée de la simulation.
- ✓ Le mécanisme FMT utilisé est la FMT n°3 à trois modes.
- ✓ Chaque station (modèle PP_UES_MDR2) comprend deux sources de trafic (les mêmes que dans le scénario précédent avec un réglage identique).
- ✓ La carte radar utilisée fait intervenir 3 cellules de pluie (voir figure 110).
- ✓ La configuration système utilisée est celle dénommée "réduite" (capacité de 10 Mbit/s).
- ✓ Tous les résultats servant à mettre en évidence le caractère fonctionnel du simulateur ont été obtenus avec des durées d'appel très longues par rapport à la durée de la simulation (ce qui revient à dire comme dans le scénario précédent que le CAC est court-circuité).

La figure 110 ci-dessous rend compte des positions initiales (en traits pleins) et finales (au bout d'une heure, en traits pointillés) des cellules de pluie relativement aux stations.

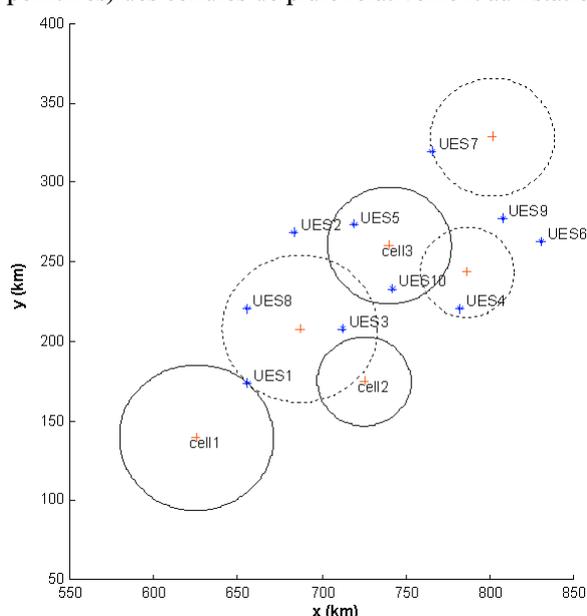


Figure 110 : Positions initiales et finales des cellules de pluie pour la carte radar utilisée



Figure 111 : Représentation du scénario de simulation

Les positions des stations sont précisées dans le tableau 37.

UES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitude (°)	0.8936	1.139	1.398	2.025	1.4587	2.461	1.873	0.889	2.252	1.6644
Latitude (°)	42.81	43.66	43.12	43.23	43.702	43.61	44.12	43.23	43.74	43.342

Tableau 37 : Positions des stations

De la figure 110, il apparaît clairement que :

- les stations 1, 3 et 8 sont touchées par la cellule de pluie n°1 ;
- la station 4 est touchée par la cellule de pluie n°2 ;
- les stations 5, 7 et 10 sont touchées par la cellule de pluie n°3 ;
- les stations 2, 6 et 9 ne sont touchées par aucune cellule de pluie.

Les instants où les stations sont touchées par la pluie respectivement la première fois et la dernière fois sont recensés dans le tableau ci-dessous :

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Instant début (s)	1	-	2628	1833	1	-	1204	1841	-	1 1733
Instant fin (s)	3600	-	3600	3599	928	-	3585	3600	-	493 2531

Tableau 38 : Instants de début et de fin des événements de précipitation affectant les stations

La figure ci-dessous montre l'évolution du nombre de stations touchées simultanément par la pluie pendant la durée de la simulation :

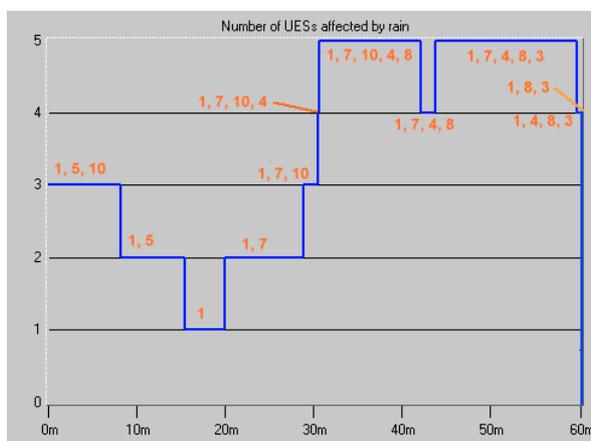


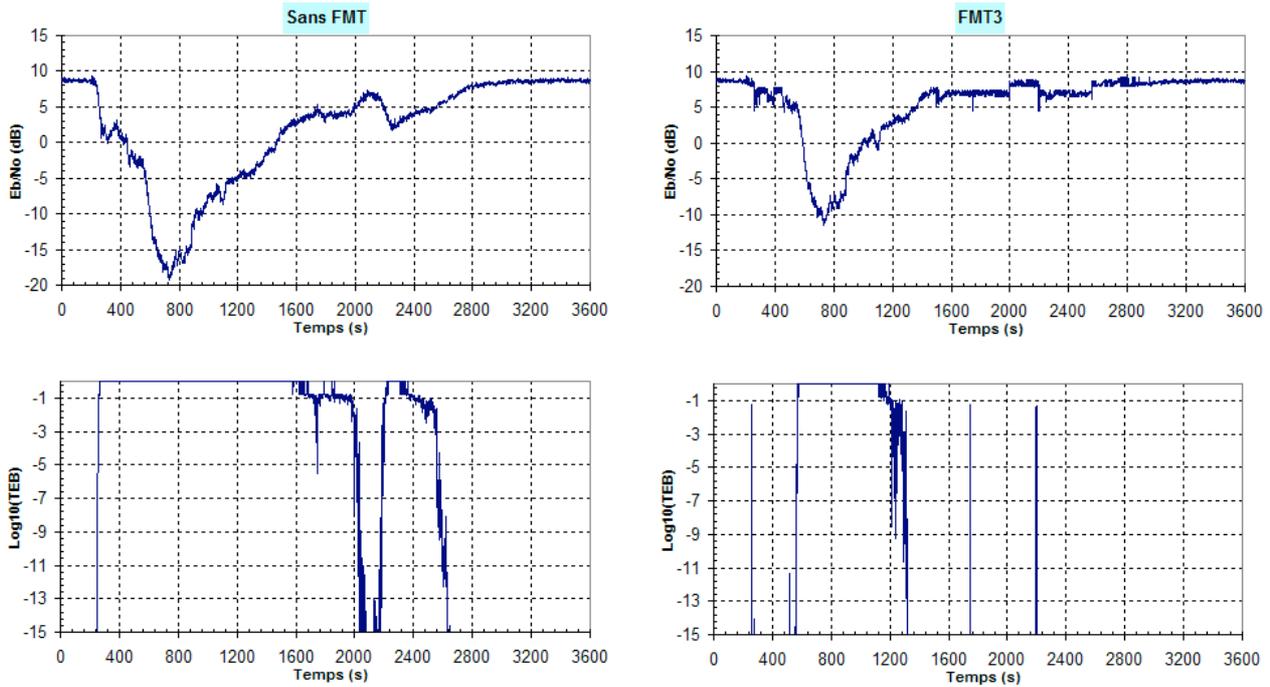
Figure 112 : Evolution du nombre de stations touchées par la pluie (en bleu). Les chiffres en rouge surmontant chaque palier indiquent les stations concernées.

5.3.3.2 Validation du mécanisme FMT

5.3.3.2.1 Station de référence

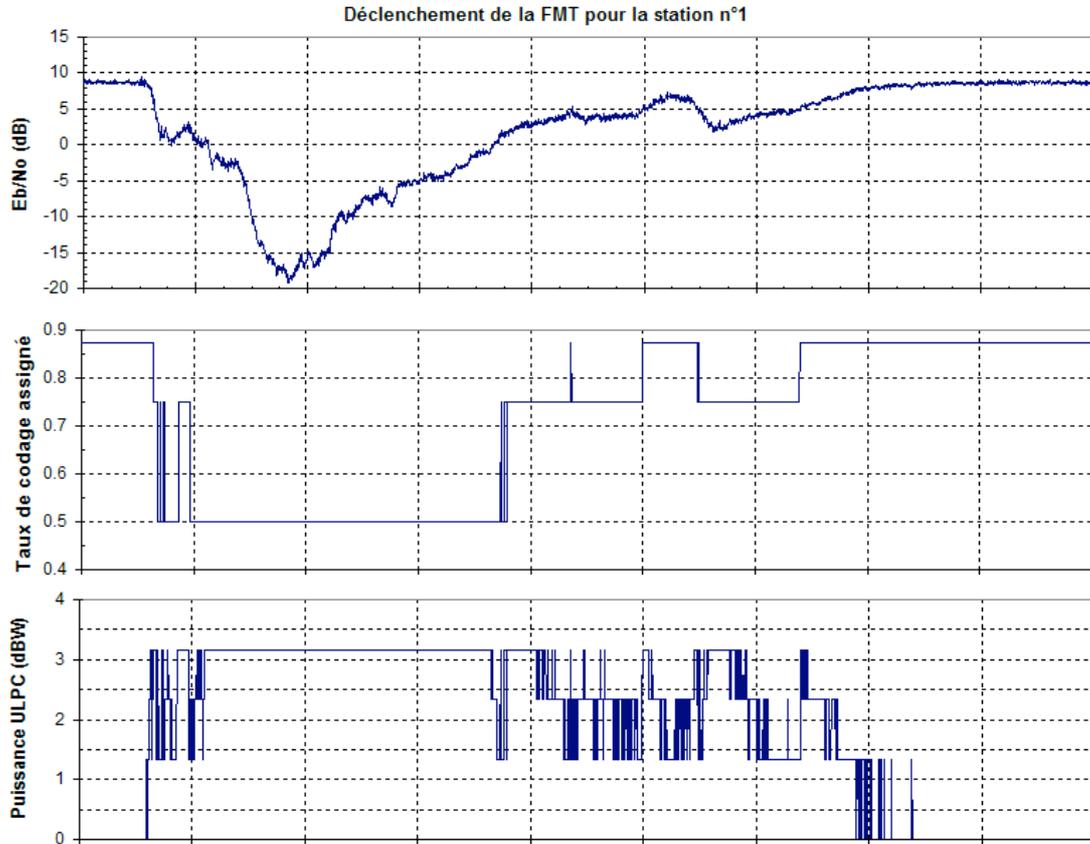
La figure 113(a) représente la série chronologique de référence (subie par la station n°1) du rapport E_b/N_o , et la figure 113(c) la même série chronologique mais corrigée par FMT. Au début et à la fin, lorsque le canal se trouve en air clair, les valeurs de la série chronologique corrigée par FMT coïncident parfaitement avec les valeurs de la série de départ non corrigée, ce qui est cohérent. Sans correction FMT, le pic d'atténuation est de -19.3 dB. L'atténuation corrigée par FMT atteint un pic qui n'est plus que de -11.5 dB environ, ce qui représente une compensation d'atténuation de 7.8 dB. Le bilan de liaison associé à la configuration FMT n°3 fixe le niveau minimal du rapport signal sur bruit E_b/N_o à 7.6 dB en dessous duquel la liaison montante est coupée, l'objectif de TEB à 10^{-9} n'étant alors plus satisfait.

Les figures 113(b) et 113(d) représentent l'évolution du logarithme décimal des TEB correspondants pour la même station, respectivement dans le cas sans FMT et dans le cas FMT n°3. Le niveau limite de disponibilité de la liaison est donné par un TEB de 10^{-9} . L'emploi d'une technique de contre-mesure permet ici de réduire la durée totale d'indisponibilité de la liaison d'environ 10 minutes (pour une durée de coupure d'environ 42 minutes, dans le cas sans FMT). Cette amélioration par rapport au cas sans FMT est très dépendante du comportement de la boucle de contrôle FMT qui elle-même dépend du réglage de deux paramètres essentiellement : la marge de détection et la marge d'hystérésis dans chacun des modes FMT (voir *Annexe*, §2). Par simplification, elles ont été considérées comme nulles ici. Un réglage plus approprié peut par conséquent augmenter substantiellement la disponibilité de la liaison.



Figures 113 : Courbes de gauche : 113(a) : E_b/N_o (courbe du haut) ; 113(b) : Logarithme décimal du TEB correspondant (courbe du bas) pour la station n°1 avant correction FMT - Courbes de droite : Idem après correction FMT (113(c) et 113(d) respectivement).

La stratégie de contre-mesure adoptée consiste tout d'abord à contrôler, suivant l'atténuation mesurée du signal, le codage adaptatif avec éventuellement une réduction de débit d'un facteur 4 (mode 3) lorsque l'atténuation est très forte, pour ensuite effectuer un réglage plus fin, par paliers de 0.5 dBW, du niveau du signal émis, par l'intermédiaire du contrôle de puissance. Ce fonctionnement est présenté sur les figures 114.



Figures 114 : Opération de la contre-mesure sur la liaison montante de la station n°1 : 114(a) (en haut) : E_b/N_o mesuré sur le canal, non corrigé ; 114(b) (2^{ème} courbe à partir du haut) : Evolution du taux de codage tel qu'assigné par le DAMA ; 114(c) (3^{ème} courbe à partir du haut) : Evolution de la puissance émise commandée par la FMT

L'évolution des paramètres QoS (TEB, taux de perte de cellules CLR et taux d'erreur de paquets PER) après correction FMT est relevée sur la figure ci-dessous en parallèle avec l'évolution du rapport signal sur bruit corrigé par FMT.

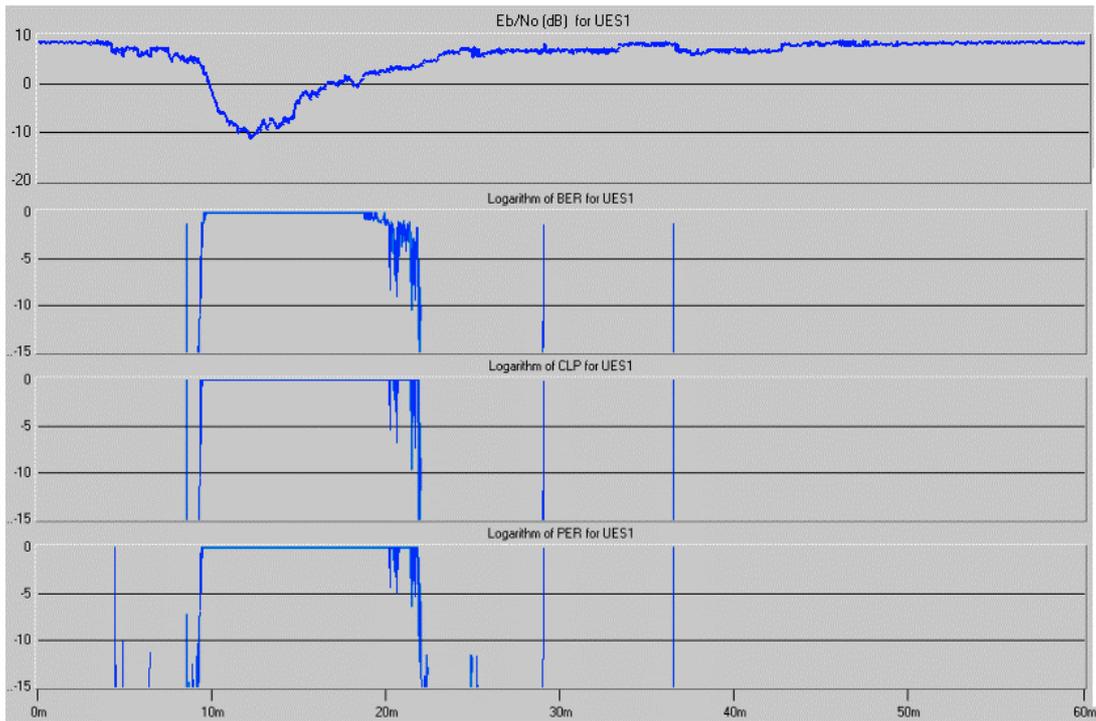
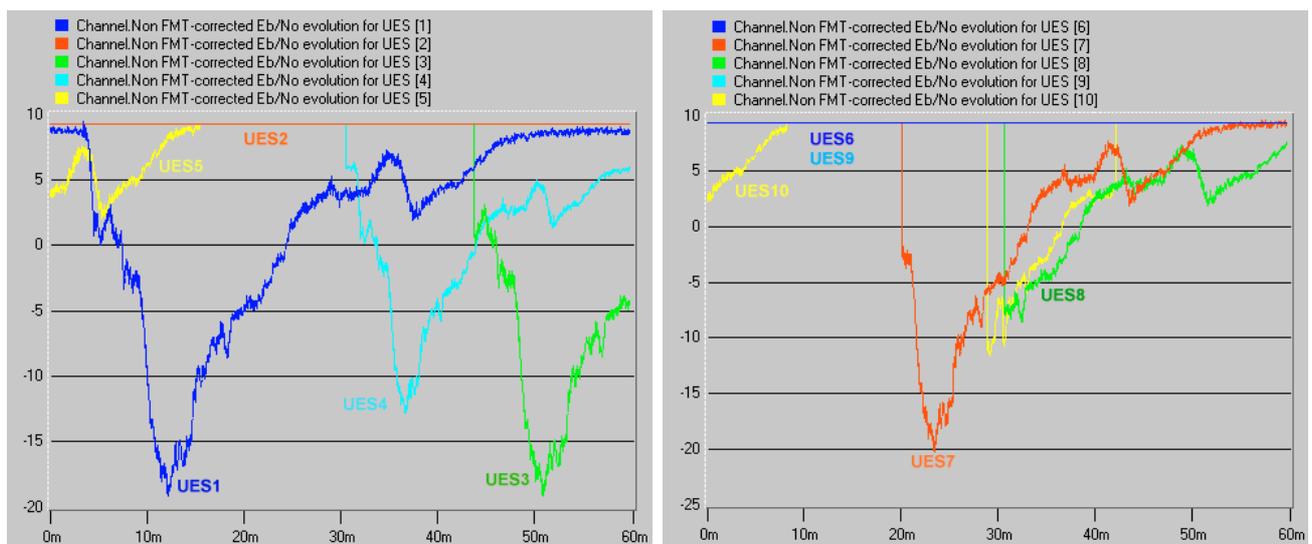


Figure 115 : E_b/N_o (courbe du haut), logarithme décimal du TEB (2^{ème} courbe à partir du haut), du CLR ((3^{ème} courbe à partir du haut) et du PER (courbe du bas), pour la station de référence, après correction FMT

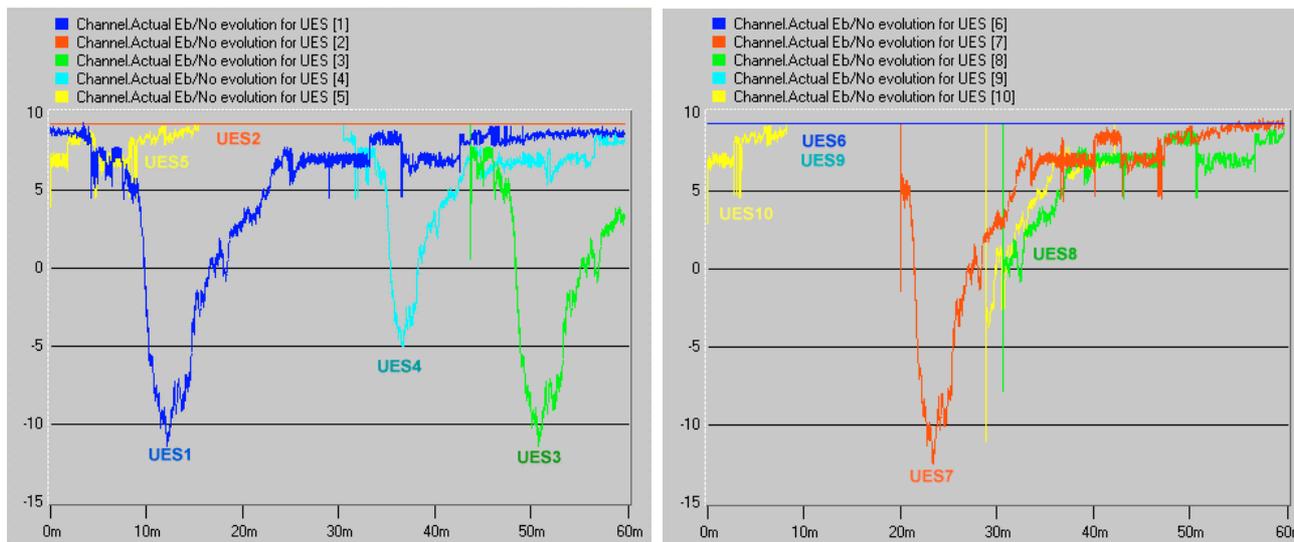
5.3.3.2.2 Cas des autres stations

Les événements de pluie qu'expérimentent les stations ont été obtenus dans le simulateur par corrélation spatiale. Les stations 1, 3 et 8 sont affectées par la même cellule de pluie n°1. Leurs événements de pluie associés ne subissent donc pas de conversion d'amplitude donc le pic d'atténuation est le même pour tous, mais ils sont simplement décalés dans le temps. Il en est de même pour les stations 5, 7 et 10 qui sont affectées par la cellule de pluie n°3.

Les événements de pluie non corrigés par FMT sont représentés sur les figures 116. Les figures 117 montrent ces mêmes événements mais cette fois corrigés par FMT (configuration n°3).



Figures 116 : Séries chronologiques E_b/N_o non corrigées : 116(a) (à gauche) : stations 1 à 5 - 116(b) (à droite) : stations 6 à 10



Figures 117 : Séries chronologiques E_b/N_o corrigées par FMT : 117(a) (à gauche) : stations 1 à 5 ; 117(b) (à droite) : stations 6 à 10

5.3.3.2.3 Etude du mécanisme d'allocation des créneaux avec affectation de mode FMT

La fonction d'allocation DAMA opère selon la stratégie "dure" d'affectation de mode FMT dont le principe est rappelé ci-après : une station peut se voir assigner un mode FMT d'ordre supérieur (dégradé) lorsque le mode qu'elle requiert n'admet plus de créneaux disponibles dans la trame montante. Plus précisément, si une station requiert le mode 1 (air clair) et qu'il n'y a pas suffisamment de créneaux disponibles dans ce mode, elle peut se voir assigner le mode 2 ou le mode 3. De même, si elle requiert le mode 2 et que sa demande ne peut être satisfaite, elle a la possibilité de transmettre ses cellules en mode 3.

Si la commutation dans le sens des modes d'ordre supérieur est tout à fait logique (il est préférable qu'une station qui ne peut transmettre en mode air clair par manque de créneaux disponibles se rabatte sur un mode dégradé, plutôt que de ne pas transmettre, car le taux d'utilisation du canal sera meilleur sans que la qualité de service soit dégradée), la commutation systématique dans le sens inverse, quant à elle, n'est pas souhaitable puisqu'elle est à l'évidence préjudiciable aux performances QoS.

Dans les simulations de cette section, c'est donc la stratégie de commutation FMT "dure" qui a été supposée dans le simulateur : aucune commutation de mode FMT dans le sens d'une amélioration du canal n'est autorisée ; en particulier, si une station requiert sur sa liaison le mode 3 et que le nombre de créneaux dans ce mode est insuffisant, elle ne peut recevoir ni le mode 1 ni le mode 2, mais le contrôleur DAMA lui interdira de transmettre et la liaison est alors coupée.

Les figures 118 montrent l'évolution des proportions de stations dans chacun des modes FMT pendant la simulation. Elles sont corroborées par les figures 119 qui représentent l'évolution des taux de codage assignés aux 10 stations pendant la durée de la simulation.

Les taux de codage peuvent prendre quatre valeurs :

- 7/8 : mode 1 ou air clair ;
- 3/4 : mode 2 à 2048 kbit/s ;
- 1/2 : mode 3 à 512 kbit/s
- 0 : aucun mode FMT valide n'est assignable et la transmission des cellules n'est donc pas autorisée. Cette valeur n'est jamais atteinte dans ce scénario spécialement élaboré pour éviter ce cas de figure.

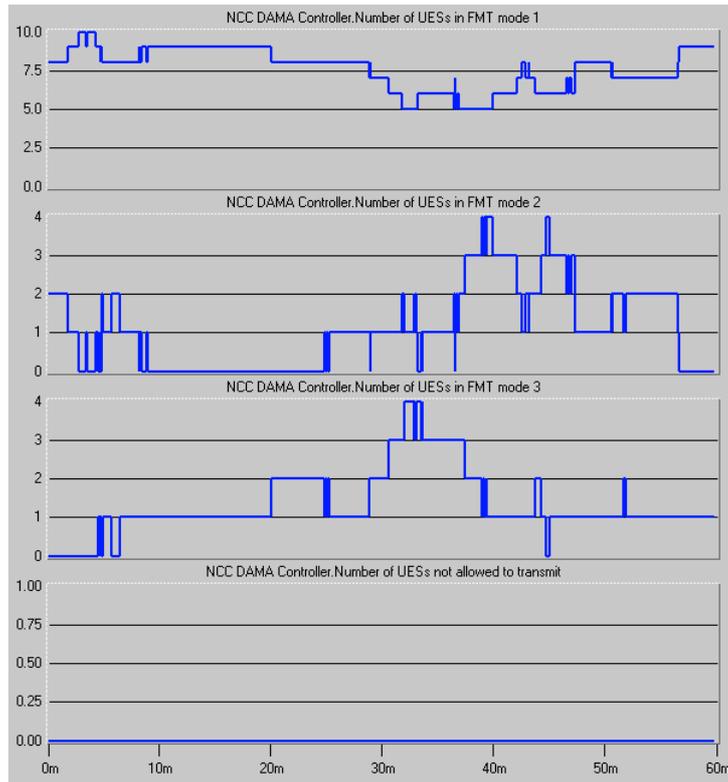
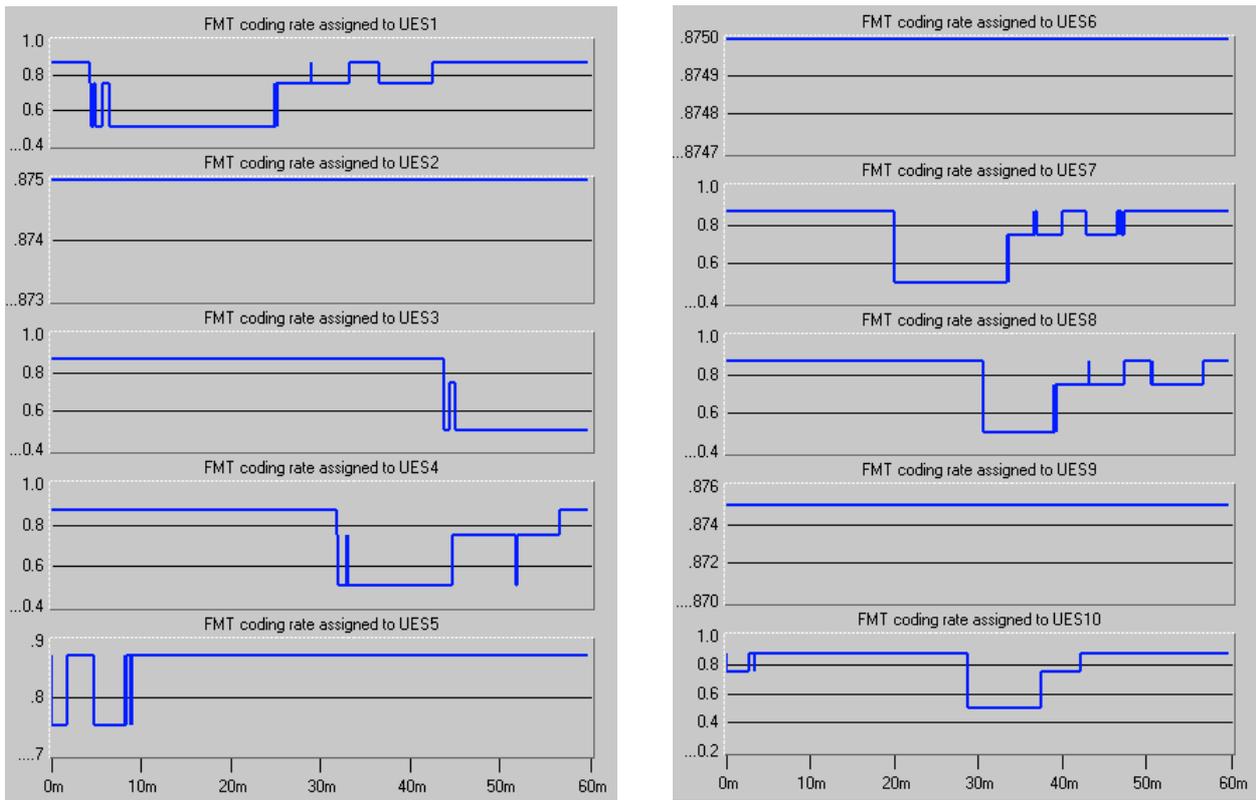


Figure 118 : 118(a), 118(b) et 118(c) : Nombres de stations respectivement en mode 1 (1^{ère} courbe à partir du haut) ; en mode 2 (2^{ème} courbe) ; et en mode 3 (3^{ème} figure) ; 118(d) (courbe du bas) : Nombre de stations non autorisées à transmettre



Figures 119 : Evolution des taux de codage assignés aux stations pendant la durée de la simulation

Une autre série de courbes corollaires aux courbes de la figure 118 fait intervenir cette fois les nombres de créneaux alloués dans la trame dans chacun des différents modes FMT. Leurs profils coïncident bien avec les profils des courbes donnant les nombres de stations dans chacun des modes FMT (cf. : Figure 120).

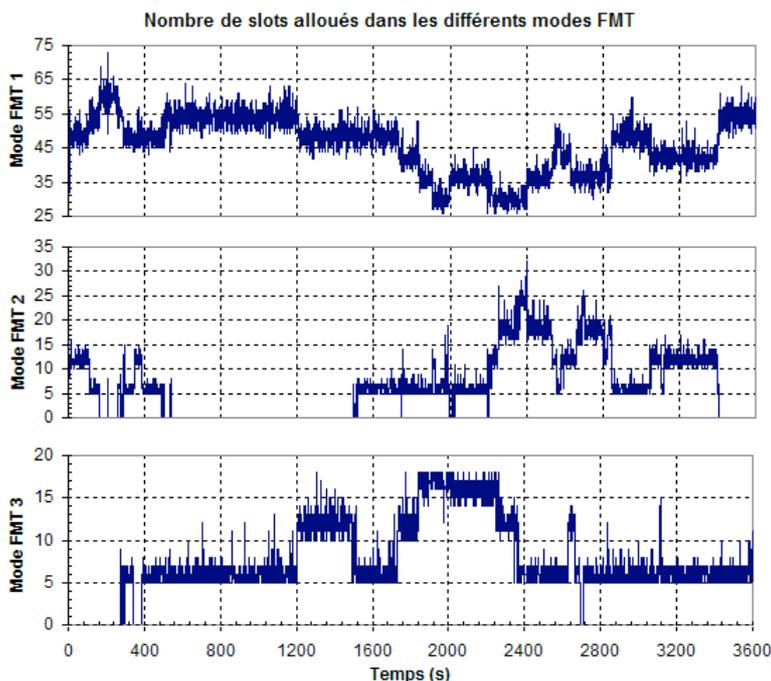


Figure 120 : Nombres de créneaux occupés dans chacun des modes FMT respectivement

L'interprétation de ces courbes est bien cohérente avec l'évolution des conditions de propagation sur l'ensemble du système. Plusieurs phases sont importantes à appréhender :

- Tout au début de la simulation, 8 stations sont en mode FMT air clair, dont 3 ne sont pas touchées par la pluie. Or chaque station génère du trafic téléphonique à 64 kbit/s, ce qui représente une allocation continue de capacité réservée CRA de 4 créneaux (un créneau transporte 16 kbit/s de données). La capacité CRA totale pour toutes les stations est donc de 32 créneaux, valeur qui peut être observée sur la courbe bleue (nombre de créneaux occupés en mode 1 dans la trame) pratiquement à l'instant $t = 0$ s. Les fortes variations rapides (de l'ordre de la seconde) des courbes sont dues aux capacités RBDC allouées aux stations suivant leurs requêtes dynamiques de capacité par voie OBR.
- A partir de $t = 1204$ s (environ 20 mn), jusqu'à $t = 1841$ s (environ 30 mn), le nombre de stations touchées par la pluie augmente régulièrement par paliers successifs : de 2 à 3 à $t = 1733$ s (≈ 29 mn) ; de 3 à 4 à $t = 1833$ s (= 30 mn 33 s) ; et de 4 à 5 à $t = 1841$ s (= 30 mn 41 s), tandis qu'au fur et à mesure que le temps s'écoule dans cet intervalle de temps, l'atténuation sur la liaison montante de la station 7 s'accroît, pour se rapprocher de son maximum. La station 10 rentre subitement dans la zone de service de la cellule de pluie 2 avec une atténuation d'emblée de -10 dB ce qui lui fait prendre immédiatement le mode FMT 3. C'est ce qui explique que le nombre de créneaux alloués en mode FMT 1 diminue progressivement, puisque les stations mentionnées précédemment commutent en modes FMT dégradés. Inversement, le nombre de stations en mode FMT 3 subit la progression dans le sens inverse : il augmente d'une unité entre 20 et 30 mn. L'augmentation subite du nombre de créneaux alloués en mode 3 aux alentours de $t = 25$ mn est due essentiellement à la station 7.
- Entre $t = 37$ mn et $t = 45$ mn approximativement, les stations 7, 4, 7, 8 et 10 subissent les versants montants de leurs événements de pluie respectifs ; mais seule la station 7 expérimente une atténuation suffisamment faible pour la faire basculer en mode FMT 1, alors que les autres stations transmettent toujours en mode 3 ou basculent dans ce mode. Ceci rend compte de l'augmentation du nombre de créneaux en mode FMT 1 et du nombre de créneaux en mode FMT 3.

En poursuivant l'examen de l'évolution des atténuations subies par les stations sur leurs liaisons montantes, il est aisé de comprendre les autres phases des courbes de la figure 120.

Le nombre total de créneaux alloués dans une trame oscille autour d'une valeur moyenne de 59-60 comme le montre la figure 121.

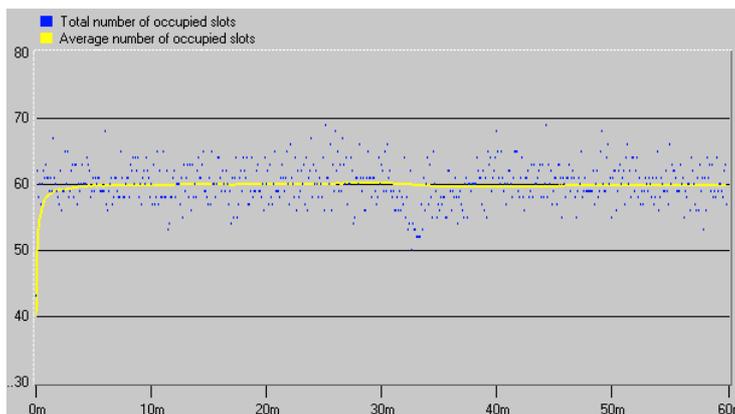


Figure 121 : Nombre total de créneaux alloués dans une trame (points bleus) et nombre total moyen de créneaux alloués dans une trame (en jaune)

La figure 122 ci-dessous représente la fonction de densité de probabilité discrète (appelée PMF ou en anglais *Probability Mass Function*) des nombres de créneaux alloués respectivement total, en mode 1, en mode 2 et en mode 3. La PMF du nombre de créneaux total atteint un pic de 59 qui représente sa valeur moyenne, ce qui corrobore bien le résultat indiqué sur la figure précédente.

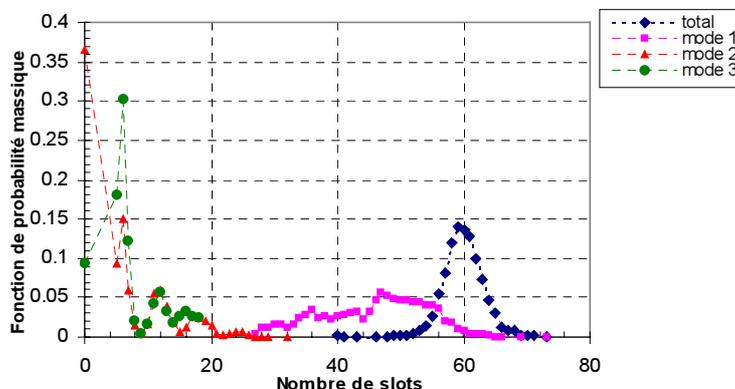


Figure 122 : Fonction de densité de probabilité discrète des nombres de créneaux alloués respectivement total, en mode 1, en mode 2 et en mode 3

5.3.3.2.4 Effet d'hystérésis dans le mécanisme de commutation des modes FMT

La figure 123 de la page suivante laisse entrevoir des sauts inopinés dans l'évolution temporelle des paramètres QoS. L'observation corrélée de l'évolution du mode FMT assigné montre que les événements de discontinuité A, B et C proviennent d'une commutation erratique de mode FMT. Ce comportement est dû à l'hystérésis inéluctable existant entre deux modes consécutifs. La boucle de contrôle FMT tente au moyen d'un paramétrage optimal des marges dites d'hystérésis et de détection de diminuer ces occurrences, mais elles ne peuvent être éliminées complètement. Le simulateur de l'ONERA sous Matlab orienté couche physique présente le même type de comportement.

Des vues agrandies (cf. : Figures 124) des événements A, B et C marqués sur la figure 123 permettent d'avoir un ordre de grandeur des durées liées à ces phases transitoires d'hystérésis de la boucle FMT. Par exemple, l'événement A commence à environ $t = 24 \text{ mn } 54 \text{ s}$ et se finit vers $t = 25 \text{ mn } 18 \text{ s}$, ce qui représente une durée d'à peu près 24 s, ce qui est loin d'être insignifiant devant les 10 secondes erronées consécutives requises par l'IUT-T I.357 [190] pour déclarer une période d'indisponibilité sur la liaison. Dans le cas particulier de l'événement A toutefois, la figure 124(a) permet de remarquer que le TEB reste bien en dessous de 10^{-9} , donc l'événement A n'a pas produit de coupure sur la liaison.

En revanche, les événements B et C entraînent parallèlement des remontées sensibles du TEB qui peut devenir ponctuellement supérieur largement à 10^{-9} . Fort heureusement, ces remontées inopinées ne durent que quelques secondes ici, moins de 4 secondes approximativement, et par conséquent n'entraînent pas non plus de coupure de liaison.

Il n'est pas exclu néanmoins que de telles phases transitoires d'hystérésis ne génèrent statistiquement pas des périodes d'indisponibilité sur la liaison. L'effet d'hystérésis de la contre-mesure autour des instants de commutation de mode, doit ainsi être minutieusement contrôlé et limité par des réglages appropriés.

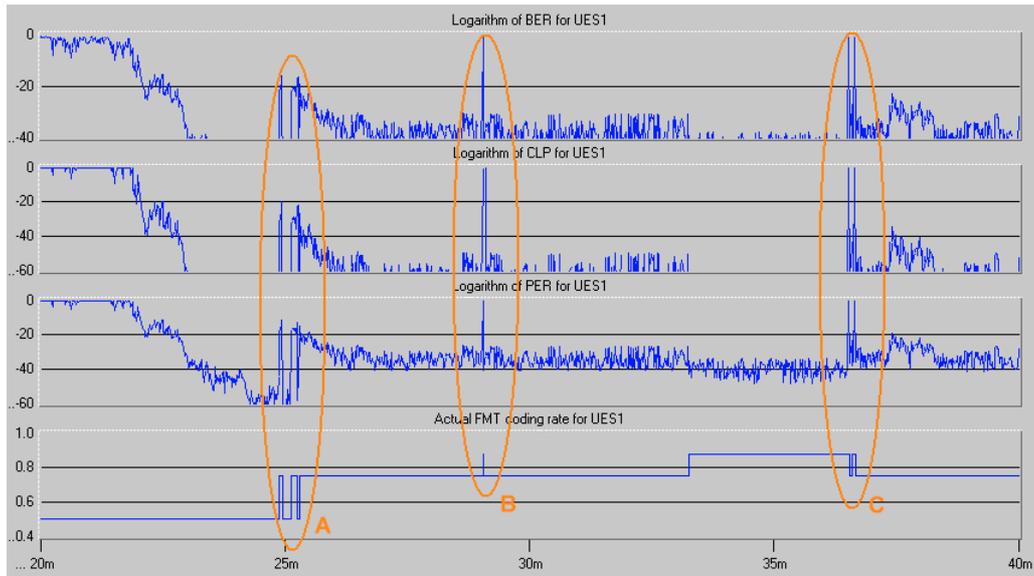
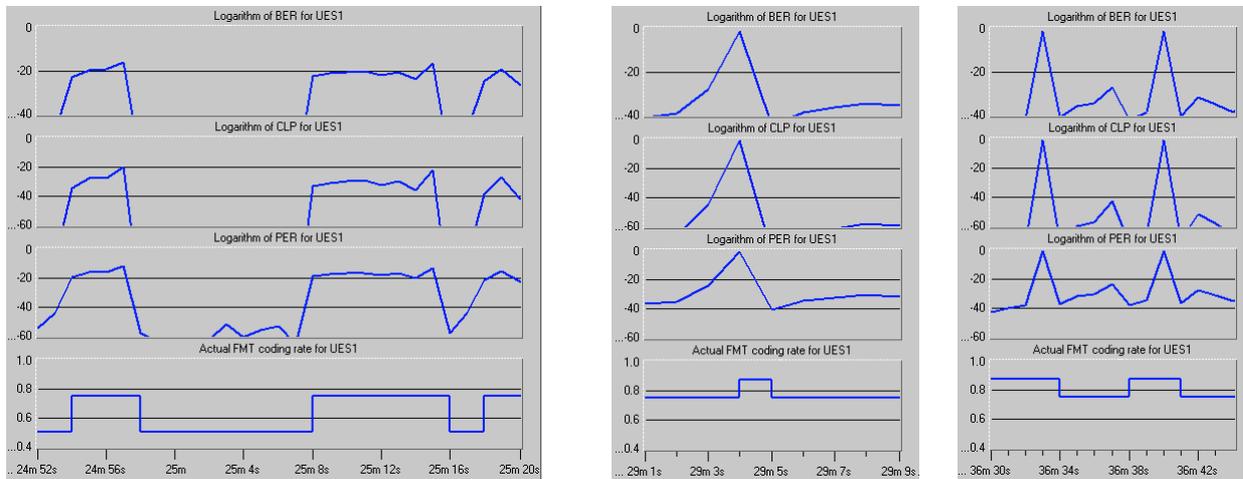


Figure 123 : Sauts survenant dans l'évolution des paramètres QoS dus à des commutations erratiques de mode FMT



Figures 124 : Vues agrandies des sauts A (à gauche, fig. 124(a)), B (au milieu, fig. 124(b)) et C (à droite, fig. 124(c))

Ce comportement en hystérésis de la commutation du taux de codage se traduit, au niveau du mécanisme d'allocation des créneaux par le DAMA, par un échange en hystérésis entre des créneaux affectés de deux modes FMT consécutifs. La figure 125 ci-après illustre par exemple les échanges entre l'utilisation de créneaux en mode 2 et l'utilisation de créneaux en mode 3.

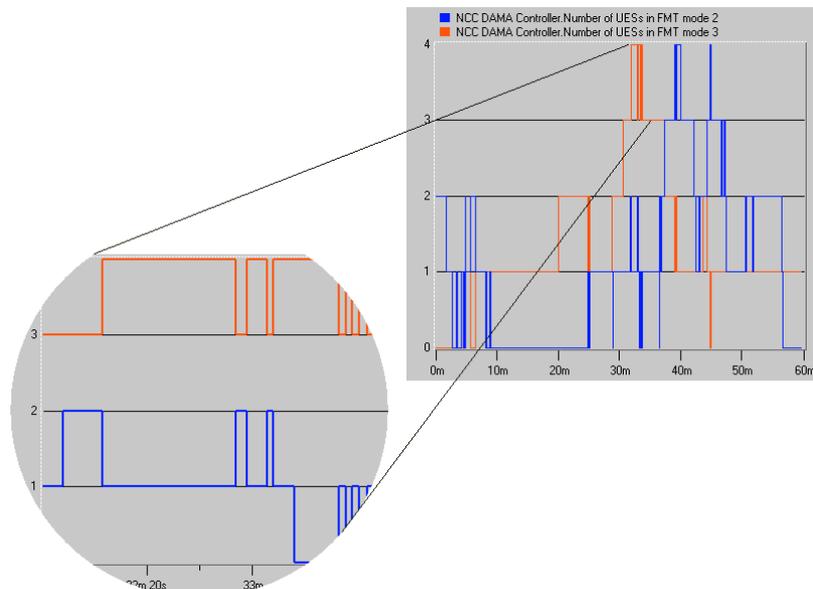


Figure 125 : Echanges entre les modes 2 et 3 dus à l'hystérésis dans le mécanisme FMT

5.3.3.3 Comparaison des performances avec et sans FMT

Les débits utiles effectivement transmis pour chaque station, obtenus respectivement dans le cas où la FMT est inactive et dans le cas où la configuration FMT n°3 est activée sont donnés dans les tableaux suivants, la valeur du TEB pour assurer la disponibilité de la liaison étant de 10^{-9} .

SANS FMT avec objectif de TEB à 10^{-9}								
UES	Nombre total de cellules envoyées	Nombre total de cellules envoyées correctement	Débit utile total (kbit/s)	Débit utile réel (kbit/s)	Nombre de cellules CBR correctes envoyées	Débit CBR utile réel (kbit/s)	Nombre de cellules UBR correctes envoyées	Débit UBR utile réel (kbit/s)
1	658631	258415	68.607	26.918	185815	19.356	72600	7.5625
2	654379	654379	68.164	68.164	468929	48.847	185450	19.318
3	650415	473358	67.752	49.308	339002	35.313	134356	13.995
4	654266	358543	68.152	37.348	257745	26.848	100798	10.500
5	652254	574743	67.943	59.869	412463	42.965	162280	16.904
6	657879	657879	68.529	68.529	472351	49.203	185528	19.326
7	653982	374517	68.047	39.012	269366	28.059	105151	10.953
8	651555	386796	67.341	40.291	276654	28.818	110142	11.473
9	654889	654889	68.218	68.218	469579	48.914	185310	19.303
10	654918	465335	67.921	48.472	334229	34.816	131106	13.657
Toutes	6543168	4858854	680.675	506.131	3486133	363.139	1372721	142.992

FMT3 avec objectif de TEB à 10^{-9}								
UES	Nombre total de cellules envoyées	Nombre total de cellules envoyées correctement	Débit utile total (kbit/s)	Débit utile réel (kbit/s)	Nombre de cellules CBR correctes envoyées	Débit CBR utile réel (kbit/s)	Nombre de cellules UBR correctes envoyées	Débit UBR utile réel (kbit/s)
1	658631	523376	68.607	54.518	375949	39.161	147427	15.357
2	654379	654379	68.164	68.164	468929	48.847	185450	19.318
3	650415	521088	67.752	54.28	373704	38.928	147384	15.353
4	654258	593626	68.152	61.836	426281	44.404	167345	17.432
5	652254	650476	67.943	67.758	466967	48.642	183509	19.116
6	657879	657879	68.529	68.529	472351	49.203	185528	19.326
7	653254	540347	68.047	56.286	389273	40.549	151074	15.737
8	646475	591055	67.341	61.568	422697	44.031	168358	17.537
9	654889	654889	68.218	68.218	469579	48.914	185310	19.303
10	652042	602084	67.921	62.717	433636	45.170	168448	17.547
Toutes	6534476	5989199	680.674583	623.8748958	4299366	447.850625	1689833	176.024

Tableaux 39 : Performances en débit utile, pour un objectif de TEB à 10^{-9} respectivement sans FMT (tableau de haut), et avec FMT3 (tableau de bas)

Les performances du système constitué des 10 stations sont déduites dans le tableau suivant :

	Sans FMT	FMT3
Taux d'allocation de trame (%)	9.42	9.38
Charge de trame réelle (%)	8.52	8.52
CTD CBR (ms)	278.743	278.238
CDV CBR (ms)	15.508	15.051
CTD UBR (ms)	827.324	892.152
CDV UBR (ms)	564.083	628.958
Nombre moyen de stations simultanément en mode 1	NC	7.6
Nombre moyen de stations simultanément en mode 2	NC	1.1
Nombre moyen de stations simultanément en mode 3	NC	1.3
Nombre moyen de créneaux alloués en mode 1	60.2	45.7
Nombre moyen de créneaux alloués en mode 2	NC	6.6
Nombre moyen de créneaux alloués en mode 3	NC	7.6
Nombre total de cellules transmises	6 534 476	6 534 476
Nombre total de cellules correctement transmises	4 858 854	5 989 199
Pourcentage de cellules correctement transmises (%)	74.4	91.7
Nombre total de cellules CBR correctement transmises	3 486 133	4 299 366
Nombre total de cellules UBR correctement transmises	1 372 721	1 689 833
Nombre total moyen de cellules transmises par trame	54.53	54.46
Nombre total moyen de cellules correctement transmises par trame	40.49	49.91
Débit CBR utile réel total (kbit/s)	363.139	447.851
Débit UBR utile réel total (kbit/s)	142.992	176.024
Débit utile transmis total (kbit/s)	680.675	680.675
Débit utile réel total (kbit/s)	506.131	623.875

Tableau 40 : Performances comparées du système

Une cellule est dite "correcte" si le TEB associé est inférieur à 10^{-9} . Il s'agit là d'une approximation grossière de la notion de disponibilité au sens de la recommandation IUT-T 1.357. Les observations qui peuvent être émises à partir des résultats des tableaux précédents sont principalement les suivantes :

- ✓ Le taux d'allocation de trame est apparemment légèrement plus faible dans le cas où la configuration FMT n°3 est activée que dans le cas où la FMT n'est pas déployée (9.38 % contre 9.42). En fait, ces deux taux reflètent le même nombre moyen entier de créneaux alloués par trame (60). La différence s'explique par le fait que 639 créneaux seulement sont disponibles lorsque la FMT n°3 est activée, contre 640 sinon.
- ✓ Les délais de bout en bout et les gigues des cellules CBR sont sensiblement identiques sans FMT et avec l'utilisation de la FMT3 (les écarts sont de l'ordre de la demi-milliseconde, donc infimes). En revanche, les résultats obtenus pour cinq grains différentes semblent confirmer que les délais et les gigues des cellules UBR sont plus élevés (respectivement d'environ 8% et 11.5% pour les chiffres rapportés sur le tableau 40) dans le cas où la configuration FMT n°3 est enclenchée. Cette tendance peut être expliquée par le fait que dans cette dernière configuration le débit de transmission des stations est réduit de quart lorsqu'elles commutent en mode FMT dégradé n°3, ce qui rallonge ainsi les temps d'accès à la trame montante.
- ✓ Dans le cas où la configuration FMT n°3 est activée, le débit utile total réel est supérieur par rapport au cas sans FMT (623.87 kbit/s contre 506.131 kbit/s soit un gain de 23.26 %) durant l'événement de pluie forte. De façon équivalente, cette amélioration se traduit aussi par un nombre total moyen de cellules correctes transmises par trame plus élevé dans le cas de la FMT n°3 (49.91 au lieu de 40.49).

5.3.4 Canal variable avec FMT en configuration de pluie extrême

5.3.4.1 Configuration de la simulation

Un scénario de nature "catastrophiste" fortement irréaliste est mis en œuvre, dans lequel il arrive qu'à certains moments, des phénomènes de congestion de trame surviennent, le nombre de stations étant toujours fixé à 10. Dans ce scénario, les stations ont été positionnées de manière à ce qu'un grand nombre d'entre elles subissent simultanément l'événement de pluie sur de longues durées de temps (plus de 50% du temps simulé).

Les mêmes hypothèses que pour le cas de pluie normale ont été adoptées, et les positions des stations ont été choisies de telle sorte que la commutation progressive vers les modes FMT dégradés avec l'évolution du canal, à mesure que se déplacent les cellules de pluie, puisse être bien mise en évidence.

La figure 126 ci-dessous rend compte des positions initiales (en traits pleins) et finales (au bout d'une heure, en traits pointillés) des cellules de pluie par rapport aux stations.

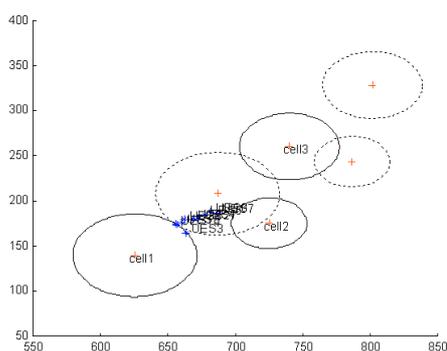


Figure 126 : Positions initiales et finales des cellules de pluie pour la carte radar utilisée



Figure 127 : Représentation du scénario de simulation

De la figure 126, il apparaît clairement que toutes les stations sont touchées par la même cellule de pluie (n°1). Les positions des stations sont données dans le tableau 41.

UES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitude(°)	0.8936	1.005	0.9581	1.043	1.083	1.1199	1.1657	0.94589	0.93673	0.89522
Latitude (°)	42.81	42.86	42.72	42.87	42.91	42.936	42.927	42.856	42.826	42.808

Tableau 41 : Positions des stations

5.3.4.2 Effets de la contre-mesure sur le vidage des cellules

Cette section est destinée à observer l'impact de la contre-mesure sur le vidage des files d'attente lorsqu'il n'y a plus de créneaux disponibles à allouer dans la trame montante. La station 6 est observée. A certains moments, elle se voit refuser l'assignation d'un mode FMT, donc l'accès à la trame montante pour ses cellules en attente de transmission dans les files d'attente. Cette situation est dépeinte sur les figures 128 et 129 ci-après :

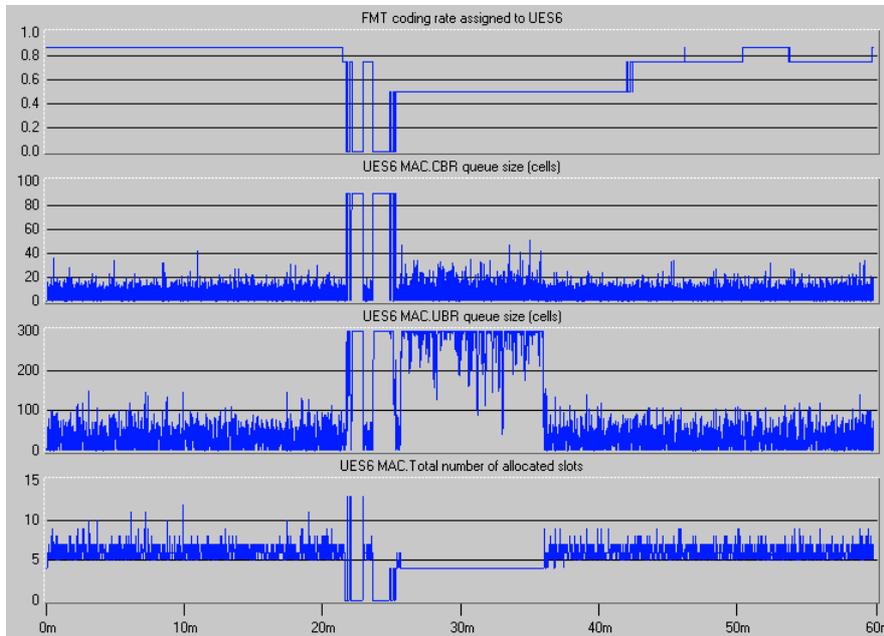


Figure 128 : Evolution de la taille des files d'attente CBR (2^{ème} courbe à partir du haut) et UBR (3^{ème} courbe à partir du haut) de la station 6, et du nombre total de créneaux alloués à cette station (courbe du bas) suivant le mode FMT assigné (courbe du haut)

Sur la période allant de l'instant $t = 21$ mn 40s environ à $t = 25$ mn environ, se trouvent plusieurs intervalles de temps pendant lesquels aucun mode FMT n'a pu être assigné à la station 6 (le taux de codage passe à 0). Et par conséquent, le contrôleur DAMA n'alloue aucun créneau à la station 6 (courbe du bas de la figure 128 ; voir aussi la figure 129 qui constitue un agrandissement local de la figure 128), et la taille des files d'attente CBR et UBR se stabilise pendant ces intervalles de temps, les cellules étant bloquées ne disposant pas de créneaux dans la trame pour pouvoir être transmises (voir courbe du bas représentant le nombre de cellules envoyées par trame à partir de la file d'attente UBR, sur la figure 129).

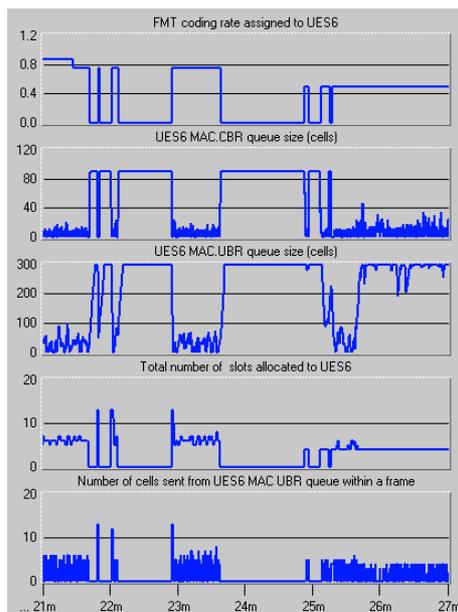


Figure 129 : Evolutions localisées de la taille des files d'attente CBR (2^{ème} courbe à partir du haut) et UBR (3^{ème} courbe à partir du haut) de la station 6, du nombre total de créneaux alloués à cette station (4^{ème} courbe à partir du haut) et du nombre de cellules transmises dans une trame à partir de la file d'attente UBR (courbe du bas), en parallèle avec l'évolution du mode FMT assigné (courbe du haut)

Il peut être vérifié, d'après la figure 128, que lorsque la station 6 reçoit de nouveau à partir de $t = 25$ mn environ une assignation valide de mode FMT, elle peut recommencer à vider ses files d'attente.

Une situation particulièrement intéressante survient lorsque à partir de $t = 27$ mn 40s environ, la station reçoit le mode FMT le plus dégradé (mode 3) : 4 stations aux alentours de ce moment peuvent transmettre en mode 3. Il s'agit des stations 2, 4, 5 et 6. Dans ce mode 3, le DAMA alloue déjà une capacité CRA totale pour les 4 stations de $4 \times 4 = 16$ créneaux sur les 18 disponibles. Il ne reste donc plus que 2 créneaux disponibles en mode 3 pour d'éventuelles capacités RBDC dynamiques requises par la station 6.

Or la capacité RBDC calculée par le DAMA pour la station 6 est constante et égale à 16 kbit/s (1 créneau) à partir de $t = 25$ mn 40s jusqu'à au moins $t = 28$ mn d'après la dernière courbe en partant du haut de la figure 131 et la troisième courbe en partant du haut de la figure 130. Mais la station 6 étant la moins prioritaire parmi les 4 stations 2, 4, 5 et 6 tous en mode 3, n'a aucune chance de se voir allouer cette capacité RBDC en plus de la capacité CRA déjà allouée, puisque les stations 2 et 4 ont déjà remporté à elles seules les créneaux restants grâce à leurs propres requêtes RBDC dont la valeur minimale est de 16 kbit/s (cf. : Figures 131).

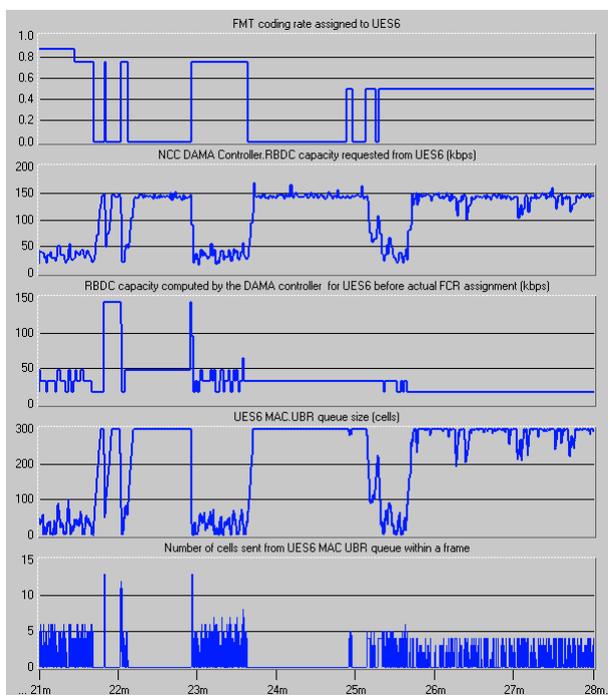


Figure 130 : Etat de la file d'attente UBR de la station 6 (4^{ème} courbe à partir du haut) en corrélation avec les valeurs des requêtes RBDC requises (2^{ème} courbe) et calculées (3^{ème} courbe), et nombre de cellules UBR transmises dans une trame (5^{ème} courbe), suivant l'évolution du mode FMT assigné (1^{ère} courbe)

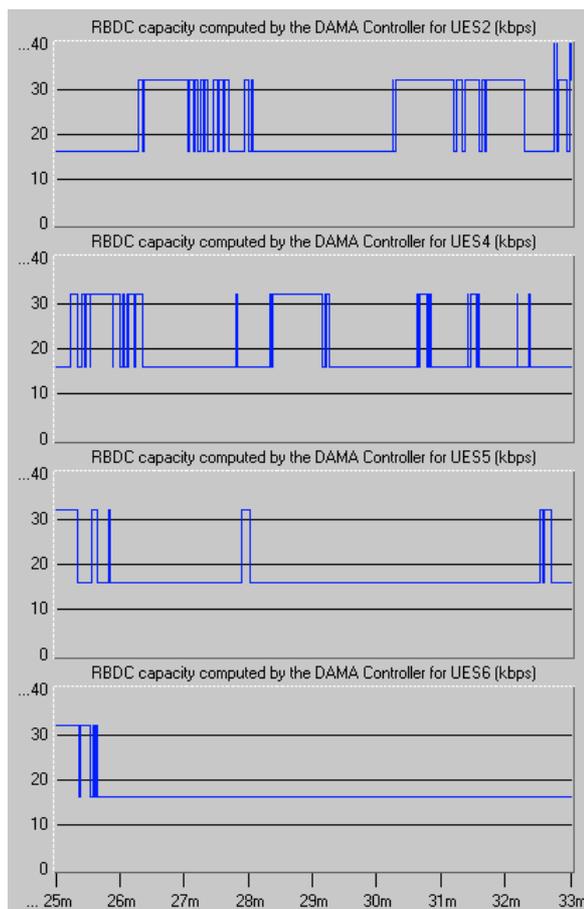


Figure 131 : Requêtes RBDC calculées par le DAMA pour les stations 2, 4, 5 et 6

L'absence d'attribution d'un mode FMT valide interdit à la station de transmettre des cellules à partir de ses files d'attente, ce qui veut dire que sa liaison montante est tout simplement coupée, comme le montrent les courbes de la figure 132 de la page suivante :

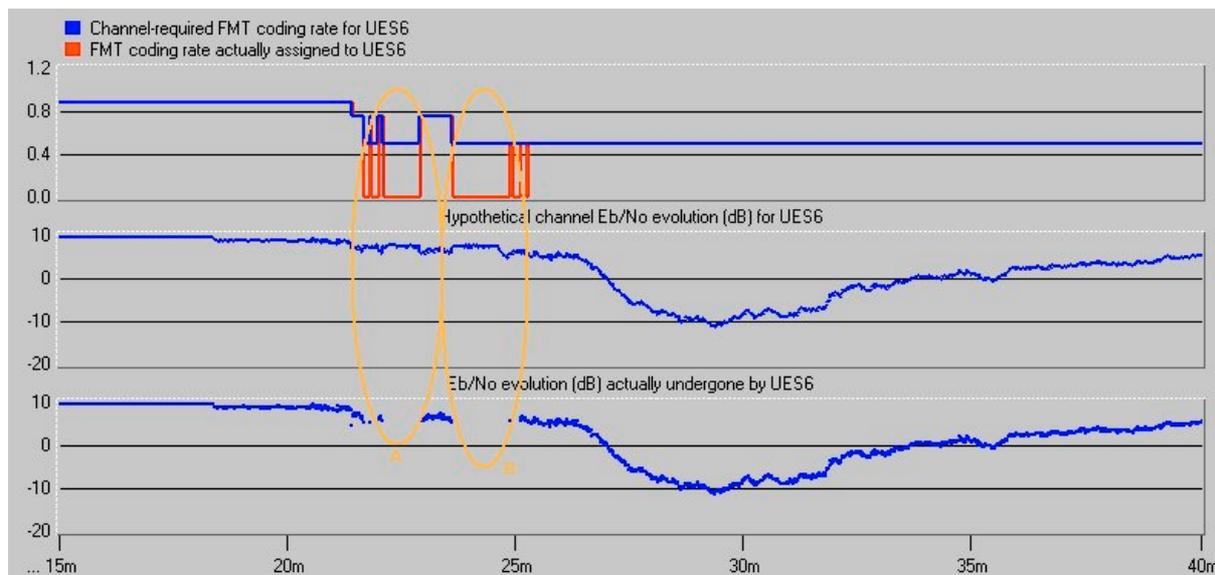


Figure 132 : Evolution hypothétique de E_b/N_o (au milieu) d'après le mode FMT requis (courbe du haut, en bleu) par le canal et évolution réelle du rapport E_b/N_o (courbe du bas) d'après le mode FMT véritablement assigné à la station 6 (courbe du haut, en rouge)

CONCLUSION

Ce document a tracé les grandes lignes d'une étude des performances réseau d'un système satellitaire suivant une approche novatrice qui propose une rupture fondamentale d'avec l'approche *unicouche* habituelle découpant un projet en plusieurs sous-projets ou composantes a priori disjointes qui ne se rejoignent qu'au niveau des interfaces au moment de tout intégrer sans qu'il y ait d'emblée une vision *multicouche* des interactions mutuelles. Les limites et insuffisances de cette dernière approche se traduisent dans l'absence de réponses approfondies et élaborées dans la littérature technique à des questions comme : « *Quels sont les effets d'un fort événement de pluie sur le fonctionnement et les performances d'un gestionnaire des ressources satellitaires ?* »

Répondre à de telles questions a été l'un des objectifs poursuivis par la présente étude. Il a été mis en avant la problématique majeure qui se trouve au cœur de l'étude, à savoir celle d'une *bande de transmission variable* dans la gestion des ressources du fait de l'introduction de techniques adaptatives de compensation des effets d'atténuation. Cette problématique illustre parfaitement l'incidence que peut avoir la prise en compte d'informations liées au canal – orientées propagation – sur des protocoles situés sur des couches supérieures : des remaniements structurels et des extensions comportementales deviennent dès lors incontournables.

L'examen d'une telle incidence sous divers aspects s'est traduit par la nécessité d'élaborer un simulateur réseau qui soit capable d'incorporer des informations issues de la couche physique en termes à la fois statistiques et comportementaux dans des algorithmes et fonctions de la couche ATM et de la couche accès : la génération de trafic, le tamponnage en files d'attente des cellules de trafic, l'ordonnanceur des cellules, le contrôle d'admission des connexions (CAC), le protocole MAC de contrôle d'accès aux ressources radio, l'allocation des créneaux dans la trame MF-TDMA montante et l'allocation des porteuses. Ce simulateur réalisé dans l'environnement du logiciel de commerce OPNET y parvient par le biais d'un émulateur intégré d'une contre-mesure adaptative à base de contrôle de puissance en liaison montante, de codage adaptatif et de réduction de débit, et d'un modèle dynamique de champ de précipitation qui s'appuie sur l'utilisation d'une série chronologique empirique d'atténuation dans le canal de propagation Ka, et sur une carte radar.

Les modèles de propagation développés et les algorithmes de gestion des ressources par nécessité devenus *prédictifs* au sens du canal ont été décrits précisément, ainsi que l'incidence du canal Ka sur les performances du système, étayée par un certain nombre de résultats situés à différents niveaux : niveau cellule, niveau appel, niveau trame. Les impacts quelquefois subtils de l'atténuation sur la liaison lors d'un événement de pluie forte, et d'une technique de contre-mesure adaptative à bande transmise variable ont été mis en évidence. Ces résultats ont permis d'investiguer de multiples niveaux d'interaction entre les mécanismes de gestion des ressources, depuis le niveau global avec les performances de délai de bout en bout et de gigue des cellules ATM en fonction de la charge de trafic dans le réseau et des conditions de propagation, jusqu'à des niveaux plus localisés comme le niveau appel avec l'évaluation des probabilités de blocage ou encore le niveau trame (taux d'occupation de trame), en passant par le niveau cellule sur la couche ATM (statistiques concernant le comportement des files d'attente). Ils ont permis de corrélérer des phénomènes de dégradation du canal à des effets mesurables sur la gestion des ressources et sur la qualité des services transportés dans un système satellitaire multimédia en bande Ka. Par ailleurs, la plate-forme de simulation a permis de rendre compte "en grandeur nature" de l'enchevêtrement dynamique des actions de contre-mesure centralisées par un contrôleur global sur diverses stations situées sur une même zone de service, et partant des effets agrégés de ces mêmes actions sur la gestion des ressources. Cette possibilité d'une représentation des comportements corrélés des dispositifs de contre-mesure et des mécanismes de gestion des ressources en parallèle avec l'évolution des conditions météorologiques, par le biais d'un modèle de variabilité spatiale de la pluie, constitue l'un des aspects les plus innovants de la plate-forme de simulation.

Les premiers résultats s'articulent autour de ce qui pourrait paraître un grand paradoxe s'énonçant ainsi : tandis que sur le long terme, l'apport des techniques de contre-mesure en ce qui concerne les performances de perte de cellules apparaît comme négligeable par rapport au cas sans contre-mesure, certaines performances locales, à court et moyen termes, sont cependant améliorées, comme la disponibilité du système (comme c'était prévisible dès le départ d'après le calcul de la réduction attendue des affaiblissements), du fait de la diminution des durées de coupure observées sur des événements d'atténuation de moyenne durée (quelques heures). D'autres performances comme le taux de perte de cellules ATM (CLR) ou encore les délais de bout en bout (CTD) et la gigue (CDV) des cellules, si elles restent relativement stables par rapport au cas sans FMT à faible charge (moins de 10%) même en situation de pluie très forte, se dégradent néanmoins, à charge moyenne, dans le cas de l'introduction d'une technique FMT à trois modes faisant intervenir un codage adaptatif et une réduction de débit, lorsqu'une proportion élevée de stations est affectée par la pluie simultanément. Dans un tel cas de pluie extrême, des phénomènes de congestion ont été observés : d'abord congestion de trame (capacité disponible insuffisante dans la trame montante dans le mode FMT dégradé requis), puis par ricochet, coupure de liaisons, et enfin, débordement des files d'attente dans les stations. Il s'agit là d'un cas typique où les

conditions de propagation extrêmes dégradent les performances de taux de perte de cellules CLR durant un événement de précipitation. Et toutefois, même dans cette situation très déconcertante, les simulations ont clairement mis en évidence que l'utilisation de la FMT permet d'atteindre des performances de débit utile réel supérieures au cas sans FMT.

L'intérêt majeur d'une FMT réside ainsi principalement dans la diminution des coupures et dans l'augmentation du débit utile correctement transmis. Elle permet par conséquent un gain appréciable d'utilisation du canal et donc de capacité, et c'est bien là l'un de ses plus grands intérêts. Mais le déploiement d'une technique de contre-mesure apporte également des dégradations dans des situations spécifiques, et contraint à des modifications dans l'architecture des mécanismes de gestion des ressources. Ceci donne lieu à des protocoles qui gagnent rapidement en complexité d'autant plus que les interactions se multiplient et que les réactivités des différents protocoles (CAC, DAMA) se situent dans des ordres de grandeur très distincts.

Si cette étude se clôt maintenant, les perspectives d'amélioration et d'affinement dans le simulateur ne manquent cependant pas et de vastes sources d'investigation viennent en fait d'être seulement explorées ! Il va sans dire qu'un profond remaniement réfléchi des architectures du protocole MAC et du CAC est indispensable pour optimiser l'utilisation des ressources sur le moyen/long terme. La solution prospective d'un CAC prédictif exploitant la connaissance statistique des futurs instants de réduction de capacité a été définie dans ses principes et ses grandes lignes d'architecture. Tout indiquerait qu'une orientation de ce type est une des voies royales d'avenir pour limiter les dégradations en terme de probabilité de rejet a posteriori des appels. En effet, il a été fortement souligné qu'un CAC conventionnel, dont la stratégie d'admission se contente d'exploiter uniquement la connaissance de la capacité disponible courante à l'instant de décision, favorise un rejet de connexions a posteriori, ce qui peut engendrer une rupture inattendue des contrats de trafics, et donc dégrader la qualité de service des applications, au grand malheur des utilisateurs finaux. La solution d'un CAC prédictif à capacité variable semble donc être prometteuse et certainement mériter de constituer l'objet de travaux de recherche plus poussés qui requièrent d'emblée l'intégration de l'algorithme CAC dénommé "RCCT" (*Random Capacity Change Time*) basé sur la courbe de limite d'admission (ALC) de Siwko et Rubin, dans la plate-forme de simulation réalisée.

Il est essentiel de rappeler enfin qu'un des objectifs visés, dans un système satellitaire d'accès multimédia de type SAGAM, est de garantir la satisfaction des utilisateurs finaux qui sont les véritables bénéficiaires des applications et services proposés. Cette thèse a exploré diverses méthodologies permettant de transcrire les effets du canal à partir d'un paramètre de qualité de service situé sur la couche physique, qu'est le TEB, en paramètres QoS plus adaptés aux couches hautes. La méthodologie suggérée par l'IUT dans sa recommandation S.1062, si elle représente un effort sérieux de mise en correspondance de divers paramètres QoS, entre ceux de G.826 et ceux de I.356 qui relèvent de la couche ATM, reconnaît explicitement ses limites : des paramètres QoS plus agrégés sont nécessaires. Il suffit de considérer des applications vidéo comme la visioconférence pour s'apercevoir que l'un des pas à franchir maintenant est de parvenir à maîtriser correctement les impacts du canal sur la qualité de service subjective perçue par un utilisateur final, autrement dit à translater une information liée aux conditions de propagation, non seulement en taux de perte de cellules ou de taux d'erreur paquets PER, mais également en métrique de qualité perceptive.

PERSPECTIVES

1 APERÇU DES LIMITATIONS DE LA PLATE-FORME DE SIMULATION ET DE SES AMELIORATIONS IMMEDIATES

La plate-forme de simulation développée qui vient d'être présentée repose sur un certain nombre d'orientations et d'algorithmes qui, pour la plupart, impliquaient des hypothèses sous-jacentes grandement simplifiées ou simplificatrices voire réductrices. Compte-tenu de l'aspect sensible de l'approche de simulation qui a été adoptée et de la complexité inhérente à l'incorporation de nombreux modèles innovants, le premier objectif visé était principalement de valider les fonctionnalités de la plate-forme, sans avoir la prétention de rendre compte de toute la finesse des comportements qui pourraient résulter d'hypothèses plus précises et réalistes. Ceci se traduit par des résultats de performances nécessairement biaisés par rapport à la réalité.

Dans les sections qui suivent, les principales limitations de la plate-forme de simulation actuelle et les possibilités d'améliorations immédiates ou à court et moyen termes pour y remédier sont exposées. Chacun des divers points relevés mérite un développement significatif spécial.

1.1 AMELIORATION ET EXTENSION DES ENTREES DU SIMULATEUR

Toutes les simulations ont été réalisées sur la base des entrées suivantes :

1. Lorsque le mécanisme de contre-mesure est activé, seule la configuration FMT n°3 (à trois modes et incluant ULPC, AC et DRR) a été utilisée.
2. Hors temps clair, le seul événement de pluie injecté a été l'événement de pluie forte présentant une amplitude d'atténuation de 28 dB environ.
3. La configuration météorologique établissant les positions initiales des cellules de pluie relevait uniquement d'une carte radar de référence comportant trois cellules de pluie.
4. Les stations ont été positionnées de façon arbitraire.

Dans l'avenir, afin de soutenir des comparaisons significatives, ces entrées peuvent être étendues comme suit :

1. Utilisation de la configuration FMT n°2 (à deux modes et faisant intervenir uniquement ULPC et AC), voire de mécanismes FMT à nombre de modes plus élevé.
2. Exploitation d'un événement de pluie légère et d'un événement de forte scintillation en temps clair.
3. Emploi d'une carte radar de Karlsruhe (Allemagne) à 24 cellules de pluie de concert avec une localisation plus réaliste des stations, et ce dans le but de générer une répartition de la pluie proche de la réalité sur la zone de service considérée.

1.2 INTRODUCTION DE MODELES DE TRAFIC PLUS COMPLEXES

Le simulateur actuel s'appuie sur des modèles de trafic classiques et élémentaires de type markovien empruntés uniquement à deux classes de service ATM : CBR (trafic téléphonique) et UBR (trafic de données). Les deux types de source utilisés n'exhibent que le caractère de dépendance court terme (*Short Range Dependence* ou SRD).

Ainsi, la première amélioration à effectuer est d'envisager d'introduire un caractère sporadique et de mesurer les effets du taux de sporadicité sur les performances du système.

En deuxième lieu, comme dans un système multimédia un grand nombre de sources hétérogènes se superposent, il convient d'étendre le nombre de types de trafic injecté en introduisant notamment du trafic VBR et des services de type ABR qui est de loin le plus difficile à gérer en raison du caractère rétroactif, particulièrement en configuration satellitaire géostationnaire. Une source vidéo MPEG-1 de type VBR-rt à débit moyen (moins de 500 kbit/s) pourrait être introduite dans une première étape, source modélisée simplement par un processus de Poisson modulé par une chaîne de Markov (MMPP) à N états. Un deuxième niveau d'amélioration consisterait à augmenter le débit de cette source vidéo de telle sorte que la somme des débits crête de toutes les sources de trafic pour chaque station dépasse le débit maximal dans le mode FMT n°3 le plus dégradé (512 kbit/s). L'intérêt de la présence d'une telle source de trafic vidéo repose sur l'opportunité d'étudier les problèmes liés au multiplexage statistique et aux performances de la contre-mesure en situation de lourdes dégradations du canal.

En troisième lieu, la caractérisation des sources de trafic multimédia suppose d'emblée une bonne modélisation statistique de ces sources, qui puisse rendre compte des qualités de service associées et de leurs propriétés intrinsèques. Divers types de modèles de trafic les plus couramment utilisés pour les réseaux large bande y compris ceux qui présentent le caractère de dépendance long terme (*Long Term Dependence* (LRD) ou encore *self-similarity*) constaté sur

certains types de trafic tels que la vidéo et les flux Ethernet, sont donnés dans [173-179]. La littérature technique offre un très large éventail de modèles de trafic auto-similaires et s'avère une source inépuisable d'expérimentation.

1.3 DEVELOPPEMENT ET EVALUATION D'UN CAC PREDICTIF A CAPACITE VARIABLE

Les simulations présentées dans la section §5.3 sont toutes parties de l'hypothèse d'un CAC conventionnel de type bande équivalente à capacité constante. Le développement théorique exposé dans la section §4.5 s'est attaché à mettre en évidence l'inadéquation d'un CAC à capacité constante vis-à-vis du système lorsque la contre-mesure de type 3 est enclenchée et qu'il se produit des réductions de capacité, car alors la probabilité de rejet des connexions a posteriori risque d'être fortement augmentée en situation de pluie. Un algorithme CAC à capacité variable devient alors nécessaire pour remédier à ce problème. Tous les principes théoriques d'un tel CAC dérivant de la Courbe de Limite d'Admission (ALC) introduite par Siwko et Rubin, et qui garantit une probabilité de blocage minimal, selon la variante baptisée RCCT adaptée aux instants de réduction de capacité stochastiques, ont été spécifiés et développés dans la section §4.5. En particulier, du fait que la limitation majeure du CAC RCCT réside dans sa propriété mono-classe, c'est-à-dire qu'il ne s'applique qu'à une classe de connexions homogènes (les connexions requièrent toutes la même capacité), une étude de la mise en œuvre proprement dite de ce CAC dans l'environnement OPNET a été effectuée. Elle requiert une extension multi-classe qui peut être rendue aussi simple que possible moyennant plusieurs approximations particulières. La réalisation de cet algorithme dans le simulateur constitue la prochaine étape incontournable.

- Dans une première phase, il pourra être pris comme distribution $G(T)$ des instants de réduction de capacité, des distributions statistiques arbitraires connues.
- Dans une deuxième phase, une distribution $G(T)$ pourra être construite de façon empirique par l'intermédiaire d'une analyse statistique des instants de réduction de capacité relevés dans les simulations OPNET.

Ce CAC exploite dans sa stratégie de décision des informations d'état du canal issues du prédicteur FMT et du canal de propagation.

Une attention particulière doit être portée sur un modèle agrégé de réduction de capacité rendant compte à la fois de la quantité de réduction de capacité et de la distribution agrégée des événements de réduction de capacité. Dans le cas où une station unique est étudiée, les événements de réduction de capacité dus aux changements de mode FMT sont suffisamment distants les uns des autres pour que l'hypothèse d'une seule occurrence de réduction de capacité durant toute la durée d'un appel soit satisfaite. Néanmoins, quand le nombre de stations augmente, il devient très difficile de prédire la distribution résultante des événements de réduction de capacité. Un filtrage partiel des événements de réduction de capacité peut être envisagé dans un tel modèle de distribution agrégée des événements de réduction de capacité, de telle sorte que l'hypothèse (HYP4) de la section §4.5.7.3.2, requise par un CAC à capacité variable fondé sur l'ALC, demeure valide.

1.4 MODELE D'ERREURS DANS LA METHODOLOGIE PREDICTIVE DE CONVERSION DU TEB EN CRITERES DE PERFORMANCES QOS

Les performances d'erreur traduites en termes de TEB, de taux de perte de cellules (CLR), de taux d'erreur de paquets (PER) et d'autres paramètres normalisés IUT reposaient sur un modèle de conversion d'erreurs principalement basé sur le mécanisme de correction des erreurs de l'en-tête des cellules ATM, sur un certain modèle statistique de répartition des erreurs dans une salve et sur des spécifications des recommandations IUT Rec.I.356, Rec.G.826 et Rec. S.1062, qui toutes font intervenir un grand nombre d'hypothèses dont la validité est discutable. Incontestablement, l'adoption d'hypothèses modifiées dans cette méthodologie de conversion du TEB en critères de performance QoS conduirait à des résultats différents.

1.5 MODELES AMELIORES DU CHAMP DE PRECIPITATION

Le modèle de propagation pour générer les champs de précipitation peut être affiné, en utilisant par exemple une amélioration proposée par Féral et al du modèle EXCELL classique. Cette dernière consiste dans ses grandes lignes à :

- (a) considérer une forme elliptique des cellules de pluie plutôt qu'une forme circulaire ;
- (b) hybrider la fonction de décroissance exponentielle de l'intensité de pluie avec une fonction gaussienne au voisinage du pic. Ce modèle hybride a été baptisé HYCELL [111,117-119]. Il est utilisé pour générer automatiquement une série temporelle d'atténuation dans n'importe quelle zone climatique. Un tel utilitaire a été développé sous Matlab. Il a été présenté dans la section §2.2.4.2.2. Il prend en compte l'amélioration HYCELL et exploite une carte radar à 24 cellules de pluie dont l'utilisation pourra permettre d'obtenir un aperçu plus réaliste des corrélations spatiales des cellules de pluie.

1.6 ETUDE DE LA SIGNALISATION INDUITE PAR L'INTRODUCTION D'UN DISPOSITIF FMT DANS LE SYSTEME

Dans la plate-forme de simulation développée, la signalisation, aussi bien entre les différentes entités de la couche accès, qu'entre les différents segments ou encore entre la couche physique et les couches supérieures, a été simplifiée au maximum, de simples interruptions quelquefois accompagnées d'ICI (*Interface Control Information*) propres au logiciel OPNET ou des variables globales étant employées en lieu et place d'une véritable signalisation telle que celle qui existe dans le système réel. Ceci sous-dimensionne nécessairement la plate-forme en termes d'évaluation de la capacité disponible, mais aussi en terme de délais puisque, dans la réalité, des retards et latences sont introduits dans le système à travers la signalisation et les procédés associés.

A titre d'exemple, les cellules RM (*Resource Management*) pour le service ABR dont le format est défini par l'ATM Forum sont envisagées dans le projet SAGAM pour former les requêtes de capacité dans les stations. Il peut être envisagé d'utiliser ces mêmes cellules pour toute la signalisation induite dans le système, avec un certain écart autorisé par rapport à la norme, par exemple en complétant les divers champs inutilisés des cellules RM suivant les besoins. Toutefois, l'inconvénient d'une cellule RM est le délai de traitement induit puisqu'il y a tamponnage en file d'attente. Il est aisé de voir que ce délai de traitement peut ne pas être compatible de la réactivité attendue du système. Il peut être alors plus approprié d'utiliser la priorité forte MTC-HP (*MAC Transfer Capacity - High Priority*) pour ce type de notification.

Par ailleurs, mettre les requêtes de changement de taux de codage ou d'incrément de capacité d'une station dans les créneaux SYNC (pour éviter d'introduire trop de données non informatives) est une solution envisageable. Les positions de ces créneaux peuvent être rendues équitables pour l'ensemble des stations dans la mesure où les stations dont les créneaux SYNC sont localisés en fin de trame sont avantagées puisqu'elles seront servies plus tôt, dans le cas où la période d'allocation est un sous-multiple de la supertrame, mais l'avantage reste mineur.

La signalisation comprend les messages suivants parmi d'autres :

- ✓ Signalisation DAMA (FCR, régulation des débits des sources sur indication du BAC comme contrôle préventif dynamique de congestion en voie descendante) ;
- ✓ Transmission par les stations (ATM) des requêtes de connexions contenant les descripteurs de trafic (Q.2931) ;
- ✓ Echange des informations FMT entre les entités de gestion des ressources :
 - mode FMT (puissance de sortie, taux de codage, débit) ;
 - instants d'anticipation de commutation de mode FMT ;
 - valeur mesurée de l'atténuation sur la liaison montante de la station source ;
 - valeur de l'atténuation sur la liaison descendante de la station destinataire.

Cette signalisation est très dépendante du délai qui va conditionner la réactivité du système.

2 EXTENSIONS PROSPECTIVES

2.1 AMELIORATIONS LIEES AUX TECHNIQUES ADAPTATIVES DE CONTRE-MESURE

2.1.1 Techniques adaptatives sur la liaison descendante

Aujourd'hui, dans SAGAM, seul un lien TDM descendant unique dont la puissance est dimensionnée pour les conditions météorologiques les plus défavorables [8] a été envisagé. Deux autres solutions alternatives peuvent être envisagées :

- (a) Plusieurs TDM ayant une puissance et un débit plus adaptés aux conditions de propagation, par exemple deux TDM, l'un à codage faible et l'autre à codage fort. Cette solution amène à étudier l'impact sur tous les utilisateurs situés à l'intérieur de la zone de couverture.
- (b) Application du codage adaptatif au sein de la trame descendante :
La station qui subit un affaiblissement assez important sur sa liaison descendante pour entraîner une réduction du débit doit en notifier le satellite afin que celui-ci puisse à bord identifier les cellules qu'il reçoit en direction de la station concernée dans le faisceau correspondant afin de les coder avec le bon taux de codage avant transmission sur le TDM descendant. Une méthode possible est de rediriger, à bord du satellite, les cellules reçues dans des files d'attente différenciées par taux de codage, afin de permettre de regrouper les cellules codées avec le même taux de codage sur le TDM descendant, ces cellules étant ainsi correctement redirigées vers les stations appropriées. Pour ce faire, un champ de l'en-tête des cellules peut être utilisé. Le classement

des cellules par taux de codage pour la liaison descendante ajoute à la complexité de la commutation ATM des cellules à bord (brassage de VP suivant le champ VPI). La ségrégation des cellules par taux de codage pour la liaison descendante se fait en plus d'une ségrégation par taux de codage sur la liaison montante MF-TDMA. Ce mécanisme de double ségrégation doit être étudié, et les implications sur l'architecture du GRI correctement analysées.

2.1.2 Optimisation de la commutation des modes FMT

La prédiction à court terme des affaiblissements pose principalement le problème du déclenchement du dispositif de contre-mesure et de ses effets sur le CAC et le DAMA.

Le critère de commutation de mode FMT utilisé dans le prédicteur d'affaiblissement de l'ONERA [72,73] est aujourd'hui celui du franchissement des seuils prédéterminés de détection de l'atténuation mesurée correspondant à un objectif requis de E_b/N_0 (ou, de façon équivalente, de TEB) pour diverses configurations de propagation, critère assorti d'un mécanisme additionnel de marges d'hystérésis visant à limiter le nombre de commutations répétées dans le cas où le prédicteur fluctue autour de ces seuils de détection.

Cette méthode de commutation semble la plus naturelle puisqu'elle fait intervenir le TEB, critère de performance le plus direct de la couche physique, mais le fait de ne faire intervenir que ce critère du TEB de la couche physique, indépendamment des performances des couches supérieures, peut, d'un autre côté, apparaître comme restrictif. La question se pose alors de savoir si le critère du TEB est toujours le critère le plus approprié ou bien s'il amène plutôt à une gestion sous-optimale des ressources du système du point de vue des couches supérieures.

D'autres critères de contrôle FMT doivent alors être recherchés, pour notamment favoriser les performances de qualité de service (le taux de perte des cellules ou l'efficacité du canal en sont des exemples à explorer) ou de qualité perceptive orientée utilisateur (comme pour la vidéo dont la qualité perçue par un utilisateur n'est plus reliée simplement au TEB - pour plus de détails sur la question, voir chapitre *Perspectives*, §2.2). Trois possibilités alternatives peuvent être envisagées :

2.1.2.1 Commutation des modes FMT suivant un critère QoS réseau

Un exemple de critère QoS utilisable est celui du taux CLR de perte des cellules ATM au niveau de la couche réseau, critère qui représente des performances de bout en bout. Dans un système de contre-mesure construite à partir d'une modulation adaptative associée à un codage adaptatif et d'un mécanisme de retransmission ARQ (*Automatic Repeat Request*) [77,78], une valeur mesurée de CLR correspond à une perte de bande au niveau du processus d'allocation des ressources, car un CLR trop faible oblige à retransmettre les données. Un compromis doit être fait entre cette perte de bande due au CLR et l'augmentation de la part de données non informatives engendrée par l'augmentation du taux de codage. En effet, lorsque le codage devient fort, la liaison devient aussi plus robuste ce qui réduit le CLR, mais en contrepartie, la part de données non-informatives dans la trame augmente. Le rendement de transmission s'en trouve ainsi réduit (à capacité transmise égale, la part des données utiles est plus faible, lorsque le codage devient fort), ce qui peut être ramené aussi à une perte de capacité. Dans le cas d'un système à deux taux de codage, le seuil de commutation SNR_{th} peut être déterminé comme la valeur du rapport signal sur bruit en dessous de laquelle la perte de bande due au CLR est plus importante que la perte de bande due à la redondance de codage. La perte de capacité (exprimée sous forme de CLR) peut être connue en ligne et la redondance de codage (traduite en capacité) est connue puisque les caractéristiques du codage le sont.

Dans la même perspective, il peut être propice d'étudier s'il est possible de maintenir un mode FMT donné associé à une dégradation de TEB pendant un temps contrôlé, dans le but d'assouplir la contrainte de commutation par TEB. D'autres facteurs de mesure de la QoS peuvent être des candidats comme critère de commutation des modes FMT. La difficulté réside cependant dans l'hétérogénéité du multimédia qui amène encore une fois à des métriques objectives de QoS très diverses suivant l'application considérée, spécialement en matière de vidéo [64] (cf. : paragraphe *Perspectives*, §2.2).

2.1.2.2 Commutation des modes FMT suivant un objectif de maximisation de l'efficacité du canal

Cette méthode de commutation [77,78] est associée à l'emploi d'une contre-mesure par "modulation"⁽¹⁾ adaptative (modulation et codage adaptatifs) à bande constante, associée à une technique de retransmission (couche 2 dans la nomenclature OSI), de type ARQ Go Back N (GBN), sachant toutefois que la diversité temporelle n'est possible que pour des services peu sensibles au délai et à la gigue sur le délai (services non-temps réel). Etant donné l'originalité de cette commutation, elle est décrite plus en détail. La commutation se fait au travers du critère de l'EFT (*Error-Free Throughput*) ou du rendement de transmission sans erreur qui est défini comme le nombre de trames sans erreur par unité de temps. L'EFT noté ξ est une fonction du rapport signal sur bruit et s'exprime comme le produit de l'efficacité du canal et de la capacité de la liaison physique C_F (en trame/s) :

⁽¹⁾ Néologisme forgé dans la littérature technique anglaise qui n'a pas été repris dans la littérature française.

$$\xi = \eta \times C_F$$

Équation 73 : Formule de l'EFT

où

$$\eta = \frac{N_{EF}}{N} = \frac{\text{nombre de trames reçues sans erreur}}{\text{nombre de trames total transmises}}$$

Équation 74 : Efficacité du canal

est l'efficacité du canal, et C_F (trame/s) la capacité de la liaison physique.

L'estimation de l'EFT s'effectue par une mesure en temps réel du nombre de trames erronées par un mécanisme de fenêtre de contrôle dont les paramètres (taille, limite haute et limite basse, cf. : Figure 133 ci-dessous) peuvent être réglés [77].

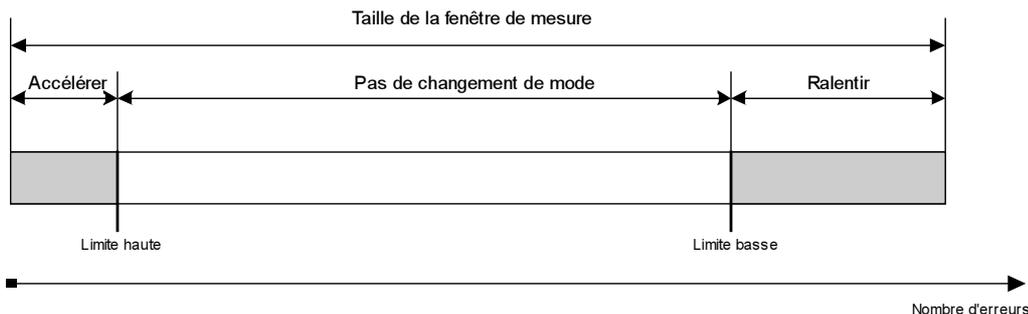


Figure 133 : Fenêtre de mesure des trames erronées

En reprenant la terminologie de [77], "accélérer" la transmission signifie passer dans un mode FMT supérieur (ordre de modulation plus élevé) quand le nombre de trames erronées récentes est inférieur à la limite haute (bonnes conditions de propagation), et "ralentir" la transmission signifie passer à un mode FMT inférieur (ordre de modulation décroissant donc la liaison est plus robuste) lorsque les conditions de propagation se détériorent et que le nombre de trames erronées excède la limite basse.

A l'établissement de la liaison, aucune décision de contrôle FMT n'est possible avant que la fenêtre de mesure ne soit remplie. Une fois que le nombre de trames requis est atteint, une décision de changement de mode FMT est faite à chaque arrivée de trame. Après un changement effectif de mode FMT, la procédure est redéroulée, le nombre de trames reçues devant atteindre la taille de la fenêtre pour qu'une nouvelle prise de décision soit possible.

L'emploi de ce critère de commutation de mode FMT plutôt qu'un critère de type TEB / SNR tel qu'utilisé par l'ONERA est justifié dans [78] par le fait que ce dernier aurait contraint à utiliser deux ensembles de seuils de commutation, le premier ensemble pour une commutation dans le sens d'une modulation d'ordre élevé vers une modulation d'ordre inférieur et le second pour une commutation dans le sens inverse. En effet, la commutation dans le sens des modulations d'ordre croissant ne pose pas de problème car elle se fait dès qu'un seuil de TEB est atteint. En revanche, la direction inverse est plus problématique : du point de vue du rapport signal sur bruit, il semble raisonnable d'attendre d'atteindre le seuil de SNR du mode en cours avant de commuter, parce que, pendant ce laps de temps, le TEB reste très bas. Cependant, du point de vue de l'efficacité de transmission, il peut être envisagé de commuter avant d'atteindre le seuil, pour maximiser l'EFT. Ainsi, un fonctionnement en hystérésis risque de se produire et cela présente quelques inconvénients pour la stabilité du système. L'utilisation du critère de l'EFT enlève la nécessité de recourir à un fonctionnement en hystérésis avec deux ensembles de seuils. Ce critère rend compte par ailleurs des performances réelles vis-à-vis des erreurs.

Cette solution amène à intégrer un protocole bien adapté de retransmission dans la couche LLC, en modifiant si nécessaire les protocoles existants (LAP-D, HDLC).

2.2 EVALUATION DE METRIQUES DE QUALITE PERCEPTIVE

Cette approche constitue l'étape suivante logique et indispensable à franchir après l'exploration des paramètres de QoS normalisés par l'IUT relevant de la couche physique ou de la couche ATM, de manière à pouvoir s'orienter vers une vision QoS intégrée aussi proche que possible de la satisfaction de l'utilisateur final des applications multimédia. Dans cette perspective, trois axes essentiels sont à développer :

- ✓ Elaboration et étude approfondie des paramètres de qualité perceptive de la voix, de l'audio et de la vidéo. Diverses métriques et techniques de mesures de qualité perceptive pour la voix et la vidéo sont énumérées dans la section suivante §2.2.1.
- ✓ Mise en correspondance des paramètres QoS conventionnels (G.826, I.356 pour l'ATM et S.1602 pour l'ATM par satellite) et les paramètres QoS au niveau applicatif (couche AAL et au niveau des trames vidéo par exemple).
- ✓ Etude des impacts de l'introduction d'un dispositif de contre-mesure sur les paramètres de qualité perceptive ainsi conçus.

2.2.1 Qualité perceptive pour la voix

La tendance claire émergeant dans l'industrie des télécommunications poussant à abandonner les réseaux conventionnels à commutation de circuit au profit de modèles de "Réseaux de Nouvelles Générations" (*Next-Generation Network* ou NGN) flexibles, gérables dynamiquement et à commutation de paquets, est illustrée entre autres par le développement rapide de la Voix sur IP (*Voice over IP* ou VoIP) ces cinq dernières années ou de la téléphonie par Internet. Ceci fait ressortir très fortement le fait que fournir efficacement la qualité requise demeure un défi essentiel. En particulier, une gestion de réseau efficace requiert un contrôle ou une prédiction des performances du trafic réel par des méthodes temps réel non-intrusives à partir des statistiques des paquets.

Les méthodes de mesure de la qualité de la parole peuvent être classées sous 2 catégories principales [151] :

- **Tests subjectifs :**

Comme il n'existe pas de définition physique de la qualité de la parole, les systèmes sont testés par rapport à une qualité "moyenne" perçue par les utilisateurs. Cet étalon subjectif est souvent dénommé sous le terme de MOS (*Mean Opinion Score*). Par exemple, il peut être demandé à un groupe de personnes de déterminer une qualité d'écoute en choisissant un qualificatif dans une échelle à 5 états : *Excellent, Bon, Correct, Médiocre, Mauvais*, ce qui donne un score d'opinion moyenne calculé dans des conditions particulières. Ce test n'est pas bien adapté aux besoins de mesure du monde réel. La Qualité d'Ecoute (*Listening Quality*) est la mesure de performance privilégiée dans le monde des télécommunications, et est traitée dans plusieurs recommandations de l'IUT-T comme P.800 et P.862.

- **Tests objectifs :**

Les techniques de test objectif mesurent des propriétés physiques d'un système dans le but de prédire ses performances perçues. Parmi ces techniques, il en existe des *intrusives* et des *non-intrusives*. Les techniques intrusives injectent dans le système un signal qui est capturé et évalué à un autre point. La norme internationale pour l'évaluation intrusive de la qualité de bout en bout de la parole est le modèle d'Evaluation Perceptive de la Qualité de la Parole (*Perceptual Evaluation of Speech Quality* ou PESQ) de la recommandation IUT P.862. Les techniques non-intrusives contrôlent le trafic réel côté utilisateur en vue de prédire la qualité perçue par l'utilisateur. PsyVoIP par exemple est un ensemble logiciel qui contrôle les appels des clients VoIP pour déterminer la qualité de la parole d'un réseau VoIP.

2.2.2 Qualité perceptive pour la vidéo

Un malentendu de langage sépare le monde des réseaux et le monde de la vidéo [180]. Au sein de la communauté réseau, le trafic vidéo VBR est décrit en termes de paramètres de descripteurs de trafic (délai, tolérance à la gigue, taux d'erreur de paquets). Dans le monde de la vidéo, la notion de qualité vidéo est plus essentielle. Cette notion recouvre à la fois une définition objective et une définition plus subjective qui ont trait par exemple à la résolution de l'image, au taux de tramage ou encore à la métrique conventionnelle en vidéo, le PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) qui représente une mesure qualitative de la distorsion de l'image par rapport à l'original. Le critère du PSNR pourrait être utilisé comme une mesure objective, mais cette mesure est défectueuse. Par ailleurs, la qualité vidéo sera d'autant meilleure que la quantification est fine.

En fait, il n'existe pas à l'heure actuelle de métrique de qualité vidéo perçue qui soit précise. Il est par conséquent impossible de déterminer rigoureusement le débit CBR équivalent. A défaut d'une telle métrique, le nombre de connexions qui peuvent être acceptées sans modification du taux de perte des cellules est utilisé comme métrique.

Il n'existe pas aujourd'hui de correspondance directe et évidente entre les paramètres QoS ATM et les métriques de qualité au niveau AAL ou au niveau des trames vidéo. La difficulté est grande pour le MPEG-2 à cause de l'existence d'une structure hiérarchisée des informations, composée de deux parties :

- Une partie *syntaxique* (l'en-tête) sur laquelle l'influence d'une perte de cellules est grave ; une perte de bits ou d'octets syntaxiques peut entraîner une perte de synchronisation de trame, donc la perte d'une trame entière (qui est sautée à cause d'un en-tête erroné, donc non détecté). Si par ailleurs la trame manquante est une trame prédictive (P

ou I), la qualité perceptive sera encore plus affectée. Certains en-têtes sont plus critiques que d'autres. Par exemple, ceux des séquences, des trames prédictives I et P, ceux des tranches dans les trames intra-codées, sont plus critiques que les en-têtes des tranches de trames B.

- Une partie *sémantique* (l'information vidéo pure) sur laquelle l'impact d'une perte de cellules est de la plus grande gravité. En outre, l'endroit où intervient la perte joue également sur le niveau de qualité perceptive à cause de la nature prédictive du flux vidéo codé MPEG-2.

Trois métriques ont été proposées [64,181] :

✓ **Métrique SHAT :**

La vidéo est évaluée au moyen de métriques humaines corrélées s'appuyant sur les deux quantités suivantes :

- Une Information Spatiale (IS) ;
- Une Information Temporelle (IT).

La métrique SHAT est une combinaison linéaire de trois mesures de compensation de qualité utilisant IS et IT. Elle surestime la qualité pour les bas débits d'encodage MPEG-2.

✓ **Métrique psychophysique MPQM :**

Des études récentes ont montré la nécessité d'introduire dans l'estimation de la qualité subjective une part de modèle de vision humaine. La métrique MPQM (*Moving Pictures Quality Metric* c'est-à-dire Métrique de Qualité des Images Animées) repose sur un modèle de vision humaine et consiste à :

- Décomposer la séquence originale et sa version dégradée en composantes perceptives par banc de filtres de Gabor (les profils des canaux visuels sont proches des fonctions de Gabor) ;
- Calculer une mesure de distorsion du signal, qui rend compte de la sensibilité au contraste et au masquage ;
- Accumuler les données sur tous les canaux, ce qui permet d'obtenir une échelle de qualité perceptive allant de 1 à 5 :

Niveau	Perception des troubles	Qualité
5	Imperceptibles	Excellent
4	Perceptibles, pas gênants	Bon
3	Légèrement gênants	Moyen
2	Gênants	Médiocre
1	Très gênants	Mauvais

✓ **Métrique psychophysique améliorée NVFM :**

La métrique NVFM (*Normalised Video Fidelity Metric* soit *Métrique de Fidélité Vidéo Normalisée*) introduit un modèle de vision amélioré qui est l'extension du modèle "still-picture" de Teo et Heeger :

- Caractérisation des réponses des cellules corticales à la saturation ;
- Modèle de masquage inter-canaux.

2.3 CAC COMBINANT PREDICTION DE CANAL ET PREDICTION DE TRAFIC

Des développements présentés dans la section §4.5, il ressort que l'élaboration d'un CAC spécifique à capacité variable à caractère prédictif vis-à-vis du canal de propagation passe par la mise en place d'une architecture nouvelle constituée d'une part d'une stratégie de contrôle d'admission et d'autre part d'une stratégie de rejet d'appels. Mais une des propriétés majeures recherchées pour un CAC performant est sa capacité d'adaptation par rapport au trafic. A partir de cette double contrainte, il apparaît au grand jour qu'un CAC optimisé doit pouvoir combiner une prédiction de canal et une prédiction de trafic. Cette forme novatrice pourrait de fait être réalisée en plusieurs étapes successives :

1. Rendre le CAC adapté à un système à capacité variable (cf. : §4.5), ce qui suppose d'incorporer une fonction de prédiction de canal exploitant par exemple des statistiques des durées d'affaiblissement et d'inter-affaiblissement [29,126-128,131].
2. Adjoindre une fonction de prédiction de trafic au CAC, par exemple par introduction d'un procédé de mesures en ligne de type MBAC [13,17,48,109], afin de s'affranchir le plus possible d'une nécessité de caractérisation de trafic a priori.
3. Prendre en compte le critère QoS de taux de perte de cellules ATM (CLR) dans le contrôle d'admission (par analyse spectrale par exemple [48]).

4. Combiner les trois critères d'admission capacité équivalente, CLR et probabilité de blocage dans un mécanisme d'admission associé à un mécanisme de rejet d'appels, les deux mécanismes prenant en compte et la prédiction de trafic et la prédiction de canal. Le mode de contrôle de ces deux entités au niveau du CAC requiert un procédé efficace, a priori basé sur la logique floue dans laquelle les règles d'inférence utilisées proviennent de connaissances système expert.
5. En dernier lieu, rajouter une architecture de réseau de neurones avec logique floue imbriquée pour doter le contrôle d'admission d'une capacité d'apprentissage et mimer les connaissances expert injectées dans l'étape 4. Cette dernière étape nécessite une étude exhaustive et poussée qui peut donner lieu à des travaux de recherche de grande richesse.

L'architecture globale d'un tel CAC peut être schématisée comme suit :

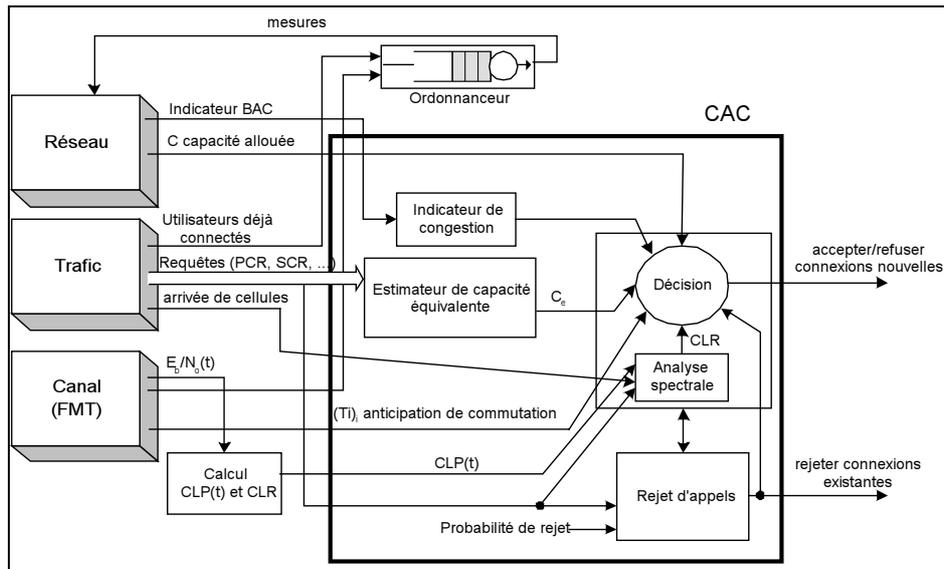


Figure 134 : Architecture d'un CAC évolué combinant prédiction de trafic et prédiction de canal

2.4 PREVISION METEOROLOGIQUE IMMEDIATE DE TYPE "NOWCASTING"

Les modèles de canal introduits dans la plate-forme de simulation étaient tous localisés sur des échelles de temps qui allaient du très court terme (de l'ordre de la seconde avec les variations quasi instantanées de l'atténuation sur les liaisons) au moyen terme ne dépassant pas une heure (par l'emploi d'informations radar figées permettant de modéliser le déplacement des cellules de pluie). Une grande étape à franchir est de pouvoir maintenant *prédire* l'évolution des conditions météorologiques sur une échelle de temps de plusieurs heures, et d'incorporer ce type d'informations probabilistes dans un simulateur réseau. Ces techniques de prédiction sont appelées "nowcasting" (prévision immédiate). Il s'agit là d'un domaine complexe où des modèles de haute résolution sont utilisés pour simuler de façon réaliste un ensemble d'évolutions météorologiques régionales, et produisent ainsi des prévisions à la fois probabilistes et déterministes à l'échelle régionale bien calibrées qui dépassent de loin la capacité d'analyse des agents humains. En effet, une quantité titanesque, toujours croissante, de données récupérées par télédétection - un "déluge de données" - est aujourd'hui disponible pour les experts de la prévision météorologique. Pour pouvoir traiter rapidement ces données, l'usage d'intelligence artificielle semble être l'une des solutions.

A l'heure actuelle, les outils de nowcasting intègrent pourtant très peu d'intelligence artificielle. Les experts en prévision météorologiques utilisent leur intelligence pour réfléchir, analyser des résultats de prédiction, en appliquant leur propre expertise dans le domaine. Un développement d'outils de nowcasting, tant pour des conditions météorologiques normales que sévères, devrait donc mettre en synergie les connaissances expert et l'intelligence artificielle, dans le but de permettre une intégration intelligente de domaines hétérogènes et prédictifs tels que l'observation, des méthodologies à base de modèles, ainsi que des images radar et satellite issues d'expérimentations. Les techniques de nowcasting doivent également être hautement fiables, précises, et permettre des prévisions météorologiques sur une échéance située entre 0 et 6 heures. Elles demeurent très largement au stade des premiers balbutiements aujourd'hui, mais il est évident qu'elles seront d'une grande utilité dans le genre de problématique envisagée dans les présents travaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Stéphane Combes, Céline Fouquet, "Protocoles d'accès SAGAM, SAGAM sous-projet 1", rapport interne ASPI-99-DSP/DEI-156, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 22 juin 1999
- [2] Stéphane Combes, Laurent Rouillet, Tarif Zein, Pierre Parmentier, "Gestionnaire de ressources intégré : Description préliminaire - SAGAM sous-projet 1", rapport interne ASPI99006259IRT0050, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 8 février 1999
- [3] Andrea Baiocchi, M. Listanti, and Nicola Blefari-Melazzi, C. Soprano, "An ATM-Like System Architecture for Satellite Communications Including On-Board Switching", *International Journal of Satellite Communications*, vol.14, pp.398-412-1996
- [4] Stéphane Combes, Céline Fouquet, "Protocoles d'Accès au Système SAGAM : Première approche", rapport interne ASPI-99-DSP/DEI-155, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 1999
- [5] Carlo Filippone, and Antonio Pietrabissa, "Congestion Control for DOMINO2", DOMINO2 study report DOM-2-UOR-CongContr-0, University of Rome, 15 October 2000
- [6] William Martin Shvodian, "A New Media Access Control Protocol for Broadband Satellites", Ph.D Thesis, The George Washington University, U.S.A., January 2000
- [7] L. Bouscary, "SAGAM: optimisation des ressources sur la liaison montante", rapport interne, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 2 avril 1999
- [8] L. Bouscary, "SAGAM - GROUPE SOUS PROJET 3 : Plan de fréquence pour le projet SAGAM, hypothèses de travail sur les stations et bilans de liaisons associés", rapport interne ASPI 99 009066 IRT 0064, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 15 mars 1999
- [9] Benoît Fabre, "Inputs for University of Aberdeen network simulation", rapport interne GEOC-ASPI-TN-40-2000-12-12, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 12 décembre 2000
- [10] Ponia Pech, "Système Multimédia par Satellite en Bande Ka avec une Technique de Contre-Mesure - Modélisation des interfaces entre la couche physique et la couche MAC", rapport interne d'avancement de première année de thèse, ENSAE-PP-TH.II.03.10.00-ATM 12C, SUPAERO, Toulouse, 5 octobre 2000
- [11] Y. Ahmet Sekercioglu, Andreas Pitsillides, and Athanasios Vasilakos, "Computational Intelligence in Management of ATM Networks: A Survey of Current State of Research", <http://oberon.it.swin.edu.au/~yas/ciapatm/ciapatm-tr.html>, 2 June 1999
- [12] Chih-Hen Lin, Dah-Sheng Guan, Ray-Guang Cheng, and Chung-Ju Chang "Design of a Power-Spectrum-Based ATM Connection Admission Controller for Multimedia Communications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 1, February 1998
- [13] Kohei Shiimoto, Naoaki Yamanaka, and Tatsuro Takahashi, "Overview of Measurement-Based Connection Admission Control Methods in ATM Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, First Quarter 1999
- [14] Roberto Cusani, Maria Milazzo, and Antonio Pietrabissa, "Survey On Traffic Management", GEOCAST study report GEOC-UoR-DD-1451, University of Rome "La Sapienza", Rome, Italy, 4 April 2000
- [15] Mohammad A. Rahin, and Mourad Kara, "Call Admission Control Algorithms in ATM Networks: A Performance Comparison and Research Directions", interim research report draft 0.8, dt. 29.9.98, 29 September 1998
- [16] Ray-Guang Cheng, Chung-Ju Chang, and Li-Fong Lin, "A QoS-Provisioning Neural Fuzzy Connection Admission Controller for Multimedia High-Speed Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.7, no.1, February 1999
- [17] Matthias Grossglauser, and David N.C. Tse, "A Time-Scale Decomposition Approach to Measurement-Based Admission Control", *IEEE Infocom'99*, New York, U.S.A., 21-25 March 1999
- [18] J. Siwko, and I. Rubin, "Call admission control for non-geostationary orbit satellite networks and other capacity varying networks", *International Journal of Satellite Communications*, no.18, pp.87-106, 2000
- [19] Bing Zheng, and Mohammed Atiquzzaman, "Traffic Management of Multimedia over ATM Networks", *IEEE Communications Magazine*, January 1999
- [20] Ponia Pech, Vincent Frede, "Synthèse bibliographique sur les protocoles MAC", rapport interne ENSAE-PP-TH.I.12.07.00-ATM 09C, SUPAERO, Toulouse, France, 12 juillet 1999
- [21] Feng Hao, Ioanis Nikolaidis, and Ellen W. Zegura, "Efficient Simulation of ATM Networks with Accurate End-to-End Delay Statistics", <http://citeseer.nj.nec.com/100291.html>
- [22] G. Kesidis, A. Singh, D. Cheung, and W. Kwok, "Feasibility of fluid event-driven simulation for ATM networks", *IEEE Globecom*, London, U.K., November 1996
- [23] Jeff Foerster, and Jonh Liebetreu, "FEC Performance of Concatenated Reed-Solomon and Convolutional Coding with Interleaving", IEEE 802.16.1pc 00/33, 8 June 2000
- [24] Marie-Paule Kluth, "SAGAM Etude Système – Présentation des concepts généraux", rapport confidentiel ASPI-00-TS/AT/ES-38, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 24 juillet 2000
- [25] Max. M. J. L. van de Kamp, "Climatic Radiowave Propagation Models for the design of Satellite Communication Systems", Ph.D Thesis, Eindhoven University, Eindhoven, The Netherlands, 24 November 1999

- [26] A. Malygin, and M. Filip, "Deployment Strategy for a Fade Countermeasure System: A Generic Fade Countermeasure Controller", COST255 study, Microwave Telecommunication Systems Research Group, University of Portsmouth
- [27] Marie-Madeleine Maubourguet, Corinne Mailhes, "Probabilités et Statistiques", INP ENSEEIHT, Toulouse, France, juillet 1997
- [28] Martin Bossert, "Coding Channel for Telecommunications", Wiley, 1955
- [29] A. Safaai-Jazi, H. Ajaz, and W.L. Stutzman, "Empirical models for rain fade time on Ku and Ka-band satellite links", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.43, no.12, pp.1411-1415, December 1995
- [30] Chun Loo, "Impairment of digital transmission through a Ka band satellite channel due to weather conditions", *International Journal of Satellite Communications*, no.16, pp.137-145, 1998
- [31] Chun Loo, "Statistical models for land mobile and fixed satellite communications at Ka band", *IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlanta, U.S.A., pp.1023-1027, 1996
- [32] Peter M. Lee, "Bayesian Statistics: An Introduction", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1989
- [33] Young Yong Kim, and San-qi Li, "Capturing Important Statistics of a Fading/Shadowing Channel for Network Performance Analysis", *IEEE Journal of Selected Area in Communications*, vol.17, no.5, 25 October 1999
- [34] IUT-T, "Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital paths at or above the primary rate", ITU-T Recommendation G.826, August 1996
- [35] ITU-T, "B-ISDN ATM layer cell transfer performance", ITU-T Recommendation I.356, November 1993
- [36] E.G. Cuevas, B. Doshi, and S. Dravida, "Performance models for ATM applications over 45 Mb/s satellite facilities", *10th International Conference on Digital Satellite Communications*, Brighton, U.K., 15-19 May 1995
- [37] Enrique G. Cuevas, "The Development of Performance and Availability Standards for Satellite ATM Networks", AT&T Laboratories, *IEEE Communications Magazine 'Broadband Satellite Network Performance'*, vol. 37 no. 7, pp.74-79, July 1999
- [38] João Célio Brandão, Ernesto Leite Pinto, and Marco A. G. Maia, "A Review of Error Performance Models for Satellite ATM Networks", *IEEE Communications Magazine 'Broadband Satellite Network Performance'*, vol. 37 no. 7, pp.80-85, July 1999
- [39] Faramaz Davarian, "Earth-Space Links and Fade-Duration Statistics", *AGARD SPP Symposium on « Digital Communications Systems: Propagation Effects, Technical Solutions, Systems Design »*, Athens, Greece, 18-21 September 1995
- [40] C. Catalan, and E. Vilar, "Transformation of beacon attenuation statistics into C/N₀ statistics", *4th Ka-band Conference*, Venice, Italy, 2-4 November 1998
- [41] Laurent Castanet, Hughes Vasseur, Michel Bousquet, and André Vander Vorst, "Simulation test case n°2: Ka band videoconference VSAT system link budgets", COST 255, CP 73012, December 1998
- [42] Sooyoung Kim Shin, Soo In Lee, Yang Su Kim, and Jae Mounng Kim, "A Dynamic Rain Attenuation Modeling Technique for Satellite Communication Link", *Proceedings of International Conference on Telecommunications*, vol.2, pp.33-37, 15-18 June 1999
- [43] Michele Zorzi, and Ramesh R. Rao, "On channel modeling for delay analysis of packet communications over wireless links", *36th Annual Allerton Conference on Communications, Control and Computing*, Monticello, 23-25 September 1998
- [44] Y.H. Kim, and S. Li, "Timescale of Interest in Traffic Measurement for Link Bandwidth Allocation Design", *Proceedings of IEEE Infocom '96*, pp.738-748, March 1996
- [45] S. Li, S. Park, and D. Arifler, "SMAQ: A Measurement-Based Tool for Traffic Modeling and Queuing Analysis, Part I – Design Methodologies and Software Architecture", *IEEE Communications Magazine*, August 1998
- [46] S. Li, S. Park, and D. Arifler, "SMAQ: A Measurement-Based Tool for Traffic Modeling and Queuing Analysis, Part II – Network Applications", *IEEE Communications Magazine*, August 1998
- [47] S. Li, and C.L. Hwang, "On the Convergence of Traffic Measurement and Queuing Analysis: A Statistical-Match Queuing (SMAQ) Tool", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.5, no.1, pp.95-110, February 1997
- [48] Brahim Bensaou, Shirley T.C. Lam, Hon-Wai Chu, and Danny H.K. Tsang, "Estimation of the Cell Loss Ratio in ATM Networks with a Fuzzy System and Application to Measurement-Based Call Admission Control", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 4, pp. 572-584, August 1997
- [49] S. Li, and C.L. Hwang, "Queue Response to Input Correlation Functions: Continuous Spectral Analysis", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.1, no.6, pp.678-692, December 1993
- [50] H. D. Sheng, and S. Li, "Second order effect of binary sources on characteristics of queue and loss rate", *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pp.18-27, April 1993
- [51] B. Grémont, and M. Filip, "Modelling and Applications of the Instantaneous Frequency Scaling Factor (IFSF) of Rain Attenuation", *1st International Workshop on Radiowave Propagation and Modelling for New Satcom Services at Ku Band and Above*, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 28-29 October 1998
- [52] J. Ye, and S. Li, "Folding Algorithm: a Computational Method for Finite QBD Processes with Level-Dependent Transitions", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 2, pp. 625-639, February 1994
- [53] R-G. Cheng, and C-J. Chang, "Design of a fuzzy traffic controller for ATM networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.4, no.3, pp.460-469, June 1996

- [54] Antonio Franchi, and Robert Harris, "On the Error Burst Properties of the Standard K=7, Rate 1/2 Convolutional Code with Soft Decision Viterbi Decoding", *European Transactions on Telecommunications*, vol.6, no.3, May-June 1995
- [55] Ada Vittoria Bosisio, and Carlo Riva, "A novel method for the statistical prediction of rain attenuation in site diversity systems: theory and comparative testing against experimental data", *International Journal of Satellite Communications*, vol.16, no.47-52, 1998
- [56] Gérard Maral, and Michel Bousquet, "Satellite Communications Systems, Third Edition", John Wiley & Sons, 1998
- [57] Boris Grémont, Miodrag Filip, Paul Gallois, and Stephen Bate, "Comparative Analysis and Performance of Two Predictive Fade Detection Schemes for Ka-Band Fade Countermeasures", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.17, no.2, February 1999
- [58] Akira Hashimoto, "Error Performance and ATM Cell Transfer Characteristics in Relocatable Wireless Access Systems", Proceedings of the *IEICE*, vol.E81-B, no.6, pp.1213-1223, June 1998
- [59] Jeffrey R. Heissler, and Richard Condello, "An Analysis of the Viterbi Decoder Error Statistics for ATM and TCP/IP Over Satellite Communication", Proceedings of the *MILCOM'99*, 1999
- [60] Thomas Kaltenschnee, and Stefan Ramseier, "Impact of burst errors on ATM over satellite Analysis and Experimental Results", *10th IEE International Conference on Digital Satellite Communication*, pp. 236-243, 1995
- [61] Laurent Rouillet, "Interactions des entités « gestion des ressources », « planification », « air interface »", rapport interne ASPI 00 TS/AT/E177, Alcatel Space, Toulouse, France, 21 novembre 2000
- [62] Benoît Fabre, "Planification à long terme des ressources dans un satellite géostationnaire multi-spot MF-TDMA - Proposition d'un système à deux étages: la planification des ressources radio, et l'allocation des créneaux des trames", rapport interne SAGA-ASPI-TN-26, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 8 décembre 2000
- [63] Zhili Sun, "ATM and B-ISDN - Notes for the lecture component", University of Surrey, Surrey, U.K.
- [64] Xavier Garcia Adanez, "Designing New Network Adaptation and ATM Adaptation Layers for Interactive Multimedia Applications", Ph.D Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland, 1998
- [65] ITU-R, "Carrier-to-Interference Calculations Between Networks in the Fixed-Satellite Service", ITU-R Rec. S.741-2, 1992-1993-1994
- [66] IUT-R, "Qualité de fonctionnement admissible en termes d'erreur pour un conduit numérique fictif de référence fonctionnant à un débit égal ou supérieur au débit primaire", Rec. UIT-R S.1062-1, groupe de travail 4B2, 1994-1995
- [67] Pasi Lassila, Jorma Virtamo, and Samuli Aalto, "Two Approaches to Simulating Loss Networks", *COST257(97)*, 25 May 1997
- [68] Seung-Hoon Hwang, Dong-Hee Kim, Soo-In Lee, and Keum-Chan Whang, "Power Control and Macrodiversity as Fade Countermeasure in Satellite CDMA Transmission at Ka-Band", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E82-B, no.11, pp.1878-1882, November 1999
- [69] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, "Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing Second Edition", Cambridge University Press, 1992
- [70] Mohamed-Slim Alouini, Scott A. Borgsmiller, and Paul G. Steffes, "Channel Characterization and Modeling for Ka-Band Very Small Aperture Terminals", *Proceedings of the IEEE*, vol.85, no.6, June 1997
- [71] B. Audoire, L. Castanet, F. Christophe, and B. Grémont, "Ka band attenuation time series generator and comparison with Olympus Data", *19th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, Toulouse, France, 17-20 April 2001
- [72] David Mertens, and Laurent Castanet, "Performance Simulation of an Adaptive Control Scheme for Scintillation Fade Compensation in a Generic Ka-Band VSAT Videoconferencing System", *6th Ka Band Utilization Conference*, Cleveland, Ohio, U.S.A., June 2000
- [73] David Mertens, and Laurent Castanet, "Performance Simulation of an Adaptive Data Rate Scheme for Rain Fade Compensation in a Ka-Band VSAT Videoconferencing System", *HF Journal (Belgium Journal of Electronics and Telecommunications)*, no.1, pp.41-52, January 2000
- [74] Laurent Castanet, David Mertens, and Michel Bousquet, "Influence of Propagation Effects on the Performance of a Generic Ka-Band VSAT Videoconferencing System", *18th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, Oakland, U.S.A., April 2000
- [75] L. Castanet, J. Lemorton, and M. Bousquet, "Techniques Adaptatives de Lutte contre les Affaiblissements de Propagation pour les Systèmes de Télécommunication par Satellite dans les Bandes Ka et V", *CNES workshop on Radiowave Propagation for Earth-space Links*, Toulouse, France, 14 December 2000
- [76] L. Féral, L. Castanet, J. Lemorton, F. Mesnard, and H. Sauvageot, "Etude de la Forme et de l'Orientation des Cellules de Pluie dans le Sud-Ouest de la France, Application à l'Etude des Futurs Systèmes Satcom", *CNES workshop on radiowave propagation for Earth-space links*, Toulouse, France, 14 December 2000
- [77] M. Filip, "OSI Layer 2 Protocol For a Fade Countermeasure System", Microwave Telecommunication Systems Research Group, University of Portsmouth, http://www2.ee.port.ac.uk/~fm-www/research/DLC_Control_WWW/DLC_Control_WWW.html, 10 July 2000
- [78] P. Zong, and M. Filip, "Real Propagation Event Simulation of Selective Repeat Data Link Layer Protocol for VSAT FCM System", *Electronic Letters*, vol.36, no.17, pp.1492-1494, 17 August 2000

- [79] Mohammed El Mime, "Etude des performances de l'interface air d'un système de vidéoconférence par satellite en bande Ka", rapport de projet de fin d'études, SUPAERO, Toulouse, France, avril-septembre 2000
- [80] H. Vasseur, M. Czarnecki, L. Castanet, and M. Bousquet, "Performance Simulation of a Ka-band VSAT Videoconferencing System", *1st COST 255 Workshop*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp.227-234, 28-29 October 1998
- [81] Costas Courcoubetis, George Fouskas, and Richard Weber, "An on-line Estimation Procedure Cell Loss Probabilities in ATM Links", *Proceedings of the 3rd IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks*, U.K., July 1995
- [82] ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services", ETSI EN 300 421 v1.1.2, August 1997
- [83] A. Burgueño, E. Vilar, and M. Puigcerver, "Spectral analysis of 49 years rainfall rate and relation to fade dynamics", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-38, no.9, pp.1359-1366, September 1990
- [84] Laurent Castanet, Joël Lemorton, and Michel Bousquet, "Fade mitigation techniques for new satcom services at Ku-band and above: a review", *4th Ka-band Utilization Conference*, Venise, Italy, 1998
- [85] Laurent Castanet, Michel Bousquet, "Technique de lutte contre les affaiblissements pour les futurs systèmes de télécommunications dans la bande EHF: position du problème", rapport technique interne ONERA, R.F. 1/1690.26/DEM Département Electromagnétisme et Radar, Toulouse, France, février 1999
- [86] Daniel Bermudez Sanchez, Milena Planells Rodriguez, David Sanz Herrero, "Etude des atténuations atmosphériques en bande Ka et des techniques de lutte contre les affaiblissements de type traitement de signal adaptatif", projet ENST Paris site de Toulouse, France, option Systèmes de Communications par Satellites, 17 décembre 1999
- [87] Michele Zorzi, "Outage and Error Events in Bursty Channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, pp. 349-356, March 1998
- [88] Michele Zorzi, and Ramesh R. Rao, "Impact of Burst Errors on Framing", *PIMRC '98*, Boston, U.S.A., September 1998
- [89] M. Zorzi, and R. Rao, "On the Statistics of Block Errors in Bursty Channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol.45, pp.660-667, June 1997
- [90] Vineet Birmani, "Resource Allocation for Ka-band Broadband Satellite Systems", Master's Thesis, University of Maryland, U.S.A., 1999
- [91] Brenda Groskinsky, Deep Medhi, and David Tipper, "An Investigation of Adaptive Capacity Control Schemes in a Dynamic Traffic Environment", *IEICE Transactions on Communications*, vol.E84-B, no.2, February 2001
- [92] George Kesidis, "Bandwidth adjustments using on-line packet-level measurements", *SPIE Conference on Performance and Control of Network Systems*, Boston, U.S.A., 19-22 September 1999
- [93] Poethi Boedhihartono, "Handover and its associated signalling in non-geostationary satellite constellations", Ph.D Thesis, ENST Paris site de Toulouse, France, November 2002
- [94] Hughes Vasseur, "Bandwidth Limitations on Millimetre-Wave Communications due to Tropospheric Clear-Air Phenomena", Ph.D Thesis, Université Catholique de Louvain, Louvain la Neuve, Belgium, March 1995
- [95] Sooyoung Kim Shin, Hyoungsoo Lim, and Soo In Lee, "Performance simulation of adaptive transmission technique using dynamic rain attenuation model", *5th Ka-Band Utilization Conference*, Taormina, Sicily Island, Italy, 18 - 20 October 1999
- [96] Ponia Pech, Laurent Castanet, and Michel Bousquet, "A Prediction Model to Convert Propagation Distributions in Statistics of Quality of Service Performance Parameters", *COST 280 1st International Workshop, « Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Radio Wave Systems »*, Malvern, U.K., 1-3 July 2002
- [97] U.-C. Fiebig, and J. Lemorton, "Overview of available channel models for time series generation", *COST Action 280, 1st International Workshop « Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems »*, Malvern, U.K., 1-3 July 2002
- [98] Site Web SAGAM: <http://www.sagam-satellite.com/home.phtml>
- [99] Site Web RNRT dédié à SAGAM: <http://www.telecom.gouv.fr/rnrt/psagam.htm>
- [100] Laurent Castanet, "Techniques adaptatives de lutte contre les affaiblissements de propagation pour les systèmes de télécommunications par satellite en EHF", mémoire de thèse de doctorat, SUPAERO, Toulouse, France, 18 décembre 2001
- [101] Laurent Castanet, David Mertens, and Michel Bousquet, "Simulation of the performance of a Ka-band VSAT videoconferencing system with uplink power control and data rate reduction to mitigate atmospheric propagation effects", *International Journal of Satellite Communications*, vol. 20, no.4, pp. 231-249, July-August 2002
- [102] L. Castanet, J. Lemorton, T. Konefal, A. Shukla, P. Watson, and C. Wrench, "Comparison of combined propagation models for predicting loss in low-availability systems that operate in the 20 GHz to 50 GHz frequency range", *International Journal of Satellite Communications*, vol. 19, no.3, pp. 317-334, May-June 2001
- [103] A. Iuoras, P. Takats, C. Black, R. Digirolamo, E.A. Wibowo, J. Lambadaris, and M. Devetsikiotis, "Quality of Service-Oriented Protocols for Resource Management in Packet-switched Satellites", *International Journal of Satellite Communications*, no.17, pp.129-141, 1999

- [104] Tho Le Ngoc, and S.V. Krishnamurthy, "Performance of Combined Free/Demand Assignment Multiple-Access Protocols with Pre-assigned Requests Créneaux in Integrated Voice/Data Satellite Communications", *Proceedings of the International Conference on Communications (ICC) / SUPERCOMM'94*, 1994
- [105] Michel Bousquet, Isabelle Buret, Stéphane Combes, Marie-Paule Kluth, Laurent Rouillet, Pierre Parmentier, Tarif Zein, Al Abadeen, and Céline Fouquet, "Geostationary Satellite for Multimedia Access (SAGAM) : System Architecture & Satellite Resource Management", *18th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, Oakland, U.S.A., April 2000
- [106] Ponia Pech, Michel Bousquet, Laurent Castanet, José Radzik, and Benoît Fabre, "Methodology to Optimise Techniques of Resource Management for Ka-band GEO Satellite Networks from the Introduction of Propagation Information", *COST280 2nd meeting of the Management Committee, 'Propagation Impairments Mitigation for Millimetre-Wave Radio Systems'*, Toulouse, France, 29-30 October 2001
- [107] J. Siwko, and I. Rubin, "Call Admission Control for Non-Geostationary Orbit Satellite Networks and Other Capacity-Varying Networks", *International Journal of Satellite Communications*, no.18, pp.87-106, 2000
- [108] J. Siwko, and I. Rubin, "Connection Admission Control for Capacity-Varying Networks with Stochastic Change Times", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, no. 3, pp. 351-360, June 2001
- [109] R.B. Gibbens, and F.P. Kelly, "Measurement-based connection admission control", *15th International Teletraffic Congress Proceedings*, pp.879-888, June 1997
- [110] Ponia Pech, Michel Bousquet, Laurent Castanet, José Radzik, and Benoît Fabre, "Insights into an Architecture of Ka-Band OBP Satellite System Involving FMTs", *Proceedings of the 20th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, Montreal, Canada, 12-15 May 2002
- [111] L.Feral, F.Mesnard, H.Sauvageot, L.Castanet, and J. Lemorton, "Rain cells shape and orientation distribution in South-west of France", *Phys.Chem.Earth (B)*, vol.25, no. 10-12, pp.1073-1078, 2000
- [112] Julius Goldhirsh, "Two-dimension visualization of rain cell structures", *Radio Science*, vol.35, no.3, pp.713-729, May-June 2000
- [113] Ioannis Mertzanis, "QoS Provisioning for Broadband Satellite - ATM Multimedia Networks", Ph.D Thesis, University of Surrey, Centre for Communication Systems Research, Surrey, U.K., July 1999
- [114] Michael Ritter, and Phuoc Tran-Gia, "Multi-Rate Models for Dimensioning and Performance Evaluation of ATM Networks", COST 242 Interim Report, Institute of Computer Science, University of Würzburg, Federal Republic of Germany, June 1994
- [115] Philippe Nain, "Qualitative Properties of the Erlang Blocking Model with Heterogeneous User Requirements", Research Report #1018, programme 3, INRIA, Sophia Antipolis, France, April 1989
- [116] ETSI, "Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems", ETSI EN 301 790 v1.2.2, December 2000
- [117] Laurent Féral, "Etude des variabilités spatiales des précipitations pour optimiser les systèmes de télécommunication par satellite", mémoire de thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, décembre 2002
- [118] Laurent Féral, Henri Sauvageot, Laurent Castanet, and Joël Lemorton, "HYCELL: A new hybrid model for the rain horizontal distribution for propagation studies. Part 1: Modelling of the rain cell", *Radio Science*, vol. 38, no. 3, 1056, 2003
- [119] Laurent Féral, Henri Sauvageot, Laurent Castanet, and Joël Lemorton, "HYCELL: A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies. Part 2: Statistical modelling of the rain rate field", *Radio Science*, vol. 38, no. 3, 1057, 2003
- [120] Laurent Castanet, Joël Lemorton, Michel Bousquet, and Benoît Garnier, "Up-Link Power Control as a fade mitigation technique to comply service availability requirements of the interface air of SAGAM at Ka band", *7th Ka Band Utilisation Conference*, Portofino, Italy, 26-28 September 2001
- [121] Laurent Féral, Joël Lemorton, Laurent Castanet, and Henri Sauvageot, "HYCELL, a new model of the rain horizontal distribution, application for propagation studies", *ICAP'2003*, Exeter, U.K., April 2003
- [122] ITU-R, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods", ITU-R Rec. P.838, Geneva, Switzerland, 1997
- [123] Ponia Pech, Michel Bousquet, Laurent Castanet, José Radzik, Benoît Fabre, and Stéphane Combes, "Insights into an Architecture of Ka-Band OBP Satellite System Involving Fade Mitigation Techniques: Challenges, Simulation and Performance", *8th Ka-Band Utilization Conference*, Baveno/Stresa (Lake Maggiore), Italy, September 25-27, 2002
- [124] William D. Ivancic, and Eric A. Bobinsky, "ATM Quality of Service Parameters at 45 Mbit/s Using a Satellite Emulator: Laboratory Measurements", *IEEE Globecom '97*, Phoenix, Arizona, U.S.A., 4-8 November 1997
- [125] J. Siwko, and I. Rubin, "Call Admission Control for Capacity-Varying Networks", *Telecommunication Systems: Modeling, Analysis, Design and Management*, vol.16, no.12, pp.25-40, January-February 2001
- [126] L.E. Bråten, and César Amaya, "Fade Duration at Ka-Band on a Satellite-Earth Link in Vancouver: Modeling and Comparison with Measurements", *Proceedings IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, SBMO, Joao Pessoa, Brazil, 7-11 August 2000

- [127] Lars E. Bråten, César Amaya, and David V. Rogers, "Fade and Inter-fade Duration at Ka-Band Satellite-Earth Links: Modeling and System Implications", *Proceedings of the 19th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, Toulouse, France, 17-20 April 2001
- [128] R. Lekkla, K.S. McCormick, and D.V. Rogers, "12-GHz Fade Duration Statistics on Earth-Space Paths in South-East Asia", *Proceedings of the URSI CLIMPARA '98*, Ottawa, Canada, pp.167-170, 27-29 April 1998
- [129] Robert B. Cooper, "Introduction to Queueing Theory", Second Edition, Edward Arnold Publishers, Ltd
- [130] Villy B. Iversen, "Teletraffic Engineering Handbook", Technical University of Denmark, Denmark, <http://www.tele.dtu.dk/teletraffic/>, 23 November 2001
- [131] 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*, vol.12, pp.387-394, 1994
- [132] Alain Pirovano, "Contrôle d'admission et allocation de ressources dans les réseaux ATM par satellite", mémoire de thèse de doctorat, ENST Paris site de Toulouse, Toulouse, France, 2002
- [133] M. Filip, and E. Vilar, "Optimum Utilization of the Channel Capacity of a Satellite Link in the Presence of Amplitude Scintillations and Rain Attenuation", *IEEE Transactions on Communications*, vol.38, pp.1958-1965, November 1990
- [134] Y. Karasawa, M. Yamada, and J.E. Allnutt, "A new prediction method for tropospheric scintillation on Earth-space paths", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-36, no.11, pp.1608-1614, 1988
- [135] L. Castanet, J. Lemorton, M. Bousquet, and L. Claverotte, "A Joint Fade Mitigation Technique Applied to the Regenerative Packet Switch Payload of the GEOCAST System", *8th Ka-band Utilization Conference*, Baveno, Italy, 25-27 September 2002
- [136] ITU-R, "Allowable Error Performance for a Hypothetical Reference Digital Path Operating At or Above the Primary Rate", ITU-R Recommendation S.1062-1, Working Group 4B2, 1994-1995
- [137] D. Mertens, and D. Vanhoenacker-Janvier, "Rain fade dependence model of long-term scintillation amplitude distribution at 12.5 GHz", *IEE Electronics Letters*, vol. 37, no. 10, pp. 657-658, May 2001
- [138] Michel Bousquet, Laurent Castanet, Laurant Féral, Ponia Pech, and Joël Lemorton, "Application of a Model of Spatial Correlated Time-Series Into a Simulation of Adaptive Resource Management for Ka-Band Satellite Systems", *International Workshop of COST Actions 272 and 280 « Satellite Communications - From Fade Mitigation to Service Provision »*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 26-28 May 2003
- [139] S. Lovejoy, "Area-perimeter relation for rain and cloud areas", *Radio Science*, 216, 185-187, 1982
- [140] F.S. Rhys, and A. Waldvogel, "Fractal shape of hail clouds", *Phys. Rev. Lett.*, 56, 784-787, 1986
- [141] S. Lovejoy and D. Schertzer, "Multifractal, universality classes and satellite and radar measurements of cloud and rain fields", *J. Geophys. Res.*, 95, D3, pp.2021-2034, 1990
- [142] L. Féral, and H. Sauvageot, "Fractal identification of supercell storms", *Geophys. Res. Letters*, vol.29, no.14, 10.1029/2002GL015260, 2002
- [143] S. Lovejoy, and B.B. Mandelbrot, "Fractal properties of rain, and a fractal model", *Tellus*, vol.37A, 209-232 1985
- [144] Freeman and Co., B.B. Mandelbrot, "The fractal geometry of nature", New York, 461 pp., 1982
- [145] S.A. Callaghan and E. Vilar, "The spatial distribution of rain and its implications for wide area communications systems", *ICAP conference*, doc. 014, University of Exeter, U.K., April 2003
- [146] T.L. Bell, "A space-time stochastic model of rainfall for satellite remote-sensing studies", *Journ. of Geophys. Res.*, vol. 92, No D8, 9631-9643, 1987
- [147] ITU-R, "Characteristics of precipitation for propagation modelling", ITU-R Recommendations P. 837-1, Geneva, Switzerland, 1997
- [148] ITU-R, "Characteristics of precipitation for propagation modelling", ITU-R Recommendations P.837-3, Supplement 1 to vol. 2000, P series, part 1 and 2, 2001
- [149] C. Capsoni, F. Fedi, C. Magistroni, A. Paraboni, and A. Pawlina, "Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications", *Radio Science*, vol. 22, no.3, pp.395-404, 1987
- [150] J. Awaka, "A three-dimensional rain cell model for the study of interference due to hydrometeor scattering", *J. Commun. Res. Lab.*, vol. 36, no.147, pp.13-44, 1989
- [151] Simon Broom, and Mike Hollier, "Speech Quality Measurement Tools for Dynamic Network Management", *Proceedings of the International On-line Workshop, "Measurement of Speech and Audio Quality in Networks"*, Prague, Czech Republic, May 2003
- [152] M. Haddad, "DVB-S Synthesis", internal report ASPI 99 01 6399 IRT 155, ATM Node In the Sky (ANIS), Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 21 April 1999
- [153] M. Texier, "Modeling of the propagation channel dynamics in Ka band with Markov chains", final study report, ONERA/ENAC, Toulouse, France, June 2001
- [154] M. Zorzi, and R.R. Rao, "Performance of ARQ Go-Back-N protocol in Markov channels with unreliable feedback", *Wireless Networks*, vol. 2, pp. 183-193, 1997
- [155] Akira Hashimoto, "Outage Probability Analysis in Relocatable Wireless Access Systems under Line-of-Sight Non-Rayleigh Fading", *IEICE* vol.E80-B no.5, pp.746-754, May 1997
- [156] Andrea J. Goldsmith, "The Capacity of Downlink Fading Channels with Variable Rate and Power", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.46, no.3, pp.569-580, 1997

- [157] Sang Wu Kim, and Andrea Goldsmith, "Truncated Power Control in Code Division Multiple Access Communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, pp. 965-972, May 2000
- [158] Seong Taek Chung, and Andrea J. Goldsmith, Degrees of Freedom in Adaptive Modulation : A Unified View, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 9, pp. 1561-1571, September 2001
- [159] M-S. Alouini, and A. J. Goldsmith, "Capacity of Rayleigh Fading Channels Under Different Adaptive Transmission and Diversity-Combining Techniques", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, pp. 1165-1181, July 1999
- [160] Mohamed-Slim Alouini, Xiaoyi Tang, and Andrea J. Goldsmith, "An Adaptive Modulation Scheme for Simultaneous Voice and Data Transmission over Fading Channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.17, no.5, May 1999
- [161] Andrea J. Goldsmith, and Soon-Ghee Chua, "Variable-Rate Variable-Power MQAM for Fading Channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, pp. 1218-1230, October 1997
- [162] A.Malygin, M. Filip, and E. Vilar, "Development of a digital modem for adaptive countermeasure VSAT system at Ka-band", *2nd Ka Band Utilization Conference*, Florence, Italy, 24-26 September 1996
- [163] A.Malygin, and M. Filip, "Deployment Strategy for a Fade Countermeasure System: A Generic Fade Countermeasure Controller", *5th International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ka band and Above*, ESA WPP-146, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp 219-226, 28-29 October 1998
- [164] A. Malygin, M. Filip, and E. Vilar, "Neural Network Implementation of a Fade Countermeasure Controller for a VSAT Link", *International Journal of Satellite Communications*, vol. 20, issue 2, pp.79-95, March/April 2002
- [165] A. Malygin, and M. Filip, "Implementation of a Fade Countermeasure Controller", Microwave Telecommunication Systems Research Group, University of Portsmouth, U.K., http://www.tech.port.ac.uk/staffweb/filipm/research/FCM_Control_WWW/FCM_Control_WWW.html, 10 July 2000
- [166] Celandroni Nedo, Ferro Erina, and Potorti Francesco "A multi-level satellite channel allocation algorithm for VBR real-time data", *International Journal on Satellite Communications*, vol. 20, no.1, pp. 47-61, January-February 2002
- [167] Nedo Celandroni, Erina Ferro, Nick James, and Francesco Potorti. "FODA/IBEA-TDMA: a flexible fade countermeasure system for integrated services in user oriented networks", *International Journal of Satellite Communications*, vol.10, pp. 309-323, December 1992
- [168] Nedo Celandroni, Francesco Potorti, and Santi T. Rizzo, " An inexpensive rain fade countermeasure technique for DA-TDMA satellite systems", *Proceedings of the IEEE Conference on Global Communications (GLOBECOM)*, London, U.K., pp.1001-1005, November 1996
- [169] Nedo Celandroni, and Francesco Potorti, "Fade Countermeasure using Signal Degradation Estimation for Demand Assignment Satellite Systems", *Journal of Communications and Networks*, vol. 2, no.3, pp. 230-238, September 2000
- [170] N. Celandroni, E. Ferro, F. Potorti, and G. Maral, "Bursty data traffic via satellite: Performance comparison between two TDMA access schemes", *4th European Conference on Satellite Communication*, pp.170-175
- [171] Nedo Celandroni, Erina Ferro, Francesco Potorti, Antonio Chimienti, and Maurizio Lucenteforte, "Dynamic Rate Shaping on MPEG-2 Video Streams for Bandwidth Saving on a Faded Satellite Channel", *European Transactions on Telecommunications*, Special Issue on Service Quality Control in Multimedia Wireless Networks, vol. 11, no. 4, pp. 363-372, July-August 2000
- [172] T. Le-Ngoc, and I.M. Jahangir, "Performance Analysis of CFDAMA-PB Protocol for Packet Satellite Communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol.46, no.9, pp. 1206-1214, September 1998
- [173] J. A. Schormans, J. M. Pitts, A.H. Ma, and R. J., Mondragon, "Accurate results for traffic engineering in the presence of LRD", *16th IEE UK Teletraffic Symposium*, May 2000
- [174] Takis Konstantopoulos, and Si-Jian Lin, "Macroscopic models for long-range dependent network traffic", *Queueing Systems Theory Applications*, 28(1-3), pp.215-243, 1998
- [175] C.Huang, M.Devetsikiotis, I. Lambadaris, and A.R. Kaye, "Self-Similar traffic and its implications for ATM Network Design", *Proceedings of the International Conference on Communication Technology*, Beijing, May 1996
- [176] T. Taralp, M. Devetsikiotis, and I. Lambadaris, "In Search of Better Statistics for Traffic Characterization", *Journal of the Brazilian Computer Society, Special Issue on Traffic Modeling and Control of Wired and Wireless Networks*, vol. 5, no.3, pp. 5-13, April 1999
- [177] T. Taralp, M. Devetsikiotis, and I. Lambadaris, "Traffic Characterization for QoS Provisioning in High-Speed Networks", *Proceedings of the 31st Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, U.S.A., January 1998
- [178] I. Lambadaris, M. Devetsikiotis, A.R. Kaye, M.R. Ismail, C.M. Sharon, Y. Fang, and C. Huang, "Traffic Modeling and Design Methodologies for Broadband Networks", *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol.20, no.3, 1995

- [179] B. Ryu, "Fractal Network Traffic Modeling: Past, Present, and Future," *Proceedings of the 35th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, University of Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A., September 1997 (invited)
- [180] T.V. Lakshman, Antonio Ortega, and Amy R. Reibman, "VBR Video: Tradeoffs and Potentials", *Proceedings of the IEEE*, vol.86, no.5, pp. 952-973, May 1998
- [181] Stephen Wolf, Margaret H. Pinson, Arthur A. Webster, Gregory W. Cermak, and E. Paterson Tweedy, "Objective and Subjective Measures of MPEG Video Quality", Committe T1 Performance Standards Contribution, T1A1.5/96-121, 28 October 1996
- [182] L. Claverotte, A. Pietrabissa, G. Fairhurst, and G. Papazafeiropoulos, "Business and Technological Case - GEOCAST WP 1000", contribution to GEOCAST WP 1000, GEOC-ASPI-DD-35, Alcatel Space Industries, Toulouse, France, 9 November 2000 (<http://www.geocast-satellite.com/download/wp1000.zip>)
- [183] Site Web dédié à GEOCAST: <http://www.geocast-satellite.com>
- [184] Site Web dédié à DICAST: <http://www.dipcast-satellite.com>
- [185] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunications systems", ITU-R P.618-7 Recommendation, 2001
- [186] Max M.J.L. van de Kamp, "Rain Attenuation as a Markov Process: The Meaning of Two Samples", COST Action 280, *1st International Workshop "Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems"*, Malvern, U.K., 1-3 July 2002
- [187] Boris C. Grémont, "Fade Countermeasure Modelling for Ka Band Digital Satellite Links", Ph.D Thesis, Coventry University, U.K., November 1997
- [188] The International Telegraph and Telephone Consultative Committee (CCITT), "Integrated Services Digital Network (ISDN) - Overall Network Aspects and Functions, ISDN User-Network Interfaces, B-ISDN User-Network Interface - Physical Layer Specification", CCITT Recommendation I.432, Geneva, Switzerland, 1991
- [189] ITU-T, "B-ISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Type 5 Specification", ITU-T Recommendation I.363.5, August 1996
- [190] ITU-T, "B-ISDN semi-permanent connection availability", ITU-T Recommendation I.357, November 2000
- [191] N. Yoshimura, T. Takahashi, and N. Kadowaki, "Applications performance over Ka-band high data rate ATM satellite link", *International Journal of Satellite Communications*, no.17, pp.161-168, 1999
- [192] Sastri Kota, Rohit Goyal, and Raj Jain, "Satellite ATM Network Architectural Considerations and TCP/IP Performance", *Proceedings of the 3rd Ka Band Utilization Conference*, Sorrento, Italy, 1997
- [193] Thomas R. Henderson, and Randy H. Katz, "Transport Protocols for Internet-Compatible Satellite Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.17, no.2, February, 1999
- [194] Su-Kyoung Lee, and Jooseok Song, "An Integrated Call Admission Control in ATM Networks", *IEICE Transactions on Communications*, vol.E82-B, no.5, May 1999
- [195] Stéphane Combes, Céline Fouquet, and Virginie Renat, "Packet-Based DAMA Protocols for New Generation Satellite Networks", *Proceedings of 19th ALAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, Toulouse, France, 17-20 April 2001
- [196] Anubhav Arora, John S. Baras, and Georges Mykoniatis, "An End-to-End Measurement-Based Scheduling Architecture for ATM Networks", Technical Research Report CSHCN T.R. 99-7, Centre for Satellite and Hybrid Communication Networks, University of Maryland, Maryland, U.S.A., 1999
- [197] Ekram Hossain, and Vijay K. Bhargava, "Link-State Aware Dynamic Traffic Scheduling for Providing Predictive QoS in Wireless Mobile Multimedia Networks", *Journal of Interconnection Networks*, vol.1, no.3, pp.221-245, 2000
- [198] Nilo Casimiro Ericsson, "On Scheduling and Adaptive Modulation in Wireless Communications", Licentiate Thesis, Signals and Systems, Uppsala University, Sweden, June 2001
- [199] Nilo Casimiro Ericsson, Sorour Falahati, Anders Ahlén, and Arne Svensson, "Hybrid type-II ARQ/AMS supported by Channel Predictive Scheduling in a Multi-User Scenario", *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference VTC'00-Fall*, Boston, MA, U.S.A., pp. 1804-1811, 24-28 September 2000
- [200] Nikos Passas, Thanasis Korakis, Evangelos Zervas, and Lazaros Merakos, "Improving Traffic Scheduling in Wireless ATM Networks", *3rd IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Athens, Greece, June 1998
- [201] Nilo Casimiro Ericsson, "Scheduling as an Optimization Problem", *Nordic Radio Symposium 2001 (NRS 01)*, Nynäshamn, Sweden, 3-5 April 2001
- [202] Robert Boorstyn, Almut Burchard, Jörg Liebeherr, and Chaiwat Oottamakorn, "Statistical Multiplexing Gain of Link Scheduling Algorithms in QoS Networks (Short Version)", Technical Report CS-99-23, University of Virginia, U.S.A., July 1999
- [203] Aleksandar Neskovic, Natasa Neskovic, and George Paunovic, "Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment", *IEEE Communications Surveys*, Third Quarter 2000
- [204] Seung-Hoon Hwang, Jae-Young Ahn, Tae-Joong Kim, and Keum-Chan Whang, "The effects of Rain Attenuation on a Quasi Synchronous CDMA Return Link for a Ka-Band Satellite Communication Link", *IEICE Transactions Fundamentals*, vol.E81-A, no.7, pp.1436-1444, July 1998

- [205] M. Schnell, and D. von Hugo, "Fade Countermeasure and Adaptive Resource Sharing for an Experimental TDMA Satellite Communications System Operating at Ka-Band", *Telecommunication Transmissions*, vol.9, no.6, pp.561-568, December 1998
- [206] A. Baiocchi, M. Carosi, M. Listanti, and A. Roveri, "Modeling of A Distributed Access Protocol for an ATM Satellite System: An Algorithmic Approach", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.9, no.1, pp. 65-75, January 1991
- [207] F. Delli Priscoli, M. Listanti, A. Roveri, and A. Vernucci, "A Distributed Access Protocol for an ATM User-Oriented Satellite System", *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '89)*, Boston, U.S.A., pp. 690-694, June 1989
- [208] A. Hung, M.J. Montpetit, G. Kesidis, and P. Takats, "A Framework for ATM via Satellite", *Proceedings of GLOBECOM'96*, London, U.K., 18-22 November 1996
- [209] Philippe Vincke, "L'Aide Multicritère à la Décision", Editions de l'Université de Bruxelles & Editions Ellipses, Collection Statistiques et Mathématiques Appliquées, 1989
- [210] E Vilar, C. Catalan, "Propagation phase noise, impact on future VSAT system design", 1st International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ka band and Above, ESA WPP-146, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, pp 235-242, 28-29 October 1998

ANNEXE

1 BILANS DE LIAISON SAGAM

Les bilans de liaison suivants ont servi de référence pour tous les calculs sur la couche physique menés dans ce rapport.

1.1 LIAISON MONTANTE

1.1.1 Configurations FMT 1

		Conf. FMT1A puiss. nom.	Conf. FMT1A puiss. max.	Conf. FMT1B puiss. nom.	Conf. FMT1B puiss. max.	Conf. FMT1C puiss. nom.	Conf. FMT1C puiss. max.
	Unité						
Caractéristiques du terminal utilisateur							
Diamètre antenne	m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Efficacité	%	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Liaison montante							
Débit utile	kbit/s	2048	2048	2048	2048	2048	2048
Fréquence centrale TX	GHz	29.66	29.66	29.66	29.66	29.66	29.66
Longueur d'onde	m	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Gain d'antenne maximal	dB _i	46.03	46.13	46.13	46.13	46.13	46.13
Puissance par porteuse	W	1	3	1	3	1	3
Recul de sortie	dB	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Pertes de sortie	dB	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
PIRE	dBW	43.97	48.94	44.17	48.94	44.17	48.94
Angle d'ouverture à 3 dB	°	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
Angle de dépointage maximal	°	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Pertes de dépointage	dB	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Propagation station vers satellite							
Distance	km	38100	38100	38100	38100	38100	38100
Pertes en espace libre	dB	213.50	213.50	213.50	213.50	213.50	213.50
Pertes atmosphériques	dB	0	0	0	0	0	0
Réception satellite							
G/T	dB/K	15	15	15	15	15	15
Isolation spatiale C/I _{iso}	dB	12	12	12	12	12	12
Interférences canaux adjacents C/I _{adj}	dB	20	20	20	20	20	20
Rendement ATM		47/53	47/53	47/53	47/53	47/53	47/53
Taux de codage convolutionnel		1/2	1/2	3/4	3/4	7/8	7/8
Reed-Solomon		53/69	53/69	53/69	53/69	53/69	53/69
Rendement TDMA		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Modulation QPSK		2	2	2	2	2	2
Bande utile	MHz	4.3499	4.3499	2.8999	2.8999	2.4856	2.4856
Taille d'un groupe	MHz	26.099	26.099	17.400	17.400	14.914	14.914
Nombre de groupes		4	4	4	4	4	4
Bande utilisée	MHz	104.397163	104.397163	69.598109	69.598109	59.655522	59.655522
Capacité totale	Mbit/s	48	48	48	48	48	48
Résultats							
C/N ₀	dBHz	74.07	79.04	74.27	79.04	74.27	79.04
C/I ₀	dBHz	77.49	77.49	75.73	75.73	75.06	75.06
C/(N ₀ +I ₀)	dBHz	72.44	75.19	71.93	74.07	71.64	73.6
E _b /(N ₀ +I ₀)	dB	9.23	11.97	8.71	10.85	8.42	10.4
Pertes technologiques	dB	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
E _b /(N ₀ +I ₀) requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dB	3.92	3.92	4.71	4.71	5.62	5.62
E _b /N ₀ requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dB	4.33	4.33	5.5	5.5	6.77	6.77
C/N ₀ requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dBHz	67.44	67.40	68.71	68.61	69.89	69.89
Marge liaison montante	dB	3.3	6.1	2	4.15	0.8	2.77
Rapport débit utile / bande utilisée	bit/s/Hz	0.471	0.471	0.706	0.706	0.824	0.824

Tableau 42 : Bilans de liaison montante dans les configurations FMT n°1 SAGAM

1.1.2 Configuration FMT 2

	Unité	Mode 1 Air clair Puiss. min.	Mode 1 Air clair Puiss. max.	Mode 2 Pluie Puiss. min.	Mode 2 Pluie Puiss. max.
Caractéristiques du terminal utilisateur					
Diamètre antenne	m	0.8	0.8	0.8	0.8
Efficacité	%	0.65	0.65	0.65	0.65
Liaison montante					
Débit utile	kbit/s	2048	2048	2048	2048
Fréquence centrale TX	GHz	29.66	29.66	29.66	29.66
Longueur d'onde	m	0.01	0.01	0.01	0.01
Gain d'antenne maximal	dB _i	46.03	46.03	46.03	46.03
Puissance par porteuse	W	1	3	1.3	3
Recul de sortie	dB	0.5	0.5	0.5	0.5
Pertes de sortie	dB	0.5	0.5	0.5	0.5
PIRE	dBW	44.07	48.84	45.21	48.84
Angle d'ouverture à 3 dB	°	0.89	0.89	0.89	0.89
Angle de dépointage maximal	°	0.25	0.25	0.25	0.25
Pertes de dépointage	dB	0.96	0.96	0.96	0.96
Propagation station vers satellite					
Distance	km	38100	38100	38100	38100
Pertes en espace libre	dB	213.50	213.50	213.50	213.50
Pertes atmosphériques	dB	0	0	0	0
Réception satellite					
G/T	dB/K	15	15	15	15
Isolation spatiale C/I _{iso}	dB	12	12	12	12
Interférences canaux adjacents C/I _{adj}	dB	20	20	20	20
Rendement					
Rendement ATM		47/53	47/53	47/53	47/53
Taux de codage convolutionnel		3/4	3/4	1/2	1/2
Reed-Solomon		53/69	53/69	53/69	53/69
Rendement TDMA		0.9	0.9	0.9	0.9
Modulation QPSK		2	2	2	2
Bande utile	MHz	2.8999	2.8999	4.3499	4.3499
Taille d'un groupe	MHz	17.400	17.400	26.099	26.099
Nombre de groupes		4	4	4	4
Bande utilisée	MHz	69.598109	69.598109	104.397163	104.397163
Capacité totale	Mbit/s	48	48	48	48
Résultats					
C/N ₀	dBHz	74.17	78.94	75.31	78.94
C/I ₀	dBHz	75.73	75.73	77.49	77.49
C/(N ₀ +I ₀)	dBHz	71.87	74.04	73.26	75.15
E _b /(N ₀ +I ₀)	dB	8.65	10.82	10.04	11.93
Pertes technologiques	dB	2.0	2.0	2.0	2.0
E _b /(N ₀ +I ₀) requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dB	4.71	4.71	3.92	3.92
E _b /N ₀ requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dB	5.47	5.39	4.29	4.29
C/N ₀ requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dBHz	68.6	68.5	67.4	67.4
Marge liaison montante	dB	1.95	4.1	4.1	6
Rapport débit utile / bande utilisée	bit/s/Hz	0.706	0.706	0.471	0.471

Tableau 43 : Bilans de liaison montante en configuration FMT n°2 SAGAM

1.1.3 Configuration FMT 3

	Unité	Mode 1 Air clair Puiss. min.	Mode 1 Air clair Puiss. max.	Mode 2 Pluie moy. Puiss. min.	Mode 2 Pluie moy. Puiss. max.	Mode 3 Pluie forte Puiss. min.	Mode 3 Pluie forte Puiss. max.
Caractéristiques du terminal utilisateur							
Diamètre antenne	m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Efficacité	%	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Liaison montante							
Débit utile	kbit/s	2048	2048	2048	2048	512	512
Fréquence centrale TX	GHZ	29.66	29.66	29.66	29.66	29.66	29.66
Longueur d'onde	m	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Gain d'antenne maximal	dB _i	46.03	46.03	46.03	46.03	46.03	46.03
Puissance par porteuse	W	1.4	3	1.4	3	1.1	3
Recul de sortie	dB	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Pertes de sortie	dB	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
PIRE	dBW	45.43	48.84	45.53	48.84	44.49	48.84
Angle d'ouverture à 3 dB	°	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
Angle de dépointage maximal	°	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Pertes de dépointage	dB	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Propagation station vers satellite							
Distance	km	38566	38566	38566	38566	38566	38566
Pertes en espace libre	dB	213.6	213.6	213.6	213.6	213.6	213.6
Pertes atmosphériques	dB	0	0	0	0	0	0
Réception satellite							
G/T	dB/K	15	15	15	15	15	15
Isolation spatiale C/I _{iso}	dB	12	12	12	12	12	12
Interférences canaux adjacents C/I _{adj}	dB	20	20	20	20	20	20
Rendement ATM		47/53	47/53	47/53	47/53	47/53	47/53
Taux de codage convolutionnel		7/8	7/8	3/4	3/4	1/2	1/2
Reed-Solomon		53/69	53/69	53/69	53/69	53/69	53/69
Rendement TDMA		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Modulation QPSK		2	2	2	2	2	2
Bande utile	MHz	2.4856	2.4856	2.8999	2.8999	1.0875	1.0875
Taille d'un groupe	MHz	14.914	14.914	17.400	17.400	6.525	6.525
Nombre de groupes		4	4	4	4	4	4
Bande utilisée	MHz	59.655522	59.655522	69.598109	69.598109	26.099291	26.099291
Capacité totale	Mbit/s	48	48	48	48	12	12
Résultats							
C/N ₀	dBHz	75.42	78.83	75.52	78.83	74.48	78.83
C/I ₀	dBHz	75.06	75.06	75.83	79.14	70.53	74.88
C/(N ₀ +I ₀)	dBHz	72.23	73.54	72.67	75.98	69.06	73.41
E _b /(N ₀ +I ₀)	dB	9	10.33	9.45	12.76	11.86	16.22
Pertes technologiques	dB	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
E _b /(N ₀ +I ₀) requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dB	5.62	5.62	4.71	4.71	3.92	3.92
E _b /N ₀ requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dB	6.8	6.8	5.47	5.05	4.45	4.11
C/N ₀ requis pour un TEB = 10 ⁻⁹	dBHz	70.02	70.02	68.69	68.26	61.64	61.3
Marge liaison montante	dB	1.39	2.71	2.74	6.05	5.94	10.3
Rapport débit utile / bande utilisée	bit/s/Hz	0.805	0.805	0.690	0.690	0.460	0.460

Tableau 44 : Bilan de liaison montante dans la configuration FMT n°3 SAGAM

1.2 LIAISON DESCENDANTE

	Unité	
Emission satellite		
Débit utile	Mbit/s	68.28
Taux de codage convolutionnel		1/2
Reed-Solomon		188/204
Modulation QPSK		2
Bande utile	MHz	111.40
Fréquence centrale TX	GHz	19.7
Puissance TWTA	W	120
Gain d'antenne TX (faisceau de 0.6°)	dB	43
Pertes de sortie	dB	1.5
PIRE satellite	dBW	62.29
Propagation satellite vers station		
Distance	km	38100
Longueur d'onde	m	0.02
Pertes en espace libre	dB	210.1
Pertes atmosphériques	dB	1.6
Réception station		
Diamètre antenne	m	0.8
Gain d'antenne maximal	dB	42.5
Angle d'ouverture à 3 dB	°	1.33
Angle de dépointage maximal	°	0.25
Pertes de dépointage	dB	0.43
G/T	dB/K	15.4
Température de bruit du système	K	409.6
Isolation spatiale C/I_{iso}	dB	12
Interférences canaux adjacents C/I_{adj}	dB	20
Résultats		
C/N_o	dBHz	94.59
C/I_o	dBHz	91.83
$C/(N_o+I_o)$	dBHz	89.98
$E_b/(N_o+I_o)$	dB	11.6
Pertes technologiques	dB	1.5
Marge système	dB	3
$E_b/(N_o+I_o)$ requis pour un TEB = 10^{-9}	dB	3.44
Marge liaison montante	dB	3.70
Rapport débit utile / bande utilisée	bit/s/Hz	0.613

Tableau 45 : Bilan de liaison descendante SAGAM

2 ARCHITECTURE DE LA BOUCLE DE DETECTION FMT DE L'ONERA

Le prédicteur FMT de l'ONERA possède l'architecture suivante [73,74,80] :

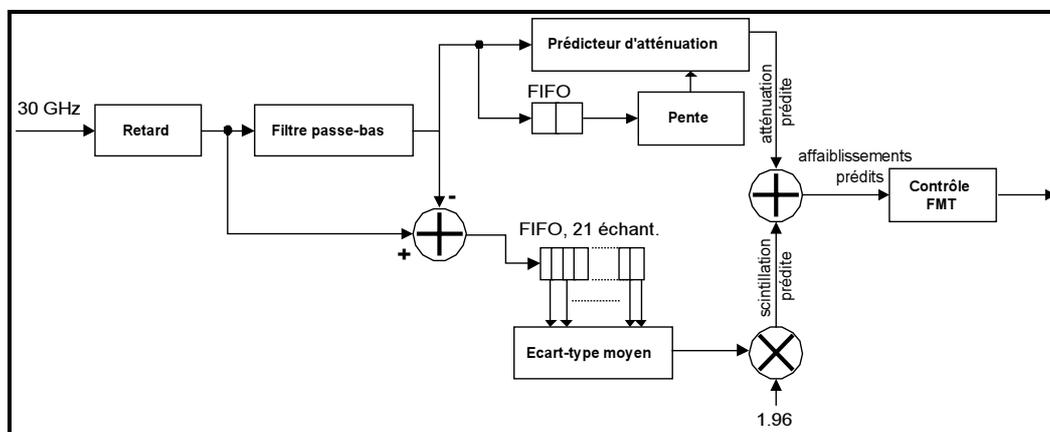


Figure 135 : Architecture du prédicteur d'affaiblissement de l'ONERA

- ✓ L'atténuation du signal sur la liaison montante est mesurée directement à 30 GHz au niveau du satellite qui renvoie cette information à la station terrestre, ce qui enlève la nécessité d'une similitude en fréquence sur le signal reçu.
- ✓ Le signal est ensuite filtré par un filtre passe-bas qui sépare la composante scintillation de la composante atténuation due à la pluie.
- ✓ Le dispositif effectue une prédiction en temps réel de l'atténuation due à la pluie à partir de deux échantillons à 1 Hz en sortie du filtre, en utilisant l'information de la pente d'atténuation.
- ✓ L'enveloppe du signal de fluctuation dû à la scintillation d'amplitude est prédite par estimation de l'écart type moyen $\sigma_\chi(t)$ calculé sur 21 échantillons ; cette valeur est multipliée par 1.96 de manière à ajouter une marge dynamique correspondant à l'amplitude de scintillation non dépassée pendant 97.5 % du temps. De façon équivalente, les 2.5 % correspondent à un seuil d'erreur de prédiction autorisée. Cette approche par marge dynamique de prédiction conduit à de performances long terme (débit utile et disponibilité de la liaison) meilleures que par l'approche par marge fixe [74]. Ces résultats sont corroborés par les calculs menés par l'Université de Portsmouth [57] qui propose un dispositif FMT différent de celui de l'ONERA, mais utilisant aussi le principe de marge de détection variable VDM (*Variable Detection Margin*) par opposition à la détection par marge fixe FDM (*Fixed Detection Margin*).
- ✓ L'atténuation totale est ainsi estimée à l'aide de l'atténuation due à la pluie prédite augmentée d'un terme correspondant à l'estimation de l'écart type de la scintillation d'amplitude :

$$\hat{A}(t+1) = \hat{A}_r(t+1) + 1.96 \times \hat{\sigma}_\chi(t - t_d)$$

Équation 75 : Atténuation estimée par la boucle de détection FMT de l'ONERA

où :

- $\hat{\sigma}_\chi(t)$ est l'écart type espéré calculé sur une période de 21 échantillons du processus de fluctuations rapides χ observé en conditions de pluie.
 - \hat{A}_r est l'atténuation due à la pluie prédite.
 - $\hat{A}(t+1)$ est l'atténuation globale prédite.
 - t_d est un terme de retard dû à l'étage de filtrage ainsi qu'au calcul de l'écart type par moyenne mobile.
- ✓ Le contrôle des ressources de contre-mesure est réalisé suivant le principe d'une double marge pour chaque mode FMT :
 - Marge variable DM (*Detection Margin*) de détection de pluie, notée d qui est fonction de l'atténuation due à la pluie prédite, et dépend de deux paramètres $\delta > 0$ et $\gamma \geq 0$, le premier étant une protection contre une sous-estimation de l'atténuation quand l'atténuation est importante, et le deuxième, un décalage destiné à compenser les imperfections des équipements de mesure et les erreurs résiduelles inhérentes à la méthode de prédiction [73] :
 - $d(\hat{A}_r) = \delta + \gamma \hat{A}_r$ (dB)
 - Marge d'hystérésis HM (*Hysteresis Margin*), permettant d'éviter des commutations trop fréquentes au passage d'un seuil lors d'un passage d'un mode FMT dégradé (l'atténuation augmente) vers un mode FMT relâché (l'atténuation diminue).
 - ✓ Le débit utile long terme est prédit en utilisant un modèle d'atténuation globale sur les liaisons satellitaires composée de l'atténuation due à la pluie et de la scintillation d'amplitude survenant *durant les précipitations* (scintillation dite humide). La fonction de densité de probabilité $p_{\hat{A}_r}(\hat{A}_r)$ de l'atténuation espérée est supposée log-normale, tandis qu'une densité de probabilité conditionnelle log-normale $p_{\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r}$ est utilisée pour la scintillation humide. Cette dernière fonction de densité de probabilité vient d'une relation existant entre l'intensité espérée des fluctuations et la sévérité du niveau d'affaiblissement induit par la pluie :

$$p_{\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r}(\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{\hat{\sigma}_\chi}(\hat{A}_r) \cdot \hat{\sigma}_\chi \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln \hat{\sigma}_\chi - \mu_{\hat{\sigma}_\chi}(\hat{A}_r)\right)^2}{2\sigma_{\hat{\sigma}_\chi}^2(\hat{A}_r)}\right) & \text{si } \hat{\sigma}_\chi \geq 0 \\ 0 & \text{si } \hat{\sigma}_\chi < 0 \end{cases}$$

Équation 76 : Fonction de densité de probabilité de la variance espérée de la scintillation conditionnelle à l'atténuation due à la pluie

Les paramètres $\mu_{\hat{\sigma}_\chi}$ et $\sigma_{\hat{\sigma}_\chi}$ ont été directement obtenus par Mertens et Castanet par régression linéaire sur les valeurs expérimentales de σ_χ mesurées sur 7 mois d'affilée par rapport à \hat{A}_r [72] :

$$\begin{cases} \mu_{\hat{\sigma}_\chi}(\hat{A}_r) = (a \hat{A}_r + b)^{1/\gamma} \\ \sigma_{\hat{\sigma}_\chi}(\hat{A}_r) = c \hat{A}_r + d \end{cases}$$

Équations 77 : Formules des paramètres $\mu_{\hat{\sigma}_\chi}$ et $\sigma_{\hat{\sigma}_\chi}$ déduites d'une régression linéaire

Les valeurs de a, b, c, d et γ dépendent du site considéré et sont données dans le tableau ci-dessous pour Louvain la Neuve (LLN) et Lessive (LSV) situées toutes les deux en Belgique :

	a	b	c	d	γ
LLN	0.0270	0.0161	0.0013	0.0003	1.2
LSV	0.0034	0.0004	0.0007	0.0008	2.25

Tableau 46 : Valeurs des paramètres $a, b, c, d,$ et γ sur les sites LLN et LSV en Belgique

3 CARACTERISATION STATISTIQUE DU CANAL KA

3.1 DISTRIBUTIONS DE L'ATTENUATION DUE A LA PLUIE ET DE L'ATTENUATION DUE A LA SCINTILLATION D'AMPLITUDE

3.1.1 Distribution de l'atténuation due à la pluie en liaison montante

En air clair, le bilan de liaison montante s'écrit comme suit :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{0,ul} = \frac{PIRE_{vsat}}{(I_{FS})_{ul} \cdot (I_{atm})_{ul}} \times \frac{G_{sat}}{kT_{sat}}$$

Équation 78 : Bilan de liaison montante en air clair

avec :

- Rapport signal reçu sur bruit en liaison montante : $\left(\frac{C}{N_0}\right)_{0,ul}$
- Atténuation en espace libre : I_{FS} (valeur réelle)
- Atténuation en espace libre exprimée en dB : $L_{FS} = -10 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ (dB)
- Longueur d'onde : $\lambda = \frac{c}{f}$ (m)
- Célérité de la lumière : $c = 3 \times 10^8$ m/s
- Fréquence de la liaison montante : f (Hz)
- Rayon terrestre : $R = 38400$ km
- Pertes atmosphériques (sans les pertes en espace libre) : I_{atm} (valeur réelle)

- Pertes atmosphériques (sans les pertes en espace libre) en dB : L_{atm} (dB)
- Gain d'antenne du satellite : $G_{sat} = \frac{G_{sat_{max}}}{l_{F_{sat}} \cdot l_{R_{sat}}}$ (valeur réelle)
- Température de bruit du satellite : T_{sat} (K)
- Constante de Boltzmann : $k = 1.379 \times 10^{-23}$ W/Hz
- PIRE transmise par la station : $PIRE_{vsat} = P_{vsat} \cdot G_{vsat}$
- Pertes en ligne de l'antenne satellite : $l_{F_{sat}}$ (valeur réelle)
- Pertes en ligne de l'antenne satellite en dB : $L_{F_{sat}}$ (dB)
- Perte de dépointage de l'antenne satellite : $l_{R_{sat}}$ (valeur réelle)
- Perte de dépointage de l'antenne satellite exprimée en dB : $L_{R_{sat}} = 12 \left(\frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2$ (dB) pour $0 \leq \theta_R \leq \frac{\theta_{3d}}{2}$
- Angle de dépointage au niveau de l'antenne satellite : θ_R (°)
- Angle d'ouverture à 3 dB (illumination non uniforme) de l'antenne satellite : $\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$ (°)
- Puissance par porteuse en transmission : P_{vsat} (W)

L'indice 0 désigne les conditions en air clair. Le bilan de liaison affaibli par la pluie devient :

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{pluie,ul} = \frac{\left(\frac{C}{N_0} \right)_{0,ul}}{(l_{pluie})_{ul}} = \frac{PIRE_{vsat}}{(l_{FS})_{ul} \cdot (l_{atm})_{ul} \cdot (l_{pluie})_{ul}} \times \frac{G_{sat}}{kT_{sat}}$$

Équation 79 : Bilan de liaison montante en conditions de pluie

$(l_{pluie})_{ul}$ est le facteur d'atténuation due à la pluie sur la liaison montante. Si $(L_{pluie})_{ul} = 10 \log((l_{pluie})_{ul})$ (dB), alors l'atténuation due à la pluie $(L_{pluie})_{ul}$ exprimée en dB, et notée par la suite $A_{r,ul}$ est déterminée par une fonction de densité de probabilité log-normale [57,70,185] :

$$p_{A_{r,ul}}(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma u \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln u - m)^2}{2\sigma^2}\right) & \text{pour } u \geq 0 \\ 0 & \text{pour } u < 0 \end{cases}$$

Équation 80 : Densité de probabilité de l'atténuation due à la pluie sur la liaison montante où σ et m sont deux paramètres dépendant de la zone climatique

3.1.2 Distribution de l'atténuation due à la pluie en liaison descendante

Le bilan de liaison descendante, en air clair, s'écrit comme suit :

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{0,dl} = \frac{PIRE_{sat}}{(l_{FS})_{dl} \cdot (l_{atm})_{dl}} \times \frac{G_{vsat}}{kT_{vsat}}$$

Équation 81 : Bilan de liaison descendante en air clair

La température de bruit globale de la station terrestre VSAT est $T_{vsat} = T_{ant} + T_{RX}$ où T_{RX} est la température de bruit du système de réception sol, et T_{ant} celle de l'antenne sol.

Or, par temps clair, la température de bruit T_{ant} s'exprime comme la somme de différentes contributions [56,70] :

$$T_{ant} = T_{ciel} + T_{sol} + \sum_i \Delta T_i$$

Équation 82 : Formule de température de bruit de l'antenne

avec :

- T_{ciel} : température de bruit du ciel
- $\sum_i \Delta T_i$: contribution des sources individuelles situées au voisinage de l'axe de rayonnement maximal de l'antenne
- T_{sol} : température du rayonnement du sol.

La contribution des sources individuelles diminue avec l'angle d'élévation. S'il s'agit d'une source radio i de diamètre angulaire apparent α_i et de température de bruit T_i , la température de bruit additionnelle ΔT_i contribuant à la température de bruit d'une antenne d'angle d'ouverture à 3 dB θ_{3dB} , s'exprime par [56] :

$$\Delta T_i = \begin{cases} T_i \left(\frac{\alpha_i}{\theta_{3dB}} \right)^2 & \text{si } \theta_{3dB} > \alpha_i \\ T_i & \text{si } \theta_{3dB} < \alpha_i \end{cases}$$

Équation 83 : Contribution des sources individuelles à la température de bruit de l'antenne sol

Cependant, pour des stations terrestres pointant vers un satellite géostationnaire, comme c'est le cas dans SAGAM, seule la contribution ΔT_A du soleil et de la lune doit être considérée. Le soleil et la lune ont un diamètre angulaire apparent de 0.5° . L'augmentation de la température de bruit a lieu lorsque ces corps célestes s'alignent avec la station terrestre pointant vers le satellite.

Le rayonnement dû au sol est capturé en grande partie par les lobes secondaires, leur contribution respective s'exprimant par $T_{sol,i} = G_i \left(\frac{\Omega_i}{4\pi} \right) T_G$ où G_i est le gain moyen du lobe i d'angle solide Ω_i et T_G la température de brillance du sol.

En ciel clair, la température de bruit du ciel s'exprime au moyen de la relation suivante :

$$T_{ciel,0} = \frac{T_{cosmique}}{(l_{atm})_{dl}} + T_{atm} \left(1 - \frac{1}{(l_{atm})_{dl}} \right) \text{ pour } f > 4 \text{ GHz}$$

Équation 84 : Température de bruit du ciel en air clair

où $T_{cosmique}$ est la température de bruit du rayonnement cosmique ($\approx 2,7$ K), T_{atm} la température physique de l'atmosphère (K) qui se situe entre 270 et 290 K généralement et $(l_{atm})_{dl}$ l'atténuation atmosphérique (essentiellement due aux gaz atmosphériques) intervenant sur la liaison descendante [70].

De ceci, il vient que le bilan de liaison peut aussi s'écrire :

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{0,dl} = \frac{PIRE_{sat}}{(l_{FS})_{dl} \cdot (l_{atm})_{dl}} \times \frac{G_{vsat}}{k(T_{ciel,0} + T_{sol} + \Delta T_A + T_{RX})}$$

La pluie a un impact sur la température de bruit du ciel qui devient alors :

$$T_{ciel,r} = \frac{T_{cosmique}}{(l_{atm})_{dl} \cdot (l_{pluie})_{dl}} + T_{atm} \left(1 - \frac{1}{(l_{atm})_{dl} \cdot (l_{pluie})_{dl}} \right).$$

Équation 85 : Température de bruit du ciel en conditions de pluie

Il en résulte la modification suivante du bilan de liaison :

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{pluie,dl} = \frac{PIRE_{sat}}{(l_{FS})_{dl} \cdot (l_{atm})_{dl} \cdot (l_{pluie})_{dl}} \times \frac{G_{vsat}}{k(T_{ciel,r} + T_{sol} + \Delta T_A + T_{RX})},$$

Équation 86 : Bilan de liaison descendante en conditions de pluie

soit :

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{pluie,dl} = \frac{\left(\frac{C}{N_0} \right)_{0,dl}}{(d_{pluie})_{dl}}.$$

Équation 87 : Expression du bilan de liaison descendante faisant intervenir un facteur d'atténuation due à la pluie

Un facteur d'atténuation due à la pluie peut ainsi être défini :

$$(d_{pluie})_{dl} = (1 + \beta)(l_{pluie})_{dl} - \beta$$

Équation 88 : Facteur d'atténuation due à la pluie dans le bilan de liaison descendante

avec :

$$\beta = \frac{T_{atm} - T_{cosmique}}{(T_{atm} + T_{sol} + \Delta T_A + T_{RX})(l_{atm})_{dl} - (T_{atm} - T_{cosmique})}$$

Équation 89 : Facteur de qualité β du récepteur

β représente la dégradation du facteur de mérite du récepteur et constitue un indicateur de qualité du récepteur. Une valeur élevée de β signifie que le récepteur est de bonne qualité (la température de bruit T_{RX} du récepteur est faible), tandis qu'une valeur faible dénote un récepteur de mauvaise qualité. $T_m = T_{atm} - T_{cosmique}$ est la température de rayonnement atmosphérique effective. Les ordres de grandeurs numériques pour β sont tels que :

$$0.25 < \beta < 0.95 \text{ pour } T_{cosmique} = 2.7 \text{ K et } T_{atm} = 280 \text{ K}$$

En passant en dB, la formule 87 du bilan de liaison s'écrit :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{pluie,dl,dB} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{0,dl,dB} - 10 \log((d_{pluie})_{dl})$$

Le terme $(D_{pluie})_{dl} = 10 \log((d_{pluie})_{dl})$ représente la dégradation (ou atténuation) en dB due à la pluie sur la liaison descendante. Cette atténuation est notée $A_{r,dl}$ dans la suite des développements.

L'objectif est de déterminer la fonction de densité de probabilité de $A_{r,dl}$. Dans ce but, la propriété 1 de la section §2.3.4 de changement de variable strictement monotone dans une distribution statistique, est une nouvelle fois utilisée, ce qui permet ainsi d'écrire :

$$\begin{aligned} P_{(D_{pluie})_{dl}}(D) &= \frac{\ln(10)}{10} \cdot 10^{\frac{D}{10}} \cdot P_{(d_{pluie})_{dl}}\left(10^{\frac{D}{10}}\right) \\ &= 0.23 \times 10^{\frac{D}{10}} \cdot P_{(d_{pluie})_{dl}}\left(10^{\frac{D}{10}}\right), \end{aligned}$$

où :

$$P_{(d_{pluie})_{dl}}(d) = \frac{1}{1 + \beta} P_{(l_{pluie})_{dl}}\left(\frac{d + \beta}{1 + \beta}\right)$$

et :

$$\begin{aligned} P_{(l_{pluie})_{dl}}(l) &= \frac{10}{\ln(10)} \frac{P_{(L_{pluie})_{dl}}(10 \log l)}{l} \\ &= 4.343 \frac{P_{(L_{pluie})_{dl}}(10 \log l)}{l} \end{aligned}$$

De ces trois relations, il vient :

$$P_{(D_{pluie})_{dl}}(D) = \frac{10^{\frac{D}{10}}}{10^{\frac{D}{10}} + \beta} P_{(L_{pluie})_{dl}}\left(10 \log \frac{10^{\frac{D}{10}} + \beta}{1 + \beta}\right)$$

Or la fonction de densité de probabilité de $(L_{pluie})_{dl}$, comme pour la liaison montante, est log-normale :

$$P_{(L_{pluie})_{dl}}(L) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_d \cdot L \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln L - m_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) & \text{si } L > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Il en résulte en définitive :

$$p_{A_{r,d}}(A) = \begin{cases} \frac{10^{\frac{A}{10}}}{10^{\frac{A}{10}} + \beta} \frac{1}{10\sigma \cdot \sqrt{2\pi} \log \frac{10^{\frac{A}{10}} + \beta}{1 + \beta}} \exp \left[-\frac{\left(\ln \left(10 \log \frac{10^{\frac{A}{10}} + \beta}{1 + \beta} \right) - m \right)^2}{2\sigma^2} \right] & \text{pour } A > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 90 : Fonction de densité de probabilité de la dégradation due à la pluie en liaison descendante, où σ et m sont deux paramètres dépendant de la zone climatique

Le tracé de $p_{A_{r,d}}(A)$ pour différentes valeurs de β (cf. : Figure 136) montre que si β croît, $p_{A_{r,d}}(A)$ prend également des valeurs plus élevées, ce qui signifie que meilleure est la qualité du récepteur, plus ce dernier est sensible aux effets d'atténuation par la pluie (ce qui est conforme au bon sens).

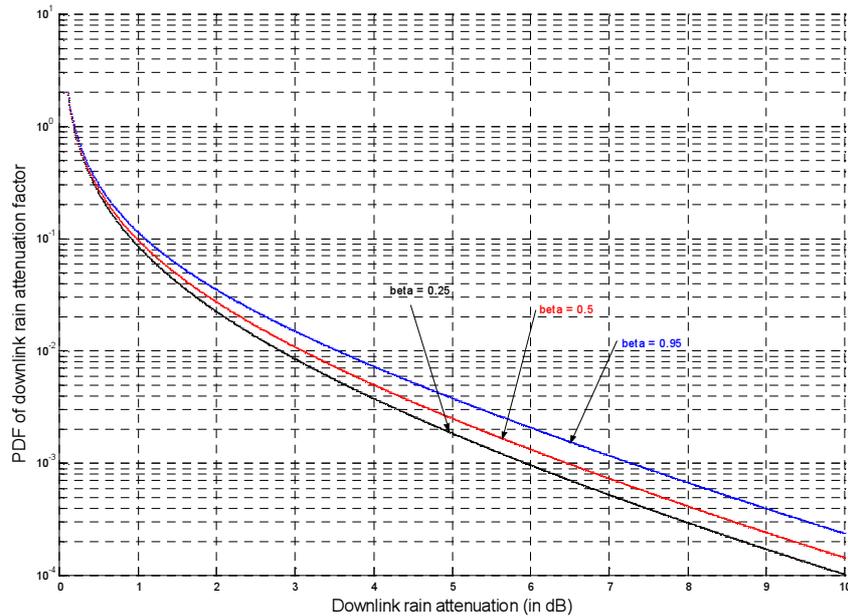


Figure 136 : Fonction de densité de probabilité de la dégradation due à la pluie en liaison descendante pour $\beta = 0.25, 0.50, 0.95, \sigma_d = 1.7056$ et $m_d = -2.9558$

3.1.3 Distribution de la scintillation d'amplitude

Seule la scintillation d'amplitude est considérée, la scintillation de phase étant supposée négligeable devant le bruit de phase des oscillateurs [70]. En fait, l'effet de la scintillation de phase n'est pas toujours négligeable mais elle n'intervient pas au niveau du bilan de liaison (cf. : §3.5 de l'annexe).

La scintillation d'amplitude peut être modélisée par la variable aléatoire χ définie par : $\chi = \ln \frac{A}{A_0}$, où A et A_0 sont respectivement les amplitudes du signal reçu et du signal non atténué. Le facteur d'atténuation due à la scintillation d'amplitude et exprimée en dB est alors défini par :

$$L_\chi(t) = 20 \log \frac{A(t)}{A_0} = 20 \log e^\chi = 8.686 \chi$$

Équation 91 : Définition du facteur d'atténuation due à la scintillation d'amplitude, exprimé en dB

Sa fonction de densité de probabilité est :

$$p_{L_\chi}(l) \approx 0.1151 p_\chi(0.1151 \times l)$$

Équation 92 : Fonction de densité de probabilité du facteur d'atténuation $L_\chi(t)$ due à la scintillation d'amplitude

où $p_\chi(\chi)$ est la fonction de densité de probabilité de la scintillation d'amplitude χ .

Un certain nombre de modèles de scintillation d'amplitude existent. Deux parmi eux sont considérés en particulier.

3.1.3.1 Le modèle de Mousley-Vilar

La fonction de densité de probabilité du processus de scintillation χ d'après Mousley-Vilar a été donnée au chapitre 2 à la section §2.1.1 [10,70,133] et est telle que :

$$p_{\chi}(\chi) = \frac{1}{\pi\sigma_{\sigma}} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sigma_{\chi}^2} \exp\left(-\frac{\chi^2}{2\sigma_{\chi}^2} - \frac{\left(\ln\frac{\sigma_{\chi}^2}{\sigma_m^2}\right)^2}{2\sigma_{\sigma}^2}\right) d\sigma_{\chi}$$

Équation 93 : Fonction de densité de probabilité d'après Mousley-Vilar du processus de scintillation d'amplitude, où σ_m et σ_{σ} sont deux paramètres

Les relations définissant les deux paramètres σ_m et σ_{σ} ont été déterminées également en §2.1.1, le lecteur est prié de s'y reporter.

La fonction de densité de probabilité de Mousley-Vilar repose sur l'hypothèse que la variance σ_{χ}^2 de la scintillation suit une loi log-normale de moyenne $m_{\sigma_{\chi}^2} = \ln\sigma_m^2$ et de variance $\sigma_{\sigma} = \sigma_{\ln(\sigma_{\chi}^2)}$, et sur l'utilisation d'une fonction de densité de probabilité gaussienne de l'amplitude logarithmique moyennée sur tout l'ensemble des valeurs de σ_{χ} .

3.1.3.2 Le modèle de van de Kamp

Le modèle de van de Kamp suppose que la fonction de densité de probabilité court terme de χ n'est plus gaussienne mais suit plutôt une distribution de Rice-Nagakami [25] :

$$p_{\chi}\left(\chi\left|\xi^2\right.\right) = \frac{\ln 10}{20} \cdot \frac{10^{2\chi/20}}{\xi^2} \cdot \exp\left(-\frac{10^{2\chi/20} + 1}{2\xi^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{10^{\chi/20}}{\xi^2}\right)$$

Équation 94 : Densité de probabilité court terme Rice-Nagakami de l'amplitude logarithmique de la scintillation

où I_0 est la fonction de Bessel modifiée d'ordre 0.

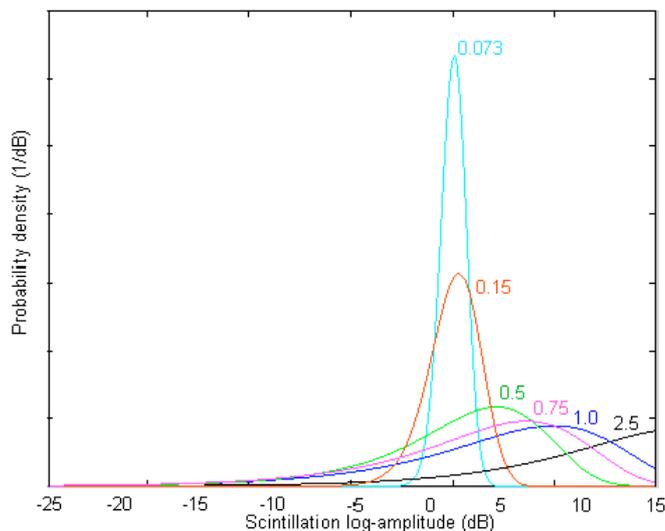


Figure 137 : Densité de probabilité court terme de l'amplitude logarithmique de la scintillation avec le modèle de van de Kamp pour différentes valeurs de ξ

Cette distribution dépend d'un paramètre (ξ) qui exprime que l'écart type σ_x de la scintillation est proportionnel à l'amplitude du signal direct E : $\sigma_x = \xi E$. La fonction de densité de probabilité long terme de l'écart type de la scintillation est supposée suivre une distribution de Gamma d'après Karasawa, Yamada et Allnutt [25] :

$$p_{\sigma_{\chi}}(\sigma) = \frac{\left(\frac{a}{m_{\sigma_{\chi}}}\right)^a}{\Gamma(a)} \sigma^{a-1} \exp\left(-\frac{a\sigma}{m_{\sigma_{\chi}}}\right)$$

Équation 95 : Densité de probabilité long terme de l'écart type de la scintillation d'après Karasawa, Yamada et Allnutt

où : $a = m_{\sigma_{\chi}}^2 / \sigma_{\sigma_{\chi}}^2$;

$m_{\sigma_{\chi}}$ est la valeur moyenne de σ_{χ} ;

$\sigma_{\sigma_{\chi}}$ est l'écart type de σ_{χ} ;

Γ est la fonction Gamma définie par : $\Gamma(b) = \int_0^{\infty} x^{b-1} e^{-x} dx$

Ceci conduit à la fonction de densité de probabilité suivante pour la variance de la scintillation :

$$p_{\sigma_{\chi}^2}(\sigma^2) = \frac{P_{\sigma_{\chi}}(\sigma)}{2\sigma} = \frac{\left(a/m_{\sigma_{\chi}}\right)^a}{2\Gamma(a)} (\sigma^2)^{a/2-1} \exp\left(-a\sqrt{\sigma^2}/m_{\sigma_{\chi}}\right)$$

Équation 96 : Fonction de densité de probabilité long terme de la variance de la scintillation d'après Karasawa, Yamada et Allnutt

En supposant $m_{\sigma^2} = 10 \sigma_{\sigma^2}$, le nombre de paramètres du modèle peut être réduit. Finalement, la fonction de densité de probabilité long terme de l'amplitude logarithmique de la scintillation peut être exprimée de la façon suivante :

$$p_{\chi}(\chi) = \int_0^{+\infty} p_{\sigma_{\chi}^2}(\sigma^2) p_{\chi}(\chi|\sigma^2) d\sigma .$$

Équation 97 : Fonction de densité de probabilité long terme de l'amplitude logarithmique de la scintillation avec le modèle de van de Kamp

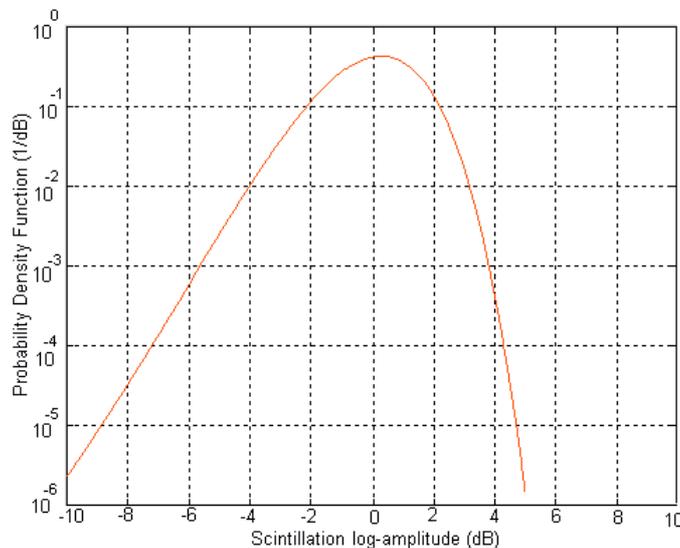


Figure 138 : Fonction de densité de probabilité long terme de l'amplitude logarithmique de la scintillation d'après le modèle de van de Kamp

3.1.3.3 Choix d'un modèle statistique pour la scintillation

D'après une comparaison effectuée par van de Kamp :

- Le test du χ^2 a montré que la fonction de densité de probabilité gaussienne pour les fluctuations court terme donne de meilleurs résultats que la distribution Gamma. Ainsi, le modèle de Mousley-Vilar semble mieux coïncider avec les mesures que le modèle de van de Kamp. Néanmoins, aucun des deux modèles ne passe avec succès le test avec les 5% recommandés de marge d'erreur. Par ailleurs, lorsque le test de Kolmogorov-Smirnov est appliqué, ils semblent tous les deux équivalents.
- Aucune corrélation n'a été mesurée entre les paramètres $m_{\sigma_{\chi}^2}$ et σ_{σ} de la distribution gaussienne (en presumant que la fonction de densité de probabilité gaussienne coïncide avec les données de manière adéquate), tandis que

m_{σ_x} et σ_{σ_x} ont été trouvés corrélés (ce qui renforce le fait que la distribution Gamma coïncide mieux avec les mesures). Une nouvelle fois, ceci met l'accent sur le fait que les deux distributions peuvent décrire avec les mêmes possibilités l'écart type de la scintillation.

Etant donné :

- a) que le modèle de Moulosley-Vilar utilise moins de paramètres que celui de van de Kamp (2 contre 5 ou 3) ;
 - b) que son expression est beaucoup moins complexe et qu'elle peut être approximée par la formule non intégrale de Banjo-Vilar ;
 - c) qu'il représente des statistiques long terme,
- c'est ce modèle pour la scintillation d'amplitude long terme qui a été retenu. Toutefois, ce modèle n'est pas global car il n'a pas été validé pour d'autres régions géographiques que Portsmouth, en Angleterre.

3.2 DISTRIBUTION DE L'ATTENUATION DUE A LA PLUIE ET DE LA SCINTILLATION COMBINEES

Parmi l'ensemble des effets d'affaiblissement troposphériques de la bande Ka, il ne sera pris en compte ici et dans toute la suite que l'atténuation due à la pluie et la scintillation. Il peut ainsi être écrit que le rapport signal à bruit dans des conditions d'affaiblissement est égal au rapport signal à bruit en air clair diminué des termes correctifs relatifs à la pluie d'une part, et à la scintillation d'amplitude d'autre part :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{i,dB} = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{0,i,dB} - (A_{r,i} - L_{\chi,i})$$

Équation 98 : Influence combinée de la pluie et de la scintillation d'amplitude sur le bilan de liaison

où $\Delta_{i,dB} = A_{r,i} - L_{\chi,i}$ est le terme d'affaiblissement global et l'indice i peut être *ul* (pour *uplink* ou liaison montante) ou *dl* (pour *downlink* ou liaison descendante).

La suite des calculs nécessite de prendre comme hypothèse de travail l'indépendance statistique à long terme des effets d'atténuation due à la pluie et de scintillation d'amplitude. Cette hypothèse est couramment utilisée car elle est corroborée par des résultats empiriques et résulte du fait que scintillation et atténuation due à la pluie procèdent de phénomènes physiques distincts. Cependant, une faible dépendance à court terme existe, l'intensité de la scintillation d'amplitude augmentant légèrement avec les événements de pluie [70].

Cette hypothèse étant posée, la densité de probabilité de $\Delta_{i,dB}$ se calcule à partir d'une convolution des densités de probabilité de $A_{r,i}$ et $L_{\chi,i}$:

$$\begin{aligned} p_{\Delta_{i,dB}}(D) &= \int_{-\infty}^{+\infty} p_{A_{r,i}}(D-u) \cdot p_{L_{\chi,i}}(u) du \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} p_{A_{r,i}}(u) \cdot p_{L_{\chi,i}}(D-u) du \end{aligned}$$

où $A_{r,i}$ suit une distribution log-normale de paramètres β, σ_d et m_d , et $L_{\chi,i}$ est la fonction de densité de probabilité de la scintillation exprimée en dB, définie par les équations 92 et 93 et de paramètres σ_m et σ_σ .

Il vient donc :

$$p_{\Delta_{i,dB}}(D) \approx 0.1151 \int_0^{+\infty} p_{A_{r,i}}(u) \cdot p_{\chi_{MV,i}}(0.1151 \times (D-u)) du \text{ car } p_{A_{r,i}}(D) = 0 \text{ pour } D < 0$$

Équation 99 : PDF du facteur d'affaiblissement dû à la pluie et à la scintillation d'amplitude combinées

où $p_{\chi_{MV,i}}$ est la fonction de densité de probabilité de Moulosley-Vilar donnée par l'équation 93.

La fonction de densité de probabilité $p_{\Delta_{i,dB}}$ de la dégradation globale du canal due à la pluie et la scintillation d'amplitude dépend ainsi des cinq paramètres : $m_d, \sigma_d, \beta, \sigma_m, \sigma_\sigma$.

3.3 DISTRIBUTION DU RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT

La méthode de transformation des statistiques du canal en distribution du rapport signal à bruit E_b/N_o (en dB) noté γ_{dB} , présentée dans la section §2.3.4, est détaillée ci-après.

3.3.1 Liaison descendante

La dégradation totale exprimée en dB du rapport C/N_o sur la liaison descendante, notée $\Delta_{dl,dB}$ est, à l'instar de la dégradation due à la pluie (cf. : *Annexe, §3.1*), définie par :

$$\Delta_{dl,dB} = \left(\frac{C}{N_o} \right)_{dl,dB} - \left(\frac{C}{N_o} \right)_{0,dl,dB}$$

Équation 100 : Dégradation du rapport signal à bruit en dB sur la liaison descendante

mais, ici, $\left(\frac{C}{N_o} \right)_{dl,dB}$ représente le rapport signal sur bruit *total*, c'est-à-dire tenant compte des autres effets d'atténuation (c'est-à-dire la scintillation d'amplitude) que la pluie seule.

$$\text{Or : } \begin{cases} \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{dl,dB} = 10 \log \left(\frac{L_{RX}}{R_{b,dl}} \right) + \left(\frac{C}{N_o} \right)_{dl,dB} \\ \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{0,dl,dB} = 10 \log \left(\frac{L_{RX}}{R_{b_0,dl}} \right) + \left(\frac{C}{N_o} \right)_{0,dl,dB} \end{cases}$$

avec :

- L_{RX} : perte en ligne au niveau de la station sol réceptrice ;
- $R_{b,dl}$: débit binaire courant sur la liaison descendante ;
- $R_{b_0,dl}$: débit binaire en air clair sur la liaison descendante.

Il en découle que la dégradation totale peut s'écrire :

$$\Delta_{dl,dB} = \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{dl,dB} - \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{0,dl,dB} - 10 \log \frac{R_{b,dl}}{R_{b_0,dl}}$$

Équation 101 : Dégradation totale de la liaison descendante

Il est à remarquer à ce stade que le rythme binaire utile $R_{b,dl}$ peut varier dans le cas où un TDM unique est remplacé par plusieurs TDM avec des taux de codage différents.

Seule l'hypothèse d'un TDM unique sera retenue. Dans ce cas : $R_{b,dl} = R_{b_0,dl}$ et :

$$\Delta_{dl,dB} = \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{dl,dB} - \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{0,dl,dB} = \gamma_{dl,dB} - \gamma_{0,dl,dB}$$

Équation 102 : Dégradation de la liaison descendante à débit binaire constant

Cette relation permet de déduire immédiatement la fonction de distribution $P_{\gamma_{dl,dB}}(\gamma)$ cherchée grâce à la propriété 1 :

$$\begin{aligned} P_{\gamma_{dl,dB}}(\gamma) &= P[\gamma_{dl,dB} < \gamma] \\ &= P[\Delta_{dl,dB} < \gamma - \gamma_{0,dl,dB}] = P_{\Delta_{dl,dB}}(\gamma - \gamma_{0,dl,dB}) \end{aligned}$$

Équation 103 : Fonction de distribution du rapport signal sur bruit total en liaison descendante

où $P_{\Delta_{dl,dB}}$ est la fonction de distribution de la dégradation totale $\Delta_{dl,dB}$.

Or la fonction de densité de probabilité de la dégradation totale $\Delta_{dl,dB}$ a été déterminée dans la section §3.2 précédente de l'annexe :

$$p_{\Delta_{dl,dB}}(D) \approx 0.1151 \int_0^{+\infty} p_{A_{r,dl}}(u) \cdot p_{\chi_{MV,dl}}(0.1151 \times (D-u)) du$$

où $p_{\chi_{MV,dl}}$ est la PDF de Moulisley-Vilar, et $p_{A_{r,dl}}$ est la fonction de densité de probabilité du facteur d'atténuation due à la pluie sur la liaison descendante, qui provient d'une distribution long terme log-normale :

$$p_{A_{r,dl}}(L) = \begin{cases} \frac{10^{\frac{L}{10}}}{10^{\frac{L}{10}} + \beta} \frac{1}{10\sigma_d \cdot \sqrt{2\pi} \log \frac{10^{\frac{L}{10}} + \beta}{1 + \beta}} \exp \left(- \frac{\left(\ln \left(10 \log \frac{10^{\frac{L}{10}} + \beta}{1 + \beta} \right) - m_d \right)^2}{2\sigma_d^2} \right) & \text{pour } L > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Par la suite, la propriété 2 suivante [28] de changement de variable bijectif et régulier dans une fonction de densité de probabilité, sera utilisée :

Soit X et Y deux variables aléatoires continues telles que $Y = h(X)$, où h est une fonction strictement monotone, et la densité de probabilité de X est $p_X(x)$. Alors la densité de probabilité de Y est donnée par :

$$p_Y(y) = p_X(h^{-1}(y)) \cdot \left| \frac{dh^{-1}(y)}{dy} \right|.$$

Propriété 2 : Propriété de changement de variable bijectif dans une fonction de densité de probabilité

Il vient immédiatement que la fonction de distribution du facteur de dégradation $\Delta_{dl,dB}$ peut être obtenue par l'équation:

$$P_{\Delta_{dl,dB}}(D) = P[\Delta_{dl,dB} < D] = \int_{-D}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_{r,dl}}(u) \times p_{\chi_{MV,dl}}(v-u) du dv$$

Équation 104 : Fonction de répartition de la dégradation totale en liaison descendante

D'où en définitive :

$$P_{\gamma_{dl,dB}}(\gamma) = P_{\Delta_{dl,dB}}[\gamma - \gamma_{0,dl,dB}] = \int_{\gamma_{0,dl,dB} - \gamma}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_{r,dl}}(u) \times p_{\chi_{MV,dl}}(v-u) du dv$$

Équation 105 : Fonction de répartition du rapport signal sur bruit en dB sur la liaison descendante

3.3.2 Liaison montante

De façon analogue à la liaison descendante, si $\Delta_{ul,dB}$ est la dégradation totale sur la liaison montante, la fonction de répartition de $\Delta_{ul,dB}$ est donnée par la relation :

$$P_{\Delta_{ul,dB}}(\Delta) = \int_{-\Delta}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_{r,ul}}(u) \times p_{\chi_{MV,ul}}(v-u) du dv$$

Équation 106 : Fonction de répartition de la dégradation totale sur la liaison montante

mais cette fois, la fonction de densité de probabilité du facteur d'atténuation due à la pluie est simplement une loi log-normale :

$$p_{A_{r,ul}}(L) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_d \cdot L \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln L - m_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) & \text{pour } L > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Par ailleurs, plusieurs cas sont à distinguer ici.

3.3.2.1 Configuration sans FMT et configurations FMT SAGAM n°1 et n°2

Le débit binaire utile reste inchangé indépendamment de la valeur de l'atténuation rencontrée sur la liaison, par conséquent, il est possible d'écrire de nouveau :

$$\Delta_{ul,dB} = \gamma_{ul,dB} - \gamma_{0,ul,dB}$$

Il en découle tout naturellement que la fonction de distribution du rapport signal sur bruit est :

$$\begin{aligned} P_{\gamma_{ul,dB}}(\gamma) &= P_{\Delta_{ul,dB}}[\gamma - \gamma_{0,ul,dB}] \\ &= \int_{\gamma_{0,ul,dB} - \gamma}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_{r,ul}}(u) \times p_{\chi_{MV,ul}}(v-u) du dv \end{aligned}$$

Équation 107 : Fonction de distribution du rapport sur bruit en liaison montante sans FMT ou dans les configurations FMT n°1 et n°2

3.3.2.2 Configuration FMT SAGAM n°3

Dans cette configuration, le débit utile est de 2048 kbit/s tant que le dispositif de contre-mesure reste dans le mode 1 ou 2 ; s'il passe dans le mode 3 le plus dégradé, le débit est réduit à 512 kbit/s. Il en résulte donc :

$$\Delta_{ul,dB} = \begin{cases} \gamma_{ul,dB} - \gamma_{0,ul,dB} & \text{dans les modes FMT1 et FMT2 avec } \gamma_{ul,dB} \leq 12.8 \text{ dB} \\ \gamma_{ul,dB} - \gamma_{0,ul,dB} - C & \text{dans le mode FMT3 avec } \gamma_{ul,dB} > 11.9 \text{ dB} \end{cases}$$

(Équation 108)

où $C = 10 \log \frac{2048}{512} \approx 6 \text{ dB}$, $\gamma_{0,ul,dB} = 9 \text{ dB}$ et 11.9 dB est la valeur minimale du rapport signal sur bruit $\gamma_{ul,dB}$ dans le mode FMT n°3, d'après le bilan de liaison pour la configuration FMT n°3 (cf. : tableau 44).

3.4 DISTRIBUTION DU TEB

Seul le cas de la liaison montante munie d'une contre-mesure est étudié dans ce paragraphe, étant donné que le cas de la liaison descendante a déjà été traité dans le corps du rapport, dans la section §2.3.4 et que, par ailleurs, ce dernier ne présente aucune difficulté particulière.

Dans l'hypothèse où la configuration FMT SAGAM n°3 est employée, il vient immédiatement :

$$\begin{aligned} P[TEB < \varepsilon_b] &= P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode FMT 1}] \cdot P[\text{mode FMT 1}] + P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode FMT 2}] \cdot P[\text{mode FMT 2}] \\ &\quad + P[TEB < \varepsilon_b | \text{mode FMT 3}] \cdot P[\text{mode FMT 3}] \end{aligned}$$

Équation 109 : Expression de la fonction de répartition du TEB comme somme des fonctions de répartition du TEB conditionnelles aux modes FMT, pour la configuration FMT n°3

Avec le dispositif de détection de l'affaiblissement de l'ONERA (voir *Annexe*, §2), les probabilités pour que le contrôleur FMT soit dans le mode i , pour $i \in \{1,2,3\}$ sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P[\text{mode FMT 1}] = P[\hat{A} \leq a_1 - d] = P[\hat{A}_r + 1.96\hat{\sigma}_\chi \leq a_1 - d] \\ P[\text{mode FMT 2}] = P[a_1 - d \leq \hat{A} \leq a_2 - d] = P[a_1 - d \leq \hat{A}_r + 1.96\hat{\sigma}_\chi \leq a_2 - d] \\ P[\text{mode FMT 3}] = P[a_2 - d \leq \hat{A} \leq a_3] = P[a_2 - d \leq \hat{A}_r + 1.96\hat{\sigma}_\chi \leq a_3] \end{cases}$$

Équations 110 : Probabilités d'état de la configuration FMT n°3

où $a_1 = 2.7$ dB, $a_2 = 6$ dB et $a_3 = 10.3$ dB sont les seuils de commutation, et d la marge de détection.

Ceci permet d'aboutir à :

$$\begin{cases} P[\text{mode FMT 1}] = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{\sigma_{\chi,1}(\hat{A}_r)} p_{\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r}(\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r) \cdot p_{\hat{A}_r}(\hat{A}_r) d\hat{\sigma}_\chi d\hat{A}_r \\ P[\text{mode FMT 2}] = \int_0^{+\infty} \int_{\sigma_{\chi,1}(\hat{A}_r)}^{\sigma_{\chi,2}(\hat{A}_r)} p_{\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r}(\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r) \cdot p_{\hat{A}_r}(\hat{A}_r) d\hat{\sigma}_\chi d\hat{A}_r \\ P[\text{mode FMT 3}] = \int_0^{+\infty} \int_{\sigma_{\chi,2}(\hat{A}_r)}^{\sigma_{\chi,3}(\hat{A}_r)} p_{\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r}(\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r) \cdot p_{\hat{A}_r}(\hat{A}_r) d\hat{\sigma}_\chi d\hat{A}_r \end{cases}$$

Équations 111 : Probabilités d'état de la FMT n°3

où : $\sigma_{\chi,i}(\hat{A}_r) = \max\left(\frac{a_i - d - \hat{A}_r}{1.96}, 0\right)$, pour $i \in \{1,2,3\}$, et $p_{\hat{A}_r}$ est la fonction de densité de probabilité log-normale de l'atténuation due à la pluie prédite sur la liaison montante, et $p_{\hat{\sigma}_\chi|\hat{A}_r}$ la fonction de densité de probabilité conditionnelle de l'écart type de la scintillation, également log-normale, de moyenne μ_{σ_χ} et de variance $\sigma_{\sigma_\chi}^2$ (voir *Annexe*, §2).

Le calcul de $P[TEB < \varepsilon_b | FMT_i]$ s'effectue aisément en tenant compte de l'équation rappelée ci-dessous :

$$\Delta_{ul,dB} = \begin{cases} \gamma_{ul,dB} - \gamma_{0,ul,dB} & \text{dans les modes FMT1 et FMT2 avec } \gamma_{ul,dB} \leq 12.8 \text{ dB} \\ \gamma_{ul,dB} - \gamma_{0,ul,dB} - 6 & \text{dans le mode FMT3 avec } \gamma_{ul,dB} > 11.9 \text{ dB} \end{cases}$$

Ainsi :

$$\begin{cases} P_{TEB}[TEB < \varepsilon_b | \text{mode FMT 1}] = \int_{\gamma_{0,ul,dB} - T_{CC,ul,7/8}^{-1}(\varepsilon_b)}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_r,ul}(u) \times p_{\chi_{MV,ul}}(v-u) dudv & (a) \\ P_{TEB}[TEB < \varepsilon_b | \text{mode FMT 2}] = \int_{\gamma_{0,ul,dB} - T_{CC,ul,3/4}^{-1}(\varepsilon_b)}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_r,ul}(u) \times p_{\chi_{MV,ul}}(v-u) dudv & (b) \\ P_{TEB}[TEB < \varepsilon_b | \text{mode FMT 3}] = \int_{\gamma_{0,ul,dB} + 6 - T_{CC,ul,1/2}^{-1}(\varepsilon_b)}^{+\infty} \int_0^{+\infty} p_{A_r,ul}(u) \times p_{\chi_{MV,ul}}(v-u) dudv & (c) \end{cases}$$

Équation 112 : Fonctions de répartition du TEB conditionnelles aux modes FMT

où $T_{CC,ul,r}^{-1}$ est la fonction du TEB en sortie du Reed-Solomon pour la liaison montante, donnée dans la section *Annexe* §4.

La fonction de distribution du TEB pour la liaison montante, dans la configuration FMT SAGAM n°3, est ainsi entièrement définie.

3.5 EFFET DE LA SCINTILLATION DE PHASE

3.5.1 Modélisation de la scintillation de phase due à la propagation

Il a été montré qu'il est possible de modéliser de façon commune le bruit de phase FM (*Frequency Modulation*) généré par les oscillateurs locaux des terminaux VSAT et le bruit de phase dû à la scintillation [210].

Soient $\phi_i(t)$ la phase de l'oscillateur et $\Delta_\tau(\phi_i) = \phi_i(t + \tau) - \phi_i(t)$ la différence de phase accumulée sur une période τ d'un oscillateur par rapport à une référence de phase. L'indice i peut être soit FM (désignant le bruit de phase par modulation de fréquence), soit *scint* (désignant dans ce cas le bruit de phase dû à la scintillation).

Alors la variance $\sigma_{\Delta_\tau(\phi_i)}^2$ de $\Delta_\tau(\phi_i)$, la densité spectrale de puissance $S_{\phi_i}(f)$ de $\phi_i(t)$ et la densité spectrale de puissance $S_{\dot{\phi}_i}(f)$ de $\dot{\phi}_i(t)$ peuvent s'exprimer par les expressions génériques suivantes :

Expressions génériques	
$\sigma_{\Delta_\tau(\phi_i)}^2$	$\frac{A_i}{\sin\left(\frac{b+1}{2}\pi\right) \cdot \Gamma(b+2)} \cdot \tau^{b+1}$
$S_{\phi_i}(f)$	$\frac{A_i}{f^{b+2}} \text{ (rad}^2\text{/Hz)}$
$S_{\dot{\phi}_i}(f)$	$\frac{A_i}{f^b} \text{ (rad}^2 \cdot \text{Hz)}$

Bruit de scintillation ($b = 2/3$)	Bruit FM ($b = 0$)
$A_{sc\ int} = 1.94 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 v_t^{2/3} C_n^2 L$	$D = \frac{A_{FM}}{\sin\left(\frac{b+1}{2}\pi\right) \cdot \Gamma(b+2)}$
$\tau = \frac{\rho}{v_t}$	coefficient de diffusion de phase

Tableaux 47 : Modélisation commune du bruit de phase FM et du bruit de phase de scintillation

avec :

- $\Gamma(\cdot)$: fonction Gamma
- ρ : distance radiale d'un point fictif au centre de l'ouverture d'antenne
- v_t : vitesse transversale du vent
- L : longueur du chemin effectif Terre-satellite.

3.5.2 Impact du bruit de phase sur une boucle de synchronisation porteuse

Pour maximiser la capacité de transmission pour une modulation de type PSK (*Phase Shift Keying*) ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), il est nécessaire de récupérer correctement la porteuse. Pour un système de récupération de la phase de la porteuse, généralement à base d'une boucle à verrouillage de phase PLL (*Phase Lock Loop*), il est donc primordial de maintenir l'erreur de phase totale ε_θ à un niveau, sinon le plus faible possible, du moins inférieur à une valeur statique admissible donnée.

Si la boucle de récupération de phase est d'ordre 2 avec un coefficient d'amortissement $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, alors la variance de l'erreur de phase totale peut s'exprimer comme suit [210] :

$$\sigma_{\varepsilon_\theta}^2 = \underbrace{B_L \frac{N_0}{C}}_{\text{bruit de phase FM + bruit thermique}} + 5.283 \underbrace{\frac{A_{sc\ int}}{B_L^{5/3}}}_{\text{bruit de phase de propagation}}$$

bruit de phase FM + bruit thermique bruit de phase de propagation

Équation 113 : Erreur totale de phase au niveau de la boucle de récupération de phase du récepteur

- B_L : bande équivalente de bruit de la boucle à l'entrée du récepteur (Hz)
- N_0 : densité monolatérale de puissance du bruit thermique (W/Hz)
- C : amplitude de la porteuse (W).

De cette équation, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Lorsque le rapport signal sur bruit $\frac{C}{N_0}$ est faible, le bruit de phase propre à l'équipement de réception prédomine et la scintillation de phase est négligeable.

Le système de récupération de la phase porteuse gagne à avoir une bande de boucle B_L réduite au maximum afin de mieux poursuivre la porteuse et minimiser la variance (puissance) de l'erreur de phase totale. La valeur minimale de cette variance est donnée par :

$$B_{L_{opt}} = \left(8.8 A_{scint} \frac{C}{N_0} \right)^{3/8}$$

Équation 114 : Valeur de la bande de boucle minimisant la variance de l'erreur de phase totale

- Pour $\frac{C}{N_0}$ élevé, le bruit dû à la scintillation de phase peut devenir dominant et il n'existe plus de valeur de B_L qui minimise la variance de l'erreur de phase totale. Il faut au contraire avoir B_L grand pour diminuer la variance. Cependant, la variance de l'erreur totale de phase reste faible même à B_L faible.

Généralement, B_L peut être technologiquement maintenue petite (inférieure à 10 Hz). En ce qui concerne la variance de l'erreur totale de phase, si le bruit de phase du répéteur à bord du satellite peut être négligé, il reste néanmoins le bruit de phase de propagation qui, lui, demeure irréductible.

Un fonctionnement correct implique $\varepsilon_\theta < 0.1$ rad (rms). A 20 GHz, la probabilité que l'erreur de phase excède cette valeur est très faible.

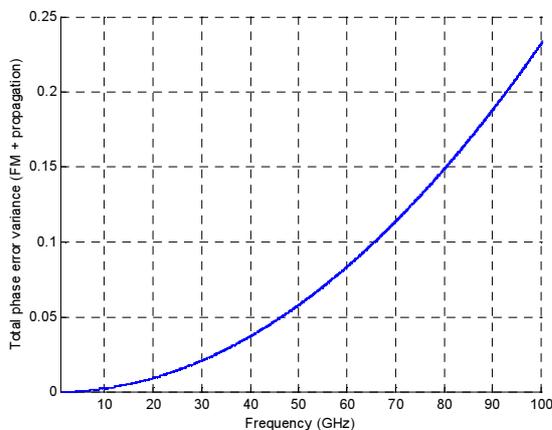


Figure 139 : Variance de l'erreur de phase totale en fonction de la fréquence avec $B_L = 10$ Hz, $\frac{C}{N_0} = 45$ dB, $C_n^2 L = 6 \times 10^{-8} \text{ m}^{1/3}$ et $v_t = 8 \text{ m/s}$.

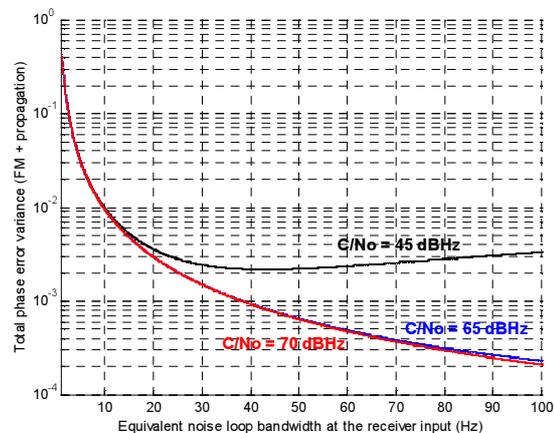


Figure 140 : Variance de l'erreur de phase totale en fonction de la bande de boucle avec $B_L = 10$ Hz, $f = 20$ GHz, $v_t = 8 \text{ m/s}$ et $C_n^2 L = 6 \times 10^{-8} \text{ m}^{1/3}$.

3.6 MODELES STATISTIQUES DES DUREES D'AFFAIBLISSEMENT

Les modèles de durée d'affaiblissement séparent les effets dus à la climatologie régionale des effets inhérents aux hydrométéores [126,127]. Ils utilisent, de fait, des probabilités conditionnelles. Ainsi, la probabilité conjointe d'observer un affaiblissement dont la durée D dépasse d et dont l'amplitude A est plus grande que a est exprimée par :

$$P_{D,A}[D \geq d, A \geq a] = P_{D|A}[D \geq d | A \geq a] \times P_A[A \geq a]$$

Équation 115 : Probabilité conjointe d'observer un affaiblissement de durée D supérieure à d et d'amplitude A supérieure à a

où :

- $P_{D|A}[D \geq d|A \geq a]$ représente l'effet des hydrométéores commun à toutes les régions du monde ;
- $P_A[A \geq a]$ est la probabilité d'observer un niveau d'affaiblissement A dépassant a , cette probabilité pouvant être exprimée par exemple par le modèle de l'IUT ou une loi log-normale ou encore le modèle d'affaiblissement global de Mouldsley-Vilar [70,96,133] défini plus haut.

Les lois de distribution $P_{D|A}[D \geq d|A \geq a]$ des durées d'affaiblissement sont connues. Elles sont conformes aux mesures expérimentales et ont été testées. Elles seront notées : $P[D > d|A \geq a] = F_{D|A}(d, a)$.

$P_{D|A}[D \geq d|A \geq a]$ exprime la probabilité que l'affaiblissement dure plus de d secondes, étant donné une amplitude d'affaiblissement A supérieur à a .

Dans le cas d'une configuration FMT avec n seuils de commutation $\{A_i, 1 \leq i \leq n\}$, ces lois s'appliquent donc naturellement aux durées d'affaiblissement $\{\tau_i, 1 \leq i \leq n\}$ relatif à des seuils fixés, définies comme les intervalles de temps séparant les instants T_i et T'_i correspondant respectivement à l'instant où l'atténuation est en dessous du seuil A_i , et à l'instant où elle réapparaît au-dessus du seuil A_i .

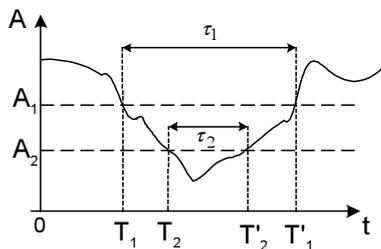


Figure 141 : Durées d'affaiblissement relatif un seuil donné

Ainsi il est possible d'écrire :

$$P[\tau_i > d|A \geq A_i] = F_{D|A}(d, A_i)$$

Équation 116 : Probabilité d'observer une durée d'affaiblissement supérieure à d , à un seuil supérieur à un seuil donné

Les distributions les plus largement utilisées sont données ci-après [126,127,131] :

- **Distribution de Weibull :**

$$F_{D|A}(d, a) = \gamma \cdot \beta \cdot d^{\beta-1} \exp(-\gamma \cdot d^\beta) \text{ pour } d > 0 \text{ et avec } \gamma, \beta > 0 \text{ (Équation 117)}$$

Les coefficients γ et β dépendent du seuil a , de la fréquence de la liaison et du site considéré.

- **Distribution exponentielle :**

C'est un cas particulier de la distribution de Weibull avec $\beta = 1$:

$$F_{D|A}(d, a) = \exp(-\gamma d) \text{ (Équation 118)}$$

γ dépend du seuil d'atténuation a , de la fréquence de la liaison et du site considéré.

- **Distribution exponentielle cascade :**

$$F_{D|A}(d, a) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \exp(-\beta_i d) \text{ (Équation 119) où } N = 2 \text{ ou } 3 \text{ termes.}$$

- **Distributions de Paraboni-Riva [131] :**

Le modèle de Paraboni-Riva fait intervenir deux fonctions de distribution différentes :

- $N_s(D)$: période totale (en secondes) pendant laquelle un seuil A est dépassé, cette période étant composée d'intervalles de temps plus longs que D .
- $N_d(D)$: nombre d'affaiblissements individuels dont la durée est supérieure à D .

Ce modèle suppose que les durées d'affaiblissement supérieures à environ 1 minute sont distribuées suivant une loi $N_s(D)$ log-normale, tandis que les durées inférieures obéissent à une loi de type puissance.

3.6.1 Comparaison des performances des distributions

La loi exponentielle est très facile à mettre en œuvre analytiquement. Les performances de la loi exponentielle cascadiée à partir de $N = 3$ sont meilleures que celles de Paraboni-Riva pour tous les sites de mesure considérés à 20-30 GHz, sachant que l'ordre 3 permet de prendre en compte la scintillation [127].

Le critère de comparaison utilisé est décrit ci-après : les paramètres des modèles ont été obtenus par [127] en minimisant une fonction d'erreur logarithmique entre les résultats fournis par les modèles théoriques et les mesures pour un seuil a donné :

$$\varepsilon_i = \log \left(\frac{P_{mesure} [D > d_i | A \geq a]}{P_{modèle} [D > d_i | A \geq a]} \right)$$

Équation 120 : Fonction d'erreur logarithmique

La moyenne μ_ε et l'écart type σ_ε de ε_i ont été calculés pour toutes les valeurs de seuil.

Une fonction de pondération qui sert de critère de comparaison des différentes lois des durées d'affaiblissement a été définie : $\rho_\varepsilon = \sqrt{\mu_\varepsilon^2 + \sigma_\varepsilon^2}$.

Ce sont essentiellement les résultats de comparaison de certains modèles statistiques avec des mesures effectuées sur cinq années à partir de balise en utilisant le satellite ACTS fonctionnant en bande Ka à Vancouver au Canada [126] qui sont choisis comme référence. La distribution de Weibull a été trouvée la plus performante parmi toutes les distributions testées, suivie de près par la distribution de Paraboni-Riva aux deux fréquences 20.2 et 27.5 GHz, et pour tous les seuils d'atténuation sauf pour 6.9 dB à 20.2 GHz, où le modèle log-normal est meilleur.

Pour le modèle exponentiel cascadié, les résultats proviennent de mesures effectuées sur des événements de courte durée. Les meilleurs résultats sont obtenus à 20.2 GHz pour $N = 3$ termes, et à 27.5 GHz pour $N = 2$ termes. Une excellente correspondance entre le modèle exponentiel double et les mesures à 12 GHz a été établie [128]. Ces mesures étaient réalisées à l'aide d'un radiomètre qui ne prenait pas en compte la scintillation d'amplitude de courte durée. Elles montraient qu'à 12.5 GHz à Ottawa, le modèle exponentiel double exhibait les meilleures performances. Mais ces résultats doivent être modulés par le fait de la possibilité d'effets d'humidité résiduelle sur l'antenne qui ont pu influencer sur les mesures récupérées par le biais d'une balise.

3.6.2 Choix d'une distribution des durées d'affaiblissement

La distribution exponentielle cascadiée semble présenter le meilleur compromis entre simplicité de l'expression de la loi et performances. Cependant, aucune méthode empirique n'a été indiquée dans la littérature pour calculer les paramètres α_i et β_i en fonction de la fréquence ainsi que du seuil d'atténuation.

Compte-tenu de ces manquements, la distribution de Weibull qui donne de très bonnes performances également et reste, en outre, plus facilement manipulable par rapport à la distribution de Paraboni-Riva, sera choisie.

Les paramètres γ et β dépendent du seuil d'atténuation a (dB). Pour le site de Vancouver (Canada), sur la liaison montante à 27.5 GHz, les valeurs suivantes de γ et β ont été trouvées [126] :

	Seuil (dB)	γ (27.5 GHz)
A ₁	1.32	1.7435
A ₂	2.705	1.3696
A ₃	4.32	1.1
A ₄	6.41	1

	Seuil (dB)	β (27.5 GHz)
B ₁	1.32	0.952
B ₂	2.7045	1.187
B ₃	4.32	1.435
B ₄	6.41	1.5696

Tableaux 48 : Paramètres de la distribution de Weibull à 27.5 GHz à Vancouver (Canada)

γ et β sont supposés évoluer de façon linéaire entre respectivement les points A_i et les points B_i . Les valeurs de γ et β pour d'autres seuils d'atténuation peuvent donc être obtenues linéairement.

Pour la configuration FMT n°2 à deux modes, l'unique seuil de commutation est à 4.4 dB ; tandis que pour la configuration FMT n°3, les deux seuils de commutation sont 3.1 dB et 6.3 dB. Ceci donne les valeurs suivantes pour γ et β :

Seuil (dB)	γ (27.5 GHz)	β (27.5 GHz)
4.4	1.0962	1.44
3.055	1.311	1.241
6.324	1.004	1.564

Tableau 49 : Valeurs des paramètres γ et β pour différents seuils de commutation

3.7 LE MODELE DE PLUIE EXCELL

Le modèle de cellule de pluie EXCELL présenté dans [56] donne les meilleurs résultats en termes de valeur efficace (RMS) de l'erreur de gain relatif sur la prédiction des gains de diversité relative comparés aux mesures. Les performances d'un système de diversité de site dépendent non seulement des facteurs météorologiques mais également de facteurs géométriques et radioélectriques tels que la distance D séparant deux stations, la fréquence de la liaison et l'angle d'élévation.

Cette variabilité spatiale est principalement caractérisée par [9,56] :

- un coefficient de corrélation $\zeta_{12}(D)$ de l'atténuation de pluie dans deux sites par rapport à la distance D les séparant ;
- une probabilité non conditionnelle $P_{12}(A_1, A_2, D)$ que l'atténuation dépasse simultanément A_1 sur le site 1 et A_2 sur le site 2 ;
- un indice de dépendance statistique $X(A_1, A_2, D)$ qui représente la valeur de la probabilité conditionnelle normalisée par la valeur obtenue dans le cas de l'indépendance statistique ;
- le gain de diversité de site $G(p\%)$ défini comme le rapport entre la valeur de l'atténuation dépassée sur un site unique avec la probabilité $p\%$ et la valeur de l'atténuation dépassée conjointement sur les deux sites avec le même pourcentage de temps $p\%$:

$$G(p\%) = \frac{A_s(p\%)}{A_j(p\%)}$$

Équation 121 : Gain de diversité de site

- le facteur d'amélioration de diversité I défini comme le rapport entre la probabilité de dépasser un niveau d'atténuation A sur un seul site et la probabilité conjointe de dépasser le même niveau d'atténuation A sur les deux sites [56] :

$$I(A) = \frac{P_s(A)}{P_{12}(A, A, D)} = \frac{P_s(A)}{P_j(A, D)}$$

Équation 122 : Facteur d'amélioration de diversité

avec :

$$P_j(A, D) = \frac{(P_s(A))^2 (1 + \delta_{site}^2)}{P_s(A) + 100\delta_{site}^2}$$

Équation 123 : Probabilité conjointe de dépasser un même seuil d'atténuation sur deux sites

avec $\delta_{site}^2 = 2 \times 10^{-4} d$ où d est la distance (km) entre les deux sites ($d > 5$ km).

- ✓ Le taux de précipitation R à une distance ρ du centre de la cellule est donné par :

$$R(\rho) = R_M \exp\left(-\frac{\rho}{\rho_0}\right)$$

Équation 124 : Taux de précipitation dans le modèle EXCELL à une distance ρ du centre de la cellule

avec :

- R_M : intensité maximale de pluie au centre de la cellule ;
- ρ_0 : « rayon » de la cellule de pluie défini comme la distance au centre de la cellule à laquelle le taux de précipitation décroît d'un facteur $1/e$.

✓ La densité spatiale $N(R_M, \rho_0)$ de population de cellules de pluie est :

$$N(\ln R_M, \rho_0) = N_0(\ln R_M) \exp\left(-\frac{\rho_0}{\bar{\rho}_0}\right)$$

Équation 125 : Densité spatiale de la population des cellules de pluie

et vient du fait qu'il a été observé que ρ_0 , pour un R_M donné, suit une distribution exponentielle.

✓ Le rayon moyen $\bar{\rho}_0$ conditionnel à R_M s'exprime par :

$$\bar{\rho}_0 = 1.7 \left[\left(\frac{R_M}{6} \right)^{-10} + \left(\frac{R_M}{6} \right)^{-0.26} \right], R_M > 5$$

Équation 126 : Rayon moyen d'une cellule de pluie

✓ Le facteur de densité spatiale $N_0(\ln R_M)$ se déduit de la fonction de distribution locale de l'intensité de pluie ponctuelle par :

$$N_0(\ln R_M) = -\frac{1}{4\pi\bar{\rho}_0^2} P(R_M)^m$$

Équation 127 : Facteur de densité spatiale de la population des cellules de pluie

où $P(R_M)^m$ est la dérivée de troisième ordre, par rapport à la variable $\ln(R)$, de la fonction de distribution de l'intensité ponctuelle de pluie $P(R)$, calculée à $R = R_M$.

Le modèle EXCELL fait intervenir par ailleurs un concept de « noyau » (*kernel*) défini comme la surface constituée par l'ensemble de toutes les positions du système de communication par rapport à la cellule de pluie (qui se translate dans le temps), pour laquelle une valeur donnée d'un paramètre λ quelconque est dépassée. L'aire de cette surface est proportionnelle à la probabilité que le paramètre λ dépasse le seuil donné.

Pour une configuration sans diversité de site, la fonction de distribution de l'atténuation due à la pluie subie par la station est calculée en intégrant les noyaux de chaque cellule de pluie sur l'ensemble de la population de cellules.

Pour une diversité de site avec deux stations, pour chacune des cellules et une valeur d'atténuation donnée, il existe un noyau par station, les deux noyaux pouvant avoir des aires différentes si les deux stations présentent des caractéristiques différentes. La probabilité que le même niveau d'atténuation soit dépassé sur les deux sites est proportionnelle à la surface commune des deux noyaux. La fonction de distribution conjointe s'obtient alors par intégration de cette aire commune sur l'ensemble de la population des cellules de pluie.

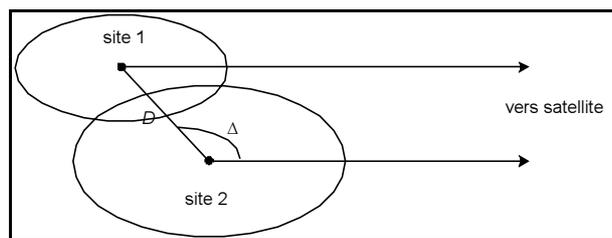


Figure 142 : Noyaux de pluie dans une configuration de diversité de site à deux stations

Le procédé est identique pour plus de deux stations.

Outre une modélisation des cellules suivant une forme circulaire, les applications suivantes du modèle EXCELL peuvent être mentionnées :

- EXCELL a été utilisé dans la plate-forme de simulation OPNET présentée au chapitre 5, de façon combinée avec une série chronologique d'atténuation, pour modéliser la variabilité spatiale des cellules de pluie sur une zone géographique de $240 \text{ km} \times 240 \text{ km}$. Ce modèle de variabilité spatiale peut être affiné en remplaçant le modèle EXCELL par le récent modèle de cellule de pluie de forme elliptique HYCELL développé par Féral [76,117-119]. Cette amélioration, quoique n'ayant pas été introduite dans le simulateur OPNET, est disponible sous forme d'un utilitaire Matlab destiné à générer des séries d'atténuation spatialement corrélées subies par plusieurs stations (cf. : §1.2.4.2.2). Cette variabilité spatiale est nécessaire pour réaliser un contrôle centralisé d'actions de contre-mesure : des contrôles FMT individuels par station ne sont pas envisageables car ils alourdiraient l'architecture des stations et du NCC, et plus généralement des mécanismes de gestion des ressources, et ne conduiraient pas à des

performances optimales. En effet, un contrôle centralisé à optimisation distribuée qui prend en considération les données du sous-ensemble de réseau affecté par l'événement de pluie semble être la solution la plus performante [26].

- La diversité de site.

4 MODELISATION DES STATISTIQUES D'ORDRE SUPERIEUR DE LA COUCHE PHYSIQUE ET DU TRAFIC COMBINES

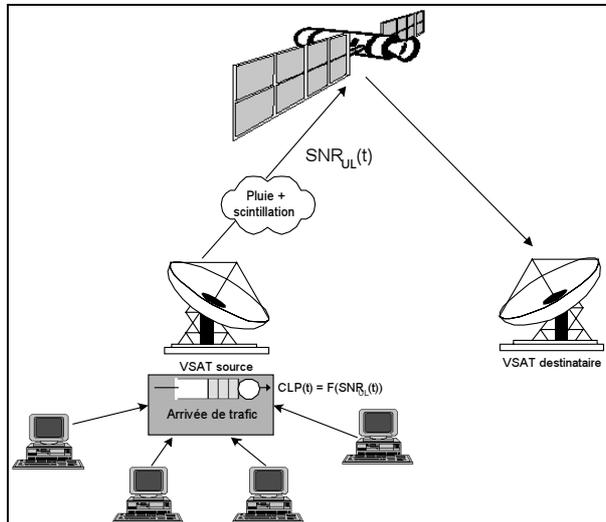


Figure 143 : Impact du trafic et du canal combinés sur les files d'attente d'une station

Dans cette section, l'impact combiné du canal sur la liaison montante et du trafic sur les performances des files d'attente dans une station terrestre source est étudié d'après les travaux de San-qi Li.

Une file d'attente unique peut être modélisée et analysée avec la théorie des écoulements fluides.

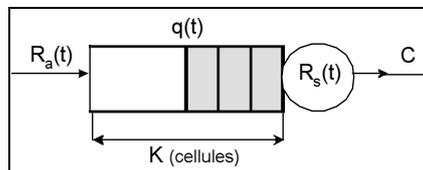


Figure 144 : Modèle de file d'attente simple avec discipline de service

- $R_a(t)$: taux d'arrivée des cellules à l'instant t
- $R_s(t)$: taux de service à l'instant t
- $q(t)$: niveau de remplissage (en nombre de cellules ATM) de la file d'attente à l'instant t
- K : taille de la file d'attente (en nombre de cellules ATM)
- $C(t)$: capacité du canal (en nombre de cellules ATM) mesurée toutes les Δt .

A l'instant Δt , le niveau de remplissage est tel que :

$$\begin{cases} q(t + \Delta t) = \max(0, q(t) + R_a(t) - R_s(t)) \\ q(t + \Delta t) \leq K \end{cases}$$

Équation 128 : Equation du taux de remplissage d'une file d'attente

$R_a(t)$ et $R_s(t)$ peuvent être représentés généralement par des variables aléatoires.

$R_a(t)$ est lié directement au profil du trafic qui arrive à l'entrée de la file d'attente, il transporte donc les caractéristiques statistiques du trafic. Les flux multimédia réels exhibent souvent la propriété de dépendance long terme (LRD), ce qui se traduit par une concentration de leur puissance dans les basses fréquences.

Les nombreuses études faites sur les problèmes liés aux files d'attentes alimentées par du trafic multimédia, dans les réseaux câblés, ont montré [33] que seules les statistiques de premier et de deuxième ordres du processus d'arrivée

$R_a(t)$ ont une répercussion directe sur le taux de remplissage $q(t)$ en régime permanent. Dans les réseaux câblés, le taux de service $R_s(t)$ est constant et égal à la capacité C du lien physique.

Les résultats de l'analyse conduite pour les réseaux câblés se transposent de façon analogue à un réseau satellitaire, excepté que $R_s(t)$ n'est plus constant. Ceci se démontre simplement en posant : $R'_s(t) = \mu - R_s(t)$ où μ est la valeur moyenne de $R_s(t)$ (en cellules). Le processus de taux de remplissage devient alors :

$$q(t + \Delta t) = \max(0, q(t) + R_a(t) + R'_s(t) - \mu)$$

Équation 129 : Expression modifiée du taux de remplissage d'une file d'attente

équation qui montre que le taux de service $R'_s(t)$ peut être traité comme un processus d'arrivée. Or $R_s(t)$ se déduit de $R'_s(t)$ par une simple translation. Il est donc possible de dire que seules les statistiques de premier et de deuxième ordres sont nécessaires dans l'étude du processus d'affaiblissement du canal, car la dynamique stochastique du canal se traduit par $R_s(t)$. En effet, s'il est supposé qu'au niveau de la station terrestre, est réalisé un mécanisme éliminant systématiquement des cellules ATM de la file d'attente avant transmission lorsque la liaison montante expérimente des conditions de propagation qui engendrent un taux de perte de cellules $CLR(t)$ inférieur à l'objectif de qualité visé pour cette liaison, le taux de service $R_s(t)$ peut s'exprimer dans ce cas de la façon suivante :

$$R_s(t) = [1 - CLR(t)] \times C(t)$$

Équation 130 : Taux de service de la file d'attente en fonction du taux de perte de cellules

$C(t)$ dépend du contrôle d'accès à la trame montante qui, lui-même, dépend de la présence de créneaux alloués à la station dans la trame montante MF-TDAMA courante, de l'état des files d'attente et du mécanisme de vidage utilisé. Une modélisation analytique de $C(t)$ est par conséquent nécessaire, en tenant compte du fait que, dans SAGAM, d'une part, la file d'attente est multiple et non pas unique, et que, d'autre part, la discipline de service envisagée est soit suivant une priorité de service stricte, soit alors suivant l'algorithme WFQ (*Weighted Fair Queueing*) (cf. §4.1.1).

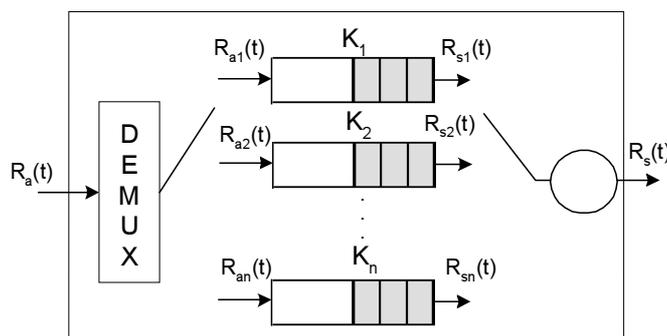


Figure 145 : Files d'attentes multiples dans SAGAM

Il est nécessaire de se ramener au modèle équivalent de file d'attente unique de la figure 144 .

La prise en compte du taux de codage variable (à cause des techniques FMT) sur la liaison montante augmente la complexité du modèle.

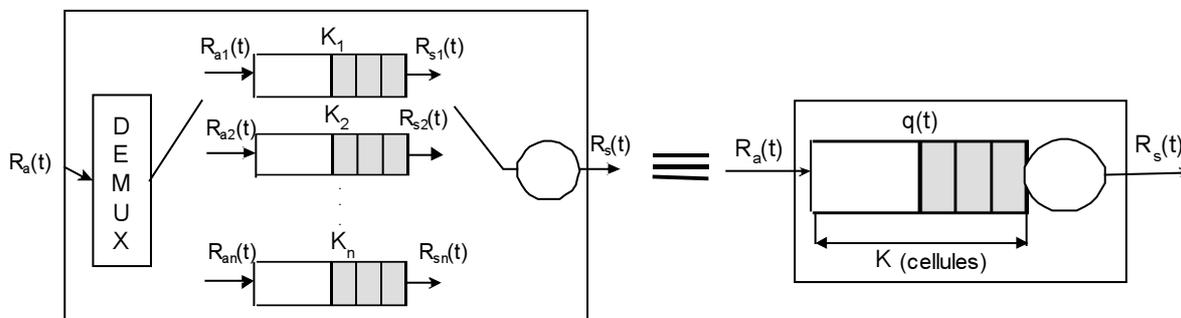


Figure 146 : Modèle équivalent par file d'attente unique d'une file d'attente multiple

Le taux de service moyen est :

$$\begin{aligned}\mu &= \bar{R}_s = (1 - E[CLR(t)]) \times E[C(t)] \\ &= (1 - \overline{CLR}) \times E[C(t)]\end{aligned}$$

Équation 131 : Taux de service moyen

Ainsi, le modèle de file d'attente unique défini plus haut montre que les performances réseau sont déterminées principalement par deux phénomènes : d'une part, la dynamique du processus $R_a(t)$ d'arrivée des cellules ; et d'autre part, la dynamique du canal de propagation qui influence directement le taux de service $R_s(t)$. L'analyse des performances réseau est en fait liée étroitement à l'interdépendance de ces deux phénomènes, le trafic et la couche physique [33]. De ce fait, il est nécessaire de passer par une analyse spectrale.

Li et al. [33,44-47,49,50,52] ont étudié les réseaux haut débit dans le domaine fréquentiel et sont parvenus à la conclusion que les statistiques de premier et de deuxième ordres ont une influence plus significative sur les performances des systèmes, que les statistiques d'ordre supérieur (bispectre, trispectre). En notant ω la pulsation, trois domaines de fréquence peuvent être caractérisés [44] :

- (a) **Basses fréquences** (LF ou *Low Frequency*) avec $0 < |\omega| \leq \omega_L$: sur ce domaine de fréquence, les performances en file d'attente sont principalement déterminées par les statistiques de premier ordre des processus qui sont la fonction de densité de probabilité (PDF) stationnaire et la fonction de distribution (CDF).
- (b) **Moyennes fréquences** (MF ou *Medium Frequency*) avec $\omega_L < |\omega| \leq \omega_H$: les statistiques de premier ordre et les statistiques de deuxième ordre essentiellement caractérisées par la fonction d'autocorrélation ou le spectre de puissance (PSD ou *Power Spectral Density*) interviennent conjointement dans l'analyse des performances.
- (c) **Hautes fréquences** (HF *High Frequency*) avec $|\omega| \geq \omega_H$: dans ce domaine de fréquence, il n'est pas nécessaire de capturer les statistiques des processus étudiés car la file d'attente se comporte comme un filtre passe-bas qui absorbe les hautes fréquences et ne laissent inchangées que les basses fréquences dans le système. A titre d'illustration, le taux d'arrivée moyen d'un trafic est la composante de plus basse fréquence. Cette fréquence n'est pas modifiée par le système excepté en cas de blocage où il y a alors interruption de trafic.

Pour un canal à évanouissement tel que le canal mobile avec effets de masquage (*shadowing*) et de multitrajets (*multipath*), les statistiques hautes fréquence sont négligeables dans leurs effets sur les performances des files d'attente, seules les statistiques basses fréquences sont à prendre en compte. La dynamique basses fréquences correspond aux fluctuations lentes (masquage) alors que la dynamique hautes fréquences aux fluctuations rapides (multitrajets).

Les pulsations ω_L et ω_H (en rad/s) sont définies comme suit :

$$\begin{cases} \omega_L = \frac{0.01\pi}{d_{\max}} \\ \omega_H = \frac{2\pi}{d_{\max}} \end{cases}$$

Équation 132 : Pulsations limites des domaines d'analyse spectrale

où $d_{\max} = \frac{K}{\mu}$ est le délai maximal (en secondes) dans la file d'attente, μ le taux de service moyen (bit/s) et K la taille de la file d'attente en nombre de cellules ATM.

Ces relations font ressortir le fait que les paramètres de la file d'attente (dimension et discipline de service) influencent la réactivité du système au niveau des couches supérieures vis-à-vis des phénomènes du trafic et du canal. En effet, une augmentation de la taille K de la file d'attente aura pour conséquence que les limites des domaines de fréquence seront décalées vers les basses fréquences, et donc que le domaine des moyennes fréquences se rapprochera des fréquences plus basses. Ainsi, K augmentant, les effets des statistiques de deuxième ordre qui étaient négligeables avec des valeurs de K plus faibles, deviennent de plus en plus importants.

Il est donc primordial de connaître la décomposition en fréquence des spectres de puissance du trafic et du canal afin de pouvoir déterminer leur influence relative sur le comportement de la distribution du taux de remplissage $q(t)$ de la file d'attente, et partant sur la distribution du délai en file d'attente. Une analyse spectrale doit par conséquent être effectuée à la fois sur le trafic et sur le canal, ce qui requiert d'être capable de caractériser le trafic et les phénomènes de propagation dans le canal Ka en terme de spectre de puissance. A partir de cette analyse-là, San-qi Li a énoncé la règle suivante :

La modélisation du canal n'est nécessaire dans l'analyse de la file d'attente que si le canal contient dans son spectre de

puissance une composante basses fréquences comparable à celle du processus du trafic d'arrivée. Si tel est bien le cas, il est indispensable de tenir compte des caractéristiques stochastiques du taux de service, caractéristiques qui découlent directement des mesures de l'information de série chronologique du rapport signal sur bruit du canal. Quatre cas distincts se présentent alors :

- (a) Le spectre de puissance du trafic est prépondérant par rapport au spectre de puissance du canal. Dans ce cas, la dynamique du canal peut être totalement ignorée dans l'analyse des files d'attente dont le comportement ne dépend que du profil statistique du trafic d'arrivée et un modèle simple de discipline de service, soit à taux constant, soit encore à taux exponentiel, suffit.
- (b) Le spectre de puissance du canal est comparable au spectre de puissance du trafic et la majeure partie de la puissance est concentrée dans la région des basses fréquences : seule la CDF du canal doit être prise en compte dans la modélisation par chaîne de Markov.
- (c) Le spectre de puissance du canal est comparable au spectre de puissance du trafic et la majeure partie de la puissance est concentrée dans la région des moyennes fréquences. Alors la modélisation doit rendre compte aussi bien de la CDF que de la PSD du canal.
- (d) Le spectre de puissance du canal est comparable au spectre de puissance du trafic mais est localisé majoritairement dans la région des hautes fréquences. Dans ce cas, toute la dynamique du canal est entièrement absorbée par la file d'attente et seul le trafic intervient dans le comportement réseau.

Propriété 3 : Règles d'analyse spectrale comparée du trafic et du canal

Soit par exemple un lien à $\mu = 2048$ kbit/s (valeur du débit sur la voie montante de SAGAM) et une file d'attente de taille $K = 100$ cellules ATM. Ces valeurs donnent un délai maximal d_{\max} de 48.8 μ s, une fréquence basse $f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = 102.4$ Hz et une fréquence haute de régionnement spectral $f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = 20.48$ kHz. Or, il a été montré que le spectre de l'atténuation due à la pluie et à la scintillation en bande Ka a son énergie concentrée dans les basses fréquences, typiquement inférieures à 1 Hz [71], ce qui se situe bien en dessous de la fréquence basse f_L .

L'analyse précédente amène ainsi à élaborer une architecture de gestion des ressources qui inclut des modèles de trafic et de canal basés sur des mesures en ligne. San-qi Li a proposé une méthode d'analyse des performances des files d'attente, utilisant une modélisation du canal et du trafic d'arrivée suivant des chaînes de Markov MMP (*Markov Modulated Process*) à N états (N pouvant être très grand, de l'ordre de la centaine) en utilisant l'outil SMAQ [33,45-47]. Les processus MMP sont synthétisés à partir des variations du canal et du trafic caractérisées par un profil de fonction de répartition CDF et un profil de spectre de puissance PSD. Les statistiques de premier et de deuxième ordre sont capturées à travers des mesures en ligne. A partir de ce modèle MMP, le spectre de puissance PSD peut être construit grâce à une formule analytique. Le trafic est modélisé par n sources MMP identiques, identiquement distribuées, à deux états (sources tout ou rien). Chaque période d'activité (ON) consiste en la génération d'un message constitué d'un certain nombre de cellules produites à un taux poissonnien. Avec ces modèles markoviens MMP pour les processus du canal et d'arrivée du trafic, la solution en régime permanent du problème de file d'attente est donnée par l'algorithme de Folding [52]. Il existe d'autres modèles de trafic qui permettent de déterminer le spectre de puissance. Dans [12] par exemple, les sources voix sont modélisées par un processus MMDP (*Markov-Modulated Deterministic Process*) à deux états, les sources vidéo par un processus de naissance et de mort MMPP (*Markov-Modulated Poisson Process*), et les sources de données par un processus de Poisson.

5 CARACTERISATION STATISTIQUE DES SALVES D'ERREUR

5.1 CARACTERISATION PAR LA DISTRIBUTION DE CONTAGION DE NEYMAN-A

Une approche simple consiste à réduire la description statistique d'une salve d'erreur à deux valeurs moyennes :

- La longueur moyenne des salves ;
- Le nombre d'erreurs moyen dans les salves.

Dans cette perspective, la distribution de « contagion » de Neyman-A est habituellement utilisée [38,60]. Les hypothèses sous-jacentes à ce modèle sont les suivantes :

- 1) Une salve est un événement discret dans le temps défini par sa durée (en nombre de bits) et la distribution des erreurs.
- 2) Le nombre de salves dans un long intervalle d'observation T est distribué suivant une loi de Poisson de moyenne λT .
- 3) Le nombre d'erreurs dans une salve est distribué suivant une loi de Poisson de moyenne α .
- 4) Le temps d'observation est supposé long. Dans le cas contraire, il est fait l'hypothèse d'une seule salve dans l'intervalle d'observation et la probabilité d'avoir un nombre donné de bits en erreur se calcule par l'intermédiaire

de la probabilité d'avoir une salve dans l'intervalle d'observation et de la distribution des erreurs dans les intervalles adjacents.

Il est à noter que, dans le cas de SAGAM, c'est le codage concaténé du DVB-S avec entrelaceur-désentrelaceur qui est utilisé et non pas le codage convolutionnel seul. Il peut donc être fait l'hypothèse d'erreurs aléatoires en sortie du désentrelaceur. Ainsi une caractérisation statistique fine des erreurs en sortie du décodeur de Viterbi n'est pas indispensable.

5.2 CARACTERISATION PAR LA FONCTION DE TRANSFERT

Le décodeur de Viterbi employé dans le canal satellitaire génère des erreurs en salve et leur profil dépend des paramètres du code. La caractérisation statistique des profils de salve (taille et temps d'inter arrivée) peut s'obtenir à l'aide du diagramme en treillis en sortie du décodeur, faisant intervenir le concept de fonction de transfert (Viterbi) du code convolutionnel, et d'un algorithme collectant systématiquement tous les motifs de salve associés à une séquence codée admissible définie par une distance de Hamming donnée [38,54].

La fonction de transfert d'un code convolutionnel s'exprime de la façon suivante :

$$T(W, N, L) = \sum_{w=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{l=1}^{+\infty} \alpha_{wnl} \times W^w N^n L^l$$

Équation 133 : Fonction de transfert d'un code convolutionnel

où les exposants des variables W , N et L sont respectivement le poids de Hamming du mot de code, la longueur et le nombre de bits erronés de la séquence en sortie du décodeur de Viterbi.

Le CCITT définit une salve comme un groupe de bits dans lequel deux bits erronés consécutifs sont toujours séparés par au moins un nombre donné X de bits corrects, quantité dénommée BLC (*Burst Length Criterion*). Une salve est toujours spécifiée avec une valeur X du BLC.

La longueur moyenne \bar{B} des salves pour un code donné est définie par :

$$\bar{B} = \frac{\text{Longueur totale de toutes les salves}}{\text{Nombre total de salves}}$$

Équation 134 : Longueur moyenne des salves

Le comportement asymptotique de \bar{B} à rapport signal sur bruit élevé est déterminé par la distribution des salves de longueur l produites par les mots de code de poids minimal. La valeur limite de \bar{B} est donnée par :

$$\bar{B}_{w(\min)} = \frac{\sum_{l=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} l \alpha_{w(\min)nl}}{\sum_{l=1}^{+\infty} \sum_{n=1}^{+\infty} \alpha_{w(\min)nl}}$$

Équation 135 : Valeur minimale de la longueur moyenne des salves

[54] donne un tableau permettant de déterminer $\bar{B}_{w(\min)}$ en fonction de l pour le code convolutionnel $K=7, 1/2$. Une distribution géométrique est proposée pour la longueur l des salves d'erreur :

$$p_l(l) = \frac{1}{\bar{B}} \left(1 - \frac{1}{\bar{B}}\right)^{l-1}$$

Équation 136 : Distribution géométrique de la longueur des salves

La probabilité d'avoir une longueur l de salve qui dépasse une valeur L fixée est donnée par :

$$P[l > L] = \left(1 - \frac{1}{\bar{B}}\right)^L$$

Équation 137 : Probabilité d'avoir une longueur de salve supérieure à une valeur donnée

Ces deux distributions sont valables pour un rapport signal sur bruit relativement faible.

La densité moyenne d'erreurs dans une salve de longueur l bits est définie par :

$$\theta(l) = \frac{\text{Nombre total d'erreurs dans des salves de longueur } l}{\text{Longueur totale de salves de longueur } l}$$

Équation 138 : Densité moyenne d'erreurs dans une salve de longueur l bits

- Pour un rapport signal sur bruit E_b/N_0 faible, la densité moyenne d'erreurs $\theta(l)$ dans un événement de longueur l peut s'exprimer par :

$$\theta(l) = \begin{cases} l & \text{si } l = 1 \\ \frac{l+2}{2l} & \text{si } l > 1 \end{cases}$$

Équation 139 : Densité moyenne d'erreurs à rapport signal sur bruit faible

- Pour E_b/N_0 suffisamment élevé, seuls les mots de code de poids minimal interviennent et $\theta(l)$ doit se calculer au moyen de la formule suivante :

$$\theta(l) = \frac{\sum_n n \alpha_{w(\min)nl}}{l \sum_n \alpha_{w(\min)nl}}$$

Équation 140 : Densité moyenne d'erreurs à rapport signal sur bruit suffisamment élevé

Enfin, la densité moyenne $\bar{\theta}$ d'erreurs dans toutes les salves est définie par :

$$\bar{\theta} = \frac{\text{Nombre total d'erreurs}}{\text{Longueur totale de toutes les salves}}$$

Équation 141 : Définition de la densité moyenne d'erreurs dans les salves

qui s'exprime de la façon suivante :

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_l l p_l(l) \theta(l)}{\sum_l l p_l(l)}$$

Équation 142 : Expression de la densité moyenne d'erreurs dans les salves

ce qui conduit à :

$$\bar{\theta} = \frac{\frac{1}{B} + \sum_{l=2}^{+\infty} \left[\frac{1}{B} \left(1 - \frac{1}{B}\right)^{l-1} \cdot \frac{l+2}{2} \right]}{\sum_{l=1}^{+\infty} \left[l \cdot \frac{1}{B} \left(1 - \frac{1}{B}\right)^{l-1} \right]}$$

Équation 143 : Expression développée de la densité moyenne d'erreurs dans les salves

Cette méthode conduit à une forte complexité analytique et théorique et elle présente le défaut d'être très dépendante du type de codage utilisé. Des expérimentations ou des simulations peuvent alors être utilisées de façon alternative comme dans [59].

6 TEB EN SORTIE DU DECODEUR REED-SOLOMON

L'entrelacement effectué dans SAGAM est suffisamment long (profondeur de 12) pour autoriser l'hypothèse que les erreurs en sortie du désentrelaceur sont distribuées uniformément (erreurs dites aléatoires). Pour le code RS(204,188, T=8) utilisé en voie descendante, les trames comportant plus de 8 octets erronés (capacité de correction du code Reed-Solomon) sont considérées comme erronées. En approximant le TEB en sortie du décodeur Reed-Solomon par la borne de l'union, la formule analytique classiquement utilisée suivante est obtenue [9,10,23] :

$$\begin{aligned}
 TEB_{RS,r}(\gamma) &= \sum_{i=T+1}^N \frac{i}{N \times N_{bps}} C_N^i P_{s_rs,r}^i (1 - P_{s_rs,r})^{N-i} \\
 &= \sum_{i=T+1}^N \frac{i}{N \times N_{bps}} C_N^i \left(1 - (1 - TEB_{vit,r})^{N_{bps}}\right)^i (1 - TEB_{vit,r})^{(N-i)N_{bps}} \\
 &= T_{CC,r}(\gamma)
 \end{aligned}$$

Équation 144 : Borne de l'union du TEB en sortie du décodeur RS

avec: $P_{s_rs,r} = 1 - (1 - TEB_{vit,r})^{N_{bps}}$ où $N_{bps} = \frac{\log(N+1)}{\log 2}$ est le nombre de bits effectif, et :

$N = 204$ octets : longueur du bloc codé RS

$K = 188$ octets : longueur du message non codé

$T = 8$ octets : capacité de correction du code RS.

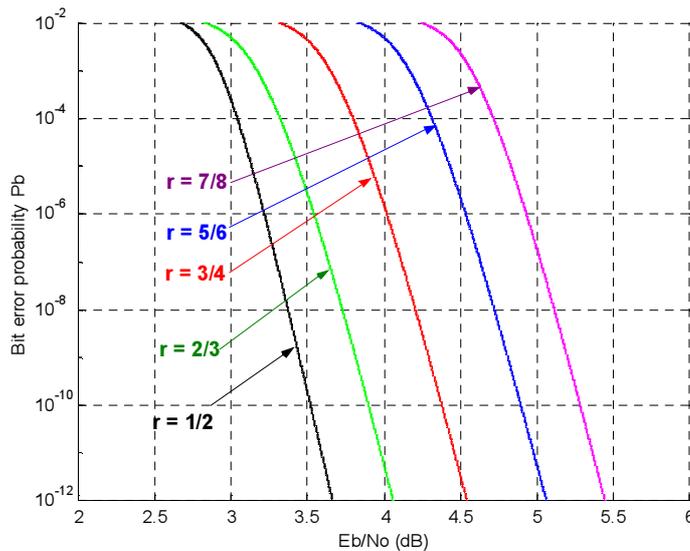


Figure 147 : TEB en sortie du décodeur Reed-Solomon RS(208,188,8) pour un code DVB-S

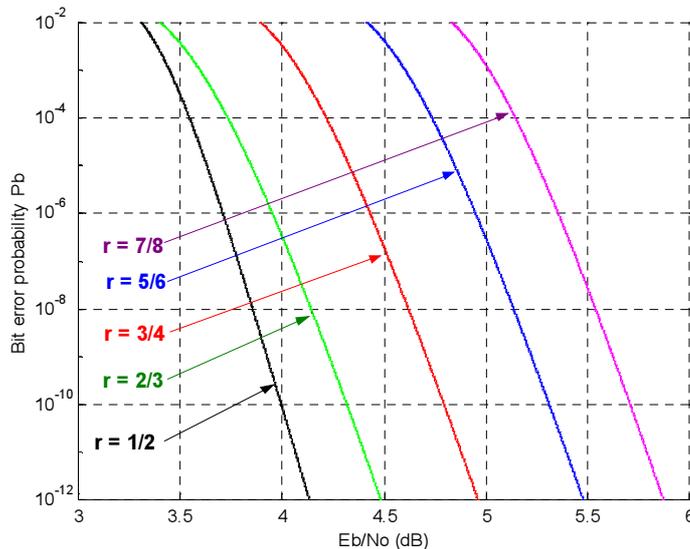


Figure 148 : TEB en sortie du décodeur Reed-Solomon RS(69,53,8) pour un codage concaténé DVB-RCS

La fonction $T_{CC,r}$ est bijective. La fonction $T_{CC,r}^{-1}$ existe mais son expression analytique n'est pas disponible. Les valeurs de $T_{CC,r}^{-1}(\varepsilon_b)$ sont par conséquent calculées par résolution numérique de l'équation d'inconnue x :

$$T_{CC,r}(x) - \varepsilon_b = 0$$

Équation 145 : Equation permettant d'obtenir la valeur de $T_{CC,r}^{-1}(\varepsilon_b)$

Pour un taux de codage convolusionnel r , il peut être écrit d'après la propriété 1 de transformation des fonctions de distribution énoncée en §2.3.4 :

$$P[TEB_r < \varepsilon_b] = P_{\gamma_{dB}}(T_{CC,r}^{-1}(\varepsilon_b))$$

(Équation 146)

où $P_{\gamma_{dB}}$ est la fonction de distribution du rapport signal sur bruit E_b/N_o exprimé en dB (γ_{dB}).

Cette relation importante permet ainsi d'obtenir la distribution statistique du TEB à partir de la distribution du rapport signal sur bruit.

7 PROBABILITE DE PERTE DE CELLULES ATM (CLR) DANS LE CAS D'ERREURS ALEATOIRES

Les taux (ou probabilité) de pertes de cellules sont définies pour une des liaisons montante et descendante et, étant donnée l'architecture régénérative du satellite, ne dépendent chacune que de la dynamique du canal sur la voie considérée (montante ou descendante).

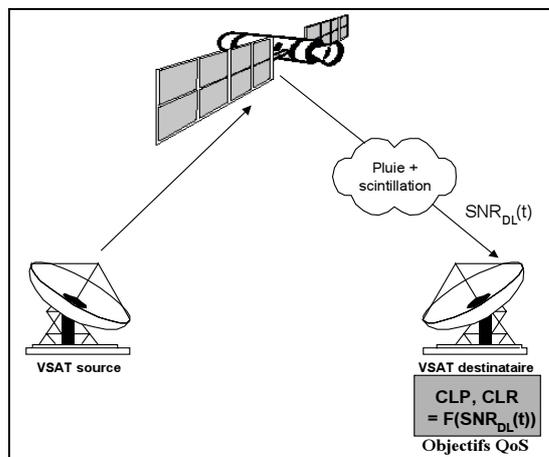


Figure 149 : Impact du canal sur les performances QoS de bout à bout

La méthodologie qui permet de convertir une série temporelle d'affaiblissement tout d'abord en série temporelle de E_b/N_o puis en probabilité de perte de cellules ATM (CLP ou CLR) et enfin en taux d'erreur de paquets IP (PER) est détaillée ci-après.

Selon la recommandation I.432 du CCITT [188], le rejet des cellules ATM en réception fonctionne suivant le principe de la machine à deux états du mécanisme de détection/correction HEC des erreurs dans l'en-tête des cellules [9,58] :

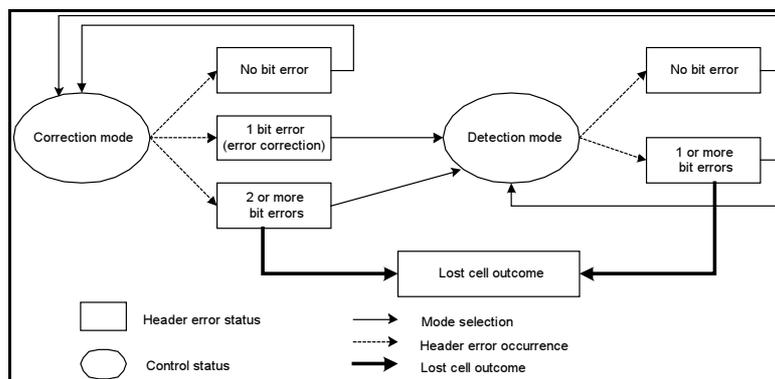


Figure 150 : Machine d'état du mécanisme HEC de l'ATM

Le code correcteur HEC sur 1 octet est employé pour la détection/correction des erreurs de bit dans l'en-tête des cellules ATM. Ce code est capable de détecter plusieurs erreurs et d'en corriger une. Il existe deux causes principales de perte de cellules ATM [9] :

- (a) Arrivée de deux cellules consécutives avec chacune un en-tête comportant un bit erroné.
- (b) Arrivée d'une seule cellule avec un en-tête comportant deux bits erronés.

En négligeant les faibles probabilités (probabilités d'observer plus de deux bits erronés dans l'en-tête), la probabilité CLP de perte de cellules peut alors s'exprimer par la formule approximative suivante :

$$CLP = P[1 \text{ bit erroné dans l'en - tête}]^2 + P[2 \text{ bits erronés dans l'en - tête}]$$

Équation 147 : Expression générique de la probabilité de perte de cellules

Or :

$$\begin{aligned} P[1 \text{ bit erroné dans l'en - tête}] &= C_{40}^1 \times TEB \times (1 - TEB)^{39} \\ &= 40TEB(1 - 39TEB + \dots) \\ &\approx 40TEB - 1560(TEB)^2 \\ P[2 \text{ bits erronés dans l'en - tête}] &= C_{40}^2 (TEB)^2 \times (1 - TEB)^{38} \\ &= 780(TEB)^2 (1 - 38TEB + \dots) \\ &\approx 780(TEB)^2 \end{aligned}$$

ce qui amène donc à :

$$CLP \approx 2380 \times TEB^2$$

Équation 148 : Expression du CLP en fonction du TEB

Ces approximations sont valables pour un TEB inférieur à 10^{-3} .

Le même résultat peut être obtenu d'une façon plus rigoureuse en se servant de la machine d'état [9].

Soient les notations :

- $P_c[i]$: probabilité que le récepteur soit dans le mode correction à l'arrivée de la cellule ATM i ;
- $P_d[i]$: probabilité que le récepteur soit dans le mode détection à l'arrivée de la cellule ATM i ;
- $P[e > k]$: probabilité que la cellule i ait plus de k erreurs de bit dans son en-tête ;
- $P[e = k]$: probabilité que la cellule i ait exactement k erreurs de bit dans son en-tête.

Il est possible d'écrire :

$$CLP = P_c[i] \cdot P[e > 1] + P_d[i] \cdot P[e > 0]$$

Équation 149 : Autre expression générique de la probabilité de perte de cellules

avec :

$$\begin{cases} P_c[i] = P_c[i-1] \cdot P[e = 0] + P_d[i-1] \cdot P[e = 0] \\ P_d[i] = P_c[i-1] \cdot P[e > 0] + P_d[i-1] \cdot P[e > 0] \\ P_c[i] = P[e = 0] \\ P_c[i] + P_d[i] = 1 \\ P[e > 0] = 1 - P[e = 0] \\ P[e > 1] = 1 - P[e = 0] - P[e = 1] \end{cases}$$

Équations 150

Il en résulte successivement :

$$\begin{aligned} P_d[i] &= P[e > 0] = 1 - P[e = 0] \\ CLP &= P[e = 0] \cdot P[e > 1] + (1 - P[e = 0]) \cdot P[e > 0] \\ CLP &= 1 - P_0 - P_0 \cdot P_1 \end{aligned}$$

Équations 151

où :

$$\begin{cases} P_0 = P[e = 0] = (1 - TEB)^{40} \\ P_1 = P[e = 1] = C_{40}^1 TEB (1 - TEB)^{39} \end{cases}$$

Équations 152

pour un profil d'erreur aléatoire (comme pour le DVB-S ou DVB-RCS).

8 DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DE PARAMETRES QOS DANS LE CAS DU TURBO-CODE DVB-RCS 2/3 EN LIAISON MONTANTE

Le projet SAGAM envisageait une deuxième forme d'onde, représentée par un turbo-code conforme aux spécifications du DVB-RCS, de taux de codage 2/3. Bien que cette forme d'onde n'ait pas été utilisée dans cette thèse, quelques résultats sont donnés ci-après à titre de comparaison avec une forme d'onde concaténée.

En raison de l'absence d'expressions analytiques aisément manipulables pour le TEB en sortie d'un turbo-décodeur, la courbe du taux d'erreur de trame FER (*Frame Error Rate*) en fonction du rapport E_b/N_o , réalisée par simulation par la société Turbo-Concept, pour des paquets ATM de 53 octets, est employée. Cette courbe ne fournit que 7 sept points.

Pour obtenir à partir du taux d'erreur de trame le taux d'erreur de bit (TEB), il suffit de noter que la probabilité qu'une trame ne soit pas erronée est égale à la probabilité qu'aucun des bits (de la charge utile) de la trame ne soit erroné. En supposant qu'il n'y a pas de corrélation entre les différents bits (ce qui n'est vrai que dans un système sans codage en réalité), et que chaque trame possède $nbBit$ bits de charge utile, il vient tout simplement :

$$1 - FER = \underbrace{(1 - TEB) \times (1 - TEB) \times \dots \times (1 - TEB)}_{nbBit \text{ facteurs}}$$

Équation 153 : Relation entre le taux d'erreur de trame et le taux d'erreur de bit

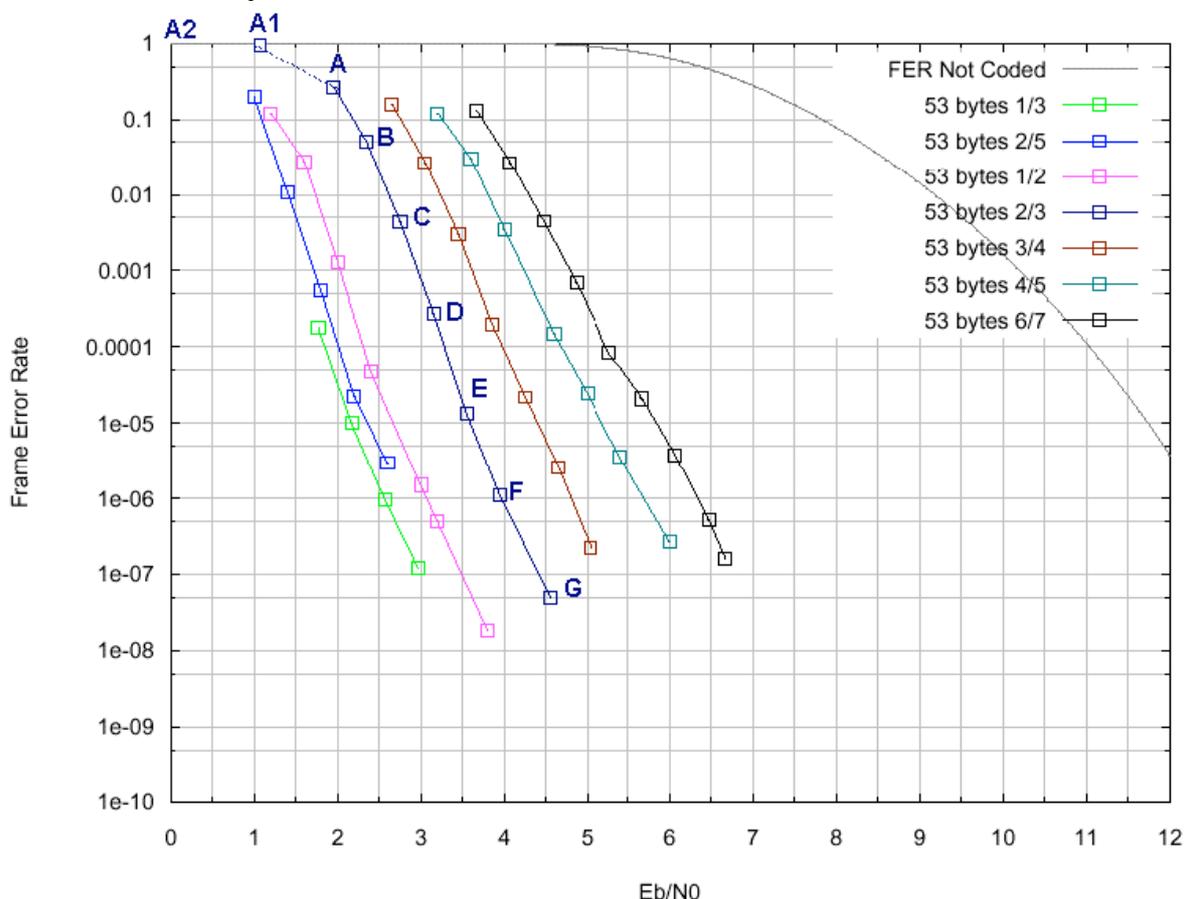


Figure 151 : Mesures du taux d'erreur de trame effectuées par la société Turbo-Concept

Les courbes ci-dessus ont été obtenues pour des trames de longueur 53 octets, ce qui correspond donc à des cellules ATM complètes. Seuls les bits de la charge utile doivent être pris en compte, soit $nbBit = 48 \times 8 = 384$ bits.

	A	B	C	D	E	F	G
E_b/N_o	1.9 dB	2.35 dB	2.75 dB	3.15 dB	3.55 dB	3.9 dB	4.55 dB
FER	0.25	5×10^{-2}	4×10^{-3}	2.3×10^{-4}	1.3×10^{-5}	1.2×10^{-6}	5×10^{-8}
TEB	7.5×10^{-4}	1.34×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-7}	3.4×10^{-8}	3.1×10^{-9}	1.3×10^{-10}

Tableau 50 : Points de mesure de FER et de TEB pour le turbo-code DVB-RCS 2/3

Chaque segment de droite entre 2 points consécutifs du tableau 50 est approximé par une droite logarithmique obtenue par régression linéaire, ce qui permet d'aboutir à une caractéristique logarithmique affine par morceaux $\log T_{TC2/3,ul}(\gamma_{dB})$ du TEB en fonction de E_b/N_o :

$$\log T_{TC2/3,ul}(\gamma_{dB}) = \log TEB \left(\left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{dB} \right) = a_i \times \left(\frac{E_b}{N_o} \right)_{dB} + b_i \text{ entre 2 points consécutifs } M_i$$

Équation 154 : Approximation par régression linéaire des segments de droite de la courbe du TEB en sortie du turbo-décodeur

On obtient les valeurs rassemblées dans le tableau ci-dessous :

	A1-A2	A1-A	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	F-G
a_i	0	-3.472154152	-1.662125478	-2.817761996	-3.054621874	-3.116680833	-2.971763495	-2.119105141
b_i	0	3.4721541518	0.0330996713	2.7488454888	3.4002101536	3.5956958754	3.0812393239	-0.244128257

Tableau 51 : Coefficients de régression linéaire de la fonction du TEB du turbo-code DVB-RCS 2/3

En utilisant cette approximation et en appliquant la méthodologie de conversion des distributions du canal en distributions de paramètres QoS telle que présentée en §2.3.4, les distributions du TEB, du taux de perte de cellules CLP et du taux d'erreur de paquets PER_{FEC} (composante due exclusivement au dépassement de la capacité de correction des codes correcteurs d'erreur) ont pu être obtenues et sont représentées sur les figures 153, 154 et 155 respectivement.

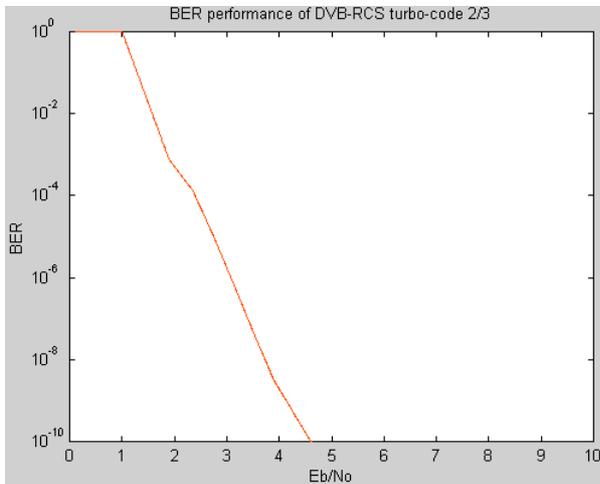


Figure 152 : Performance typique de TEB d'un turbo-code de taux de codage DVB-RCS 2/3 dans une approximation par régression linéaire par paliers successifs d'après des résultats de mesures de taux d'erreur de trame

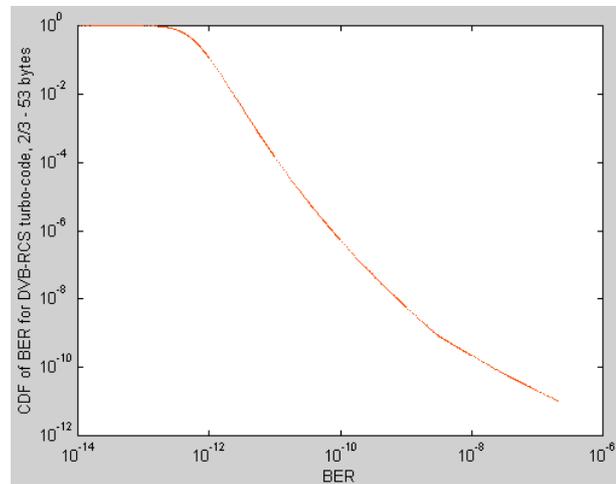


Figure 153 : Distribution du TEB pour le turbo-code 2/3 DVB-RCS prenant en compte l'influence du canal de propagation, en liaison montante, pour $(E_b/N_o)_0=5.7$ dB, $m = -2.0344$, $\sigma = 1.2146$, $\sigma_m = 0.12168$ et $\sigma_\sigma = 0.527429$

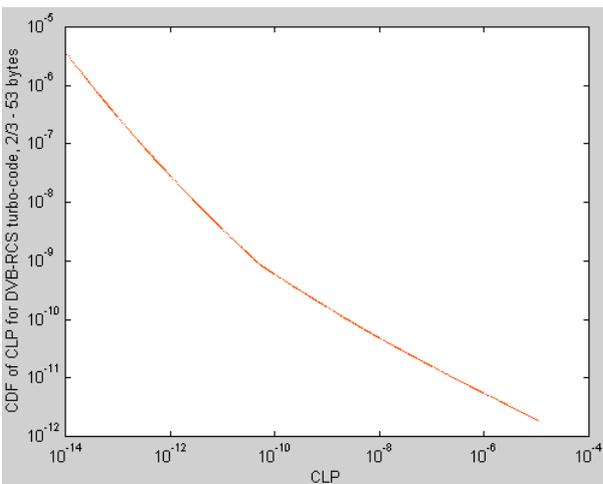


Figure 154 : Distribution du CLP pour le turbo-code DVB-RCS 2/3 prenant en compte l'influence du canal de propagation, en liaison montante pour $(E_b/N_o)_0=5.7$ dB, $m = -2.0344$, $\sigma = 1.2146$, $\sigma_m = 0.12168$ et $\sigma_\sigma = 0.527429$

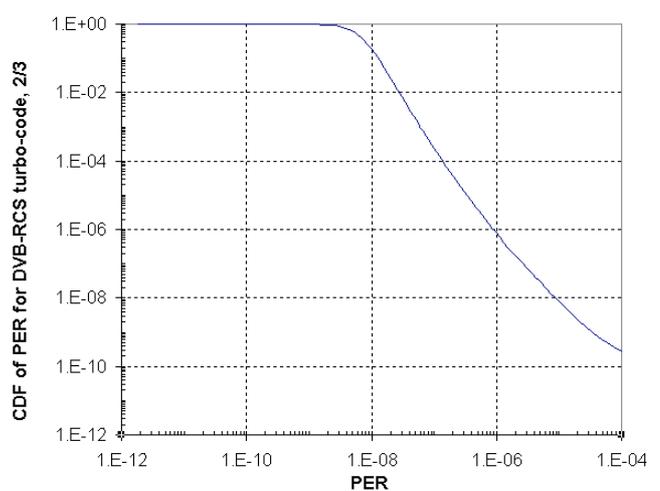


Figure 155 : Distribution de PER_{FEC} pour le turbo-code DVB-RCS 2/3, avec prise en compte de l'influence du canal de propagation pour $(E_b/N_o)_0=5.7$ dB, $m = -2.0344$, $\sigma = 1.2146$, $\sigma_m = 0.12168$ et $\sigma_\sigma = 0.527429$

9 MISE EN ŒUVRE DU CAC PREDICTIF DE TYPE RCCT ADAPTE A SAGAM

Cette section propose une mise en œuvre dans OPNET de la variante RCCT de l'algorithme CAC basé sur la Courbe de Limite d'Admission (ALC), adaptée au cas multi-classe, telle que présentée dans la section §4.5.7.

9.1 CONFIGURATIONS DE SIMULATION

Le CAC utilisant des informations issues de modules OPNET opérant à des niveaux différents (couche physique, couche accès, niveau appel, etc.), toute mise en œuvre réussie de ce CAC réclame un découpage des simulations en deux étapes essentielles.

9.1.1 CAC étalon fictif sur une liaison montante unique

Dans un premier temps, il est nécessaire de conserver l'architecture originale du CAC RCCT pour valider son fonctionnement et retrouver ses performances déjà connues, qui ont été présentées par Siwko et Rubin. Dans cette perspective, il s'agira de se placer volontairement dans une configuration mono-classe, c'est-à-dire ne faisant usage que d'un seul type d'appels, et avec une seule liaison montante (une seule station étudiée) afin de disposer d'événements de réduction de capacité qui vérifient l'hypothèse (*HYP4*) énoncée en §4.5.7.3.2. Dans cette configuration où une seule liaison est étudiée, une expression analytique, éventuellement approximée, de la distribution $G_T(T)$ des instants de réduction de capacité, devrait pouvoir être trouvée en considérant des distributions des durées d'affaiblissement et d'inter-affaiblissement, mais le problème théorique n'est a priori ni aisé, ni immédiat. Cette distribution $G_T(T)$ intervient dans le calcul à l'instant t de la probabilité de rejet à T d'une connexion arrivant à t . Dans cette configuration, il n'est donc pas nécessaire de recourir à une fonction de filtrage des instants de réduction de capacité (cf. : §4.5.7.3).

9.1.2 Approximation d'un CAC réel pour une architecture multi-station

Une fois l'étape précédente effectuée, il convient de mettre en œuvre l'extension multi-classe du CAC RCCT telle que décrite dans la section §4.5.7.3. Dans ce cas de figure, une fonction de filtrage des instants de réduction de capacité doit nécessairement être activée pour les raisons évoquées dans cette même section.

Le point central de l'algorithme RCCT consiste à déterminer la distribution $G_T(T)$ des instants de réduction de capacité pouvant survenir sur toutes les liaisons montantes, ainsi que la distribution $C_T(c) = P[C < c|T]$ associée de la quantité de capacité C impliquée. Le processus d'occurrence de tous les instants possibles de réduction de capacité correspond ici à une agrégation de n processus d'occurrence d'instants de réduction de capacité, dont certains peuvent présenter une certaine forme de corrélation mutuelle issue de la variabilité spatiale des cellules de pluie. En tout état de cause, cette agrégation de n distributions G_{T_i} ne semble pas facile à obtenir analytiquement, et ce pour les raisons suivantes :

- ✓ Plusieurs liaisons montantes sont vues comme "multiplexées", mais le nombre de ces liaisons est une variable stochastique, suivant l'état d'activité ou de transmission des stations dans le réseau.
- ✓ La distribution agrégée $G_T(T)$ dépend de la localisation géographique du faisceau, qui détermine les conditions météorologiques rencontrées en termes de précipitations.
- ✓ Elle dépend aussi des caractéristiques propres des événements de pluie subis (pluie stratiforme ou pluie convective, intensité de l'affaiblissement, durée, etc.).
- ✓ Elle dépend également de la variabilité spatiale des cellules de pluie, et à l'évidence, des positions géographiques individuelles et relatives des différentes stations à l'intérieur du même faisceau.
- ✓ Elle dépend enfin des profils des évolutions individuelles de l'atténuation sur les liaisons montantes.

Il n'apparaît donc pas approprié ici de chercher un modèle analytique de cette distribution. Une solutions alternative, plus simple et plus rapide à mettre en œuvre est proposée : plusieurs types de distribution $G_T(T)$ de référence (exponentielles, hyper-exponentielles, etc.) seront utilisés, en affinant leurs paramètres de telle sorte que l'hypothèse (*HYP4*) soit encore vérifiée, et que la distribution rende bien compte des réalisations empiriques des instants de réduction générés par le module d'émulation météorologique.

9.2 ARCHITECTURE DU CAC RCCT

L'extension multi-classe la plus rapide de l'algorithmique mathématique du CAC RCCT consiste à considérer une architecture constituée de n CAC parallèles tous de type RCCT chacun opérant sur une classe particulière de connexions, les classes étant ici tout simplement les catégories de service ATM, ce qui rendra les connexions homogènes pour chaque classe.

9.3 DESCRIPTION DES ALGORITHMES

9.3.1 Estimation de l'instant futur de changement de capacité

Du point de vue algorithmique, la connaissance de la valeur estimée \hat{T} de l'instant futur T de réduction de capacité n'est nécessaire à aucun moment, car seule la connaissance de la distribution de T est requise par l'équation de contrôle d'admission. La réalisation pratique de la stratégie RCCT suppose toutefois que le CAC est prévenu de l'occurrence d'un changement de capacité au plus tard τ secondes avant l'événement, ce qui implique que le système doit être capable de prédire suffisamment à l'avance les instants de réduction de capacité. Dans un système réel, le CAC devra donc être en mesure, à l'instant d'arrivée d'une nouvelle connexion, d'estimer T . Une telle estimation pourra être réalisée par exemple en utilisant des statistiques des durées d'affaiblissement.

9.3.2 Classification des connexions suivant les classes de service ATM

Le processeur de classification des appels reçus par le module CAC se charge de diriger les appels entrants vers les bons sous-CAC CAC_i suivant les classes de service auxquelles ils appartiennent :

- MTC_1 : catégorie de service CBR
- MTC_2 : catégorie de service rt-VBR
- MTC_3 : catégorie de service nrt-VBR
- MTC_4 : catégorie de service ABR
- MTC_5 : catégorie de service UBR

et l'ordre de priorité classique suivant sera considéré : CBR > rt-VBR > nrt-VBR > ABR > UBR.

Le processeur de classification met également à jour des compteurs n_1, n_2, \dots, n_5 effectuant le comptage des appels de chaque classe qui arrivent.

9.3.3 Processeur central de calcul de capacité

9.3.3.1 Modes de calcul de la capacité

Trois types de capacité doivent être calculés par le processeur central :

- $n(t)$ ou la dimension du système à t^- , juste avant l'arrivée d'une nouvelle connexion a en t , cette dimension étant ramenée à une valeur de capacité (en kbit/s) ;
- C_0 ou la capacité maximale du système à t^- .
- C_1 ou la capacité maximale du système à $T^+ > t$, juste après la réduction de capacité.

D'emblée, il est notoire que quatre modes distincts de calcul de ces capacités existent, donnant lieu à des valeurs nécessairement différentes, ce qui pourrait en définitive avoir un impact plus ou moins sensible sur les performances globales du système. Ces modes de calcul sont les suivants :

1. **Mode de calcul réel** : les valeurs des capacités sont représentatives des ressources *réellement* disponibles ou utilisées dans le système. Dans ce mode, les capacités sont calculées naturellement d'après les modes FMT effectivement assignés par le DAMA.
2. **Mode de calcul estimé** : les valeurs des capacités ne sont plus le reflet de la réalité des ressources réelles disponibles ou utilisées dans le système, mais le processeur, pour effectuer ses calculs, se base sur les modes FMT requis par le canal, avant assignation par le DAMA, ce qui constitue uniquement une estimation du besoin exprimé par la couche physique. Par conséquent, il y aura une marge d'erreur $\varepsilon_{est} = |\text{capacité}_{\text{réel}} - \text{capacité}_{\text{estimé}}|$ entre la valeur réelle et la valeur estimée de la capacité.

3. **Mode de calcul à la hausse** : les valeurs des capacités sont ici systématiquement ramenées à la hausse, en considérant dans les calculs que le mode FMT en temps clair est utilisé par défaut. Les résultats donnés par ce mode de calcul sont affectés d'une erreur ε_{\max} par rapport aux valeurs obtenues par le mode de calcul réel, avec $\varepsilon_{\max} = |\text{capacité}_{\text{hausse}} - \text{capacité}_{\text{réel}}| \geq \varepsilon_{\text{est}}$ à l'évidence.
4. **Mode de calcul à la baisse** : cette fois, les valeurs des capacités sont ramenées à la baisse, en considérant que la commutation de mode FMT a systématiquement lieu vers le mode le plus dégradé. Ce mode de calcul est caractérisé par une erreur $\varepsilon_{\min} = |\text{capacité}_{\text{baisse}} - \text{capacité}_{\text{réel}}|$.

Le paramètre de réglage `CalculationMode` permet de sélectionner soit le cas normal (`CalculationMode = 0`), soit le cas dit « lâche » (`CalculationMode = 1`) pour lequel le mode de calcul à la hausse est utilisé pour C_0 , et le mode de calcul à la baisse est utilisé pour C_1 . Le paragraphe suivant indique les modes de calcul appropriés aux différentes capacités $n(t)$, C_0 et C_1 dans le cas normal.

9.3.3.2 Calcul de la dimension du système et des capacités C_0 et C_1

Dans le cas normal (par défaut) – `CalculationMode = 0` –, le processeur central calcule les capacités (toutes exprimées en kbit/s) de la façon suivante :

- La dimension $n(t)$ du système à t^- est calculée en utilisant les modes FMT effectivement alloués par le DAMA aux connexions actives enregistrées dans la liste des appels.
- La fonction « processeur central » calcule la capacité disponible maximale C_0 dans le système pour le CAC à l'instant courant t , qui est donnée exactement par la capacité résiduelle C_r après allocation fournie par le DAMA. La capacité C_0 est mise à jour en temps réel en utilisant les informations de la liste des appels acceptés, la liste des appels rejetés ainsi que le FCR qui renseigne sur l'allocation des créneaux et des modes FMT effectivement attribués par le DAMA.
- La fonction calcule également la valeur C_1 - à l'arrivée d'un nouvel appel à t dans un des 5 sous-CAC CAC_i - de la capacité maximale disponible à l'instant T juste après la réduction de capacité. L'estimation de la capacité C_1 doit être réalisée à partir de la connaissance des modes FMT requis par l'état du canal affectés fictivement aux appels entrants, et non des modes FMT réellement affectés par le DAMA, contrairement à C_0 . L'estimation de la capacité C_1 nécessite l'emploi d'une distribution de capacité agrégée associée à une distribution d'instant de réduction de capacité agrégés sur toutes les liaisons montantes.

9.3.4 Superposition des connexions d'une même classe

L'ensemble des M_i , $1 \leq i \leq 5$ différents processus d'arrivée d'appels d'une même classe MTC_i est considéré comme une unique connexion agrégée formée de la superposition de ces M_i processus distincts. La fonction de distribution résultante des durées de connexion a été donnée en §4.5.7.3.3. Tout au long des simulations, il est fait l'hypothèse que le nombre de stations dans le réseau reste fixe, et que par conséquent les nombres M_i sont constants.

9.3.5 Sous-processeurs d'admission

Chacun des 5 sous-processeur virtuels d'admission CAC_i , $1 \leq i \leq 5$ déploie la stratégie RCCT mono-classe décrite dans la section §4.5.7.2. Les mêmes notations que celles définies en §4.5.7.2 sont utilisées, indexées de l'indice i indiquant que le sous-CAC CAC_i ne s'applique que sur le sous-ensemble $N_i(t)$ de $N(t)$ de toutes les connexions actives à l'instant t appartenant à la classe de service MTC_i . En particulier, $\hat{N}_i(t)$ désignera l'union de $N_i(t)$ et de la nouvelle connexion de classe MTC_i arrivant à t .

Seules les réductions de capacité stochastiques dues aux commutations vers les modes FMT dégradés sont détectables en pratique et considérés ici. Les changements de capacité déterministes sont exclus.

De façon pratique, l'algorithme déroulé est le suivant :

Chaque bloc CAC_i déroule son algorithme sur la classe de connexions qui lui est assignée, indépendamment des autres blocs, en prenant comme objectif de probabilité de rejet ε_{idrop} qui est l'objectif garanti pour la classe MTC_i . Le lien qui relie les différents blocs se situe sur le plan suivant : les résultats d'admission et de rejet en sortie de chaque bloc sont utilisés pour calculer en temps réel les capacités maximales disponibles dans le système à la fois à l'instant courant t (C_0) et à l'instant futur T de réduction de capacité (C_1). Ces valeurs de capacité sont des informations exploitées par les sous-blocs CAC_i .

Soit un appel a de classe MTC_i arrivant à l'instant t . Cet appel est pris en charge par le sous-CAC CAC_i . Le sous-CAC connaît la dimension $n_i(t)$ (nombre d'appels actifs appartenant à la classe MTC_i du système à t^- , c'est-à-dire juste avant l'arrivée de l'appel. Il s'agit de la dimension courante convertie en capacité allouée aux connexions (kbit/s) de l'ensemble des appels actifs de la classe de service MTC_i appartenant à la liste de tous les appels actifs. Cette information est calculée à l'aide du FCR qui indique les modes FMT effectivement alloués aux différentes connexions. La capacité utilisée par les appels actifs, à l'évidence même, est calculée sur la base des modes FMT requis par ces connexions et dus à l'état du canal, et non des modes FMT assignés par le DAMA, même si le CAC peut avoir connaissance des modes FMT qui sont effectivement assignés aux connexions par le DAMA.

Le sous-CAC CAC_i calcule alors les probabilités de rejet d'après les équations suivantes :

$$\begin{cases} P_a(t, \hat{N}_i(t), C, L) = 0 & \text{pour } n_i < C_1 \\ P_a(t, \hat{N}_i(t), C, L) = \int_t^{+\infty} \sum_{x=C_1}^{n_i} C_{n_i}^x q_0 q_1^x (1-q_1)^{n_i-x} \frac{g(T)}{1-G(t)} dT = P_{a_drop}(n_i) & \text{pour } n_i \geq C_1 \end{cases}$$

Équation 155

$P_{a_drop}(n_i)$ est calculée pour les valeurs entières successives $n_i = C_1, C_1 + 1, \dots, n_{i\max}$ où $n_{i\max}$ désigne le plus grand entier $n_i \geq C_1$ tel que la probabilité de rejet de la connexion a calculée en t soit inférieure à ε_{idrop} .

La nouvelle connexion a est admise si et seulement si : $n_i(t) \leq \min(n_{i\max}, C_0 - c_i)$ où c_i désigne l'unité de capacité (en kbit/s) correspondant à une connexion de classe MTC_i affectée du mode FMT en air clair.

Si l'appel a est admis, il est stocké immédiatement dans la liste des appels admis, avec tous ses attributs. Le stockage dans la liste des appels actifs se fait suivant l'ordre d'arrivée des appels.

9.3.6 Processeur de rejet

A chaque interruption signalant une variation de la capacité, s'il s'agit d'une variation à la baisse, le processeur de rejet est initié, sinon la procédure de rejet est court-circuitée lorsque survient une augmentation de la capacité. Elle ne sera de nouveau activée qu'au prochain instant de réduction de capacité.

Chaque fois que le CAC reçoit un FCR issu du DAMA, il est en mesure de calculer la capacité disponible réelle suite aux véritables assignations des modes FMT aux différentes connexions admises précédemment. S'il s'avère, juste après une réduction de capacité, que cette capacité n'est pas suffisante pour servir les connexions actives en cours, contrairement à l'évaluation du CAC (qui utilise les modes FMT requis par le canal pour calculer la capacité maximale disponible C_0 à l'instant d'arrivée t d'une connexion nouvelle), une procédure de rejet de certaines connexions actives est enclenchée.

Sur toute la durée de la simulation, le processeur de rejet comptabilise les nombres d'appels $n_{1drop}, n_{2drop}, \dots, n_{5drop}$ rejetés pour les classes MTC_i , ce qui permet de calculer les probabilités de rejet P_{idrop} pour ces classes, au moyen de la formule suivante :

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, 5\} P_{idrop} = \frac{n_{idrop}}{n_i} \quad (\text{Équation 156})$$

où n_i est le nombre total d'appels admis de classe MTC_i fourni par le processeur de classification des appels.

La question critique est liée au choix de la stratégie de rejet globale à adopter. Il apparaît clairement, en effet, que la stratégie de rejet opérant au niveau de chaque sous-CAC individuel ne s'apparente plus en définitive à une stratégie LCFD (premier appel arrivé, premier appel rejeté) stricte car, à cause du rejet qui peut avoir lieu sur tous les appels possibles, il n'est plus possible d'actionner des procédures de rejet par classe de façon indépendante. En effet, quelle que soit la stratégie globale de gestion des rejets pour tous les sous-CAC virtuels, un facteur de dépendance mutuelle entre ces sous-CAC est introduit. Par conséquent, il se présente le risque de dénaturer la stratégie RCCT originelle pour

chaque sous-CAC, ce qui signifie qu'il n'y a aucune garantie que les objectifs de probabilité de rejet individuels pour chaque classe de service ATM soient encore satisfaits. Il conviendra donc de mesurer les écarts observés.

La méthodologie la plus simple préconisée consiste à mettre en œuvre et tester plusieurs stratégies de rejet au niveau global tout en respectant la stratégie LCFD pour chaque classe d'appels. Conceptuellement, cela revient à considérer que les appels admis sont rangés dans cinq files d'attente différentes selon leur classe, dans l'ordre inverse de leur arrivée (files d'attente LIFO ou *Last In First Out*), et qu'un certain mécanisme d'ordonnancement des appels à rejeter se charge de gérer les appels à extraire de ces cinq files d'attente.

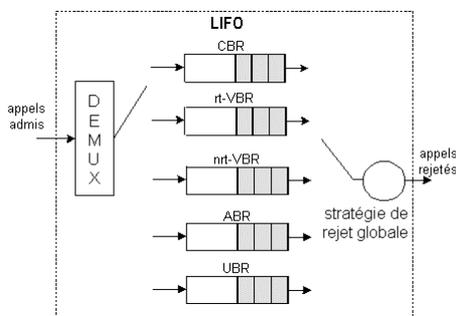


Figure 156 : Schéma de principe d'une stratégie de rejet globale

Il est à noter ici que le résultat en termes de performances n'est pas connu a priori. Les résultats des simulations seront comparés avec les performances théoriques attachées à la stratégie RCCT, attendues pour chaque classe de service.

Plusieurs stratégies de rejet global sont proposées ci-après.

9.3.6.1 Rejet global avec priorité sur les classes de service

A chaque instant de réduction significative de capacité, le vidage des listes d'appels admis s'effectue par ordre de priorité stricte suivant la classe de service des appels avec une priorité des classes ATM en sens inverse de la priorité utilisée par l'ordonnanceur des cellules pour la constitution de la trame montante MF-TDMA : CBR < rt-VBR < nrt-VBR < ABR < UBR. Ceci traduit le fait que l'on veille à rejeter en premier des appels appartenant aux classes de service les moins sensibles à une rupture du contrat de trafic.

Plusieurs méthodes de sélection de la classe de service à considérer peuvent être envisagées :

a. Priorité stricte

Le processus mémorise la classe de service qui doit être traitée. Un jeton est échangé à chaque réduction de capacité de façon circulaire, entre les différentes listes d'attente de chaque classe de service contenant les appels admis.

Par exemple, C_i étant connu ainsi que C_0 , si c'est la classe MTC_i qui détient son tour de passage lors d'une réduction de capacité, le processeur de rejet est capable de calculer le nombre n_i d'appels de cette classe à rejeter pour que le système puisse supporter cette réduction de capacité. Ainsi, le processeur rejettera n_i appels de la liste i en utilisant la stratégie LCFD. A la prochaine réduction globale de capacité, le rejet portera sur la liste d'attente associée à la classe de service $i+1$ si $i \leq 4$, ou la classe 1 si $i = 5$.

Si la nouvelle valeur de C_1 est suffisante pour servir tous les appels présents dans la liste des appels actifs, le processeur de rejet ne procède à aucun rejet.

b. Sélection aléatoire des listes d'attente selon leur classe de service

A chaque liste d'attente associée à la classe MTC_i est affectée une probabilité d'accès par le processeur de rejet,

$\rho_i, 1 \leq i \leq 5$ avec $\sum_{i=1}^5 \rho_i = 1$ et $\rho_1 < \rho_2 < \dots < \rho_5$. Le facteur ρ_i sera d'autant plus petit que la classe de service MTC_i est

sensible à un rejet a posteriori d'une connexion, ce qui revient à réaffirmer ici la priorité : CBR < rt-VBR < nrt-VBR < ABR < UBR. Ainsi, à chaque instant de réduction de capacité significative, une liste d'attente i est choisie avec la probabilité ρ_i , et ainsi le nombre d'appels n_i à rejeter sera calculé en conséquence.

c. Rejets pondérés suivant la priorité des classes de service

Comme dans le cas précédent, des facteurs de probabilité $\rho_i, 1 \leq i \leq 5$ avec $\sum_{i=1}^5 \rho_i = 1$ et $\rho_1 < \rho_2 < \dots < \rho_5$ sont affectés à

chaque classe de service. A chaque instant de réduction de capacité significative, lorsque le processeur de rejet s'aperçoit que la capacité C_1 n'est plus suffisante pour maintenir les appels actifs en cours, il va procéder à un rejet de n_{call} appels qui correspondent à un surplus de capacité de $\Delta C = C_1 - C_0$ (kbit/s). La différence avec la méthode précédente consiste à sélectionner, pour chaque classe de service MTC_i , n_i appels à rejeter qui correspondent aux derniers arrivés. Ces n_i sont calculés de la façon suivante :

$$\begin{cases} n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 = n_{call} \\ n_i^* = \rho_i \cdot n_{call} \\ n_i = \lceil n_i^* \rceil \text{ où } \lceil x \rceil \text{ désigne l'entier le plus proche de } x \text{ par valeurs supérieures.} \end{cases}$$

Équation 157 : Equations donnant les nombres d'appels à rejeter pour chaque classe de service dans la stratégie de rejet suivant la priorité des classes de service

9.3.6.2 Rejet global avec sélection aléatoire de la classe de service

Dans cette option de rejet, à chaque instant de réduction significative de capacité, le processeur de rejet choisit aléatoirement suivant une distribution arbitraire la classe de service à traiter. Lors d'une procédure de rejet, le processeur de rejet rejette alors n_{call} appels appartenant tous à une classe déterminée. Un exemple de distribution statistique utilisable est la distribution uniforme, ce qui revient à éliminer dans ce cas toute priorité d'une classe sur une autre.

9.3.6.3 LCFD avec prise en compte des modes FMT

Dans le cas de figure du système SAGAM étudié, faisant appel à une technique de contre-mesure, le recours à une stratégie de rejet de type LCFD opérant sur des connexions affectées de porteuses de types différents (taux de codage différents), n'est pas cohérent, car de toute évidence, il semble non optimal de rejeter à l'aveuglette des appels affectés de taux de codage distincts. C'est pourquoi, pour moduler la rigidité d'une telle discipline de rejet, il est judicieux de faire intervenir également comme critère de rejet le mode FMT requis des appels.

Dans cette perspective, le processeur de rejet a connaissance quasiment en temps réel des modes FMT effectifs assignés aux différentes connexions ainsi que des modes FMT requis par le canal. Il les exploite afin de mettre ces valeurs dans les champs `FCR_FMTstate` des éléments de la liste des appels admis.

La stratégie de rejet des appels tient compte, outre des instants d'arrivée des appels, des modes FMT qui leur correspondent. Si, au moment du rejet, le CAC a connaissance des modes FMT véritablement assignés par le DAMA aux appels actifs stockés en file d'attente, il utilise ces informations. Sinon, le processeur de rejet utilise les modes FMT estimés d'après la qualité du canal mesurée. Ce sont les appels affectés de modes FMT les plus dégradés et admis en dernier qui sont sélectionnés pour le rejet.

RESUME

La bande Ka pour les communications satellitaires a été l'objet d'un immense intérêt ces dernières années du fait de la congestion des bandes de fréquence conventionnelles. Les concepteurs de systèmes satellitaires se trouvent ainsi confrontés à une double contrainte : la première émane des effets troposphériques importants en bande Ka, notamment une forte atténuation du signal due à la pluie et à la scintillation d'amplitude. Ceci oblige à employer des techniques de contre-mesure (*Fade Mitigation Techniques* ou FMT) pour compenser l'atténuation dans le but d'assurer une disponibilité suffisante au système ; la seconde est directement liée à la nature même du satellite pour lequel les ressources radio et à bord sont limitées et coûteuses. Cette dernière contrainte impose de rendre la gestion des ressources la plus rationnelle, efficace et optimale possible à partager entre les différents utilisateurs, tout en leur assurant les Qualités de Service (QoS) requises.

Les présents travaux de recherche empruntent l'architecture du projet SAGAM initié par le RNRT (*Réseau National de Recherche en Télécoms*) visant à étudier un système de troisième génération d'accès multimédia par satellite régénératif géostationnaire à commutation ATM. Leur contribution spécifique consiste en l'analyse de procédures de gestion des ressources au niveau de la couche accès, en tenant compte des contraintes et modifications d'architecture apportées par l'introduction dans le système d'informations issues du canal et des FMT. Dans une première partie, le contexte et l'architecture SAGAM seront précisés. Ensuite, dans une deuxième partie, la problématique propre à la modélisation du canal Ka sera exposée, et appliquée directement à l'analyse des performances des couches supérieures, avec une description détaillée de plusieurs approches de modélisation possibles. Une troisième partie est dédiée aux problématiques et performances propres à la contre-mesure. La quatrième partie est axée sur la problématique de la gestion des ressources combinée à une FMT à bande variable. Les protocoles MAC de contrôle d'accès aux ressources radio de type DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*) sont premièrement examinés ; ensuite, les propriétés recherchées pour un contrôle d'admission des connexions (CAC) adapté au système décrit sont passées en revue avant la description d'un modèle prédictif de CAC à capacité variable exploitant la connaissance statistique des instants de réduction de capacité dans le système. Une dernière mais nécessaire partie est consacrée entièrement à la description de la plateforme de simulation réseau développée au cours de la thèse, et basée sur le logiciel commercial OPNET[®]. L'aspect innovant de cette plateforme est d'intégrer des informations de propagation, sous la forme à la fois de séries chronologiques d'atténuation du canal, et de cartes radar représentant le champ de précipitation sur une zone géographique délimitée. Cette partie se clôt avec un certain nombre de résultats de simulation obtenus à partir de la plate-forme présentée.

Mots clés : Télécommunications spatiales, satellite géostationnaire, multimédia, qualité de service, propagation, bande Ka, techniques adaptatives de compensation des affaiblissements à bande variable, ATM, gestion des ressources, protocoles MAC, DAMA, CAC, CAC à capacité variable, OPNET

ABSTRACT

Due to a congestion of conventional frequency bands, Ka band has been the subject of an ever-growing, wide interest in the recent years in the field of satellite communications. Thus satellite system designers have been led to facing a twofold constraint : the first one stems from significant tropospheric effects in Ka band which in a high degree translates into strong signal impairments due to rain and amplitude scintillation mainly. This compels one to utilise specific Fade Mitigation Techniques (FMT) to mitigate such impairments in order to ensure satisfactory system link availability. The second constraint introduced directly is related to the very nature of the satellite which possesses limited and costly radio and on-board resources, which leads to implementing efficient, optimised and cost-effective resource management protocols, when sharing resources to various users while guaranteeing them their requested Qualities of Service (QoS).

The framework of the present research work was based on the system architecture of the SAGAM project initiated by the RNRT (*French National Network for Telecommunications Research*) for the purposes of studying a third generation multimedia access system via a regenerative geostationary satellite with on-board ATM switching. Its specific contribution lies in an analysis of resource management protocols located at the access layer, while taking into account the constraints and impacts on the system architecture due to an incorporation of channel and FMT information.

With this in view, in a first chapter, the main system characteristics of the SAGAM project will be described in an overall manner. Then, in a second chapter, the peculiar issue of Ka-band channel modeling will be discussed with an insight into a straightforward application to the analysis of higher layers performance. Indeed several distinct approaches are expounded, namely, statistical approaches with static or dynamic modeling, ITU-oriented analyses, and a channel-predictive BER conversion method specifically developed here. The third chapter is wholly dedicated to the key issues and the performance of FMTs. Then, a fourth chapter tackles the plain issue of resource management combined with the use of a bandwidth-varying FMT. First and foremost, DAMA (*Demand Assignment Multiple Access*)-oriented MAC (*Medium Access Control*) protocols for controlling access to the radio resource are thoroughly examined ; then, various facets of the required properties for an efficient Connection Admission Control (CAC) algorithm fitted to multimedia services via satellite at Ka-band are reviewed. This consistently leads to defining a predictive capacity-varying CAC which exploits an empirical, statistical knowledge of future capacity reduction times. A last but necessary chapter is entirely dedicated to a more technical presentation of the network simulation platform itself which was designed during the research work. The core of this platform is the COTS OPNET[®] network software, and its main innovative aspect lies in its integrating propagation information both in the form of signal attenuation time-series and radar maps representing the rain intensity field over a given limited geographical area. Lastly, some simulation results are presented.

Keywords : Space telecommunications, geostationary satellite, multimedia, quality of service (QoS), propagation, Ka band, bandwidth-varying adaptive Fade Mitigation Techniques (FMTs), ATM, resource management, MAC protocols, DAMA, CAC, capacity-varying CAC, OPNET

