

UNIVERSITE DE LIMOGES
ECOLE DOCTORALE Science – Technologie – Santé
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2003

Thèse N° 30-2003

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Discipline : "Electronique des Hautes Fréquences, Optoélectronique"

Spécialité : "Télécommunications"

présentée et soutenue par

David CARSENAT

le 15 Octobre 2003

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE RESEAUX DE
COMMUNICATION SANS FIL.
APPLICATION AU LMDS.**

Thèse dirigée par Monsieur Thierry MONEDIERE

JURY :

Monsieur	Dominique CROS	Président
Monsieur	Xavier LAGRANGE	Rapporteur
Monsieur	Stéphane UBEDA	Rapporteur
Monsieur	Réda GUEDIRA	Examineur
Monsieur	Patrice HIRTZLIN	Examineur
Monsieur	Bernard JECKO	Examineur
Monsieur	Thierry MONEDIERE	Examineur
Monsieur	Jean-Paul PRIGENT	Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué à la Faculté des Sciences de l'Université de Limoges, au sein de l'Institut de Recherche en Communication Optique et Micro-ondes (IRCOM). Je remercie Monsieur le Professeur P.Y. GUILLON, Directeur de L'IRCOM, pour m'avoir accueilli dans ce laboratoire.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le Professeur B. JECKO, responsable de l'équipe « CREAPE », pour son accueil dans son équipe de recherche et sa participation à ce jury.

J'exprime également toute ma gratitude à Monsieur le Professeur T. MONEDIERE de l'Université de Limoges / IRCOM, qui a bien voulu assurer la direction de cette thèse ainsi qu'à Monsieur R. GUEDIRA, Maître de Conférence à l'Université de Limoges / IRCOM, qui m'a guidé tout au long de mes recherches. Une mention toute particulière à ces deux personnes pour leurs encouragements, leur compréhension, et leur sympathie dans les moments difficiles.

Je remercie Monsieur D. CROS Professeur à l'Université de Limoges / IRCOM de me faire l'honneur de présider le jury de soutenance ainsi que Monsieur le Professeur X. LAGRANGE, département Réseaux et Services Multimédias de l'ENST Bretagne et Monsieur le Professeur S. UBEDA, Directeur du CITI à l'INSA de Lyon pour avoir accepté la tâche de rapporteur et de juger ces travaux.

J'exprime ma gratitude envers messieurs P. HIRTZLIN, Ingénieur à THOMSON Rennes, et J.P. PRIGENT, Ingénieur au sein du groupe THALES à Colombes, pour m'avoir fourni une aide précieuse ainsi que tous les renseignements nécessaires à ces travaux.

Pour finir, une mention spéciale à tous mes collègues du CREAPE et de l'IRCOM pour avoir su imposer une ambiance toute particulière aux trois années passées à effectuer ces travaux. Un grand merci également à Mesdemoiselles P. LEROY et N. AYMARD, pour leur aide précieuse en ce qui concerne le secrétariat et l'administratif ainsi que leur gentillesse et leur patience.

Je dédie cette thèse à Elodie, à ma famille ainsi qu'à tous mes amis qui j'espère se reconnaîtront, sans qui rien n'aurait été possible.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I SYSTEME DE COMMUNICATION SANS FIL A HAUT DEBIT	7
I-1 INTRODUCTION	9
I-2 GENERALITES SUR LES RESEAUX ET LES RESEAUX SANS FIL	9
<i>I-2.1 Les réseaux filaires</i>	10
<i>I-2.2 Du réseau filaire au « wireless »</i>	12
I-3 LES FAISCEAUX HERTZIENS	13
<i>I-3.1 Utilisation</i>	13
<i>I-3.2 Avantages</i>	14
<i>I-3.3 Inconvénients</i>	14
I-4 LES WLANS (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK).....	14
<i>I-4.1 Utilisation</i>	14
<i>I-4.2 Inconvénients</i>	15
I-5 LES WPANS (WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK)	16
<i>I-5.1 Utilisation</i>	16
<i>I-5.2 Avantages</i>	16
<i>I-5.3 Inconvénients</i>	16
I-6 LES COMMUNICATIONS PAR SATELLITES.....	17
<i>I-6.1 Utilisation</i>	17
<i>I-6.2 Avantages</i>	18
<i>I-6.3 Inconvénients</i>	18
I-7 LES SYSTEMES LMDS	18
<i>I-7.1 Utilisation</i>	18
<i>I-7.2 Avantages</i>	20
<i>I-7.3 Inconvénients</i>	20
I-8 ELEMENTS CARACTERISANT UN SYSTEME DE RESEAU SANS FIL : LA COUCHE MAC ET LA COUCHE PHYSIQUE	20
<i>I-8.1 Description du Modèle en couche ISO</i>	21
<i>I-8.2 La couche physique : quelques principes fondamentaux</i>	24
<i>I-8.3 La couche MAC</i>	27
<i>I-8.4 Etude d'un cas simple, le protocole ALOHA [I.15]</i>	29
I-9 CONCLUSION	35

CHAPITRE II L'OUTIL DE SIMULATION OPNET	37
II-1 INTRODUCTION.....	39
II-2 PRESENTATION GENERALE	39
II-2.1 Une modélisation orientée objet.....	39
II-2.2 Prise de statistiques.....	49
II-2.3 Modélisation Radio.....	49
II-3 L' AIDE AU DIMENSIONNEMENT DE SYSTEMES DE COMMUNICATION : CESALE.....	52
II-3.1 Qu'est-ce que le dimensionnement de réseaux ?	52
II-3.2 Un exemple : le système CESALE	53
II-4 SIMULATION DES COUCHES RESEAUX EN TENANT COMPTE DES NORMES DE COMMUNICATIONS UTILISES DANS LES SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL.....	66
II-5 PRISE EN COMPTE DE LA PROPAGATION.....	67
II-5.1 Intégration du diagramme de rayonnement.....	68
II-5.2 Intégration d'un logiciel de calcul de la propagation.....	74
II-5.3 Exemple de simulation et résultats	76
II-6 CONCLUSION.....	79

CHAPITRE III PRESENTATION DE NORMES DE COMMUNICATION SANS FIL POUR LE LMDS	81
III-1 INTRODUCTION	83
III-2 LA NORME DVB EN 301 199.....	84
III-2.1 Concept	84
III-2.2 Principes In Band (IB) et Out Of Band (OOB)	85
III-2.3 Spécification de la couche physique.....	85
III-2.4 Spécification de la couche MAC	91
III-2.5 Synthèse.....	99
III-3 LA NORME 802.16.....	100
III-3.1 Concept	100
III-3.2 Couche de convergence (CS)	101
III-3.3 Couche commune MAC (MAC Common Part Sublayer)	101
III-3.4 Interconnexion couche MAC/couche physique.....	106
III-3.5 Spécifications de la couche physique	109
III-3.6 Synthèse.....	114
III-4 COMPARAISON DES NORMES	114
III-5 CONCLUSION.....	116

CHAPITRE IV APPLICATIONS	117
IV-1 INTRODUCTION	119
IV-2 LE PROJET ERASME	119
IV-3 L'AIDE AU DIMENSIONNEMENT ET AU DEPLOIEMENT DU SYSTEME LMDS	122
IV-3.1 Modèle de simulation de la norme DVB EN 301 199.....	123
IV-3.2 Problèmes de débit de la voie descendante liés au protocole TCP	128
IV-3.3 Etude du Mode Fixed Bit Rate (FBR).....	130
IV-3.4 Etude du mode contention	135
IV-3.5 Application à un cas réel : déploiement de la plateforme ERASME	150
IV-3.6 Problème de la NIU en visioconférence : étude de la DATAPUMP	157
IV-3.7 Conclusion sur la norme simulation LMDS ERASME	166
IV-4 ÉTUDE PROSPECTIVE DE LA FUTURE GENERATION DE LMDS : LA NORME 802.16.....	167
IV-4.1 Etude théorique	167
IV-4.2 Comparaison avec les simulations	173
IV-4.3 Etude du besoin de la fragmentation en voie montante.....	181
IV-4.4 Mise en place de la QOS sur la voie montante.....	183
IV-4.5 Modes TDD et HFDD	191
IV-4.6 Conclusion sur la norme 802.16.....	193
IV-5 CONCLUSION	193
CONCLUSION GENERALE	195
ANNEXES	199
ANNEXE 1	201
ANNEXE 2	204
ANNEXE 3	217
ANNEXE 4 : GLOSSAIRE	220
BIBLIOGRAPHIE.....	223

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Il y a deux siècles, naissent les premières télécommunications. À cette époque les premiers modes de transmission de l'information peuvent être divisés en deux grands groupes:

-les signaux visuels : le premier outil pour transmettre des informations fut le feu. Sa fumée indiquait la présence d'un groupe humain ou d'un individu isolé. Un peu plus tard, des feux allumés de relais en relais permettaient la transmission d'une information. De même, on se servait du feu près des côtes pour signaler les récifs aux bateaux au travers des phares.

-les signaux sonores : les gaulois utilisaient des trompes, cors ou encore transmettaient des messages par des cris codés. Dans certaines contrées des Pyrénées, on utilisait des langages sifflés, une pratique encore utilisée aujourd'hui. D'autres moyens comme les cloches d'églises ont également été employées jusqu'au début du siècle.

Il va sans dire que la rapidité de ces communications ne permettait pas un dialogue très complet ni rapide comparé à ce que nous connaissons aujourd'hui. Depuis toujours, les hommes ne cessent de faire des découvertes qui concourent toutes à accélérer le délai d'acheminement de l'information.

Les progrès considérables établis au XXe siècle ont été le facteur essentiel dans le développement des télécommunications et tout cela ne serait rien sans le concours providentiel de certains hommes qui ont révolutionné le domaine des télécommunications sans fil.

En 1873, James Maxwell, à Londres, publie son traité d'électricité de magnétisme: raisonnement qui établit que des perturbations électromagnétiques de fréquences diverses, non perceptibles par nos sens, rayonnent dans l'espace. Plus tard, en 1887, Heinrich HERTZ à Karlsruhe, vérifiera par l'expérience des théories de Maxwell : une étincelle électrique jaillit entre deux boules de cuivre, et à quelques mètres, simultanément, une étincelle minuscule prend naissance sur des armatures en forme de boucles. Il est ainsi prouvé que les oscillations électromagnétiques sont induites à distance, c'est la naissance des ondes Hertiennes.

Désormais, il est possible de déclencher une action mécanique importante à distance, à travers les murs, sans lien matériel ... SANS FIL

Dans les années 1900, le jeune Guglielmo MARCONI, qui va devenir le grand promoteur et industriel de la TELEGRAPHIE SANS FIL, commence ses expériences près de

BOLOGNE. Lui aussi a l'idée de transmettre SANS FIL des messages MORSE. Il présente que les ondes Hertziennes peuvent se propager A GRANDE DISTANCE. Muni de capitaux importants, il augmente progressivement la puissance des appareils émetteurs de HERTZ et la sensibilité des dispositifs récepteurs de BRANLY. Fin 1895, il fait inscrire des signaux MORSE à 2400 mètres puis en Décembre 1901, installé à TERRE-NEUVE, il perçoit des signaux émis depuis la côte Est de l'ANGLETERRE : 3400 Km. Le succès de cette expérience est confirmé en 1903 par la réception d'un message télégraphique complet.

C'est après la libération que débute la révolution technique qui a vu successivement les télécommunications s'automatiser, " s'électroniser " et se numériser.

C'est en 1938 que commence l'aventure de l'ordinateur moderne. L'allemand Konrad Zuse conçoit le premier calculateur universel binaire commandé par programme. Cette machine appelée Z1 était composée d'une unité mémoire et d'une unité arithmétique. Deux ans plus tard, en 1940, la guerre fait naître l'ordinateur électronique. En 1941, le Z3 comprenait un calculateur universel contrôlé par programme, un lecteur de bande perforée et une console pour l'opérateur.

En 1949, le Z4, plus puissant avec une mémoire de 512 mots de 32 bits, sera le premier ordinateur vendu par Konrad Zuse.

Au même moment, de l'autre côté de l'Atlantique, Howard H Aiken conçoit un calculateur électromagnétique à registres, le " HAVARD MARK 1 ", composé de 765 299 éléments. Il pesait 5 tonnes et avait besoin de plusieurs tonnes de glace par jour pour le refroidir.

C'est bien plus tard, aux Etats-Unis que commence l'aventure d'Internet dans les années 1960. La peur d'une guerre nucléaire incite à cette époque les responsables de l'armée américaine, au sein du Pentagone, à inventer un système de communication qui serait toujours en état de fonctionnement : Internet était né. Près de 10 ans plus tard, Internet quitte le domaine militaire pour celui de l'Université. Les calculateurs de quatre universités américaines sont connectés entre eux. Mais il faut attendre 1990 et la mise en service par le CERN (Centre Européen de la Recherche Nucléaire) du WWW (World Wide Web) pour que les ordinateurs du monde entier puissent communiquer entre eux grâce à ce langage. De nos jours, au vu du nombre de personnes désirent s'abonner à Internet, ce dernier doit se servir de tous les moyens de communication mis à sa disposition, par conséquent les ondes hertziennes.

C'est ainsi que de nouveaux modes de communication sont apparus afin de relier différents sites au réseau Internet. L'autre besoin se faisant sentir est bien évidemment l'aspect mobilité, en effet, il est beaucoup plus aisé de se déplacer avec des équipements sans fil.

De nos jours, la technologie permet d'envoyer de plus en plus d'informations de plus en plus vite. Nous avons donc vu tout naturellement apparaître les communications numériques via les ondes hertziennes : inutile de préciser l'essor considérable qu'a connu le téléphone portable (GSM France).

C'est dans le cadre d'un projet RNRT nommé ERASME que l'activité « réseaux de communication sans fil » a démarré au sein de l'équipe CREAPE de l'IRCOM. Ce projet a pour but de réaliser une plateforme de démonstration de services sur un réseau sans fil LMDS. Afin de connaître les performances d'un tel système et ainsi de prévoir son comportement vis-à-vis de différents services, nous nous sommes penchés sur le dimensionnement de réseaux sans fil. Le logiciel OPNET c'est rapidement imposé puisque, parmi les logiciels commerciaux, il est considéré comme un standard.

En étudiant le système LMDS utilisé dans la plateforme, la nécessité de connaître la norme utilisée par la couche liaison de données a été rapidement mise en avant. Nous avons donc étudié, dans le détail, différents standards pour les systèmes LMDS.

Ce mémoire reprend, dans le premier chapitre, les bases essentielles sur les réseaux, qu'ils soient filaires ou hertziens et s'intéresse plus particulièrement aux couches liaison de données et physique utilisées dans le modèle OSI, puis se termine par l'étude de l'exemple le plus populaire : ALOHA.

Le chapitre II fait une description détaillée du fonctionnement du logiciel OPNET, utilisé pendant cette thèse comme outil de dimensionnement des réseaux sans fil, avant de conclure sur un exemple appliqué au dimensionnement d'un système de communication, par le biais de l'étude du protocole utilisé dans le système CESALE. Ce chapitre montre aussi la procédure suivie pour améliorer le logiciel par l'intégration de diagrammes de rayonnement complexes et le couplage avec un autre logiciel de calcul de la propagation.

Dans le chapitre III, une présentation de deux normes de couches MAC étudiées pendant cette thèse est faite afin d'en comprendre les mécanismes et d'en extraire les éléments caractéristiques à simuler sous OPNET.

Enfin, le chapitre IV représente la partie la plus importante puisqu'elle comprend les résultats des études faites durant cette thèse tant au niveau simulation, théorique qu'expérimentale, dans le cadre du système LMDS utilisé dans le projet ERASME.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et les perspectives d'étude au sein du laboratoire.

CHAPITRE I

Système de communication sans fil à haut débit

I-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps donner les informations nécessaires pour comprendre la suite de ce manuscrit à savoir quelques informations généralistes sur les réseaux et les réseaux sans fil. Puis, nous allons passer en revue la plupart des systèmes utilisés dans les réseaux sans fil avant de décrire le modèle OSI au travers de ses différentes couches.

Un exemple bien connu sera ensuite étudié pour illustrer la suite de ces travaux et leur intérêt.

I-2 GENERALITES SUR LES RESEAUX ET LES RESEAUX SANS FIL

On peut définir un réseau comme un ensemble de machines informatiques, permettant la capture ou le traitement de l'information numérique, reliées entre elles de manière à ce qu'elles puissent échanger des données.

La possibilité d'échange de données permet :

- un accès plus rapide aux informations numériques en se passant de supports de stockage lents tels que des disquettes, bandes, CD-ROM.
- une augmentation des capacités de stockage et leur structuration sur le réseau
- de bénéficier de manière distribuée de machines de traitement spécialisé : serveurs d'applications, meilleur partage des ressources actives.
- multi diffusion rapide des messages
- accès à des banques de données collectives : *Internet - Intranet*

I-2.1 Les réseaux filaires

On distingue des réseaux [I.1] (Figure 1):

- Personnels : PAN "*Personal Area Network* " aux dimensions d'une pièce, qui permettent l'interconnexion de matériel informatique comme les souris et claviers sans fil. (Bluetooth) [I.2]
- Locaux : LAN "*Local Area Network* " aux dimensions de locaux d'une entreprise qui permettent d'interconnecter différents ordinateurs ensemble.
- Métropolitains : MAN "*Metropolitan Area Networks*" aux dimensions d'une ville, ce sont typiquement les réseaux auxquels on se connecte de chez soi pour l'accès à Internet. (ADSL, Cable)
- Elargis : WAN "*Wide Area Networks*" aux dimensions d'un pays ou de la planète (Internet)

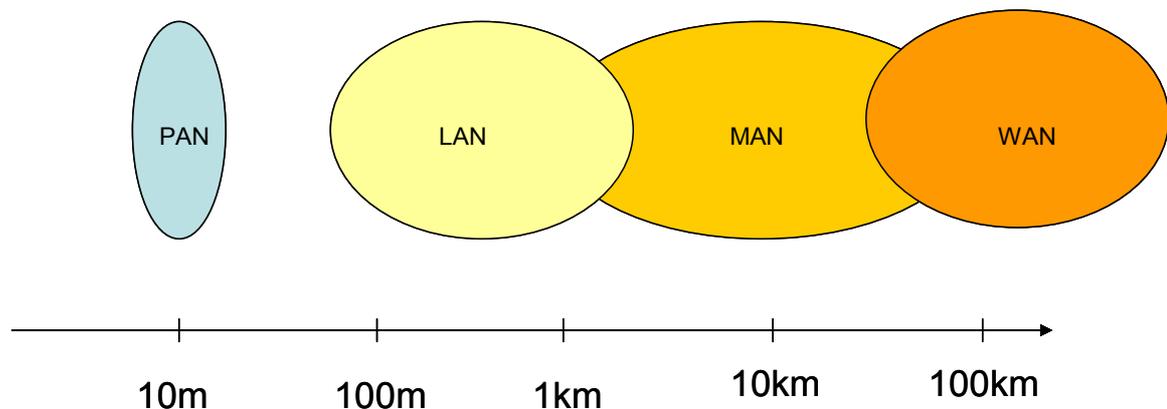


Figure 1 : Les différentes catégories de réseaux informatiques

La distinction n'est pas sans fondement: la taille d'un réseau implique des technologies différentes.

Il y a différentes manières d'interconnecter plusieurs machines, nous en distinguerons seulement trois ici :

- Point à point (Figure 2)

Il s'agit là du système le plus simple à mettre en œuvre à savoir qu'un site ne peut correspondre qu'avec un seul autre et vice-versa.



Figure 2 : Point à point

- Point multipoints (Figure 3)

Il y a un système central et des systèmes périphériques. Seul le système central peut communiquer avec l'ensemble des sites, les systèmes périphériques ne pouvant communiquer que vers le site central. L'avantage de cette méthode est la grande simplicité des communications. La gestion de l'ensemble peut s'effectuer par le centre.

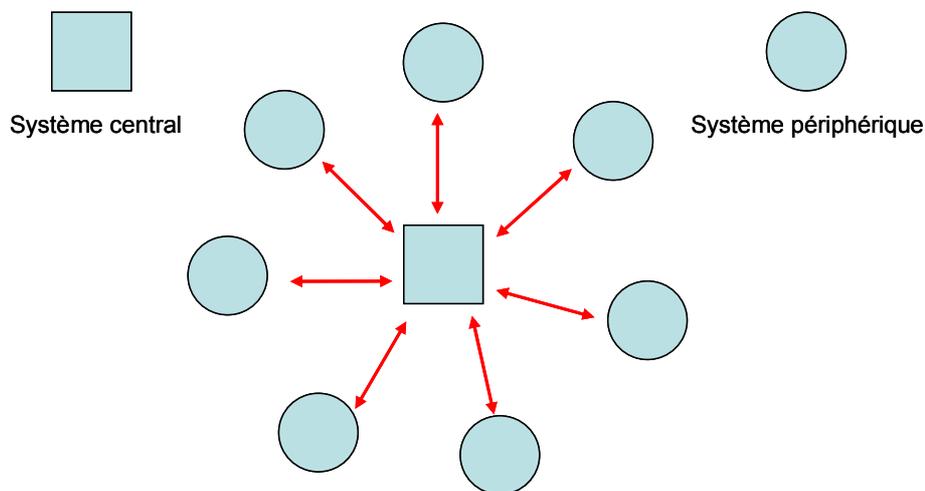


Figure 3 : Principe du multipoint

- Multipoints multipoints (Adhoc) (Figure 4)

C'est l'équivalent du point multipoint sauf que tous les systèmes sont des systèmes centraux c'est-à-dire que chaque site peut communiquer directement avec tout autre site. On voit bien la complexité globale de cette configuration, puisque la gestion des échanges est totalement distribuée et la coordination des systèmes est difficile à prendre en charge.

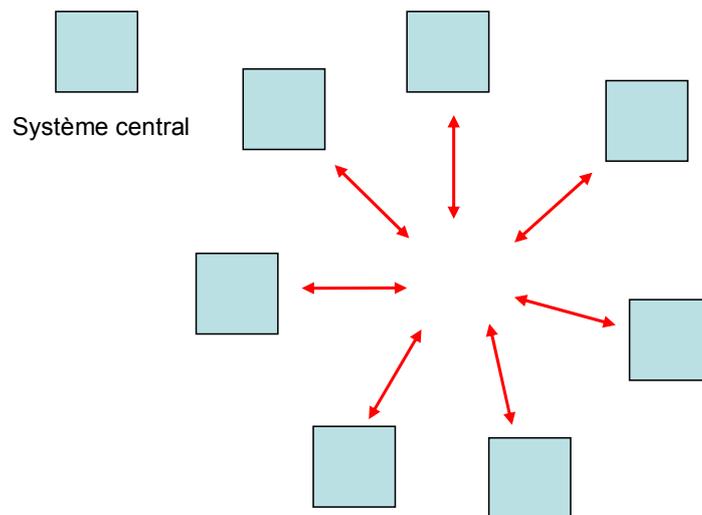


Figure 4 : Principe d'un réseau multipoints multipoints

I-2.2 Du réseau filaire au « wireless »

Les récents progrès réalisés en matière de technologie sans fil [I.3] ont amené le développement des réseaux sans fil dits « wireless »

Les gains sont considérables en terme d'infrastructures [I.4] puisque l'on n'a plus besoin de fils pour relier les différents sites. De plus, le simple fait que chaque machine ne soit plus reliée aux autres par un fil permet la mobilité dans l'espace de celle-ci [I.5].

Le développement constant de ces réseaux sans fil a amené la création de nouvelles normes afin de mieux interconnecter les machines.

En effet, cette mobilité et ce gain en infrastructure ne sont malheureusement pas sans conséquence : on se heurte à des problèmes physiques liés à l'utilisation même du media radio. La propagation électromagnétique (obstacles multi trajets) et le fait que le signal soit accessible à tous, sont deux phénomènes fortement gênants pour la sécurité des données transmises.

De plus l'ART (l'Agence de Régulation des Télécoms), ne permet pas d'utiliser toutes les fréquences à n'importe quelle puissance ce qui est préjudiciable à l'utilisation de ce média.

Nous allons brièvement décrire les systèmes les plus courants utilisant la technologie sans fil pour connecter deux ou plusieurs sites entre eux [I.6].

I-3 LES FAISCEAUX HERTZIENS

Les faisceaux hertziens [I.7] sont utilisés pour une liaison point à point (Figure 5). Ils permettent l'interconnexion de deux points fixes en hyperfréquence.

I-3.1 Utilisation

L'émission en hyperfréquences est idéale pour une liaison point à point puisqu'elle permet facilement la concentration d'un faisceau d'ondes radio dans une direction bien précise par le biais d'antennes directives.

Ils sont utilisés pour relier deux réseaux d'infrastructures entre eux, par exemple des réseaux d'infrastructures de sécurité, des réseaux linéaires à longue distance, des réseaux privés indépendants, des banques, hôpitaux, universités, collectivités locales, ...

Les bandes de fréquences où cette technologie s'applique s'étalent de 1 GHz à 40 GHz.

La fréquence est attribuée en fonction de la distance souhaitée (jusqu'à quelques dizaines de km), du débit souhaité, des cohabitants éventuels.

Les débits vont de 2 à 155 Mbits/sec, un exemple se trouve être celui de l'université de Limoges reliant deux sites distants de quelques km à 2 Mbits/sec.

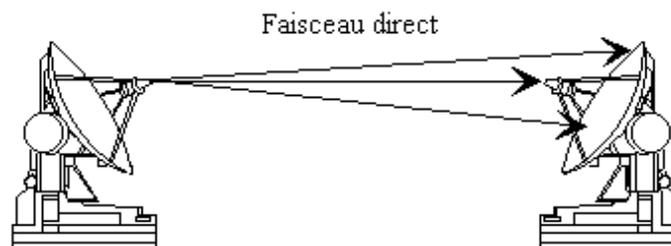


Figure 5 : Un faisceau hertzien

I-3.2 Avantages

Etant donné que le rayonnement est très directif afin de transmettre le maximum de puissance vers le récepteur, le rayonnement radio ne "pollue" pas les alentours inutilement.

De part leur infrastructure simple, les coûts de fonctionnement sont relativement faibles.

L'aspect sécurité est bien pourvu car le piratage d'une liaison F.H. nécessiterait l'accès aux équipements pour récupérer le signal, la connaissance du protocole de transmission, l'utilisation de matériels radio coûteux, et de placer son équipement dans le faisceau et donc de le couper.

I-3.3 Inconvénients

Les inconvénients techniques sont principalement le besoin de visibilité entre les sites à interconnecter, l'utilisation d'antennes hyper directives, la sensibilité possible aux perturbations atmosphériques et la vulnérabilité au phénomène de multi trajets.

I-4 LES WLANS (WIRELESS LOCAL AREA NETWORK)

Un WLAN [I.8] est un réseau local sans fil, fournissant toutes les caractéristiques et avantages d'un réseau local traditionnel comme Ethernet. Au lieu d'utiliser des câbles à paires torsadées, coaxiaux ou fibres optiques, les réseaux locaux sans fil utilisent les fréquences radio pour recevoir et émettre des données entre PCs ou d'autres équipements de réseaux sans câble ni fil.

I-4.1 Utilisation

Les réseaux locaux utilisent des ondes radio à spectre diffus moins sensibles aux bruits et interférences radio et ainsi sont idéaux pour des communications informatiques. Ce type de réseaux utilise les principes point multipoints et multipoint multipoints.

Le principe point multipoints est la configuration la plus courante avec un point faisant office de station de base pour interconnecter les réseaux avec d'autres sites (Figure 6.a). Le deuxième principe de connexion (AdHoc) permet d'interconnecter les sites (PC) (Figure 6.b), chaque machine pouvant directement communiquer avec toutes les autres.

Les débits offerts par de tels réseaux sont de l'ordre de 1 à 11 Mbits/sec et utilisent les fréquences de 2.4 GHz ou 5 GHz. C'est un réseau à couverture moyenne (quelques centaines de mètres). Les principaux standards utilisés sont 802.11 [I.9] pour les Etats Unis et HIPERLAN2 pour l'Europe.

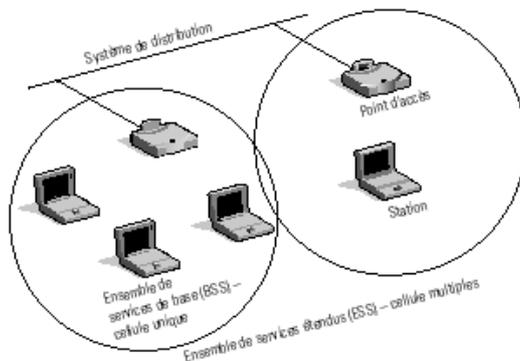


Figure 6.a)

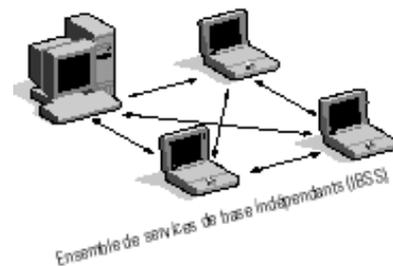


Figure 6.b)

Figure 6 : WLAN en configuration : a) point-multipoints, b) AdHOC

I-4.2 Inconvénients

La limitation forte en distance reste un des inconvénients majeurs des WLANs à cause de la faible puissance autorisée aux fréquences utilisées.

Vu que toutes les machines présentes dans le réseau partagent le même média donc la même bande passante en terme de débit (bits/sec), le nombre de nœuds (machines) limite le débit par machine.

De plus, comme nous l'avons vu, avoir du WLAN c'est comme avoir une prise Ethernet dans la rue à savoir que l'aspect sécurité est un gros problème pour les fabricants de systèmes WLAN actuellement. En effet, n'importe qui peut se procurer un terminal WLAN et se connecter à n'importe quel réseau pour peu qu'il sache décoder les mots de passe.

I-5 LES WPANS (WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK)

Encore plus réduit que les WLANs, les WPANs se trouvent utiles pour tout ce qui concerne l'interconnexion de matériel.

I-5.1 Utilisation

Les WPANs [I.2] sont utilisés pour les réseaux personnels à savoir pour relier des équipements comme un ordinateur portable, un agenda électronique, une souris sans fil. Les normes utilisées le plus souvent sont Bluetooth ou 802.15 et fonctionnent à la fréquence de 2.4 GHz (Figure 7).

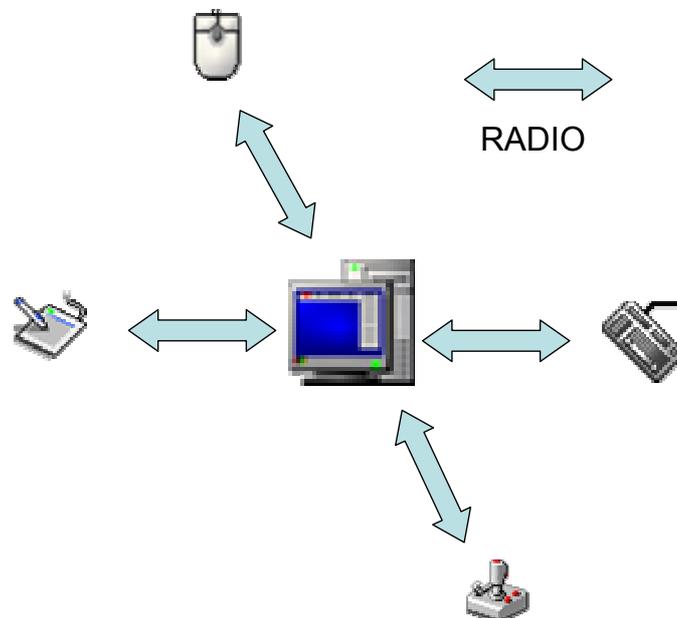


Figure 7 : Exemple de configuration d'un WPAN

I-5.2 Avantages

Grâce à la standardisation du matériel utilisé (Bluetooth, 802.15), l'interconnexion est facile et peu coûteuse. De plus, les WPANs peuvent être utilisés pour d'autres systèmes comme les réseaux de capteurs, la domotique etc....

I-5.3 Inconvénients

Du fait de la faible bande passante permise, il est impossible d'appliquer des services nécessitant des débits élevés. En effet les WPANs offrent un débit faible (<1Mbits/sec) partagé entre tous les sites ce qui convient parfaitement pour l'interconnexion de matériel mais pas pour d'autres services comme le transfert de données.

La faible portée (quelques mètres), reste une limite mais demeure une condition sans laquelle des interférences entre les différents sites interviendraient.

I-6 LES COMMUNICATIONS PAR SATELLITES

Afin de relier facilement des sites très éloignés géographiquement, les satellites se sont imposés logiquement à cause de leur grande couverture terrestre.

I-6.1 Utilisation

Cette couverture apportée par les satellites [I.10] permet de diffuser l'information presque partout dans le monde. Ainsi, l'accès à l'Internet peut se faire de partout, même dans les régions les plus isolées (les pôles exceptés!).

Les satellites sont aussi utilisés pour de la diffusion point multipoints de programmes TV (Figure 8).



Figure 8 : communications par satellites

I-6.2 Avantages

De part la technologie utilisée, les communications par satellites sont bien adaptées à des régions sans infrastructure de télécommunications.

I-6.3 Inconvénients

Les débits fournis par de tels systèmes sont faibles car la bande passante du satellite est partagée sur une très grande zone géographique et donc potentiellement par un grand nombre d'utilisateurs.

La réception du signal est soumise aux caprices des conditions météorologiques et de la topologie du terrain (arbres, bâtiments) ce qui peut quasiment amener à la coupure des communications. Les temps de propagation des signaux sont relativement longs à cause de la grande distance à parcourir.

Le matériel pour une bonne réception coûte relativement cher, de plus la voie de retour n'est pas facile à mettre en œuvre (le plus souvent la voie de retour est réalisée sur le réseau téléphonique).

I-7 LES SYSTEMES LMDS

En fin, nous voyons ici le système LMDS qui se trouve être le point de départ de ces travaux.

I-7.1 Utilisation

LMDS est un système de communications sans fil [I.11], opérant dans la bande de fréquences de 10 à 66 GHz, qui peut être utilisé pour distribuer de la voix, des données, Internet et des services de vidéos [I.12]. Le système de transmission utilisé est du point multipoints (Figure 9).

L'acronyme LMDS est décrit ci-dessous :

L (local) —dénote que les caractéristiques de propagation du signal à ces fréquences limitent la zone de couverture potentielle d'une cellule (environ 3 km).

M (multipoint) —indique que les signaux sont transmis d'un point vers plusieurs points ou avec une méthode de broadcast. Le retour sans fil des abonnés vers la station de base est une transmission point à point.

D (distribution) —se réfère à la distribution du signal, qui consiste en plusieurs trafics simultanés comme la voix, les data, Internet, et la vidéo.

S (service) —implique la relation entre l'abonné et l'opérateur ; les services offerts par un réseau LMDS sont entièrement dépendants du choix de l'opérateur.

Les principaux standards de communication utilisés par les systèmes LMDS sont nouvellement 802.16 pour les Etats Unis et DVB EN 301.199 pour l'Europe [I.13].

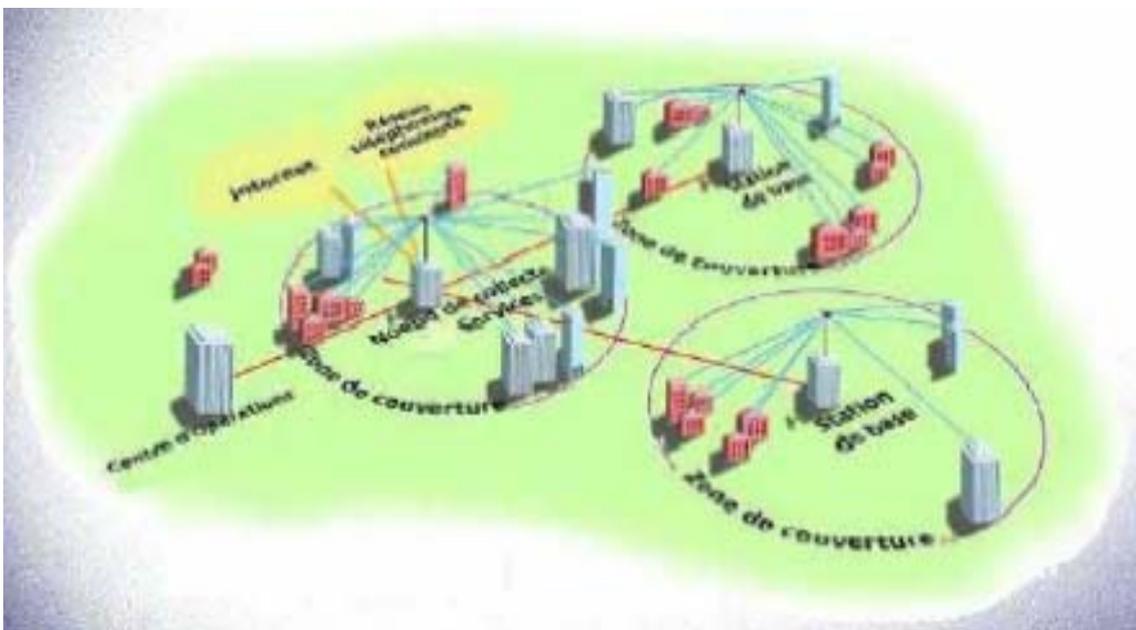


Figure 9 : Principe de la boucle locale radio

I-7.2 Avantages

Les fréquences utilisées permettent de faire passer du très haut débit (jusqu'à 155 Mbits/sec partagés) avec un nombre de nœuds important. Il est tout indiqué pour un fournisseur d'accès désirant connecter des centaines d'abonnés dans une zone ayant peu d'infrastructures installées, ceci grâce au faible coût de déploiement (pas de fil ni de fibre à faire passer).

I-7.3 Inconvénients

Les fréquences utilisées (11 GHz – 66 GHz) par le LMDS (notamment à 40 GHz et plus) sont très sensibles aux perturbations atmosphériques (pluie, brouillard). La possibilité de trajets multiples par phénomènes de réflexion peut gravement nuire à la communication.

Le LMDS est donc soumis aux caprices des conditions météorologiques et à la topologie du terrain (arbres, bâtiments) puisque tout comme les faisceaux hertziens, une visibilité entre les sites à interconnecter est quasi indispensable. De plus, le coût des équipements à mettre en place chez l'abonné n'est pas négligeable du fait des fréquences utilisées et du besoin d'une antenne très directive.

I-8 ELEMENTS CARACTERISANT UN SYSTEME DE RESEAU SANS FIL : LA COUCHE MAC ET LA COUCHE PHYSIQUE

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu différents systèmes de communications sans fil dont les caractéristiques diffèrent. Ce paragraphe va tenter de mettre en avant les éléments déterminants d'un système de communication en terme de performances (porté, débit, etc...). Avant cela, il est nécessaire d'apporter quelques éléments de théorie des réseaux.

I-8.1 Description du Modèle en couche ISO

Pour réaliser le transport de données d'une extrémité à l'autre d'un réseau, il faut bien sûr un support physique ou hertzien de communication. Cependant, pour s'assurer que les données arriveront correctement au destinataire, il faut une architecture logicielle complexe et structurée. Nous allons maintenant tenter de présenter cette architecture.

Dans tout ce rapport nous n'utiliserons pas uniquement l'architecture proposée par l'OSI (Open System Interconnexion) mais celui-ci forme la base de référence de ces travaux.

Ce modèle [I.1] comporte 7 couches que nous allons décrire dans les lignes qui suivent. La figure 10 illustre ce modèle.

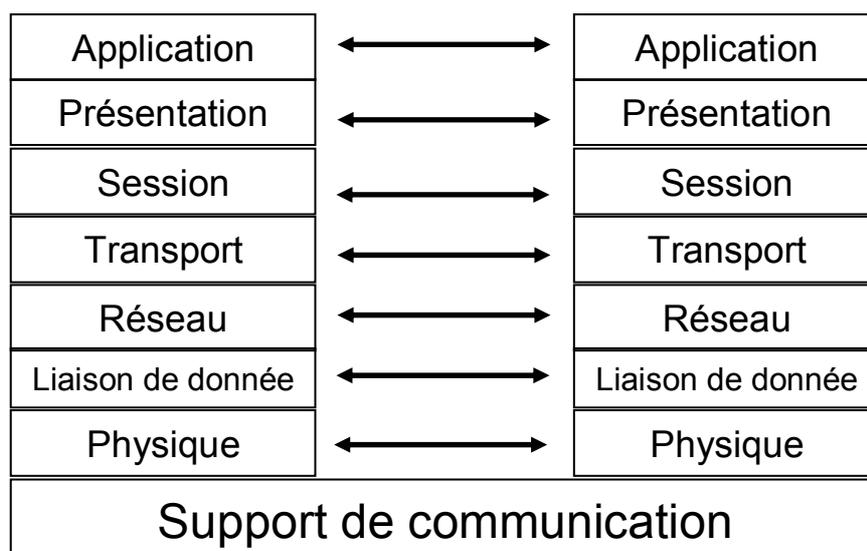


Figure 10 : L'architecture OSI

La présentation des différentes couches n'est pas exhaustive mais montre les aspects essentiels pour aborder l'étude de systèmes de communication dans ce mémoire.

- **La couche application** donne au processus d'application (par exemple un navigateur Internet) le moyen d'accéder à l'environnement OSI. Elle contient toutes les fonctions impliquant des communications entre systèmes.
- **La couche présentation** permet de transcrire les données dans un format compréhensible par les deux systèmes. Elle assure entre autre le codage des données dans une norme réseau reconnue et le cryptage éventuel des données.
- **Le rôle de la couche session** est de fournir aux entités de présentation les moyens nécessaires pour organiser et synchroniser leur dialogue. Pour arriver à ce but, la couche session doit fournir les services nécessaires à l'établissement d'une connexion, son maintien et de sa libération.
- **La couche transport** assure le transfert des données de bout en bout entre deux machines d'extrémité, à savoir qu'un processus d'une machine source dialogue avec un processus similaire appartenant à une machine distante (Figure 11).

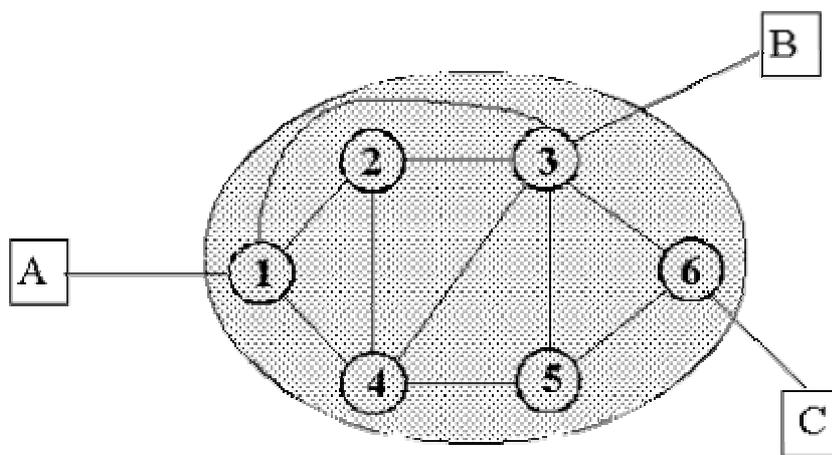


Figure 11 : Exemple de configuration de réseau

Cette couche assure donc un protocole entre la machine émettrice et la machine réceptrice. Les unités de données sont acheminées sans erreur, en séquence, sans perte ni duplicata.

-
- **La couche réseau** doit fournir d'une part les moyens d'établir, de maintenir, et de libérer des connexions entre les systèmes ouverts et, d'autre part, de donner les moyens fonctionnels et les procédures nécessaires pour échanger des données entre les entités de transport et les unités du service réseau. Elle a pour but l'envoi de paquets (ensemble structuré de bits) et doit assurer une indépendance vis-à-vis du réseau de communication utilisé (commutation par paquets). Elle doit établir, maintenir et rompre la connexion. Ses principales fonctions sont :
 - le routage à travers un réseau pour deux entités non connectées directement (point à point, multipoint ou par diffusion "*broadcast*")
 - assurer le contrôle de trafic (contrôle de flux, contrôle de congestion etc...)
 - assurer le contrôle d'erreur (que faire si un noeud du réseau tombe en panne; comment garantir que le réseau ne perdra aucun paquet ?).
 - **La couche liaison de données** fournit les moyens fonctionnels et procéduraux nécessaires à l'établissement, au maintien et à la libération des connexions de liaison de données entre entités adjacentes du réseau. Elle détecte et corrige, si possible, les erreurs dues au support physique et signale à la couche réseau les erreurs irrécupérables. Elle supervise le fonctionnement de la transmission et définit la structure syntaxique des messages, la manière d'enchaîner les échanges selon un protocole normalisé ou non. Une connexion de liaison de données est réalisée à l'aide d'une ou plusieurs liaisons physiques entre deux machines adjacentes dans le réseau donc sans noeud intermédiaire entre elles. A noter que dans ce rapport, nous parlerons de couche MAC (Medium Access Control) qui se trouve être avec la couche LLC (Link Layer Control), l'équivalent de la couche liaison dans le modèle 802.
 - **La couche physique** fournit les moyens mécaniques, électriques, fonctionnels et procéduraux nécessaires à l'activation, au maintien et à la désactivation des connexions physiques destinées à la transmission de bits entre deux entités de liaison de données. Ici, on s'occupe donc de transmission des bits de façon brute, l'important est que l'on soit sûr que si l'émetteur envoie un bit à 1, alors le récepteur reçoit un bit à 1. Les normes et standards de la couche physique définissent le type de signaux émis (modulation, puissance, portée...), la nature et les caractéristiques des supports (câble, fibre optique...), les sens de transmission... . L'objectif de la couche 1 du modèle OSI est aussi de fixer les

caractéristiques des matériels utilisés pour relier physiquement les équipements d'un réseau.

D'après ce modèle il est facile de conclure que les deux premières couches du modèle OSI vont fortement contribuer aux performances du réseau. En effet, étant parmi les plus basses du modèle OSI, si elles sont défectueuses ou peu performantes, toutes les couches supérieures seront affectées. C'est dans cette optique que cette thèse a été effectuée et pour cela que nous allons, dans les deux paragraphes suivants, étudier de façon générale la couche MAC et la couche physique.

I-8.2 La couche physique : quelques principes fondamentaux

Dans ce paragraphe nous allons étudier de plus près la couche physique. Tout d'abord une liaison entre 2 équipements A et B peut être *simplex* (unidirectionnelle), dans ce cas A est toujours l'émetteur et B le récepteur. C'est ce que l'on trouve par exemple entre un banc de mesure et un ordinateur recueillant les données mesurées. La communication est *half-duplex* (bidirectionnelle à l'alternat) quand le rôle de A et B peut changer [I.1], la communication change de sens à tour de rôle (comme avec des talkies-walkies). Elle est *full-duplex* (bidirectionnelle simultanée) quand A et B peuvent émettre et recevoir en même temps (comme dans le cas du téléphone).

La transmission de plusieurs bits peut s'effectuer en *série* ou en *parallèle*. [I.14] En série, les bits sont envoyés les uns derrière les autres de manière synchrone ou asynchrone. Dans le mode synchrone l'émetteur et le récepteur se mettent d'accord sur une base de temps (un top d'horloge) qui se répète régulièrement durant tout l'échange. À chaque top d'horloge (ou k tops d'horloge, k entier fixé définitivement) un bit est envoyé et le récepteur saura ainsi quand lui arrivent les bits. Dans le mode asynchrone, il n'y a pas de négociation préalable mais chaque caractère envoyé est précédé d'un *bit de START* et immédiatement suivi d'un *bit de STOP*. Ces deux bits spéciaux servent à caler l'horloge du récepteur pour qu'il échantillonne le signal afin d'y décoder les bits qu'il reçoit. En parallèle, les bits d'un même caractère sont envoyés en même temps chacun sur un fil distinct, mais cela pose des problèmes de synchronisation et n'est utilisé que sur de courtes distances (bus par exemple) et encore moins en communications sans fil.

Quelque soit le mode de transmission retenu, l'émission est toujours cadencée par une horloge dont la vitesse donne la rapidité de modulation de la ligne en *bauds*, c'est-à-dire le nombre de tops d'horloge en une seconde. Ainsi, une ligne d'un débit de 100 bauds autorise 100 émissions par seconde.

a) Transmission en bande de base

La transmission en bande de base [I.14] consiste à envoyer directement les suites de bits sur le support à l'aide de *signaux carrés* constitués par un courant électrique pouvant prendre 2 valeurs (5 Volts ou 0 par exemple). On ne détaillera pas les différents codages des bits possibles, mais dans tous les cas l'émetteur envoie sur la ligne un signal carré du type de celui de la figure 12 pour la séquence de bits 1010 par exemple.

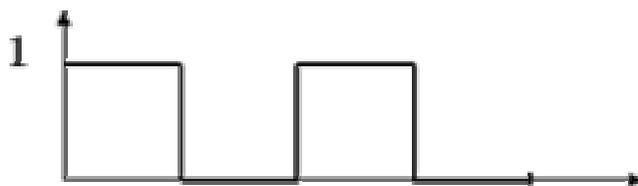


Figure 12 : Signal carré de la séquence de bits 1010

b) Transmission modulée

Le principal problème de la transmission en bande de base est la dégradation du signal très rapide en fonction de la distance parcourue, c'est pourquoi elle n'est utilisée qu'en réseau local (<5km) et pas du tout en radio. Il serait en effet trop coûteux de prévoir des *répéteurs* pour régénérer régulièrement le signal. C'est pourquoi sur les longues distances on émet un signal sinusoïdal qui, même s'il est affaibli, sera facilement décodable par le récepteur. Ce signal sinusoïdal est obtenu grâce à un *modem* (modulateur démodulateur) qui est un équipement électronique capable de prendre en entrée un signal en bande de base pour en faire un signal sinusoïdal (modulation) et l'inverse à savoir restituer un signal carré à partir d'un signal sinusoïdal (démodulation). Autrement dit il permet de passer de signaux numériques discrets (0 ou 1) à des signaux analogiques continus faciles à transmettre en radio.

Il existe trois principaux types de modulation décrits ci-dessous [I.14]:

- la *modulation d'amplitude* (Figure 13) envoie un signal d'amplitude différente suivant qu'il faut transmettre un 0 ou un 1. Cette technique est efficace si la bande passante et la fréquence sont bien ajustées. Par contre, cette modulation est sensible aux perturbations (orage, lignes électriques...), car si un signal de grande amplitude (représentant un 1) est momentanément affaibli le récepteur l'interprétera à tort comme un 0.

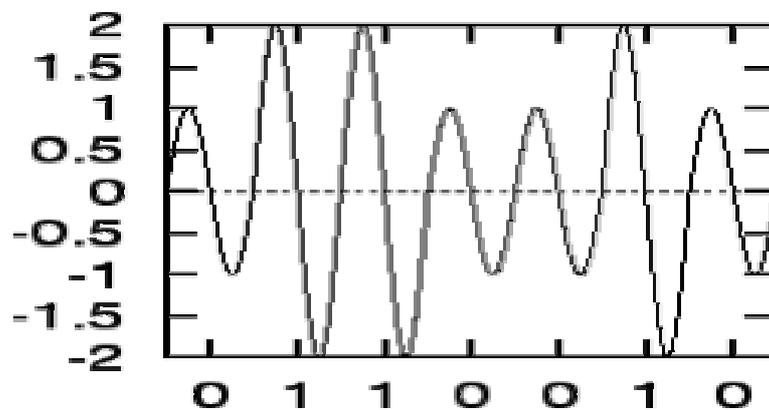


Figure 13 : Exemple de modulation d'amplitude

- la *modulation de fréquence* (Figure 14) envoie un signal à une fréquence différente pour transmettre un 1. Comme l'amplitude importe peu, c'est un signal très résistant aux perturbations (la radio FM est de meilleure qualité que la radio AM) et assez facile à détecter.

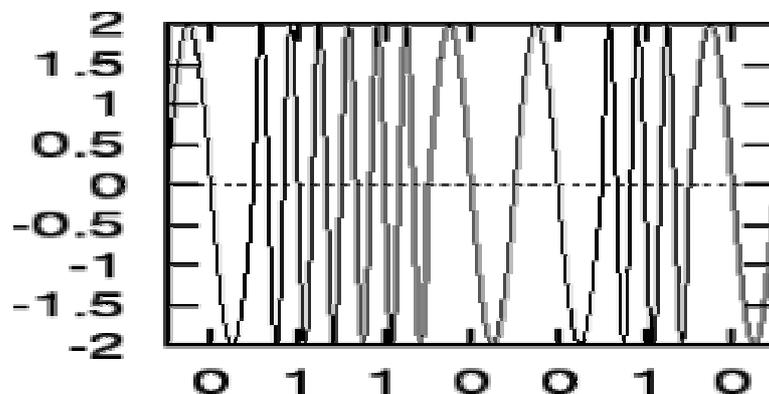


Figure 14 : Exemple de modulation de fréquence

- la *modulation de phase* (Figure 15) change la phase du signal (ici de 180°) suivant qu'il s'agit d'un 0 (phase montante) ou d'un 1 (phase descendante).

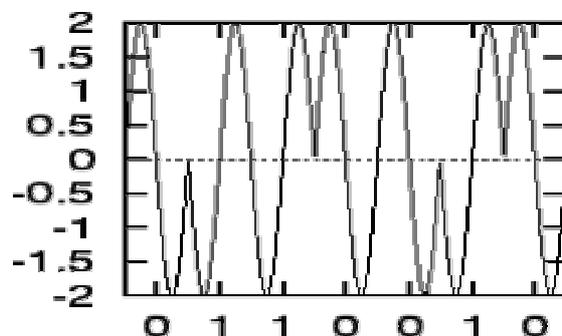


Figure 15 : Exemple de modulation de phase

Dans les exemples donnés ci-dessus on a seulement 2 niveaux possibles à chaque fois, donc on a uniquement la possibilité de coder 2 valeurs différentes à chaque instant, dans ce cas 1 baud donne 1bit/s. De manière plus sophistiquée, il existe des modems capables de moduler un signal suivant plusieurs niveaux, par exemple 4 fréquences différentes que le modem récepteur saura lui aussi distinguer. Dans ce cas, chaque signal envoyé code 2 bits donc 1 baud = 2 bit/s. Il est même possible de transmettre des signaux mêlant les différentes modulations présentées comme dans le cas de la norme V29 qui module à la fois l'amplitude du signal sur 2 niveaux et la phase sur 8 niveaux ($0^\circ, 45^\circ, \dots, 315^\circ$). En combinant les 2 modulations, on obtient ainsi 16 signaux différents possibles à chaque instant, permettant de transmettre simultanément 4 bits à chaque top d'horloge (1 baud = 4 bit/s). Dans les chapitres suivants, nous décrirons quelques modulations plus en détail.

I-8.3 La couche MAC

La couche MAC utilisée dans le modèle 802 détermine donc la façon dont les différentes machines du réseau vont se partager le medium (radio, paire torsadée...). Ce paragraphe décrit les différents moyens utilisés pour mener à bien cette tâche.

Afin de partager de manière efficace ce médium de communication, plusieurs méthodes ont été mises au point. Le multiplexage est le terme qui désigne ces moyens de partage de ressources mis en œuvre par la couche MAC.

Le multiplexage consiste à faire transiter sur une seule et même ligne de liaison, dite *voie haute vitesse*, des communications appartenant à plusieurs paires d'équipements émetteurs et récepteurs comme représenté dans la figure 16. Chaque émetteur est raccordé à un multiplexeur et chaque récepteur est raccordé à un démultiplexeur par une liaison dit *voie basse vitesse*.



Figure 16 : Principe de multiplexage

Plusieurs techniques sont possibles :

- le *multiplexage fréquentiel* (figure 17) consiste à affecter à chaque voie basse vitesse une bande passante particulière sur la voie haute vitesse en s'assurant qu'aucune bande passante de voie basse vitesse ne se chevauche. Le multiplexeur prend chaque signal de voie basse vitesse et le ré-emet sur la voie haute vitesse dans la plage de fréquences prévues. Ainsi plusieurs transmissions peuvent être assurées simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières, et à l'arrivée le démultiplexeur est capable de discriminer chaque signal de la voie haute vitesse pour l'aiguiller sur la bonne voie basse vitesse.

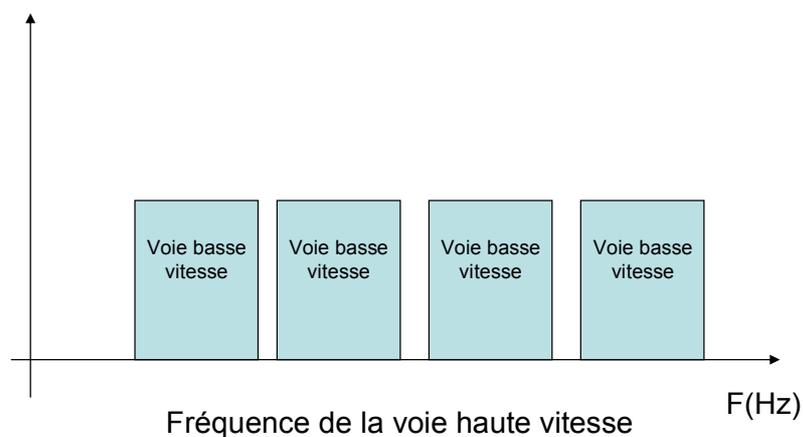


Figure 17 : Multiplexage fréquentiel

- le *multiplexage temporel* (figure 18) partage dans le temps l'utilisation de la voie haute vitesse en l'attribuant successivement aux différentes voies basse vitesse même si celles-ci n'ont rien à émettre. Suivant les techniques, chaque intervalle de temps attribué à une voie lui permettra de transmettre 1 ou plusieurs bits.

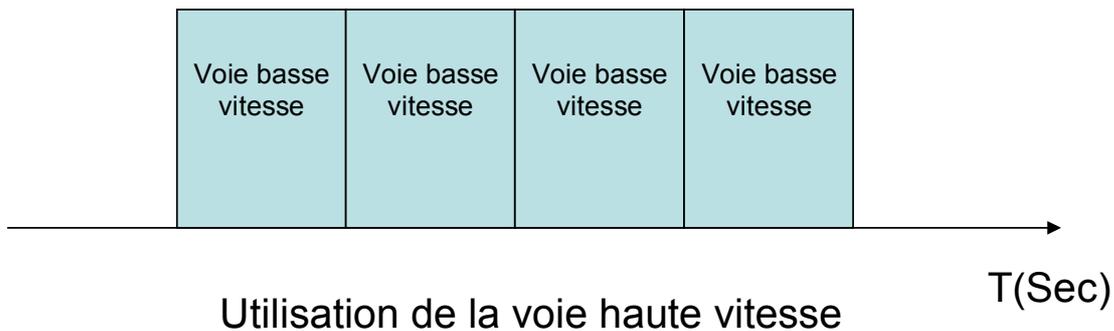


Figure 18 : Multiplexage temporel

- le *multiplexage statistique* améliore le multiplexage temporel en n'attribuant la voie haute vitesse qu'aux voies basse vitesse qui ont effectivement quelque chose à transmettre. En ne transmettant pas les silences des voies basses cette technique implantée dans des *concentrateurs* améliore grandement le débit global des transmissions mais elle fait appel à des protocoles de plus haut niveau et est basée sur des moyennes statistiques des débits de chaque ligne basse vitesse.

Il existe d'autres techniques que nous ne décrivons pas ici car les systèmes étudiés n'y font pas référence. Afin de mieux comprendre l'impact de la couche MAC sur les performances des systèmes de communications sans fil, nous allons faire une étude simple et très connue d'un système utilisant le protocole ALOHA.

I-8.4 Etude d'un cas simple, le protocole ALOHA [I.15]

Le premier protocole de réseau local, nommé " Aloha ", a été mis au point en 1970 par Abramson à l'université d'Hawaï. Il voulait assurer la communication entre des établissements de l'université situés sur des îles éloignées les unes des autres.

Le principe de ce protocole est que tous les ordinateurs émettent en même temps, reçoivent en même temps, donc communiquent en même temps sur la même bande de fréquence. Il s'agit donc d'une conversation à plusieurs, principe opposé à celui de la commutation qui procède en allouant à chaque conversation des ressources cloisonnées les unes par rapport aux autres.

Donc, lorsqu'une machine a une information à transmettre sur le réseau via un medium partagé, elle envoie sa trame (ensemble de bits) sans se préoccuper si une autre machine est en transmission. Il en résulte des collisions (figure 19) d'informations entraînant une perte de données.

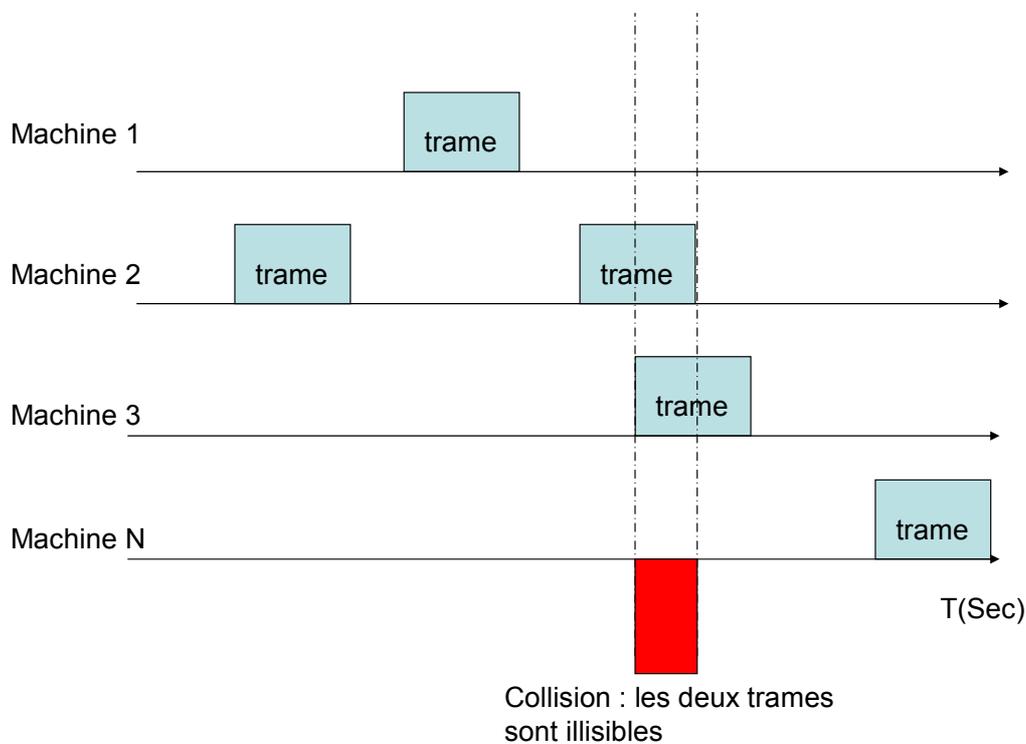


Figure 19 : Principe de collision de trame

L'émetteur découpe le message en trames comportant l'adresse du récepteur et un numéro d'ordre. Les ordinateurs reçoivent toutes les trames émises sur le réseau et trient celles qui leur sont destinées en lisant les adresses. Le destinataire reconstitue le message en ouvrant ces trames pour en extraire le contenu et le ranger dans l'ordre après celui des trames précédentes.

Appelons " durée de trame ", la durée (fonction inverse du débit) de l'émission d'une trame par un ordinateur, et notons G , le nombre moyen de trames émises pendant une durée de trame. Supposons que le nombre des trames émises pendant une durée de trames obéit à la loi de Poisson, qui rend compte des processus d'arrivée dans une file d'attente. La probabilité que le nombre des trames émises pendant une durée de trames soit égal à k est alors :

$$P(k) = G^k \cdot e^{-G} / k! \quad (I.1)$$

Notons t la durée de trame. Pour qu'une trame ne provoque pas de collision, il faut qu'aucun autre ordinateur ne commence à émettre pendant une durée égale à $2t$ (figure 20) :

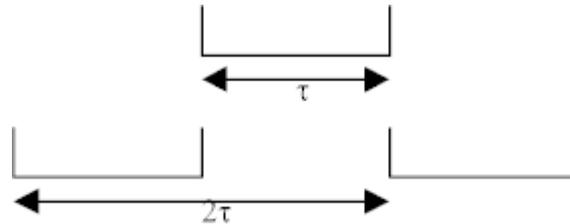


Figure 20 : représentation de la durée occupée par une trame sans collision

En supposant que le nombre d'ordinateurs est grand, la probabilité pour qu'il n'y ait pas de trame émise pendant la durée t est $P(0)$. Il résulte de (I.1) que :

$$P(0) = e^{-G} \quad (I.2)$$

La probabilité pour que deux événements indépendants se produisent étant égale au produit de leurs probabilités, la probabilité pour qu'il n'y ait pas de trame émise pendant deux durées t successives est $[P(0)]^2$, soit e^{-2G} .

Notons S le nombre moyen de trames " utiles ", c'est-à-dire émises sans collision. Comme il y a en moyenne G trames émises par durée de trame, on a :

$$S = Ge^{-2G} \quad (I.3)$$

La forme de cette fonction est indiquée par le graphique ci-dessous (figure 21). S atteint son maximum, égal à 0,18, pour $G = 0,5$.

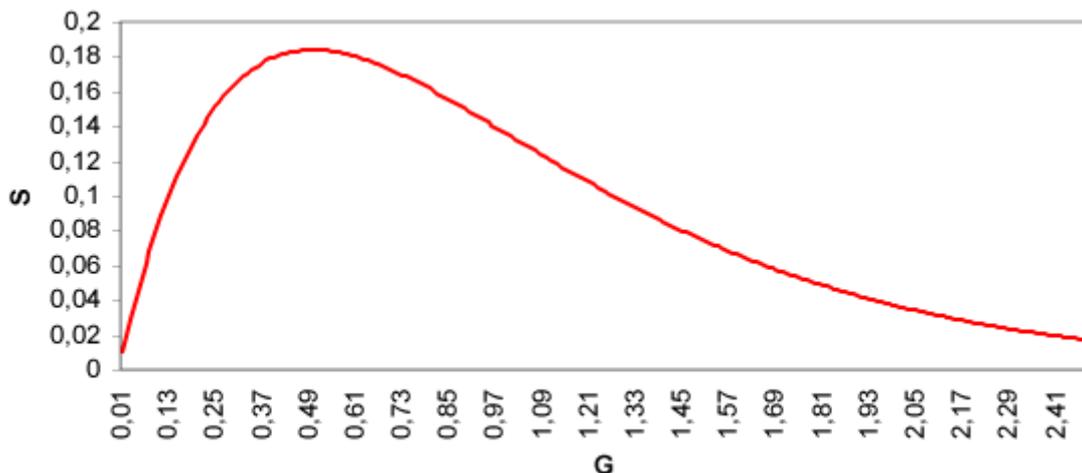


Figure 21 : Rendement du protocole Aloha

Cette fonction mérite un examen attentif. Lorsque G est très petit, c'est-à-dire lorsque le nombre de trames émises par durée de trame est très faible, S est égal à G : le réseau n'étant pas encombré, les trames passent sans collision.

Si G croît, la probabilité des collisions augmente. S devient inférieur à G .

Le maximum de S est atteint lorsque $G = 0,5$, c'est-à-dire lorsque les ordinateurs émettent en moyenne une trame pour deux durées de trames. Alors $S = 0,18$: en moyenne seules 36 % ($= 0,18 / 0,50$) des trames émises passent sans collision. Le nombre de trames utiles par durée de trame étant 0,18, le réseau peut véhiculer des données pendant 18 % du temps d'utilisation. Ce taux de 18 % est un maximum : *le débit disponible pour le transport des données est égal au plus à 18 % du débit physique du réseau.*

Si G croît au delà de 0,5, le nombre de collisions croît encore et le nombre de trames utiles décroît. Pour des valeurs importantes de G , S est très faible : le nombre de collisions est tellement grand que le nombre des trames utiles devient très petit.

NB : on peut s'étonner que S ne devienne pas nul lorsque $G > 1$, du fait qu'il y a plus d'une trame émise par durée de trame. G est un nombre moyen, et pendant certaines durées de trame il peut y avoir moins d'une trame émise même si $G > 1$.

Aloha discrétisé :

En 1972, Roberts mit au point une version perfectionnée du protocole Aloha : une horloge installée sur le réseau émet un signal à la fin de chaque durée de trame [I.15]. Un ordinateur n'a le droit d'émettre qu'à la réception du signal de l'horloge : au lieu d'émettre une trame dès qu'il en a envie, il doit donc attendre le prochain signal d'horloge (figure 22). Une collision se produira si deux ordinateurs ont eu envie d'émettre pendant une même durée de trame, car ils émettront ensemble au reçu du signal d'horloge.

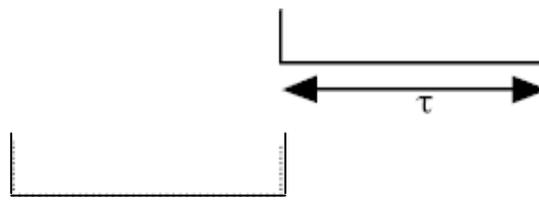


Figure 22 : représentation de la durée occupée par une trame sans collision

L'astuce de ce protocole est de *diminuer la durée du silence nécessaire pour éviter la collision* (figure 22). Cette durée était de $2t$ avec Aloha, elle devient de t seulement avec Aloha " discrétisé ". Ce perfectionnement a un coût : il faut installer une horloge sur le réseau, et mettre sur chaque ordinateur le dispositif lui interdisant d'émettre si ce n'est à la réception du signal de l'horloge.

On trouve dans ce cas :

$$S = Ge^{-G} \quad (I.4)$$

Le maximum de S est atteint pour $G = 1$ et il vaut 0,37.

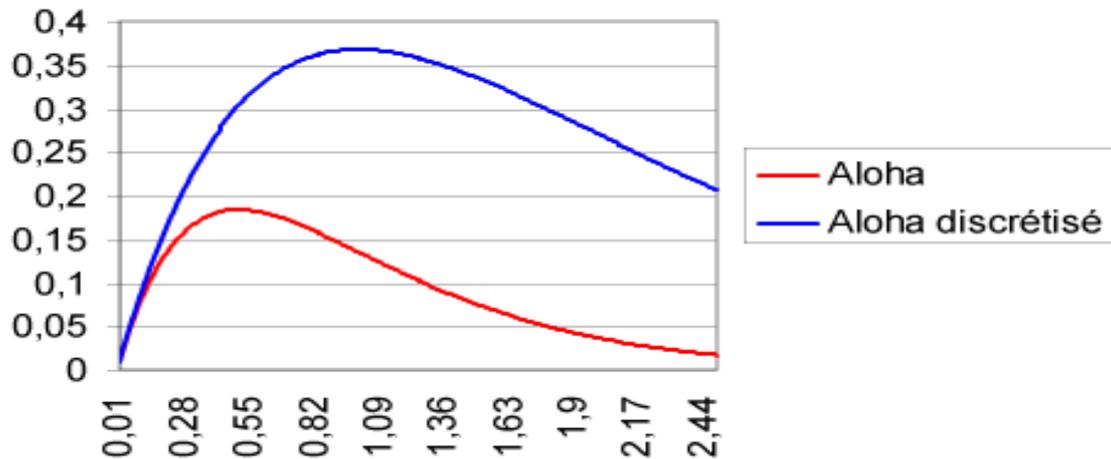


Figure 23 : Rendement comparé d'Aloha et Aloha discrétisé

" Aloha discrétisé " est deux fois plus efficace qu'" Aloha ", puisqu'il permet d'utiliser 37 % du débit physique du réseau (figure 23).

Ce cas simple est une référence en matière d'étude d'efficacité de protocoles. Il démontre bien la façon dont les machines se partagent le réseau, ce qui est très important pour l'efficacité de ce dernier. La couche MAC impose sa loi aux couches supérieures car si elle est inefficace, c'est tout le réseau qui en pâti, elle constitue avec la couche physique, le dernier maillon de la chaîne de transmission.

De ce fait, des réseaux utilisant le medium radio imposent une étude couplée de la couche MAC avec la couche physique, cette dernière étant très importante car elle définit la taille totale du canal, en terme de débit, que vont se partager les différentes machines.

De telles études peuvent paraître simples dans le cas étudié ci-dessus mais se révèlent de plus en plus complexes à mesure que les systèmes évoluent. Durant les travaux menés dans cette thèse, nous nous sommes efforcés de faire l'étude de quelques systèmes à travers leurs couches MAC et physiques.

I-9 CONCLUSION

Ce chapitre a donc introduit les différentes catégories de réseaux de communication, puis c'est attaché au travers d'exemples simples, à démontrer l'importance des couches basses du modèle en couche. Les réseaux utilisant des couches complexes étant très difficiles à quantifier de manière théorique, l'utilisation de logiciels de simulation numérique est indispensable, autant pour valider les résultats théoriques que pour réellement mesurer leur efficacité dans des cas trop complexes.

Ainsi, pour mener ces travaux de thèse, le logiciel utilisé est un logiciel de simulation de réseaux numérique appelé OPNET (Optimized Network Engineering Tool) [II.1]. Le chapitre suivant en fait une présentation rapide mais non exhaustive.

CHAPITRE II

L'outil de simulation OPNET

II-1 INTRODUCTION

Ce chapitre explique le fonctionnement général du logiciel OPNET en présentant chaque éditeur utilisé. Puis dans un deuxième temps, les procédures suivies pour améliorer cette version d'OPNET sont décrites à savoir l'intégration d'un diagramme de rayonnement complexe et le couplage avec un logiciel de propagation développé au sein du laboratoire. Puis pour terminer, nous traitons un exemple de système de communication afin de démontrer l'utilité d'un tel outil.

II-2 PRESENTATION GENERALE

OPNET est un environnement graphique créé pour permettre de concevoir, étudier des réseaux numériques, et des protocoles de communication avec une grande flexibilité.

Il travaille sur toutes les couches du modèle OSI et permet de récupérer une grande quantité d'informations tant que l'on reste au niveau de granularité égale au paquet. Il permet également de simuler un bon nombre de matériel existant comme les routeurs, les serveurs d'application etc... Grâce à cela, toutes les configurations de réseaux deviennent très faciles à modéliser et simuler.

II-2.1 Une modélisation orientée objet

Son approche est orientée objet [II.1] pour le développement et dispose d'une interface graphique simple dans laquelle on place les différents composants du réseau à étudier. OPNET supporte tous les types et toutes les technologies de réseaux.

a) Objet réseau

Rappelons tout d'abord qu'un réseau est un ensemble complexe constitué de matériels, logiciels et supports de transmissions, c'est à dire un ensemble de nœuds et de liens, interconnectés entre eux pour communiquer.

OPNET dispose de deux types de nœuds - fixes (serveurs, stations de travail, routeurs...) ou mobiles (téléphones portables, satellites...) - et de trois types de liens - point à point, bus ou radio.

Lorsque le réseau devient complexe, il est décomposé en plusieurs sous réseaux, afin de simplifier sa visualisation et sa modélisation. La définition de la topologie d'un réseau se fait grâce à l'éditeur de projet (Project Editor) comme le montre la figure 24.

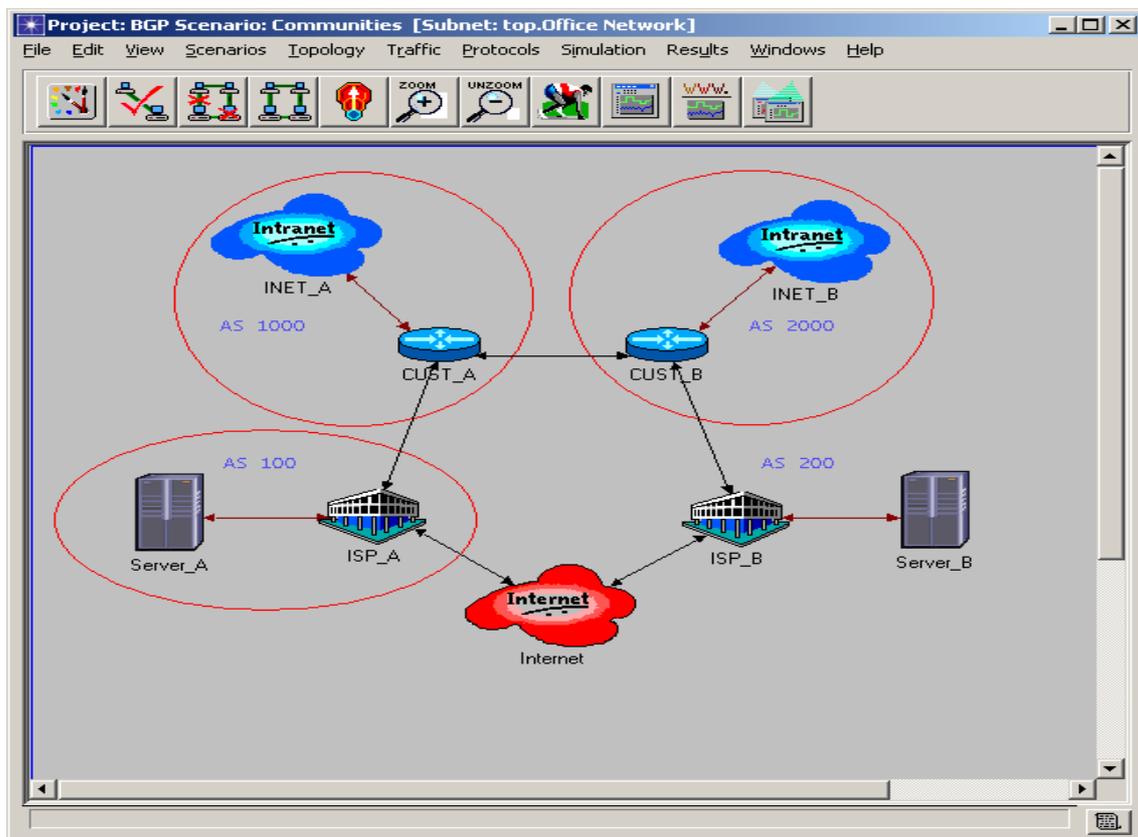


Figure 24 : éditeur de projet, visualisation de l'objet réseau

La figure 24 montre un exemple de projet édité sous OPNET. On peut y voir la présence de nombreuses machines comme des serveurs (Server_A et Server_B), un nuage Internet qui simule le trajet emprunté par les informations lorsqu'elles transitent sur le réseau mondial, et des réseaux locaux (ISP_A et ISP_B).

b) Objet nœud

Un nœud est formé d'un ensemble de blocs fonctionnels appelés modules de processus qui peuvent être des processeurs, des files d'attente, des générateurs, des émetteurs, des récepteurs ou bien des antennes. Ils sont liés entre eux par des connexions de type flux de paquets (pour le transport des données) ou de type fil statistique (pour la transmission de valeurs).

Les éléments précédents sont assemblés grâce à l'éditeur de nœuds (figure 25) appelé « Node Editor » afin de créer des éléments de réseau comme un routeur, un ordinateur, etc.

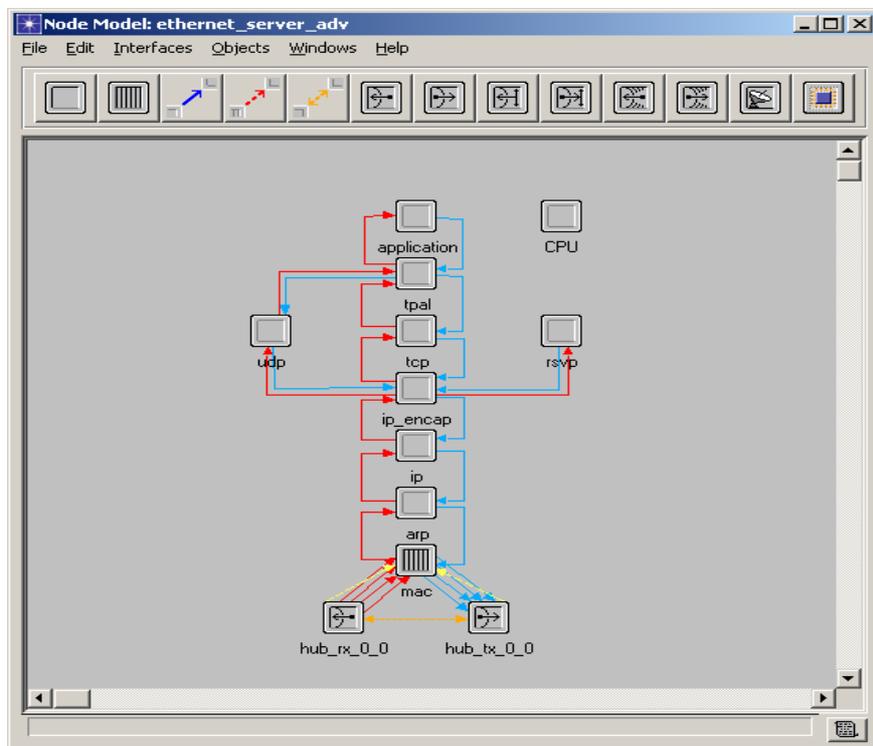


Figure 25 : Exemple de nœud construit avec l'éditeur de nœuds

La figure 25 montre un exemple de nœud à savoir un serveur Ethernet avec toutes les couches utilisées par celui-ci (Application, TCP, IP, etc...).

c) Objet processus

Un processus définit le comportement d'un module appartenant à un nœud. Construit à partir de l'éditeur de processus (Process Editor), il est décrit par un diagramme de transitions et d'états. Chacun de ces états est programmé en langage C ou C++.

La figure 26 illustre un diagramme d'état à l'intérieur d'un processus.

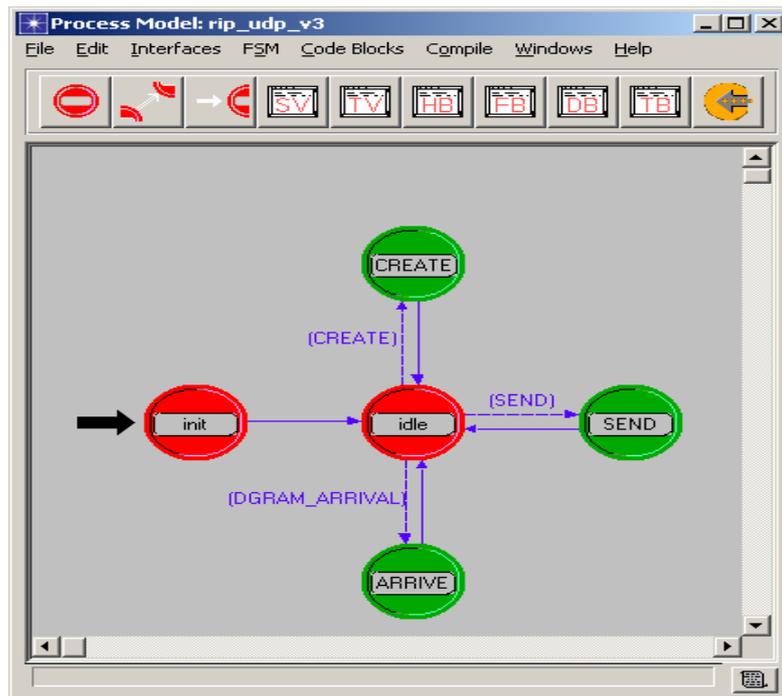


Figure 26 : Editeur de processus avec le diagramme d'état

Les états d'un modèle de processus sont de l'un des trois types suivants :

- état initial : état dans lequel se trouve un processus en début de simulation,
- état forcé (vert) : état dans lequel un processus ne peut pas interrompre son activité durant la simulation c'est-à-dire qu'il exécute en une seule fois toutes ses lignes de code,
- état non forcé (rouge) : état dans lequel un processus exécute une première partie de son code C, s'interrompt pour passer le relais au noyau de simulation ou à un autre module puis redevient actif lorsqu'il reprend la main.

Chaque état comporte deux blocs d'exécution : celui d'entrée (Enter Execs) qui s'exécute lorsque le processus entre dans cet état et celui de sortie qui se déroule avant que le processus ne le quitte. Les différents états sont reliés entre eux par des transitions qui décrivent la possibilité pour un processus de passer d'un état à un autre. Elles sont évaluées après l'exécution du code de sortie d'un état, en vue de ne sélectionner que celle dont la condition est vraie.

Une fois le processus construit, il est alors nécessaire de le compiler afin de le rendre exécutable et utilisable dans un modèle de nœud. La simulation de ce dernier est ensuite gérée par un outil appelé noyau de simulation (Simulation Kernel) qui coordonne les différents processus mis en jeu. A chaque exécution du code d'un état, il y a programmation dans une liste, connue sous le nom d'échéancier, d'un ou de plusieurs événements appelés interruptions. Le noyau de simulation, qui gère cet échéancier, passe donc le contrôle de la simulation à un module donné, en lui envoyant l'interruption qui arrive à la tête de cette liste. L'événement suivant prend alors la place de l'interruption précédente.

d) Résumé et principe de développement d'un projet

Lorsque l'on crée un nouveau projet [II.2], il faut dans un premier temps définir les nœuds qui vont intervenir dans le réseau (ordinateurs, routeur, etc...). Chacun de ces nœuds, comme vu précédemment, va être composé de différents modules (files d'attente, générateur de paquets, etc...) qui eux même sont composés d'un processus réalisé avec un diagramme d'état. Ce diagramme d'état doit définir quel état prend le processus (donc le module) en fonction de l'évènement (arrivée d'un paquet par exemple) généré par le noyau de simulation.

Afin de clarifier ce principe, nous allons examiner en détail une simple communication entre deux machines à savoir la création et la transmission d'un seul paquet entre la machine numéro 0 et la numéro 1.

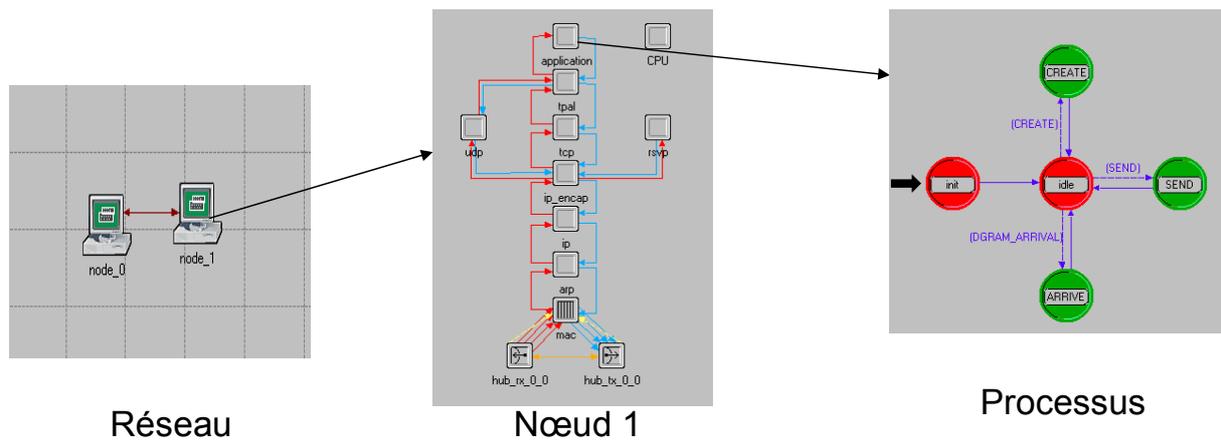


Figure 27 : Analyse d'une simulation simple

Tout d'abord, il faut créer le paquet dans la machine numéro 0 à savoir le nœud 0 au début de la simulation. Le paquet est donc créé dans le processus nommé ici application appartenant au nœud 0 au début de la simulation (figure 27).

Ce paquet est ensuite transmis au module suivant par l'intermédiaire d'une connexion de type flux de paquets afin de subir certains traitements que nous ne détaillerons pas ici (figure 28).

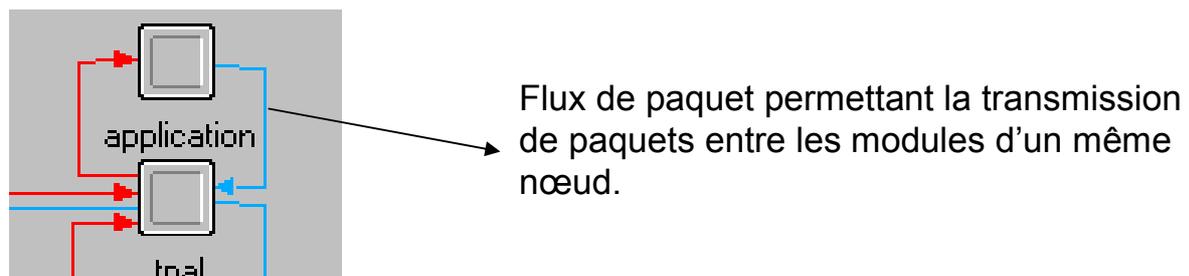


Figure 28 : Transmission du paquet entre les modules

Il finira par arriver aux modules de transmission qui le feront parvenir au nœud numéro 1 (machine 1).

A ce moment là, le noyau de simulation va créer un évènement dans les processus de réception du nœud numéro 1. Ces processus vont ensuite se placer dans l'état prévu lorsque ils reçoivent un paquet et le traiter comme le développeur l'a programmé (le détruire, le transmettre à un autre nœud, etc....).

On a montré ici que le logiciel permet une modélisation très fine des différents éléments d'un réseau. Le développeur peut donc modéliser le comportement de différentes machines d'un réseau quelconque et analyser le fonctionnement de ce dernier.

e) L'objet Paquet

Comme nous l'avons vu brièvement ci-dessus, l'unité d'échange de données dans les simulations OPNET est le paquet. Ce dernier, structuré en plusieurs champs, permet de transmettre des informations entre les divers objets d'un modèle. Il est créé puis détruit au cours d'une simulation.

Son format est défini grâce à l'éditeur OPNET appelé *Packet Format Editor* (figure 29). Chaque champ est représenté par des boîtes rectangulaires proportionnelles à la taille (en bits, en octets...) que l'utilisateur spécifie.

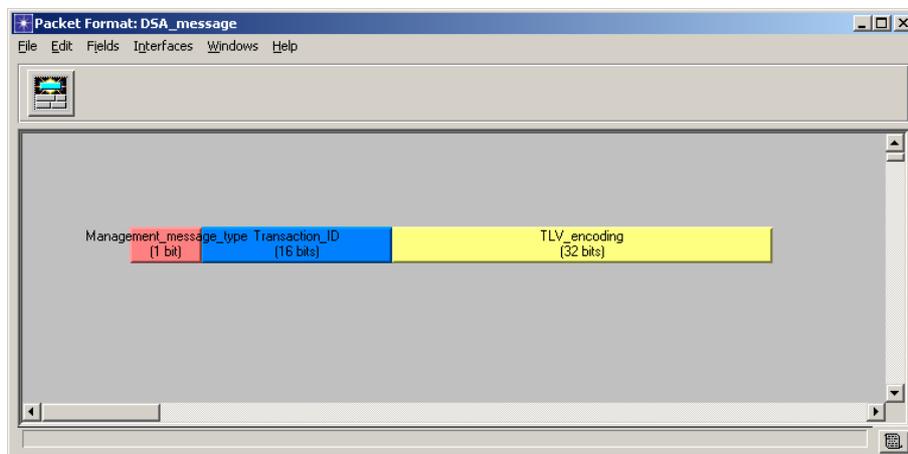


Figure 29 : Exemple de format de paquet construit avec l'éditeur OPNET

Par exemple, la figure 29 montre un paquet utilisé pour transmettre les informations de management avec ses différents champs.

f) Fonctions KERNEL (KP)

Afin de faciliter la tâche du développeur, OPNET fournit un certain nombre de fonctions appelées procédures KERNEL (KP). Ces fonctions, écrites en langage C [II.3], permettent de réaliser des opérations fréquentes, complexes ou fastidieuses. Ainsi, existent par exemple des fonctions de gestion de la mémoire, de traitement de paquets ou de résultats.

Elles peuvent être appelées par le code source C de certains modules (comme les processus) mais aussi par d'autres fichiers C (comme les *Transceiver Pipelines*). Par exemple, pour transmettre un paquet comme vu précédemment, on utilise la KP « op_pk_send (paquet) ».

g) Editeurs OPNET supplémentaires

Outre les quatre éditeurs précédemment cités (*Project-Node-Process-Packet Editors*), OPNET en comporte dix autres parmi lesquels deux méritent un peu plus d'attention.

i) Editeur de diagramme de rayonnement (*Antenna pattern editor*)

Cet outil (figure 30) permet de modéliser le gain d'une antenne dans différentes directions par une saisie point à point des valeurs de gain dans différents plans et de visualiser en trois dimensions le diagramme de rayonnement réalisé.

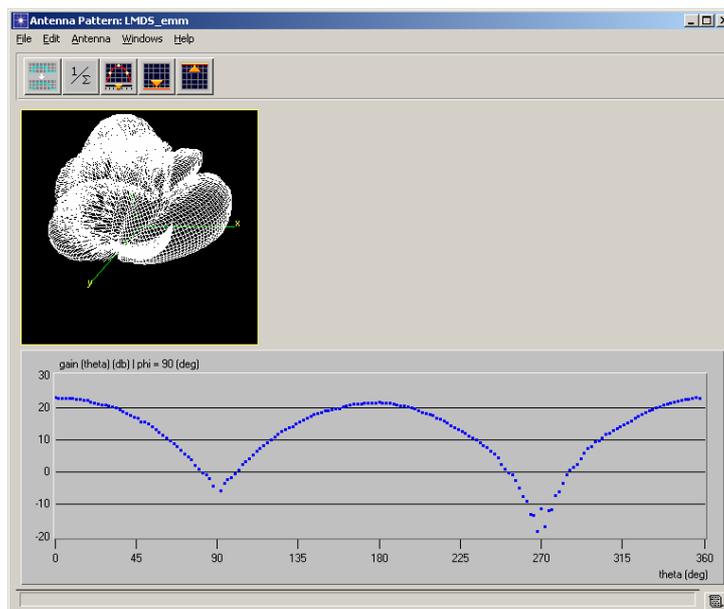


Figure 30: Editeur de diagramme

Sur la figure 30, nous voyons la représentation en 3 dimensions du diagramme édité puis la valeur du gain pour un angle phi donné en fonction de l'angle teta.

Remarque: cet éditeur utilise des conventions différentes de celles généralement employées, tant au niveau des angles que du repère, qui n'est pas ici un trièdre direct (figure 31):

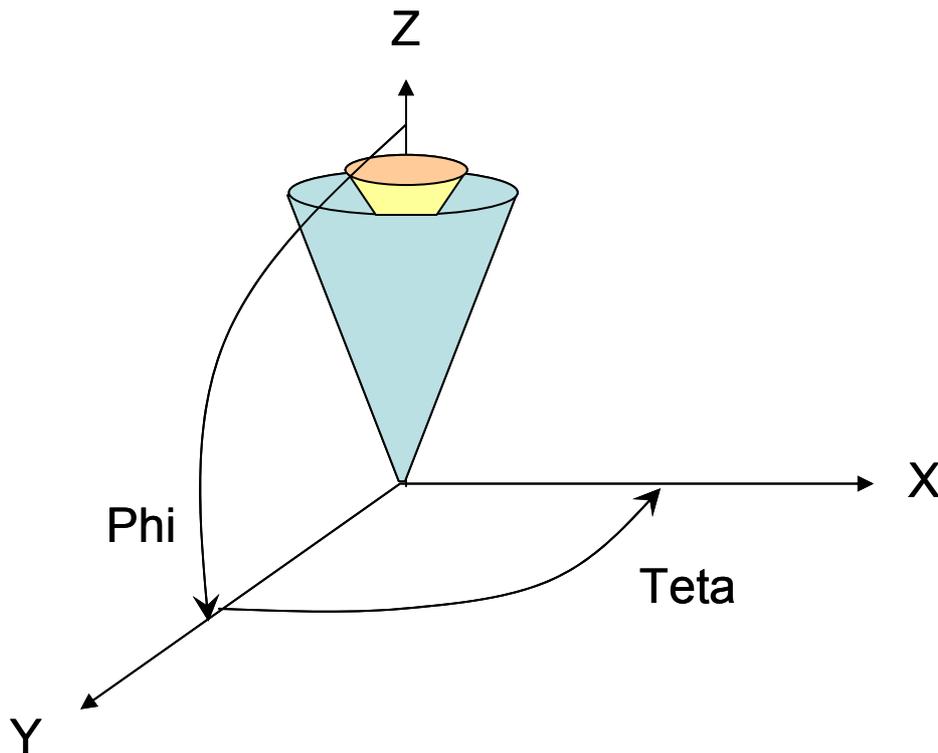


Figure 31 : convention utilisée par OPNET

En effet la figure 31 montre que le trièdre n'est pas direct et que les appellations des angles teta et phi sont inversées.

ii) Editeur de sondes (Probe editor)

Cet éditeur (figure 32) permet de choisir les statistiques qui seront seules collectées lors de la simulation. Il existe différentes sortes de statistiques mais les deux plus utilisées sont :

- les statistiques globales qui concernent le réseau dans son ensemble,
- les statistiques locales qui sont spécifiques à un objet (lien ou nœud) particulier du réseau.

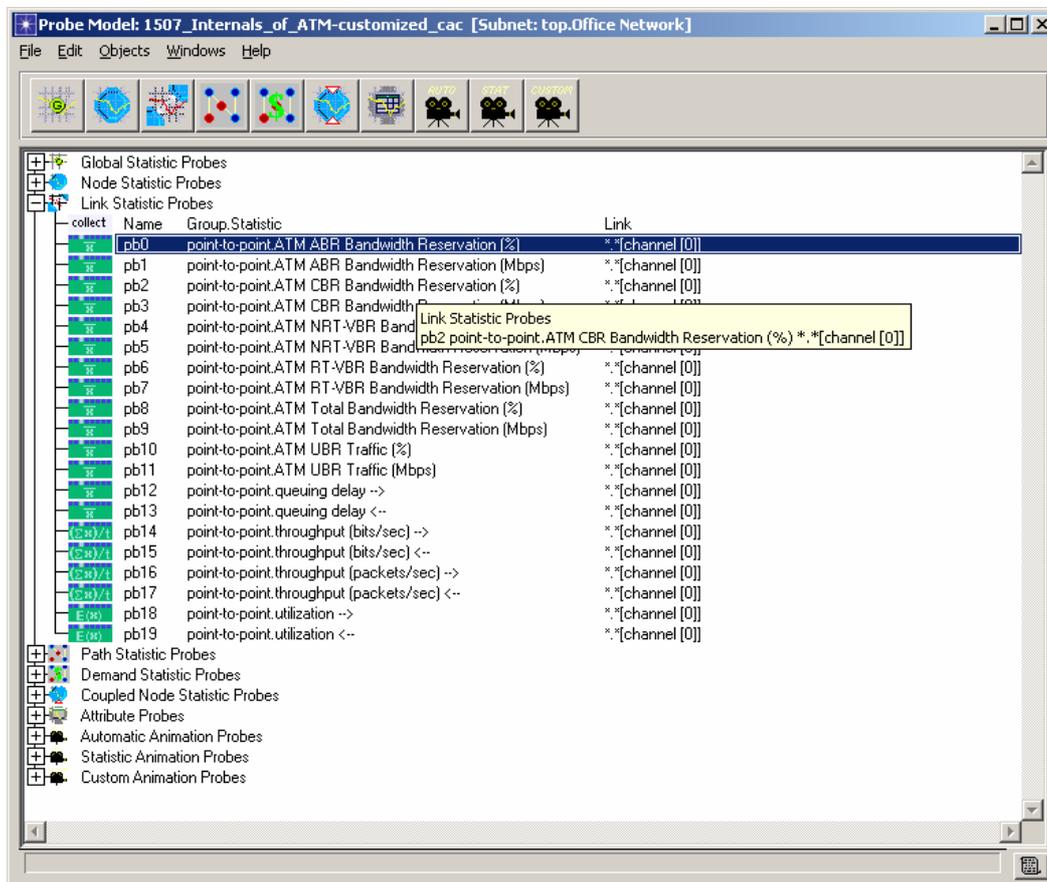


Figure 32 : Editeur de sondes

La figure 32 montre un exemple de configuration des sondes avec l'éditeur. On peut y voir que la sonde pb0 mesure la bande passante d'une liaison point à point particulière.

II-2.2 Prise de statistiques

Le réseau étant établi, il est nécessaire de choisir les différentes statistiques qui devront être récoltées au cours de la simulation.

Certaines statistiques, telles que le temps de réponse ou le taux d'utilisation d'un serveur sont prédéfinies. Cependant, l'utilisateur peut en créer d'autres afin de caractériser au mieux son réseau.

Ces nouvelles statistiques sont alors déclarées dans les différents modèles de processus de manière à pouvoir être sondées.

II-2.3 Modélisation Radio

La présentation qui va suivre concerne l'aspect radio offert par la version du logiciel OPNET dont nous disposons. Elle traite plus particulièrement de la procédure d'établissement d'un lien radio entre deux nœuds.

Chaque procédure sera décrite par un nœud radio, un lien radio, et une antenne. Le rôle de ces procédures va maintenant être détaillé.

a) Nœud radio

OPNET Modeler/Radio permet de modéliser plusieurs types de réseaux de communications sans fil, que ce soit un réseau d'antennes fixes comme le réseau TV, un réseau mobile comme celui des téléphones portables ou bien un réseau satellitaire.

En effet, il permet d'utiliser trois catégories de nœuds adaptés à chacun de ces réseaux : des nœuds fixes, mobiles et satellites. Les premiers sont repérés dans l'espace par trois coordonnées (x, y, altitude) constantes au cours du temps. Les seconds, modélisant des composants de réseau terrestre comme des automobiles, des avions ou des bateaux, ont par

définition une position variant au cours de la simulation. Ils sont caractérisés par (x, y, altitude) mais aussi par une trajectoire définie par l'utilisateur. Les nœuds satellites, quant à eux, modélisent des éléments de réseau en orbite autour de la Terre, comme des satellites ou des vaisseaux spatiaux.

b) Liens radio

Lors d'une liaison radio, il y a propagation des ondes émises dans l'air. Cette diffusion à l'ensemble du réseau fait qu'un lien radio est susceptible d'exister entre toute paire émetteur/récepteur. Chaque lien, n'existant pas en tant qu'objet physique, est établi dynamiquement au cours de la simulation entre chaque paire potentielle, mais n'est effectif que si certains paramètres tels que les bandes de fréquence, le type de modulation, la puissance émise, la distance et la direction des antennes le permettent.

Pour caractériser une liaison radio, il est nécessaire d'associer aux antennes d'émission et de réception respectivement un émetteur et un récepteur radio. Ils sont représentés par la figure 33 :

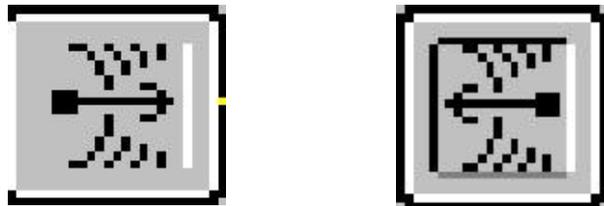


Figure 33 : Icône de réception et émission radio

Ceux-ci regroupent différents paramètres déterminants pour l'existence ou non du lien à un moment donné. Ces paramètres sont :

- *Channel* : caractérise les attributs du ou des canaux radio par les paramètres suivants:

data rate (bps) : débit d'émission ou de réception des données,

packet format : type de paquet qu'un canal peut émettre ou recevoir,

bandwidth (kHz) : largeur de bande du canal,

Min frequency (MHz) : fréquence basse du canal,

spreading code : utilisé pour spécifier du code utilisateur,

power (W) : puissance d'émission des paquets émis sur le canal (d'émission seulement),

processing gain : gain du canal de réception spécifié par l'utilisateur (donc seulement en réception).

- *Modulation* : nom de la table de modulation utilisée, calculant le taux d'erreur (BER) en fonction du rapport signal à bruit (SNR).
- *Noise figure* : représentation de l'effet du bruit thermique sur la transmission radio (réception seulement).
- *Ecc_threshold* (en bits) : proportion maximale de bits en erreur pour laquelle un paquet peut être accepté par un récepteur (réception seulement).
- *model* : attributs du modèle de communication, c'est à dire étapes du *Transceiver Pipeline*.

c) Antennes

Elles permettent soit de rayonner, soit de capter des informations transmises dans l'espace.

Chaque antenne modélisée sous OPNET possède divers attributs :

- *pattern* : nom du diagramme de rayonnement défini au moyen de l'éditeur Antenna Pattern,
- *pointing ref. phi* et *pointing ref. theta* : angles définissant le point du diagramme de rayonnement à pointer vers un récepteur donné appelé cible (ils sont pris dans le repère de l'éditeur précité donc : $0^\circ < \phi < 180^\circ$ et $0^\circ < \theta < 360^\circ$),
- *target latitude*, *target longitude* et *target altitude* : paramètres définissant la position de la cible dans l'espace et servant à orienter l'antenne vers celle-ci.

La procédure appelée *Transceiver Pipeline* modélise l'émission de paquets à travers le canal de communication en implémentant les caractéristiques de la couche physique. Elle est divisée en 14 étapes décrites en annexe 1, chacune modélisant un aspect particulier du canal.

Six d'entre elles sont associées à l'émetteur, les huit autres au récepteur, elles sont détaillées en annexe 1.

Après avoir présenté différents aspects du logiciel et insisté plus particulièrement sur son module radio, nous allons montrer quelques exemples d'application du logiciel OPNET dans la modélisation de communications sans fil.

II-3 L'AIDE AU DIMENSIONNEMENT DE SYSTEMES DE COMMUNICATION : CESALE

Le développement des télécommunications se caractérise par un accroissement de la complexité dû à l'inter-fonctionnement de réseaux hétérogènes et à la diversification des services et des natures de trafic. Le développement de l'intelligence dans les réseaux et la diversification des protocoles contribuent à cette complexité. Afin d'évaluer les performances de ces réseaux, on a besoin de modéliser les comportements de l'utilisateur, dans un but de simulation du fonctionnement de systèmes complexes et évolutifs.

II-3.1 Qu'est-ce que le dimensionnement de réseaux ?

Il faut pouvoir assurer une gestion dynamique des ressources en *optimisant le dimensionnement* des réseaux et en réalisant de bonnes prédictions des trafics.

Dimensionner un réseau revient donc à prédire ses performances en fonction de plusieurs paramètres qui peuvent être :

- le nombre d'utilisateurs de ce même réseau,
- le trafic généré par ces mêmes utilisateurs,
- la distance entre ces utilisateurs,
- etc...

Les performances sont déterminées en fonctions de différents résultats qui sont par exemple :

- le débit maximum reçu par machines,
- le temps de transmission des paquets d'une machine à l'autre,
- le nombre de paquets perdus (par exemple lors d'une collision),
- etc...

L'ensemble de ces résultats va définir ce que l'on appelle la qualité de service. Le paragraphe suivant montre une étude de dimensionnement d'un système simple, CESALE, et les avantages que peut procurer l'utilisation du logiciel OPNET.

II-3.2 Un exemple : le système CESALE

Afin de montrer l'utilité et la puissance du logiciel OPNET, nous allons faire l'étude d'un système utilisant un protocole de communication simple : CESALE (Circuit pour Entraînement des Sportifs et Aide à la Localisation).

a) Présentation de CESALE

CESALE est un dispositif de télémétrie qui comporte :

- un appareil central de réception,
- une antenne et son support,
- ceintures émettrices,
- une liaison série RS 232 pour être relié à un PC utilisateur afin d'analyser les résultats.

Ce dispositif permet de transmettre des informations d'un ensemble de sportifs équipés de ceintures émettrices réparties sur une distance de deux km maximum autour d'un système central réceptionnant ces informations.

Les informations transmises sont par exemple le rythme cardiaque fourni par un capteur fixé sur le thorax du coureur.

C'est donc un système sans fil fonctionnant à 869 MHz transmettant des paquets d'informations toutes les 3 secondes vers un système central (Figure 34). Le dimensionnement consiste ici à savoir combien de ceintures le système central de réception peut gérer simultanément tout en ayant une périodicité de réception des informations du sportif satisfaisante. En effet, si deux paquets sont transmis simultanément, il y a une collision et les deux sont illisibles par le récepteur, ils sont donc perdus ainsi que les informations qu'ils transportent. Le but est de connaître, si l'on augmente le nombre de ceintures, le temps moyen entre deux paquets reçus d'un même émetteur sachant qu'il y a un certain pourcentage des paquets émis qui seront perdus. Il faut donc rester dans une limite acceptable du taux de paquets perdus. OPNET va nous permettre de quantifier ce nombre de paquets perdus et le temps moyen entre deux paquets reçus d'une même ceinture.

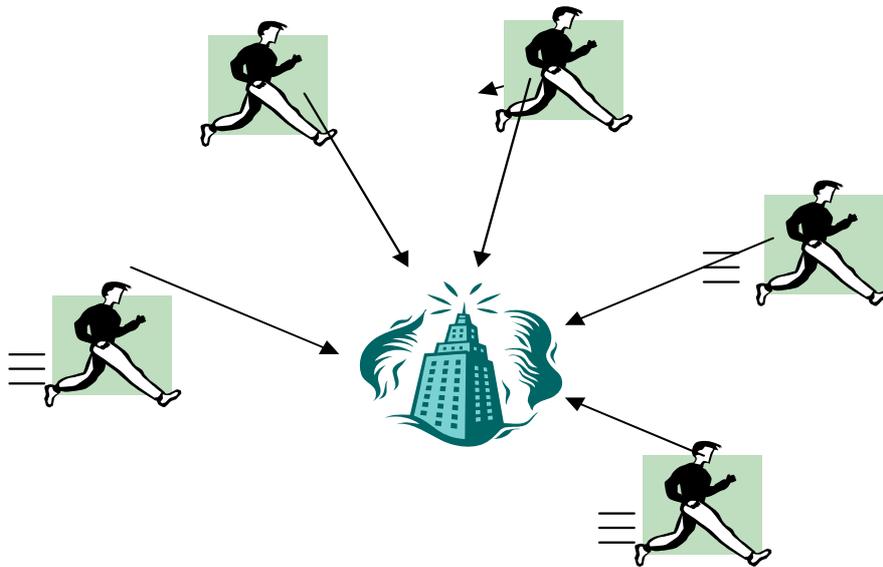


Figure 34 : Schéma de principe du système CESALE

b) Modèle OPNET de CESALE

Afin de développer un modèle OPNET qui simule la réalité, il est nécessaire de connaître les protocoles de transmission des ceintures, à savoir la façon dont elles se partagent la bande de fréquence, la rapidité de transmission des informations, leur fréquence, etc...

Ce protocole est construit sur le principe du système ALOHA décrit précédemment, à quelques variantes près : chaque ceinture émet un paquet d'une durée de 100ms toutes les 3 secondes en moyenne. A chaque émission d'un paquet, l'émetteur calcule un temps de 3 secondes après l'envoi de ce dernier. Le prochain paquet sera envoyé suivant une loi uniforme dans une fenêtre de plus ou moins 2 secondes autour de ce temps. Ceci permet de garder un temps minimum d'une seconde entre 2 paquets envoyés. La figure 35 illustre ce principe.

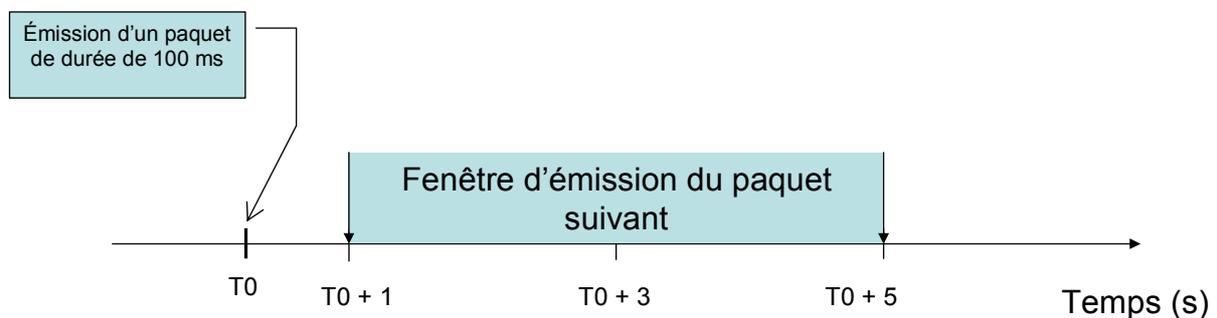


Figure 35 : Principe de transmission du protocole CESALE

La première chose à faire est de définir la taille des paquets envoyés. Les paquets réels ont une durée de 100 ms, nous choisissons donc arbitrairement un débit de 1000 bit/s, et par conséquent, la longueur du paquet sera de 100 bits. Seul le temps mis pour l'émission d'un paquet est important pour le dimensionnement du système.

Maintenant nous allons construire le réseau d'émetteurs (ceintures) et le récepteur selon la structure suivante (figure 36).

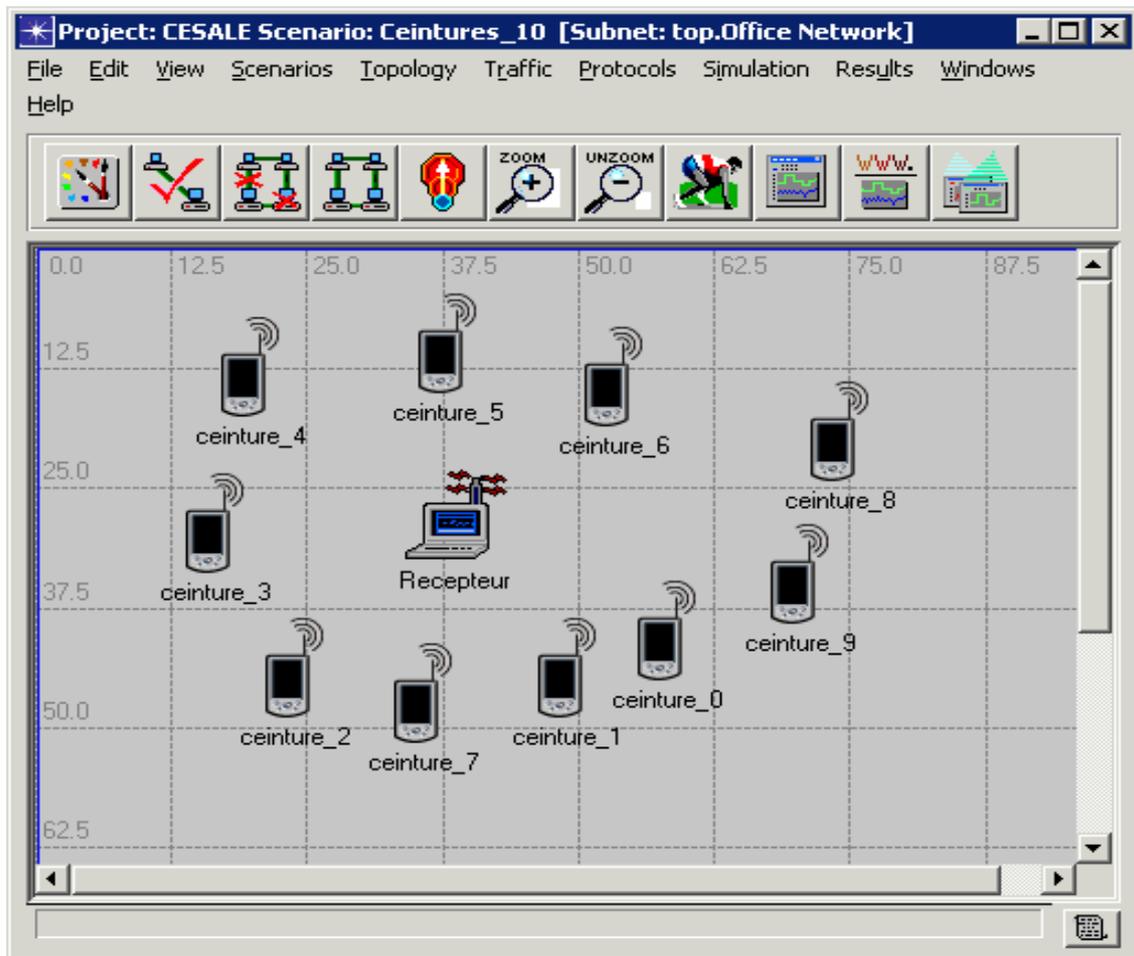


Figure 36 : Réseau CESALE modélisé sous OPNET

La figure 36 montre le réseau de ceintures autour du récepteur, ici il comporte 10 ceintures (soit 10 sportifs).

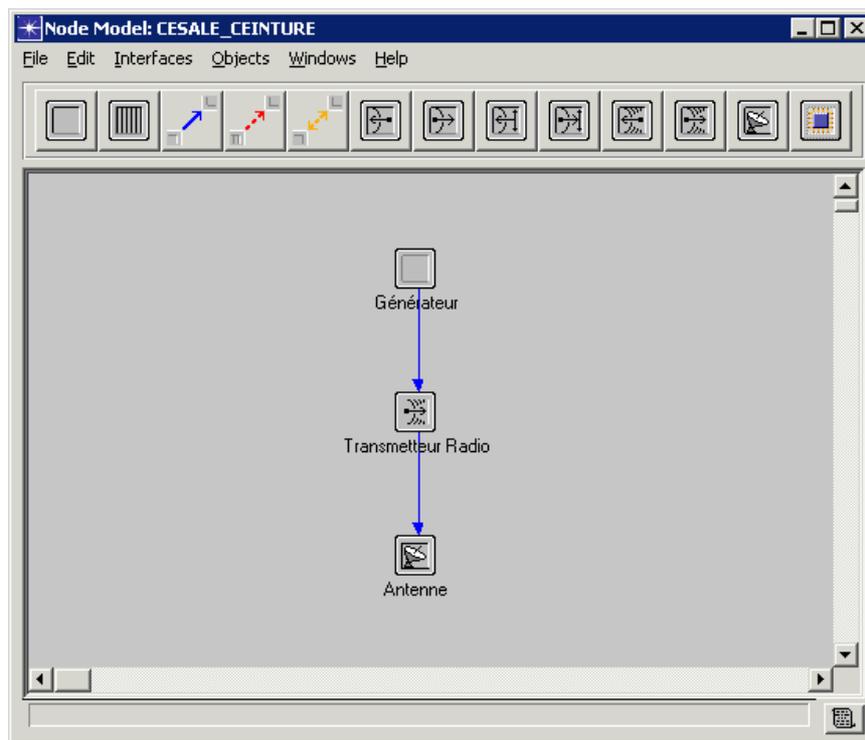


Figure 37 : Noeud OPNET pour les ceintures

Ici, (figure 37), on peut voir la fenêtre du nœud « ceinture » avec l'antenne d'émission (omnidirectionnelle), l'émetteur radio, et le générateur de paquets de 100 ms (100 bits).

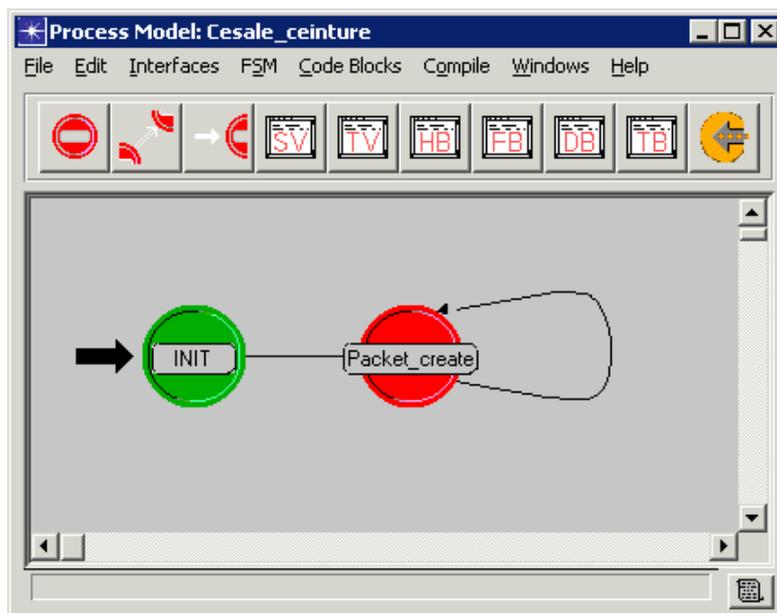
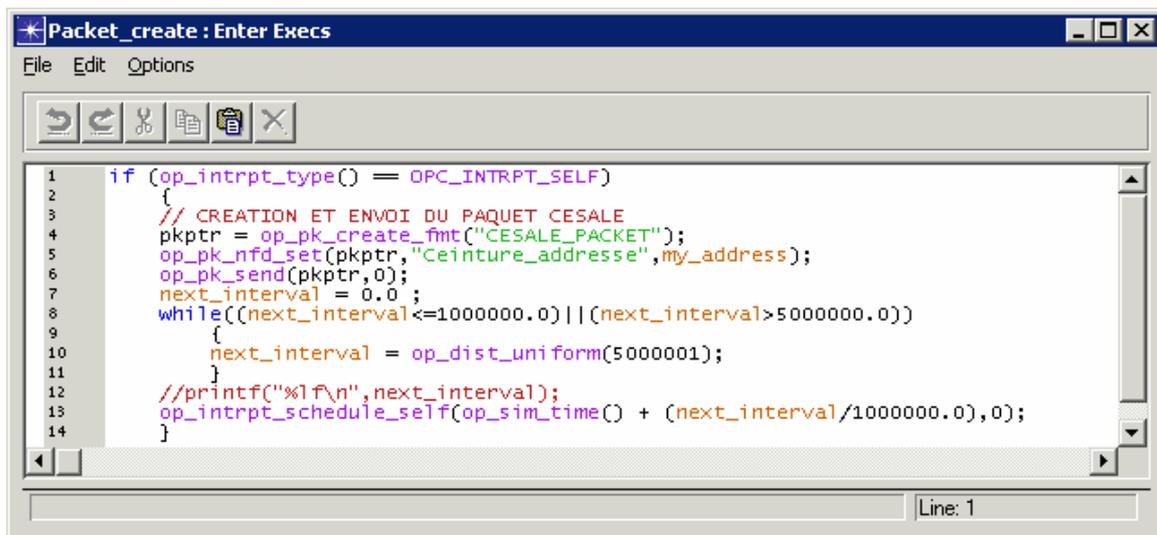


Figure 38 : Processus du générateur de paquets de la ceinture

Le processus ceinture représenté par la figure 38 spécifie le générateur de paquet. Après l'état d'initialisation, il rentre dans l'état « Packet_create » qui contient le code suivant (Figure 39) pour transmettre un paquet selon le protocole choisi.



```
1  if (op_intrpt_type() == OPC_INTRPT_SELF)
2  {
3      // CREATION ET ENVOI DU PAQUET CESALE
4      pkptr = op_pk_create_fmt("CESALE_PACKET");
5      op_pk_nfd_set(pkptr, "Ceinture_adresse", my_address);
6      op_pk_send(pkptr, 0);
7      next_interval = 0.0;
8      while((next_interval <= 1000000.0) || (next_interval > 5000000.0))
9      {
10         next_interval = op_dist_uniform(5000001);
11     }
12     //printf("%lf\n", next_interval);
13     op_intrpt_schedule_self(op_sim_time() + (next_interval/1000000.0), 0);
14 }
```

Figure 39 : Détail du code du générateur de paquet pour une ceinture

A chaque interruption générée par lui-même, le processus crée un paquet au format « CESALE_PACKET » (figure 40) contenant un champ adresse pour permettre au récepteur d'identifier la provenance du paquet (ceinture) et ainsi calculer les différentes statistiques nécessaires à l'analyse du système. On écrit dans ce champ « adresse » la valeur propre au numéro de ceinture correspondant puis on transmet ce paquet vers le transmetteur radio qui se charge de l'envoyer au récepteur. Ensuite on crée la prochaine interruption dans la fenêtre temporelle décrite plus haut (figure 36) et on la programme dans la pile d'évènement du noyau de simulation. On a ainsi une création et un envoi de paquet en moyenne toutes les trois secondes comme spécifié dans le cahier des charges.

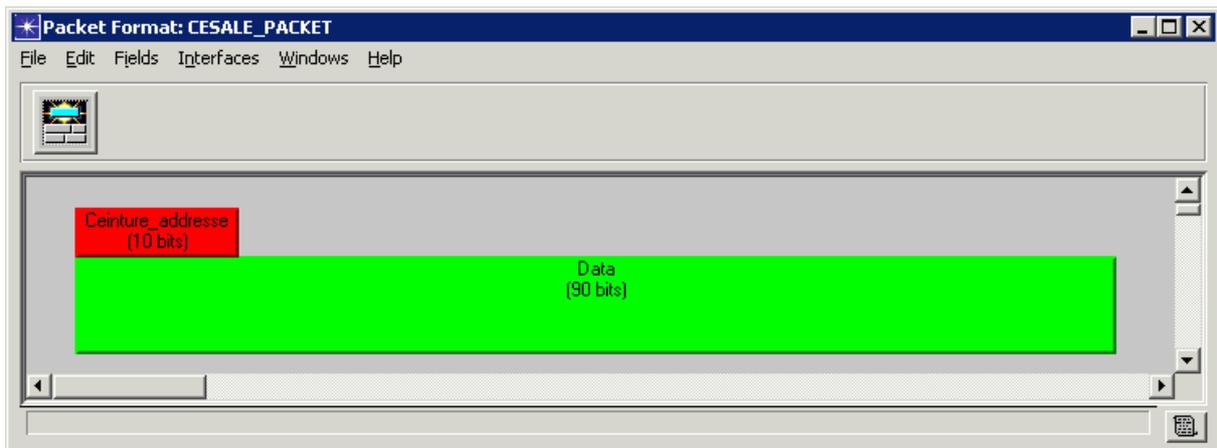


Figure 40 : Détail du paquet CESALE

Dans la fenêtre du nœud « récepteur » (figure 41) on peut voir l'antenne de réception (omnidirectionnelle), le récepteur radio, et l'analyseur de paquets qui crée toutes les statistiques voulues.

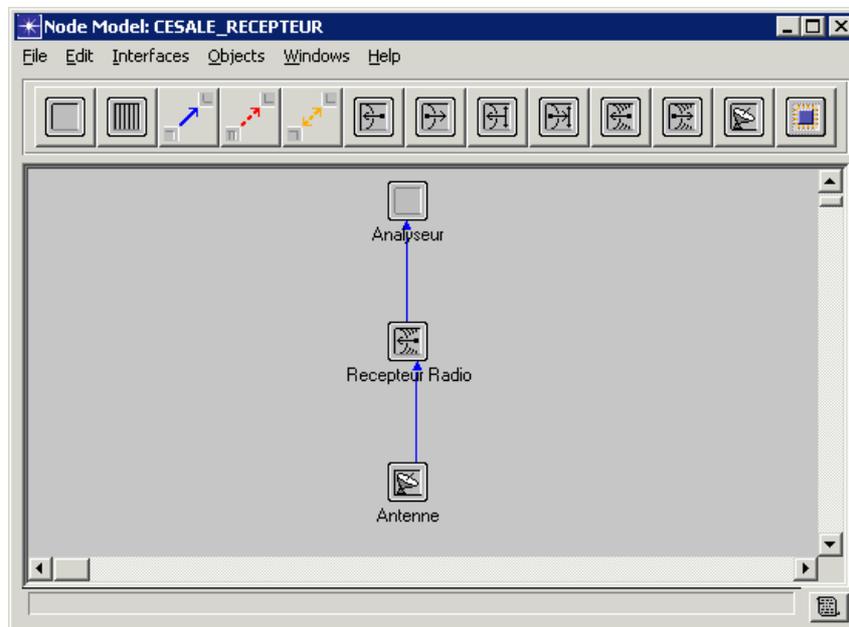


Figure 41 : Noeud central sous OPNET

La figure 42 représente le processus du récepteur, il contient le code analysant les paquets au travers de données comme la date de création du paquet, si il est en collision avec un autre, la date du dernier paquet reçu de cette ceinture, etc.... .

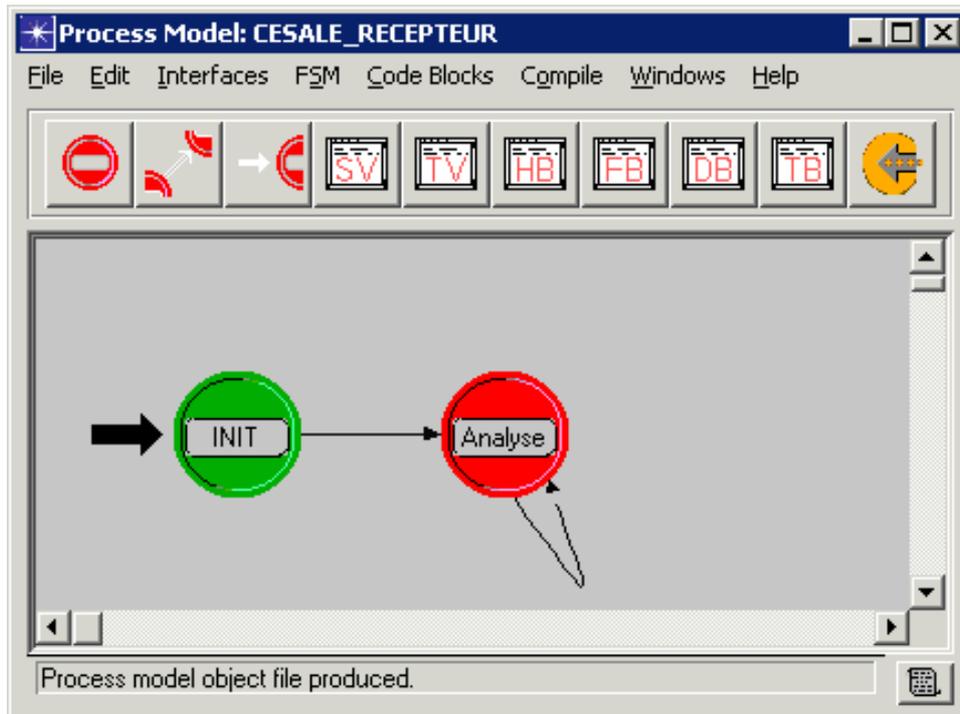


Figure 42 : Processus de l'analyseur de paquets

Dans un premier temps, nous allons valider le programme simulant la source de paquet. Ceci afin de vérifier que nous avons bien en moyenne un paquet envoyé toutes les 3 secondes pour un émetteur.

Le scénario est le suivant :

- une seule ceinture pour ne pas avoir de collisions,
- on analyse le nombre de paquets transmis par seconde et le nombre de paquets reçus par seconde,

- les résultats de la simulation sont donnés par la figure 43 et nous montrent le nombre de paquets transmis par seconde pour un émetteur ainsi que le nombre moyen de paquets reçus par seconde ce qui valide par la même occasion le module de réception.

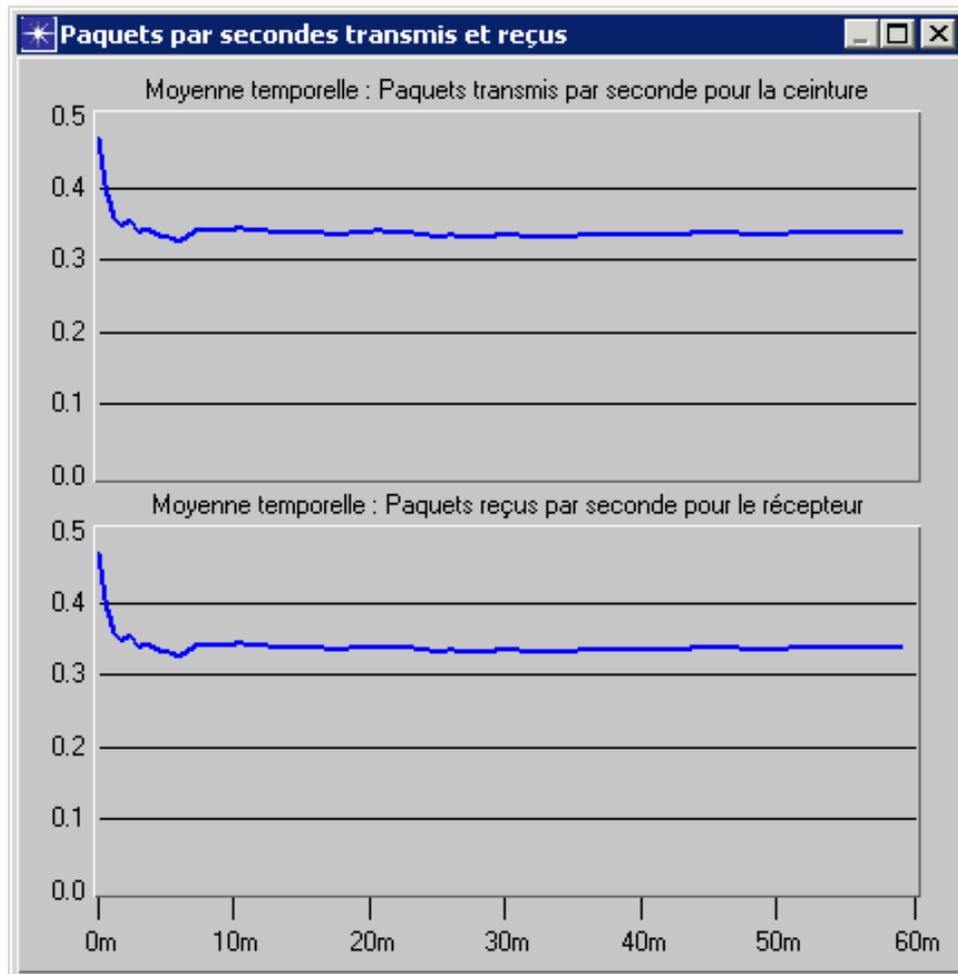


Figure 43 : Moyenne des paquets reçus et transmis

Maintenant que nous avons validé les modèles de ceinture et du récepteur, il est possible de générer plusieurs scénarios en augmentant progressivement le nombre de ceintures de une à vingt.

c) Résultats de simulation du système CESALE

Les résultats les plus significatifs pour le dimensionnement d'un tel système sont le temps moyen relevé et la probabilité cumulée du temps entre deux paquets reçus d'un même coureur, en fonction du nombre de ceintures connectées.

La simulation a été réalisée sur 12 heures afin de récupérer une bonne moyenne.

La figure 44 présente le temps moyen entre deux paquets reçus d'un même coureur.

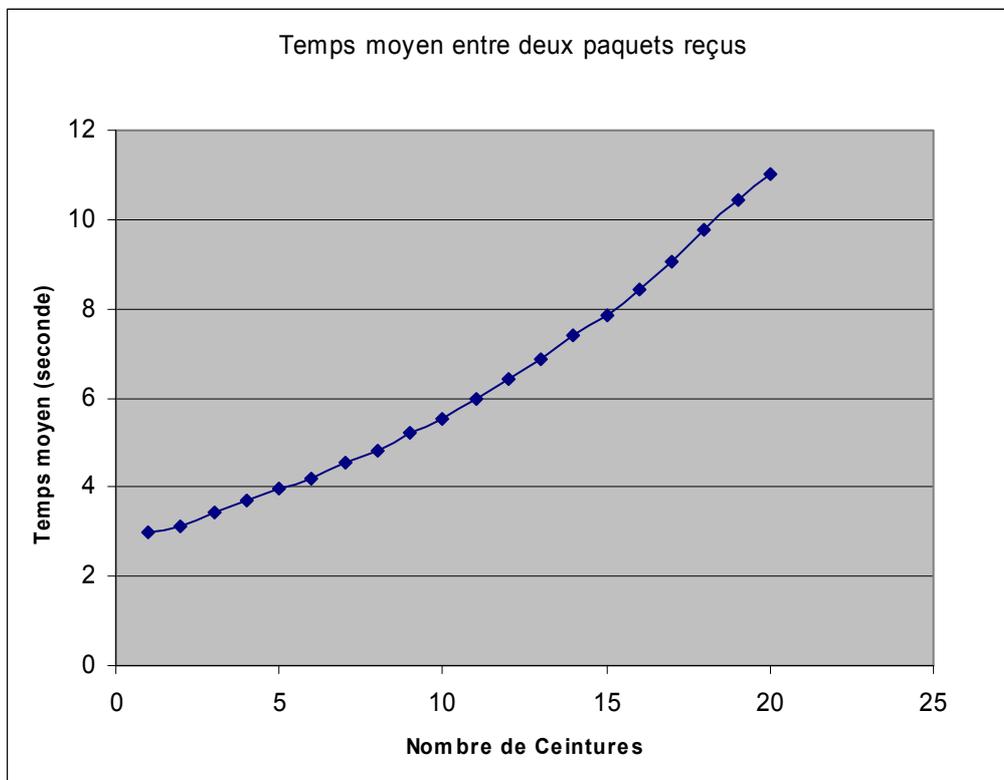


Figure 44 : Temps moyen entre deux paquets reçus en fonction du nombre de ceintures

On peut constater que logiquement ce temps augmente avec le nombre de ceintures connectées sur le récepteur.

Aux vues de ces résultats on peut dire que même avec 20 ceintures, le nombre d'informations reçues pour une ceinture reste acceptable si la durée de l'effort est suffisante.

Le paragraphe suivant analyse plus en détail les résultats. La figure 45 montre la probabilité cumulée, elle apporte un peu plus sur les performances réelles du système.

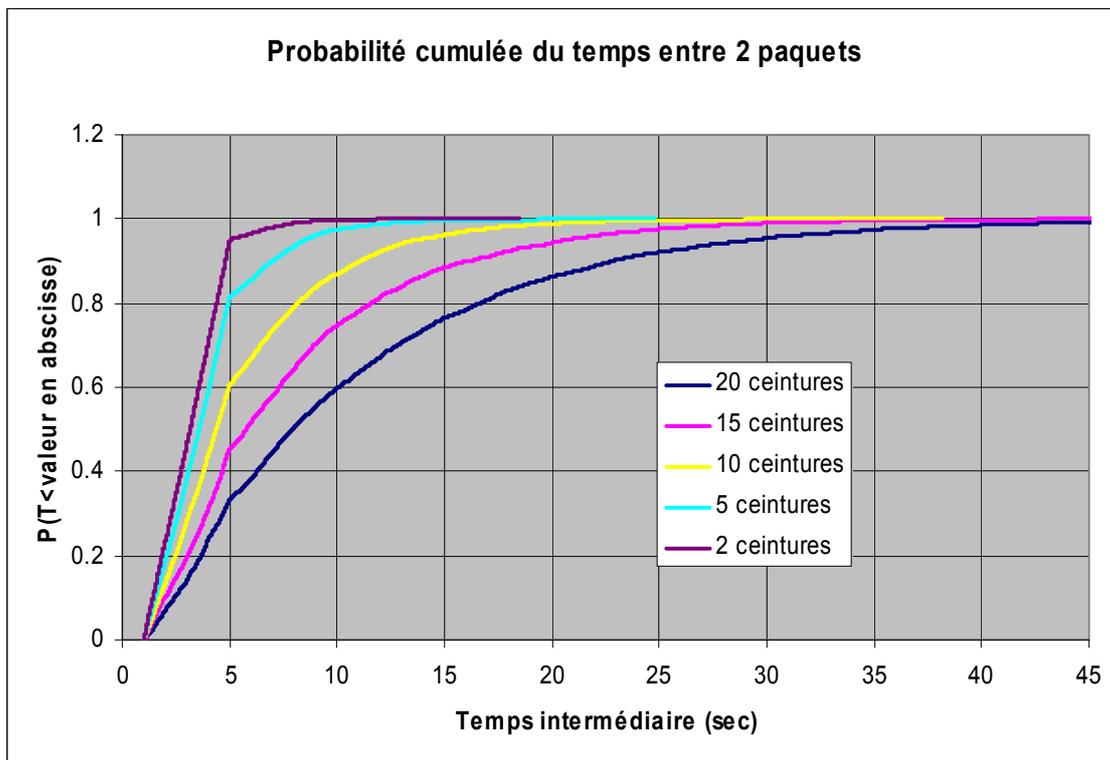


Figure 45 : Probabilité que le temps entre deux paquets soit $< X$

d) Analyse des résultats

Comme annoncé plus haut, au vu du temps moyen séparant la réception d'un paquet d'une même ceinture, le système reste efficace pour 20 ceintures mais lorsque l'on regarde la probabilité cumulée de ce temps, on s'aperçoit que la probabilité pour qu'il soit inférieur à 10 secondes pour 20 ceintures est de seulement 60%, or le besoin d'avoir des informations fréquentes est une nécessité pour pouvoir analyser les données provenant du sportif.

En supposant que 10 secondes entre la réception de deux paquets successifs est une valeur acceptable et que l'on veut que le temps entre deux paquets successifs ne dépasse pas ces 10 secondes plus de 80% du temps, aux vues de la figure 45, on peut annoncer que le système reste fiable pour un nombre de ceintures ne dépassant pas 12 ceintures.

e) Comparaison avec ALOHA

Nous allons maintenant comparer ce système avec ALOHA décrit dans le paragraphe I.7.4. Nous avons donc une durée de trame de 100 ms. La formule suivante montre la correspondance entre le nombre de ceintures et la valeur G correspondante de l'étude ALOHA.

$$G = (Nb_ceintures / F) * L_trame \quad (II.1)$$

Avec $Nb_ceintures$ le nombre de ceintures connectées,

F étant la fréquence moyenne d'émission d'une trame,

L_trame la durée moyenne d'une trame.

La figure 46 nous donne la comparaison entre le protocole ALOHA, ALOHA discrétisé et celui de CESALE.

S est donné par OPNET à savoir le nombre de trames utiles par durée de trames soit le nombre de trames utiles par 100 ms.

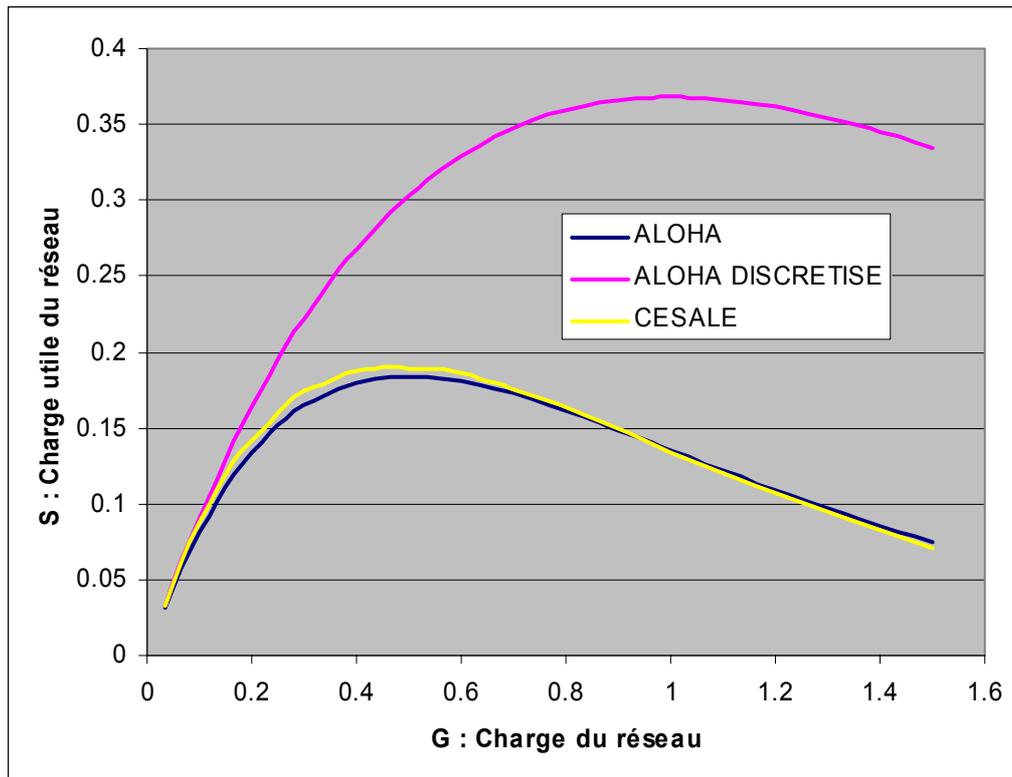


Figure 46 : Charge utile des systèmes ALOHA ET CESALE

On peut constater que les performances du système CESALE sont très proches du protocole ALOHA simple (non discrétisé). Les résultats démontrent que l'utilisation optimale est obtenue pour un nombre de ceintures égal à 14 c'est-à-dire que la bande est le mieux utilisée pour ce nombre de ceintures. Or nous avons vu précédemment que selon la périodicité voulue pour l'obtention d'informations venant du sportif, le nombre de ceintures maximum n'est pas nécessairement de 14. Il était donc utile de faire une analyse telle que celle décrite dans le paragraphe précédent.

f) Conclusion sur l'utilité d'OPNET

Cet exemple simple de dimensionnement d'un système a eu pour but de bien démontrer qu'OPNET s'avère très puissant pour simuler et prévoir les performances d'un réseau qu'il soit filaire ou Hertzien.

On a réussi à dimensionner le système, à savoir donner le nombre maximum de ceintures que l'on peut avoir en même temps sur un même récepteur, en fonction des performances souhaitées. OPNET a permis de faire cela simplement en programmant le comportement de chaque ceinture et du récepteur.

En effet, il était difficile de prévoir ce comportement d'un point de vue strictement théorique à cause de la complexité du jeu mathématique à mettre en œuvre. De plus, il ne s'agit que d'un système très simple comparé à d'autres que nous allons étudier par la suite, sans compter que les performances d'un réseau dépendent aussi de ce qu'il y a en amont et en aval de ce dernier.

Notre but est de simuler et dimensionner des systèmes plus complexes basés sur le modèle OSI ou autres. Nous nous intéresserons particulièrement à la simulation de la couche MAC.

II-4 SIMULATION DES COUCHES RESEAUX EN TENANT COMPTE DES NORMES DE COMMUNICATIONS UTILISEES DANS LES SYSTEMES DE COMMUNICATION SANS FIL

Nous avons vu dans le paragraphe précédent l'utilité d'un outil tel qu'OPNET, permettant de simuler le comportement de systèmes complexes utilisant des normes de communication standards.

Ces normes ont été élaborées afin de pouvoir interconnecter des systèmes venant de différents fabricants entre eux. Ethernet, 802.11 etc...

Les performances d'un réseau de communication dépendent donc directement des protocoles utilisés pour les différentes couches du modèle de communication (OSI ou autres).

OPNET permet de simuler un réseau complet en reproduisant le comportement de chaque couche de chaque machine constituant le réseau.

Beaucoup de ces standards sont déjà implémentés sous OPNET mais il a fallu en programmer d'autres de la même façon que le protocole de CESALE pour pouvoir les simuler.

De plus, les modèles utilisés en standard sous OPNET pour la couche physique ont été sujets à modification comme les *Transceiver Pipeline (annexe 1)* décrits plus haut, afin de mieux répondre aux exigences dues à une modélisation fine du lien radio. C'est ce que nous allons décrire dans le paragraphe suivant.

II-5 PRISE EN COMPTE DE LA PROPAGATION

Certaines caractéristiques du lien radio, comme le rapport signal à bruit ou SNR (signal noise ratio) ou le TEB (Taux d'erreur Binaire) sont basées sur une connaissance précise de la puissance reçue. Il est par conséquent fondamental de connaître les lois de propagation des ondes électromagnétiques entre l'émetteur et le récepteur. En effet si la puissance reçue est trop faible, le SNR sera lui aussi trop faible et par conséquent, le TEB des paquets reçus sera donc trop élevé. Il sera alors impossible pour le récepteur de récupérer les informations contenues dans ces paquets.

Pour cela, le gain des différentes antennes doit être parfaitement connu dans toutes les directions, ce qui nous a amené à créer une procédure pour intégrer un diagramme 3D et de définir de nouvelle méthode de pointage sous OPNET à cause de la complexité des antennes. Nous avons été amené à cela car l'éditeur de diagramme OPNET oblige à rentrer manuellement le gain des antennes pour chaque valeur des angles *phi* et *theta*. Ce qui, pour permettre une résolution suffisante, devient rapidement fastidieux.

Il est aussi nécessaire de connaître les différents multi trajets dus aux multiples réflexions sur le sol ou bien des murs de bâtiments par exemple. La version d'OPNET que nous utilisons ne permet pas de prendre en compte de tels phénomènes et utilise la formule de FRIIS [II.4] pour calculer la puissance reçue par le récepteur.

Ce paragraphe décrit l'intégration d'un diagramme 3D et l'implémentation d'un logiciel de propagation sous OPNET. Ce logiciel est basé sur les méthodes asymptotiques et le tracé de rayon.

II-5.1 Intégration du diagramme de rayonnement

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe II.1.1.i, OPNET requiert un diagramme de rayonnement en 3D ce qui nous amène à travailler avec l'éditeur de diagramme OPNET. Le paragraphe qui va suivre montre le fonctionnement de cet éditeur.

a) Editeur de diagramme de rayonnement

La figure suivante (figure 47) nous montre la construction d'un diagramme de rayonnement sous OPNET par le biais de l'éditeur de diagrammes. Le principe est le suivant : l'éditeur fixe un angle φ entre 0 et 180 degrés et l'utilisateur donne la valeur du gain pour tous les angles θ compris entre 0 et 360 degrés.

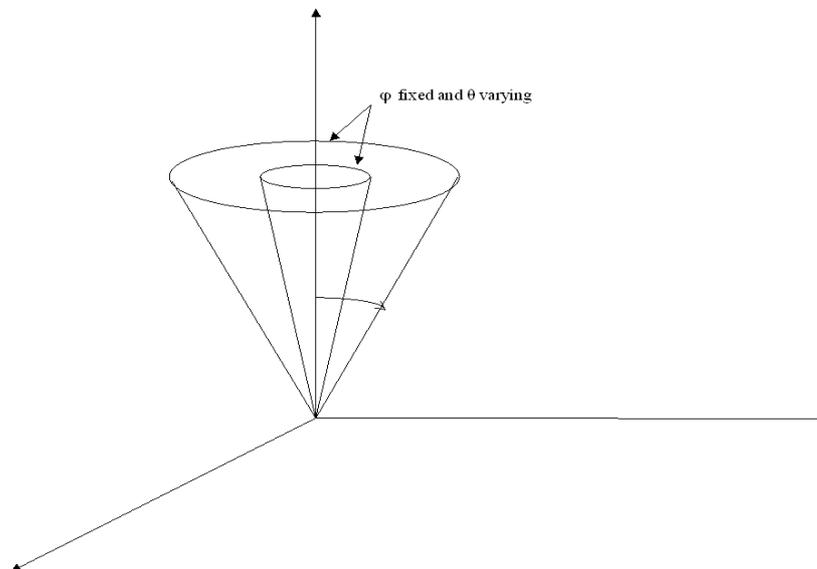


Figure 47 : Principe de construction d'un diagramme de rayonnement sous OPNET

Il est donc nécessaire de connaître le diagramme dans les trois dimensions. Beaucoup de systèmes ont besoin de diagrammes de rayonnement spécifiques et utilisent par conséquent des antennes complexes. A cause de cette complexité, le diagramme 3D réel est très difficile à obtenir car le temps de calcul d'un simulateur serait trop long. Les diagrammes sont donc généralement calculés dans seulement les deux plans principaux appelés plans E et H. Afin de connaître les diagrammes 3D, une méthode d'interpolation [II.4] a été développée à partir de ces deux plans connus E et H. A noter que pour une précision de un degré, le nombre de points à donner à l'éditeur de diagramme est trop important pour pouvoir être rentré manuellement. Il a donc été nécessaire de créer un processus permettant de faire cela automatiquement [II.5].

b) Méthode d'interpolation

Cette méthode consiste à appliquer une rotation au plan E autour de l'axe du plan H (figure 50) et à le pondérer par une valeur directement proportionnelle au gain du plan H pour l'angle de rotation donné. La formule d'interpolation est donnée par l'équation II.2 [II.4].

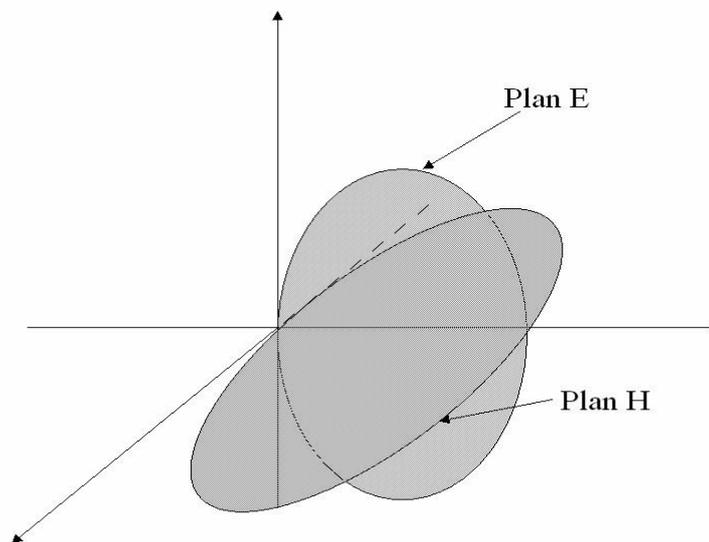


Figure 48 : Principe de la méthode d'interpolation

$$G(\theta, \varphi) = GE(\varphi) \cdot \frac{GH(\theta)}{GH \max} \quad (II.2)$$

- G : Gain de l'antenne dans une direction θ et φ donnée.
- GE : Gain de l'antenne dans le plan E et dans une direction φ donnée.
- GH : Gain de l'antenne dans le plan H et dans une direction θ donnée.
- $GHmax$: Gain maximum de l'antenne dans le plan H.

c) Validation de la méthode

Pour valider la méthode d'interpolation, nous avons comparé le diagramme interpolé avec celui calculé par la méthode des différences finies FDTD [II.6], [II.7] Cette comparaison a été réalisée sur une antenne patch de dimension $2.41 * 2.41$ mm, $\epsilon_r=2.2$, $h=254\mu\text{m}$. à 40GHz.

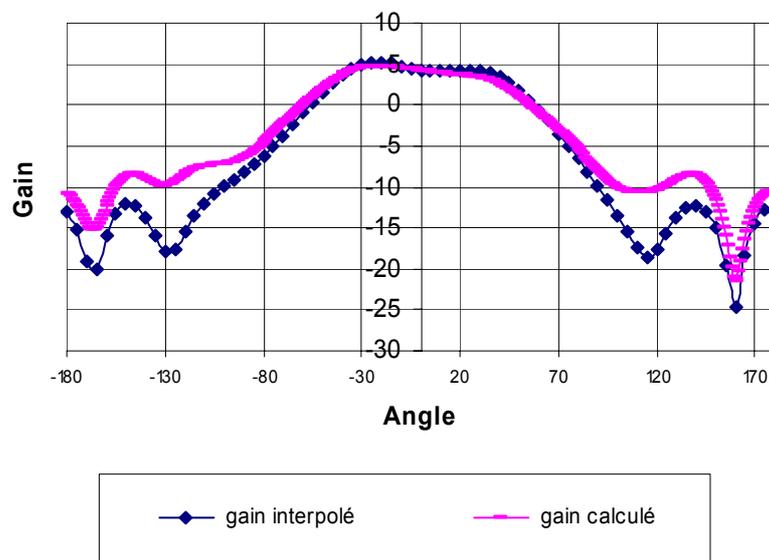


Figure 49 : Comparaison entre le gain calculé et interpolé

La figure 49 montre le gain calculé avec les deux méthodes dans un plan incliné de 40 degrés en ϕ par rapport au plan E initial ceci afin d'être suffisamment éloigné des points que l'on a mesurés.

On constate que pour des valeurs de l'angle θ comprises entre -80 et +80 degrés, il y a un bon accord ce qui est suffisant puisque l'on a une couverture cellulaire et que seule la direction +60 à -60 degrés nous importe.

Par cette intégration du diagramme de rayonnement dans OPNET, nous avons obtenu un moyen efficace de dimensionnement de réseaux. En effet, il suffit maintenant de donner la direction des antennes et de placer les nœuds OPNET dans l'éditeur de projet pour connaître le gain des antennes à appliquer dans la formule de FRIIS.

d) Etude de l'effet de la résolution du diagramme de rayonnement

Maintenant que nous avons la possibilité d'intégrer n'importe quel diagramme, il reste à déterminer quelle résolution est nécessaire à une simulation précise.

Une étude paramétrique a été réalisée afin de déterminer la résolution nécessaire du diagramme d'antenne pour obtenir une modélisation précise de la propagation. Un émetteur est placé à une altitude de 50 m, un récepteur au niveau du sol s'éloignant de l'émetteur et pointant toujours vers l'émetteur (figure 50). La puissance reçue a été calculée pour 2 résolutions différentes de l'antenne d'émission.

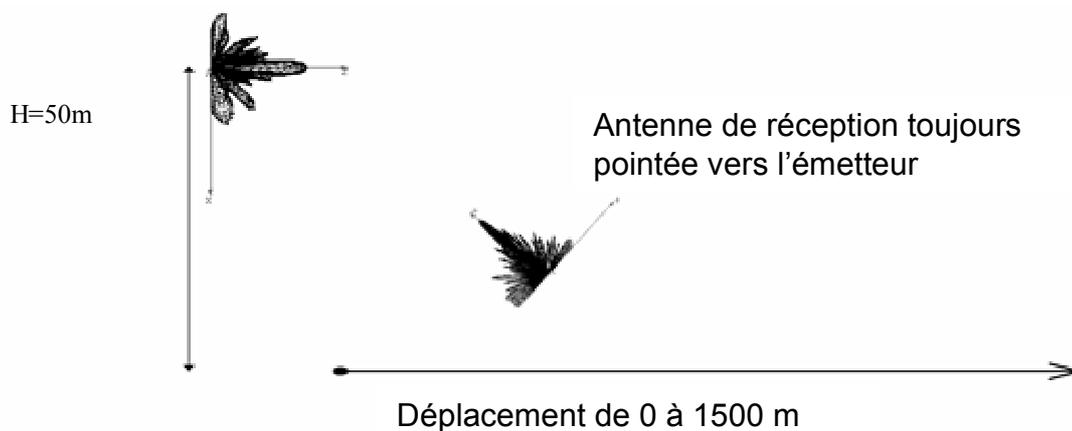


Figure 50 : Scénario de l'étude

Sur le graphique suivant donné par OPNET, (figure 51), on remarque l'importance de la résolution dans le cas d'un diagramme complexe à cause de l'effet des lobes secondaires. En effet, le premier graphique avec une résolution de 2 degrés, montre une insuffisance par rapport au deuxième qui lui a une résolution de 0.5 degrés et montre bien la présence des lobes secondaires.

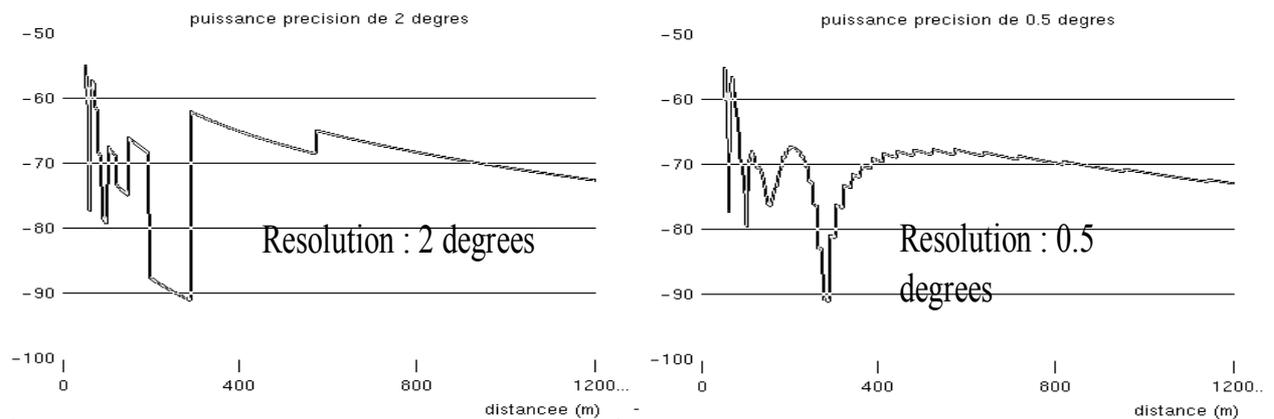


Figure 51 : Puissance reçue pour deux résolutions différentes

On peut donc conclure qu'une résolution inférieure à 1 degré est nécessaire mais il est évident que cela dépend de la complexité du diagramme et de la distance entre les deux points à relier.

e) Validation de l'intégration du diagramme de rayonnement 3D dans OPNET

Maintenant, pour valider la procédure et l'intégration du diagramme sous OPNET, nous allons comparer les résultats de simulation avec des mesures. Une étude expérimentale a été réalisée à 40 GHz dans le cadre d'un démonstrateur LMDS à Limoges [I.13]. Nous reparlerons plus en aval de ce démonstrateur.

Les deux antennes sont parfaitement pointées l'une vers l'autre et l'atténuation a été mesurée par temps clair. Nous avons donc un gain de 15 DB pour l'antenne d'émission et 25 dB pour la réception. Les pertes de connexion pour le système utilisé sont de 1 dB pour l'émetteur et le récepteur. La bande de fréquences utilisée est 40,5 – 42,5 GHz (bande utilisée par le démonstrateur LMDS) et la puissance émise est de 17 dBm. Le facteur de bruit du récepteur est de 8 dB. La puissance reçue est calculée selon la formule de FRIIS [II.4] sous le logiciel OPNET.

Le tableau 1 représente la puissance reçue théorique et expérimentale à différentes distances de l'émetteur. Une bonne corrélation apparaît entre les mesures et la simulation sous OPNET.

Distance (m)	Puissance mesurée (dBm)	Puissance simulée (dBm)
600	-65	-65.1
1200	-74	-71.1
2500	-80	-77.5

Tableau 1 : Comparaison entre théorie et expérimentation

On constate un bon accord à 600m et de légères différences par la suite. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait qu'il est très difficile de pointer parfaitement les antennes (8° d'ouverture seulement pour les antennes de réception) et aussi par les interférences causées par de probables réflexions sur le sol ou des bâtiments. Ce sont donc ces interférences qui nous ont amenés à développer une méthode de simulation de la propagation prenant en compte les réflexions sur des surfaces planes.

II-5.2 Intégration d'un logiciel de calcul de la propagation

Nous avons vu qu'il est nécessaire de calculer la propagation avec plus d'exactitude, tenant compte de la réflexion sur le sol et sur des murs de bâtiments, car dans une zone urbaine, le nombre important de bâtiments peut fortement affecter la propagation. Nous avons donc intégré à OPNET un logiciel simulant ce phénomène.

a) Fonction du logiciel

Le logiciel développé [II.4] fonctionne en 2 dimensions et est basé sur les méthodes asymptotiques (développement asymptotique de la solution exacte de l'équation du Maxwell's) [II.8] et la méthode de tracé de rayon (principe de Fermat : les rayons sont trajectoire qui réduisent au minimum le chemin optique) [II.9]. L'émetteur et le récepteur sont placés dans une structure faite de segments (figure 52) sur lequel les rayons se réfléchissent. Le code électromagnétique de propagation est basé sur la méthode suivante : les structures de segments sont enregistrées dans un fichier sous forme de liste de nombres représentant les coordonnées de chaque segment. Le programme calcule alors le rayon direct s'il y en a un et les rayons réfléchis possibles.

Il prend également en considération l'atténuation due aux hydrometeors. Ce calcul est basé sur un voeux de maintien de la liaison pendant un certain pourcentage de temps et des statistiques sur l'intensité de la pluie pour chaque secteur du monde [II.10]. Ainsi, le programme modifié pour les besoins du modeleur exige en variables d'entrée le fichier de structure (figure 52), la position de l'émetteur et du récepteur, et la puissance d'émission. Il est important de noter que nous avons choisi de tenir compte uniquement des réflexions qui ont lieu dans un plan vertical puisque le logiciel fonctionne en 2D, seuls les rayons contenus dans le plan vertical passant par l'émetteur et le récepteur sont tracés et interviennent dans le calcul de la puissance reçue.

Le logiciel a été programmé en langage C ce qui a facilité son intégration dans le modeleur OPNET.

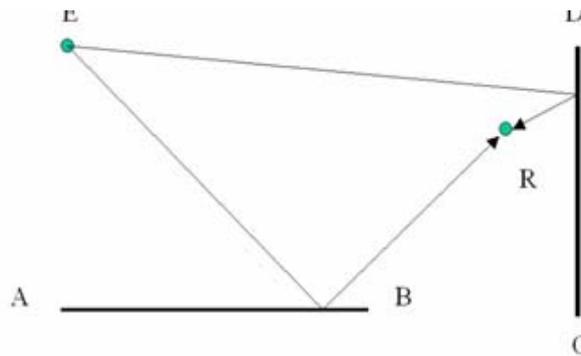


Figure 52 : Principe du logiciel de propagation

Cette figure montre un exemple de structure de segments avec la réflexion des rayons sur eux, avant d'arriver au récepteur.

b) Fonctionnement d'OPNET

OPNET fonctionne avec des procédures programmées en langage C. Par exemple, il existe une procédure pour le calcul de gain vers une direction donnée, d'autres qui calculent la puissance reçue etc..... Nous avons ainsi remplacé celle qui calcule la puissance reçue par notre programme qui tient compte de la propagation.

c) Couplage

Nous avons vu qu'OPNET fonctionne selon un principe de transmission de paquets auxquels sont associés tous les paramètres de transmission calculés par les procédures appelées *pipeline stage*. Ainsi, un gain d'émission, de réception, une puissance reçue, sont assignés à chaque paquet. Ceci permet pour travailler avec une discrétisation de l'espace et de temps. Quand plusieurs récepteurs obtiennent l'information du même émetteur, il n'y a pas toujours les mêmes obstacles entre eux. Il est ainsi nécessaire d'assigner un dossier de structure à chaque noeud de réception. Pour contrôler séparément chaque récepteur, OPNET permet la création d'attributs spécifiques à chaque noeud. Le procédé du calcul qui est mis en application avec chacun d'eux exploitera cette propriété pour différencier les dossiers de structure. La figure 53 montre un exemple de ce que nous voyons dans la fenêtre d'OPNET.

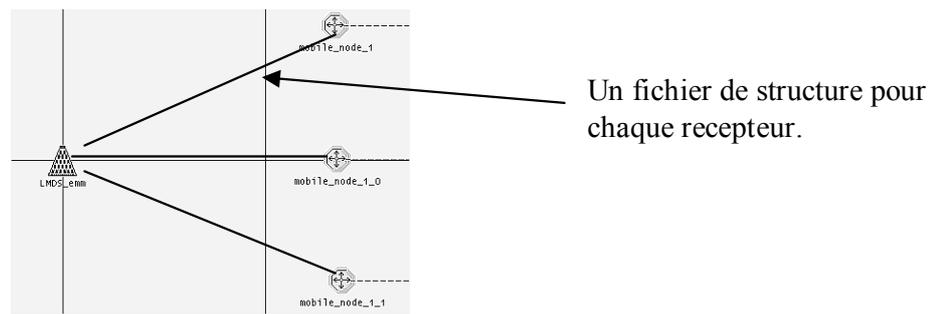


Figure 53 : Exemple de scénario pour l'intégration de la propagation sous OPNET

La figure 53 illustre le fait que chaque Nœud de réception possède son propre fichier de structure ce qui permet de travailler de manière autonome.

II-5.3 Exemple de simulation et résultats

Afin de comprendre l'utilité de ce couplage des deux logiciels, nous avons réalisé une simulation qui montre l'influence des réflexions sur le sol.

a) Scénario

Maintenant, nous allons valider l'intégration du logiciel avec un exemple très simple de simulation (figure 54).

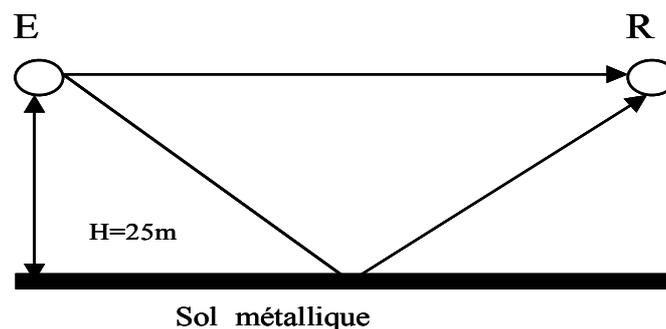


Figure 54 : Scénario de validation

Sur la figure 54, on voit que l'émetteur et le récepteur sont tous deux à 25m de hauteur sur un sol métallique et les deux antennes pointées l'une vers l'autre.

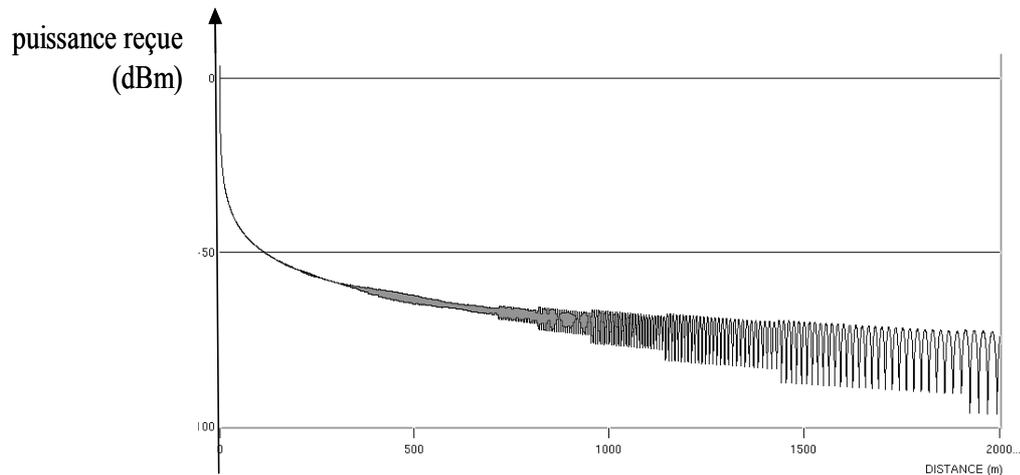


Figure 55 : Résultats du scénario de validation

Les sauts de puissance montrés par la figure 55 sont dus au changement de gain lui-même dû à la position du point de réflexion. Les chutes de puissance révèlent des interférences entre le rayon réfléchi et le rayon direct qui sont parfois constructives (les deux rayons sont en phase) ou destructrices (les deux rayons sont en opposition de phase) du signal reçu.

b) Prise en compte de toute la bande de fréquence

Les résultats ci-dessus ont été obtenus en calculant seulement un point de fréquence (centrale) pour toute la largeur de bande alors qu'il serait peut-être nécessaire, en théorie, de les calculer pour toutes les fréquences, puisqu'un décalage fréquentiel implique une différence en position des trous de la puissance (deux rayons en opposition de phase à une fréquence donnée peuvent être en phase à une autre fréquence). Le calcul a été ainsi effectué selon le principe suivant :

Considérons une largeur de bande de 40 MHz autour de la fréquence centrale, la forme du spectre du signal émis doit être connue pour avoir l'influence de chaque point de fréquence sur toute la puissance. Puis, le logiciel calcule la puissance pour tous les points et reconstruit toute la puissance selon la formule suivante :

$$Pr_T = \sum_n \alpha(f) \cdot Pr(f) \quad (II.3)$$

$$\text{Avec} \quad \alpha(f) = \frac{Pe(f)}{Pe_{\max}} \quad (II.4)$$

Là où Pr_T est toute la puissance totale reçue, Pe la puissance d'émission $\alpha(f)$ est le poids de chaque fréquence dans la toute la puissance de spectre, n est le nombre de points, $P(f)$ la puissance de chaque point de fréquence.

Pour simplifier la simulation, nous avons considéré que toutes les fréquences ont la même puissance de sorte que le poids soit égal à $1/n$. La simulation a été faite pour 400 points de fréquence et dans la même configuration que la simulation ci-dessus.

On peut voir sur la figure 57 que le fait de prendre en compte toute la largeur de bande n'influe que très peu sur le résultat final. Il est donc inutile de surcharger les simulations en prenant un grand nombre de points de fréquence.

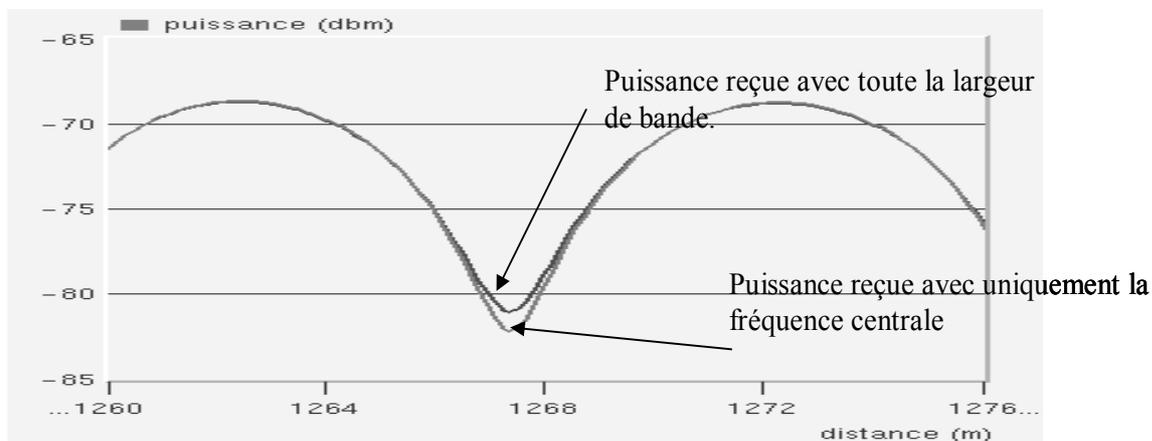


Figure 56 : Comparaison entre les deux méthodes de calcul

Dans ce paragraphe, ce n'est pas tant les résultats obtenus que la démarche qui nous importe. En effet, nous savons maintenant comment améliorer le module radio afin de prendre en compte une propagation complexe. Nous sommes capables d'y intégrer n'importe quel logiciel de propagation y compris ceux fonctionnant en 3D, en cours de développement au sein de l'équipe.

II-6 CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons fait une présentation rapide du logiciel OPNET, puis, au travers d'un exemple (CESALE) nous avons montré que OPNET est très utile et très efficace en matière de dimensionnement de systèmes de communications numériques. Néanmoins, il semble limité en matière de modélisation de la propagation électromagnétique, ce qui nous a amené à développer une procédure d'intégration de diagramme, et de la coupler avec un autre logiciel qui calcule la propagation de manière précise. Cette amélioration du module radio OPNET va nous permettre de simuler avec précision des liens radio en milieu urbain [II.11].

OPNET a une puissance de calcul très grande et permet, de part son mode de calcul, une grande flexibilité. La complexité de ce logiciel peut paraître rebutante au premier abord mais permet le traitement des cas les plus divers comme des liaisons radio hautes fréquences. C'est cette complexité qui permet sa flexibilité.

Nous sommes maintenant prêts à utiliser OPNET pour dimensionner, simuler, un système plus complexe comme le LMDS.

CHAPITRE III

Présentation de normes de communication sans fil pour le LMDS

III-1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons dit, la couche liaison représente une partie essentielle du modèle en couche (Figure 57) en terme de performances.

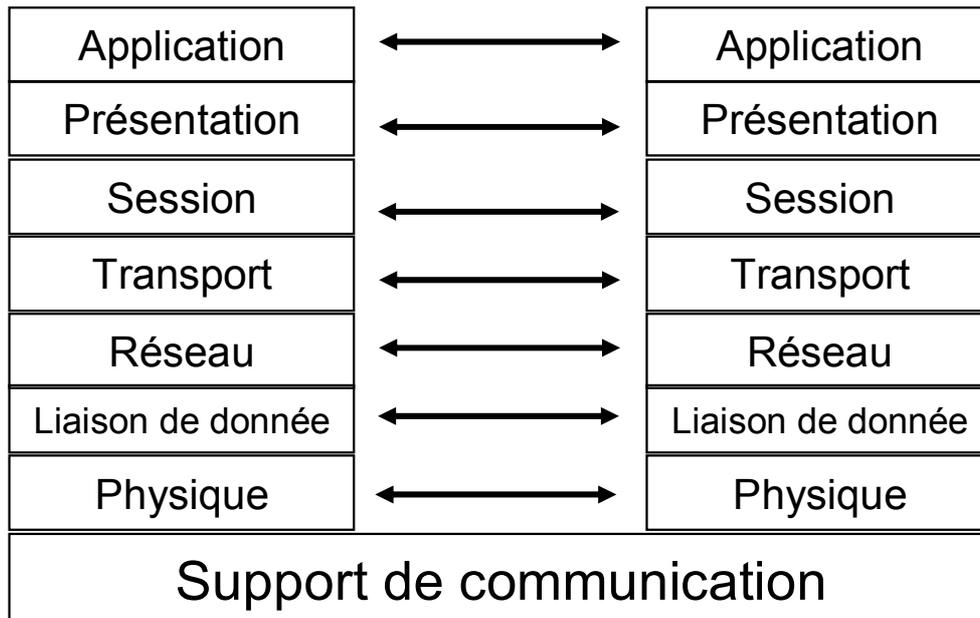


Figure 57 : modèle en couche.

Les travaux effectués se sont concentrés sur la couche MAC étant un élément de la couche liaison dans le modèle 802. Comme cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un projet de plateforme LMDS, nous allons tout d'abord décrire la norme utilisée dans ERASME [I.13] à savoir le standard DVB EN 301 199 [III.1], afin de comprendre son fonctionnement et plus tard, en prévoir le comportement. Puis dans un deuxième temps, aux vues des performances de cette dernière, la norme 802.16 [III.2] sera détaillée car elle présente une plus grande flexibilité d'utilisation.

Nous allons maintenant essayer de résumer les principales caractéristiques de ces deux normes.

III-2 LA NORME DVB EN 301 199

Ce paragraphe reprend l'architecture générale du document original de la norme, en le résumant et en simplifiant certains de ses aspects pour une meilleure lisibilité.

III-2.1 Concept

Ce standard spécifie une couche liaison pouvant être utilisée pour le LMDS afin de concurrencer des systèmes tels que l'ADSL ou bien encore le câble, d'ailleurs cette norme est dérivée de la norme DVB câble RC [III.1]. Il décrit un système point multipoints ayant une voie descendante pour le lien station de base vers abonné et une voie montante pour celui abonné vers la station de base. Cette station de base se compose de l'INA (Interactive Network Adapter) alors que le système abonné (modem) est constitué de la NIU (Network Interface Unit). Les transmissions de la voie descendante sont réalisées en Broadcast c'est-à-dire que la station de base (INA) transmet les données vers tous les abonnés, chacun d'entre eux écartant les informations qui ne leur sont pas destinées. Ces paquets sont transmis dans leur ordre d'arrivée sans la moindre priorité les uns par rapport aux autres. De cette manière, les informations de synchronisation sont transmises de façon identique à toutes les NIUs. Cela permet à ces dernières de s'adapter au réseau et d'émettre leurs informations sur la voie montante en étant synchronisées les unes par rapport aux autres.

La voie montante utilise les techniques du TDMA et du FDMA (décrites succinctement au chapitre II) à savoir que la voie montante est divisée en plusieurs canaux fréquentiels, chacun d'entre eux étant lui-même divisé en slots temporels pouvant être utilisés par plusieurs NIUs. Il faut aussi savoir qu'à une voie descendante correspond une voie montante c'est-à-dire que une seule voie descendante sert à synchroniser huit canaux fréquentiels montants.

Trois modes d'accès à la voie montante sont utilisés dans ce système, le premier est basé sur de la contention, qui laisse les utilisateurs transmettre leurs messages à n'importe quel moment au risque d'avoir des collisions avec d'autres.

Pour le second et le troisième mode, l'INA alloue soit un nombre fini de slots à chaque NIU, soit un certain débit demandé par une NIU particulière.

III-2.2 Principes In Band (IB) et Out Of Band (OOB)

Cette norme est basée sur les principes IB ou OOB [III.3], pour la voie descendante. Dans le cas où l'OOB est utilisé, les informations de synchronisation et de signalisation sont transmises sur un canal spécialement dédié ce qui permet d'obtenir un débit supérieur sur la voie descendante par rapport au principe IB qui utilise le même canal pour les données et les messages de synchronisation et de signalisation.

III-2.3 Spécification de la couche physique

La norme DVB EN 301 199 spécifie une couche physique pour s'adapter à la couche MAC correspondante. Nous allons maintenant regarder dans les grandes lignes les principales caractéristiques spécifiées pour la voie descendante puis montante.

a) Voie descendante

Le standard ne définit pas de débit spécifique pour la voie descendante mis à par le fait qu'il doit être un multiple de 8 kbits/s. La figure 58 décrit le cheminement des informations à travers la couche physique.

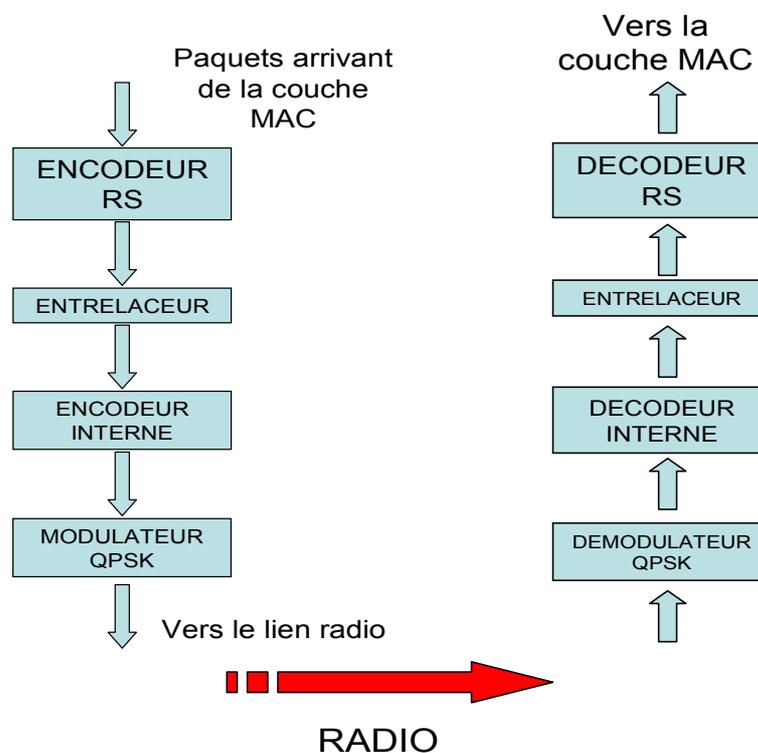


Figure 58 : Schéma bloc de la couche physique pour la voie descendante

Les paquets arrivant de la couche MAC passent tout d'abord dans un encodeur RS afin de les prémunir contre d'éventuelles erreurs dues au média radio. Ensuite ces mêmes informations, une fois encodées traversent un entrelaceur qui « mélange » les bits du paquet pour la prévention du phénomène d'évanouissement puis la succession de bits qui en découle est à nouveau encodée pour la correction d'erreur avant d'être modulée en QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Les différentes étapes décrites ci-dessus vont être détaillées afin de mieux comprendre leur rôle.

i) Codage correcteur d'erreur

- Codage interne (Inner code)

Tout ce que nous avons besoin de savoir sur les codes internes est décrit dans le principe énoncé ci-dessous.

A partir d'une succession de bits en entrée, le codeur crée une nouvelle succession de bits de manière à ce que l'on ne puisse avoir en sortie du codeur, que quelques combinaisons possibles. De cette manière, lors du passage dans le récepteur, le décodeur peut alors détecter les erreurs survenues si la combinaison de bits reçue n'est pas une de celles classiquement données par le codeur. Ce type de codage augmente souvent la taille des paquets.

- RS code (Reed Solomon)

Un codage Reed Solomon est spécifié de la manière RS (n,k) avec un symbole équivalant à s bits, c'est-à-dire que l'encodeur prend k symboles des informations arrivant et rajoute des symboles de redondance de manière à créer un mot de n symboles, il y a donc n-k symboles de parité dans chaque mot final. La figure 59 montre un mot typique formé par un codage Reed Solomon.

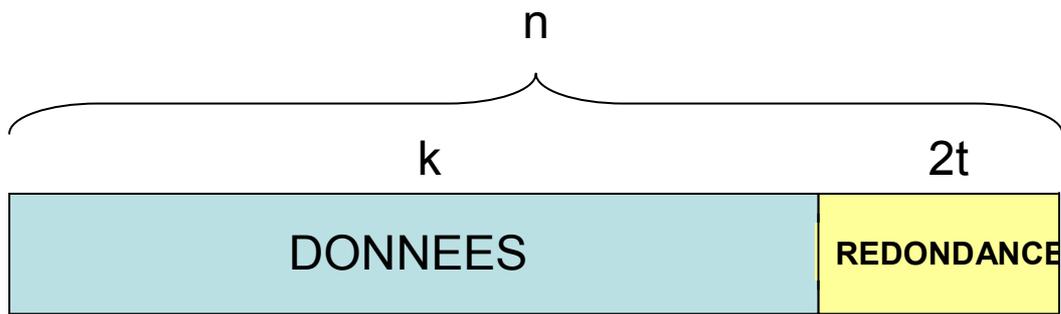


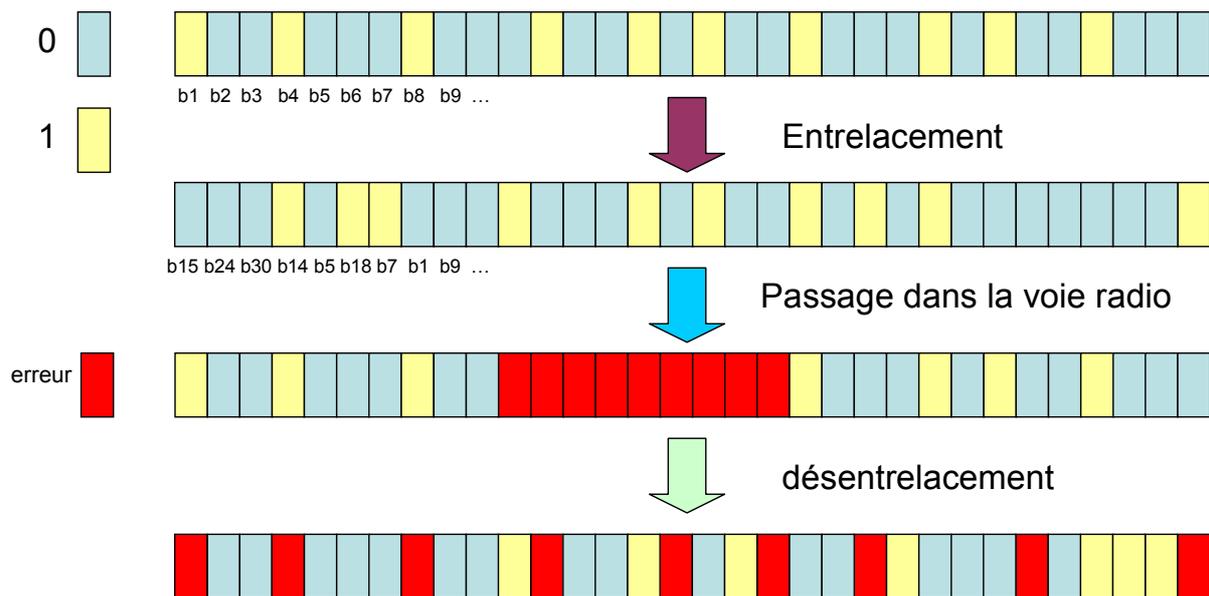
Figure 59 : Mot formé par un codage Reed Solomon

Le but de cette thèse n'étant pas l'étude des codages correcteur d'erreurs, nous n'allons pas aller plus en avant dans cette explication. Pour plus de précisions la référence [III.5] décrit leur fonctionnement dans le détail.

ii) Entrelacement

La principale caractéristique de ces codages correcteurs d'erreur réside dans le fait qu'ils sont très efficaces pour corriger des erreurs isolées. En effet, si un grand nombre de bits successifs est erroné, les décodeurs associés ne peuvent plus se servir de la parité ou bien de la séquence précédente pour reconstituer les données.

Afin de palier à ce problème, les bits contenus dans les informations sont brassés de manière aléatoire mais connue du récepteur après avoir été soumis au codage. Lors d'évanouissement du signal radio (baisse temporaire de la puissance reçue et donc du SNR) on a constaté que se sont des paquets de plusieurs bits successifs qui sont erronés. Mais après reconstitution par le désentrelaceur coté récepteur, cette succession d'erreur se transforme en quelques bits erronés isolés, facilement corrigeables par le codage. La figure 60 montre le principe de l'entrelacement.



Les erreurs sont dispersées de manière à pouvoir être plus facilement corrigées

Figure 60 : Principe de l'entrelacement

Comme le montre la figure 60, les paquets de bits erronés, après entrelacement, sont dispersés dans toute la trame, ce qui permet au codage correcteur d'effectuer sa tâche plus efficacement.

iii) Modulation QPSK

Pour finir, les informations sous forme de bits sont modulées avant d'être transmises sur la voie radio. La modulation utilisée est QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ou modulation à quatre états de phase, nous allons rapidement expliquer son fonctionnement.

C'est une modulation de phase largement utilisée dans les systèmes de communication à cause de sa robustesse face aux perturbations externes. En fonction des données à moduler, la porteuse est forcée dans une des quatre phases possibles, aussi appelée symbole.

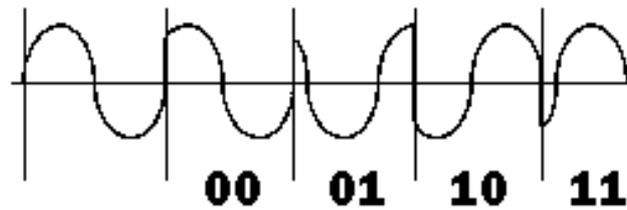


Figure 61 : Symboles correspondants aux différents états de phase

Nous voyons donc que le symbole correspondant est donné pour une phase particulière, la figure 62 qui représente la modulation QPSK dans le plan complexe permet de mieux expliquer cette correspondance.

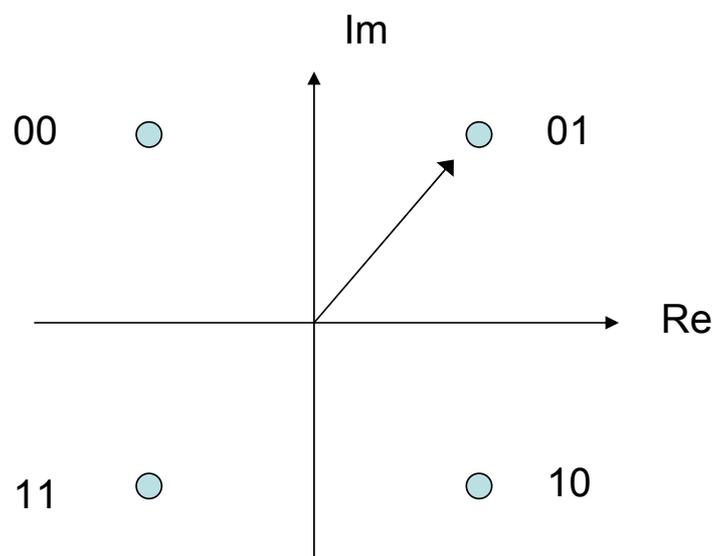


Figure 62 : Représentation dans le plan complexe d'un signal modulé en QPSK

A cause de l'utilisation du QPSK, le débit des données est souvent exprimé en débit symbole (symbol rate) plutôt qu'en débit binaire (bit rate). Dans le cas de la modulation QPSK, le débit binaire est deux fois le débit symbole.

Nous allons maintenant, après avoir détaillé la voie descendante, nous intéresser à la voie montante pour ce qui concerne sa couche physique.

b) Voie montante

Le schéma bloc suivant (figure 63) illustre la couche physique utilisée pour la voie montante par la norme DVB.

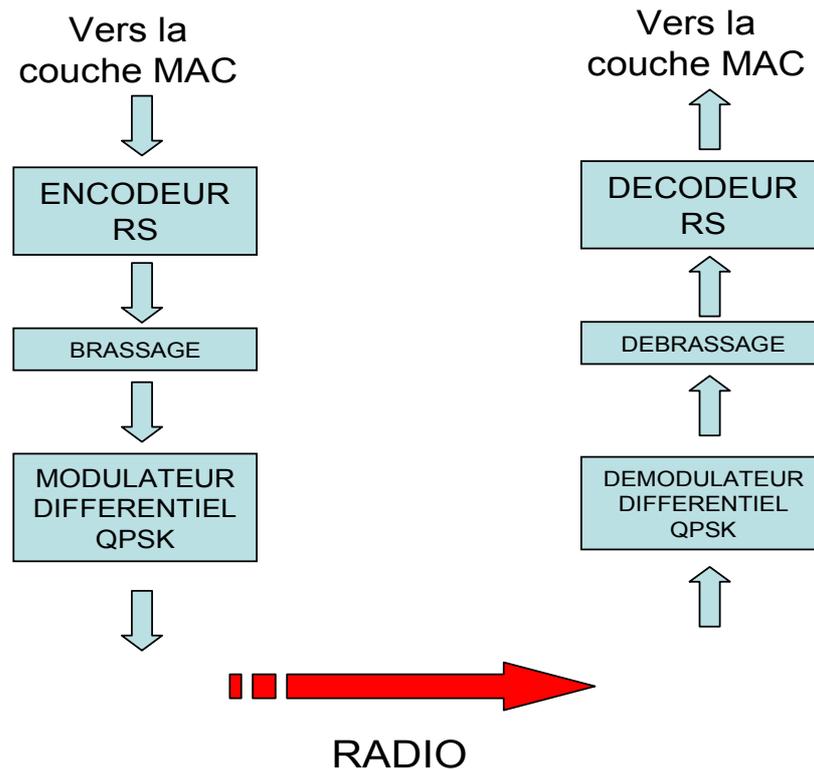


Figure 63 : Schéma bloc de la couche physique pour la voie montante

Les informations passent donc par un encodeur RS de la même manière que pour la voie descendante. On remarque qu'il n'y a plus de codage interne ni d'entrelacement mais un brassage et que la modulation est maintenant une modulation différentielle.

Le brassage est utilisé pour uniformiser la distribution des 0 et les 1 pour les bits présents dans le message pour pouvoir être utilisé par la modulation différentielle et brouiller les messages.

i) Codage différentiel

Le codage différentiel est utilisé car le récepteur n'a aucun moyen de connaître la phase absolue du signal reçu. Au lieu de faire correspondre à une combinaison de bit une phase, on lui fait correspondre un saut de phase par exemple pour la combinaison 00, le signal reste sur la phase où il était, alors que pour un symbole 11, le signal prend une phase de 180 degrés de plus. Le tableau 2 suivant décrit les changements de phase que le signal doit subir.

A	B	Changement de phase
0	0	none
0	1	+90°
1	1	180°
1	0	-90°

Tableau 2 : Carte des changements de phase en fonction du symbole à transmettre

ii) Débit

Pour le OOB (canal fréquentiel différent pour les informations de synchronisation) le débit doit être de 3.088 Mbits/s.

Pour le mode IB, le débit montant peut être défini selon deux classes : C et D.

La classe C dispose d'un débit de 3.088 Mbits/s alors que la classe D transmet ses informations à un débit de 6.176 Mbits/s. Le système mis en place autour de ce standard devra supporter obligatoirement la classe C alors que la D est optionnelle.

Maintenant que nous avons succinctement décrit la couche physique de la norme, nous allons nous intéresser à ce qui constitue le cœur de ce standard : la couche liaison ou MAC.

III-2.4 Spécification de la couche MAC

Nous avons vu que 8 canaux montants et un descendant constituent une liaison entre les NIUs et l'INA. Ces canaux peuvent coexister avec d'autres sur plusieurs cellules (duplexage spatial) ou bien sur la même (duplexage fréquentiel). Il est évident que plusieurs

scénarios mixant les deux méthodes doivent être utilisés afin d'obtenir le meilleur parti du système. Il est important de noter aussi qu'une NIU utilise uniquement un canal montant. Les explications qui vont suivre concernent en premier lieu la voie descendante puis montante en décrivant la fragmentation utilisée et la méthode d'accès au médium.

a) Voie descendante

La transmission d'informations de la station de base vers les abonnés se fait en broadcast c'est-à-dire que les paquets provenant des couches supérieures sont transmis à la suite les uns des autres, sans se préoccuper de leur destination. Néanmoins, comme le montre la figure 64, ces paquets sont fragmentés en plusieurs paquets de tailles identiques de type MPEG2-TS. La taille de ces paquets est de 192 octets avec 4 octets d'entête pour l'adressage.

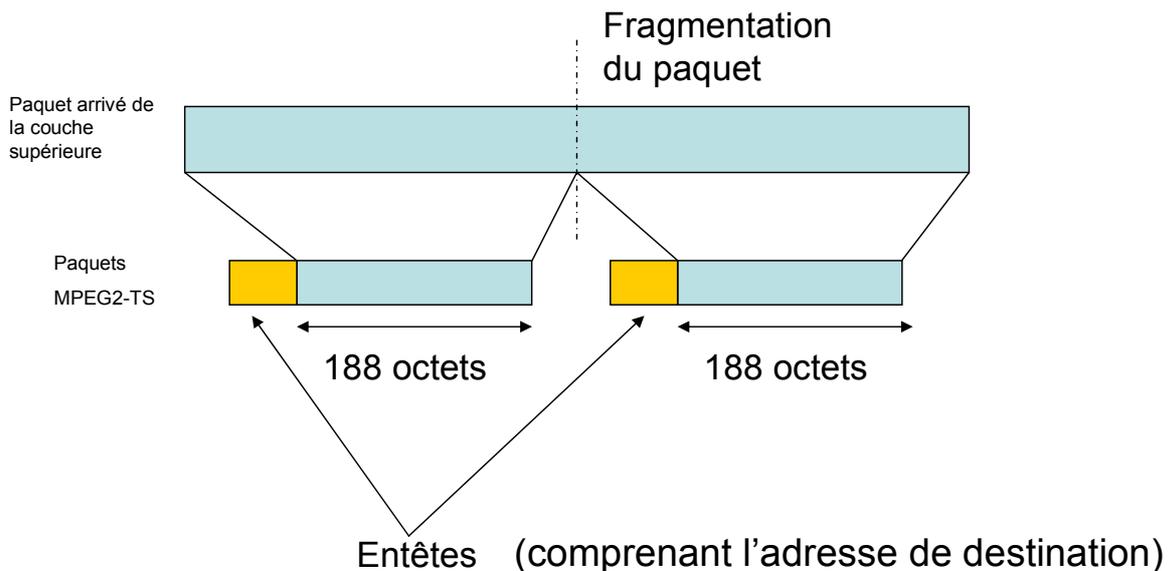


Figure 64 : Principe de fragmentation MPEG2

Ces paquets sont ensuite transmis à la couche physique afin d'y subir toutes les opérations décrites dans les paragraphes précédents. Les NIUs font ensuite le tri grâce à l'adresse contenue dans l'entête de chaque paquet MPEG2.

b) Voie montante

En ce qui concerne la voie montante, les choses sont beaucoup plus complexes. Il existe pour cette voie, un double multiplexage :

- le FDMA (Frequency Division Multiple Acces) qui est en fait un multiplexage fréquentiel pour différencier les 8 canaux montants.
- Le TDMA (Time Division Multiple Acces) qui est un multiplexage temporel où l'on découpe le temps en slots.

Pour des raisons de commodité, on définit aussi une unité de temps de 3 ms. Ces trames de 3ms contiennent exactement 18 slots temporels lorsque l'on utilise la classe C et 36 en classe D. La figure 65 explique de manière schématique ces découpages dans le cas de la classe C.

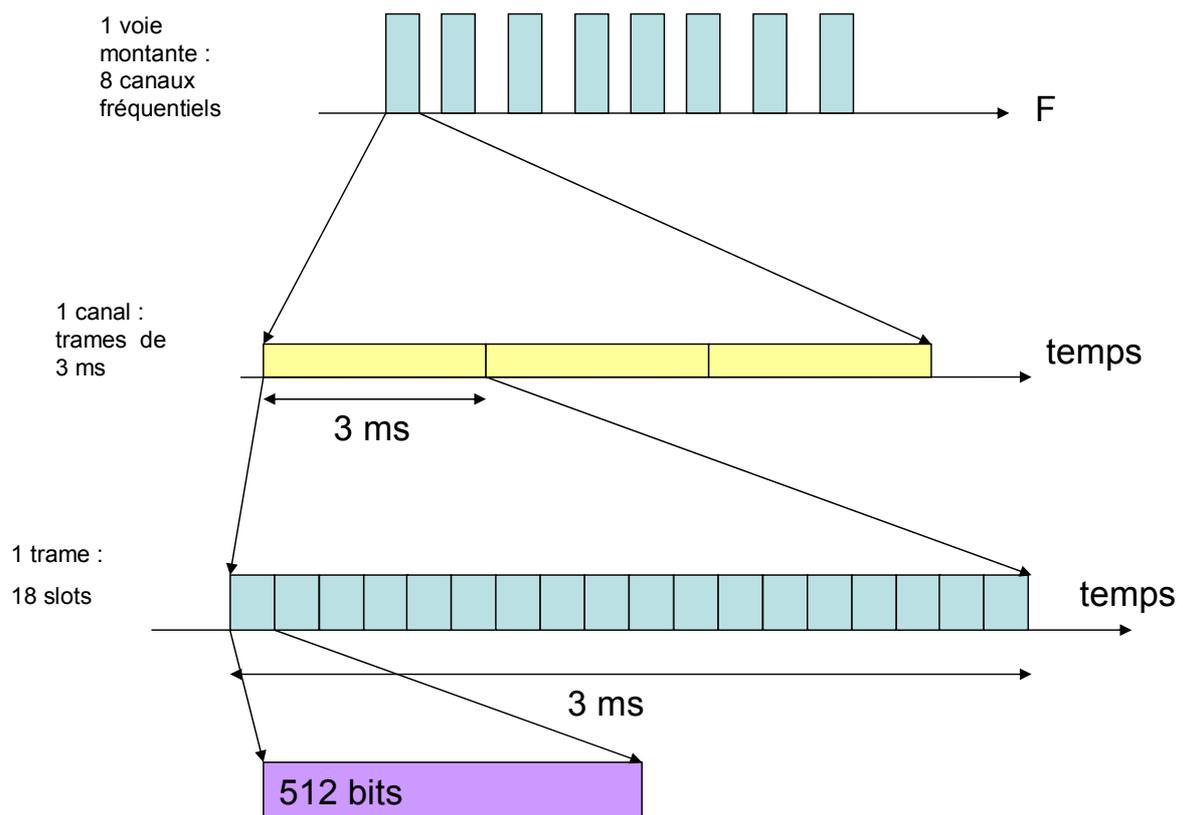


Figure 65 : Schéma de découpage de la voie montante

i) Fragmentation ATM

Comme nous l'avons vu, les NIUs doivent transmettre leurs informations dans des slots pouvant contenir 512 bits à savoir 64 octets. Or, le paquet arrivant de la couche supérieure peut être plus grand que ces 64 octets il faut donc le fragmenter en paquets pouvant rentrer dans un slot. Le format utilisé est ATM (Asynchronous Transfer Mode) et les paquets résultants de cette fragmentation sont appelés cellules ATM. La taille d'une cellule est de 53 octets soit 48 pour les données et 5 d'entête. Ces cellules sont ensuite encapsulées dans un paquet que l'on appellera cellule DVB de taille correspondant à la taille d'un slot à savoir 64 octets. Les 11 octets ajoutés à la cellule ATM sont utilisés pour le codage correcteur d'erreur et une bande de garde pour prévenir des erreurs de synchronisation. La figure 66 illustre le phénomène de fragmentation en cellule ATM puis l'encapsulation dans des cellules DVB.

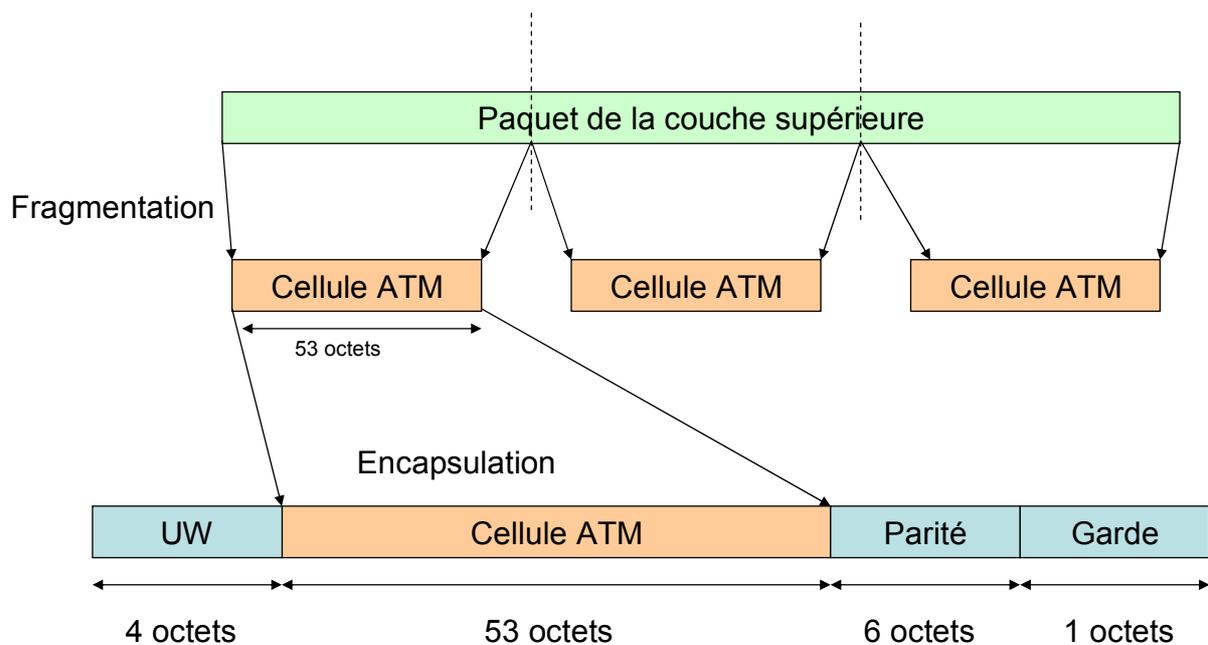


Figure 66 : Principe de fragmentation et d'encapsulation de la voie montante

UW ou « Unique Word » est une entête utilisée pour signifier le démarrage du slot à l'INA.

ii) Modes d'accès

Le standard DVB EN 301 199 définit trois modes d'accès au médium pour la voie montante c'est-à-dire trois moyens pour les NIUs de se partager les slots temporels. Ce paragraphe va les décrire de manière détaillée car ce sont eux qui vont le plus influencer sur les performances du système et donc sur la qualité de service.

Les trois modes d'accès sont :

- **Fixed Rate Access** : chaque utilisateur se voit alloué un ou plusieurs slots périodiquement (à chaque trame de 3 ms)
- **Reservation Access** : L'utilisateur envoie une demande d'allocation de bande de manière dynamique et reçoit de l'INA les numéros des slots qui lui sont réservés.
- **Contention Access** : Tous les utilisateurs peuvent tenter d'émettre sur ces slots au risque d'avoir plusieurs utilisateurs pour le même slot et donc de créer une collision.

iii) Description du mode Fixed Rate Access

Le mode Fixed rate access est le plus simple des trois. Chaque NIU se voit allouer par l'INA un ou plusieurs slots à chaque trame de 3 ms. Le nombre de NIUs est donc limité par canal montant puisque le nombre de slots possibles est lui aussi limité. De cette manière, il est possible pour l'INA de choisir le débit montant de chaque NIU puisqu'il est directement proportionnel au nombre de slots alloués. Par exemple, si une NIU a la permission d'émettre sur un slot, le débit montant de cette dernière sera de :

$$D = \frac{1}{0.003} \cdot 64 \cdot 8 = 170.1 \text{ kbits/sec} \quad (\text{III.1})$$

Pour une longueur de trame de 0.003 secondes, une taille de cellule de 64 octets.

Il ne faut pas oublier que ce débit comprend toutes les entêtes et les champs de parité ajoutés pour créer les cellules DVB. A noter aussi que le débit montant pour chaque NIU sera forcément un multiple de D.

iv) Description du mode Reservation Access

Ce mode est certainement le plus complexe au niveau protocole de mise en place puisqu'il suppose un dialogue entre l'INA et les NIUs. En effet, si la NIU a besoin d'une certaine bande passante en terme de débit à un certain moment, elle envoie une requête à l'INA qui va lui répondre par un message lui indiquant les slots qui lui sont assignés.

Pour se faire, le standard utilise une autre base de temps que l'on appelle trame étendue. La durée de ces trames est de 8189 slots pour la classe C et 8171 pour la classe D. Un fois que l'INA a reçu une demande de bande venant d'une NIU, elle lui retourne un numéro de slot de départ et un de fin dans la prochaine trame étendue. La NIU va donc savoir qu'elle pourra utiliser n'importe quel slot parmi les numéros reçus pour transmettre ses informations. Le standard laisse libre la façon d'assigner les slots ce qui peut fortement jouer sur la qualité de service. En effet, l'INA peut choisir de privilégier telle ou telle NIU et ainsi lui accorder plus de bande.

Le principal avantage de ce mode d'accès réside dans le fait que, comparé au mode Fixed rate Access, l'allocation dynamique ne bloque pas de la bande pour rien. En effet, lorsqu'une NIU n'a rien à transmettre, l'INA connaît les besoins de chacune et peut utiliser la bande non utilisée pour les autres.

v) Description du mode Contention Access

Pour ce mode, les slots sont accessibles à plusieurs NIUs. Il est donc possible que deux ou plusieurs NIUs décident d'utiliser le même slot ce qui amène à une collision rendant les messages illisibles. L'INA utilise un système d'accusé de réception (ACK) par le biais des MAC_Flags pour informer les NIUs que leur message a bien été reçu ou qu'il est entré en collision avec un autre. Lorsqu'une NIU décide de transmettre une cellule en mode contention, elle choisit aléatoirement un numéro de slot dans une trame et l'utilise. Le processus de contention attend ensuite d'avoir reçu un accusé de réception avant de poursuivre. Dans le cas d'un accusé de réception positif, la cellule n'a pas subi de collision et a donc été reçue correctement. La cellule suivante (s'il y en a une), peut être transmise selon le même procédé. Si l'ACK est négatif, il y a eu collision et la cellule peut être retransmise selon le processus suivant :

Un compteur dans la NIU enregistre un nombre, appelé *backoff_exponent*, de collisions rencontrées par une cellule. Ce *backoff_exponent*, a une valeur minimum (*Min_Backoff*) et une valeur maximum (*Max_Backoff*). Il est utilisé pour générer un nombre aléatoire entre 1 et $2^{\text{backoff_exponent}}$. Ce nombre aléatoire définit le nombre de slots de contention que la NIU devra attendre avant de retransmettre la cellule. Si le compteur arrive à la valeur maximum (*Max_Backoff_Exponent*), sa valeur reste la même quel que soit le nombre de collisions suivantes.

Ce processus permet d'augmenter la fenêtre de contention c'est-à-dire le nombre de slots parmi lesquels la NIU décide de retransmettre la cellule.

Les trois modes d'accès décrits ci-dessus peuvent bien entendu être combinés c'est-à-dire que dans une trame de 18 slots, on peut en assigner par exemple 5 en « contention access », 8 en « fixed rate access », et 2 en « reservation access ». On remarque que le total n'est pas égal à 18, les 3 slots restants étant utilisés pour la calibration des NIUs comme expliqué dans le paragraphe suivant.

vi) Calibration et synchronisation

La synchronisation et la calibration se font par l'intermédiaire du « ranging access ». Les données sont transmises dans un slot précédé et suivi par d'autres slots inutilisés par d'autres NIUs. Ces slots permettent d'ajuster l'horloge en fonction de la distance par rapport à l'INA afin que la réception au niveau de cette dernière se fasse effectivement dans le slot approprié sans débordement sur les autres pour éviter les collisions. Il faut donc trois slots pour permettre la synchronisation et la calibration. Le standard doit permettre une calibration fréquemment, il y a donc trois slots par trame de 3 ms utilisés pour le « ranging access » à savoir les trois premiers. Ce sont donc 15 slots sur 18 qui seront effectivement utiles pour transmettre les données.

Afin de mieux comprendre l'utilisation du mode « ranging access », nous allons prendre l'exemple de la première connexion d'une NIU. Lorsqu'une NIU est mise sous tension, elle synchronise son horloge sur les trames reçues de l'INA. Elle connaît donc l'instant de départ de la prochaine trame de 3 ms et donc les slots associés au « ranging

access ». Elle décide donc de transmettre un message de « ranging » dans ces slots mais étant donné qu'elle ne connaît pas sa distance par rapport à l'INA, le paquet transmis va « déborder » sur les autres slots adjacents à cause du temps de transmission comme le montre la figure 67.

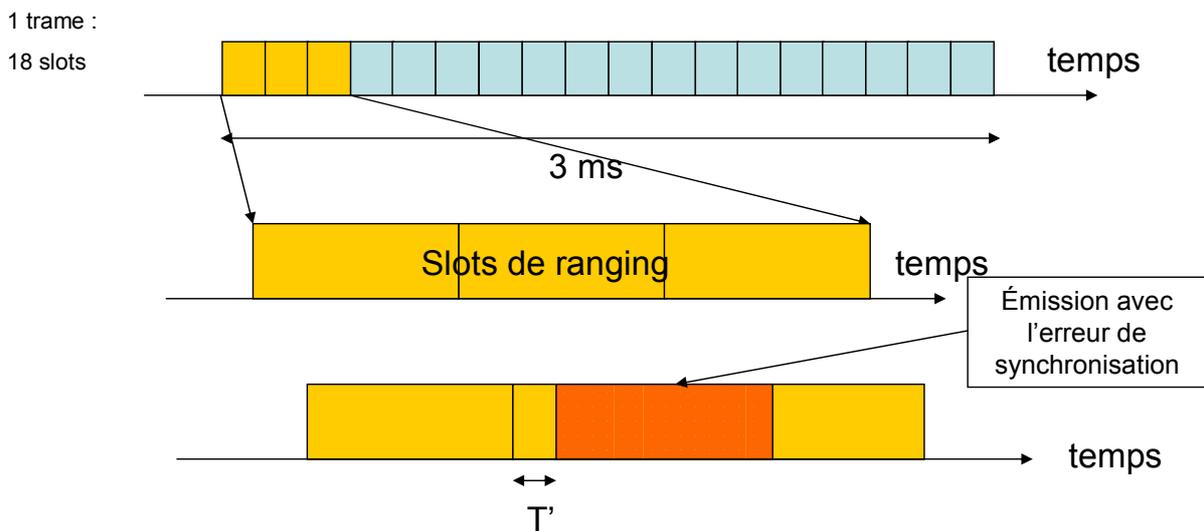


Figure 67 : Principe d'initialisation d'une NIU

Comme ces slots ne sont pas utilisés, il n'y a pas de collisions et le message reste lisible par l'INA qui va mesurer le temps T' et renvoyer cette valeur à la NIU en question qui ajustera son horloge interne en conséquence. La calibration en puissance se fait de la même manière c'est-à-dire que l'INA va, en même temps que les informations de synchronisation, répondre à la NIU en lui indiquant de combien elle doit augmenter ou diminuer sa puissance pour rester dans des normes acceptables. (Voir annexe 2 pour l'algorithme de connexion d'une NIU).

Maintenant que nous avons décrit le fonctionnement de ce standard, nous allons en quelques lignes récapituler les principales caractéristiques à retenir à travers le paragraphe suivant.

III-2.5 Synthèse

Voici donc les points à retenir concernant le standard DVB EN 301 199.

- Système point-multipoints

- Voie descendante :

Modulation QPSK.,

Transmission de paquets MPEG2 en Broadcast.

- Voie montante :

Modulation QPSK,

Segmentation en cellules ATM,

FDMA : 8 canaux fréquentiels,

Pour chaque canal : trames de 3 ms,

Pour chaque trame : 18 slots temporels permettant le transport de 18 cellules ATM,

Les 3 premiers slots réservés pour la synchronisation et la calibration,

3 modes de partage des slots entre les NIUs (modes d'accès),

« **Fixed rate access** » : un nombre fini de slots par trames pour chaque NIU,

« **Reservation access** » : allocation dynamique des slots par l'INA,

« **Contention access** » : Tous les slots pouvant être utilisés par chaque NIU (risque de collision).

Nous verrons dans le chapitre suivant que cette norme n'est pas très bien adaptée aux demandes émergentes des utilisateurs en terme de débits c'est pourquoi nous avons été amenés à étudier des standards plus récents et mieux adaptés aux besoins actuels comme le 802.16.

III-3 LA NORME 802.16

La norme 802.16 décrite dans les paragraphes suivants spécifie à la fois la couche physique et la couche MAC d'un système point multipoints large bande sans fil [III.2]. Ce standard a été élaboré pour des fréquences comprises dans les bandes 10-66 GHz et 2-11 GHz.

III-3.1 Concept

Nous allons maintenant présenter le concept général de la norme 802.16 qui comme l'illustre la figure 68, comprend trois sous couches qui sont :

- « ***Service Specific Convergence Sublayer (CS)*** » joue le rôle d'interface avec les couches supérieures ou bien les systèmes externes. Elle a entre autre la charge de classer les paquets selon leur provenance et leur destination afin de les répartir sur la bonne connexion MAC.
- « ***MAC Common Part Sublayer (MAC CPS)*** » est le cœur de la couche MAC à savoir qu'elle s'occupe de l'allocation de bande, l'établissement et la maintenance des connexions. Elle reçoit des paquets provenant de la CS que cette dernière aura classifié en connexions de différentes qualités de service.
- « ***Privacy Sublayer*** » qui est la couche de sécurité s'occupant du cryptage des données, de l'échange des clefs etc...

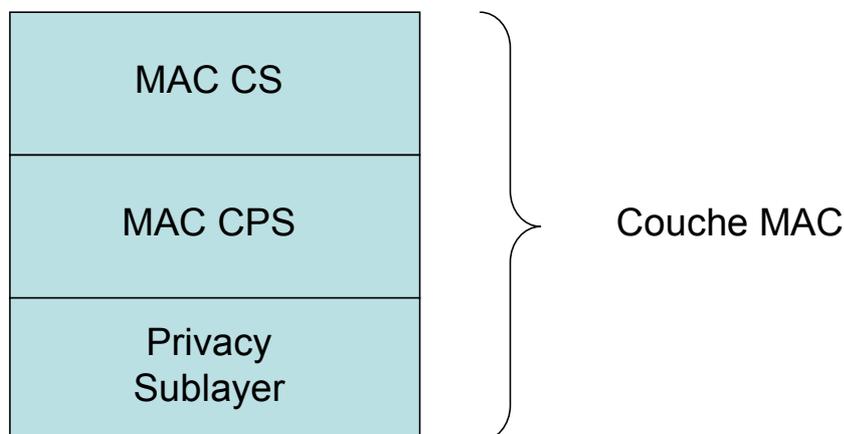


Figure 68 : La couche MAC et ses sous-couches

Les paragraphes suivant détaillent le rôle des deux premières couches à savoir la CS et la MAC CPS qui représentent le cœur de ce standard.

III-3.2 Couche de convergence (CS)

Il existe à l'heure actuelle deux spécifications pour cette couche CS, l'une étant basée sur un mode de transfert de cellules (ATM) et l'autre sur un mode de transfert de paquets :

- *la couche de convergence ATM* accepte des cellules ATM d'une couche supérieure, les classe, et délivre des PDU à la sous-couche MAC CPS. Elle est utilisée pour interfacer le système avec des réseaux ATM,
- *la couche de convergence « packet CS »* est utilisée pour interfacer avec des couches supérieures fonctionnant avec des paquets comme la couche IP ou Ethernet, mais d'autres spécifications pourront être rajoutées dans le futur.

III-3.3 Couche commune MAC (MAC Common Part Sublayer)

Cette couche est la partie la plus importante pour notre étude puisque c'est elle qui détermine de quelle manière le médium va être partagé. Nous allons évoquer le principe de base avant de rentrer dans le détail du fonctionnement de la norme 802.16.

a) Principe de base

Nous avons vu qu'un réseau utilisant un médium partagé requiert un mécanisme efficace de partage. La voie descendante, de la station de base (dans ce standard appelée BS) vers l'abonné, opère donc sur la base d'un système point multipoints. Ce standard, opère donc de manière sectorielle de façon à pouvoir créer un système cellulaire. Comme dans la norme DVB EN 301 199 décrite en amont, toutes les stations abonné (appelées SS) d'un même secteur reçoivent la même transmission sur la même fréquence. La discrimination des messages se fait donc grâce au contrôle d'adresse par chaque SS.

Dans l'autre direction (SS vers BS), les SSs partagent donc le médium radio selon un système de requêtes. En fonction de la classe de service utilisée, la SS (Subscriber Station) aura ou non une opportunité d'émettre ses messages, cette opportunité étant définie par la BS. Ces opportunités sont transmises aux SSs par la BS après réception d'une requête.

Il y a quatre types d'allocation de bande pour la voie montante, c'est-à-dire cinq façons pour les SSs de se partager la bande. Elles sont implémentées en utilisant différentes procédures qui sont :

- "unsolicited bandwidth grants" ou allocation de bande non réclamée,
- "polling" ou allocation de bande par système d'interrogation des SSs,
- "contention procedures" ou allocation de bande selon un système de contention.

Chacune de ces procédures sera décrite plus en détail dans la section III.2.3.c mais on peut déjà dire que leur utilisation se fera en fonction des données devant être transmises et que la combinaison de ces procédures va fortement influencer sur les performances du système.

Par exemple, les services utilisant de la transmission de données sont très tolérants en terme de retard alors que des services temps réel comme de la voix ou de la vidéo ont besoins de bande passante de manière quasi-instantanée.

Cette couche MAC utilise un système de connexions c'est-à-dire qu'elle va gérer des connexions plutôt que des machines. Cela permet d'avoir par exemple plusieurs individus connectés avec chacun leur machine sur une même SS, la station de base pouvant donc gérer les connexions de ces individus plutôt que la SS seule. Ainsi on pourra accorder plus de bande passante à un individu faisant de la visioconférence qu'aux autres ne faisant que de la navigation Internet. Les connexions peuvent être gérées dynamiquement à savoir qu'on peut changer leur qualité de service, les détruire, en créer de nouvelles etc... A chaque connexion est associé un flux de service à savoir un certain débit, un retard maximum autorisé, le tout dans les sens montant et descendant. Ce concept de flux de service est primordial. Il est la pièce centrale des mécanismes de qualité de service associés au standard 802.16.

Une SS transmet donc des requêtes de bande passante pour chaque connexion qui lui est associée. La BS quant à elle, alloue la bande soit par connexion, soit par SS.

Chaque SS doit avoir une adresse unique dite adresse MAC, codée sur 48 bits. Les connexions, quant à elles sont codées sur 16 bits.

Pour transporter les données, la norme 802.16 utilise un format de paquet spécifique décrit dans le paragraphe suivant.

b) Format de paquets

Les paquets utilisés par la couche MAC (MAC PDUs) sont illustrés par la figure 69. Chaque PDU commence par une entête générique de longueur fixe. Cette entête est suivie par un champ de données qui peut lui-même être constitué de plusieurs sous entêtes et des paquets provenant de la CS (données à transmettre). La longueur de ce champ est variable en fonction du nombre de sous entêtes et de la taille des paquets à transmettre.

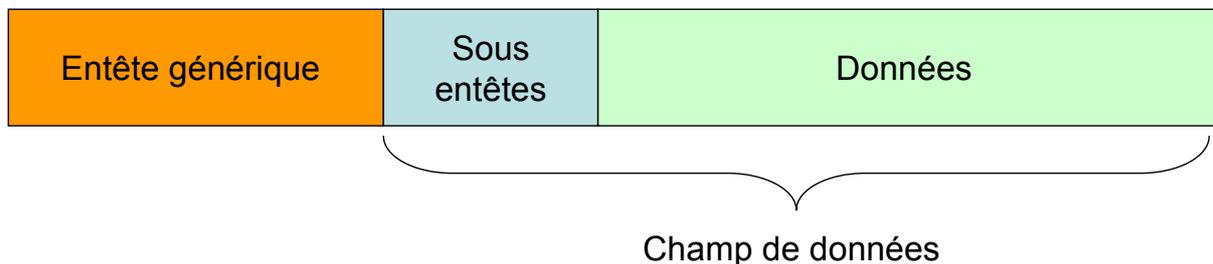


Figure 69 : Format d'un paquet MAC PDU

Ce système permet à la couche MAC d'agir comme un tunnel sans avoir besoin de connaître ce qu'il y a dans les paquets de données reçus de la couche MAC CS.

Les sous entêtes citées servent pour la transmission d'informations telles que l'état de la fragmentation, de l'encapsulation. En effet la couche MAC comporte une option servant à découper les paquets de grande taille dans le cas d'une CS utilisant des paquets plutôt que des cellules ATM et une autre servant à encapsuler plusieurs petits paquets dans un même champs de données.

Pour la voie montante un autre format de PDU existe pour acheminer les requêtes de bande. Il s'agit uniquement d'une entête sans champ de données.

c) Procédure de partage de bande pour la voie montante

Le partage de bande pour la voie montante est la procédure qui gère l'allocation de bande et l'interrogation des SSs sur l'état de leur file d'attente. Différents types de services sont utilisés dans ce standard : Unsolicited Grant Service (UGS), Real-Time Polling Service (rtPS), Non-Real-Time Polling Service (nrtPS) and Best Effort (BE). Ils vont être décrits succinctement dans les lignes suivantes.

i) *Unsolicited Grant Service (UGS)*

Ce type de service est utilisé pour supporter des flux temps réel générant des paquets de taille fixe et de façon périodique comme de la transmission de voix sans suppression des silences. Il offre une fenêtre de manière systématique et périodique ce qui évite les temps de latence dus aux mécanismes de requête. La BS autorise donc les connexions utilisant ce flux d'émettre des paquets de taille fixe à intervalles réguliers.

Le standard préconise, pour les connexions utilisant ce service, de ne pas utiliser les autres afin qu'il puisse fonctionner correctement.

Le service UGS est spécifié par différents paramètres, la taille la fenêtre allouée, la période nominale d'allocation de cette fenêtre, et l'écart temporel maximum autorisé par rapport à la période. La figure 70 illustre le service UGS.

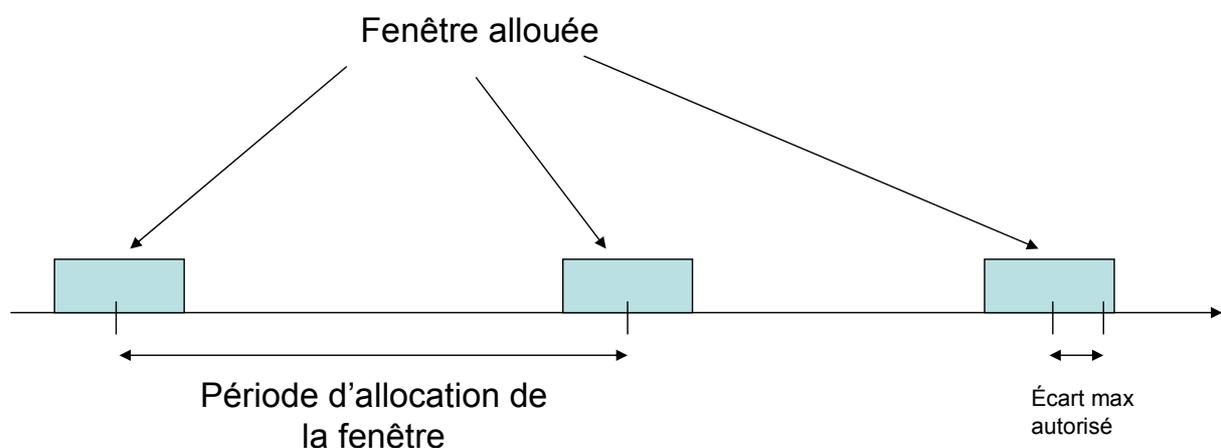


Figure 70 : Principe du service UGS

ii) Real-Time Polling Service (rtPS)

Ce service supporte les flux temps réel générant périodiquement des paquets de taille variable comme de la vidéo encodée en MPEG. Il offre des opportunités à chaque SS l'utilisant, de transmettre des requêtes indiquant la taille de la fenêtre voulue, permettant ainsi de transmettre des paquets de longueur variable. Pour cela la BS accorde une fenêtre d'interrogation périodiquement à la SS, permettant à cette dernière de transmettre une requête. Le standard préconise, pour les connexions utilisant ce flux, de ne pas utiliser ceux utilisant la contention afin que ce service puisse fonctionner correctement. Les paramètres définissant ce service sont l'intervalle nominal entre les fenêtres d'interrogation et l'écart temporel maximum.

L'inconvénient est que le besoin de transmettre les requêtes occupe de la bande passante et que le temps de transaction entre la BS et la SS peut altérer la qualité du service.

iii) Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)

Ce service est désigné pour supporter les flux ne nécessitant pas de temps réel, utilisant des paquets de taille variable, comme du transfert de fichiers (FTP) en haut débit. Il offre aux SSs des opportunités de transmettre des requêtes environ toutes les secondes de manière périodique. De plus, contrairement au service temps réel, dont la fréquence des opportunités est beaucoup plus importante, les connexions l'utilisant ont la possibilité d'utiliser les fenêtres de contention pour transmettre ces même requêtes.

Les paramètres définissant ce service sont l'intervalle nominal entre les fenêtres d'interrogation, le trafic réservé minimum et maximum, et la priorité de ce trafic.

iv) Best Effort (BE)

Ce service est le plus simple de tous, il est utilisé pour tous les flux ne nécessitant pas de qualité de service particulière. Les SSs utilisant un service « BE » peuvent transmettre leurs requêtes aussi bien dans une fenêtre de contention que d'interrogation.

Les paramètres de ce service sont le débit minimum et maximum accordé, et la priorité de ce trafic.

III-3.4 Interconnexion couche MAC/couche physique

Le standard 802.16 spécifie plusieurs méthodes de duplexage des voies montantes et descendantes. La couche MAC se base à l'heure actuelle sur un mode tramé c'est-à-dire qu'elle définit une base de temps. Cette base de temps dépend de celle de la couche physique associée.

Le standard 802.16 peut utiliser deux modes de duplexage :

- Le duplexage FDD (Frequency Division Duplexing),
- Le duplexage TDD (Time Division Duplexing).

A noter aussi que le standard spécifie trois longueurs de trame possibles : 0.5, 1 et 2 ms.

a) Duplexage FDD (Frequency Division Duplexing)

Dans le mode FDD, la voie montante et la voie descendante utilisent des fréquences différentes. Une trame de durée fixe est utilisée pour les deux voies de transmission. Cela permet une utilisation plus facile des différentes modulations et l'utilisation des modes « half et full duplex ». Si le mode « half-duplex » est utilisé, la BS ne doit donc pas allouer de la bande au même moment qu'elle transmet des données à une SS.

La figure 71 illustre le principe du mode FDD en fonctionnement « half et full duplex ».

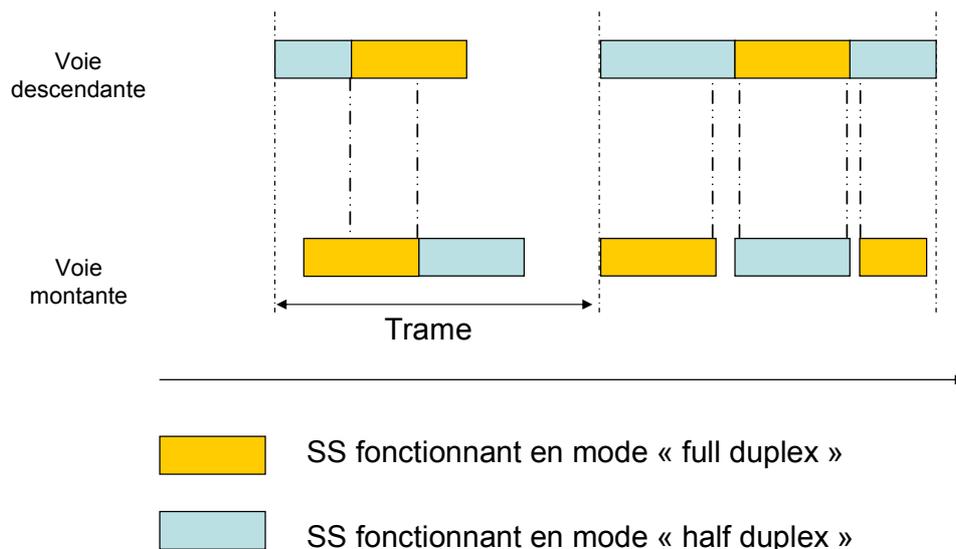


Figure 71 : Exemple d'un système à deux SSs l'une en mode « Full duplex » et l'autre en « Half duplex »

Le fait que la voie montante et la voie descendante utilisent la même longueur de trame simplifie l'algorithme d'allocation de bande passante. Une SS utilisant le mode « full duplex » est capable d'écouter continuellement la voie descendante tandis qu'une SS fonctionnant en mode « half duplex » ne peut pas écouter la voie descendante pendant qu'elle transmet des données sur la voie montante.

b) Duplexage TDD (Time Division Duplexing)

Dans le cas d'un mode TDD, la voie descendante et la voie montante utilisent la même bande de fréquence et les transmissions de chacune se déroulent à des temps bien distincts.

Les trames TDD, comme le montre la figure 72, sont toujours d'une longueur fixe et contiennent une « sous-trame » montante et une « sous-trame » descendante.

La trame est donc divisée en un nombre de slots (un slot correspondant à 4 symboles de modulation) ce qui permet de partitionner la bande facilement. Le tramage TDD est adaptable c'est-à-dire que le partage entre la voie montante et descendante n'est pas figé. Ceci permet d'adapter le débit de la voie descendante par rapport à celui de la voie montante.

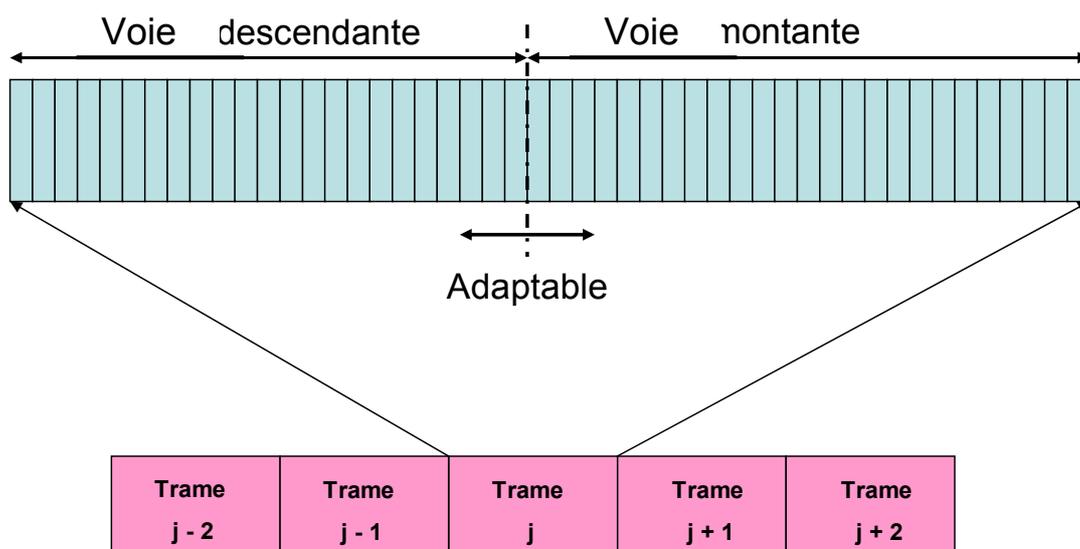


Figure 72 : Structure d'une trame TDD

c) Cartes des trames montantes et descendantes

Nous avons vu que c'est la BS qui décide de tout en ce qui concerne l'allocation de bande. Pour cela elle doit faire connaître aux SSs connectés la structure des prochaines trames tant en voie montante que descendante. Cette structure transmise via des paquets spécifiques à chaque début de trame est appelée carte. Il existe une carte pour la voie montante (UL_MAP) et une autre pour la voie descendante (DL_MAP).

Les informations contenues dans la DL_MAP concernent la trame courante (la trame dans laquelle elle est transmise) alors que la UL_MAP concerne soit la trame courante soit la suivante. La figure 73 illustre l'utilisation des cartes en mode TDD alors que la figure 74 montre cette utilisation en mode FDD.

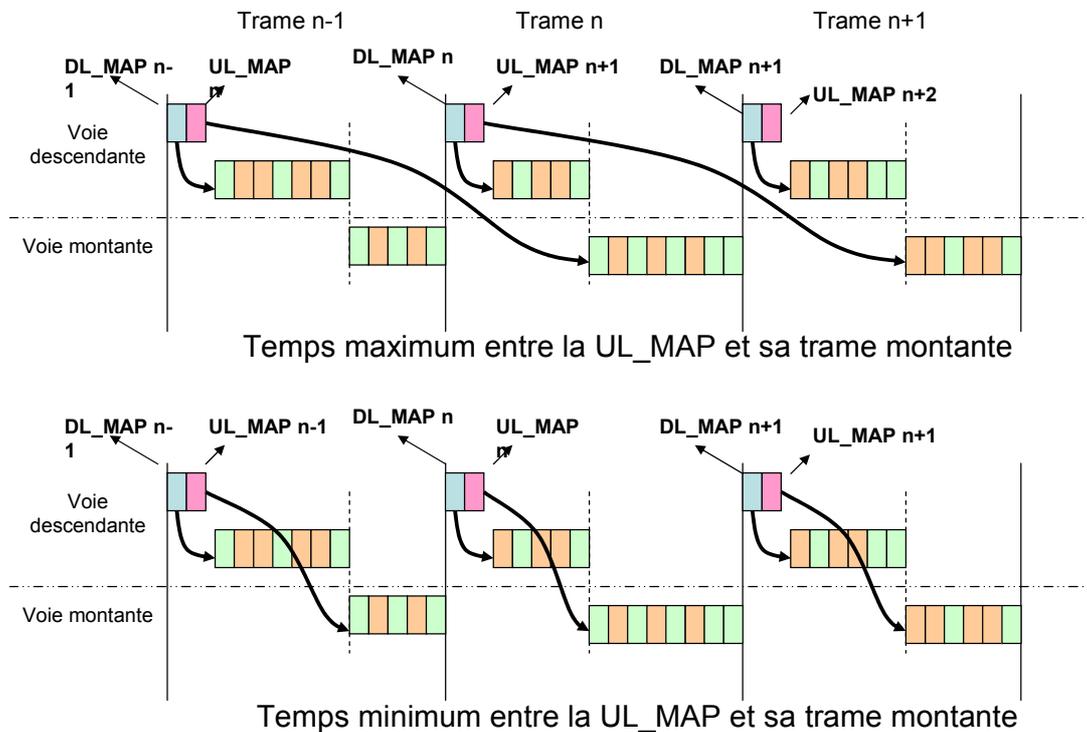


Figure 73 : Utilisation des cartes en mode TDD

On constate que la carte peut soit décrire la trame qui suit immédiatement cette dernière, soit la suivante. Ceci permet à la SS d'avoir le temps de décrypter la carte avant que celle-ci ne se produise.

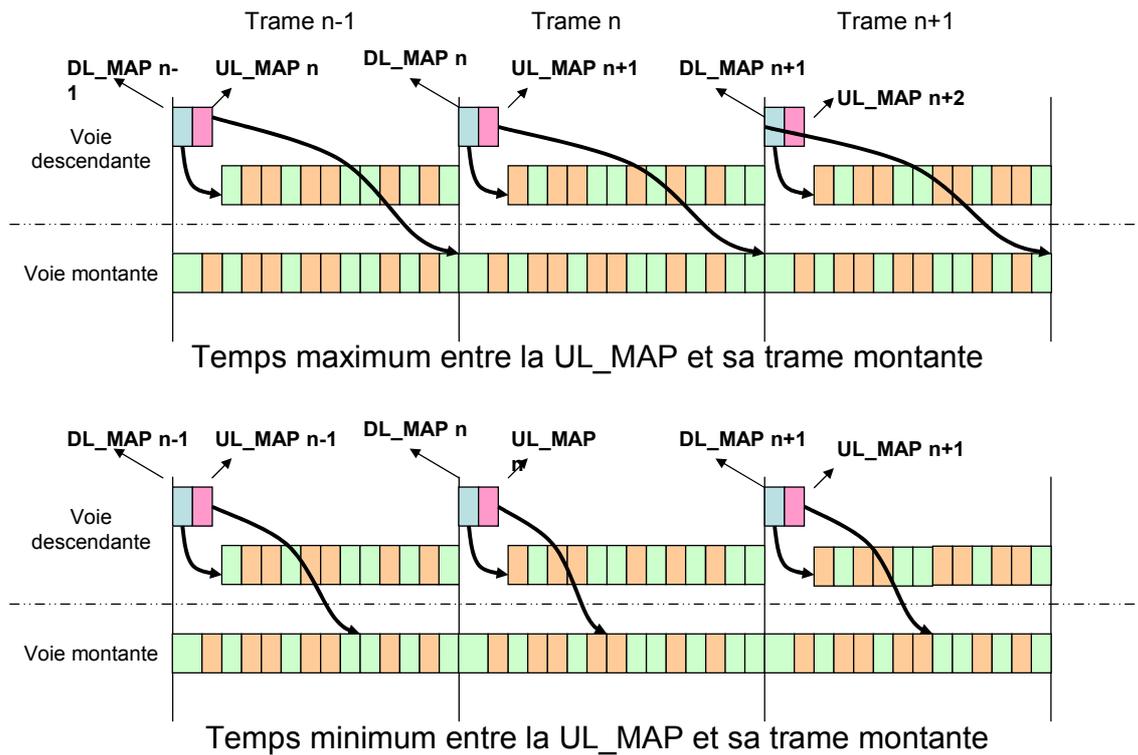


Figure 74 : utilisation des cartes en mode FDD

C'est le même principe que pour le mode TDD mis à part que les deux trames (montante et descendante), sont synchronisées.

III-3.5 Spécifications de la couche physique

Dans ce paragraphe nous allons énumérer les spécifications de la couche physique [III.4] pour les voies descendante et montante indifféremment. Il faut rappeler que la durée des trames peut être de 0.5, 1, ou 2 ms et que le mode de duplexage entre les deux voies peut être soit FDD, soit TDD.

a) Une couche flexible

Une des principales particularités de la norme 802.16 réside dans le fait que la couche physique est totalement adaptable en fonction de la qualité du signal reçu.

Comme celle du standard DVB EN 301 199 vu précédemment, la norme 802.16 définit la modulation et les différents systèmes de correction d'erreur utilisés. Le

fonctionnement de ces systèmes est tel que plus ils sont robustes aux interférences et au bruit, plus le débit utile après passage à travers eux est faible. Or, dans un système LMDS, il y aura des abonnés très près de la station de base et d'autres très éloignés, il est donc logique d'adapter leur couche physique en fonction de certains paramètres comme le rapport signal à bruit.

La couche physique de la norme 802.16 définit trois types de modulation qui sont la modulation QPSK (vue pour la norme DVB), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation à 16 états), et 64QAM allant de la plus robuste à la plus efficace en terme de débit [III.5].

i) Modulation 16QAM

La modulation 16QAM est une modulation d'amplitude et de phase. Elle comprend deux états d'amplitude et 8 états de phase ce qui nous donne 16 états différents du signal. Nous avons ainsi 4 bits par symboles.

La figure 75 donne la représentation de cette modulation dans le plan complexe.

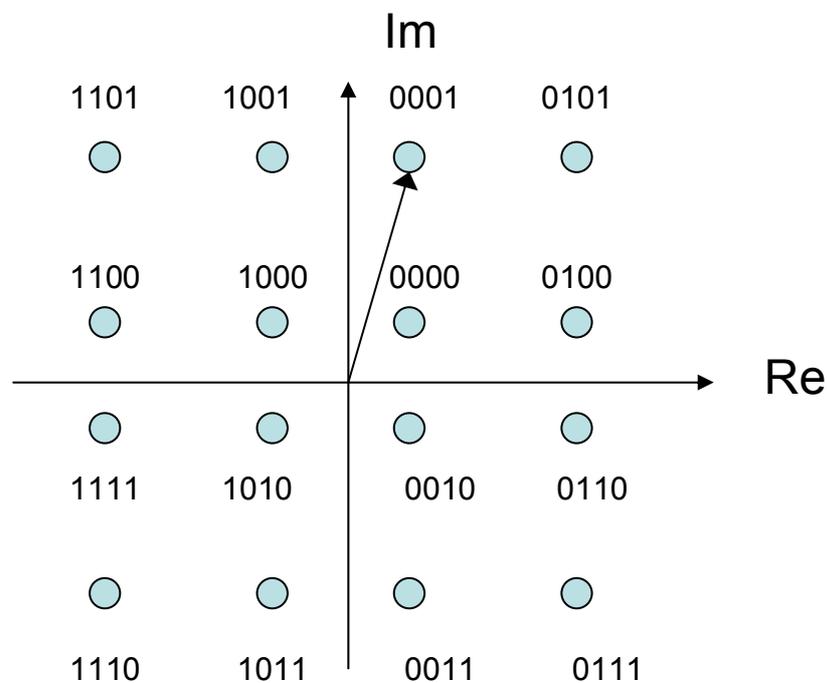


Figure 75 : Constellation de la modulation 16QAM dans le plan complexe

On peut voir que le nombre d'états change par rapport à la modulation QPSK ce qui permet d'avoir un nombre de bits par symboles supérieur (4).

ii) Modulation 64QAM

La modulation 64QAM est une modulation d'amplitude et de phase. La combinaison de ces différents états amène à 64 combinaisons possibles ce qui donne 6 bits par symboles.

La figure 76 donne la représentation de cette modulation dans le plan complexe.

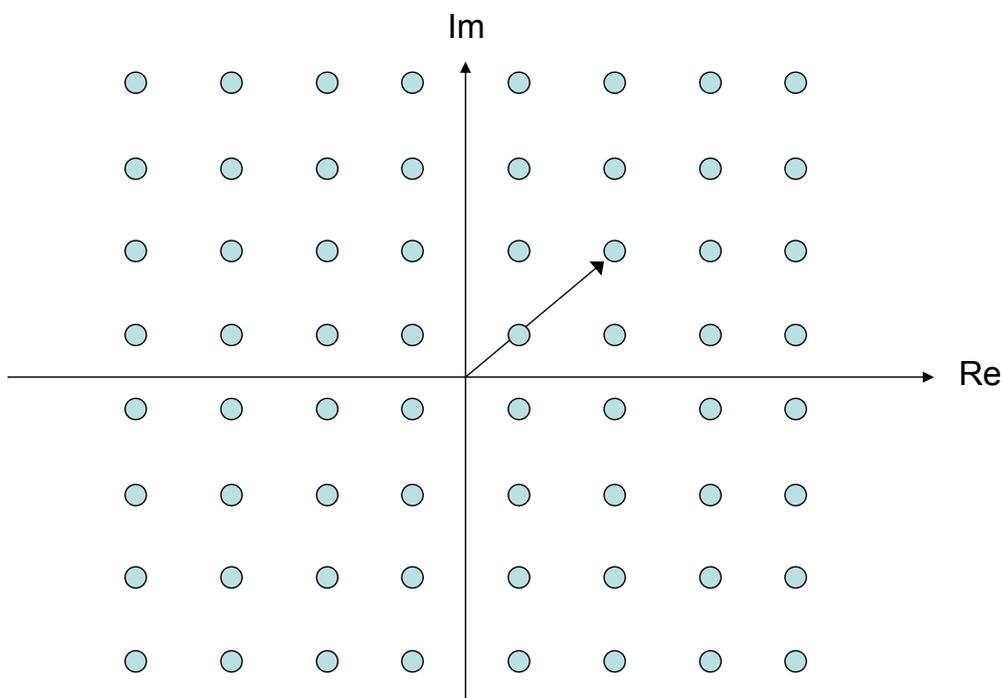


Figure 76 : Constellation de la modulation 64QAM dans le plan complexe

On voit là aussi que la modulation est plus efficace puisqu'elle dispose de plus d'états possibles (64) et donc de plus de bits par symboles.

Dans ce paragraphe, nous n'allons pas nous attarder sur le codage correcteur d'erreurs mais il faut tout de même savoir que comme la modulation, plus il est robuste aux erreurs, moins il est efficace en terme de débits utiles. Les codages utilisés sont basés sur les mêmes principes que ceux de la norme DVB.

b) Notion de profil

On appelle profil un couple « codage/modulation ». Vu qu'il existe une grande quantité possible de codages et trois modulations différentes, le nombre de profils pouvant être définis est très grand.

Selon la qualité du signal reçu par le récepteur, il peut choisir de passer à un profil plus ou moins robuste.

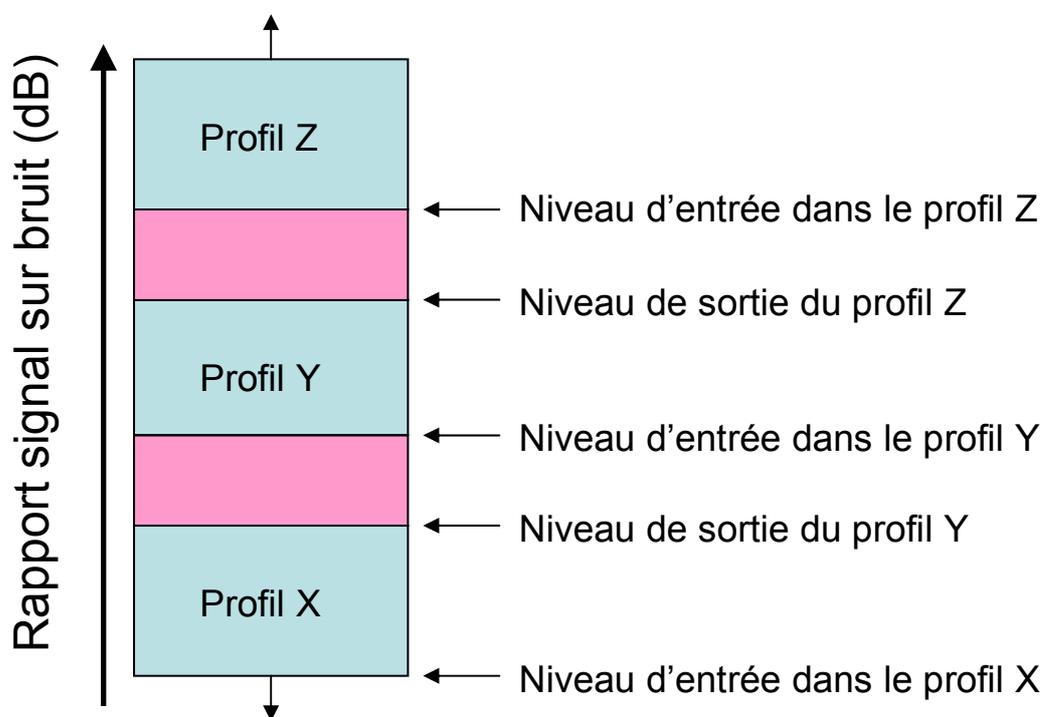


Figure 77 : Principe de changement de profils

Comme le montre la figure 77, le passage de tel ou tel profil passe par des hystérésis afin d'éviter, si le rapport signal sur bruit est exactement égal à un niveau d'entrée, de permuter trop souvent de profil.

Du fait des variations de la réglementation en terme des fréquences utilisables en fonction des régions, le standard 802.16 ne définit pas de plan de fréquences.

Nous allons dans le paragraphe suivant énumérer les différents débits possibles pour la transmission d'information que ce soit pour l'une ou l'autre des voies, en fonction de la taille du canal fréquentiel.

c) Débits

Le tableau 3 donne la correspondance entre la taille du canal et les débits possibles, sachant que les débits en symboles par secondes sont constants.

Largeur de canal (MHz)	Débit en symboles par sec	Débit en bits/sec QPSK	Débit en bits/sec 16QAM	Débit en bits/sec 64QAM
20	16	32	64	96
25	20	40	80	120
28	22.4	44.8	89.6	134.4

Tableau 3 : Débits offerts par le standard 802.16

Logiquement on constate que plus le canal est large, plus le débit maximum est grand.

III-3.6 Synthèse

Voici donc les points à retenir concernant le standard IEEE 802.16 :

- système points-multipoints.
- Voie descendante :
modulation adaptative QPSK, 16QAM, 64QAM,
codage correcteur d'erreur adaptatif,
transmission de cellules ATM ou de paquets de taille variable encapsulés dans des PDUs en Broadcast,
tramage de 0.5, 1 ou 2 ms,
gestion avancée de la qualité de service.
- Voie montante :
modulation adaptative QPSK, 16QAM, 64QAM (optionnelle),
codage correcteur d'erreur adaptatif,
transmission de cellules ATM ou de paquets de taille variable encapsulés dans des PDUs,
tramage de 0.5, 1 ou 2 ms,
gestion avancée de la qualité de service,
allocation de bande par la BS de manière dynamique (toutes les trames).
- Duplexage en mode FDD, TDD ou HFDD (Half duplex FDD).

III-4 COMPARAISON DES NORMES

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les normes dans leurs spécifications c'est-à-dire les points qui détermineront leurs différences non pas en terme de performances mais en terme de mode de fonctionnement.

- Principe de fonctionnement :

Les deux standards fonctionnent en mode point multipoints et sont établis pour un système LMDS, il n'y a pas de différences.

- Duplexage :

Le standard DVB utilise un duplexage fréquentiel alors que la norme 802.16 permet un duplexage temporel ou fréquentiel. De plus, la norme 802.16 offre la possibilité aux SSs de ne pas fonctionner en Full duplex ce qui simplifie grandement l'architecture de ces dernières d'un point de vue matériel alors que la norme DVB impose un fonctionnement en Full duplex.

- Voie descendante :

Les voies descendantes des deux standards sont sensiblement identiques mis à part le format des paquets transmis. Le tramage est présent du côté 802.16 mais pas DVB. La modulation adaptative de la norme 802.16 apporte une évolution considérable pour optimiser la bande passante alors que la norme DVB utilise la modulation QPSK de manière systématique.

- Voie montante :

La grande différence entre les deux standards réside dans le fonctionnement de la voie montante. En effet, la norme DVB, pour une voie montante utilise 8 canaux de fréquence différents alors que la 802.16 n'utilise qu'un seul canal. Le tramage est présent dans les deux standards mais la résolution de la 802.16 est supérieure à celle de la DVB puisque elle peut aller jusqu'à la demi milliseconde. L'allocation de bande peut être gérée de manière dynamique par les deux standards mais cette gestion est beaucoup plus poussée du côté de la 802.16 puisqu'elle se fait à chaque trame. La modulation adaptative est présente pour la 802.16 et non pour la DVB. La DVB utilise du TDMA à chaque canal (slots temporels) alors que la 802.16 n'a pas de longueur de slots fixe.

- Débits :

Pour les voies descendantes, aucune des deux normes ne spécifie de débit particulier, elles sont donc identiques de ce point de vue mais les voies montantes sont différentes. La norme DVB spécifie 8 canaux de 3.088 ou 6.176 Mbits/sec chacun alors que la 802.16 n'a pas de contraintes. Sachant qu'une NIU DVB ne peut utiliser qu'un seul canal, son débit maximum sera de 3.088 ou 6.176 Mbits/sec alors qu'il n'y a pas de limites théoriques par la norme 802.16.

- Qualité de service :

Nous avons vu que la gestion de la qualité de service par la 802.16 est beaucoup plus poussée que celle de la DVB ce qui permet une adaptation aux nouvelles demandes des utilisateurs comme la visioconférence ou la téléphonie sur IP. De plus la 802.16 ayant la possibilité d'allouer de la bande de manière flexible, elle peut optimiser le trafic qu'elle transmet. La limite en terme de débit de la norme DVB pour la voie montante cause des problèmes pour les applications telles que la visioconférence qui demandent un débit symétrique (identique sur la voie montante et descendante). Alors que la norme 802.16 va utiliser une même bande passante pour les deux sens.

III-5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le fonctionnement de deux normes spécifiées pour les systèmes LMDS. Les formats de paquet, la couche physique et la méthode de partage du médium ont été abordés ce qui permet de conclure que la norme 802.16 est beaucoup plus flexible que la DVB. Elle permet une gestion de la qualité de service absente du standard DVB et une meilleure optimisation du médium radio.

La symétrie possible pour l'une et non pour l'autre renforce le sentiment que la DVB n'est pas bien adaptée aux demandes grandissantes des utilisateurs en terme de flux sortant.

La 802.16 permet une optimisation de la bande passante très fine et n'alloue que la bande dont l'utilisateur a réellement besoin en laissant libre le reste pour d'autres abonnés.

Maintenant, nous avons toutes les connaissances afin d'étudier le comportement de ces normes et aussi d'en faire des modèles OPNET précis et efficaces.

CHAPITRE IV

Applications

IV-1 INTRODUCTION

Au cours de ce chapitre, nous allons faire une brève description du projet ERASME qui se trouve être le cadre de cette thèse. Puis nous décrirons les travaux effectués sur la norme DVB tant au niveau théorique, simulation qu'expérimental. Au travers de ces études nous évoquerons les problèmes posés par un composant particulier du modem abonné.

Une étude prospective de la norme 802.16 sera faite par la suite en insistant sur l'effet des modulations et la mise en place de la qualité de service avant de conclure sur cette dernière et sur les performances autorisées.

IV-2 LE PROJET ERASME

ERASME (Evaluation de réseaux sans fil multimedia en EHF) est un projet RNRT [IV.1] piloté par Thalès, de plate-forme ouverte « **Multimédia Wireless System (MWS)** » qui vise l'étude de réseaux d'accès sans fil. Il permet l'expérimentation, par les universitaires, les PME et les administrations, des nouveaux services nécessitant le haut débit, [I.13]. Il nécessite pour cela l'étude et la modélisation des flux de données en tenant compte des limites et des atouts du MWS.

Il sera ainsi possible de lever les verrous technologiques matériels et logiciels des communications sans fil dans la bande millimétrique.

Dans le cadre de ce projet dont le site d'expérimentation est **ESTER – TECHNOPOLE de Limoges**, les applications envisagées sont :

- L'accès par des étudiants répartis sur un campus à une bibliothèque de cours enregistrés,
- la mise en commun d'ateliers de développement logiciel et matériel par un groupe de PME ou entre une grande entreprise et des laboratoires et PME coopérants,
- la formation professionnelle,
- la mise à disposition conjointe d'abonnés représentatifs du grand public de services de télévision interactive et de raccordement à haut débit à Internet.

Le choix de la bande de fréquence (40,5 GHz – 43,5 GHz) est motivé par la saturation dans les basses fréquences. Même les bandes de 3,5 et 26 GHz récemment attribuées risquent d'être vite engorgées vu la multiplication des services proposés.

A terme le projet **ERASME**, s'appuyant techniquement sur le projet RNRT **DANUBE [IV.2]** contribuera à lever les inquiétudes et réticences actuelles en :

- démontrant la maturité de la technologie dans cette bande de fréquence,
- prouvant les méthodes d'ingénierie réseau pour cette nouvelle bande de fréquences sur un cas réel en ayant en vue les paramètres pouvant améliorer le système (répéteurs actifs et passifs, antennes émettrices grand gain, diminution des dimensions des aériens, augmentation de la puissance rayonnée et réduction du facteur de bruit...)
- prouvant la qualité de services sur une portée raisonnable,
- quantifiant la demande moyenne en trafic sur les deux voies (montante et descendante).

La multiplicité des partenaires engagés sur ce projet est un atout supplémentaire dans l'apport des diverses compétences indispensables à sa réussite.

La figure 78 montre l'architecture globale de la plateforme de tests installée sur le site d'ESTER.

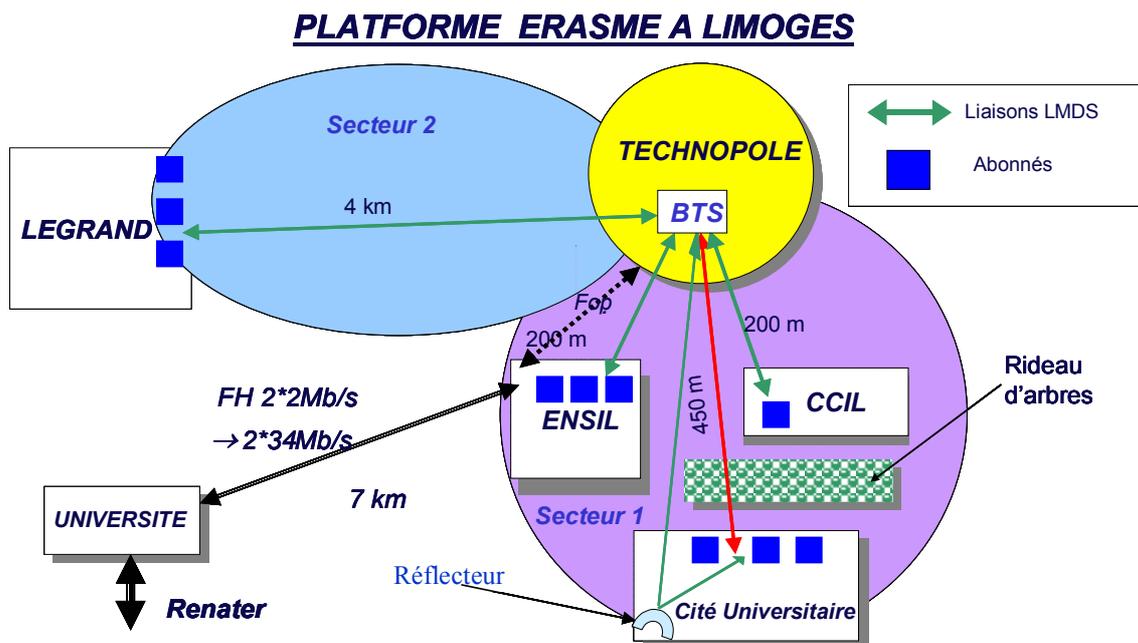


Figure 78 : Site d'expérimentation de la technopole

La Station de Base (BTS) située à la TECHNOPOLE « arrosera » deux secteurs, elle-même étant raccordée à RENATER via l'université et l'ENSIL. Le secteur 2 est utilisé pour raccorder le bâtiment LEGRAND alors que le secteur 1 couvrira l'ENSIL, la CCIL, et la cité universitaire où les étudiants seront donc connectés à l'Internet.

On obtient l'architecture physique suivante pour un réseau LMDS. (Figure 79)

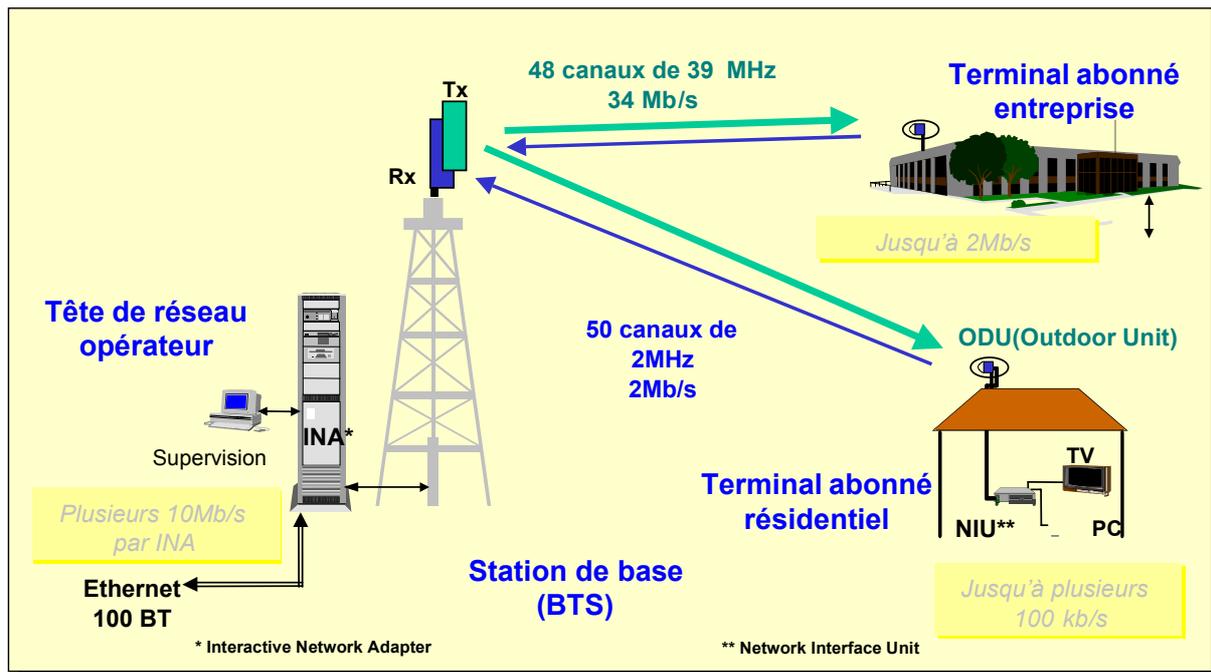


Figure 79 : Architecture physique du LMDS

Ainsi sur une largeur de bande de 3 GHz, une station de base (BTS) peut offrir 48 canaux de 39 MHz à 34 Mbps en voie descendante et 50 canaux de 2 MHz à 2 Mbps en voie montante.

Les deux entités essentielles de cette architecture sont la station de base et l'équipement abonné.

- La station de base (BTS), est composée d'une partie interne dédiée au traitement du signal allant du routage des données jusqu'à la modulation pour l'émission. L'INA (Interactive Network Adapter) permet de gérer le trafic via un serveur pour les services interactifs, comme vu dans le chapitre III, tandis que les modems QPSK assurent la réception des services MPEG2. L'ensemble des modules d'émission constitue la partie visible de la

BTS. Les modules d'émission permettent de transposer la fréquence d'entrée (canal modulé QPSK à FI 70 MHz) dans un canal de la bande millimétrique (40,5 GHz – 43,5 GHz) et d'amplifier le signal reçu afin de couvrir la zone correspondante. De plus l'INA assure la gestion du trafic des requêtes arrivant à la BTS par la voie retour.

- L'équipement abonné comporte deux parties :

Le module radiofréquence (RF) est la partie visible: C'est le Out Door Unit (ODU). L'ODU assure la réception (canal descendant) et la transposition du signal modulé hyperfréquence (40,5 GHz – 43,5 GHz) vers une fréquence de sortie conforme à la bande BIS (952 MHz – 2150 MHz). Il permet aussi l'émission (canal montant) du signal vers la STB sur la voie retour.

La NIU est une carte disposant d'un accès vidéo en bande BIS et est conforme à la norme DVB décrite dans le chapitre 3.

Maintenant que nous avons décrit la plateforme d'essai ERASME, nous allons décrire le cheminement suivi pour dimensionner un tel système. Il faut ajouter aussi que cette plateforme n'utilise qu'un seul canal descendant et 8 canaux montants compte tenu du matériel fourni par Thalès.

IV-3 L'AIDE AU DIMENSIONNEMENT ET AU DÉPLOIEMENT DU SYSTÈME LMDS

Afin de pouvoir dimensionner au mieux un LMDS, nous avons utilisé le logiciel OPNET dans lequel nous avons programmé la norme DVB décrite dans le chapitre III. Nous avons étudié les différents modes d'accès comme la contention et le mode FBR afin de pouvoir, dans le cas d'un transfert de données sur les voies montantes ou descendantes, déterminer lequel est le plus performant et dans quel cas. L'un permet en effet de garantir un débit constant par abonné mais a une capacité réduite et l'autre, à contrario, a une grande capacité en terme d'abonnés au détriment de la garantie de débit. Pour des raisons de gain en temps de calcul, nous avons aussi développé un autre logiciel spécifique à l'étude du mode d'accès en contention afin de réduire les temps de simulation. De plus, afin de comprendre et

de prévoir les performances d'un tel système, nous allons présenter le principe de la couche transport basée sur le standard TCP/IP [IV.3] utilisé dans la plateforme ERASME, celle-ci influant grandement sur le fonctionnement de cette plateforme.

IV-3.1 Modèle de simulation de la norme DVB EN 301 199

Nous allons maintenant décrire le travail effectué pour permettre le dimensionnement d'un système basé sur la plateforme ERASME.

a) Description du système utilisé dans la plateforme ERASME

Ce système est spécifié afin d'être interfacé avec des machines connectées par une carte réseau Ethernet classique (figure 80 a). Les paquets reçus par la norme DVB sont donc des trames Ethernet.

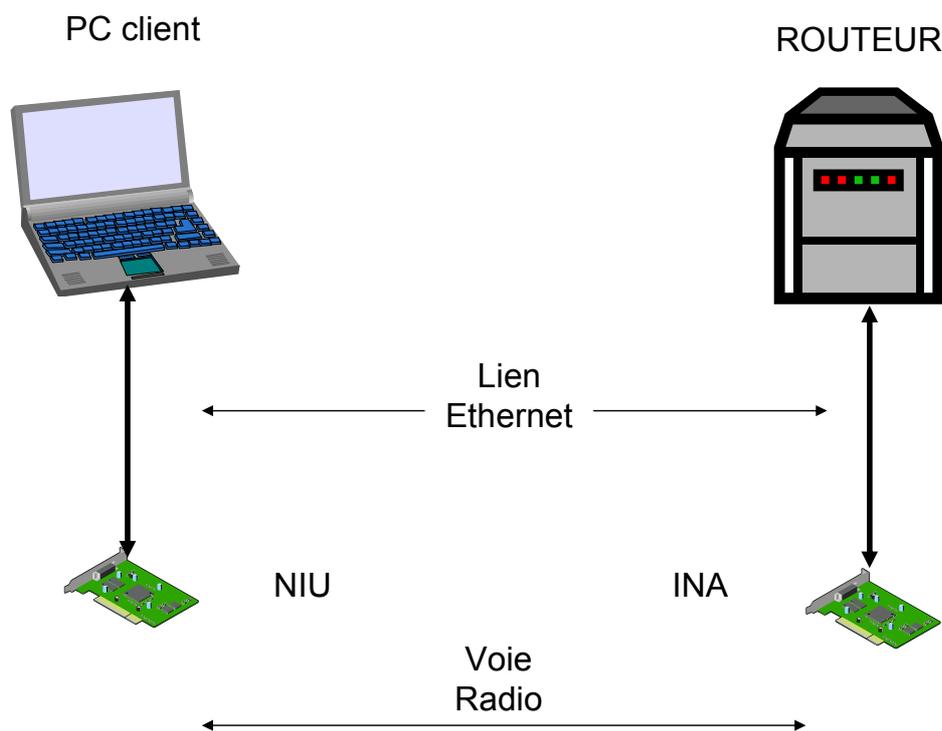


Figure 80 a – Architecture utilisée dans la plateforme ERASME1

Le modèle en couche simplifié, illustré par la figure 80 b, montre le cheminement des paquets dans les voies montantes et descendantes.

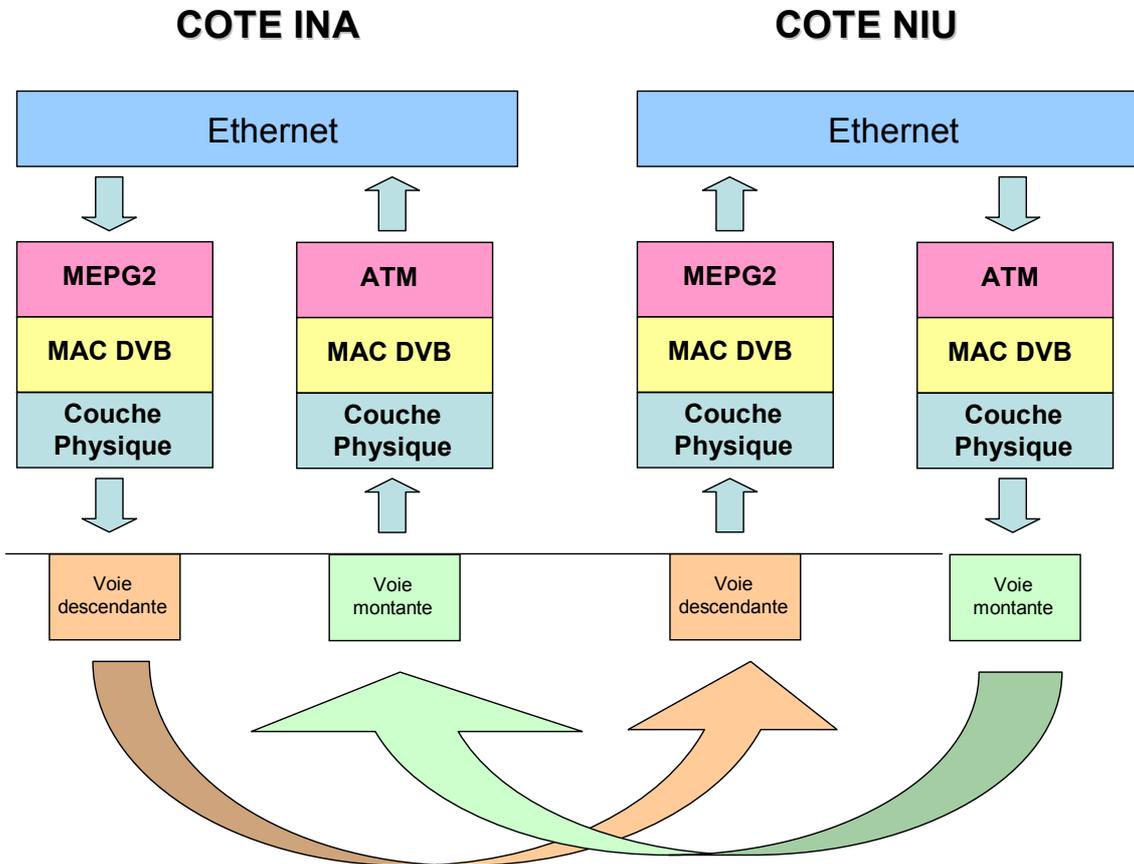


Figure 80 b : Modèle en couche simplifié du système ERASME

Comme vu dans la description de la norme DVB, les paquets provenant des machines situées derrière l'INA sont fragmentés en trame MPEG2 et ceux provenant des machines connectées à une NIU sont fragmentés en cellules ATM. Nous allons voir dans le paragraphe suivant que notre intervention s'est faite au niveau la couche MAC DVB, MPEG2 et ATM. Nous avons été dans l'obligation de programmer l'ensemble de ces couches car les modèles standards OPNET ne contiennent pas le standard DVB.

b) Description du modèle OPNET

Dans ce paragraphe, nous allons faire un descriptif du modèle DVB programmé sous OPNET. Il est évident que seules les fonctions de ce standard [III.1] qui sont réellement influentes sur les qualités d'un système ont été implémentées. Le but est de créer un modèle simulant de manière satisfaisante le comportement du système tout en ne gaspillant pas de ressources inutilement. Toutes les représentations des modèles décrits sont présentes en annexe 2

La figure 81 montre une illustration du modèle DVB OPNET, ici, on fait communiquer le client21 et le client20 entre eux par le biais de l'INA et de la NIU.

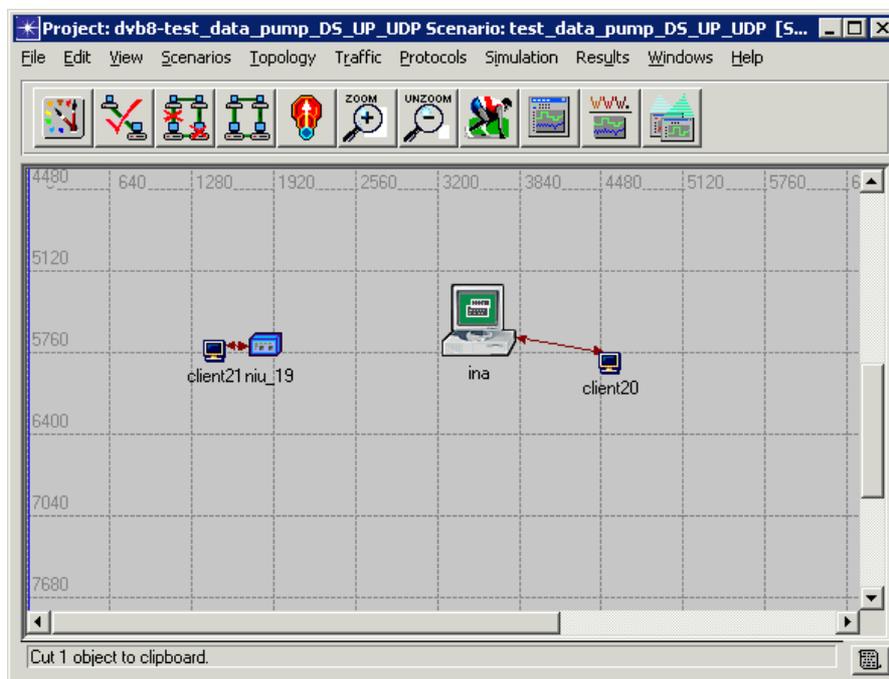


Figure 81 : Représentation d'un projet LMDS sous OPNET

Les paragraphes suivants détaillent le travail effectué sur les différentes couches du modèle.

i) Couche physique

La couche physique du modèle reprend celle données en standard sous OPNET. Il n'y a donc pas eu de modélisation à faire si ce n'est l'intégration du diagramme de rayonnement des différentes antennes. Pour information, il faut savoir que tout se fait de manière statistique à savoir que le TEB est calculé de manière théorique par le logiciel et non pas simulé. La description des paramètres choisis est donnée en Annexe.2. A noter que dans le cas étudié ci-après, on considère, pour des raisons de complexité, que cette couche physique est parfaite et n'introduit pas d'erreurs.

ii) Couche MAC

La programmation de la couche MAC sous OPNET a été la partie de l'étude la plus importante. Cette étude a permis la mise au point d'un outil très pratique et convivial pour simuler le système de manière virtuelle. Pour cela il a d'abord fallu comprendre les principes de fonctionnement décrits dans le chapitre III, pour choisir les paramètres qui influent réellement sur les performances.

Tout a été programmé afin que le système soit transparent pour les machines communiquant entre elles. En effet, le gros avantage de cette méthode est de pouvoir utiliser les modèles de machines courants OPNET sans avoir à les reprogrammer, ce qui offre un gain de temps considérable. Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, les paquets sont fragmentés et reconstitués sans que les PCs s'en rendent compte.

- **L'INA**

Le modèle de l'INA prend en charge presque toute la norme DVB mis à part la gestion du mode d'accès basé sur de la réservation. Le choix de ne pas modéliser ce mode s'est imposé car le système utilisé dans la plateforme ERASME ne l'utilise pas.

L'INA gère les NIUs connectées et celles qui veulent le faire dynamiquement de manière automatique, exactement comme dans le système réel. Lorsqu'une NIU veut se connecter, elle transmet une demande à l'INA qui lui répond en lui demandant d'ajuster des paramètres tels que la puissance émise, son horloge interne, etc... Toute cette phase d'initialisation des NIUs est décrite dans un organigramme présent en annexe 2.

Voie descendante

Le modèle récupère donc les trames Ethernet de la machine connectée (Serveur, PC, routeur, etc...) et lit l'adresse MAC de destination. Cette dernière est alors associée à l'adresse DVB de la NIU correspondante. Afin de connaître la table de correspondance entre ces adresses, le modèle crée auparavant une table d'adressage en se basant sur les trames Ethernet reçues des machines abonnées.

Une fois cette association faite, l'INA fragmente ce paquet en trames MPEG2 inscrivant l'adresse dans le champ réservé à cet effet. C'est ce champ qui servira aux NIUs pour éliminer les paquets ne lui étant pas destinés.

L'INA transmet ensuite ce paquet au module radio qui le transmettra aux NIUs.

Elle insert toutes les 3 ms un paquet MPEG2-TS servant à synchroniser l'ensemble du système car sans cela, les NIUs n'auraient aucune idée de quand va démarrer la prochaine trame de 3 ms. Ce paquet va aussi servir à transmettre tous les messages de calibration, de synchronisation, et les accusés de réception des cellules.

Voie montante

Lorsque le module de réception radio reçoit des cellules DVB. Il les transmet au module MAC DVB qui ne s'occupe pas de savoir ce qu'il y a dedans mis à part lorsque ce sont des paquets de configuration. Le module de réception reconnaît ces cellules en lisant un champ spécialement conçu pour savoir si il s'agit d'une cellule de données ou non. Si ce sont des données, les cellules sont ensuite transmises dans un module programmé qui reconstitue les trames Ethernet et les met à disposition de la machine connectée derrière.

L'INA récupère aussi toutes les informations sur chaque cellule, à savoir le décalage de l'horloge, si il y a eu collision ou non, la puissance reçue, etc... afin de calibrer toutes les NIUs connectées.

- **La NIU**

Le modèle de la NIU ne comporte pas non plus le mode d'accès basé sur la réservation de slots. Au démarrage de la simulation, les NIUs sont programmées pour tenter de se connecter un temps choisi après ce démarrage, un peu comme si l'utilisateur alimentait la NIU de chez lui. Elle émet donc une cellule DVB en se basant sur les trames reçues de l'INA. Comme pour l'INA, toute cette phase d'initialisation est décrite dans un organigramme présent en annexe 2.

Voie descendante

Le module radio récupère les paquets MPEG2 et les transmet au module DVB qui va déterminer en lisant le champ d'adresse si ce paquet lui est destiné ou pas. Il vérifie aussi si il s'agit d'un paquet d'information sur lequel toutes les NIUs vont se baser pour la synchronisation.

Voie montante

La voie montante, comme dans la norme DVB, est plus complexe à mettre en place. Il faut préciser au modèle de NIU quel est le mode d'accès à mettre en oeuvre (contention ou FBR) et le nombre de slots dont il dispose pour chaque mode. Une fois ceci fait, le modèle fragmente les trames Ethernet reçues de la couche supérieure en cellules ATM, les encapsule dans des cellules DVB, et les transmet au module radio au temps exact de départ du slot choisi.

Maintenant que nous avons décrit le modèle OPNET, il reste à effectuer des tests sur site. C'est dans ce cadre là que le paragraphe suivant trouve son sens.

IV-3.2 Problèmes de débit de la voie descendante liés au protocole TCP

Lors des tests sur la plateforme, nous nous sommes aperçus que le débit en voie descendante était loin des 34 Mbits annoncés. Ceci est en fait normal et dû au protocole TCP [IV.2]. En effet, ce protocole est le protocole de la couche transport le plus utilisé par les systèmes informatiques dans le monde et par conséquent, celui utilisé par les machines de la plateforme ERASME. Un simple rappel sur le principe de ce protocole va permettre de comprendre le phénomène et ainsi de prévoir les performances de la plateforme ERASME.

Le protocole TCP permet d'avoir une connexion fiable et un contrôle de flux. Il découpe les informations à transmettre en segments de longueur variable appelés datagrammes [IV.3].

Pour garantir le bon acheminement des messages et le contrôle de flux, TCP utilise un système d'accusés de réception c'est à dire que lorsqu'il envoie un datagramme il s'attend à recevoir un acquittement de ce dernier. Au bout d'un certain temps si cet acquittement n'est pas reçu, on considère le datagramme perdu et on le re-émet. Cette technique est pénalisante dans le sens où l'on est obligé d'attendre un acquittement avant de transmettre le datagramme suivant.

Pour palier à ce désavantage, on utilise un système de fenêtre glissante ou fenêtre de congestion comme le montre la figure 82:



Figure 82 : Illustration de la fenêtre glissante

Pour comprendre le phénomène il suffit d'imaginer que le cadre central qui représente la fenêtre de congestion se déplace vers la droite au cours de la communication. A chaque segment acquitté on envoie le suivant. Il faut noter que l'on n'envoie pas forcément un acquittement pour chaque segment TCP, cela dépend du système d'exploitation utilisé (Windows, Linux, Solaris ...) [IV.4].

Il est très difficile de savoir quel fonctionnement exact ont les systèmes d'exploitation pour les acquittements. Cependant il a été mesuré par Nextream, et, il est spécifié sous OPNET qu'un ACK est envoyé pour 2 segments reçus en moyenne. On comprend maintenant que si les accusés de réception ne remontent pas suffisamment rapidement, le débit en voie descendante s'en trouve forcément pénalisé puisqu'il faut attendre le prochain ACK pour transmettre le segment suivant.

IV-3.3 Etude du Mode Fixed Bit Rate (FBR)

Nous avons maintenant tous les éléments pour faire une étude théorique précise de la norme, cette étude va nous permettre de valider le modèle OPNET créé. La couche physique est supposée parfaite c'est-à-dire qu'elle n'introduit pas d'erreurs dans la communication.

a) Etude théorique

i) Transmission de données sur la voie montante

Dans notre configuration, le système est en mode FBR avec 1 slot réservé par trame de 3ms pour un utilisateur.

L'équation **IV.1** montre le débit brut (Up_rate) sur la voie montante pour une NIU.

$$Up_rate = \frac{Lg_slot}{0.003} = \frac{512}{0.003} = 170.1 \text{ kbits / sec} \quad (\text{IV.1})$$

Avec Lg_slot la longueur d'un slot en bits, et une longueur de trame égale à 3 ms.

Dans une cellule ATM on a 48 octets de données il y a donc la même chose dans une trame DVB qui fait 64 octets, d'où le débit Ethernet :

$$Eth_rate = \frac{48}{64} \cdot Up_rate = 128 \text{ kbits / sec} \quad (\text{IV.2})$$

L'équation **IV.2** montre que le débit Ethernet en voie montante est donc de 128 kbits/sec.

ii) Transmission de données sur le voie descendante

La configuration testée est toujours avec 1 slot réservé par trame de 3ms par utilisateur. Pour calculer le débit théorique il faut auparavant définir combien de trames DVB il faut pour envoyer un acquittement.

Ce sont les trames Ethernet qui vont être découpées en cellules ATM donc en paquets de 48 octets. Un datagramme IP ne peut contenir qu'un seul acquittement de taille 52 octets. En rajoutant les entêtes du protocole Ethernet, la taille du paquet à fragmenter en cellule ATM sera de 64 octets. Il faut donc deux cellules ATM et par conséquent 2 trames DVB pour transporter un acquittement.

On obtient donc :

$$Nb_ACK_Rate = \frac{1}{0.003 \cdot 2} = 166.7 \text{ ACK / sec} \quad (\text{IV.3})$$

Avec Nb_ACK_Rate le nombre d'ACK remontant par seconde.

L'équation **IV.3** nous montre le nombre d'acquittement pouvant remonter par seconde avec 1 slot par trame.

Nous avons vu qu'un acquittement était transmit tous les deux segments TCP, l'équation **IV.4** nous montre donc que le nombre de paquets reçus par seconde est :

$$Nb_segment_rate = Nb_ACK_Rate \cdot 2 = 333.3 \text{ paquets / sec} \quad (\text{IV.4})$$

Avec $Nb_segment_rate$ le nombre de segments TCP descendant par seconde.

Nous supposons bien entendu que la voie descendante n'est pas limitée d'elle-même ce qui est justifié au vu des 34 Mbits/sec possibles.

Nous savons qu'un segment TCP est transmis dans un paquet Ethernet de taille 1522 octets L'équation **IV.5** donne donc le débit Ethernet descendant :

$$DS_rate = Nb_segment_rate \cdot 1522 \cdot 8 = 4.06 \text{ Mbits / sec} \quad (\text{IV.5})$$

Avec DS_Rate le débit descendant en Mbits/sec.

b) Résultats de la simulation OPNET*i) Transmission de données sur la voie montante*

La figure 83 montre les résultats fournis par OPNET dans la même configuration que l'étude théorique.

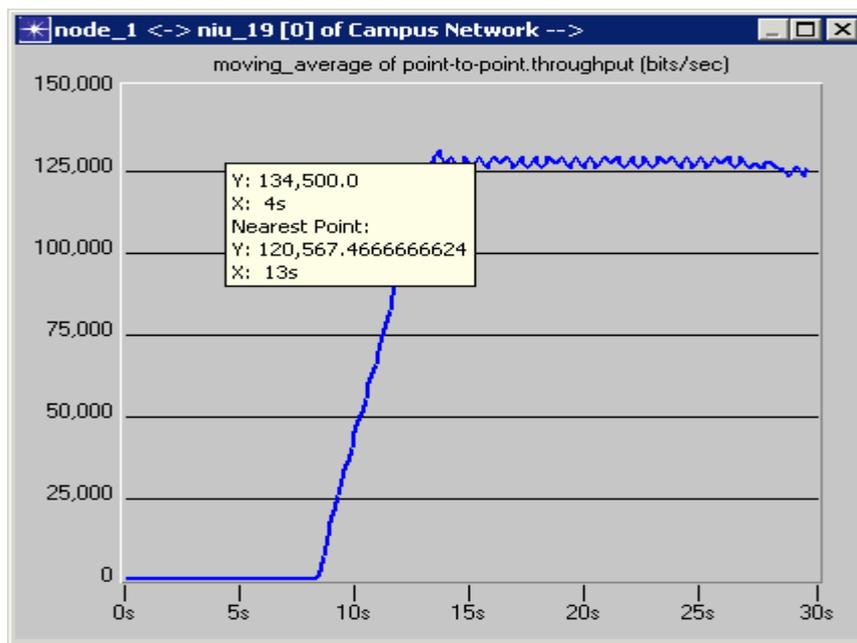


Figure 83 : Débit de la voie montante en mode FBR

On constate que le débit Ethernet est en moyenne de 128 kbits/s et donc conforme à la théorie. En plus du débit Ethernet montré ci-dessus, OPNET permet de mesurer le débit obtenu au niveau de la couche application c'est-à-dire sans les multiples entêtes des protocoles TCP/IP. Ceci est utile pour comparer la simulation avec les mesures faites en laboratoire. Ces dernières étant réalisées au niveau de la couche application.

La figure 84 montre ce débit moyen pour la voie montante au niveau de la couche application.

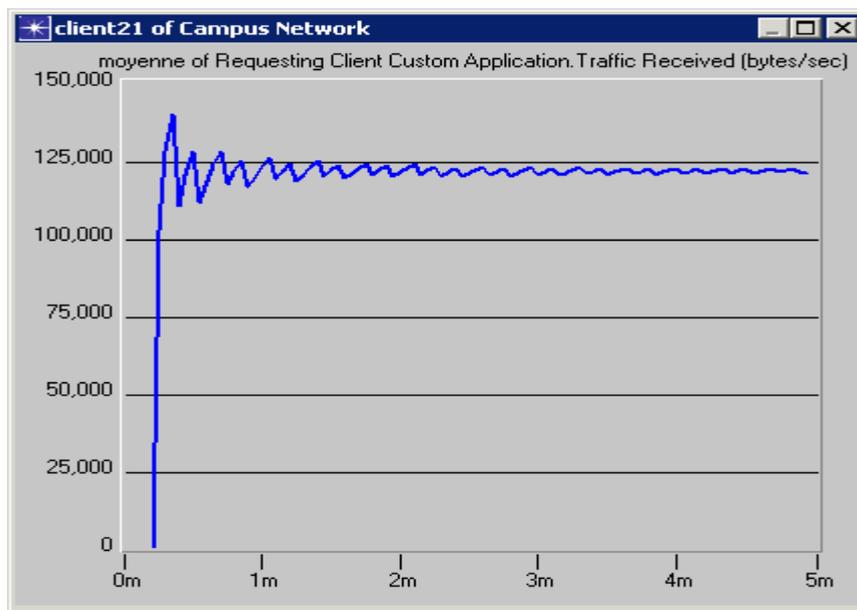


Figure 84 : Débit moyen reçu au niveau application pour la voie montante

On constate que ce débit est de 120 kbits/sec, ce qui semble logique quand on sait que l'on enlève les entête TCP/IP et Ethernet aux 128 kbits/sec du débit sur le lien Ethernet.

ii) Transmissions de données sur la voie descendante

La figure 85 montre les résultats fournis par OPNET dans la même configuration que l'étude théorique à savoir un slot par utilisateur et par trame de 3ms.

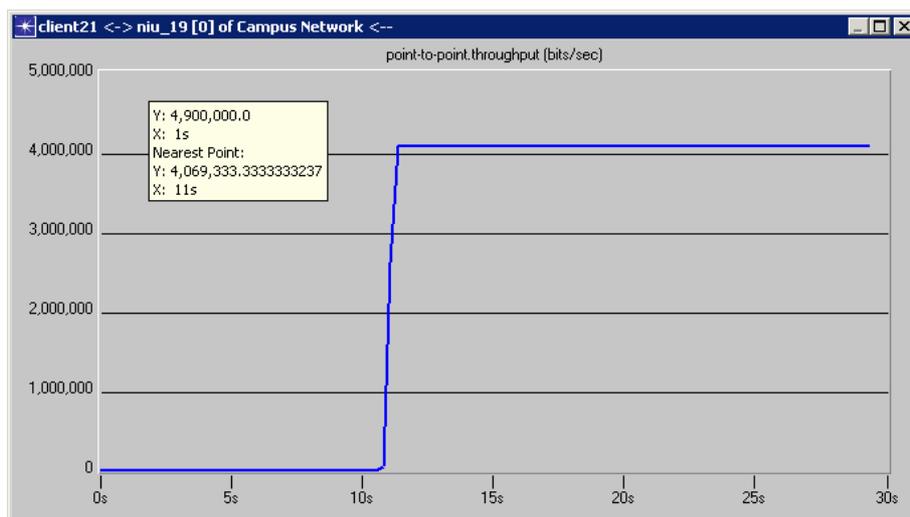


Figure 85 : Débit voie descendante en mode FBR

Le débit donné par OPNET est de 4.069 Mbits/sec ce qui est légèrement plus élevé que la théorie. Ceci est dû à la modélisation du protocole TCP sous OPNET qui ne transmet pas exactement 2 ACK tous les deux segments reçus mais avec un ratio légèrement inférieur.

Ici encore nous montrons le débit reçu par la couche application sur la figure 86 afin de les comparer avec les mesures qui vont suivre.

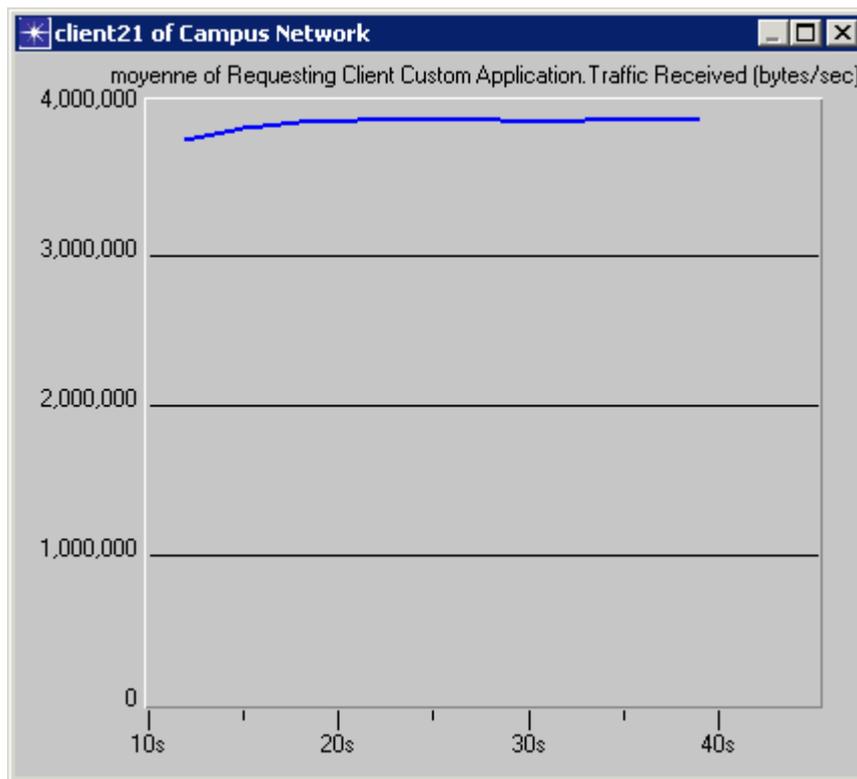


Figure 86 : Débit moyen reçu au niveau application pour la voie descendante

Le débit donné est de 3.89 Mbits/sec ce qui est, là encore, logique pour les mêmes raisons évoquées précédemment.

c) Comparaison avec les mesures

Les mesures ont été réalisées dans les laboratoires de Nextream et donnent des résultats au niveau de la couche application.

i) Transmissions de données sur la voie montante

On obtient : 118 Kbits/sec au niveau application c'est à dire moins de 2% d'erreur par rapport aux résultats donnés par OPNET. Le débit au niveau de la couche application mesuré est conforme à la simulation. Le simulateur est donc validé.

ii) Transmissions de données sur la voie descendante

Ici le débit mesuré est de 3.46 Mbits/sec. L'erreur par rapport à la simulation est donc de 11 % ce qui est à la limite de l'acceptable. L'hypothèse la plus probable a été formulée par les laboratoires ayant fait les mesures qui soupçonnent un problème de convolution entre l'horloge du protocole IP et de la NIU utilisée. Cette convolution conduit les ACK renvoyés par la pile TCP à « manquer » un slot ce qui amène donc ces ACK à prendre plus de temps pour remonter. Une autre hypothèse possible se trouve dans le fait que la modélisation des protocoles TCP/IP sous OPNET ne respecte pas rigoureusement la réalité et que le ratio entre le nombre de segments reçus et le nombre d'ACK transmis serait sensiblement différent entre la simulation et la réalité. Néanmoins, le modèle OPNET semble suffisamment précis comparé à l'investissement que demanderait une nouvelle modélisation de la pile TCP/IP sous OPNET.

IV-3.4 Etude du mode contention

Un autre mode possible pour la voir montante est le mode contention, ce qui a conduit à l'étude formulée dans ce paragraphe.

Nous avons vu dans le chapitre III qu'il y a 18 slots par trame de 3 ms qui peuvent être alloués à différents utilisateurs. Or, sur ces 18 slots il y en a 3 qui sont réservés aux messages aux informations de connexion, donc inutilisables pour le transport de données. Il reste donc 15 slots à utiliser pour tous les abonnés.

Contrairement au mode FBR vu précédemment, le mode Full contention ne réserve pas de slots à un utilisateur mais chaque abonné va essayer d'envoyer ses données sur un des 15 slots au hasard.

Prenons un exemple, l'abonné X a des données à transmettre à la prochaine trame de 3 ms, il va donc tirer un numéro au hasard entre 1 et 15 et va envoyer sa cellule DVB sur le slot correspondant.

Le problème est qu'un autre utilisateur peut lui aussi avoir choisi ce slot : il y a donc collision et tous les paquets transmis par ce slot seront perdus. Il faut donc instaurer un mécanisme d'accusés de réception appelés MAC_Flags. Ces MAC_Flags sont envoyés par l'INA 2 trames de 3 ms après la réception de la cellule DVB.

En mode contention, s'il n'y a aucune collision, il y a donc 9ms entre l'envoi de 2 trames DVB.

a) Comparaison théorie-simulation

i) Transmissions de données sur la voie montante

On suppose ici qu'il n'y a qu'un seul abonné par canal montant, il n'y a donc pas de collision possible. Cet abonné est considéré comme ayant toujours quelque chose à transmettre. On a donc une cellule ATM toutes les 9 ms, le débit montant Ethernet se calcule comme pour le mode FBR et sera donc :

$$UP_rate = \frac{8 \cdot 48}{0.009} = 4267 \text{ bits / sec} \quad (\text{IV.6})$$

Le débit Ethernet montant maximum sera donc de 42.7 kbits/sec

Les résultats donnés par OPNET confortent la théorie puisque la figure 87 montre un débit de 42.2 kbits/sec.

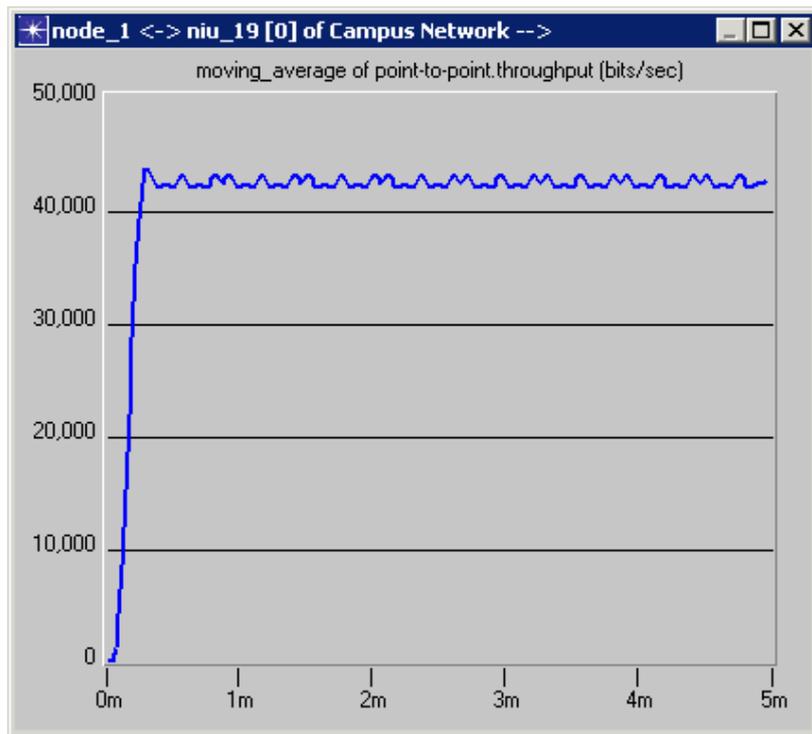


Figure 87 : Débit montant Ethernet en mode contention

Si l'on regarde au niveau de la couche application, les résultats fournis par OPNET sur la figure 88 montrent un débit de 40.0 kbits/sec.

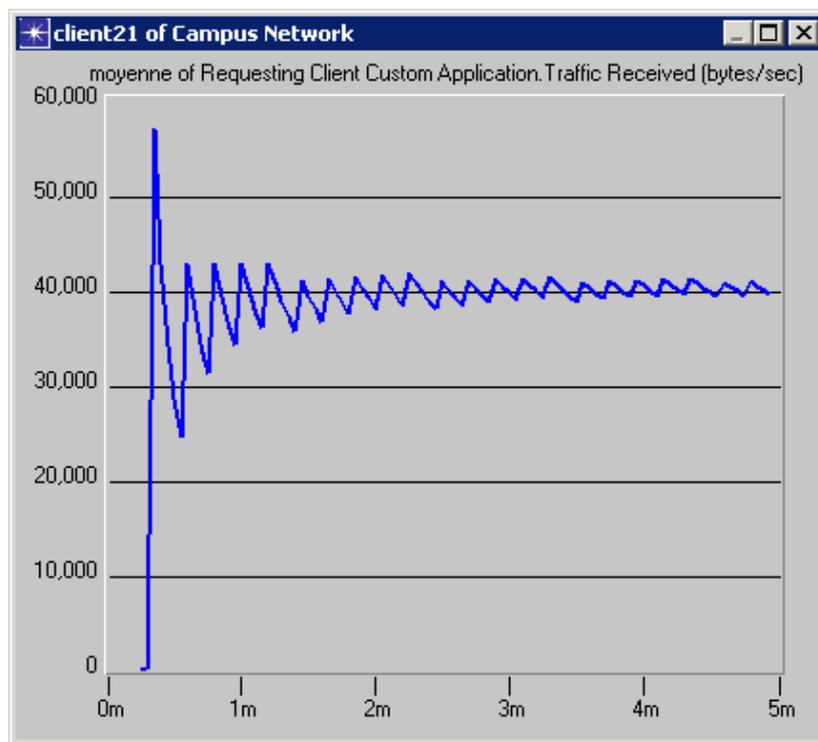


Figure 88 : Débit montant au niveau application en mode contention

Ce résultat est conforme aux mesures réalisées en laboratoire donnant un débit de 39.2 kbits/sec.

ii) Transmissions de données sur la voie descendante

Le principe de calcul est exactement le même que pour le mode FBR à savoir que ce débit dépend de la vitesse de remontée des ACK. Là encore nous considérons que la machine a toujours quelque chose à transmettre.

On aura donc un ACK toutes les $2 \cdot 9 \text{ ms} = 18 \text{ ms}$ puisqu'il faut 2 trames DVB pour transporter un accusé de réception. L'équation IV.7 nous montre le nombre d'acquittement pouvant remonter par seconde en mode contention sans collisions.

$$Nb_ACK_Rate = \frac{1}{0.009 \cdot 2} = 55.5 \text{ ACK / sec} \quad (\text{IV.7})$$

Sachant qu'il faut recevoir deux segments TCP pour transmettre 1 acquittement :

$$Nb_segment_rate = Nb_ACK_Rate \cdot 2 = 111.1 \text{ paquets / sec} \quad (\text{IV.8})$$

Avec Nb_ACK_Rate le nombre d'ACK qui remonte par seconde.

Nous supposons bien entendu que la voie descendante n'est pas limitée d'elle-même ce qui est justifié au vu des 34 Mbits/sec possibles.

Un segment TCP est transmis dans un paquet Ethernet, l'équation IV.9 donne alors le débit Ethernet descendant :

$$DS_rate = Nb_segment_rate \cdot 1522 \cdot 8 = 1.35 \text{ Mbits / sec} \quad (\text{IV.9})$$

Avec DS_rate le débit descendant en bits/sec.

La figure 89 montre le débit Ethernet obtenu en simulation.

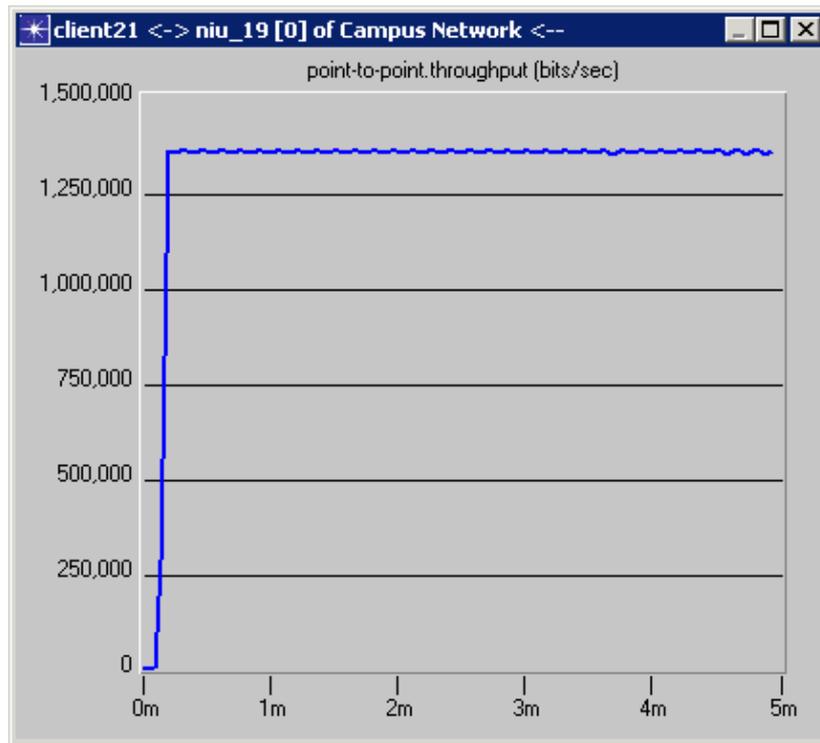


Figure 89 : Débit Ethernet descendant en mode contention

On obtient 1.35 Mbits/sec ce qui est parfaitement conforme à la théorie. Afin de comparer avec les mesures, nous avons relevé le débit simulé au niveau de la couche application. La figure 90 montre cette simulation.

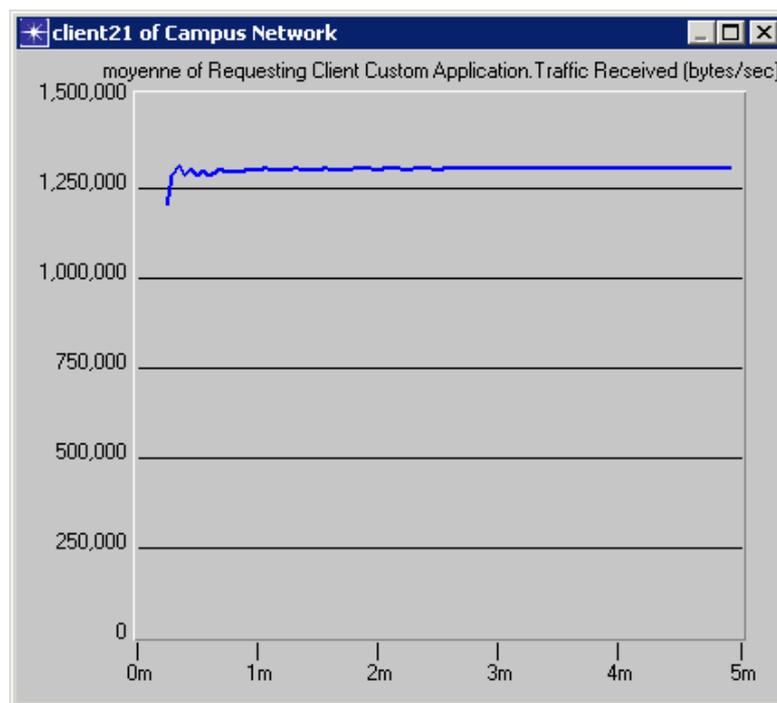


Figure 90 : Débit au niveau de la couche application

OPNET donne un débit de 1.29 Mbits/sec alors que le débit mesuré est de 1.23 Mbits/sec ce qui nous donne moins de 5% d'erreur.

iii) Etude avec gestion des collisions

Maintenant que nous avons validé le principe de fonctionnement du simulateur sans collisions, il reste à valider l'implantation de l'algorithme de gestion des collisions. Pour cela nous avons comparé les résultats fournis par OPNET avec des mesures effectuées par Nextream dans la configuration suivante :

- deux slots de contention alloués par trame de 3 ms,
- toutes les NIUs ne sont autorisées à transmettre que sur ces slots,
- toutes les NIUs n'ont que des acquittements TCP à transmettre en voie montante (exemple de téléchargement d'un fichier de taille importante),
- le nombre de NIUs connectées varie de 1 à 6.

La figure 91 donne les deux courbes du débit simulé et mesuré pour la transmission de données en voie descendante en fonction du nombre de NIUs.

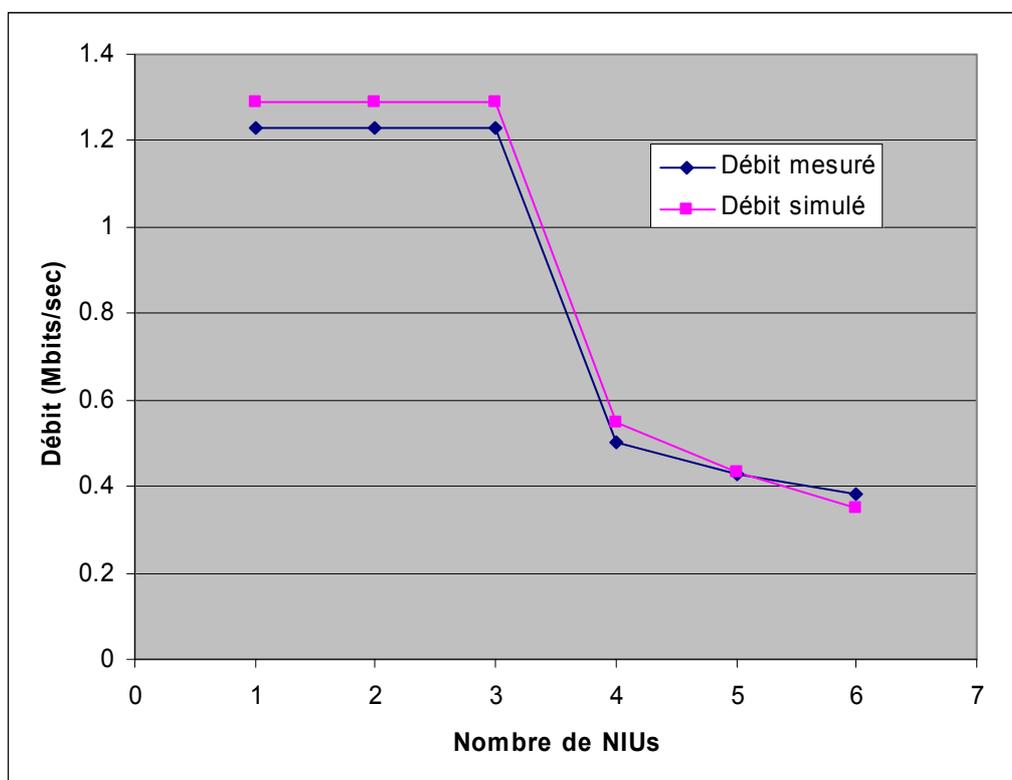


Figure 91 : Comparaison entre le débit mesuré et simulé en mode contention

On constate que la différence entre les deux débits, mesuré et simulé, est faible ce qui valide l'implantation de l'algorithme de gestion des collisions sous OPNET.

On peut remarquer que pour un nombre de NIUs connectées inférieure à trois, le débit reste le même ce qui s'explique de la manière suivante :

En effet il se produit un phénomène d'autorégulation comme le montre la figure 92. Lorsqu'une NIU réussit à envoyer une cellule, elle retransmet 3 trames plus tard, il y a donc 2 trames pendant lesquelles elle ne va pas provoquer de collisions, deux trames qui pourront être utilisées par les deux autres NIUs. Donc dès que les 3 NIUs auront chacune une trame différente sur trois qui se suivent, le risque de collision sera de 0.

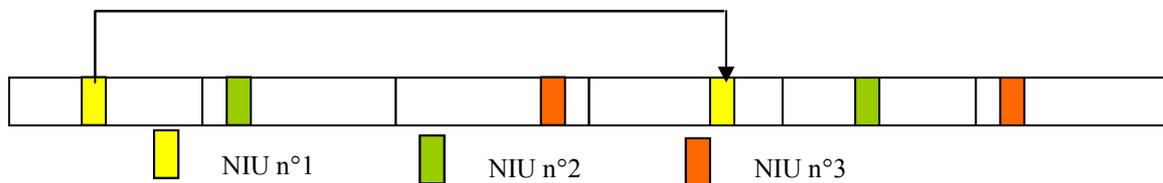


Figure 92 : Répartition temporelle des trois NIUs

Par contre dès qu'une quatrième NIU se connectera, elle perturbera considérablement le système en provoquant des collisions, engendrant ainsi une chute du débit.

Il reste maintenant, pour achever l'étude du mode contention, à étudier le comportement du système avec un grand nombre de NIUs connectées.

b) Etude déterministe

Il nous reste à observer les performances lorsque un grand nombre d'abonnés se partagent un canal en mode contention. Ceci va permettre de mesurer l'effet de différents paramètres comme *le MIN_Backoff* et *le MAX_Backoff* (Chapitre III).

Il y a deux manières de voir les choses. La première est de considérer que toutes les NIUs connectées pour le temps de la simulation sont les mêmes, et dans ce cas on applique l'algorithme de gestion des collisions de la manière décrite en III.2.4.b. La deuxième qui considère les multiples connexions et déconnexions des abonnés et où on ne connaît pas les NIUs connectées.

i) Hypothèse 1 : toutes les NIUs sont anonymes

Dans cette hypothèse, on considère qu'il y a toujours « n » NIUs connectées à l'INA qui tentent d'émettre des données. Cependant, les multiples déconnexions et connexions (comme dans un système réel) vont rendre inutilisable l'algorithme de gestion des collisions.

Nous allons donc établir une loi qui permettra de chiffrer le débit en fonction du nombre de slots de contention et du nombre de NIUs connectées simultanément.

- Soit :

Nb_NIUs le nombre de NIUs connectées simultanément,

Nc le nombre de slot par période de 9 ms.

On suppose que la machine n° Nb_NIUs choisit le slot X.

La probabilité que la station Nb_NIUs transmette avec succès est égale à la probabilité que toutes les autres stations choisissent un autre slot que le slot X.

La probabilité de choisir un autre slot est : $\frac{Nc - 1}{Nc}$

$$\text{La probabilité de succès est donc : } \left(\frac{Nc - 1}{Nc} \right)^{Nb_NIUs - 1} \quad \text{(IV.10)}$$

La probabilité pour une cellule d'être transmise est donc :

$$P(\text{transmi}) = \left(\frac{Nc - 1}{Nc} \right)^{Nb_NIUs - 1} \quad \text{(IV.11)}$$

Le débit montant en cellules par seconde est donc :

$$Up_rate (cells / sec) = \frac{P(transmitt)}{9 \cdot 10^{-3}} \quad \text{(IV.12)}$$

Les résultats obtenus par cette méthode seront donnés dans le paragraphe consacré à l'analyse. Dans un premier temps, étudions la deuxième hypothèse évoquée.

ii) Hypothèse 2 : toutes les NIUs sont connues

Ici on considère qu'aucune déconnexion ne se produit et que toutes les NIUs tentent d'émettre sans discontinuité sur la voie montante.

L'algorithme de gestion des collisions prend donc ici tout son sens. Au niveau mathématique, un tel algorithme se révèle très complexe à modéliser. De plus, nous voulons étudier son comportement pour un grand nombre d'abonnés. La solution fournie par OPNET est possible mais les temps de calcul se révèlent très longs car les modèles utilisés prennent en compte toutes les couches du modèle. Or, seul l'algorithme de gestion des collisions nous intéresse pour le moment.

Nous avons donc opté pour une solution basée sur le développement d'un logiciel spécifique reprenant pour base l'algorithme décrit en annexe 2.

La figure 93 montre l'interface de ce simulateur.

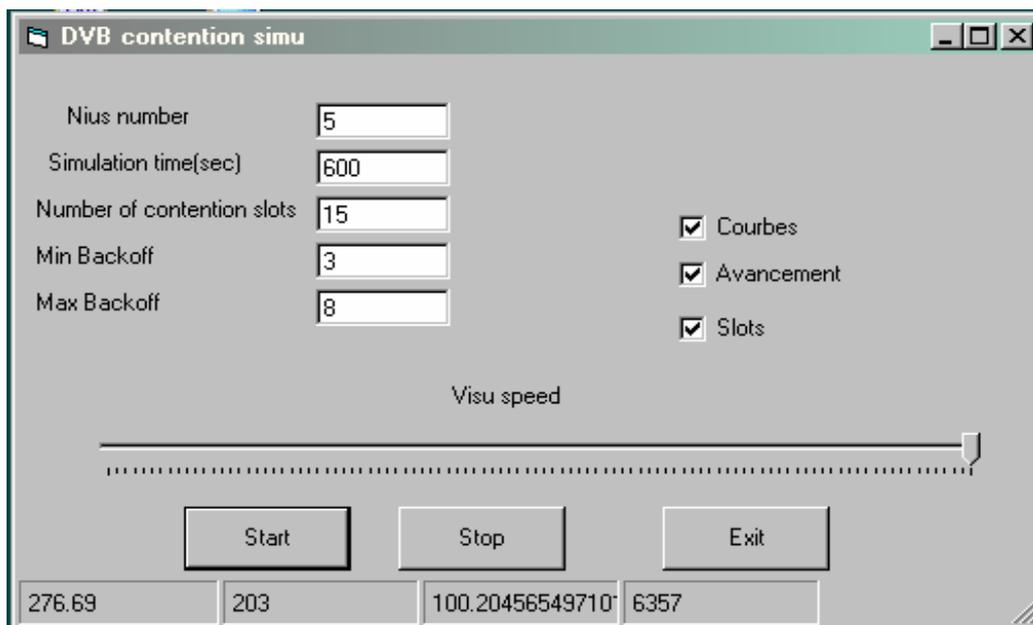


Figure 93 : Interface du simulateur de contention

Les paramètres d'entrée de ce simulateur sont donc le nombre de NIUs, le temps de simulation (pour une bonne moyenne), le nombre de slots de contention par trame de 3ms et les valeurs du MIN_Backoff et MAX_Backoff.

Le curseur « Visu speed » permet, lorsque l'on visualise les slots en temps réel, d'avoir une vitesse raisonnable d'affichage pour l'œil humain.

Les résultats fournis par ce simulateur sont la visualisation en temps réel de l'état des slots (libres, collisionnés ou transmettant une cellule) le débit moyen en paquets/sec, la durée moyenne d'émission d'une cellule. Le paragraphe suivant donne les résultats fournis par ce simulateur.

iii) Résultats sur la voie montante

- **Effet du nombre de NIUs**

Sur la figure 94, on montre l'évolution du débit montant brut (les entêtes des cellules DVB sont comprises dans le calcul) en fonction du nombre de NIUs connectées simultanément, selon deux hypothèses de simulation : toutes les NIUs sont connues ou toutes les NIUs sont anonymes.

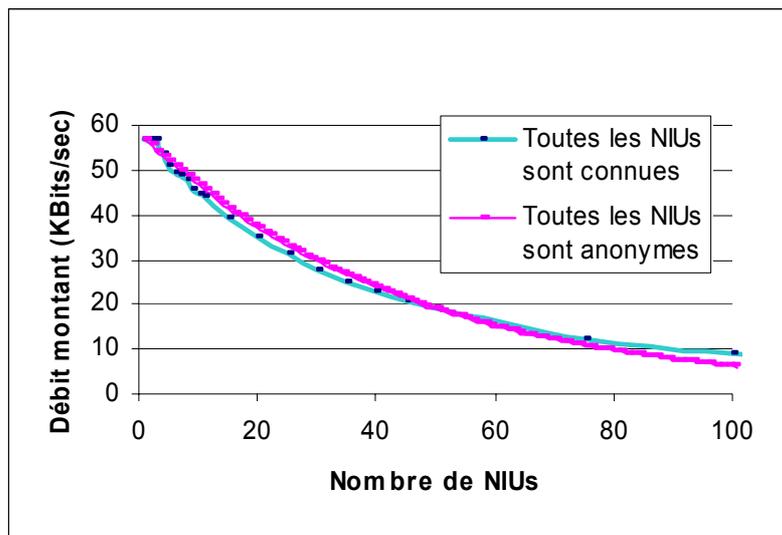


Figure 94 : Effet du nombre de NIUs pour les deux hypothèses

Grâce à cette courbe, on peut définir un nombre maximal de NIUs si l'on veut avoir un débit minimum par NIUs. En effet, si l'on veut un débit minimum de 20 Kbits/sec, la courbe donne un nombre maximal de NIUs égale à 40.

On constate une légère différence entre les deux courbes. Cette différence est plus particulièrement notable si l'on observe le pourcentage utile de la bande, à savoir le ratio entre

la bande utilisée sans collision et la bande totale offerte. La figure 95 montre les résultats pour les deux hypothèses.

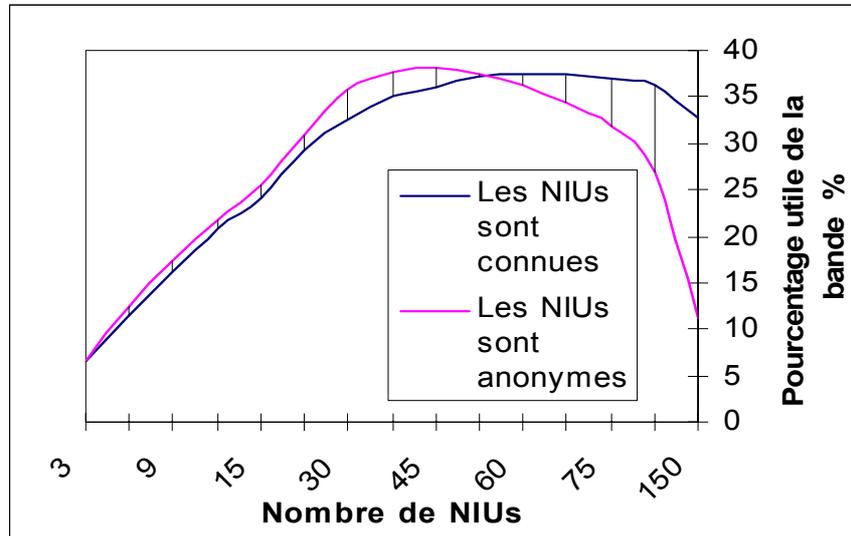


Figure 95 : Pourcentage utile de la bande

On constate ici une grande différence relative entre les deux hypothèses, l'une utilisant mieux la bande disponible pour un nombre de NIUs inférieur à 60 et l'autre pour un nombre supérieur à 60.

Lorsque l'on examine les deux hypothèses, on se rend compte que ni l'une ni l'autre ne reflète exactement la réalité. Néanmoins, on peut affirmer que cette réalité se situe forcément quelque part entre les deux puisque une NIU est soit connue, soit anonyme. La partie hachurée de la figure 95 contient donc forcément le cas réel. De plus, le nombre de NIUs connectées simultanément, offrant la meilleure utilisation de la bande, se situe entre 45 et 70. Le système réel ne devra donc pas comprendre un nombre trop différent de ceux-ci si l'on veut utiliser au mieux la bande offerte.

Maintenant que nous avons étudié le comportement d'un système utilisant le mode contention, nous allons nous intéresser plus en détail à l'algorithme de gestion des collisions afin de voir de quelle manière les valeurs des paramètres MIN_Backoff et MAX_Backoff vont influencer le comportement du système.

- **Effet du MIN_Backoff**

La valeur la plus représentative de l'effet du backoff est sans conteste le temps de transmission moyen des cellules DVB. Ce temps est mesuré à partir du moment où la première émission est décidée jusqu'au moment où la cellule est transmise sans collision. Plus ce temps sera court, plus l'algorithme sera efficace.

Pour mesurer l'effet du MIN_Backoff, nous avons fixé le nombre de NIUs et le MAX_Backoff. Le MAX_Backoff est fixé à 8 alors que plusieurs valeurs du nombre de NIUs sont choisies. La figure 96 montre l'évolution du temps de transmission d'une cellule en fonction du MIN_Backoff paramétrée par le nombre de NIUs.

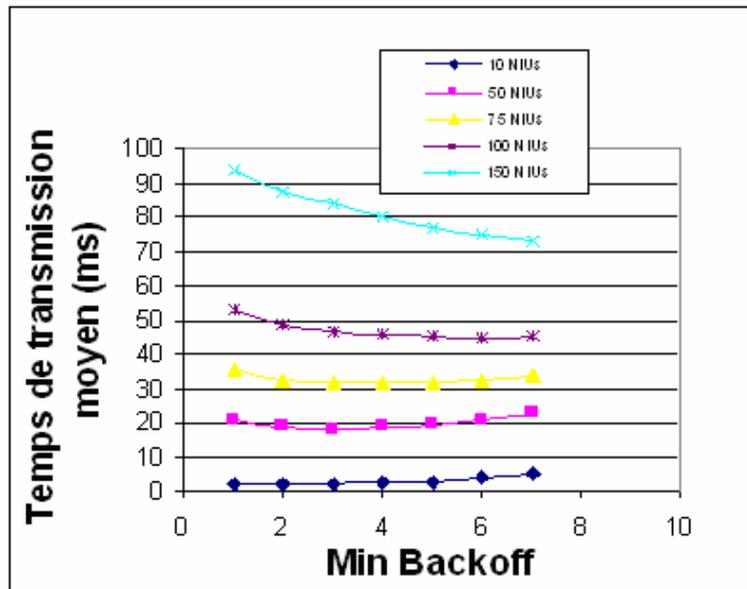


Figure 96 : Effet du MIN_Backoff

On constate que la valeur optimum dépend du nombre de NIUs connectées simultanément. Néanmoins, on peut dire que plus le nombre de NIUs est grand, plus cette valeur doit être importante. Un changement dynamique de cette valeur serait donc la meilleure chose à faire si l'on veut optimiser au mieux la bande passante. Pour un nombre de NIUs de 75, ce qui correspond au nombre utilisant au mieux la bande passante, la valeur du MIN_backoff doit être de 3 pour avoir un temps de transmission minimum. C'est cette valeur que nous allons utiliser pour faire l'étude du MAX_Backoff.

- **Effet du MAX_Backoff**

Cette étude reprend le même cheminement que celle du MIN_Backoff mis à part le fait que cette fois-ci, c'est le MIN_Backoff qui est fixé à sa valeur optimum pour 75 NIUs. Ici, le MAX_Backoff varie pour un nombre de NIUs de 10, 50, et 75 (figure 97).

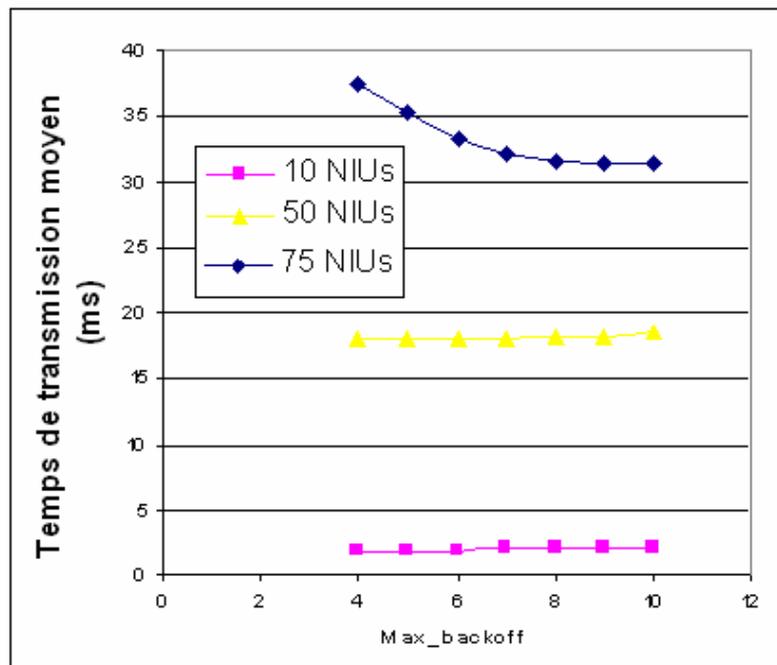


Figure 97 : Effet du MAX_Backoff

Là encore on constate que plus le nombre de NIUs est grand, plus la valeur optimale est grande. Pour un nombre de NIUs de 75, cette valeur est de 8, mais une allocation dynamique en fonction du nombre de NIUs serait l'idéale.

iv) Résultats sur la voie descendante

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que le débit descendant était limité par le débit montant à cause des accusés de réception et qu'un ACK acquitte en moyenne 2 segments TCP reçus. En conséquence, il est donc possible de prévoir le débit descendant moyen par NIUs.

Par exemple, pour 10 NIUs avec un Min_backoff de 3 et un Max_backoff de 8 on obtient 87.4 paquet/sec, soit 87.4 cellules ATM qui remontent toutes les secondes. Etant donné qu'il faut 2 cellules ATM pour transporter un acquittement TCP, nous aurons donc 87.4 segments TCP par seconde en voie descendante.

Nous avons donc 87.4 trames Ethernet par seconde, de 1522 octets chacune, ce qui nous donne 133022.8 octets/sec par et pour 10 NIUs présentes sur le canal.

Vu qu'il y a 8 voies montantes par canal descendant, il y a donc 80 NIUs au total pour les 34 Mbits/sec du canal descendant.

Donc $80 * 133022.8 = 10641824$ octets/sec soit 85.13 Mbits/sec.

Ici on voit que l'on dépasse largement le débit de la voie descendante et donc que la simulation n'est pas valable si tous les NIUs font du téléchargement TCP.

En répétant cette opération pour un nombre différent de NIUs nous obtenons la courbe suivante (figure 98) :

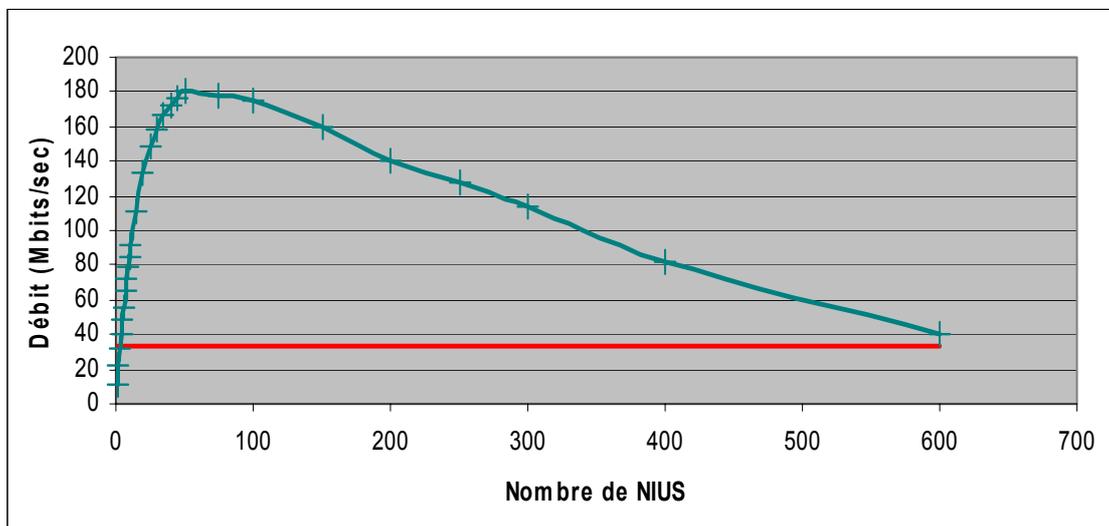


Figure 98 : Débit total calculé en le supposant limité par la voie montante

La ligne rouge représente la limite fixée par le système utilisé dans la plateforme ERASME. On constate donc que ce calcul n'est pas valable pour un nombre de NIUs supérieur à 4. Pour calculer le débit utile par NIU lorsque la voie montante ne sert qu'à remonter les ACKs, il faut donc se baser sur la voie descendante elle-même.

Pour obtenir un résultat approché, il suffit donc de considérer que c'est uniquement la voie descendante qui est en cause et de négliger la voie montante.

On obtient donc :

$$DS_rate = 34000000 / Nb_NIUs \quad (IV.13)$$

La figure 99 nous montre le débit descendant obtenu par simulation en supposant que ce sont les ACK qui limitent la voie descendante (pour un nombre de NIUs inférieur à 4). Sur cette même figure, on superpose le débit calculé avec la méthode n° 2.

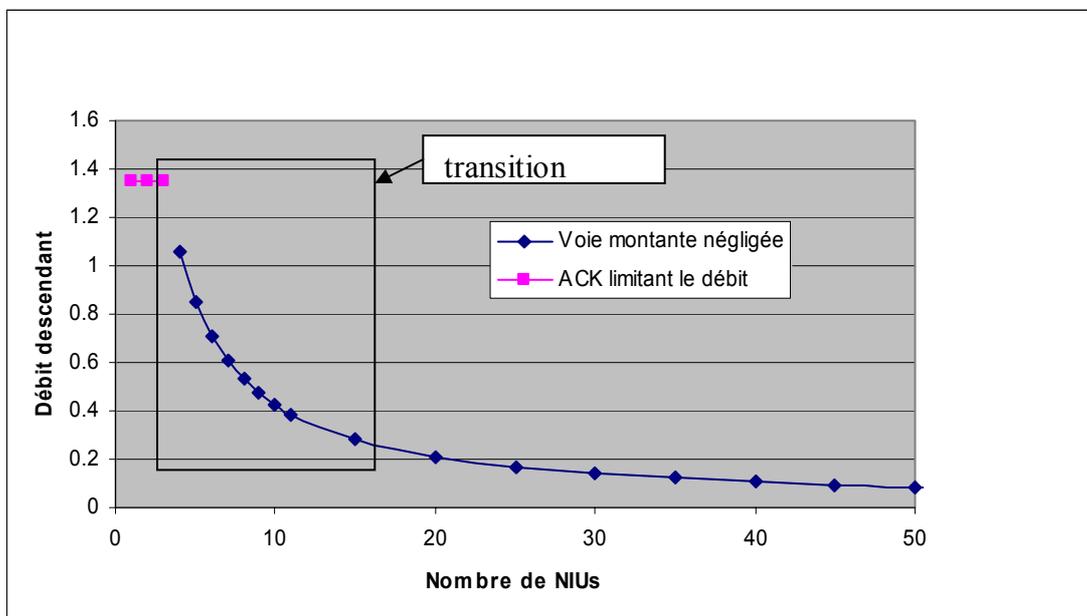


Figure 99 : Débit descendant par NIU en mode contention

Il semble évident que pour des grandes valeurs du nombre de NIUs, cette approximation soit proche de la réalité car la voie montante n'est pas beaucoup sollicitée. Alors que lorsqu'on s'approche des limites d'invalidité (transition entre la méthode 1 et la méthode 2) la voie montante est d'avantage sollicitée, il en résulte donc une perturbation de la remontée des ACK engendrant donc une baisse du débit descendant.

c) Conclusion sur l'étude du mode contention

La conclusion qui s'impose le plus rapidement est que tout dépend des performances que l'on veut pour chaque abonné. Soit on privilégie le nombre d'abonnés et les débits sont faibles, soit on veut une utilisation optimale de la bande et la encore les débits sont assez faible soit encore on choisit d'allouer un débit à chaque abonné et on fait un gaspillage de bande. On voit aussi que si l'on veut une utilisation optimale du système global pour faire du téléchargement, il faut un nombre de NIUs égal à 4 au maximum par canal montant. Ce qui nous donne environ 1.1 Mbits/sec pour chaque abonné. Dans ce cas là, la bande de 34 Mbits/sec est utilisée entièrement mais le canal montant n'est utilisé qu'à 8%, comme le montre la figure 95 alors que le maximum est à 37%. Il faudrait trouver le bon compromis entre l'utilisation des 2 voies.

Il faut bien avoir à l'esprit que ces résultats ne tiennent pas compte des demandes des utilisateurs qui ne vont pas tous utiliser les mêmes services. Par exemple si la moitié fait du téléchargement et que l'autre moitié fait de l' « Upload », la transition montrée sur la courbe 99 se déplace etc...

Toutes ces possibilités tendent à prouver que seul un logiciel comme OPNET simulant la réalité permet de prévoir les performances du système dans un cas précis.

IV-3.5 Application à un cas réel : déploiement de la plateforme ERASME

Nous allons maintenant mettre à profit le modèle OPNET décrit précédemment afin de simuler le comportement de la plateforme ERASME installée à ESTER. OPNET permet de choisir, pour chaque abonné quelle application il utilise (visioconférence, web, mail, etc).

L'étude qui va suivre consiste à reproduire le réseau de la plateforme sous OPNET et à simuler l'utilisation du système en choisissant par exemple, 4 utilisateurs faisant de la visioconférence, les autres récupérant leur mail, etc... .

Les résultats examinés seront la charge globale du réseau, les débits par utilisateurs, les temps de réponse etc...

a) Schéma simplifié du réseau

Le réseau utilisé dans la plateforme de démonstration comprend une INA et 10 NIUs. La figure 100 illustre un synoptique simplifié de ce dernier, le schéma complet étant fourni en annexe 2.

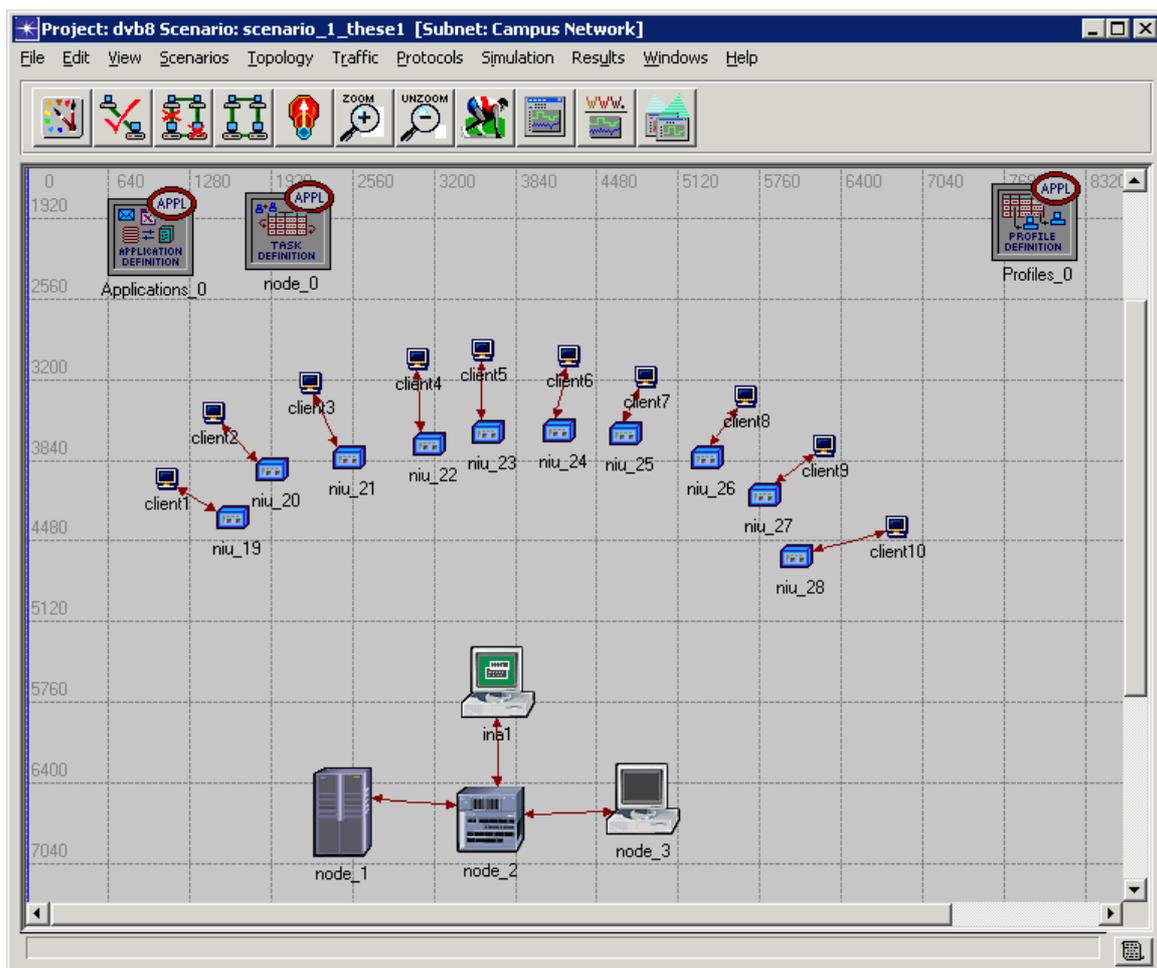


Figure 100 : Schéma du réseau simulé sous OPNET

Le schéma présenté ci-dessus comprend 10 NIUs connectées à une même INA. Ces NIUs se partagent 3 canaux montants utilisant le mode FBR. Il y a 3 slots par NIUs alloués.

On constate la présence du serveur (node_1), de la station de visioconférence (node_3) et d'un Switch pour lier les trois machines entre-elles. Le paragraphe suivant montre les résultats obtenus pour deux scénarios différents typiques de l'utilisation de la plateforme.

b) Résultats fournis par OPNET

i) Scénario 1 : les 10 utilisateurs font du Web

Dans ce scénario, tous les utilisateurs font la même chose : de la navigation Internet. Les requêtes concernant les pages Web demandées sont transmises au serveur (node_1) ce qui ne reflète pas exactement la réalité puisque les serveurs demandés sont en dehors du réseau interne. Néanmoins, la rapidité du réseau externe étant bien plus importante que celle de la plateforme, cette hypothèse est justifiée puisque les éventuelles congestions se feront au niveau de la plateforme. La durée de la simulation est fixée à 5 minutes et l'on regarde les différents temps de chargement d'une page ainsi que le taux d'utilisation de la voie descendante.

On constate sur la figure 101 que le temps de chargement d'une page Web est très court (moins de 150 ms) ce qui peut sembler faible mais il faut se rappeler que tous les utilisateurs ne demandent pas leurs pages en même temps et qu'il y a seulement 10 à se partager le réseau de 34 Mbits/sec.

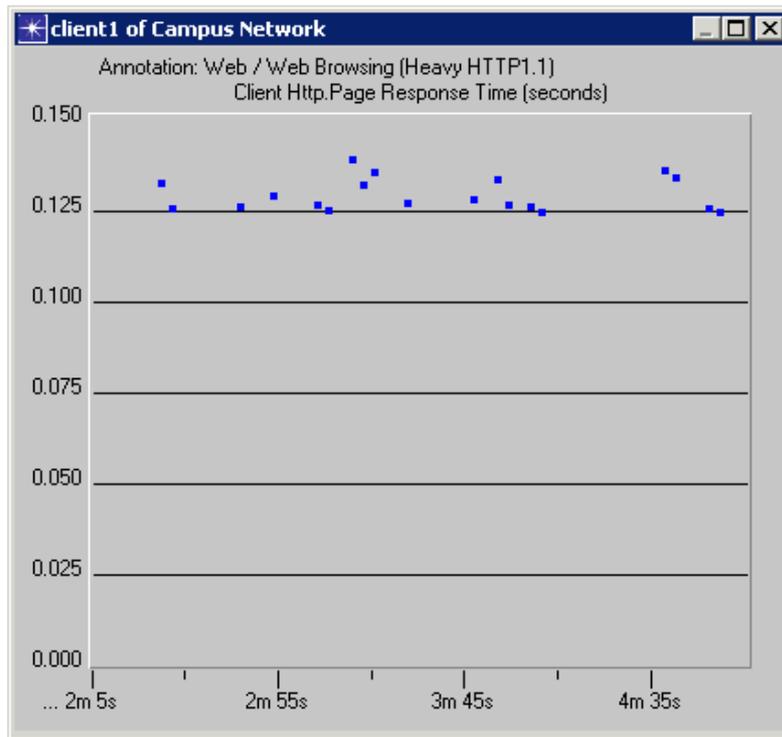


Figure 101 : Temps de téléchargement des pages Web

La figure 102 montre une utilisation très faible de la voie descendante (moins de 5%), le système est donc loin d'être saturé par 10 utilisateurs faisant de la navigation Internet.

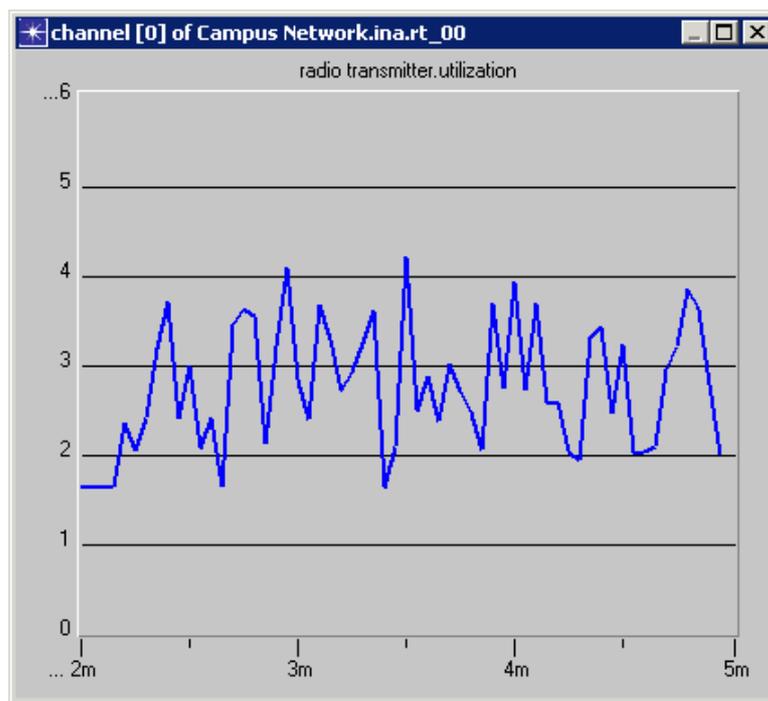


Figure 102 : Pourcentage d'utilisation de la voie descendante

ii) Scénario 2 : 4 utilisateurs font de la visioconférence, 1 fait du téléchargement de fichier, et les 5 autres de la navigation Web

Ici, 4 utilisateurs font de la visioconférence avec la station (node_3) située derrière l'INA. Les débits demandés sont de l'ordre de 250 Kbits/sec. Cette configuration est fidèle à la réalité et illustre l'utilisation de la plateforme durant un cours dispensé par visioconférence.

Nous avons cherché à évaluer le retard pris par les paquets de visioconférence en passant dans le réseau de la plateforme, cette statistique est très importante quand on sait que la visioconférence doit se faire en temps réel. Les autres résultats collectés sont le débit reçu par l'abonné faisant du téléchargement de fichiers, ainsi que le pourcentage d'utilisation de la bande descendante.

La figure 103 montre le retard des paquets de visioconférence, c'est-à-dire le temps d'acheminement de ces paquets. Deux paramètres sont importants : le retard effectif et l'écart entre les différentes valeurs de ce retard.

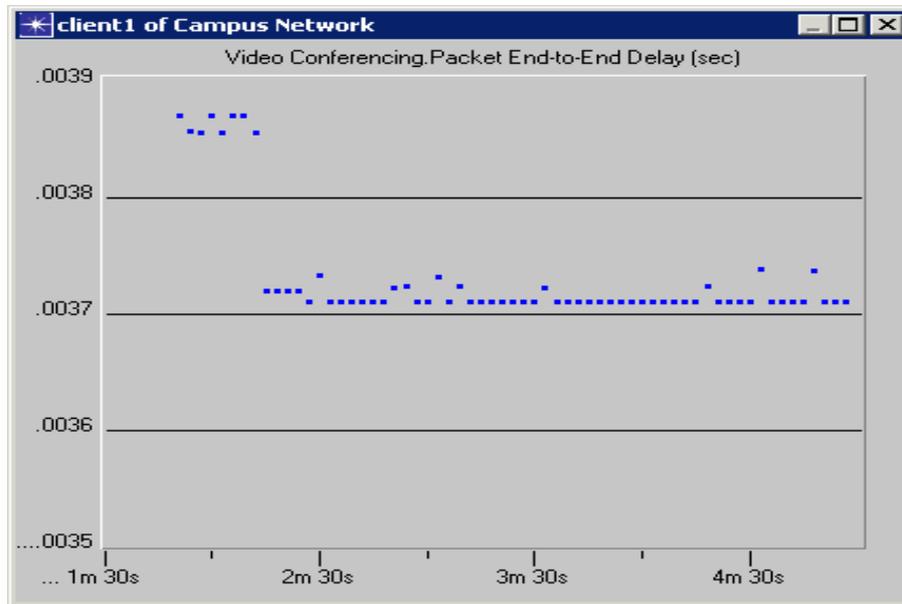


Figure 103 : Retard pris par les paquet en visioconférence

Les valeurs prises (37 ms) sont tout à fait convenables pour une bonne visioconférence puisque cela ne doit pas dépasser 1 seconde pour être confortable. Et l'écart type est lui aussi très faible, il n'y a donc pas de problèmes particuliers du point de vue de la simulation. Le délai plus élevé en début de simulation provient du temps d'établissement des connexions.

La figure 104 illustre le débit obtenu pour le téléchargement de fichiers.

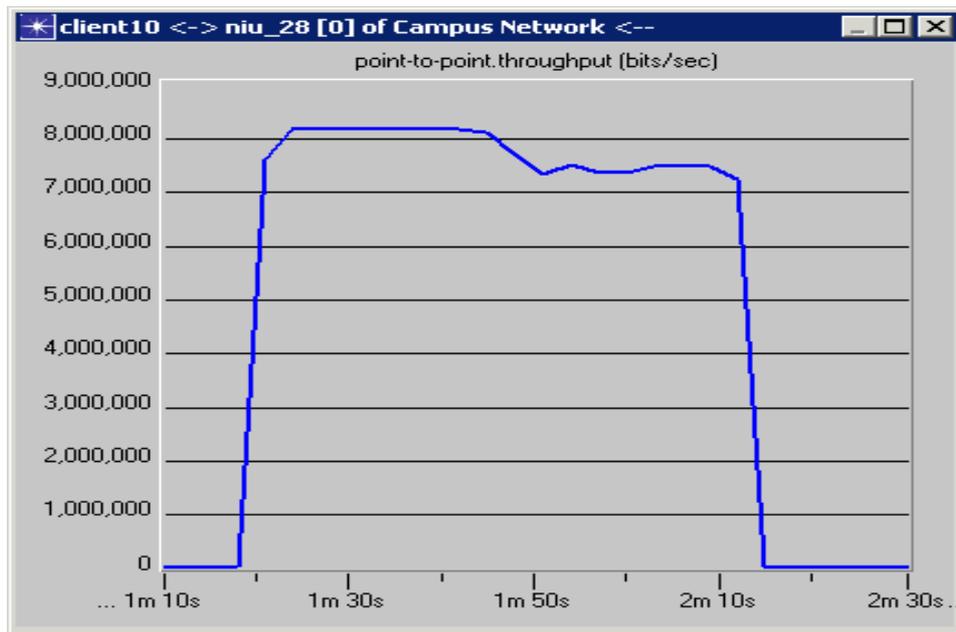


Figure 104 : Débit obtenu pendant le téléchargement de fichier

La encore, le débit obtenu en simulation est tout à fait satisfaisant pour une bonne visioconférence ($> 7\text{Mbits/sec}$). Nous verrons plus tard que ce débit n'est pas du tout respecté dans la réalité et les cause de cette divergence.

Le dernier résultat est le pourcentage d'utilisation de la bande en voie descendante, illustré par la figure 105.

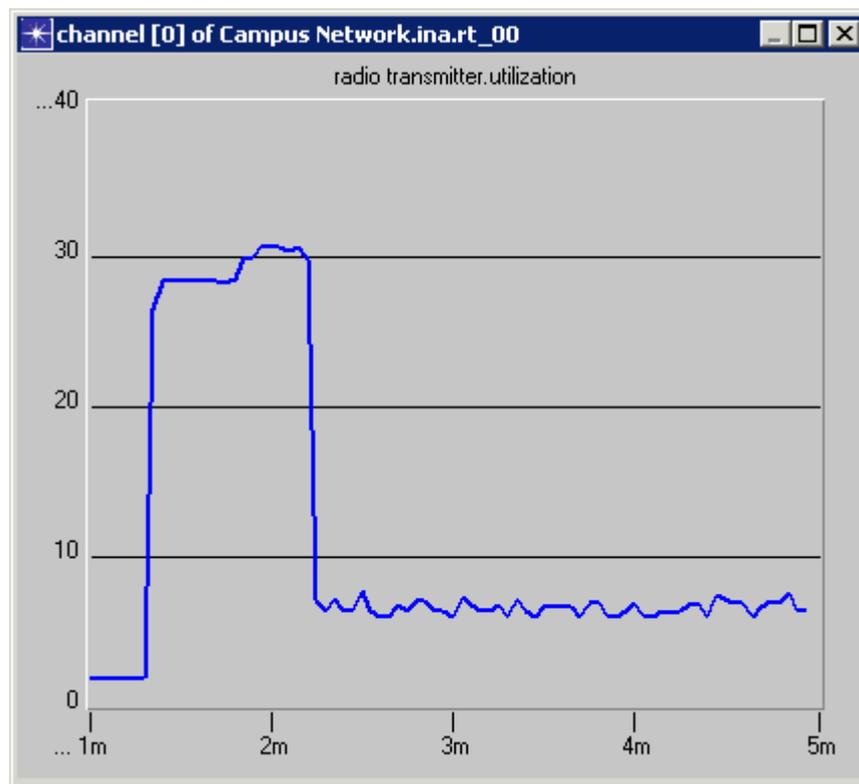


Figure 105 : Taux d'occupation de la voie descendante

Ce taux n'atteint 30% pendant la phase de téléchargement de fichier. On constate que encore une fois, il subsiste une marge conséquente avant de saturer le système.

c) Comparaison qualitative et Conclusion

Il est difficile à l'heure actuelle de comparer des mesures avec les résultats de simulation autrement que de manière qualitative car les sondes utilisées pour effectuer ces mesures ne sont pas encore opérationnelles à l'heure où ces lignes sont écrites. Pour ce qui est de la navigation Internet, nous pouvons dire que les simulations sont proches de la réalité puisqu'à l'utilisation, le temps d'affichage d'une page Web est très rapide. Par contre, pour ce qui est de la visioconférence, il y a une grosse disparité entre ce que prévoient les simulations et la qualité des conférences constatée. Il en va de même pour le téléchargement de fichiers puisque les simulations prévoient un débit de 8 Mbits/sec alors que la réalité donne un débit

maximum de 2,5 Mbits/sec Des études dans les laboratoires de Thomson ont montré qu'il s'agit d'un dysfonctionnement d'un composant électronique de la NIU appelé DATAPUMP. Nous avons donc entrepris de modéliser les défauts apportés par ce composant sous OPNET afin d'obtenir un modèle aussi proche que possible de la réalité.

IV-3.6 Problème de la NIU en visioconférence : étude de la DATAPUMP

Une application de visioconférence n'utilise pas le protocole TCP mais le protocole UDP [IV.5]. La différence entre les deux est l'absence d'ACK pour UDP par rapport à TCP. Cela veut dire qu'il n'y a pas de contrôle de flux ni de limitation due à la remontée des ACK. L'absence de contrôle de flux peut être un inconvénient majeur puisque la couche transport ne régule pas le débit pouvant entraîner un engorgement des tuyaux de communication. Cet engorgement engendre des dysfonctionnements au niveau de la NIU puisque le PC connecté transmet des paquets à cette dernière sans se soucier si elle a assez de bande au niveau MAC et remplit ainsi sa mémoire tampon, saturant le composant appelé DATAPUMP décrit ci-dessous.

a) Description du fonctionnement de la DATAPUMP

La DATAPUMP est construite autour d'un microprocesseur ARM7 (voir figure 106). Elle est composée d'une RAM double port, d'un Demultiplexeur MPEG2, du composant CabRC, et d'un contrôleur Ethernet.

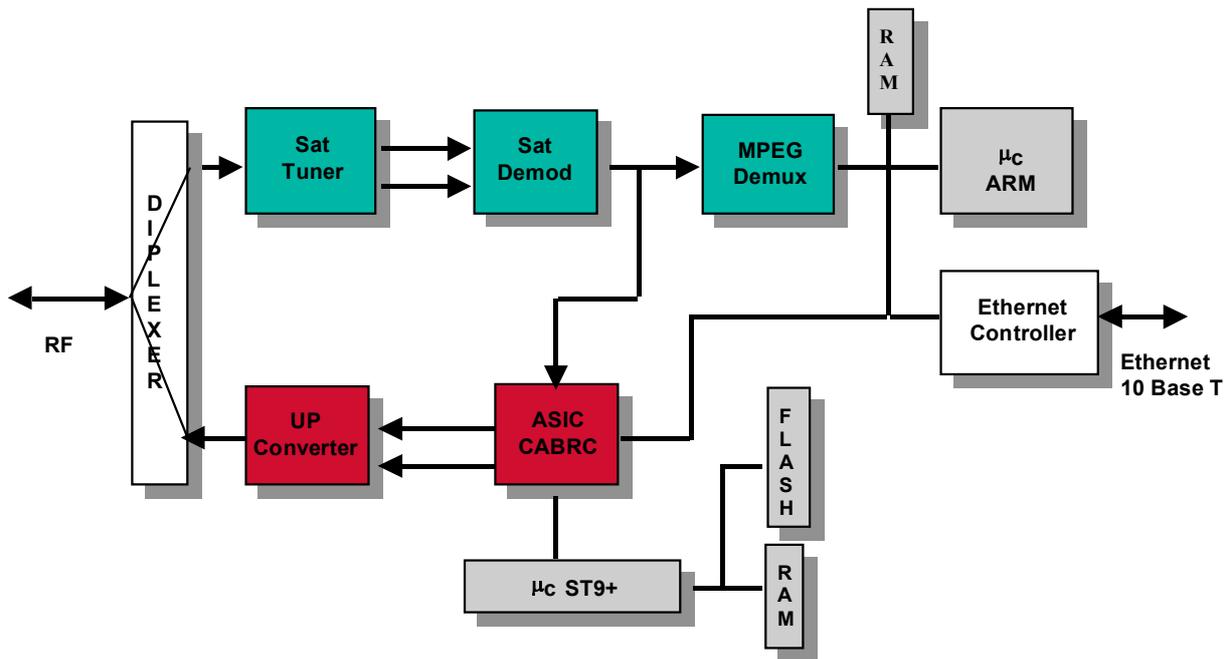


Figure 106 : Schéma bloc de la NIU LMDS actuelle

La NIU fonctionne de la manière suivante :

- voie descendante : Les trames Ethernet sont reconstituées à partir des trames MPEG-TS grâce au Demultiplexeur MPEG2 qui les place dans la RAM. Le processeur ARM7 récupère ces paquets de la RAM pour les mettre dans sa DRAM interne et les met ensuite à disposition du contrôleur Ethernet qui les transmet au PC client via un lien 10 Base T.
- Voie montante : Les trames Ethernet arrivent du PC client dans le contrôleur Ethernet. Le processeur ARM7 récupère ces trames pour les placer dans sa DRAM interne. Ensuite il segmente ces trames en cellules ATM selon le processus AAL5 et les met à disposition du CabRC qui les transmet sur la voie montante.

On voit donc que tout est centralisé autour de l'ARM7 qui gère donc quatre tâches selon des priorités bien définies.

- **TACHE 1** : récupérer les trames Ethernet provenant du PC client dans le contrôleur Ethernet et les placer dans sa DRAM interne (priorité la plus élevée),
- **TACHE 2** : récupérer ces trames Ethernet segmentée en cellules ATM dans sa DRAM interne et les écrire dans le CabRC,

-
- **TACHE 3** : écrire les trames Ethernet de la DRAM (voie descendante) sur le contrôleur Ethernet,
 - **TACHE 4** : lecture des trames Ethernet (voie descendante) de la RAM et les mettre dans sa DRAM interne (priorité la plus élevée).

Chaque tache a donc une durée bien précise en fonction de la taille des paquets qu'elle a à traiter.

b) Modèle OPNET

Il est impossible de réaliser un modèle précis de ce système sous OPNET car la granularité de ce dernier est au niveau du paquet et non du bit. De plus une restitution précise du fonctionnement rallongerait considérablement les temps de simulation ainsi que la mémoire nécessaire jusqu'à peut-être saturer le simulateur.

La démarche suit donc une approche empirique c'est à dire que l'on a réglé la durée de chaque tache pour s'approcher des résultats obtenus en tests réels.

De plus, lors des tests, on s'est aperçu que la différence de performances entre le fonctionnement UDP et TCP était très grande et qu'il était impossible de « régler » le simulateur de manière à obtenir les mêmes résultats qu'en test laboratoire en jouant uniquement sur la durée des taches. Lors des simulations, nous avons aussi remarqué que l'ordre des taches accomplies par l'ARM7 était différent selon que l'on fonctionnait en TCP ou UDP.

En effet, en TCP, tout est très bien orchestré c'est à dire que le protocole s'arrange pour que le client et le serveur n'émettent jamais en même temps (mécanisme d'ACK) alors qu'en UDP, les paquets arrivent n'importe quand puisqu'il n'y a pas de contrôle de flux.

Nous en avons donc conclu que c'est peut-être l'ordre de passage des taches qui influe sur les performances et avons rajouté des temps de passages entre les taches.

La figure 107 montre le schéma fonctionnel de la NIU programmée sous OPNET. On y retrouve l'ARM7, la RAM et la DRAM, LE CabRC, le Demultiplexeur MPEG, le contrôleur Ethernet et les modules radio.

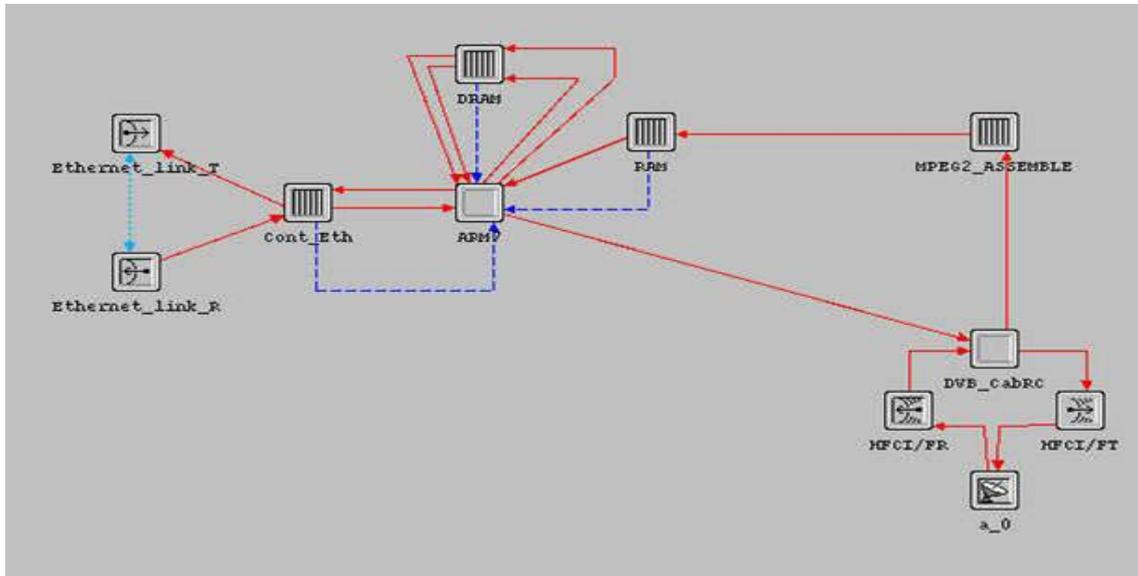


Figure 107: Schéma bloc du modèle OPNET de la NIU LMDS actuelle

Le diagramme d'état de l'ARM7 se trouve en annexe 2.

c) Résultats de simulation de la DATAPUMP

Les résultats ont été obtenus après réglage du modèle OPNET. Nous avons comparé les mesures aux simulations pour les différents tests effectués en laboratoire.

i) Tests UDP

Nous avons d'abord réalisé les simulations en UDP car c'est un mode non « pollué » par les ACK comme TCP, il a donc été plus facile de régler les paramètres.

Les applications utilisées pour charger le système en simulation sont les copies conformes de celles des tests en laboratoire à savoir une machine qui génère du trafic et une autre qui reçoit ce trafic et le mesure.

- **Transfert de données sur la voie montante seule**

Pour réaliser les tests en laboratoire en voie montante, en guise d'applications nous avons pris des générateurs de paquets. Ces tests consistent à voir à quel moment la NIU sature en augmentant le nombre de paquets émis en même temps sur la NIU.

Ils ont montré que la NIU ne supporte pas plus de 3 paquets émis simultanément sous peine de voir des paquets supprimés et que le débit maximum obtenu est de 960 Kbits/sec. Nous avons donc ajusté les paramètres du modèle OPNET pour respecter cette caractéristique.

- **Transfert de données sur la voie descendante seule**

Pour la voie descendante, la NIU ne supporte pas plus de 33 paquets simultanément, et un débit maximum de 4 Mbits/sec, nous avons donc réglé le modèle OPNET pour adhérer à ces résultats.

- **Transfert de données sur les voies montante et descendante simultanément**

Maintenant que nous avons réglé le modèle afin d'adhérer aux résultats des tests sur les voies montante et descendante seules, il reste à vérifier que le modèle fonctionne en utilisant les deux voies simultanément. Si les résultats concordent nous aurons ainsi validé le modèle en UDP.

Pour ce test, on transmet à la NIU un paquet toutes les 50 ms en sur la voie montante et on regarde combien on peut transmettre de paquets simultanément sur la voie descendante sans en perdre. Les résultats des tests en laboratoire donnent un maximum de 3 paquets et les simulations nous donnent 4 paquets au maximum.

On peut constater qu'il y a une divergence entre les tests et la simulation car le nombre de paquets émis simultanément est au maximum de 3 pour les tests et de 4 pour la simulation. Néanmoins, cela peut donner un bon ordre de grandeur si l'on applique par exemple une application visioconférence bidirectionnelle sur le système.

ii) Tests TCP

Il reste à vérifier les résultats fournis par les tests et la simulation lorsque l'on fonctionne en TCP.

- **Transfert de données sur la voie montante seule**

Le débit maximum constaté en laboratoire est de 960 Kbits/sec, la figure 108 donne les résultats obtenus sous OPNET.

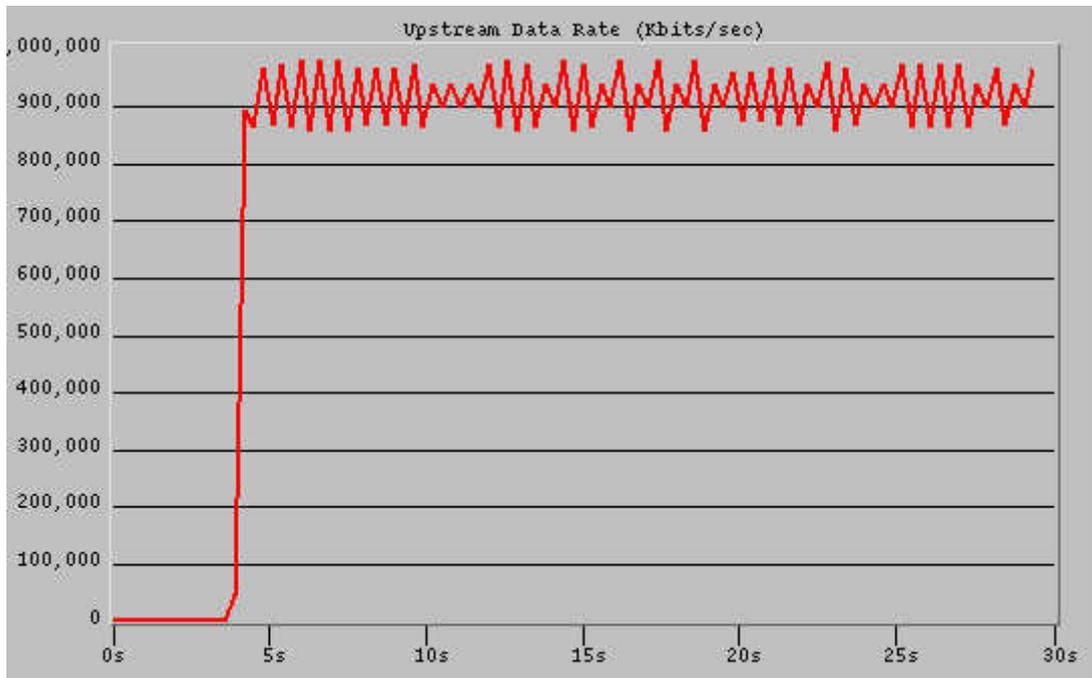


Figure 108 : Débit TCP obtenu en voie montante seule

Il y a donc une bonne corrélation entre les mesures et la réalité.

- **Transfert de données sur la voie descendante seule**

Le débit maximum constaté en laboratoire est de 2.2 Mbits/sec, la figure 109 donne les résultats obtenus sous OPNET.

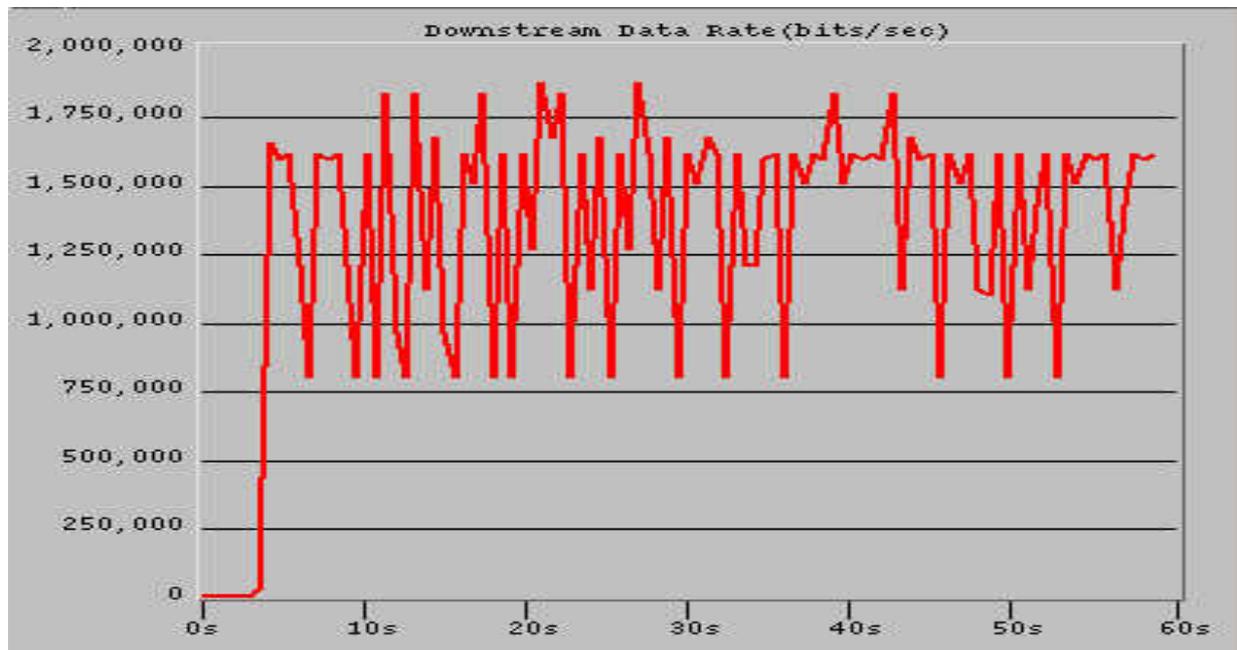


Figure 109 : Débit TCP pour la voie descendante seule

Comme on peut le constater sur le graphique, le débit maximum est de 1.9 Mbits/sec mais est très instable. De plus la valeur moyenne est de 1.5 Mbits /sec ce qui est assez éloigné de la réalité. Le modèle est donc limité dans cette configuration certainement en partie à cause de la modélisation de TCP sous OPNET et de la granularité insuffisante.

- **Transfert de données sur les voies montante et descendante simultanément**

Les mesures donnent un débit maximum de 1.5 Mbits/sec pour la voie descendante et de 500 Kbits/sec pour la voie montante mais de manière très instable (fluctuation de débit). La figure 110 donne les résultats obtenus sous OPNET.

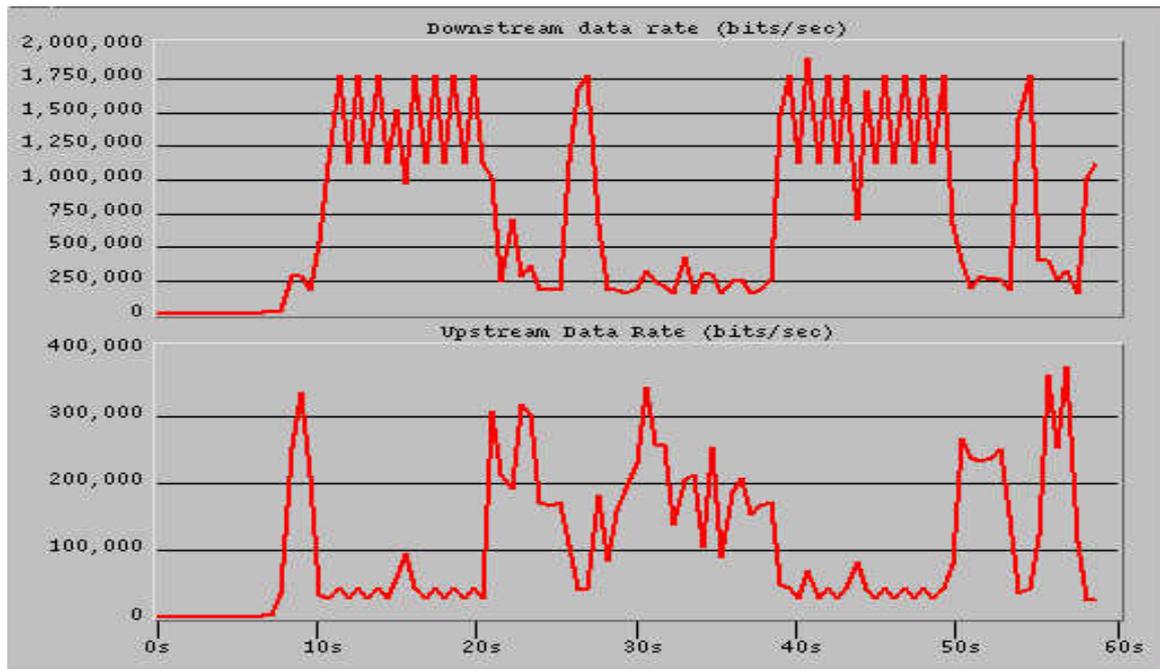


Figure 110 : Débit montants et descendants en TCP simulés

Le modèle semble reproduire de manière satisfaisante le fonctionnement dans ce cas de figure mis à part pour la voie descendante qui est un peu faible par rapport à la réalité.

d) Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que nous avons réalisé un modèle de la NIU relativement fidèle pour le fonctionnement en UDP mais utilisable avec prudence pour un fonctionnement en TCP.

De plus le réglage est très délicat à cause du nombre important de paramètres et de cas à faire fonctionner. Un modèle précis et réel ne peut donc pas être obtenu sous OPNET du fait d'une granularité insuffisante.

Néanmoins, pour représenter les problèmes liés à la visioconférence qui fonctionne en UDP, il semble suffisamment précis et proche de la réalité. La NIU actuelle n'étant pas susceptible d'évoluer, nous avons fait des simulations de cette DATAPUMP sur une application de visioconférence.

e) **Application à la vidéo conférence en simulation : étude qualitative**

Nous allons maintenant remplacer le modèle utilisé dans le paragraphe IV-2 par celui prenant en compte les défauts de la DATAPUMP et regarder les résultats qu'il donne sur une visioconférence. La statistique observée sera le pourcentage de paquets supprimés par la NIU à cause d'un nombre trop important de paquets émis simultanément comme vu dans les tests de la DATAPUMP. Si ce nombre est trop grand il est évident que la qualité de la visioconférence sera médiocre.

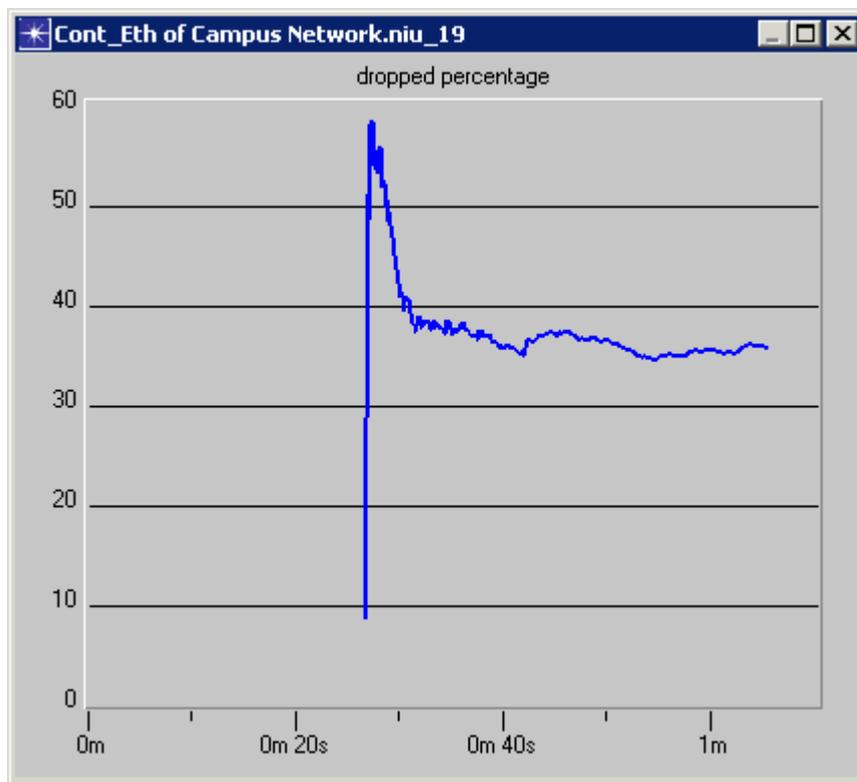


Figure 111 : Moyenne de paquets éliminés dans la DATAPUMP

On constate sur la figure 111 que ce nombre est très important (35%), ce qui rend la visioconférence de très mauvaise qualité. Les tests effectués sur la plateforme ERASME (deux personnes qui tentent de communiquer par visioconférence par le LMDS) ont démontré la même chose.

IV-3.7 Conclusion sur la norme simulation LMDS ERASME

Nous avons montré l'efficacité du modèle OPNET de la norme DVB en comparant les résultats avec la théorie et l'expérimentation. Les résultats concordent de manière satisfaisante et l'on dispose donc d'un outil puissant pour le dimensionnement d'un système basé sur cette norme. Ces travaux ont conduit à l'élaboration d'un modèle précis permettant de prévoir les performances de tous systèmes dérivés de la plateforme ERASME.

Les applications, de nos jours, semblent se tourner vers des besoins symétriques en terme de débit c'est-à-dire que les utilisateurs demandent de plus en plus à transmettre des données aussi rapidement qu'ils les reçoivent. La visioconférence ou bien encore la téléphonie sur IP en sont les parfaits exemples. Or, la norme DVB utilisée dans la plateforme ERASME a comme caractéristique principale une grosse dissymétrie entre sa voie montante et sa voie descendante. De plus les systèmes futurs devront être capables de faire de la qualité de service c'est-à-dire privilégier les flux des applications temps réel comme la visioconférence, par rapport aux autres comme la navigation Internet ou le transfert de fichiers. La norme DVB EN 301 199 ne permet pas de gérer cette qualité de service. En utilisant cette norme, le fournisseur d'accès devra faire un choix entre le nombre d'abonnés pouvant se connecter simultanément et le débit minimum qu'il leur garanti.

Une autre partie du dimensionnement consiste en l'étude de la couverture électromagnétique du système, cette étude est réalisée au sein du CREAPE et ne rentre donc pas dans le cadre de ce mémoire. Néanmoins, le logiciel de calcul de cette couverture pourra toujours être couplé avec OPNET afin d'avoir un outil complet de dimensionnement.

C'est dans la logique de systèmes mieux adaptés aux besoins actuels que nous nous sommes tournés vers la norme 802.16 qui contrairement à la norme DVB permet d'obtenir un débit symétrique et de faire de la qualité de service de manière extrêmement flexible.

IV-4 ÉTUDE PROSPECTIVE DE LA FUTURE GENERATION DE LMDS : LA NORME 802.16

Cette étude est appelée prospective puisque au moment de cette étude, aucun système commercial n'a été trouvé pour valider les simulation. C'est donc sur le principe de la norme plus que sur les performances attendues que se tourne ce paragraphe. La norme 802.16 est utilisée pour les technologies boucle locale radio. Elle définit donc un réseau d'accès fonctionnant sur le principe point-multipoint dans la bande de 10 à 66 GHz.

IV-4.1 Etude théorique

Comme vu dans le chapitre II, les deux caractéristiques principales de cette norme sont d'une part l'utilisation des trames de longueur 0.5 ,1 ou 2 millisecondes pour transporter les informations, d'autre part la modulation utilisée qui change dynamiquement entre du QPSK, 64QAM, et 16QAM. De plus, elle permet de réaliser de la qualité de service dans le mode connecté en privilégiant telle ou telle connexion. Ce qui, selon la modulation utilisée par cette connexion, va influencer sur les performances générales du système étant donné que le nombre de symboles par trame est constant. La figure 112 permet de mieux comprendre le phénomène. Les files d'attente des différentes connexions se voient retiré leurs paquets par le répartiteur QOS fonctionnant selon un algorithme bien précis. Ces paquets sont ensuite modulés et transmis dans une trame. On voit donc que c'est le répartiteur qui va gérer la QOS en fonction des priorités assignées aux connexions. A noter ici que l'hypothèse principale est que la modulation est déjà choisie pour chaque connexion (en fonction du SNR de chaque récepteur abonné) de manière à avoir un TEB négligeable.

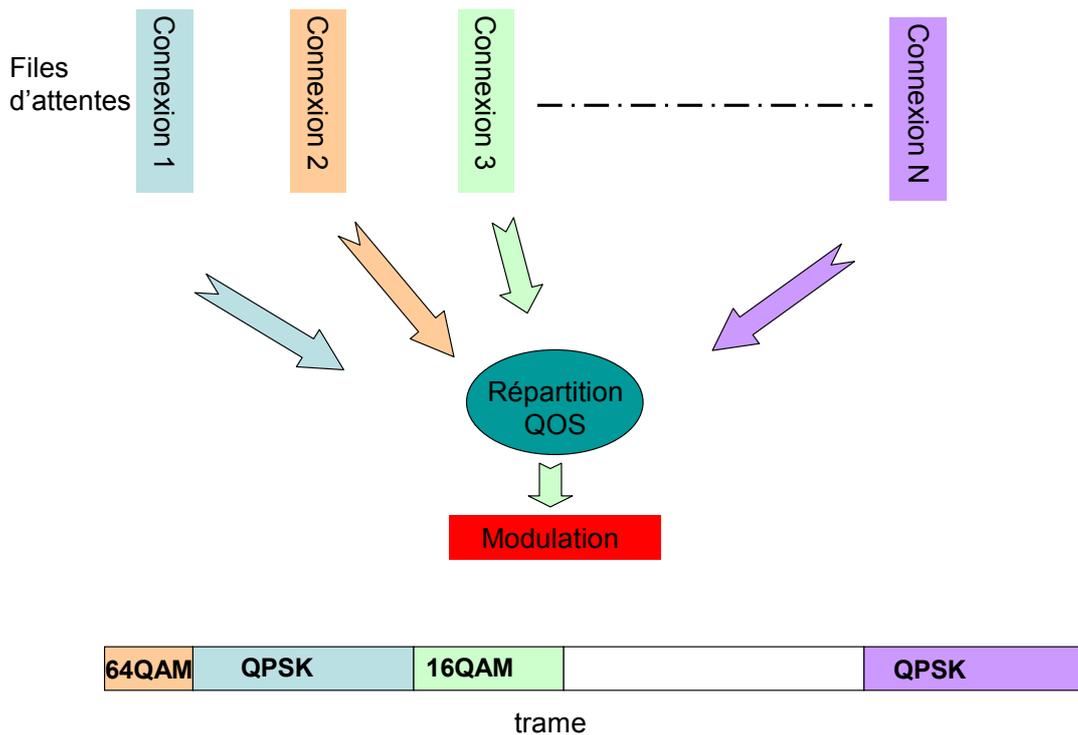


Figure 112 : Principe de répartition des paquets des connexions dans une trame

Le but de cette étude est d'étudier le comportement de la norme couplée avec des algorithmes simples de QOS ce qui permettra de prévoir le comportement avec une QOS plus poussée.

Nous avons établi une méthode permettant de calculer le débit utile total du canal, connaissant le nombre de connexions, leurs modulations et leurs priorités. Les résultats obtenus seront comparés avec un modèle réalisé sous OPNET.

a) Etude d'un cas simple : toutes les connexions ont la même priorité

Nous avons vu dans le chapitre III que la norme 802.16 peut utiliser trois modulations. Nous allons chercher à connaître le débit total en fonction du pourcentage de connexions dans chaque modulation en supposant qu'elles sont toutes actives. Nous supposons également que la taille de la trame est infinie.

Soit N le nombre total de connexions actives,

N_1 le nombre de connexions émises en QPSK,

D_1 le débit global de l'ensemble des connexions émises en QPSK en bits/sec,

N_2 le nombre de connexions émises en 16QAM,

D_2 le débit global de l'ensemble des connexions émises en 16QAM en bits/sec,

N_3 le nombre de connexions émises en 64QAM,

D_3 le débit global de l'ensemble des connexions émises en 64QAM en bits/sec,

et D_{bits} le débit total en Bits/sec.

On a :
$$D_{bits} = D_1 + D_2 + D_3 \quad (\text{IV.14})$$

Vu qu'il n'y a pas de priorités sur les connexions, toutes les connections obtiennent le même débit donc pour un type de modulation on a :

$$D_1 = N_1 \frac{D_{bits}}{N} \quad D_2 = N_2 \frac{D_{bits}}{N} \quad D_3 = N_3 \frac{D_{bits}}{N} \quad (\text{IV.15})$$

Pendant une seconde, le nombre de symboles transmis et donc la rapidité de modulation est :

$$D_{bauds} = \frac{D_1}{R_{QPSK}} + \frac{D_2}{R_{QAM16}} + \frac{D_3}{R_{QAM64}} \quad (\text{IV.16})$$

Avec R_{QPSK} : Valence de la modulation QPSK en bits/symboles,

R_{QAM16} : Valence de la modulation 16QAM en bits/symboles,

et R_{QAM64} : Valence de la modulation 64QAM en bits/symboles.

On obtient en injectant IV.14 et IV.15 dans IV.16 :

$$D_{bauds} = \left(\frac{N_1}{N} \cdot R_{QPSK} + \frac{N_2}{N} \cdot R_{QAM16} + \frac{N_3}{N} \cdot R_{QAM64} \right) \cdot D_{bits} \quad (\text{IV.17})$$

Donc :

$$D_{bits} = \frac{D_{bauds}}{\left(\left(\frac{N_1}{N} \cdot R_{QPSK} \right) + \left(\frac{N_2}{N} \cdot R_{QAM16} \right) + \left(\frac{N_3}{N} \cdot R_{QAM64} \right) \right)} \quad (\text{IV.18})$$

On voit donc que c'est le ratio N_x/N qui importe.

Afin de mieux se rendre compte de l'influence de la répartition, nous avons réalisé un diagramme en 3D avec pour axe des X le pourcentage de connexions en QPSK, sur l'axe des Y, le pourcentage de connexions 16QAM, et sur l'axe des Z le pourcentage de connexions en 64QAM.

Sur la quatrième dimension, le débit est représenté par un gradient de couleurs.

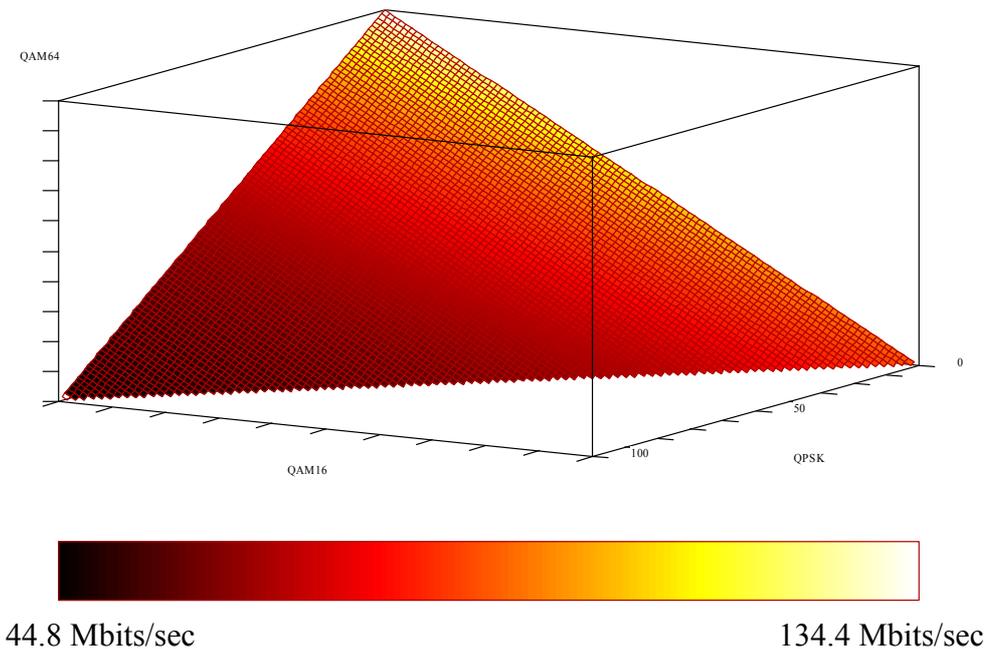


Figure 113 : Diagramme des débits en fonction de la modulation

On peut constater que logiquement plus on s'approche de l'axe 64QAM, plus le débit est important, alors que plus on se rapproche que celui de QPSK, plus le débit est faible.

b) Etude de l'influence de la priorité

La norme 802.16 permet de faire de la qualité de service c'est-à-dire qu'elle privilégie telle ou telle connexion par rapport aux autres : par exemple, une connexion avec une priorité égale à deux fois celle des autres. Elle est supposée disposer de deux fois plus de bande que les autres. Pour le calcul théorique, on suppose que toutes les connexions sont actives et que la taille de la trame est infinie.

Soit N le nombre total de connexions actives,

N_1 le nombre de connexions émises en QPSK,

D_1 le débit global des connexions émises en QPSK en bits/sec,

N_2 le nombre de connexions émises en 16QAM,

D_2 le débit global des connexions émises en 16QAM en bits/sec,

N_3 le nombre de connexions émises en 64QAM,

D_3 le débit global des connexions émises en 64QAM en bits/sec,

W_i le poids accordé à la connexion i , c'est-à-dire que pour W_i bits transmis par la connexion i , la connexion j transmettra W_j bits.

$\sum W$ La somme de tous les poids de toutes les connexions,

Soit D_{bits} le débit total en bits/sec,

et D_i le débit de la connexion i en bits/sec.

On a :

$$D_i = D_{bits} \cdot \frac{W_i}{\sum W} \quad (\text{IV.19})$$

Le débit total peut s'écrire :

$$D_{bits} = \sum_{i=1}^N D_i = \sum_{i=1}^N \left(D_{bits} \cdot \frac{W_i}{\sum W} \right) \quad (\text{IV.20})$$

On peut supposer que les N_1 premières connexions sont en QPSK, les N_2 suivantes sont en 16QAM et les N_3 dernières sont en 64QAM.

On a donc :

$$D_{bits} = \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{W_i}{\sum W} \cdot D_{bits} \right) + \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} \left(\frac{W_i}{\sum W} \cdot D_{bits} \right) + \sum_{i=N_2+1}^{N_2+N_3} \left(\frac{W_i}{\sum W} \cdot D_{bits} \right) \quad (\text{IV.21})$$

Le pourcentage de débit utilisé en QPSK est donc :

$$\sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{W_i}{\sum W} \right) \quad (\text{IV.22})$$

De même, Le pourcentage de débit utilisé en QAM16 est donc :

$$\sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} \left(\frac{W_i}{\sum W} \right) \quad (\text{IV.23})$$

Le pourcentage de débit utilisé en QAM64 est donc :

$$\sum_{i=N_2+1}^{N_2+N_3} \left(\frac{W_i}{\sum W} \right) \quad (\text{IV.24})$$

Il suffit de réinjecter ce taux dans les résultats du paragraphe précédent pour avoir le débit total ce qui nous donne :

$$D_{bits} = \frac{D_{bauds}}{\left(\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{W_i}{\sum W} \right)}{R_{QPSK}} \right) + \left(\frac{\sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} \left(\frac{W_i}{\sum W} \right)}{R_{QAM\ 16}} \right) + \left(\frac{\sum_{i=N_2+1}^{N_2+N_3} \left(\frac{W_i}{\sum W} \right)}{R_{QAM\ 64}} \right) \right)} \quad (\text{IV.25})$$

IV-4.2 Comparaison avec les simulations

a) Description du modèle OPNET

Le modèle réalisé sous OPNET reprend l'ensemble de la norme et ses spécifications :

- Voie descendante
 - modulation adaptative QPSK, 16QAM, 64QAM,
 - transmission de cellules ATM ou de paquets de taille variable encapsulés dans des PDUs en Broadcast,
 - tramage de 0.5, 1 ou 2 ms,
 - gestion avancée de la qualité de service.

- Voie montante :
 - modulation adaptative QPSK, 16QAM, 64QAM
 - transmission de cellules ATM ou de paquets de taille variable encapsulés dans des PDUs,
 - tramage de 0.5, 1 ou 2 ms,
 - gestion avancée de la qualité de service,
 - allocation de bande par la BS de manière dynamique (toutes les trames).

- Duplexage en mode FDD uniquement, les autres modes sont à développer.

i) Couche physique

La couche physique du modèle reprend celle qui donnée en standard sous OPNET. De la même manière que pour le modèle DVB, il n'y a donc pas eu à modéliser cette couche si ce n'est l'intégration du diagramme de rayonnement des différentes antennes.

ii) Couche MAC

Comme pour le standard DVB, c'est la couche MAC qui a fait l'objet d'une grande partie de l'étude. Encore une fois, il a d'abord fallu comprendre les principes de fonctionnement décrits dans le chapitre III, puis choisir quelles caractéristiques influent réellement sur les performances. Les représentations des modèles se trouvent en annexe 2.

L'interfaçage avec les modèles standard OPNET n'a pas été réalisé car la complexité de cette dernière est suffisante pour justifier d'une étude simple avant de regarder le comportement des couches supérieures associées. Nous avons donc utilisé des générateurs de paquets standard OPNET pour la génération du trafic.

Le modèle prend en charge uniquement le service Best effort pour le moment mais est prévu pour pouvoir implanter facilement les autres service (UGS, RTPS, etc...) vus dans le chapitre III. Seul le service Best effort avec une gestion de la priorité est donc implanté, les autres services sont à développer sur le modèle actuel.

b) Résultats et comparaison avec l'étude théorique

i) Validation de l'influence de la modulation

Afin de valider les formules établies en IV.3, nous avons utilisé le modèle OPNET simulant la modulation et la QOS. Dans un premier temps, toutes les priorités sont identiques et égales à un. L'algorithme utilisé se base sur le principe « Virtual Clock » décrit en annexe 3 xx. À chaque connexion correspond une modulation, donc une taille de paquet différente (par exemple, si un paquet à une taille de 100 bits et qu'il est émis avec modulation QPSK, le simulateur fixe sa taille à 50 symboles). On répète cette opération jusqu'à ce que la trame soit pleine puis on transmet cette trame.

Les paramètres du générateur de paquets sont les suivants :

- un paquet toutes les 10 microsecondes par connexion,
- la taille des paquets varie de 100 à 10 000 bits aléatoirement,
- la taille de la trame est fixée à 1 ms et le nombre de symboles par trame est de 22400.

Les résultats de la figure 114 sont donnés pour un taux de connexion en 64QAM fixe et un taux en QPSK qui varie. Celui en 16QAM est déduit des deux autres. Les trois courbes donnent trois taux différents en 64QAM obtenus par le calcul alors que les points représentent les valeurs simulées avec OPNET.

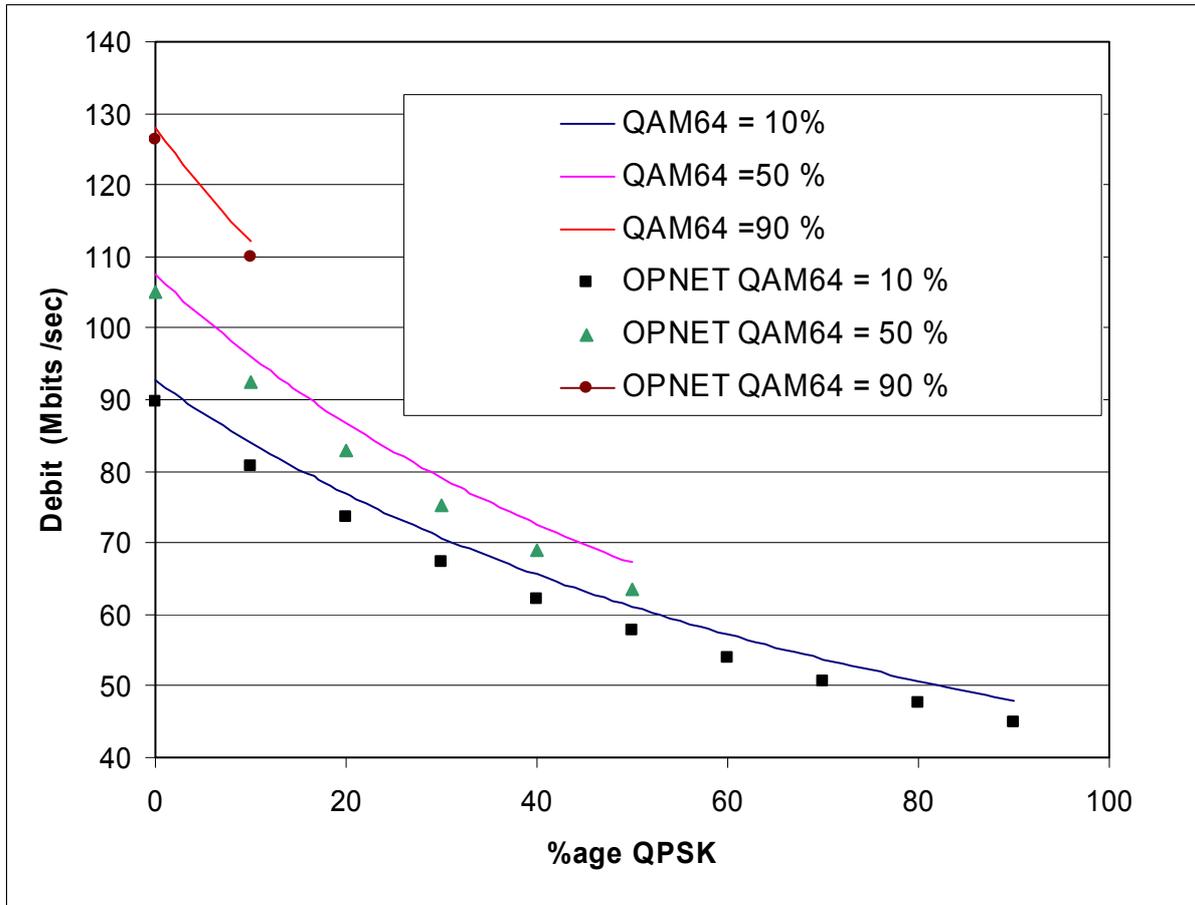


Figure 114 : Comparaison du débit total calculé et simulé en fonction des taux dans chaque modulation.

On peut constater dans un premier temps que le débit diminue en fonction de l'augmentation du taux en QPSK ce qui est logique puisqu'un paquet prend plus de symboles en QPSK que pour les autres modulations.

La deuxième constatation se situe au niveau de la différence entre les points simulés et les courbes calculées. Cette différence provient du fait que sous OPNET, une trame n'est jamais remplie à 100 %. En effet la somme de la taille de tous les paquets n'est que rarement strictement égale à la taille de la trame. Néanmoins, le modèle mathématique reste valable (pour une première approche) au vu de la rapidité d'exécution par rapport à la simulation OPNET.

ii) Validation de l'influence de la priorité

Il reste à voir, après l'influence de la modulation sur les performances, celle de la priorité des connexion suivant la modulation qui leur est associée.

Nous prendrons pour la comparaison les hypothèses suivantes :

Le modèle OPNET reste le même, l'algorithme de QOS utilisé est de type « Virtual Clock » et est décrit succinctement en annexe 3.

Les paramètres de la simulation sont :

- un paquet toutes les 10 microsecondes par connexion,
- la taille des paquets varie de 100 à 10 000 bits aléatoirement,
- la taille de la trame est fixée à 1 ms et le nombre de symboles par trame est de 22400,
- il y a 30 % des utilisateurs en QPSK, 30% en 16 QAM et 40% en 64QAM,
- deux poids différents pour la priorité (1 et 2) sont utilisés.

On fixe deux modulations avec un poids de 1 et on fait varier le pourcentage en poids 2 pour la dernière modulation.

La figure 115 montre l'évolution du débit en fonction du taux de connexions en QPSK se trouvant en priorité 1. Tous les utilisateurs utilisant la modulation 16QAM et 64 QAM ont une priorité de 1 alors que ceux en QPSK (30% du nombre total) sont un certain nombre en priorité 2.

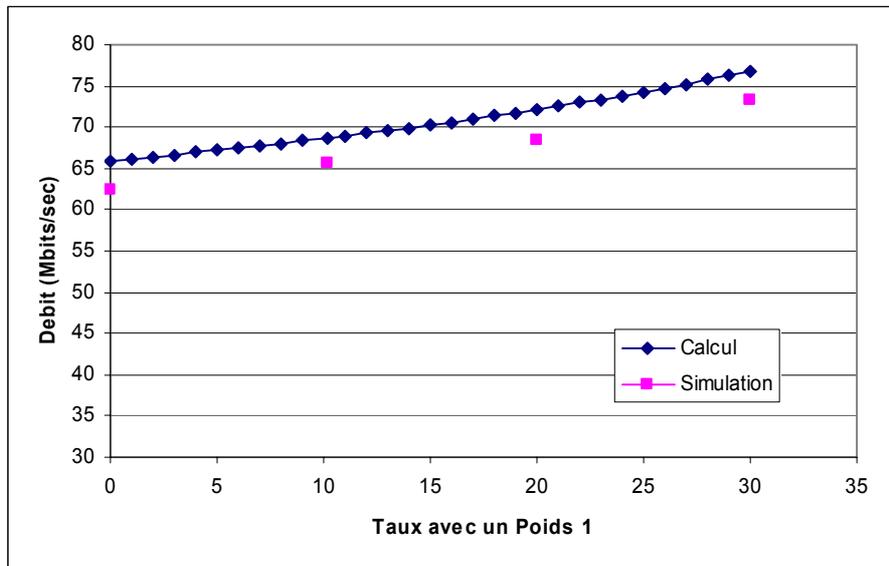


Figure 115 : Débit total en fonction du taux en priorité 1 des connexions en QPSK

On voit ici que si l'on privilégie les utilisateurs en QPSK, on diminue le débit total. La différence entre la simulation et le calcul provient du même phénomène que précédemment à savoir le remplissage des trames qui n'est pas complet.

La figure 116 montre le débit pour tous les utilisateurs en priorité 1 sauf ceux en QAM16 qui sont un certain pourcentage en priorité 2.

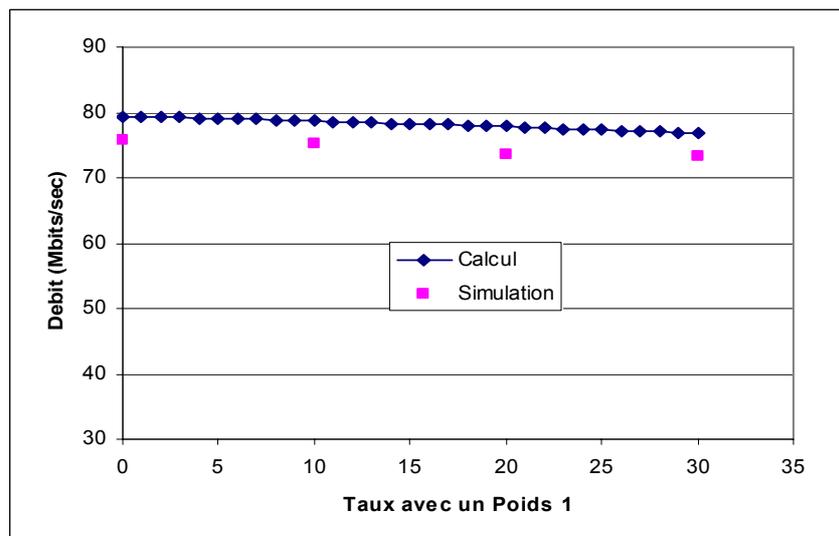


Figure 116 : Débit total en fonction du taux en priorité 1 des connexions en QAM16

On constate que si l'on privilégie les utilisateurs en 16QAM, on augmente le débit total. La différence entre la simulation et le calcul provient une fois de plus du phénomène de remplissage des trames.

Pour finir, on prend le cas où tous les utilisateurs sont en priorité 1 sauf ceux en QAM64 qui sont un certain nombre en priorité 2. La figure 117 montre l'évolution du débit en fonction de ce nombre.

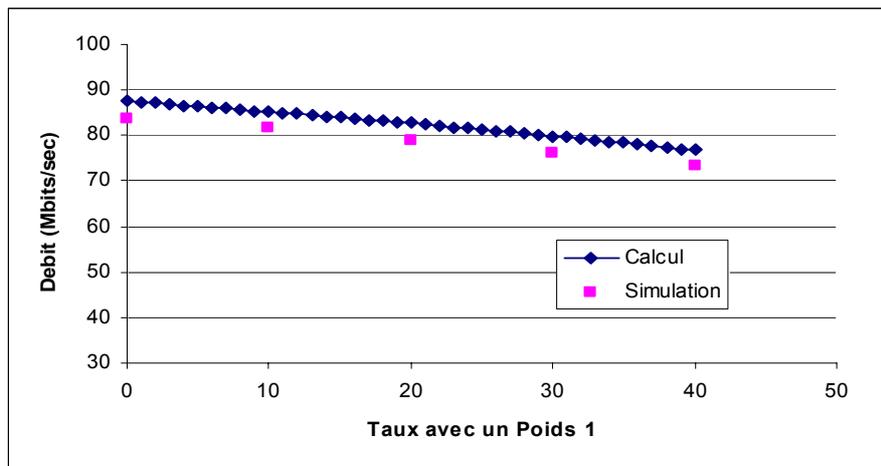


Figure 117 : Débit total en fonction du taux en priorité 1 des connexions en QAM64

On voit ici que si l'on privilégie les utilisateurs en 64QAM, on augmente le débit total.

Tous les résultats précédents démontrent la validité des équations trouvées aux erreurs de remplissage de trame près. Nous allons démontrer que si l'on applique un facteur correcteur égale au taux de remplissage des trames, nous pouvons corriger cette erreur.

iii) Etude du taux de remplissage des trames

Dans ce paragraphe nous allons étudier le taux de remplissage des trames uniquement en simulation. Le modèle OPNET réalisé nous permet de visualiser ce nombre. Il sera démontré que ce taux correspond aux erreurs entre la simulation et les calculs théoriques.

Prenons le cas où aucune connexion n'est prioritaire par rapport aux autres.

Les paramètres de la simulation sont les suivants :

- un paquet toutes les 10 microsecondes par connexion,
- la taille des paquets varie de 100 à 10 000 bits aléatoirement,
- la taille de la trame est fixée à 1 ms et le nombre de symboles par trame est de 22400.

Les résultats de la figure 118 sont donnés pour un taux de connexion en 64QAM fixe et en faisant varier le taux en QPSK, celui 16QAM étant déduit des deux autres. La courbe propose l'erreur relative de calcul avec un taux en 64QAM de 10 % alors que les points représentent le taux moyen inutilisé de la trame simulée avec OPNET.

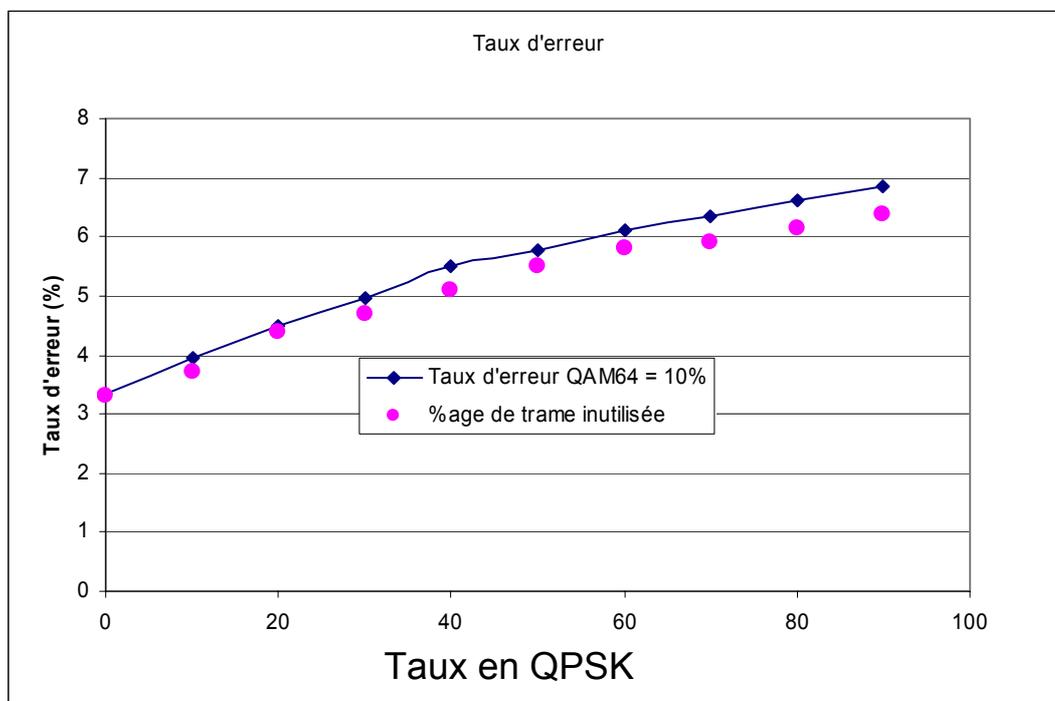


Figure 118 : Comparaison entre le taux d'erreur et le pourcentage de trame inutilisé

On constate que les deux courbes sont pratiquement confondues ce qui signifie que l'hypothèse faite précédemment était justifiée.

Pour trouver le résultat exact il suffit donc de multiplier le résultat donné par les formules par un coefficient correcteur égal au taux d'utilisation des trames. La figure 119 montre la comparaison entre la courbe simulée et la courbe calculée corrigée.

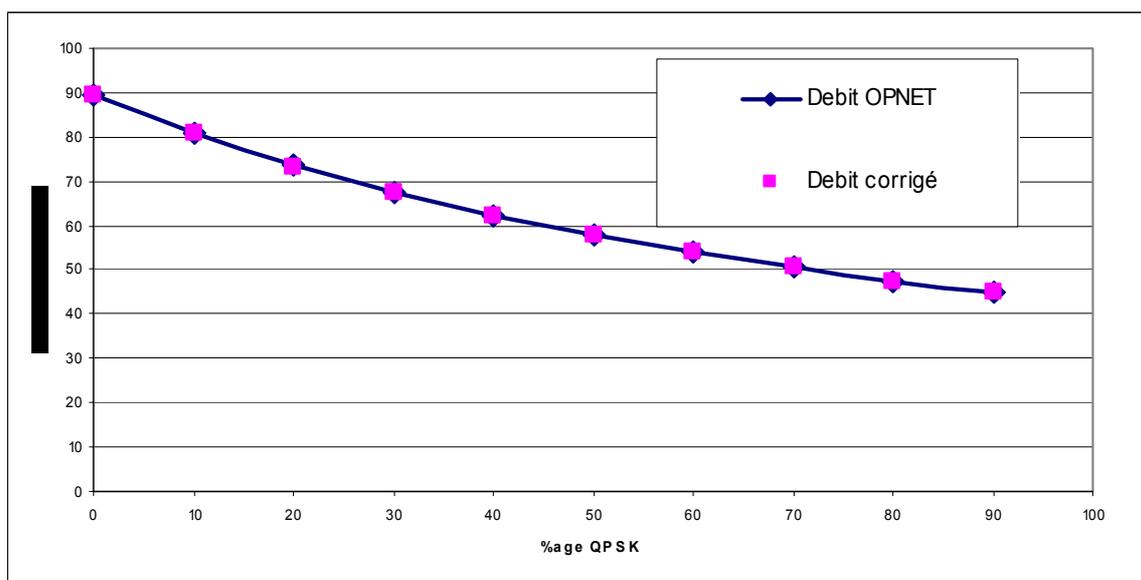


Figure 119 : Comparaison, valeurs simulées /corrigées

On voit la aussi que les deux courbes sont confondues ce qui valide la méthode de calcul.

Nous avons donc montré la validité d'une méthode de calcul rapide du comportement de la norme 802.16 puis révélé l'importance de la combinaison modulation/QOS sur les performances générales d'un système basé sur cette norme. Selon le choix, le fournisseur d'accès pourra privilégier les connexions utilisant des modulations rapides afin de mieux optimiser le système ou bien ne pas se soucier de la modulation utilisée au détriment des performances. Les calculs formulés ci-dessus permettent donc de prévoir de manière rapide tous les cas de figures ce qui sera utile à la BS pour accepter ou non les nouvelles connexions. Néanmoins, le modèle OPNET reste indispensable pour une bonne prévision avec des applications à débit non constant.

De plus cette méthode peut s'appliquer à n'importe quel mode physique c'est à dire un couple modulation codage correcteur en changeant tout simplement la rapidité de la modulation. Puisqu'on sait qu'un codage augmente la taille des paquets d'information.

La programmation sous OPNET a mis en évidence certains aspects (comme le besoin de la fragmentation en voie montante) à étudier de la norme 802.16, c'est dans ce cadre là que les travaux qui vont suivre sont réalisés.

IV-4.3 Etude du besoin de la fragmentation en voie montante

Lors de la programmation de la norme sous OPNET, les tests effectués ont montrés que lorsque le nombre de connexions était grand et que la taille des paquets devenait conséquente, certaines connexions étaient bloquées c'est-à-dire que plus aucune données ne circulaient dans le tuyau alloué à ces connexions.

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons créé une connexion dont la taille des paquets augmente régulièrement au cours du temps. La figure 120 montre simultanément le débit de cette connexion et la taille des paquets pour 10 connexions au total. On constate que lorsque cette taille atteint la valeur de 27000 bits, la connexion est bloquée. Nous en avons donc conclu que la fragmentation était nécessaire pour résoudre le problème.

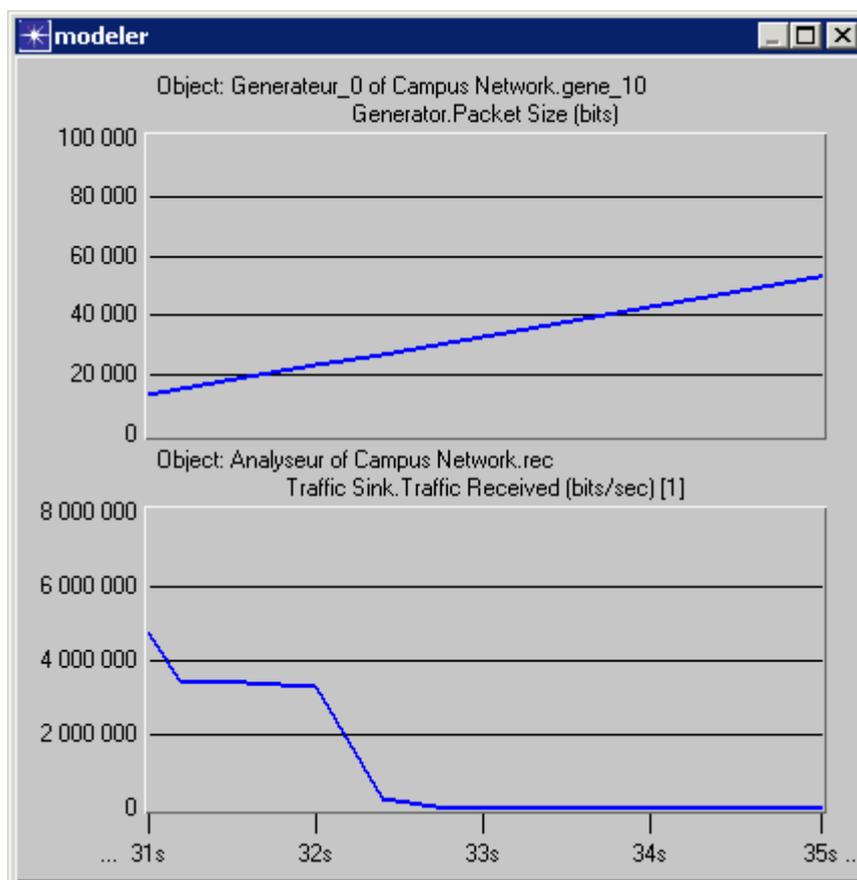


Figure 120 : Blocage d'une connexion lorsque la taille des paquets augmente

En effet, si l'on considère une trame de 1 ms utilisée pour 5 connexions ayant la même priorité, la répartition de la bande allouée dans la trame se fait de la manière illustrée par la figure 121. L'algorithme utilisé est décrit dans le paragraphe suivant.

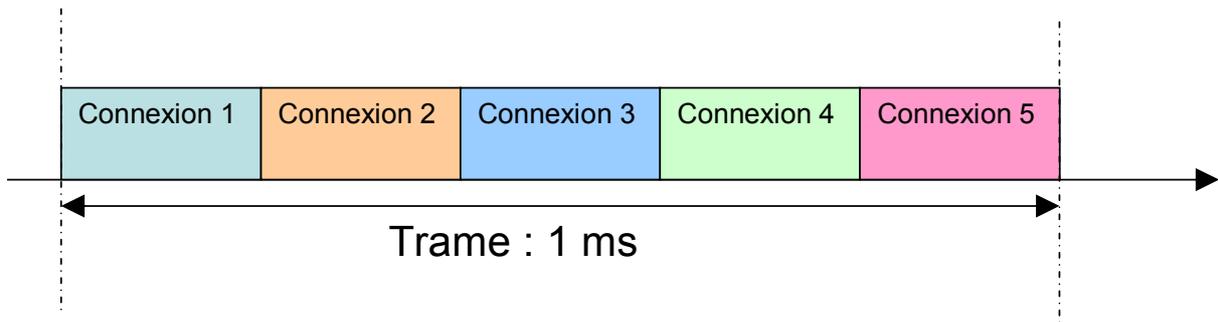


Figure 121 : Exemple de répartition de la bande dans une trame

Pour la connexion 1 par exemple, si la taille du paquet qu'elle doit transmettre est supérieur à ce que lui alloue la BS, elle ne va pas pouvoir le transmettre et va donc attendre la trame suivante pour voir si cette fois ci elle aura assez de bande et ainsi de suite. On voit bien que si les choses restent en l'état, cette connexion ne pourra plus émettre de paquets et sera donc bloquée. Une solution consiste à utiliser l'option disponible dans la norme 802.16 de fragmentation c'est-à-dire de découper le paquet de manière à ce qu'il puisse loger dans ce que lui alloue la BS. Si le paquet à transmettre est plus grand que ce que lui alloue la BS il est découpé de manière à ce que le segment entête comprise puisse être contenu dans cette fenêtre. La connexion ne peut donc plus être bloquée (figure 122).

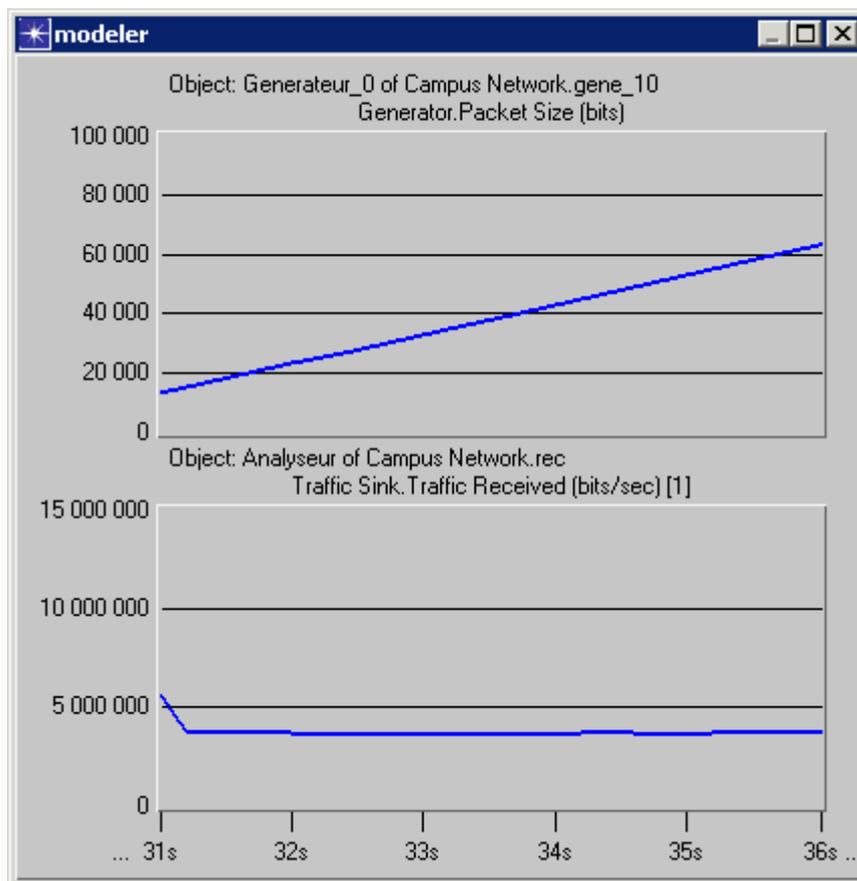


Figure 122 : Résultat donné avec l'utilisation de la fragmentation

On constate sur cette figure que la connexion n'est plus bloquée même si la taille de ses paquets augmente ce qui valide notre hypothèse.

IV-4.4 Mise en place de la QOS sur la voie montante

Sous la norme 802.16, le mécanisme de répartition de la bande sur la voie montante n'est pas imposé ce qui laisse la possibilité d'envisager plusieurs solutions. Mais tout d'abord il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de la norme.

La norme édicte simplement le principe suivant : les SSs ayant des informations dans leurs files d'attente transmettent une requête à la BS. Cette requête contient comme information la taille de la file d'attente correspondant aux connexions en attente de bande. La BS connaît donc l'état de chaque file d'attente de chaque SS mais n'a aucun moyen de savoir la répartition des paquets de chacune d'entre elles. Ainsi pour construire la UL_MAP, elle se

base sur la priorité des connexions correspondantes à ces files d'attente ainsi que sur le mode physique choisi et la taille de cette file d'attente.

De plus la BS alloue de la bande uniquement au niveau des SSs. Suivant les connexions concernées par la requête, elle regarde la priorité de ces connexions et alloue la bande en conséquence à chaque SS. La SS reçoit donc une allocation de bande globale de la part de la BS et doit se débrouiller pour rétablir les priorités.

Dans un premier temps, pour la mise en place de la QOS, nous avons choisi un algorithme au niveau de la BS simple. Chaque trame est divisée par le nombre de connexions actives en allouant une part plus importante de cette trame aux connexions ayant une priorité plus forte. De son côté la SS utilise l'algorithme « Virtual Clock » (annexe 3) pour répartir cette bande entre ses connexions. Le fonctionnement de cet ensemble n'est pas trivial puisque la BS construit son UL_MAP en allouant de la bande aux connexions et la SS ne se sert pas forcément de cette bande comme prévu par la SS. Néanmoins, la figure 123 montre que cela fonctionne puisque les priorités sont respectées entre les connexions. Il y a 4 SS avec 2 connexions chacune. Neuf connexions ont une priorité de 1 et la dixième une priorité de 5 elle a dans notre scénario, le numéro 5.

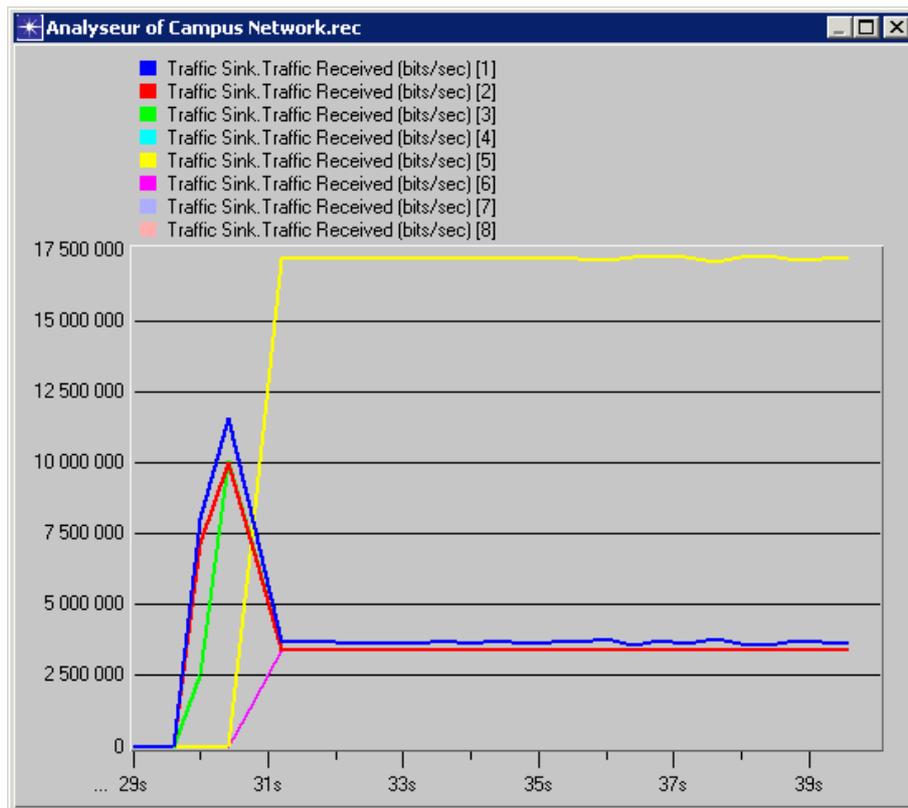


Figure 123 : Trafic reçu par le récepteur pour les huit connexions

Sur la figure 123, nous pouvons constater que la priorité est bien respectée entre les connexions ce qui valide le couplage entre les deux algorithmes (BS et SS) car la connexion 5 a bien 5 fois plus de débit que toutes les autres. Le problème de ce dispositif au niveau de la BS est que lorsqu'il y a un grand nombre de connexions actives, la portion de la trame allouée à chacune d'entre elle devient trop petite même avec l'option de fragmentation activée. Ceci car il faut une taille minimum pour pouvoir, dans le pire des cas, transmettre les entêtes des paquets segmentés.

Le découpage de chaque trame n'est donc plus valide et il a fallu penser à une autre solution. L'implantation d'un algorithme « Virtual Clock » (annexe 3) au niveau de la BS n'est pas possible puisque celle-ci n'a aucune idée de la taille des paquets dans les files d'attente des SSs.

Mais avec l'utilisation de la fragmentation, il est possible de simuler des paquets au niveau de la BS. En effet, si l'on suppose, au niveau de la BS, que tous les paquets sont de la même taille, la BS pourra diviser chaque file d'attente en un nombre de paquets dépendants de cette même taille. De cette manière la BS disposera de paquets virtuels et pourra ainsi faire tourner n'importe quel algorithme de priorité classique (annexe 3).

Etant donné que la taille de ces paquets reste identique, un simple algorithme allouant un nombre de paquets proportionnel à la priorité de la connexion (round robin) semble suffisant.

Les résultats obtenus sont montrés par la figure 124 pour un nombre de connexions égale à 8, avec 4 SSs ayant deux connexions chacune. Une seule connexion a une priorité de 5, les 7 autres ayant une priorité de 1.

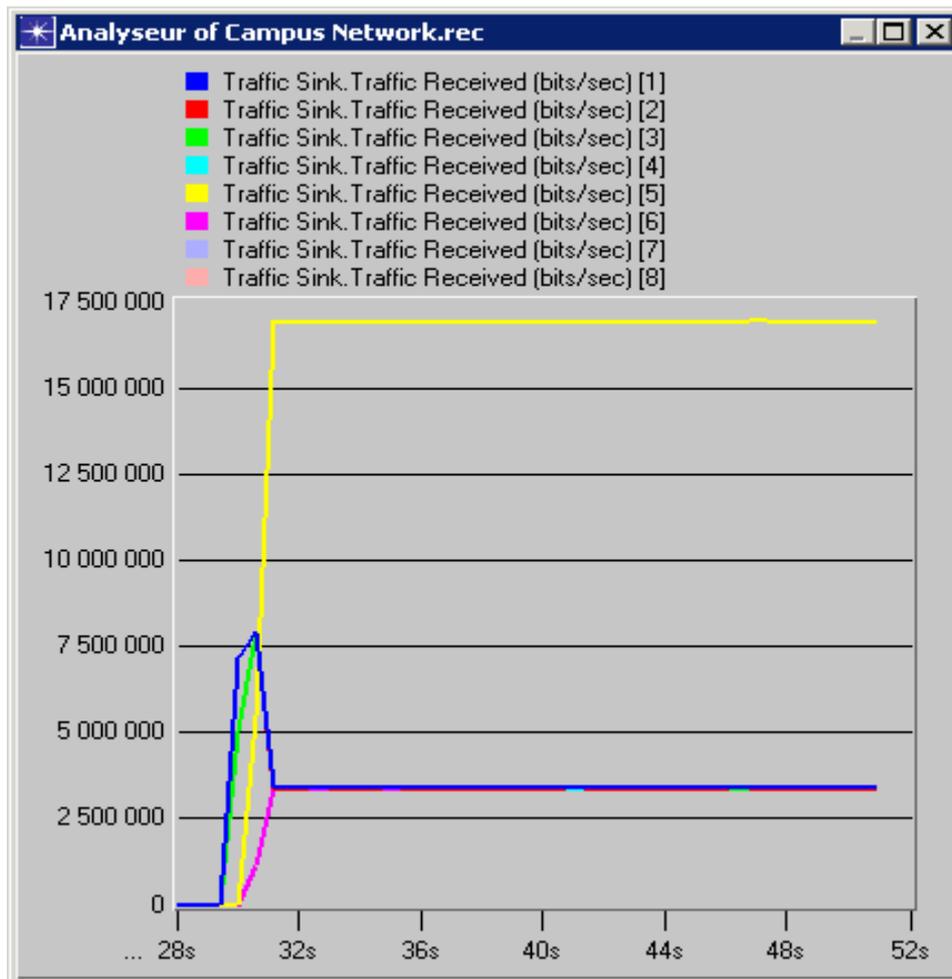


Figure 124 : Trafic reçu par le récepteur pour les huit connexions

On constate que cette méthode fonctionne parfaitement car la priorité entre les connexions est respectée.

Maintenant que nous avons validé le principe, nous allons tester le système avec un grand nombre de connexions (30) afin de voir le comportement de l'algorithme des paquets virtuels.

La configuration du scénario de test est la suivante : 10 SS ayant 3 connexions chacune. Sur ces 30 connexions, 10 ont une priorité de 3 et les autres ont une priorité de 1.

La taille des paquets virtuels est fixée à 1000 bits et toutes les SSs sont connectées sur la modulation QPSK. Les paramètres étudiés sont le débit reçu pour les connexions ainsi que l'écart entre la réception successive de deux paquets. La figure 125 montre les débits reçus pour les deux types de connexion.

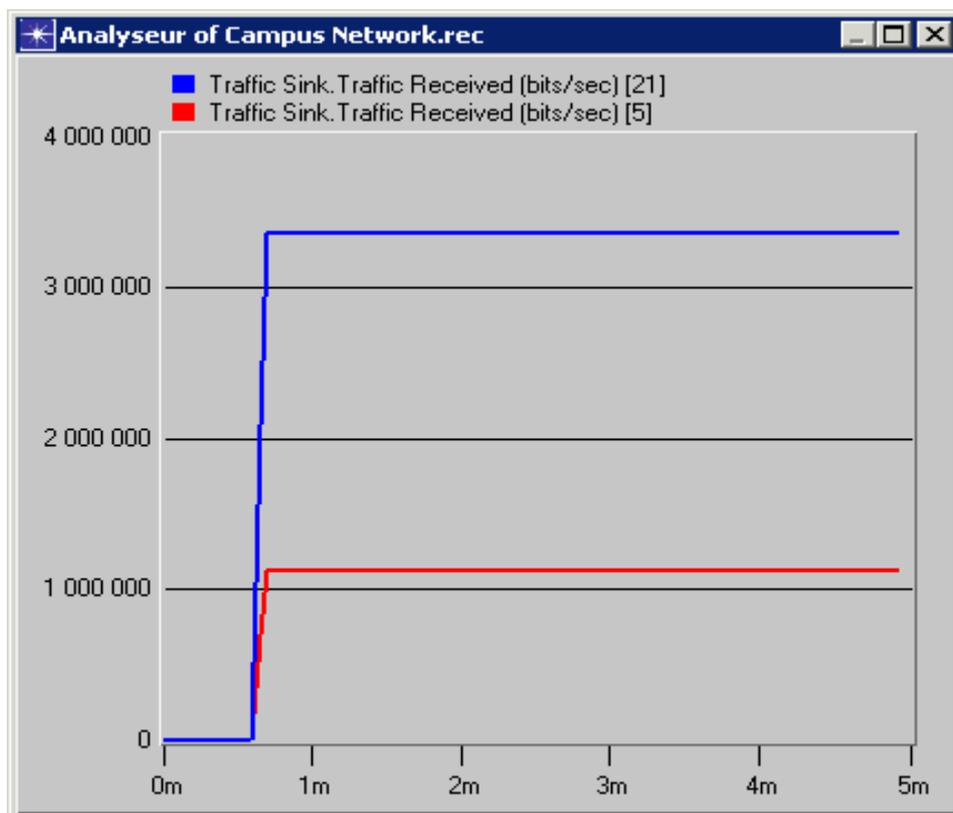


Figure 125 : Débit reçu pour une connexion en priorité 3 et une en priorité 1

On peut constater que le rapport de proportionnalité entre les débits reste valide à savoir que le débit de la connexion ayant une priorité de 3 est bien 3 fois supérieur à celle ayant une priorité de 1. L'algorithme se comporte donc bien malgré le grand nombre de connexions. La figure 126 nous montre le temps intermédiaire entre la réception de deux paquets successifs d'une même connexion.

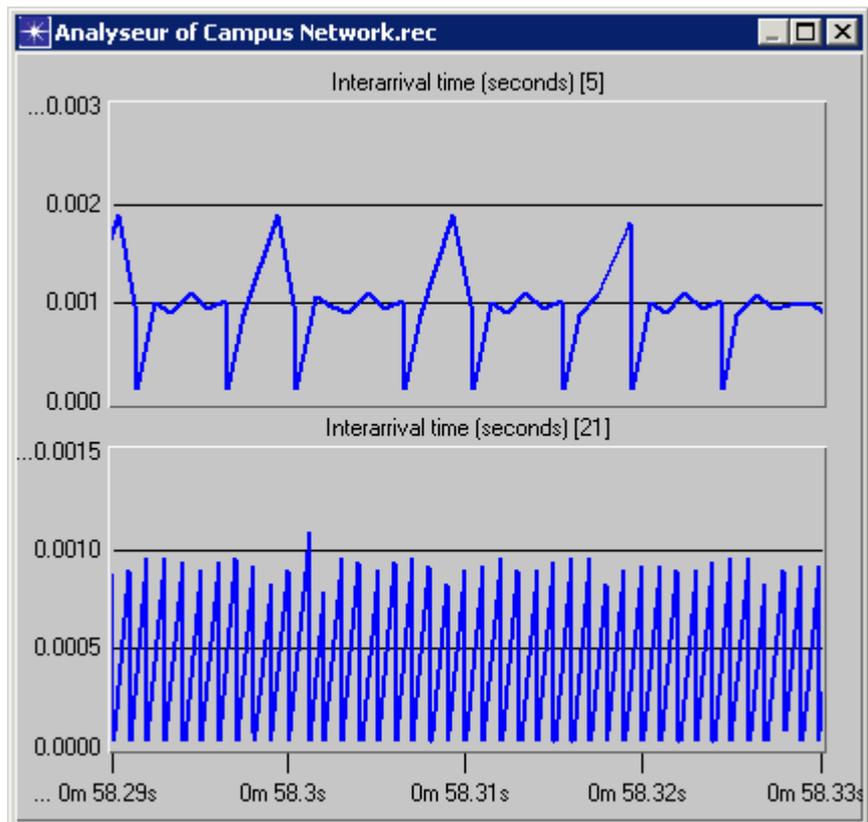


Figure 126 : Temps entre deux paquets reçus pour les deux types de connexions

On constate là aussi que les valeurs restent très bonnes pour les deux types de connexions mais nous supposons qu'elle dépend de la taille choisie pour les paquets virtuels. Pour confirmer cette hypothèse, nous avons élaboré une suite de scénarios : les 30 connexions ont la même priorité et l'on fait varier la taille des paquets virtuels de 1000 à 10000 bits. La figure 127 nous donne les valeurs maxima de ce temps d'inter arrivée entre paquets en fonction de la taille des paquets virtuels.

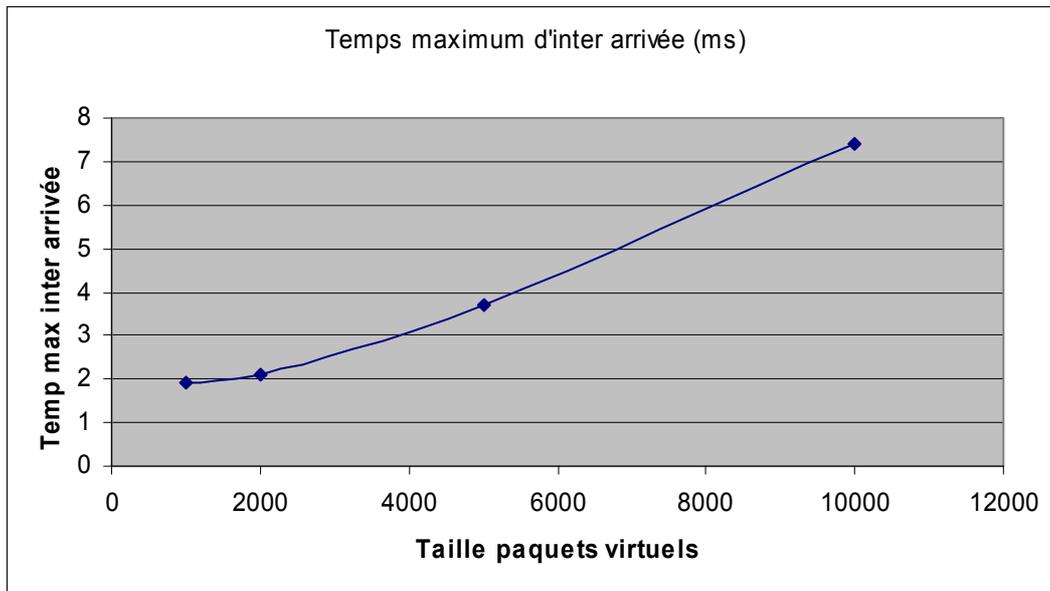


Figure 127 : Temps maximum entre deux paquets successifs

On constate que le temps entre deux paquets successifs augmente avec la taille des paquets virtuels ce qui est tout à fait logique car étant donné que pour faire une boucle qui balaie toutes les connexions, on a besoin de plus de trames de 1 ms. Cette valeur est très importante car pour des applications fonctionnant en temps réel comme la visioconférence ce temps ne doit pas excéder 5 ms

Il est intéressant de regarder le débit pour chaque valeur de la taille des paquets virtuels (figure 128).

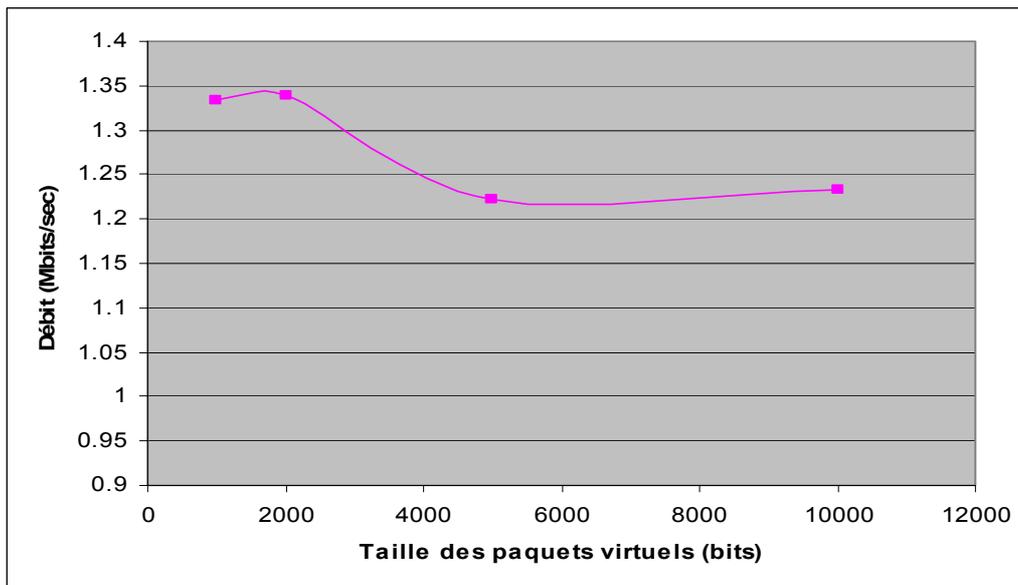


Figure 128 : Evolution du débit en fonction de la taille des paquets virtuels

On peut constater (figure 128) que la valeur du débit pour chaque connexion varie sensiblement en fonction de la taille choisie pour les paquets virtuels. Ceci est dû au taux de remplissage des trames car le nombre de paquets virtuels que l'on peut mettre dans une trame doit être un nombre entier. Si ce n'est pas le cas, le reste est perdu et la bande totale diminue, c'est pour cela que l'on voit une augmentation du débit sur la figure 128.

Il faut donc faire un compromis entre la demande en terme d'opérations par trame, le temps maximum entre deux paquets reçus et le débit perdu dans le reste de la trame. Une valeur semblant satisfaisante est 2000 bits pour laquelle nous avons le débit maximum et un temps d'inter arrivée de 2 ms (pour 30 connexions). Cette valeur est évidemment valable pour un nombre de connexions égal à 30. Un calcul dynamique de la meilleure valeur en fonction de ce nombre semble être approprié (par exemple, plus le nombre de connexions est grand, plus la taille des paquets virtuels doit être petit).

Pour conclure sur la QOS de la voie montante, nous pouvons dire que la complexité pour gérer celle-ci provient du fait que toutes les opérations sont gérées par la BS. De plus, le mode sur lequel tout a été testé est celui qui utilise le duplexage fréquentiel, alors qu'il en existe deux autres que nous allons présenter dans le paragraphe suivant.

IV-4.5 Modes TDD et HFDD

Dans ce paragraphe, nous allons simplement donner des éléments de réflexion sur les modes TDD et HFDD, chacun ayant leurs caractéristiques et impliquant le développement d'algorithmes particulier.

a) Mode TDD

La méthode la plus simple consiste à diviser chaque trame en 2 parties de taille égale ou différente si l'on veut allouer plus de bande sur la voie montante ou descendante.

Dans cette configuration, il n'y a pas de développement supplémentaire par rapport au mode FDD.

La deuxième possibilité consiste à partager la bande de manière dynamique en tenant compte des priorités des connexions. Il faudra gérer les priorités de toutes les connexions (montantes et descendantes) simultanément. Dans ce cas, la BS parcourt toutes les connexions de tous les canaux et alloue la bande en fonction de leurs priorités, ainsi, le partage de chaque trame se fait de manière dynamique tout en respectant la QOS définie.

L'inconvénient de cette méthode réside bien sûr dans le fait que le débit alloué à chaque connexion est diminué par rapport au mode FDD et le nombre de connexions à transmettre devient plus important dans une seule trame ce qui pourra amener à des temps de latence important pour certaines connexions.

L'avantage se trouve être une moindre utilisation de bande fréquentielle puisque les canaux montants et descendants partagent la même bande et la possibilité pour les SSs de ne pas fonctionner en mode « Full Duplex ».

b) Mode HFDD

Le mode HFDD est un compromis entre les modes FDD et TDD c'est-à-dire que chaque canal (montant et descendant) dispose de sa propre bande de fréquence mais les SSs ne fonctionnent pas en « Full Duplex ». Cependant, nous allons voir que ce fonctionnement n'est pas simple et implique un développement particulier.

Le problème réside dans le placement des paquets dans les trames montantes et descendantes vu qu'une SS ne peut pas émettre et recevoir en même temps.

On dispose donc de deux trames pour la voie montante et descendante mais il ne faut pas que deux paquets (montant et descendant) d'une même SS se chevauchent (figure 129). Il faut donc ranger les paquets de manière optimale ce qui nécessite le développement d'un algorithme efficace de classement des paquets.

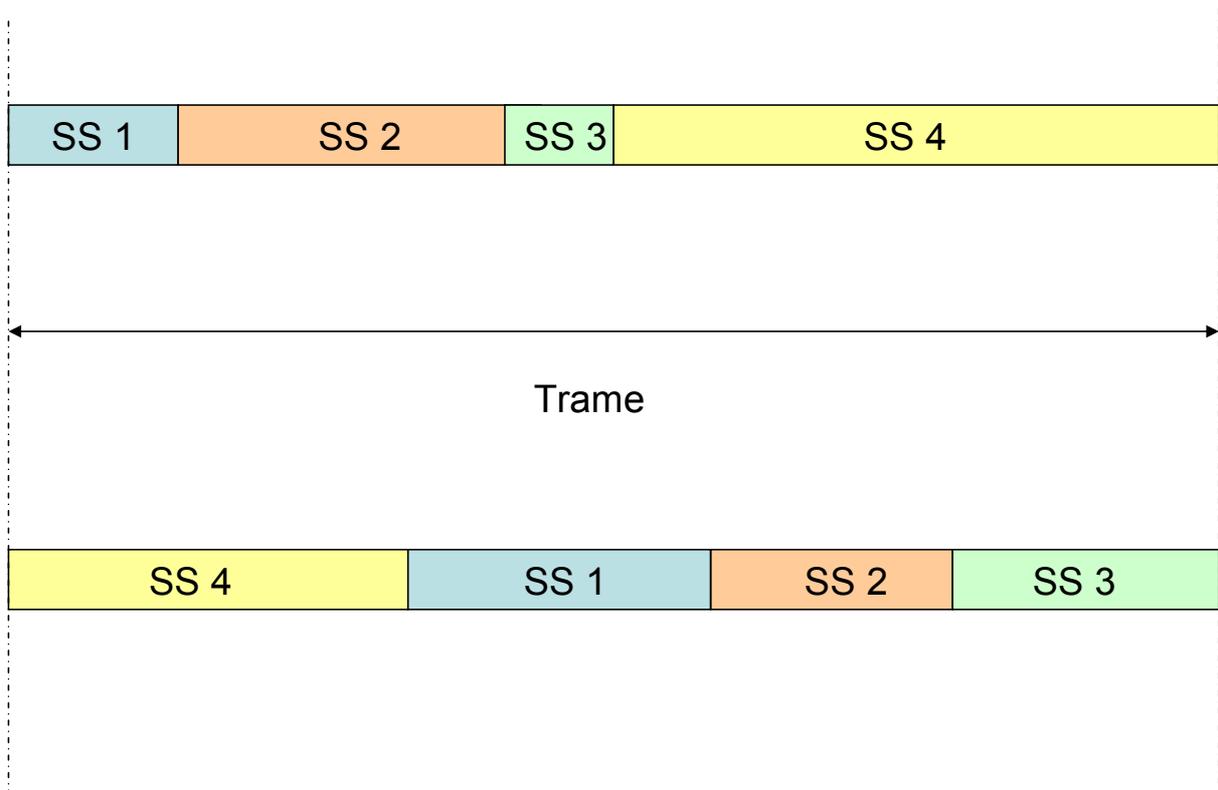


Figure 129 : Exemple de placement des paquets pour quatre SSs en mode HFDD

Comme nous pouvons le constater sur la figure 129, aucune SS ne reçoit ni n'émet simultanément, la répartition des paquets est donc correcte mais il faut garder à l'esprit que ce placement n'est pas trivial et se complique lorsque l'on y rajoute la QOS et que le nombre de SS augmente.

Une première réflexion nous a conduit à simplifier le système en utilisant des paquets de même taille (fragmentation) ce qui facilitera le rangement de ces derniers en tenant compte de la QOS mais là encore il faut implanter la fragmentation dans le protocole de la SS.

IV-4.6 Conclusion sur la norme 802.16

La norme 802.16 permet une grande flexibilité tant au niveau de la QOS qu'au niveau de la symétrie entre les voies montantes et descendantes. Elle a été conçue dans le but de supporter les applications émergentes telles que la visioconférence ou la téléphonie sur IP.

Mais cette flexibilité a un inconvénient majeur : la complexité des logiciels embarqués de la BS et de la SS. En effet, nous avons vu que les trois modes possibles (FDD, TDD, HFDD) impliquent chacun le développement d'algorithmes particuliers. De plus, au niveau de l'électronique, les SSs et la BS devront supporter plusieurs modulations et plusieurs codages ce qui va engendrer un coût supplémentaire de l'équipement.

En dernier lieu, nous pouvons donc dire que les performances d'un système de communication utilisant la norme 802.16 sont directement liées aux choix que va faire le fournisseur d'accès concernant la QOS et les algorithmes associés.

IV-5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié de manière théorique et en simulation la norme DVB utilisée dans la plateforme ERASME. Les résultats obtenus ont été comparés à l'expérimentation et nous avons obtenu un bon accord entre les deux. Un modèle de composant provoquant des dysfonctionnements a été élaboré sous OPNET afin d'obtenir un modèle aussi proche de la réalité que possible. Ce modèle a un champ d'action limité mais satisfait nos exigences pour simuler un trafic de visioconférence. Ces études ont révélé les faiblesses de ce standard c'est pour cela que nous nous sommes tournés vers la norme 802.16.

Cette étude est prospective à savoir qu'il n'existe pas de moyen de comparer les simulations avec des mesures. L'élaboration du modèle OPNET nous a permis de mettre l'accent sur des points essentiels à l'implémentation de la norme. Il nous a permis aussi de tester différents algorithmes de mise en place de la qualité de services et de trouver quelques solutions aux problèmes possibles. Néanmoins nous avons démontré que cette norme est beaucoup plus flexible que la DVB et par conséquent mieux adaptée aux nouvelles demandes en matière de QOS

CONCLUSION GENERALE

Au travers de cette thèse, nous nous sommes attachés à comprendre et modéliser différents systèmes de communication sans fils appliqués au LMDS.

Dans un premier temps il a fallu nous familiariser à la lecture de standards de communication numériques et en particulier à ceux définissant les couches MAC. En effet la terminologie utilisée dans ces derniers est très spécifique et relativement complexe pour les lecteurs non initiés. Une fois accoutumés, il a fallu prendre en main le logiciel de simulation de réseaux OPNET présenté dans le chapitre II.

Cette présentation décrit le fonctionnement général du programme et rentre progressivement dans les détails pour expliquer les travaux sur le couplage. Ces travaux ont été réalisés dans le but d'inclure, dans les simulations réseaux sans fil, une modélisation de la propagation électromagnétique en milieu urbain, celle-ci étant très importante pour dimensionner les systèmes sans fil en terme de portée, de SNR et donc du TEB.

Ce couplage a conduit à intégrer les diagrammes de rayonnement puisque il est inconcevable de modéliser un canal de propagation sans connaître les gains des antennes d'émission et de réception. Pour cela, nous avons utilisé une méthode d'interpolation afin de pouvoir intégrer n'importe quelle antenne en connaissant uniquement ses plans E et H.

Afin de mieux exprimer l'utilité du logiciel OPNET, nous avons établi un modèle d'un système simple de communication appelé CESALE. Nous montrons ainsi le potentiel d'OPNET en matière de dimensionnement puisqu'une règle a été établie en fonction des performances voulues et du nombre d'émetteurs sur le même système.

Le troisième chapitre se consacre à l'analyse des standards DVB EN 301 199 et 802.16 en profondeur. Nous y reprenons l'architecture générale des documents tout en simplifiant et en mettant l'accent sur les points essentiels relatifs aux performances de systèmes basés sur ces normes.

Puis, ce manuscrit se termine par l'élaboration des modèles pendant à ces normes afin de prévoir leur comportement ce qui est impossible à faire de manière précise de manière analytique.

L'étude de la norme DVB EN 301 199 sous OPNET montre ses limites en terme de qualité de service puisque les voies montantes et descendantes sont asymétriques ce qui est inadapté aux applications multimédia de plus en plus répandues comme la visioconférence ou la téléphonie sur IP.

La plateforme ERASME décrite dans le chapitre IV s'appuyant sur la norme DVB, nous avons pu comparer les simulations avec les mesures. La comparaison n'étant pas concluante, il est apparu qu'un défaut sur le matériel abonné était responsable des fluctuations. Ce défaut provient d'un composant appelé DATAPUMP que nous avons tout naturellement tenté de modéliser sous OPNET.

C'est là que sont apparues les limites d'OPNET puisque nous avons eu beaucoup de difficulté à reproduire le phénomène rencontré à cause de la granularité du logiciel. Nous n'avons donc pu uniquement régler le modèle de manière à ce que les résultats entre les simulations et les mesures coïncident.

Nous avons ainsi obtenu un modèle proche de la réalité et possédons un outil efficace pour dimensionner un réseau basé sur le matériel de la plateforme.

Ayant démontré les limites de la norme DVB, nous nous sommes tournés vers la norme 802.16 qui se trouve être mieux adaptée aux exigences naissantes en matière de QOS.

Au travers de cette étude, nous avons mis l'accent sur les limites et les points délicats de ce standard et notamment la nécessité de l'option de fragmentation coté SS. Nous avons ensuite démontré que la fragmentation permet d'avoir une plus grande souplesse pour l'implémentation d'algorithmes de QOS dans la norme 802.16

Les perspectives de recherche sont dans un premier temps la découverte des performances de la norme 802.16 en mode TDD et HFDD, puis de découvrir d'autres normes pour la couche MAC et analyser leurs performances dans des cas particuliers. Par la suite, une participation à l'élaboration de nouveaux standard en s'inscrivant à des « working groups » ou bien mise en place de protocoles propriétaires adaptés aux nouveaux systèmes de communication comme l'ULB pourraient être envisagées.

Un axe de recherche intéressant serait aussi de parvenir à coupler un logiciel de simulation de réseau avec un logiciel de traitement du signal afin d'obtenir des valeurs précises et dynamiques du SNR et donc du TEB. Nous aurions ainsi un outil complet pour simuler les performances de n'importe quel réseau de communication numérique.

ANNEXES

ANNEXE 1

Description des modules radio OPNET

La procédure de simulation de la couche physique sous OPNET se déroule en 14 étapes appelées « Pipeline Stage » et est invoquée à chaque paire émetteur / récepteur.

La figure 130 montre la séquence suivie par cette procédure.

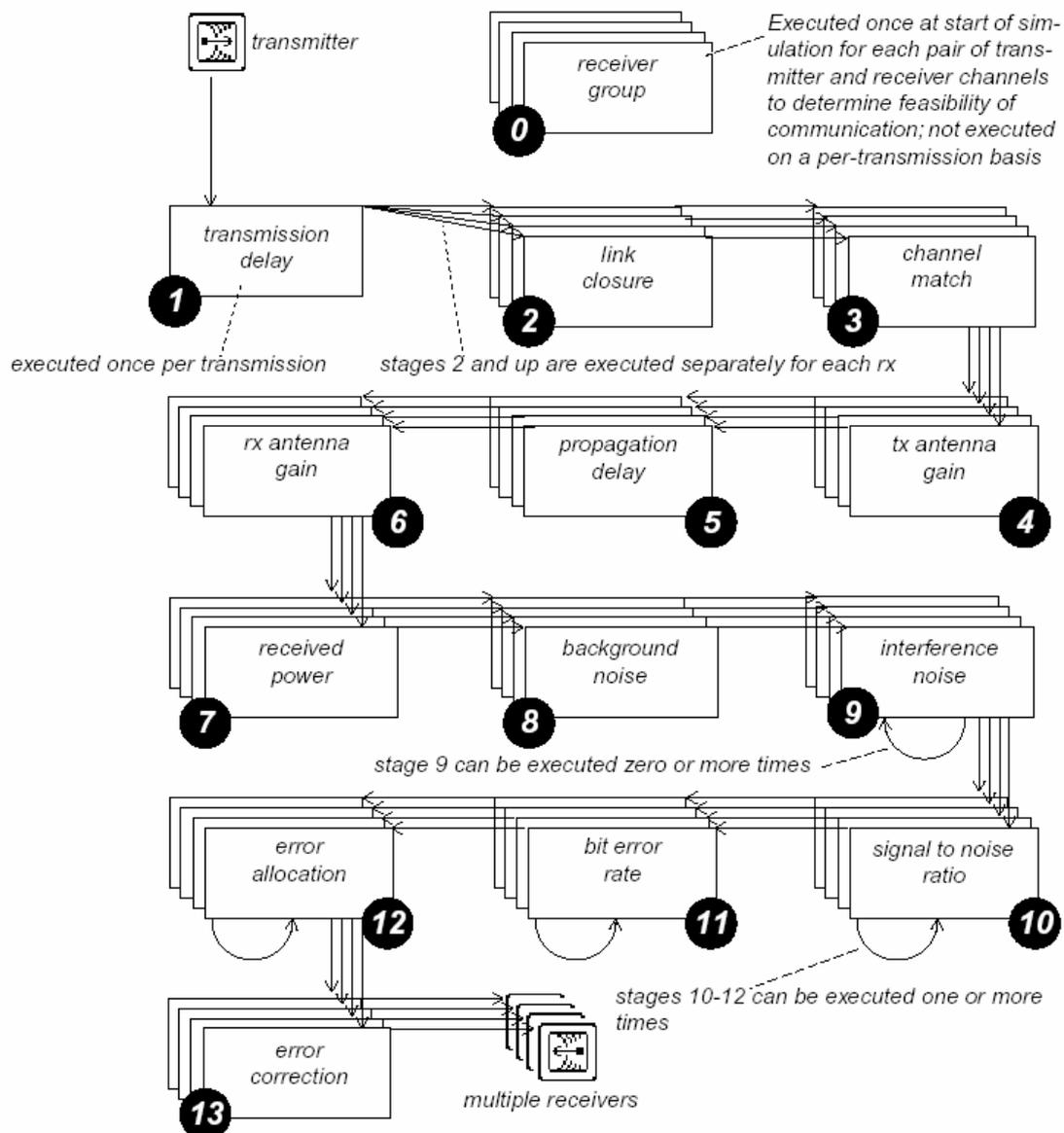


Figure 130 : Procédure d'exécution de la couche physique.

- Le but de l'étape 0 (Receiver Group) est de créer un premier groupe de récepteur pour chaque canal d'émetteur. Le noyau de simulation vérifie chaque paire possible de canal d'émetteur-récepteur, et crée un groupe de récepteur pour chaque canal d'émetteur.
- L'étape 1 (transmission Delay) est appelée pour calculer le temps nécessaire pour la transmission d'un paquet entier. Ce résultat est la différence de temps entre le commencement de la transmission et la fin de la transmission du paquet. La procédure se base sur la taille des paquets et le débit de la chaîne.
- Le but de l'étape 2 (Closure) n'est pas de déterminer si une transmission est valide ou appropriée pour un canal particulier, mais seulement si le signal transmis peut physiquement atteindre le canal de récepteur et l'affecter de quelque façon. Généralement, les calculs exécutés par cette étape sont basés la plupart du temps sur des considérations physiques, telles que l'occlusion par des obstacles et/ou la surface de la terre.
- Le but de troisième étape est de classifier la transmission en ce qui concerne le canal de récepteur. Le noyau de simulation regarde si les caractéristiques de l'émetteur et du récepteur sont compatibles à savoir la modulation, la bande de fréquence, etc...
- Comme son nom l'indique, l'étape 4 (TX Antenna Gain) calcule le gain donné par l'antenne d'émission en fonction du diagramme de cette dernière et de la position relative de l'émetteur et du récepteur.
- L'étape 5 calcule simplement le temps de propagation entre l'émetteur et le récepteur.
- L'étape 6 fait les mêmes calculs que l'étape 4 mais pour le module de réception.

-
- La 7^{ème} étape calcule la puissance reçue par le récepteur en fonction des gains calculés dans les étapes précédentes et de la distance entre les deux modules radio. A noter que c'est ce module que nous avons modifié pour y introduire le logiciel de propagation.
 - Les 8^{ème} et 9^{ème} étapes réalisent les calculs concernant la puissance de bruit que ce soit du bruit thermique des récepteurs ou bien des interférences d'autres canaux.
 - La 10^{ème} étape calcule le rapport signal à bruit et la 11^{ème} le taux d'erreur binaire en fonction du SNR et de la modulation choisie.
 - Des erreurs sont dispensées dans les paquets aléatoirement en fonction du TEB dans l'étape 12.
 - L'étape 13 joue le rôle de correcteur d'erreur puisqu'il choisi à partir de quel taux d'erreur un paquet doit être éliminé.

ANNEXE 2

Organigramme de la procédure de calibration d'une NIU.

Ce schéma est celui que l'on peut retrouver dans le document du standard DVN EN 301 199. Il décrit la procédure qu'une NIU doit suivre pour pouvoir se connecter à l'INA.

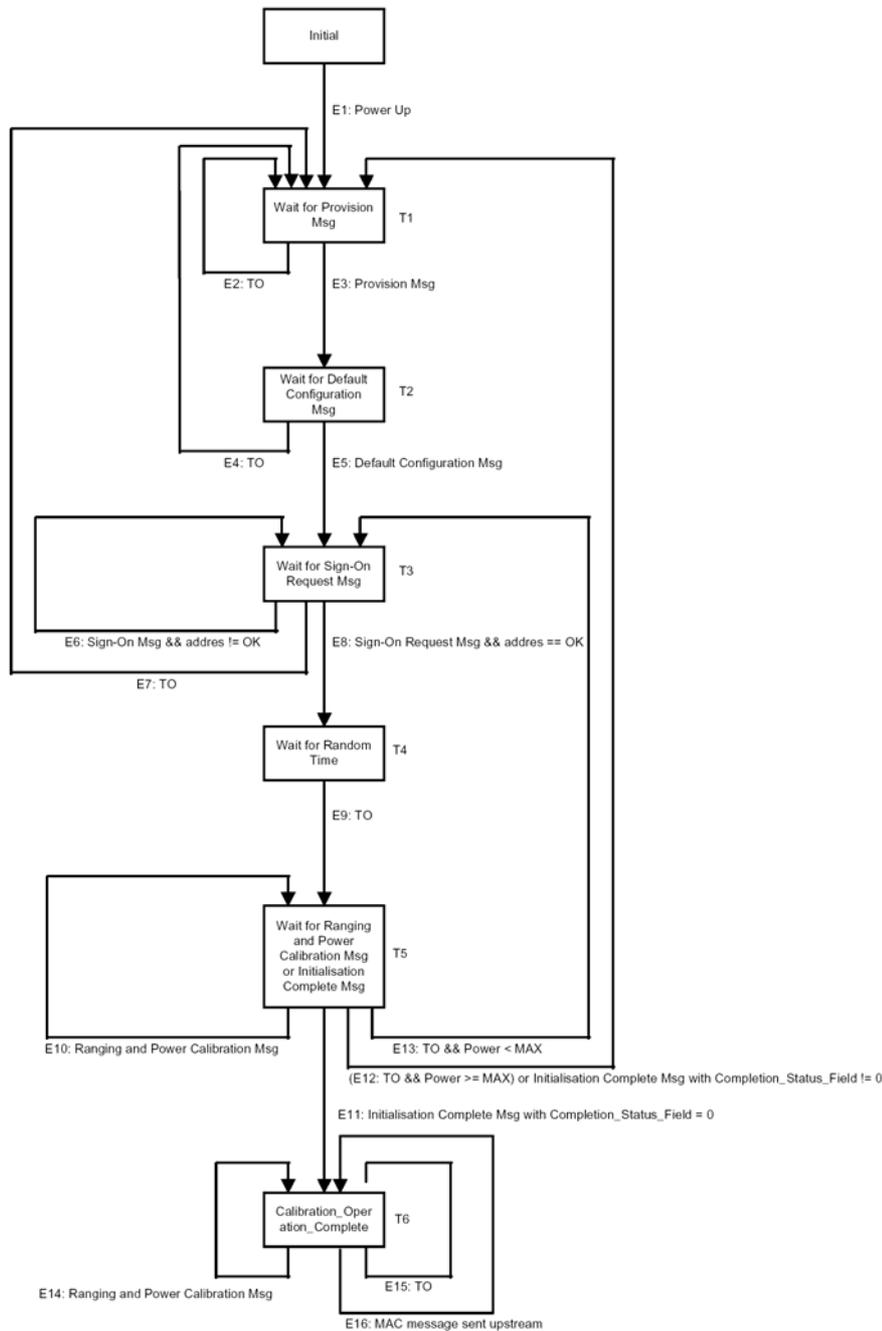


Figure 131 : organigramme de la procédure de calibration d'une NIU

Modèle de la NIU sous OPNET

Nœud NIU : La figure ci-dessous montre l'architecture du nœud NIU sous OPNET avec la DATAPUMP, les mémoires tampon, la couche MAC DVB, le contrôleur Ethernet, les transmetteurs radio et l'antenne.

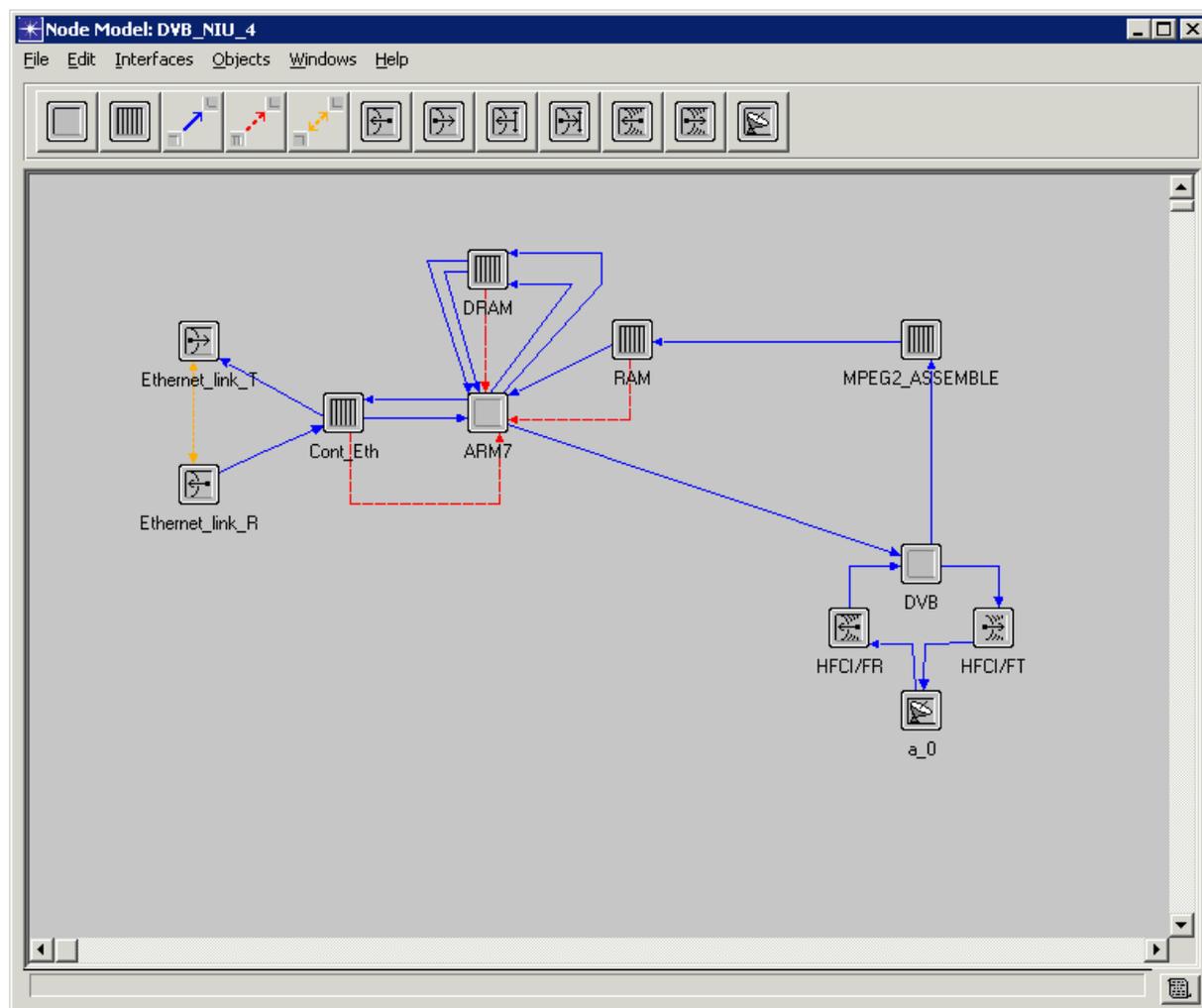


Figure 132 : Schéma du modèle de la NIU sous OPNET

Diagramme d'état de la couche MAC DVB : On retrouve ici le diagramme d'état de la couche MAC DVB programmée sous OPNET.

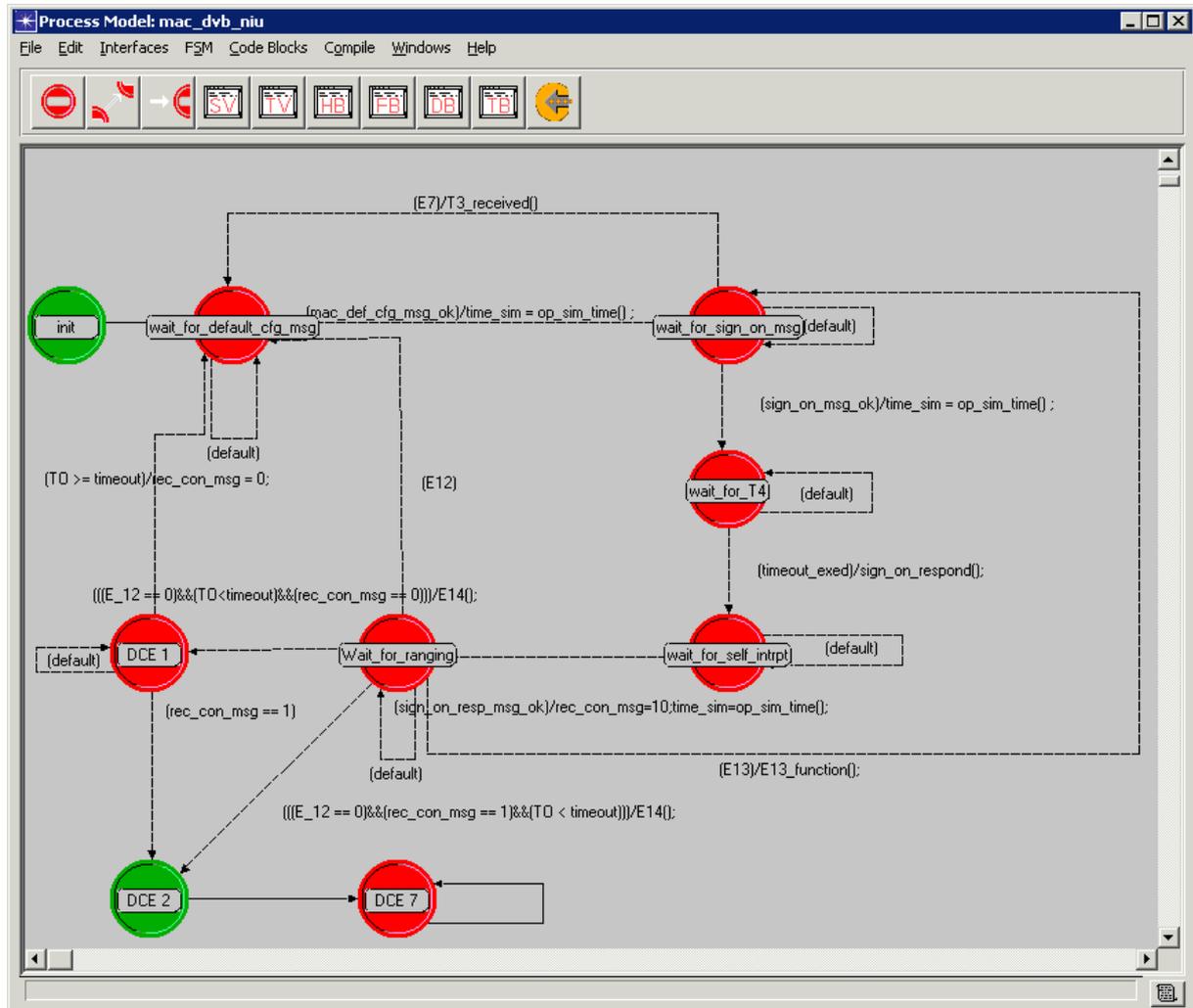


Figure 133 : Diagramme d'état de la couche MAC DVB coté NIU

Modèle de l'INA sous OPNET

Nœud INA : On voit sur cette figure le modèle de nœud de l'INA programmé sous OPNET avec les modules MAC DVB, les modules de fragmentation MPEG2 et ATM, le récepteur et émetteur radio et l'antenne d'émission.

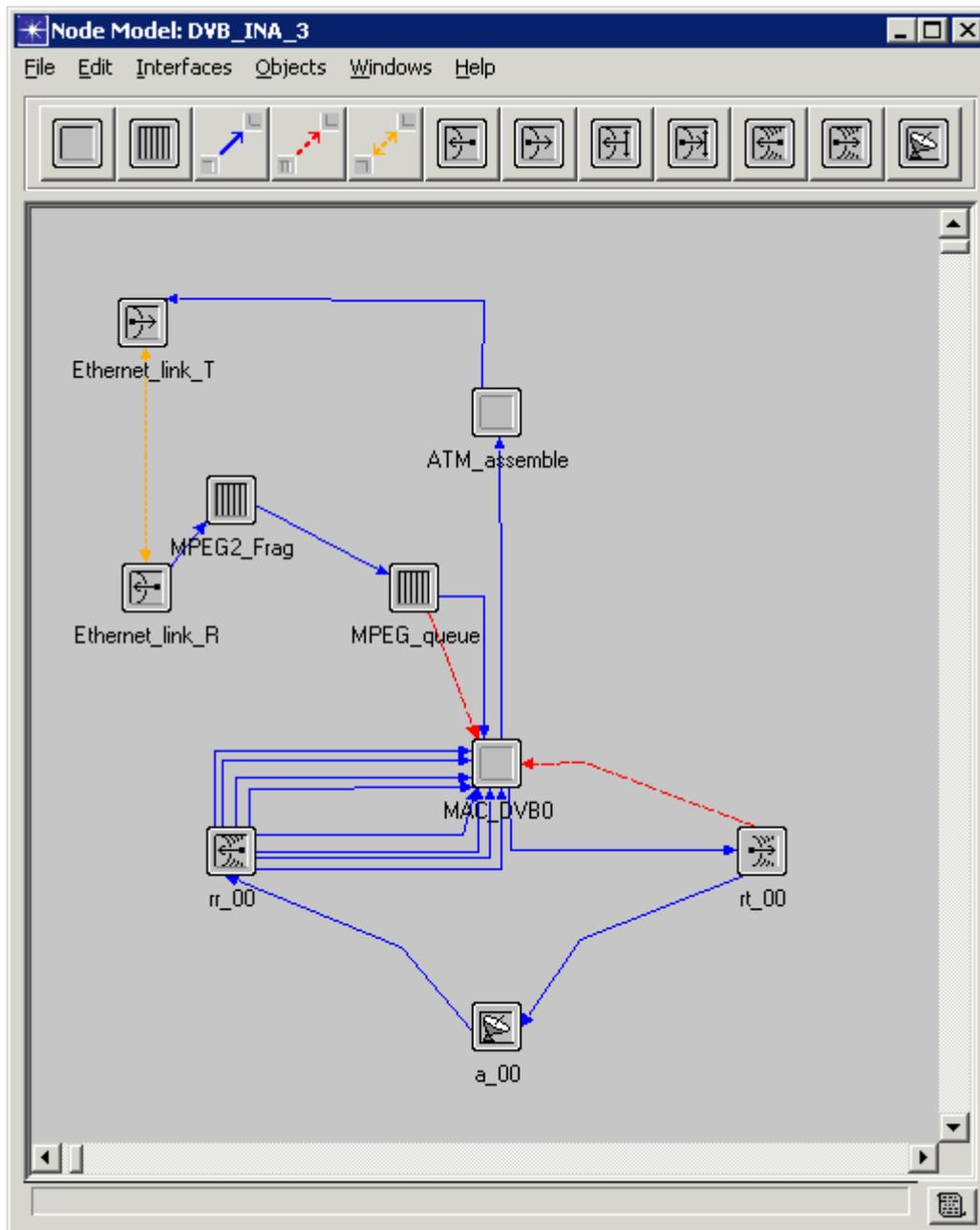


Figure 134 : Schéma du modèle de l'INA sous OPNET

Diagramme d'état de la couche MAC DVB

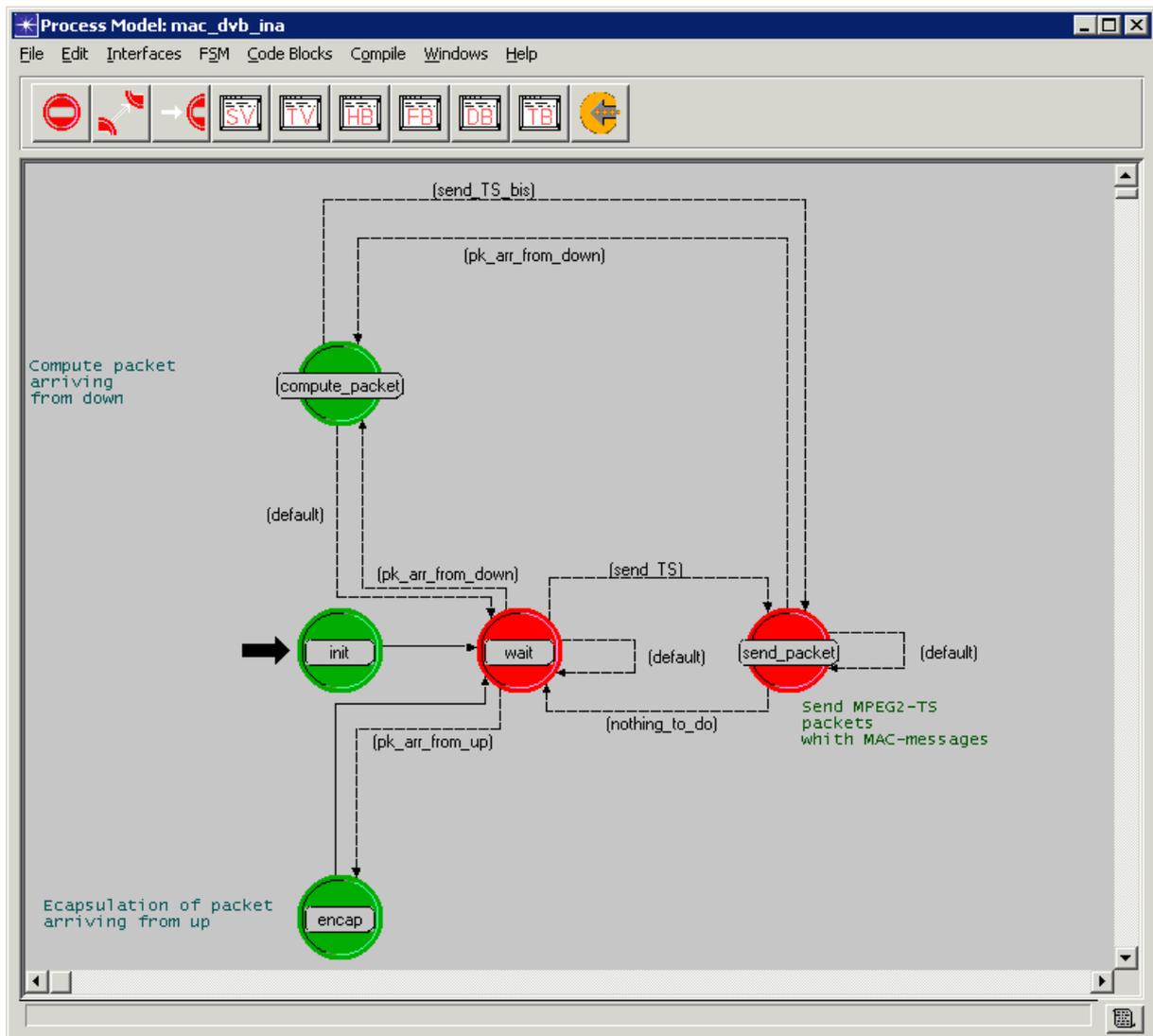
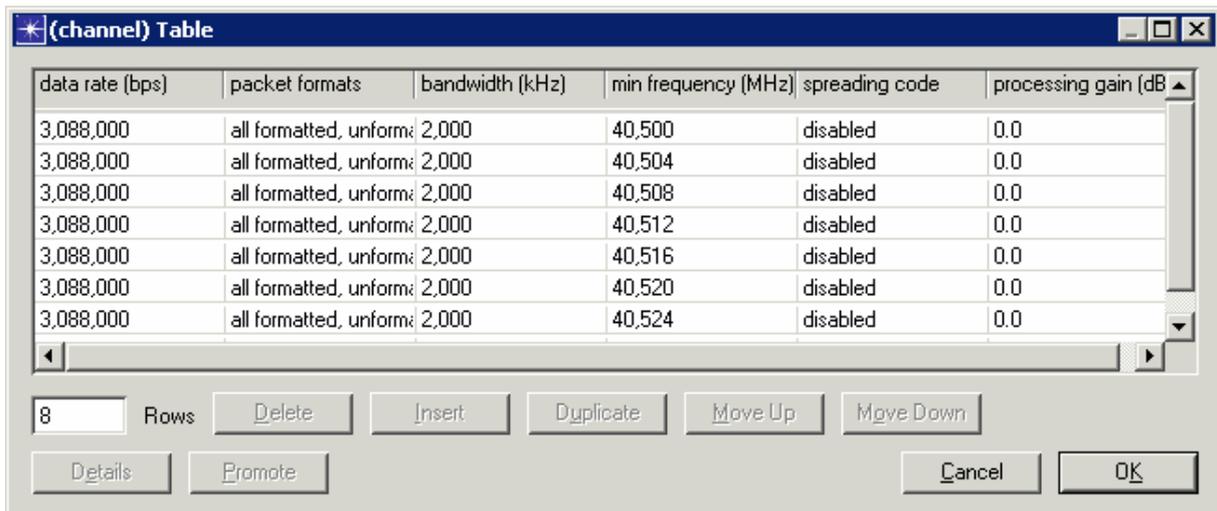


Figure 135 : Diagramme d'état de la couche MAC DVB

Paramètres de la couche physique d'OPNET pour les simulations ERASME pour la voie montante. On constate que le débit de 3.088 Mbits/sec est respecté ainsi que le nombre de canaux de 2 MHz au nombre de 8.

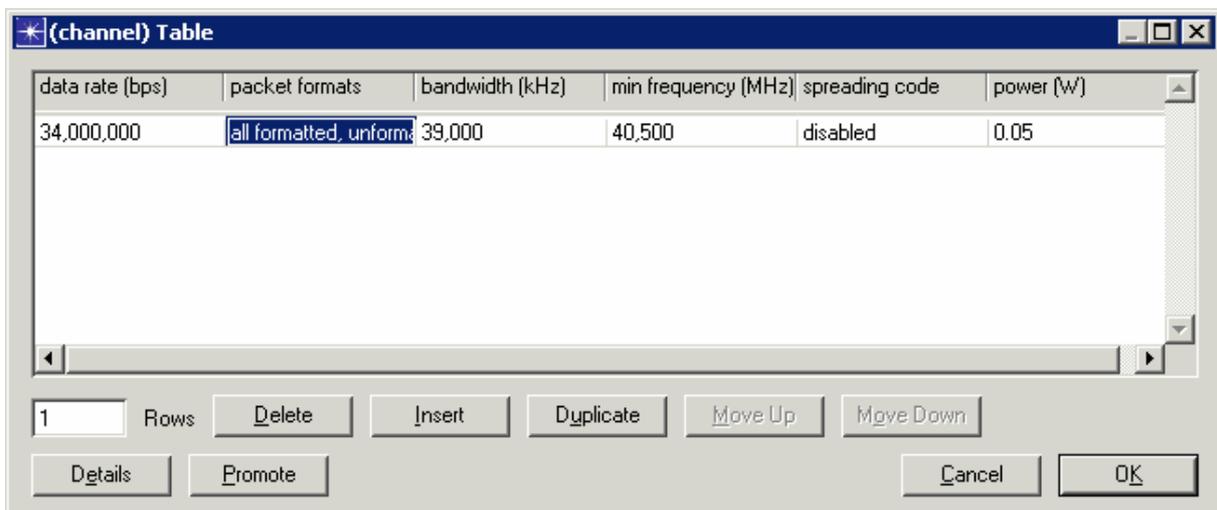


data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	processing gain (dB)
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,500	disabled	0.0
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,504	disabled	0.0
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,508	disabled	0.0
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,512	disabled	0.0
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,516	disabled	0.0
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,520	disabled	0.0
3,088,000	all formatted, unform	2,000	40,524	disabled	0.0

8 Rows

Figure 136 : Paramètres de la couche physique de la voie montante pour les simulations ERASME.

Paramètres de la couche physique d'OPNET pour les simulations ERASME pour la voie descendante. Le débit descendant est de 34 Mbits/sec comme dans la plateforme ERASME.



data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)
34,000,000	all formatted, unform	39,000	40,500	disabled	0.05

1 Rows

Figure 137 : Paramètres de la couche physique pour les simulations ERASME pour la voie descendante.

Ici, nous voyons l'organigramme décrivant l'algorithme de gestion des collisions de la norme DVB EN 301 199 en mode contention.

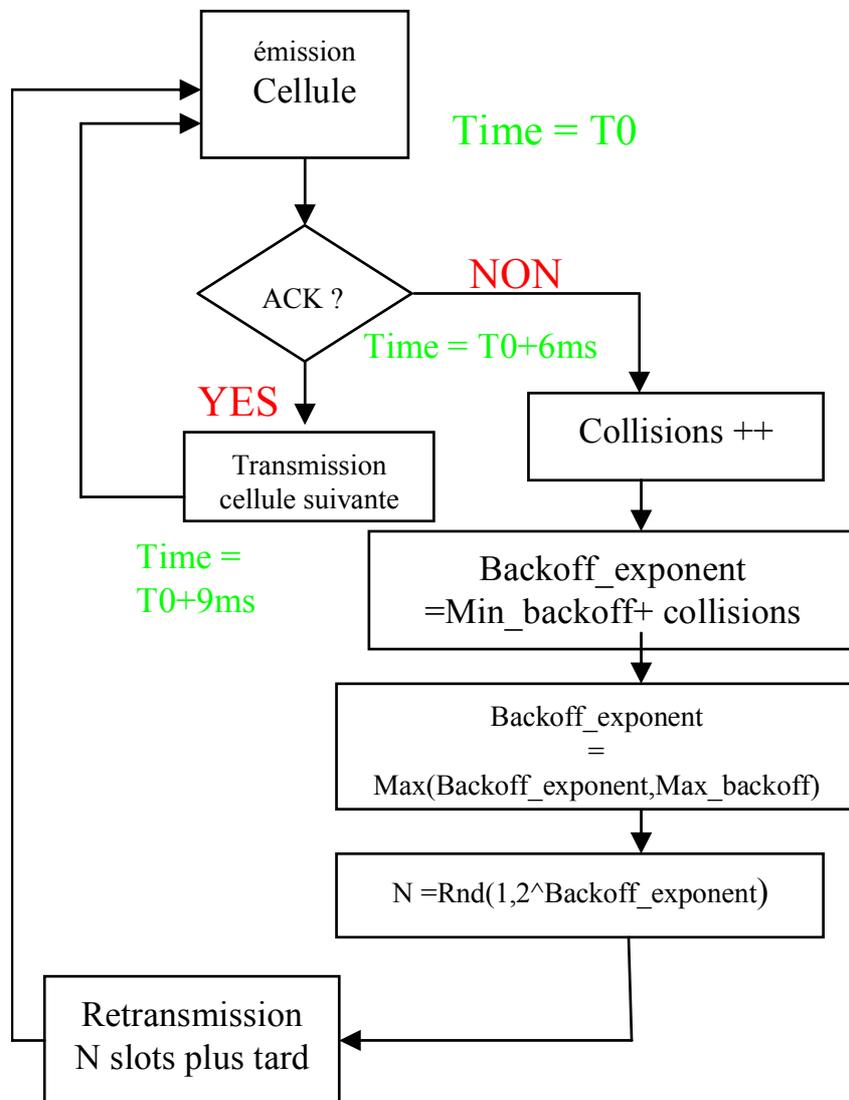


Figure 138 : algorithme de gestion des collisions

La figure suivante illustre le réseau complet utilisé dans la plateforme ERASME. Néanmoins, il peut être sujet à des modifications mineures depuis la rédaction de ce mémoire.

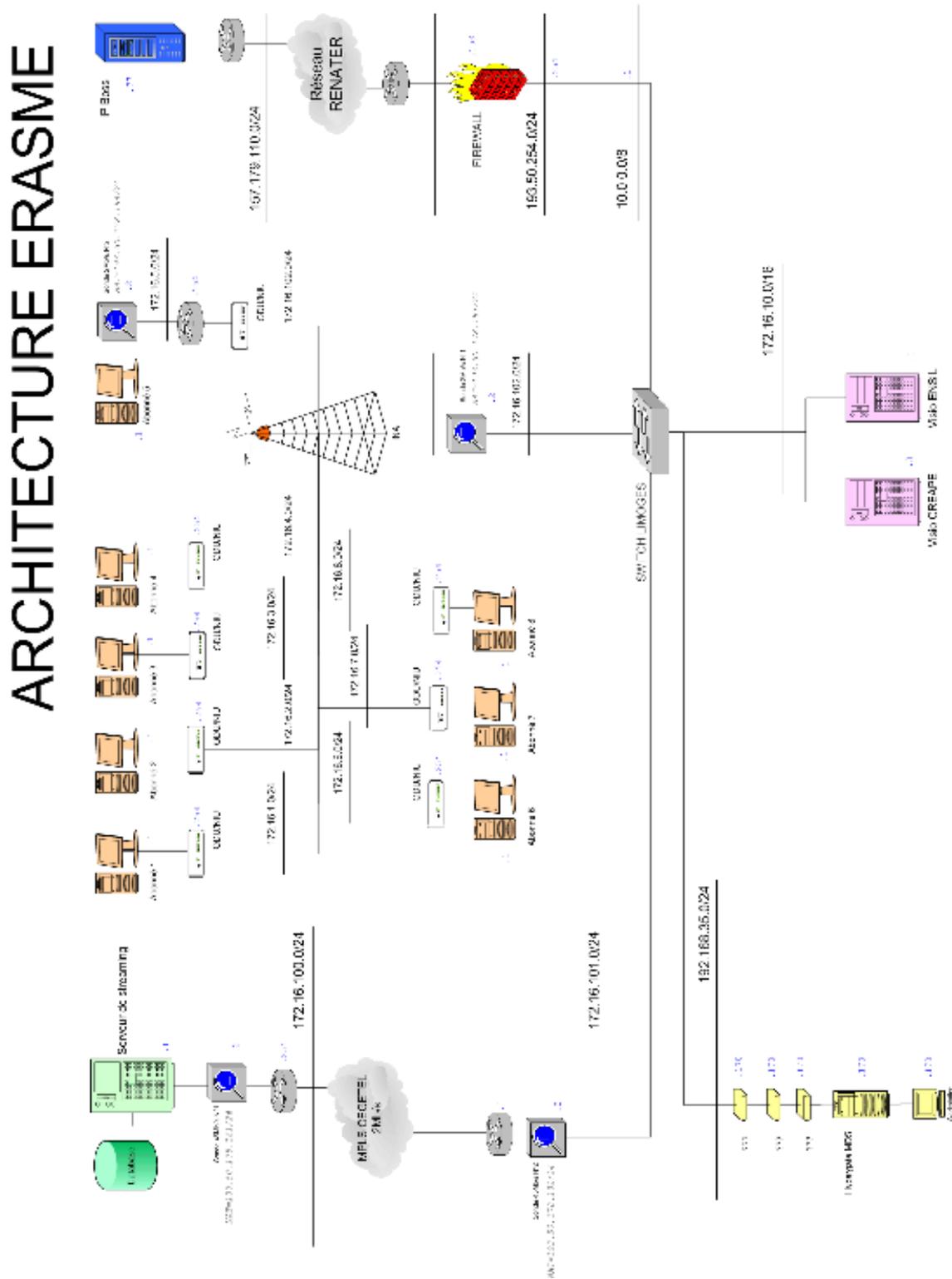


Figure 139 : Architecture ERASME

Cette figure montre le diagramme d'état OPNET de la DATAPUMP. On peut y voir les quatre taches décrites dans le chapitre III.

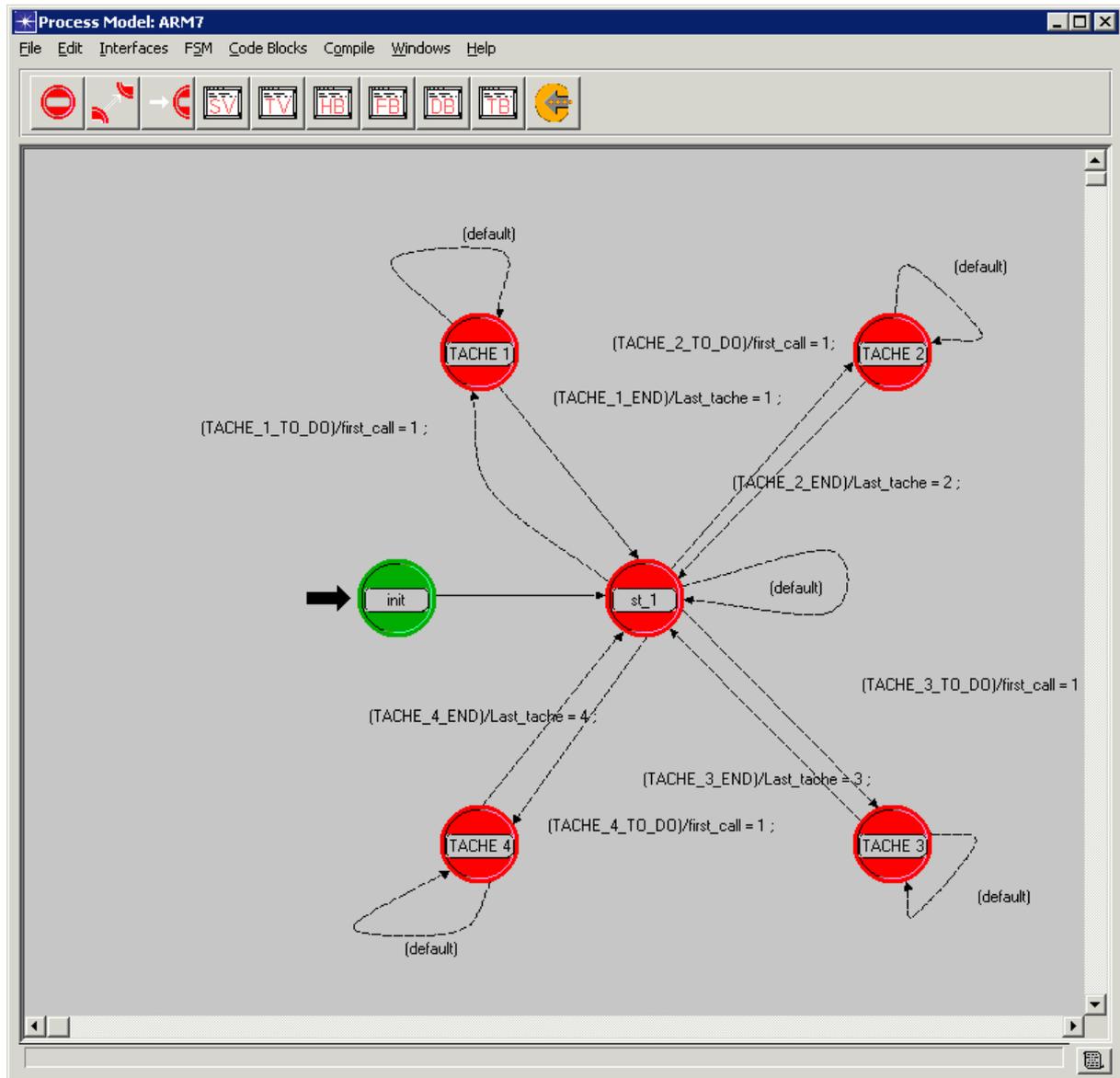


Figure 140 : Diagramme d'état de la DATAPUMP sous OPNET

Le modèle de nœud OPNET de la SS est illustré par la figure suivante. On y retrouve tous les modules nécessaires à une modélisation fidèle de la norme 802.16.

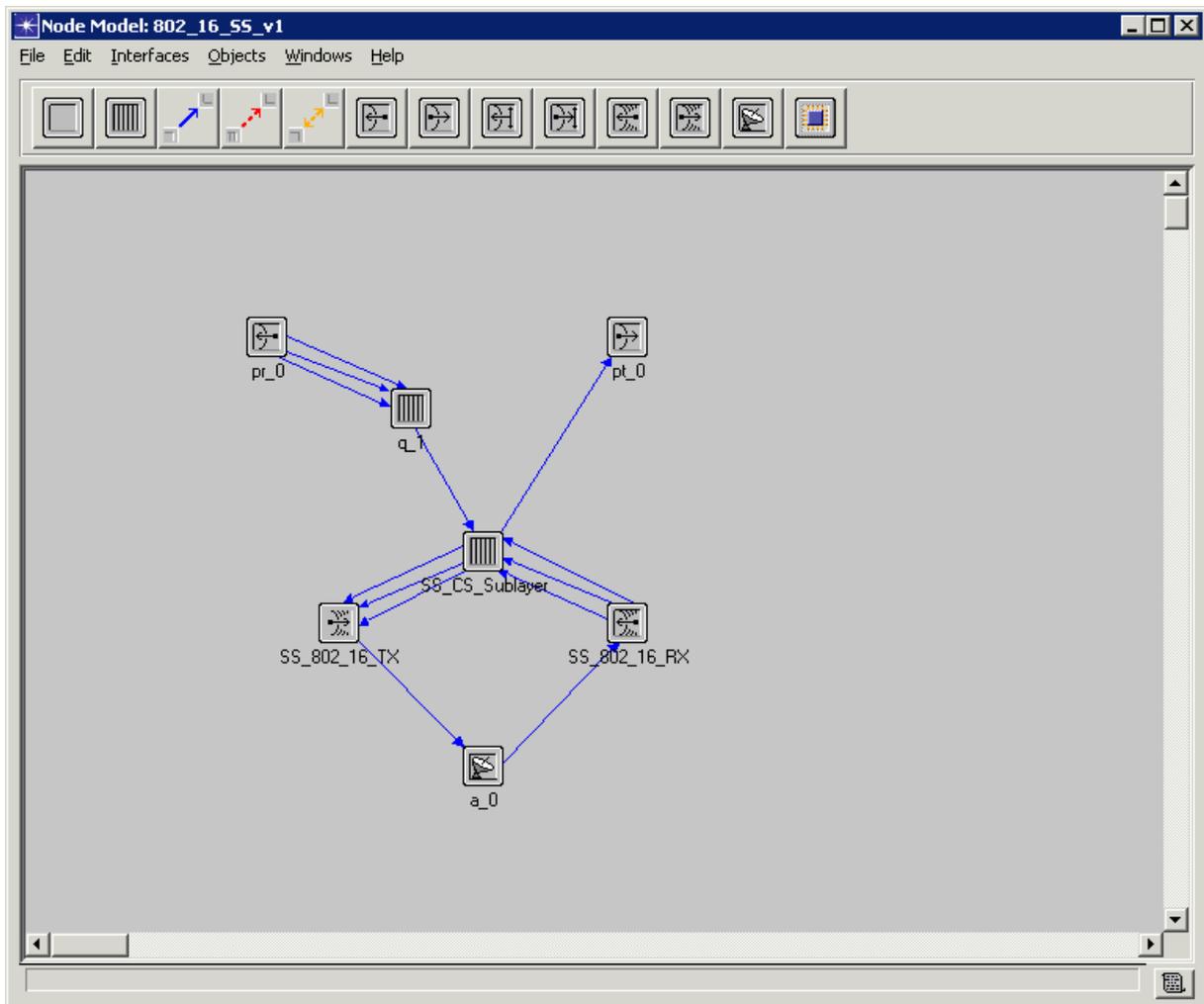


Figure 141 : Modèle de nœud OPNET de la SS

Le diagramme d'état de la SS suivant peut paraître simple mais la cause est que nous avons créé plusieurs processus imbriqués les uns dans les autres.

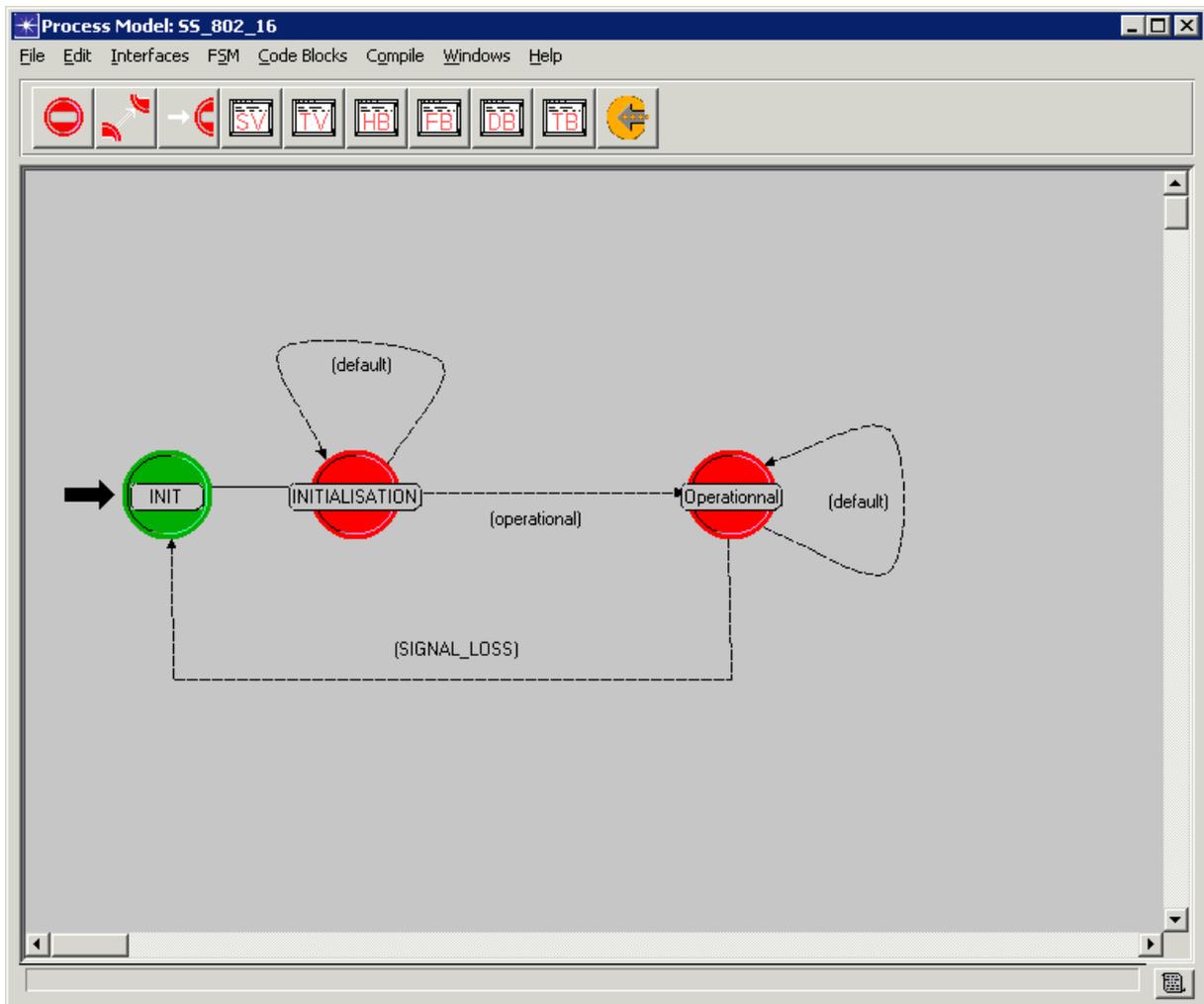


Figure 142 : Diagramme d'état de la SS

Le nœud OPNET de la BS comprend les deux couches CS et CPS sublayers.

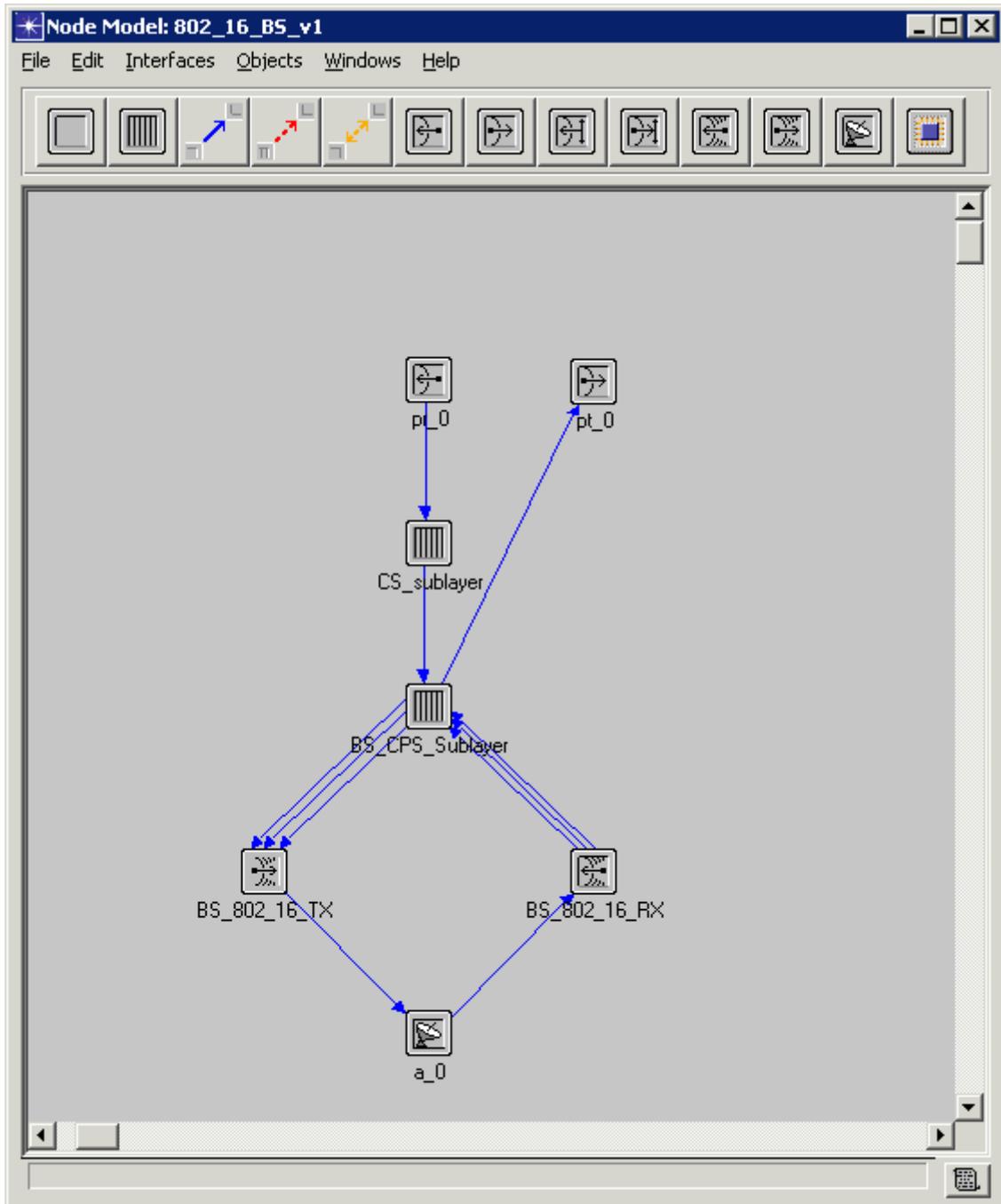


Figure 143 : Nœud OPNET de la BS

Ici nous présentons le diagramme d'état de la BS qui lui aussi est basé sur un système de processus imbriqués.

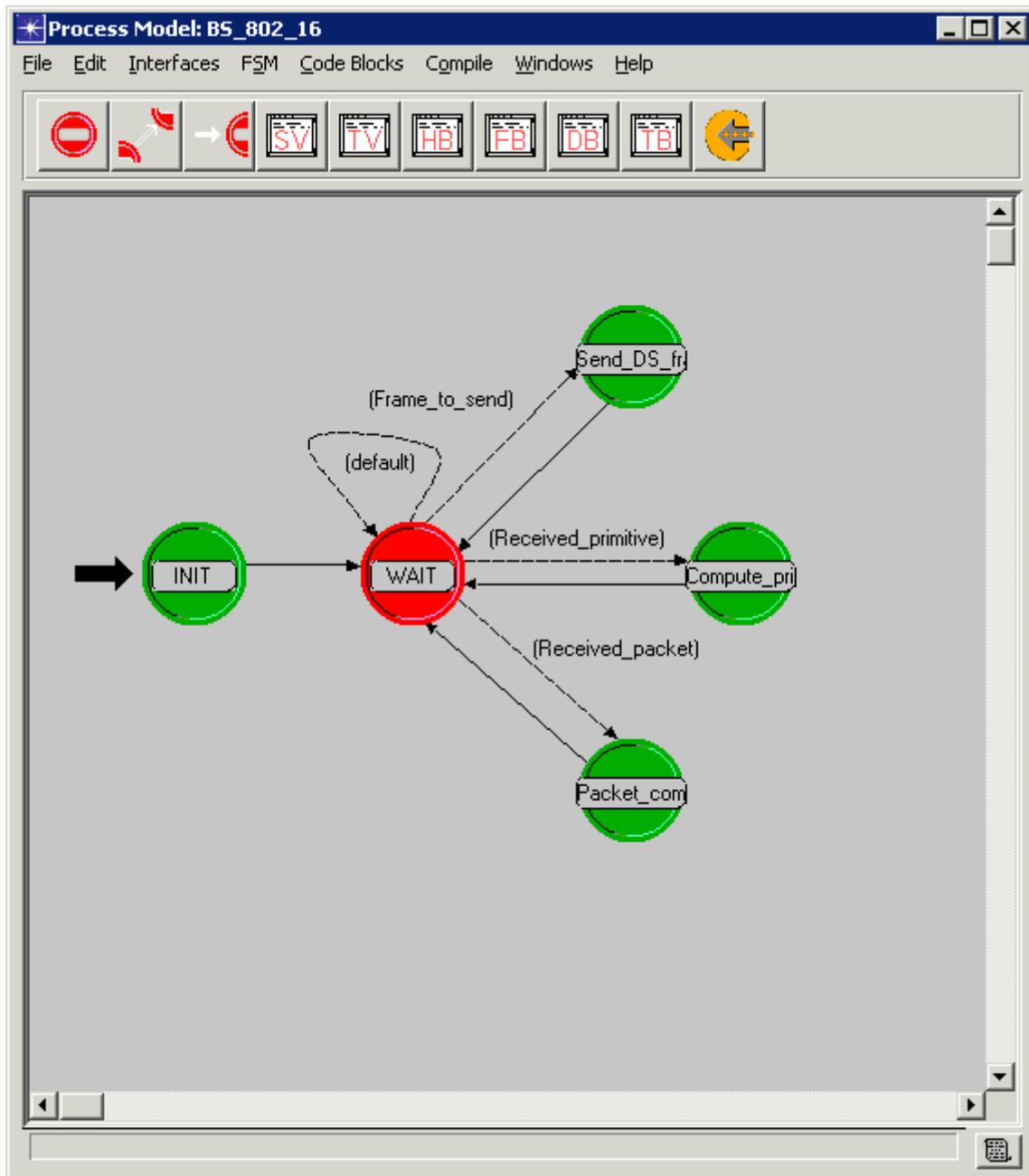


Figure 144 : Diagramme d'état de la BS

ANNEXE 3

Dans cette partie, nous faisons un survol de différentes manières d'implémenter la qualité de service au travers de différents algorithmes de distribution de paquets (packet scheduling).

Principe de base :

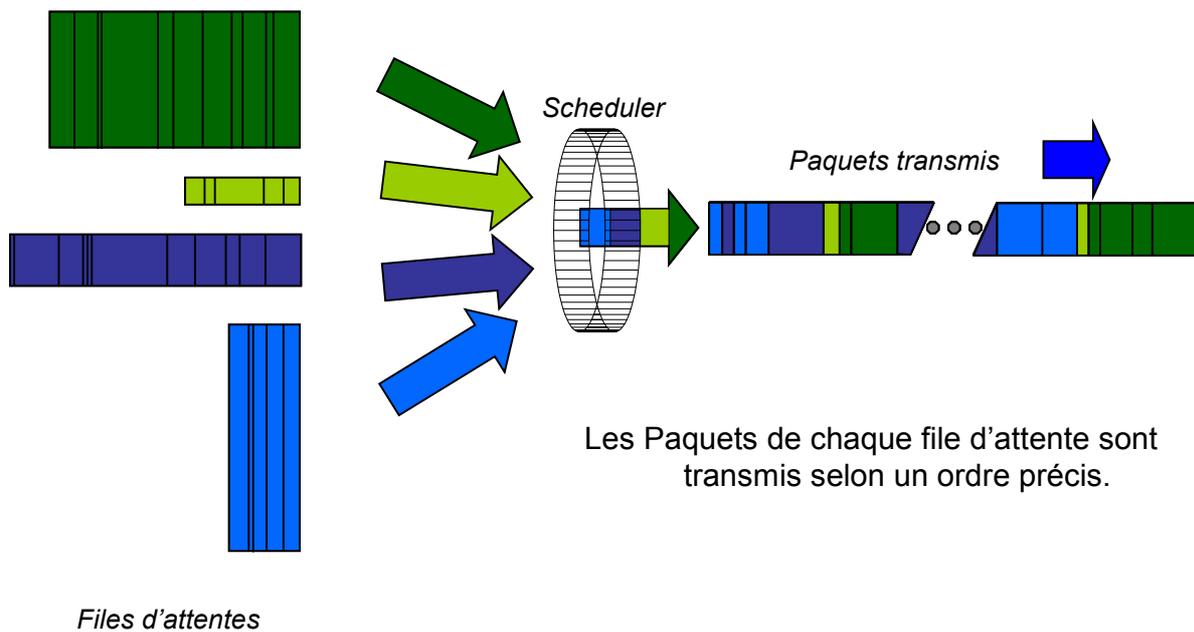


Figure 145 : principe de base de la distribution de paquets

First-Come, First-Served (FCFS)

Principe :

Le principe utilisé est le plus simple qui soit à savoir que le premier paquet arrivé est le premier paquet qui sort, cela fonctionne bien si il n'y a pas de congestions

Problèmes :

Certain flux peuvent virtuellement occuper toute la bande passante et il n'y a pas de possibilité de garantir un certain débit.

Round Robin (RR)

Principe :

Les paquets sont placés dans une file d'attente numérotée de 0 à n, et sont traités dans l'ordre de 0 à n.

Problèmes :

Le RR ne permet pas de garantir un débit ou des retards minimums, les files d'attente vides sont tout de même traitées et ce système ne prend pas en compte la taille variable des paquets.

Priority Queuing RR

Principe :

Les paquets envoyés vers les files d'attente qui se voient assignée une priorité, les files d'attente ayant la priorité la plus forte sont traitées les premiers.

Problème :

Les flux ayant la priorité la plus faible peuvent voir leur débit atteindre une valeur nulle.

Virtual Clock (VC)

Principe :

Les paquets sont classés et placés dans des files d'attente ayant une spécification de débit afin de pouvoir garantir un débit par flux.

Les paquets sont estampillés selon la formule suivante.

$$\text{Temps_Virtual_clock} = \text{Temps_Virtual_clock} + (\text{Taille_paquet} / \text{débit_file})$$

On traite les paquets dans l'ordre des estampillages.

Problèmes :

Les flux ne fournissant pas de paquets pendant un certain temps ne sont pénalisés que plus tard.

Weighted Fair Queuing

Principe :

C'est la méthode la plus juste, les paquets sont sélectionnés en utilisant les paramètres suivants :

m = numéro de la file

T_r = temps réel

T_d = temps de départ du paquet

T_f = temps de fin de transmission du paquet

P_e = paquet en début de file d'attente.

On a :

$T_f(P_e) = \text{longueur}(P_e) / \text{Débit}(m) + T_r$

Le paquet ayant le T_f le plus petit est traité

Les files étant vide un certain temps sont pénalisées immédiatement.

ANNEXE 4 : GLOSSAIRE

ACK : Acknowledgment

ATM : Asynchronous Transfer Mode

ART : Agence de Régulation des Télécommunications

BE : Best Effort

BLR : Boucle Locale Radio

BS : Base Station

CPS : Common Part Sublayer

CS : Convergence Sublayer

DL_MAP : Downlink Map

DVB : Digital Video Broadcast

FBR : Fixed Bit Rate

FDD : Frequency Division Duplexing

FDMA : Frequency Division Multiple Access

HFDD : Half duplex Frequency Division Duplexing

IB : In Band

INA : Interface Network Adapter

IP : Internet Protocol

LAN : Local Area Network

LMDS : Local Multipoint Distribution System

MAC : Medium Access Control

MAN : Metropolitan Area Network

NIU : Network Interface Unit

NRTPS : Non Real Time Polling Service

ODU : Outdoor Unit

OOB : Out Of Band

PAN : Personal Area Network

PDU : Protocol Data Unit

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QOS : Quality Of Service

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

RS :Reed Solomon

RTPS : Real Time Polling Service

SS :Subscriber Station

SNR :Signal Noise Ratio

STB : Set Top Box

TCP :Transport Control Protocol

TDD : Time Division Duplexing

TDMA :Time Division Multiple Access

TEB :Taux d'Erreur Binaire

UDP :User Datagramm Protocol

UL_MAP :Uplink Map

UGS :Unsolicited Grant Service

WAN : Wide Area Network

WLAN : Wireless LAN

WPAN : Wireless PAN

BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I

[I.1] Guy PUJOLLE*Les réseaux*

Edition Eyrolles 2000

[I.2] Jennifer BRAY, Charles F. STURMAN*Bluetooth 1.1 Connexions sans fil*

Editions CampusPress 2002

[I.3] Regis J. BATES*Wireless Networked Communications*

Edition McGraw-Hill, Inc 1994

[I.4] A. BRAZEAU*Quel est l'état actuel du déploiement sans fil ?*

Directeur Wireless ATM – NEWBRIDGE (Canada) ATM 99 Rennes France.

[I.5] ALAGHA, PUJOLLE, VIVIER*Réseaux de mobiles & réseaux sans fil*

Edition Eyrolles 2001

[I.6] L. TOUTAIN*Réseaux locaux et Internet des protocoles à l'interconnexion*

Editeur HERMES SCIENCE PUBLICATION 2003

[I.7] Vincent ALLAIN*Solution d'Interconnexion par Faisceau Hertzien*

JTR 2002 Limoges

[I.8] Vincent BLAVET*Technologies des réseaux locaux*

JTR 2002 Limoges

[I.9] Paul MÜHLETHALER*802.11 et les réseaux sans fil*

Edition Eyrolles 2002

[I.10] Eric BRÉCHET*Satellite*

JTR 2002 Limoges

[I.11]: Raphaël BASSET*LMDS/Boucle Locale Radio*

JTR 2002 Limoges

[I.12] P. MAHONEN*Broadland Wireless Access over two-layer LMDS*

VTT Reasearch, Wireless Internet Laboratory , Finland

[I.13] D. Chiron - D. Carsenat - R. Guedira - M. Giry- T. Monediere, - B. Jecko*La boucle locale radio LMDS*

Journées Réseaux, Lyon 2001

[I.14] Collectif d'auteurs sous la direction de G. BAUDOIN*Radiocommunications numériques /1*

Edition Dunod 2002

[I.15] Michel Volle, cf. [copyright](#) ; <http://www.volle.com>*Protocoles d'accès aux réseaux locaux de PC*www.volle.com/ENSPTT/protocoles.htm

Chapitre II

[II.1] MIL3 Inc.

OPNET Modeling Concepts
2001

[II.2] MIL3 Inc

OPNET Modeling Reference
2001

[II.3] B.W. KERNIGHAN, D.M. RITCHIE

Le langage C
Edition MASSON 1990

[II.4] O. BESSE

Contribution à l'étude de la propagation en zone urbaine dans le domaine millimétrique
Thèse de doctorat, n° 41 00, UER des sciences, Université de Limoges, France
Octobre 2000.

[II.5] D. Carsenat – S. Mathieu – O. Besse – R. Guedira – P. Vaudon – T. Monediere – B. Jecko

Couplage d'un logiciel de propagation électromagnétique avec le modèleur radio OPNET
Journées Nationales Microondes 2001 Futuroscope Poitiers mai 2001

[II.6] P. LEVEQUE

Diffraction d'ondes électromagnétiques transitoires par des obstacles en présence de milieux diélectriques à pertes
Thèse de doctorat, n° 14 94, UER des sciences, Université de Limoges, France Février 1994.

[II.7] A RENEIX B JECKO

Analysis of microstrip antennas on a dielectric substrate using the finite difference time domain method
IEEE Transaction on antennas and propagation Vol.37 num 11 Nov 1989 pp 1361-1369

[II.8] T. AUBRETON

Application des méthodes asymptotiques transitoires et harmoniques aux antennes et à la comptabilité électromagnétique
Thèse de doctorat, n° 10 96, UER des sciences, Université de Limoges, France Mars 1996.

[II.9] G.A. DESCHAMPS*Ray technique in electromagnetics*

IEEE Proceeding, Vol.60, September 1972.

[II.10] RECOMMENDATION ITU 838*Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*International Telecommunication Union/ITU Radiocommunication Sector p.238-241,
1992-94.**[II.11] L.Agba – B. Jecko – D. Carsenat – T. Monediere – D. Chiron***LMDS (40GHz) Network Deployment in Urban Environment*7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003) to
be Orlando, USA, in July 27-30, 2003

Chapitre III

[III.1] DEN/JTC-DVB-64

Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Local Multi-point Distribution Systems (LMDS)
ETSI DVB Project1999

[III.2] IEEE 802.16.1mc-00/21r1

Media Access Control Layer Proposal for the 802.16.1 Air Interface Specification.IEEE 802.16 Broadband
wireless Access Working Group Dated 7th July 2000.

[III.3] DTR/JTC-DVB-72

Digital Video Broadcasting (DVB); LMDS Base Station and User Terminal Implementation Guidelines for ETSI EN 301 199
ETSI DVB project 2001

[III.4] IEEE 802.16.1p-00/07r2

Draft Physical Layer Specification for the 802.16.1 Air Interface Standard.
IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. Dated 7th July 2000

[III.5] : Martyn Riley and Iain Richardson

Red Solomon Codes
http://www.4i2i.com/reed_solomon_codes.htm

[III.5] IEEE 802.16.1-00/01r1

Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. Dated August 2000.

Chapitre IV

[IV.1] Ch. POUMIER

Réalisation d'un démonstrateur LMDS 40 GHz à Limoges

Rapport de fin de programme Contrat ANVAR n° A97 07 028 K 00 France

[IV.2] RFC 793

Transmission Control Protocol

1981

[IV.3] RFC 791

Internet Protocol

1981

[IV.4] RFC 1323

TCP Extensions for High Performance

1992

[IV.5] RFC 768

User Datagram Protocol

1980