

## TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	i
NOTATIONS.....	v
ABREVIATIONS.....	vii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1: FIBRE OPTIQUE.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Définitions .....	2
1.2.1 La fibre optique .....	2
1.2.2 Lumière.....	3
1.3 Les lois optiques .....	4
1.3.1 Réflexion.....	4
1.3.2 Réfraction.....	4
1.3.3 Interférences .....	5
1.4 Principe d'un guide d'onde plan.....	6
1.4.1 Approche optique géométrique .....	6
1.4.2 Ouverture Numérique .....	7
1.4.3 Approche électromagnétique .....	7
1.5 Différents types de fibre.....	8
1.5.1 fibre multimode .....	9
1.5.2 fibre monomode.....	10
1.6 Les éléments d'une liaison optique.....	10
1.6.1 Emetteurs optiques.....	10
1.6.2 Récepteurs optiques .....	11
1.6.3 Les modulateurs .....	11
1.6.4 Les amplificateur à fibre dopées .....	11
1.7 Dispersion dans les fibres.....	12
1.7.1 Dispersion chromatiques.....	12
1.7.2 Dispersion intermodales.....	12

<b>1.8 Pertes dans les fibres optiques .....</b>	<b>13</b>
<i>1.8.1 Les pertes intrinsèques.....</i>	<i>13</i>
<i>1.8.2 Les ondes évanescentes .....</i>	<i>14</i>
<i>1.8.3 Les pertes liées à la distorsion de la fibre .....</i>	<i>15</i>
<i>1.8.4 Les pertes liées à la connectique .....</i>	<i>15</i>
<b>1.9 Avantages des liaisons optiques .....</b>	<b>16</b>
<i>1.9.1 Large bande passante.....</i>	<i>16</i>
<i>1.9.2 Débit d'information élevée .....</i>	<i>17</i>
<i>1.9.3 Faible taux d'atténuation.....</i>	<i>17</i>
<b>1.10 Conclusion.....</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE 2: LE RESEAU D'ACCES OPTIQUE EPON.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Situation de l'accès dans un réseau de télécommunication.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Le réseau d'accès ethernet optique passif .....</b>	<b>19</b>
<i>2.3.1 Définition de la norme 802.3ah de l'IEEE.....</i>	<i>20</i>
<i>2.3.2 Architectures.....</i>	<i>22</i>
<i>2.3.3 Les équipements de l'EPON.....</i>	<i>25</i>
<i>2.3.4 Technologie d'accès multiple associés .....</i>	<i>28</i>
<i>2.3.5 Principe et opération de l'EPON .....</i>	<i>29</i>
<i>2.3.6 Protocole MPCP (Multipoints Control Protocol).....</i>	<i>31</i>
<b>2.4 Avantages de l'EPON .....</b>	<b>38</b>
<b>2.5 Conclusion.....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE 3: MODELE ANALYTIQUE ET PLAN DE CONTROLE QoS POUR L'EPON .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Introduction à la notion de QoS.....</b>	<b>39</b>
<i>3.2.1 Généralités .....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.2 Modèle Diffserv appliqué à l'EPON.....</i>	<i>40</i>
<b>3.3 Plan de contrôle QoS pour l'EPON .....</b>	<b>43</b>

3.3.1	<i>Modèles gestion des ressources : DBA</i> .....	43
3.3.2	<i>Ordonnancement des classes de services au niveau de l'ONU</i> .....	44
3.3.3	<i>IPACT (Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time)</i> .....	45
3.3.4	<i>Implémentation du « Conformance control »</i> .....	47
3.4	<b>Conclusion</b> .....	48
<b>CHAPITRE 4: LES SERVICES ENVISAGES SUR L'EPON</b> .....		49
4.1	<b>Introduction</b> .....	49
4.2	<b>Présentation du triple play</b> .....	49
4.3	<b>Cahier de charge des services</b> .....	51
4.4	<b>Le service VOIP</b> .....	51
4.4.1	<i>Architecture et principe</i> .....	51
4.4.2	<i>Les protocoles</i> .....	53
4.4.3	<i>Avantages du VOIP</i> .....	56
4.5	<b>La télévision sur IP (TVIP)</b> .....	56
4.5.1	<i>Architecture et principe</i> .....	57
4.5.2	<i>Le HDTV</i> .....	58
4.5.3	<i>Les protocoles</i> .....	59
4.5.4	<i>Les avantages du TVIP</i> .....	61
4.6	<b>L'internet</b> .....	62
4.6.1	<i>Architecture</i> .....	62
4.6.2	<i>Les protocoles</i> .....	62
4.7	<b>Evolution du service triple play : vers le quad-play</b> .....	63
4.8	<b>Conclusion</b> .....	63
<b>CHAPITRE 5: SIMULATION D'UN RESEAU EPON AVEC OMNET++</b> .....		64
5.1	<b>Introduction</b> .....	64
5.2	<b>Scénarios</b> .....	64
5.3	<b>Définition des paramètres pour chaque module</b> .....	65
5.4	<b>Observation du comportement du réseau pendant la simulation</b> .....	66

<b>5.5 Collecte et analyse des résultats .....</b>	<b>71</b>
<b>5.6 Conclusion.....</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>75</b>
<b>ANNEXE 1 : LES EQUATIONS DE MAXWELL EN OPTIQUE.....</b>	<b>76</b>
<b>ANNEXE 2 : PRESENTATION DE OMNET ++.....</b>	<b>78</b>
<b>ANNEXE 3 : PRESENTATION DU LANGAGE NED .....</b>	<b>79</b>
<b>ANNEXE 4 : CODE SOURCE DE LA MODELISATION DE L'ONU.....</b>	<b>80</b>
<b>ANNEXE 5 : CODE SOURCE DE LA MODELISATION DE L'OLT .....</b>	<b>81</b>
<b>ANNEXE 6 : CODE SOURCE DE LA MODELISATION DU COUPLEUR PASSIF .....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>86</b>
<b>FICHE DE RENSEIGNEMENT.....</b>	<b>88</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>89</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>89</b>

## NOTATIONS

### 1. Minuscules latines

$k$	coefficient de couplage entre deux fibres de même nature
$m$	nombre de mode
$n_I$	indice de réfraction du cœur
$n_{II}$	indice de réfraction de la gaine
$r$	rayon du cœur de la fibre
$z$	longueur de la région de couplage

### 2. Majuscules latines

$A$	Amplitude
$B$	Bande passante
$B^{assigned}$	Bande passante allouée
$B^{avail}$	Bande passante disponible
$B^{excess}$	Bande passante en excès
$B^{min}$	Bande passante minimale
$B^{requested}$	Bande passante demandée
$E_L$	Pertes dans les coupleurs passifs
$I_L$	Perte par insertion
$N$	Nombre d'ONU dans le réseau
$O.N.$	Ouverture numérique
$P$	Puissance totale
$P_0$	Puissance à l'entrée de la fibre dans le cas du couplage
$P_1$	Puissance à la sortie de la fibre numéro 1 en cas de couplage
$P_2$	Puissance à la sortie de la fibre numéro 2 en cas de couplage
$T_{max}$	Temps de cycle maximal
$T_{size}$	
$V$	Fréquence normalisée
$W$	Dimension en seconde de la fenêtre de transmission

### 3. Minuscules Grec

$\mu$	Partage de bande passante entre les différentes classes
$\alpha$	Angle de décalage entre deux fibres présentant un décalage angulaire
$\gamma$	Charge de trafic dans les classes de services
$\delta$	Poids assignés à chaque classe de services
$\theta$	Angle d'incidence
$\theta_l$	Angle de réfraction
$\lambda$	Longueur d'onde
$\rho$	Taux d'occupation du système
$\sigma$	Part de bande passante alloué à chaque classe
$\omega$	Pulsation propre
$\varphi$	Déphasage

## ABBREVIATIONS

A/BPON	ATM/Broadband PON
AD	Adresse Destinataire
ADSL	Assymetric Digital Subscriber Line
AF	Assured Forward
AS	Adresse Source
ATM	ASYNCHRONOUS Transfert Mode
BE	Best Effort
bps	bit par second
CRC	Cyclic redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect
dB	décibel
DSL	digital subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EF	Expected Forward
EPON	Ethernet Passiv Optical Network
FEC	ForwardError Correction
FTP	File Transfert Protocol
Gbps	Gigabit par seconde
GPON	Giga-PON
GPS	General processshared
HDTV	High Definition TV
Hz	Hertz
HTTP	HyperText Transfert Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engeeneering
IETF	Internet Engineering Task Force
IGMP	Internet Group Management Protocol
IP	Internet Protocol
IPACT	Interleaved Polling Adaptative with Cycle Time
kbps	kilo-bits par seconde
LLID	Logical Link Identifier

MAC	Medium Access Control
Mbps	Méga-bits par seconde
MPCP	Multipoint Control Protocol
MPEG	Movie Picture Expert Group
MPLS	MultiProtocol Label Switching
MSB	Most Significant Bit
NRO	Nœud de raccordement Optique
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
OSI	Open system interconnexion
PABX	Private Automatic Branch eXchange
PMA	Physical Medium attachment
PMD	physical Medium dependent
PON	passiv Optical Network
PS	Proxy Server
QoS	Quality of Service
RNIS	Réseau Numérique à Intégration de Service
RTC	Réseau Téléphonique Commuté
RTP	Real Time Protocol
RTT	Round Time Trip
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDP	Session Description Protocol
SDTV	Standart TV
SIP	Session Initiation Protocol
SONET	Synchronous Optical Network
STB	Step-to-box
Tb	Tera bits
TCM	Trafic conformance Mecanism
TDM	Time Division Multiplexe
TEB	Taux d'erreur binaire
TVIP	Television over IP
UAC	User Agent Client

UAS	User Agent Server
UDP	User Datagram Protocol
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line
VOD	Video On Demand
VOIP	Voice over IP
WDM	Wavelength Division Multiplexe

## INTRODUCTION

De la création du télégraphe aux médias actuels en passant par l'avènement de l'internet, le domaine de la télécommunication et de l'informatique ont fait un bond considérable. Ces dernières décennies l'évolution très rapide des services de télécommunication associés à la lourdeur toujours croissante des volumes de données à échanger contraignent les opérateurs à réviser leurs infrastructures ; ces mêmes infrastructures sont très vite devenues obsolètes face à la demande toujours croissante de bande passante et d'une meilleure réactivité de réseau. Bien que l'ADSL, la technologie haut débit la plus connue de notre ère, fournit une bande passante bien assez large avec un bon niveau de confort, il se limite qu'aux usages actuelles puisque depuis l'offre Triple Play, la télévision haute définition ou les VOD (vidéo on Demand) il se retrouve assez vite dépassé.

L'accès au réseau doit donc désormais évoluer vers les « très hauts débits » utilisant les fibres optiques comme support. En effet, déjà largement utilisée dans nos réseaux actuels, la fibre optique permet des débits élevés qui n'ont jamais été atteint par les technologies classiques. Ses avantages multiples ajoutés à son coût faible fait d'elle le support idéal pour tous types de transmission numériques. Mais pour les opérateurs la question demeure : la fibre constitue-t-elle le support évolutif idéal pour une infrastructure flexible et durable ?

Trouver une réponse adéquate à cette question est un problème des plus complexes car de lourdes incertitudes pèsent sur les besoins des utilisateurs, de la diversité du marché et du rythme toujours plus rapide des progrès technologiques. Néanmoins de part le monde, des opérateurs ont déjà intégré la fibre optique dans leurs réseaux de dessertes. Plusieurs architectures sont possibles soit en déployant la fibre de bout en bout du réseau (la FTTH Fiber To The Home) soit en utilisant des infrastructures mixte où la fibre optique constitue seulement une partie du réseau couplé avec d'autre support jusqu'à l'utilisateur final.

Dans l'optique de trouver la réponse à la question posée, nous allons, dans le cadre de ce mémoire intitulé : « réseau ethernet optique passif », mettre d'avantage en lumière ces réseaux d'accès optiques. Pour ce faire nous adopterons le plan qui suit. Dans un premier temps nous étudierons la fibre optique et la transmission par voie optique. Ensuite nous exposerons le réseau d'accès optique passif en objet. Nous poursuivrons par les plans de contrôle QoS du réseau et enfin en guise de simulation nous proposerons un scénario typique du réseau adoptant l'architecture passive.

# CHAPITRE 1: FIBRE OPTIQUE

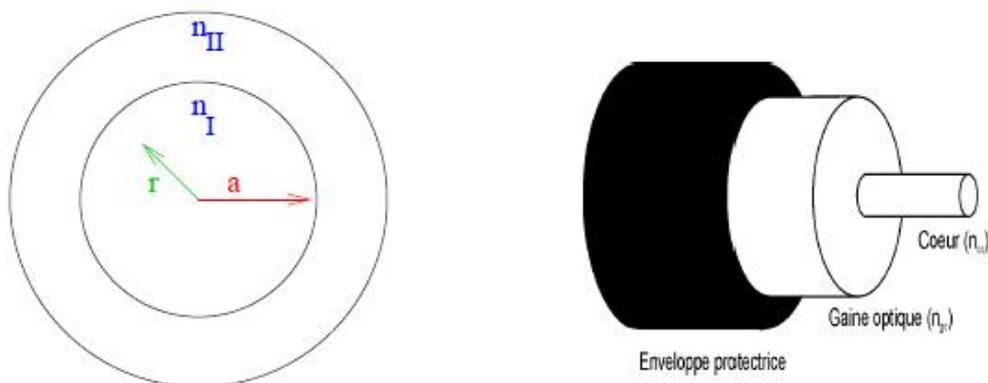
## 1.1 Introduction

Depuis les premiers essais laser jusqu'à aujourd'hui la fibre optique n'a cessé d'offrir de plus en plus de confort et bien que son utilisation couvre plusieurs domaines aussi vastes que variés (un simple objet décoratif dans notre quotidien ou un outil indispensable dans la médecine), c'est son usage dans le domaine de la télécommunication qui lui a sûrement valu son plus grand mérite. Ce chapitre mettra en lumière les principes essentiels de la fibre optique utilisée en transmission de données.

## 1.2 Définitions

### 1.2.1 La fibre optique

La fibre optique est un très mince fil en verre ou en plastique entouré qui a la propriété de conduire la lumière utilisée généralement dans les liaisons très longues distances. La fibre optique est formée d'un élément central appelé cœur et d'un indice de réfraction  $n$  et puis d'une gaine optique entourant le cœur d'indice de réfraction le plus souvent différent de celle du cœur. Cette composition est illustrée par la figure (1.01) :



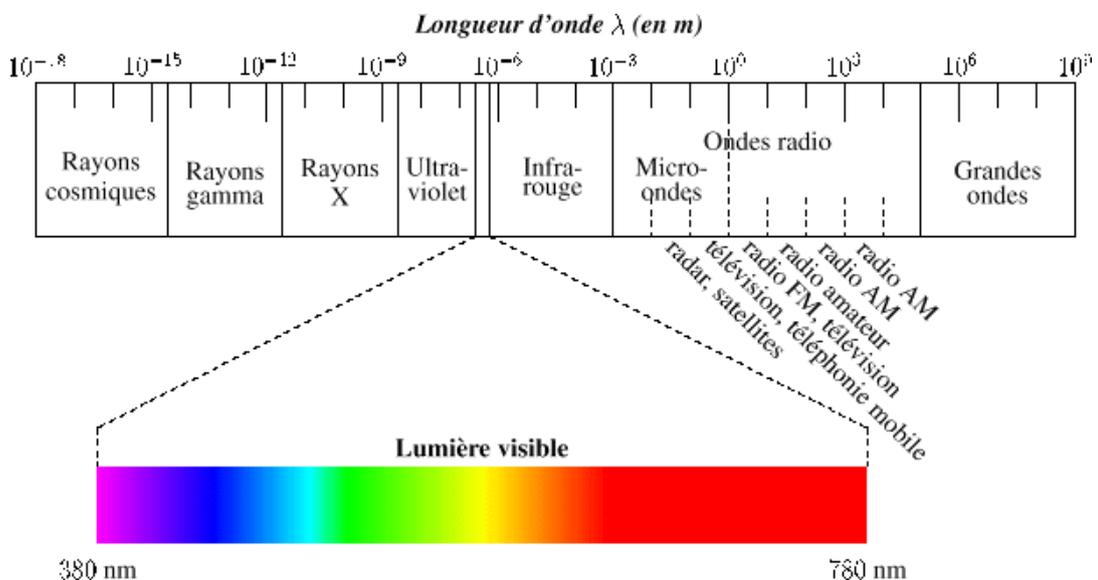
**Figure 1.01 :** Schématisation d'une fibre optique [1]

### 1.2.2 Lumière

Selon bien des considérations de la lumière les ondes lumineuse peuvent se définir de plusieurs manières. La lumière, à sa plus simple expression, se définit comme étant l'ensemble des rayonnements électromagnétiques visible dont les longueurs d'onde sont comprise entre 400 et 780 nm. Toutefois cette définition s'étend le plus souvent à des parties invisible du spectre notamment l'ultraviolet et l'infrarouge dont les propriétés sont très voisines de celle de la lumière visible. La théorie quantique, par un tout autre approche, suppose la lumière en tant qu'ensemble de plusieurs photons (particules élémentaires de masse au repos nulle).

Dans cette définition d'une façon générale l'émission de lumière correspond à la libération de quanta d'énergie (sous forme de photons), on use de cette définition que lors de l'étude des interactions de la lumière avec la matière. Dans la théorie électromagnétique, la lumière apparaît comme un phénomène ondulatoire périodique pouvant se propager dans le vide avec une vitesse finie de  $c=299\,792\,458$  m/s et donnant lieu à des interférences. Elle peut être dite monochromatique lorsqu'elle ne présente qu'un seul longueur d'onde, dans le cas contraire elle sera polychromatique.

Notre étude s'étendant aux transmission de la lumière par le biais d'un guide d'onde, nous ne retiendrons, pour la suite, que cette dernière conception de la lumière.



**Figure 1.02 :** Situation de la lumière visible sur une échelle des longueurs d'ondes

### 1.3 Les lois optiques

D'après les principes généraux de l'optique géométriques, la propagation de la lumière est soumise, principalement à trois lois : la première est celle de la propagation rectiligne de la lumière, la seconde indique que les faisceaux lumineux se propagent indépendamment les uns des autres et enfin la troisième parle des différents phénomènes de réflexion et de réfractions.

#### 1.3.1 Réflexion

Phénomène optique observé lorsqu'un rayon lumineux vient frapper une surface réfléchissante. La réflexion totale intervient lorsque ce rayon frappe la frontière entre deux milieux d'indice différents avec un angle supérieur à un certain angle dit angle critique. Dans le cadre d'une réflexion spéculaire, le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi unique qui, idéalement, hérite intégralement de son énergie. La réflexion optique obéit aux lois de Snell-Descartes pour la réflexion.

$$n_I \sin \theta = n_{II} \sin \theta_1 \quad (1.01)$$

Comme le rayon réfléchi se trouve dans le même milieu que le rayon incident alors :

$$n_I = n_{II} \quad (1.02)$$

$$\text{D'où } \theta = \theta_1 \quad (1.03)$$

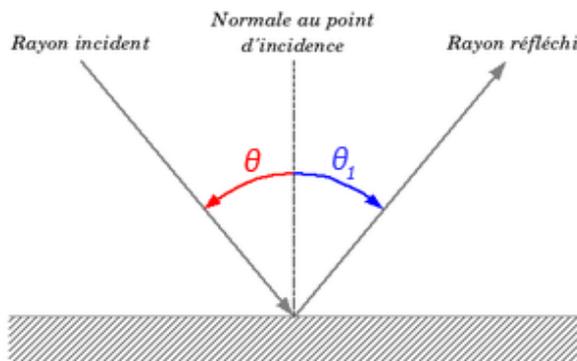


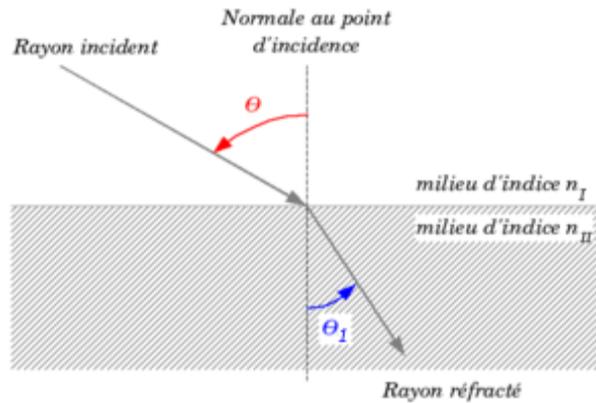
Figure 1.03 : Réflexion

#### 1.3.2 Réfraction

Phénomène optique consistant en la déviation de la trajectoire d'un rayon lumineux lors de son passage d'un milieu plus ou moins réfringent à un autre. Comme les lois de Snell-Descartes le précisent : le rayon réfracté se trouve dans le plan d'incidence.

On a donc :

$$\sin \theta_1 = \frac{n_I}{n_{II}} \sin \theta \quad (1.04)$$



**Figure 1.04 : Réfraction**

### 1.3.3 Interférences

On parle d'interférence lors de la rencontre de deux ondes de mêmes types qui interagissent l'un sur l'autre. L'interférence intervient uniquement quand les deux ondes ont la même fréquence, on parle de battement dans le cas contraire. On modélise mathématiquement ce phénomène par la somme des sinusoides : soient pour  $A_1(t) = A_{01} \cos(\omega t - \varphi_1)$  et  $A_2(t) = A_{02} \cos(\omega t - \varphi_2)$  l'onde résultante est :

$$A(t) = A_1(t) + A_2(t) = A_0 \cos(\omega t - \varphi) \quad (1.05)$$

Après calcul on trouve le carré de l'amplitude maximale de la résultante :

$$A_0^2 = A_{01}^2 + A_{02}^2 + 2A_{01}A_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1.06)$$

L'interférence est dite constructive lorsque  $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 1$  c'est-à-dire  $\varphi_1 = \varphi_2$  puisque les amplitudes maximales s'ajoutent et l'amplitude résultante augmente :

$$A_0^2 = (A_{01} + A_{02})^2 \quad (1.07)$$

Elle est dite destructive lorsque les deux ondes sont en antiphases, c'est-à-dire  $\varphi_1 = \varphi_2 + \pi$  les amplitudes maximales se soustraient, l'amplitude résultante diminue de ce fait :

$$A_0^2 = (A_{01} - A_{02})^2 \quad (1.08)$$

## 1.4 Principe d'un guide d'onde plan

Un guide d'onde plan est une lame diélectrique de section rectangulaire, d'épaisseur  $d$  et d'indice de réfraction  $n_I$ .

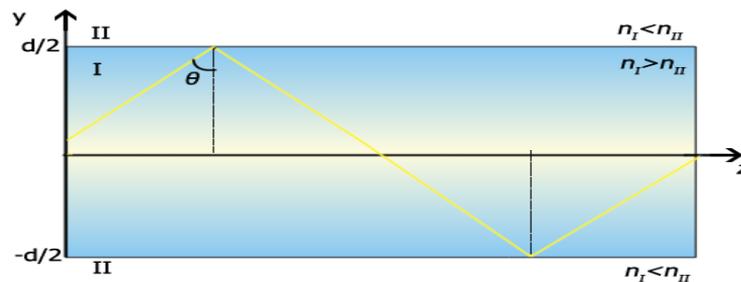
### 1.4.1 Approche optique géométrique

Ce type d'approche est le plus simple : les conditions de guidage du rayon lumineux s'obtiennent par les lois optiques classiques. Dans le guide d'onde plan, un rayon lumineux se propage e zigzag par réflexion successives sur les interfaces. Les interfaces consistent en deux régions semi-infinies placées aux extrémités du diélectrique, et d'indice de réfractons respectives  $n_{II}$  et  $n_{III}$  inférieures l'indice de réfraction  $n_I$ . Le guide d'onde sera dit symétrique si l'indice de réfraction des deux interfaces sont égales, il sera dit asymétrique dans le cas contraire. Dans le cadre de cette étude nous considèrerons notre guide d'onde symétrique et que le rayon lumineux : monochromatique.

Dans un guide d'onde les rayons lumineux atteignent les interfaces avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique et seront réfléchi totalement par la suite. Cette notion nommée condition de guidage est mieux définie par la relation :

$$\theta \geq \arcsin \frac{n_I}{n_{II}} \quad (1.09)$$

Le second membre de cette inégalité définit l'angle limite du guide d'onde. L'onde résultante se trouve piégé dans le guide par réflexions successives. La figure qui suit illustre le concept du guide d'onde plan.



**Figure 1.05 :** Schéma d'un guide d'onde plan

Ceci se résume en deux zones : la zone I nommée cœur ou core enveloppée et par la zone II portant le nom de gaine ou encore cladding.

Pour faciliter la visualisation du phénomène optique, dans la figure (1.02) n'est illustré qu'un seul rayon, mais dans les cas pratiques nous avons accès à un faisceau lumineux. Pour que ce faisceau

puisse se propager dans le guide d'onde, les interférences, aux interfaces du guide d'onde, entre rayons incidents et réfléchis doivent être constructives. Ce dernier a lieu lorsque la relation est vérifiée.

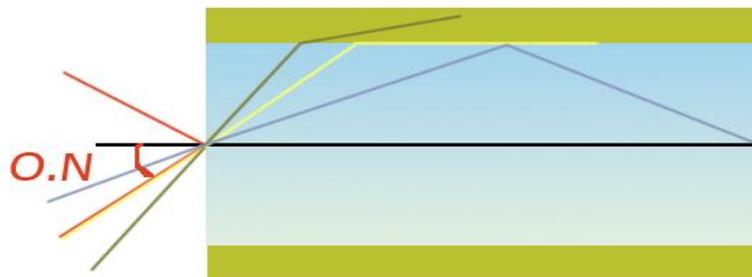
$$\frac{2\pi}{\lambda} 2d \cdot \cos(\theta) - 2\varphi = 2\pi m ; m = 1, 2, 3 \dots \quad (1.10)$$

Ce concept et ces relations sont également valables pour des guides d'ondes de section circulaire. Ceci définit donc bien la fibre optique.[1]

### 1.4.2 Ouverture Numérique

L'ouverture numérique d'une fibre optique caractérise le cône d'acceptance de la fibre : si un rayon lumineux tente de pénétrer la fibre en provenant de ce cône, alors le rayon sera guidé par réflexion totale interne ; dans le cas contraire, le rayon sera perdu. L'ouverture numérique est définie par comme le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte, mesuré par rapport à l'axe de la fibre. Cette définition, traduite par la relation (1.02), est illustrée par la figure (1.03).

$$O.N. = \sqrt{n_I^2 - n_{II}^2} \quad (1.11)$$



**Figure 1.06 : Ouverture numérique**

### 1.4.3 Approche électromagnétique

L'approche électromagnétique est une approche beaucoup plus élaborée puisqu'il propose de considérer le rayon lumineux en tant que rayonnement électromagnétique. Les équations de Maxwell sont donc indiquées pour déterminer les conditions de guidage et l'équation de propagation.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.12)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.13)$$

Tenant compte des relations constitutives et en régime harmonique ces relations deviennent :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\vec{H} \quad (1.14)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon_0 n^2 \vec{E} \quad (1.15)$$

Le guide d'onde étant plan, il n'y a aucune variation selon l'épaisseur du guide. Les dérivées partielles dans champs électriques et magnétiques suivant cet axe sont nulles. A partir de ces relations on obtient l'équation de propagation en mode transverse électrique :

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.16)$$

On ne s'intéressera qu'à la solution du régime harmonique et suivant l'axe Oz. Le champ électrique aura pour expression :

$$\vec{E} = \overline{E}(\vec{y}) e^{j(\omega t - \gamma z)} \quad (1.17)$$

Où  $\omega$  est la pulsation et  $\gamma$  est la constante de propagation suivant l'axe Oz

En mode transverse magnétique les équations se résolvent de la même manière mais seulement en tenant compte que  $\vec{H} = \text{rot } \vec{E}$ . En résolvant l'équation (1.16) on obtient finalement les conditions de guidages qui s'écrivent :

$$\frac{\omega n_I}{c} > \gamma > \frac{\omega n_{II}}{c} \quad (1.18)$$

## 1.5 Différents types de fibre

Actuellement les industriels commercialisent deux types de fibres optiques : fibre monomode et multimode. Leurs principales différences résident essentiellement dans le diamètre du cœur et la longueur d'onde utilisée.

### 1.5.1 fibre multimode

Les fibres multimode ont été les premiers à être utilisés dans la transmission de données. Elles ont la caractéristique de pouvoir transporter plusieurs modes et est adaptée pour une liaison sur une courte distance à bas débit. Pour ce type de fibre les dimensions typiques sont de  $62.5\mu\text{m}$  pour le cœur,  $125\mu\text{m}$  pour la gaine. On définit la fréquence normalisée  $V$  par :

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda_0} \sqrt{(n_I^2 - n_{II}^2)} \quad (1.19)$$

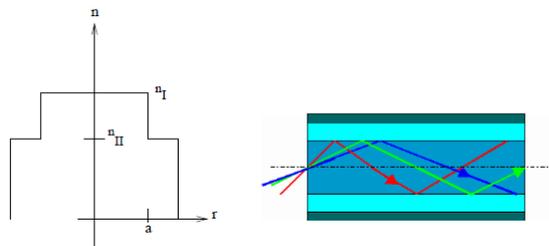
Le nombre de mode  $m$  est donné par :

$$m = \frac{V^2}{2} \quad (1.20)$$

On distingue par ailleurs, pour la fibre multimode, deux catégories : la fibre à saut d'indice et celle à gradient d'indice.

#### 1.5.1.1 La fibre à saut d'indice

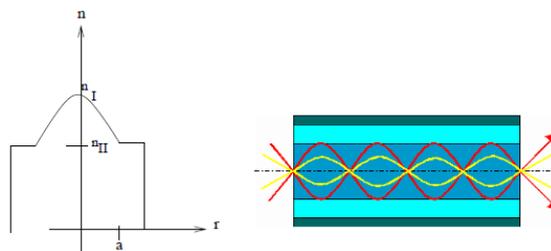
Dans une fibre à saut d'indice l'indice de réfraction du cœur de la fibre est constant.



**Figure 1.07 :** Profil d'indice et impacte sur la transmission d'une fibre à saut d'indice

#### 1.5.1.2 La fibre à gradient d'indice

Dans ce type de fibre l'indice de réfraction du cœur augmente progressivement au fur et à mesure que l'on s'approche de son centre.



**Figure 1.08 :** Profil d'indice et impacte sur la transmission d'une fibre à gradient d'indice

### 1.5.2 fibre monomode

Ce type de fibre n'admet qu'un seul trajet lumineux (propagation monomode), transmis le plus direct possible (dans l'axe de la fibre) en raison du diamètre de leur cœur qui est très fines (seulement quelques  $\mu\text{m}$ ). La fibre monomode ont des avantages certains en termes de bande passante et de perte mais son usage requiert des composants chers et de faibles tolérances. Elles s'utilisent surtout dans les liaisons intercontinentales puisque le débit offert est plus élevé et les pertes sont minimales et de plus la dispersion intermodale est absente. La longueur d'onde de coupure est celle au-dessus de laquelle la fibre devient monomode. Cette quantité est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2,404} r \cdot ON \quad (1.21)$$

Au dessous de cette longueur d'onde le mode perd de l'énergie au profit de modes dont la longueur d'onde est supérieure à celle-ci.

Le tableau suivant résume des valeurs typiques des différents types de fibres pour une portion de câble long de 1km et les mêmes indices de réfractifs :

Type de fibre	Indice cœur	Indice gaine	Diamètre cœur ( $\mu\text{m}$ )	Diamètre gaine ( $\mu\text{m}$ )	Bande passante	Dispersion intermodale
Monomode	1.53	1.51	200	380	>10Ghz	absente
Saut d'indice	1.53	1.51	50-100	125	10-100Mhz	150ns
Gradient d'indice	1.53	1.51	~10	125	200-1500MHz	0.56ns

**Tableau 1.01 :** Valeurs typiques des différents types de fibres

## 1.6 Les éléments d'une liaison optique

### 1.6.1 Emetteurs optiques

Trois types de source lumineuse sont principalement utilisés dans les liaisons optiques : les diodes électroluminescentes (DEL ou LED Light Emitting Diode), les diodes laser à semi-conducteur dont les diodes laser à structures verticales (VCSEL pour Vertical Cavity Surface Emitting Laser) et les diodes laser classiques.

Le grand choix de longueurs d'onde et la possibilité d'émettre dans le rouge des DEL en font des sources bien adaptées aux interconnexions optiques courtes distances sur fibres plastiques, où les débits mis en jeu restent faibles (environ 500 Mbit/s). Malgré la forte divergence du faisceau de sortie, l'utilisation couplée des DEL et des fibres plastiques permet de réaliser des systèmes très bas coût, et cela grâce à la structure verticale des DEL et au gros diamètre des fibres plastiques qui permettent de réduire les coûts d'alignement et de positionnement. Les diodes laser à semi-conducteur ont l'avantage de disposer d'une bande passante de modulation très large et d'une puissance optique d'émission bien supérieure aux DEL et VCSEL. En contrepartie, elles sont caractérisées par une consommation plus grande. La plage des longueurs d'onde est variée et il est possible d'émettre dans le rouge. Cependant, malgré leurs performances intrinsèques, la structure horizontale et la divergence elliptique du faisceau des diodes laser rendent leur mise en œuvre et leur coût de fabrication incompatibles avec les besoins en interconnexion optique.

### **1.6.2 Récepteurs optiques**

Les récepteurs optiques sont les éléments qui se chargent d'une part de la détection du signal et d'autre part de la démodulation du signal. La détection du signal consiste en la conversion optoélectronique alors que la démodulation, se faisant après la conversion se fait de manière classique sur un signal électrique. Il existe un grand nombre de composants satisfaisant les caractéristiques des interconnexions optiques en termes de débit, de parallélisme et d'intégration. Le choix d'une technologie de photodétecteurs est déterminé par la longueur d'onde d'émission.

### **1.6.3 Les modulateurs**

Les modulateurs des fibres optiques sont des composants actifs qui permettent de contrôler le flux de lumière et donc les informations transmises. Ils sont généralement obtenus à partir d'éléments aux propriétés optiques intéressantes comme le phosphore d'indium ou l'arséniure de gallium.

### **1.6.4 Les amplificateur à fibre dopées**

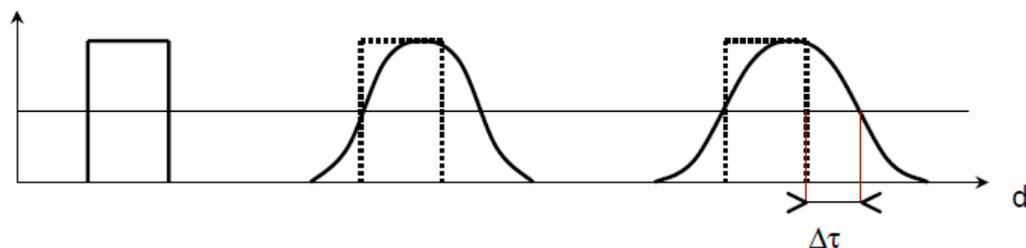
Un amplificateur optique est un dispositif qui amplifie un signal lumineux sans avoir besoin de le convertir d'abord en signal électrique avant de l'amplifier avec les techniques classiques de l'électronique. Un amplificateur à fibre dopée fonctionne à la manière d'un laser. Une portion de fibre optique est dopée et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité.

Lorsqu'un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique, il désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en tout point identique au photon incident. Le signal lumineux a donc été doublé. Par effet d'avalanche, l'amplification du signal se fait jusqu'à la sortie de la section dopée de la fibre optique.

## 1.7 Dispersion dans les fibres

### 1.7.1 Dispersion chromatiques

Dans les fibres optiques la vitesse de propagation de la lumière est fonction de la longueur d'onde. Comme une impulsion lumineuse, émis par le laser, n'est pas rigoureusement monochromatique, les différentes longueurs d'ondes vont se propager à des vitesses différentes, les grandes longueurs d'ondes se propagent plus rapidement que les longueurs d'ondes plus courtes. C'est le domaine de dispersion anormale ou négative (les dénominations « normale » et « anormale » proviennent du fait que si l'on regarde l'indice de réfraction d'un milieu sur une très large fenêtre spectrale, la dispersion est normale sauf en de très petites zones). Ce dernier est à l'origine de la dispersion chromatique qui se manifeste par un élargissement des impulsions au cours de leur propagation. C'est un facteur qui limite la bande passante de la transmission optique.



**Figure 1.09 :** effet de la dispersion chromatique dans une fibre optique

### 1.7.2 Dispersion intermodales

Les verres ou les plastiques composant les fibres optiques étant des matières fortement dispersifs la transmission est sujet à un autre type de dispersion : la dispersion intermodale. Ce dernier est dû au fait que deux modes guidés émis au même moment se propagent de manière différente. Ce qui provoque également un décalage temporel de la réception de ces deux modes. la fibre monomode n'est pas touché par ce genre de problème puisqu'elle n'admet qu'un seul mode guidé. Ce type de dispersion est un des facteurs qui limite le plus la bande passante des fibres multimodes.

## 1.8 Pertes dans les fibres optiques

Comme dans tout support de transmission, la fibre optique est soumise à des lois physiques qui régissent l'affaiblissement des ondes électromagnétiques lorsque ces derniers le parcourent. En fibre optique les pertes sont nettement moins importantes que dans d'autres supports néanmoins, si elles ne sont pas maîtrisées, peuvent induire des erreurs dans les données transmises. On distingue essentiellement cinq types de pertes dans la fibre optique qui diffèrent selon leurs origines.

### 1.8.1 Les pertes intrinsèques

Ces pertes sont principalement liées à un désordre de la composition chimique de la fibre. Elles peuvent se présenter sous la forme d'une absorption ou d'une diffusion. La diffusion est induite par un désordre du cristal constituant le cœur de la fibre ce qui implique une non homogénéité de l'indice de réfraction. Si la dimension de l'irrégularité est supérieure à  $\lambda/10$ , l'irrégularité est une source de diffusion de Rayleigh et les pertes sont proportionnelles à  $\lambda^{-4}$ .

Quant à l'absorption, elle correspond aux transitions entre photons. Elle est donc directement liée aux impuretés cristallines. Au cours de la transmission on quantifie la perte selon la loi de Beer-Lambert:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha P(z) \quad (1.22)$$

Où  $z$  est la distance parcourue par le signal et  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation en Neper/m. Pour une puissance en entrée de  $P_{en}$  la puissance du signal en fonction de  $z$  s'écrit :

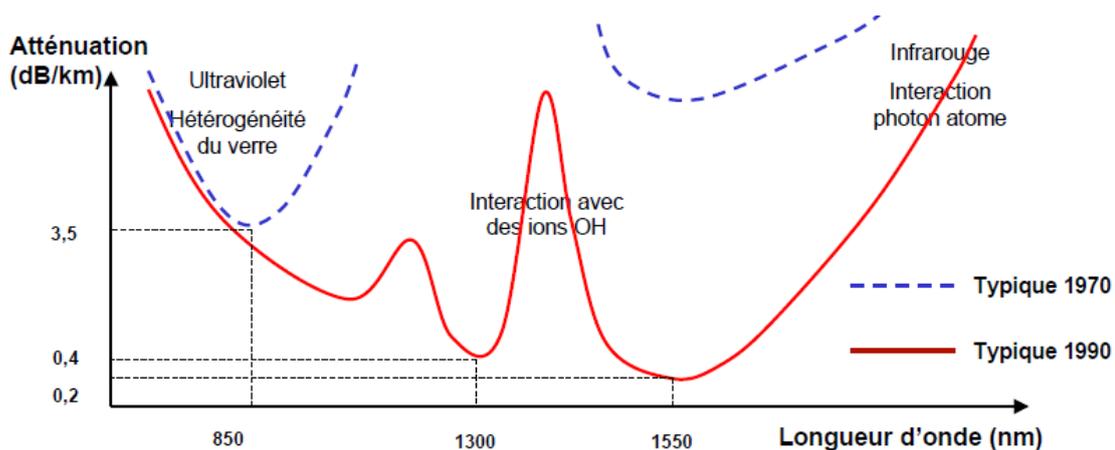
$$P(z) = P_{en} e^{-\alpha z} \quad (1.23)$$

En dB/km on définit plutôt l'atténuation par la formule :

$$A = \frac{1}{L} 10 \log\left(\frac{P_{en}}{P_s}\right) \quad (1.24)$$

Où  $P_s$  est la puissance à la sortie et  $L$  la longueur de la fibre.

La mesure des atténuations spectrales consiste à mesurer l'affaiblissement de la fibre sur une plage de longueur d'onde la courbe représentée dans la figure 1.10 en résulte :



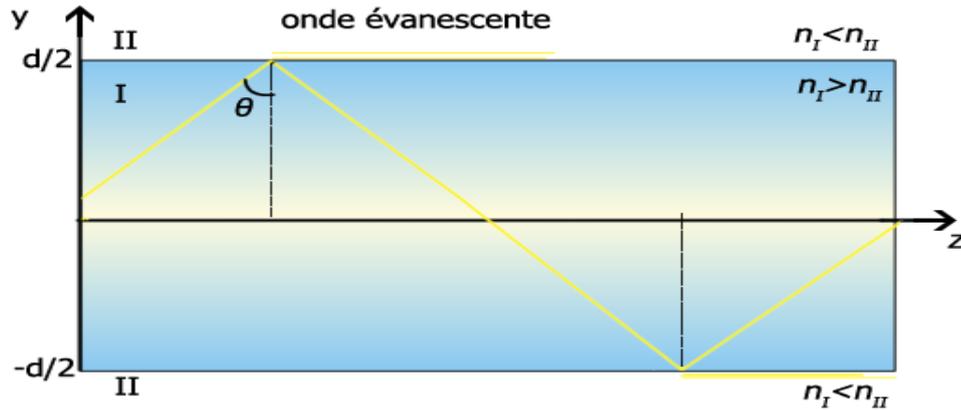
**Figure 1.10 :** Atténuation en dB en fonction de la longueur d'onde

L'analyse de cette courbe introduit la notion de fenêtre de transmission : la première fenêtre se situe entre 0,8 et 0,9  $\mu\text{m}$  pour une atténuation d'environ 3dB/km et n'est utilisé qu'en multimode sur une courte distance avec des équipements bon marché comme des diodes. La deuxième fenêtre est entre 1,28 et 1,33 $\mu\text{m}$  où l'atténuation est raisonnable (environ de 0,33dB/km) et où la dispersion chromatique est absente. La dernière fenêtre se trouve entre 1,525 et 1,625 $\mu\text{m}$  où l'atténuation est la plus faible (de l'ordre de 0,2 dB/km) supportant les applications les plus modernes.

### 1.8.2 Les ondes évanescentes

Dans les cours de physiques élémentaires il est commun de dire que lors d'une réflexion totale aucun flux lumineux n'est réfracté. Cependant des études électromagnétiques démontrent que certains rayons n'atteignent pas les interfaces du guide d'onde avec l'angle d'incidence adéquate et sera par le fait réfractée :cette onde sera dite évanescente. Ceci implique également que lors d'une réflexion totale il y ait apparition d'un champ électromagnétique dans les enveloppes du guide.

A chaque réflexion totale il y a apparition de ces ondes ce qui a pour effet d'atténuer l'onde transmise. Cependant ces ondes évanescentes sont très faibles car peu énergétique ce qui fait d'elles des phénomènes qu'on peut négliger.



**Figure 1.11 :** Représentation schématique d'une onde évanescente

### 1.8.3 Les pertes liées à la distorsion de la fibre

Dans un guide d'onde les signaux lumineux atteignent les interfaces avec un angle d'incidence  $\theta$ . Lorsque la fibre optique présente des courbures locales cet angle d'incidence dévie et devient  $\theta'$ . Ce nouvel angle ne correspondra plus au mode guidé ce qui a pour effet d'engendrer des pertes soit par ondes évanescentes s'il est inférieur à l'angle limite des interfaces, soit par interférences destructives.

Ces pertes augmentent suivant des paramètres du mode guidé peut atteindre quelques dB/km. En pratique il n'existe pas de fortes courbures sinon la fibre se casse, par contre on peut observer de micro-courbure lorsque la fibre est pressée sur une surface irrégulière. La fibre optique est généralement entourée d'une enveloppe protectrice qui permet de limiter ces micro-courbures.

### 1.8.4 Les pertes liées à la connectique

Sur le plan pratique, on est souvent amené à raccorder deux fibres. Un raccordement peut être définitif ou démontable. Mais quelque soit le type de raccordement effectué, il peut induire d'importantes pertes. Plusieurs sources coexistent :

#### 1.8.4.1 Le désalignement axial

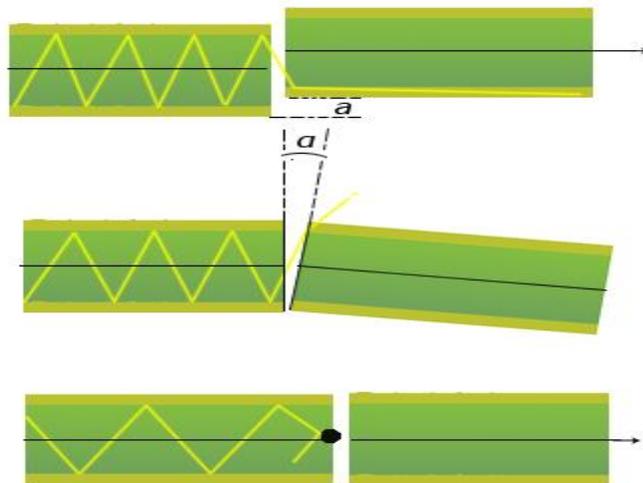
Une partie du cœur des fibres se trouve aligné sur la gaine de l'autre, certains rayons s'égarer dans le cladding ou à l'extérieur de la fibre ce qui a pour effet de perdre une partie importante du flux lumineux.

#### 1.8.4.2 Le désalignement angulaire

Les axes des deux fibres se trouvent décalé d'un angle  $\alpha$ . Ce qui provoquera une perte assez importante du flux lumineux à travers l'écart angulaire que font les deux fibres.

#### 1.8.4.3 Impureté à la surface d'entrée ou de sortie

Au cours du raccordement, il se peut qu'une impureté se glisse à la surface extérieure des fibres. Des rayons se heurtent donc à un matériau étranger et se trouvent de ce fait absorbés, réfléchis ou réfracté hors de son chemin initiale.



**Figure 1.12** : Schéma explicatif des différents pertes liées à la connectique

### 1.9 Avantages des liaisons optiques

#### 1.9.1 Large bande passante

L'un des avantages essentiels des communication par voie optique est la largeur de la bande passante qu'elle peut offrir. En effet, la théorie de la communication suppose que le nombre d'informations transmises par seconde ne peut excéder la fréquence de l'onde porteuse (soit au plus un bit par période de l'onde). Cette propriété montre l'intérêt d'utiliser des signaux optiques, dont les fréquences vont de  $10^{14}$  à  $10^{15}$  Hz, plutôt que les ondes radio de fréquences plus faibles (de l'ordre de  $10^5$  à  $10^{11}$  Hz). Il est donc possible pour les communications optiques d'atteindre en théorie la centaine ou le millier de Térabits par seconde ( $1\text{Tb} = 10^{12}$  bits).

### **1.9.2 Débit d'information élevée**

L'avènement de la fibre optique dans nos réseaux de transmission a permis l'accroissement des débits d'informations échangés. La conservation de ce débit sur une longue distance sans aucune intervention externe est l'une des propriétés essentielles de la fibre. Cet argument a d'ailleurs limité l'installation du DSL (*Digital Subscriber Line*) pour des lignes de quelques kilomètres, d'un particulier à son lieu de travail par exemple. Les câbles coaxiaux permettent de passer la barre des 100 *Mbps*, mais le signal se détériore rapidement quand la distance de transmission augmente. Les photons peuvent en théorie, être utilisés pour atteindre des débits de 50 *Tbps*. Ce constat a donc fait émerger la lumière comme porteur d'informations pour des applications à large bande passante sur des grandes distances.

### **1.9.3 Faible taux d'atténuation**

Une autre propriété primordiale de la fibre est que les pertes sont minimales. En comparaison avec d'autres supports bien connus les pertes dans les fibres optiques sont négligeables. De plus les ondes lumineuses qu'elles véhiculent ne sont pas sujettes à des interférences avec le milieu externe favorisant ainsi la sécurité des transmissions.

## **1.10 Conclusion**

Exploitées pour ces propriétés réfractrices intéressantes, les fibres optiques sont déjà largement utilisées dans les réseaux longueurs très longues. On pourrait ainsi dire qu'elle fait partie de nos quotidiens en contribuant à nos échanges lointains. Aujourd'hui des solutions existent pour que les utilisateurs puissent bénéficier directement des avantages que la fibre optique nous offre. Ces solutions permettent aux usagers de disposer d'un débit de l'ordre d'une centaine de mégabits par seconde dans le sens descendant.

## **CHAPITRE 2: LE RESEAU D'ACCES OPTIQUE EPON**

### **2.1 Introduction**

Les réseaux d'accès nommés familièrement les derniers kilomètres sont les liens qui assurent depuis toujours la liaison entre les clients et les opérateurs. Différents types de réseaux existent plusieurs opérateurs, de part le monde, commencent aujourd'hui à adopter la solution optique non seulement à cause de la demande croissante en bande passante mais aussi pour pérenniser leurs infrastructures, certains opérateurs s'accordent même à dire que la fibre optique c'est le futur. Dans ce chapitre sera mis en avant le réseau optique passif le plus adapté à notre ère, notamment le EPON.

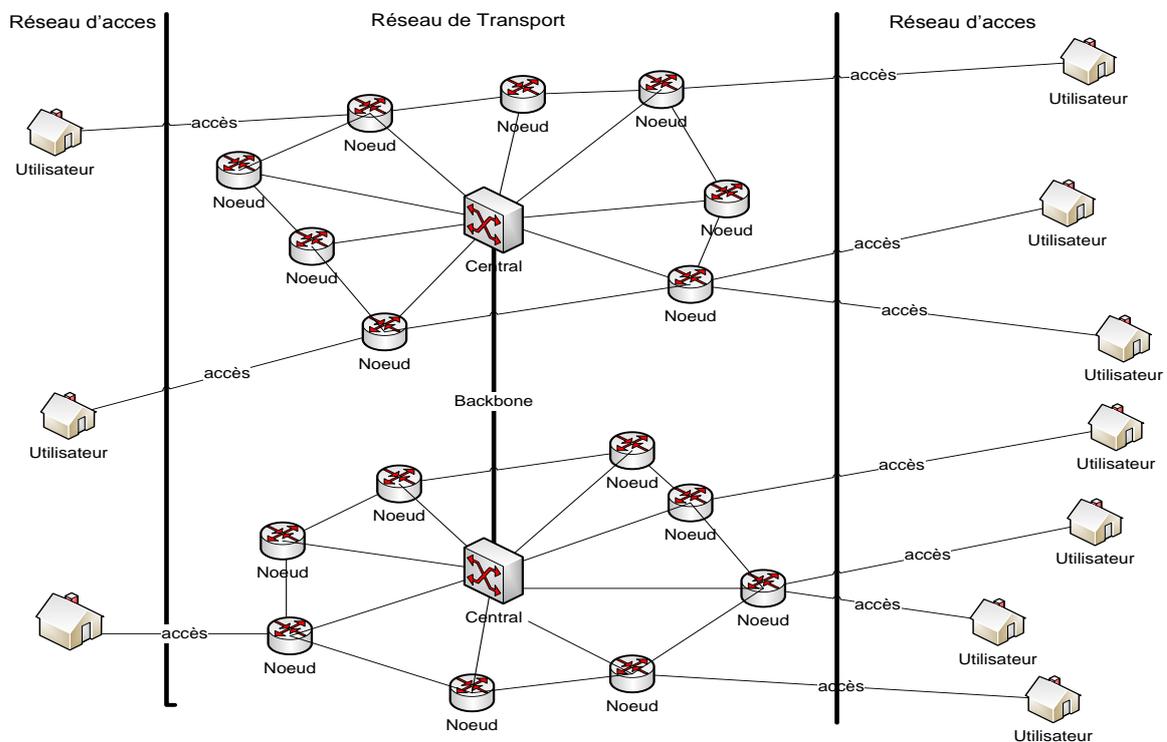
### **2.2 Situation de l'accès dans un réseau de télécommunication**

Typiquement, un réseau de télécommunication se constitue de deux sous réseaux bien distinct. Le réseau de transport, qui lui se décompose en deux sous-réseaux : un réseau dorsale ou backbone (liaison entre deux réseaux distants) et d'un réseau de collecte (plusieurs nœuds interconnectés assurant les entrées et les sorties du réseau), se propose de faire transiter les données jusqu'à un point précis de ce même sous-réseau et puis d'un réseau d'accès. Les réseaux d'accès peuvent se définir comme la connexion entre l'utilisateur et le réseau de donnée. C'est cette liaison qui définit la largeur de la bande passante utilisateur aussi bien que les débits dans le sens montant et descendant. Selon le support physique qu'ils utilisent on peut classer les réseaux d'accès en deux grandes catégories :

- Les réseaux d'accès mobiles utilisant l'onde radioélectrique
- Les réseaux d'accès fixes utilisant des câbles

La première catégorie répond à un besoin de mobilité des usagers puisque, à l'aide de l'onde radio, ils peuvent se connecter au réseau n'importe où et n'importe quand mais elle présente des inconvénients majeurs en termes de débit, de bande passante et surtout en distance maximale, elle sera réservée pour la voix et le transfert de données avec un volume réduit peu propice à des applications nouvelles gourmandes en bande passante. La seconde catégorie constitue un réseau plus sûr puisqu'on peut y transmettre des données largement plus volumineux en un temps réduit, et bien qu'elle ne répond pas aux besoins de mobilités, elle propose aux usagers de jouir, de manière confortable, les offres et les services fournis par les opérateurs de télécommunication.

Elle sera essentiellement réservée à des applications résidentielles ou bureautiques. La figure 2.01 montre un schéma type d'un réseau de télécommunication : les utilisateurs sont connectés aux terminaisons du réseau (ou nœud) via le réseau d'accès.



**Figure 2.01 :** Structure type d'un réseau de télécommunication

### 2.3 Le réseau d'accès ethernet optique passif

L'EPON est une technologie d'accès point à multipoint passive, normalisée 802.3ah et utilisant l'ethernet pour l'encapsulation des données. La différence entre technologie active et passive réside dans les équipements utilisés dans l'architecture de ces réseaux. D'une manière générale un réseau optique actif est beaucoup plus onéreux en termes de maintenance et de consommation d'énergie en raison de l'élément actif inséré dans la mise en place. C'est pourquoi les opérateurs se ruent vers les architectures passives, beaucoup plus avantageux en termes d'exploitation. Les fibres utilisées pour constituer la première partie du réseau (partant du nœud de raccordement optique ou NRO) est entièrement monomode, s'il existe une seconde partie (point à multipoint) le type des fibres dépend du choix de l'opérateur et de la prévision du trafic. Les PON (Passive Optical Network) offrent une large gamme de technologie et de protocoles pour les transmissions de données mais pour les encapsulations on utilise principalement l'ATM et l'Ethernet.

Actuellement la plupart des exploitants de ces réseaux optent pour la solution Ethernet (EPON : Ethernet Passive Optical Network) basé sur le standard 802.3ah de l'organisme IEEE et utilisant exclusivement l'IP. Ce choix impose aux opérateurs l'usage de deux longueurs d'ondes : 1550 nm pour la liaison descendante et 1310 nm pour la liaison montante. La technologie alternative à l'EPON (Ethernet Passive Optical network) est l'A/BPON (Broadband PON) basé sur la norme G.983 de l'UIT (Union Internationale des Télécommunication). Celle-ci suppose l'usage de deux longueurs d'ondes 1550 nm (utilisant le protocole IP pour les services des types vidéo ou télévision) et 1940 nm (utilisant le protocole IP pour le transfert de données numériques ou la voix) pour la liaison descendante et une longueur d'onde : 1310 nm pour la liaison descendante.

### 2.3.1 Définition de la norme 802.3ah de l'IEEE

La famille de standard 802.3 régit l'ensemble des opérations et des normes utilisé lors d'une liaison ethernet. La norme 802.3ah est une norme récente ratifiée par l'organisme IEEE. Ce standard autorise l'usage de l'ethernet entre le réseau cœur de l'opérateur ou les fournisseurs de services et les abonnés en utilisant des fibres optiques monomode. Le 802.3ah couvre toute la transmission ethernet à l'aide de différents moyens incluant : le point à point par fibre optique monomode, le point à multipoint par fibre optique monomode et point à point par paire cuivrées. Pour un réseau de type PON (Passive Optical Network) en particulier, ce standard définit, au niveau physique les normes 1000BasePX20-U et 1000BasePX20-D régissant la transmission sur une fibre monomode, les longueurs d'ondes, les pertes dans le canal.

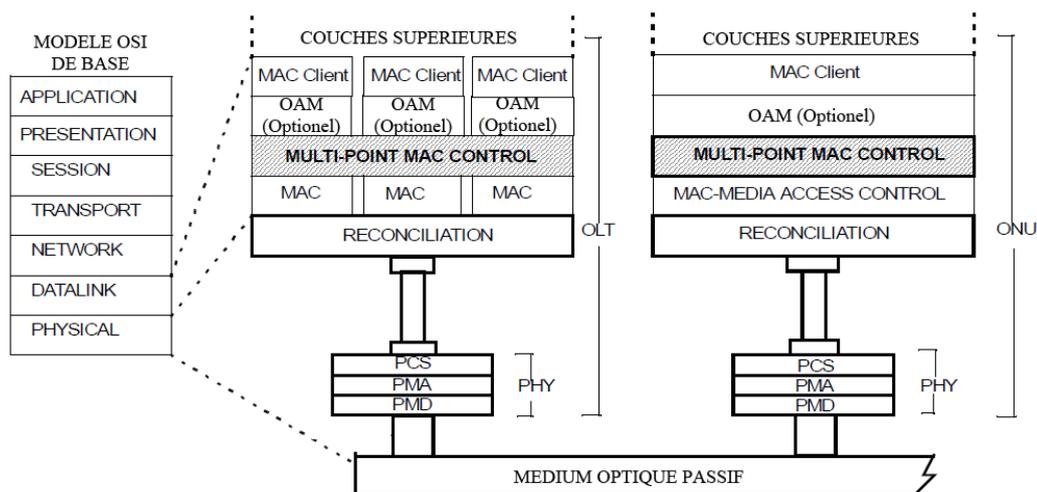


Figure 2.02 : Structure hiérarchique des couches basses d'un réseau de type PON

La figure 2.02 montre l'architecture des couches basses et sa concordance avec le modèle en sept couches de l'OSI (Open System Interconnection) définie par la norme 802.3ah pour un réseau EPON. On y retrouve, très distinctement, les subdivisions des couches physiques et liaison de données. Chaque sous-couche de cette architecture tient un rôle prépondérant dans l'établissement de la liaison : la sous-couche PMD (Physical Medium Dependent) de la couche physique transcrit les données provenant du PMA (Physical Medium Attachment) en signal convenable pour le média physique spécifique et vice-versa ; les horloges de synchronisation sont également affirmé par le PMD et directement passé à la PMA. La sous-couche PMA est chargée du brouillage et des procédées de correction d'erreur au niveau CRC (Cyclic Redundancy Check). Le FEC (Forward Error Correction) est définie comme le correcteur d'erreur à un niveau supérieur au CRC. Le PCS supervise la validité des paquets. La sous-couche RECONCILIATION sert d'interconnexion entre la sous-couche MAC de la couche liaison et la couche physique.

### 2.3.1.1 Prépondérance du multi-point MAC control dans la hiérarchie IEEE 802.3

Le multi-point MAC control définit les opérations de control MAC pour les réseaux optiques point à multipoint. Il a pris la place de la sous-couche MAC control mais avec une plus grande capacité à supporter de nouvelles fonctionnalités dont l'implémentation de mécanismes pour gérer de multiples MAC simultanément. Les différents instances de MAC offre un service d'émulation point à point entre l'OLT et l'ONU. Une autre instance de cette couche sera ajoutée pour communiquer à tous les ONU en une seule transmission.

### 2.3.1.2 Format d'une trame ethernet

Le format d'une trame ethernet est basé sur la norme 802.3 de l'IEEE et est utilisé par l'EPON en conformité avec l'architecture ethernet. Cette trame est élaborée à partir de la couche niveau 2 (couche liaison de données) du modèle OSI et est représenté par le tableau 2.01.

Préambule (64 bits)	AD (48 bits)	AS (68 bits)	Type (16 bits)	DATA	CRC (32 bits)
------------------------	-----------------	-----------------	-------------------	------	------------------

**Tableau 2.01 :** *Trame ethernet*

Le premier champ contient des valeurs conventionnelles qui servent simplement à indiquer que ce qui suit est bien des données et non pas du bruit. Les champs AD et AS contiennent les adresses sources et destinataires, ces adresses sont implémentées directement sur le matériel et sont définies par les constructeurs eux-mêmes. Le quatrième champ définit le type de données (jeton,

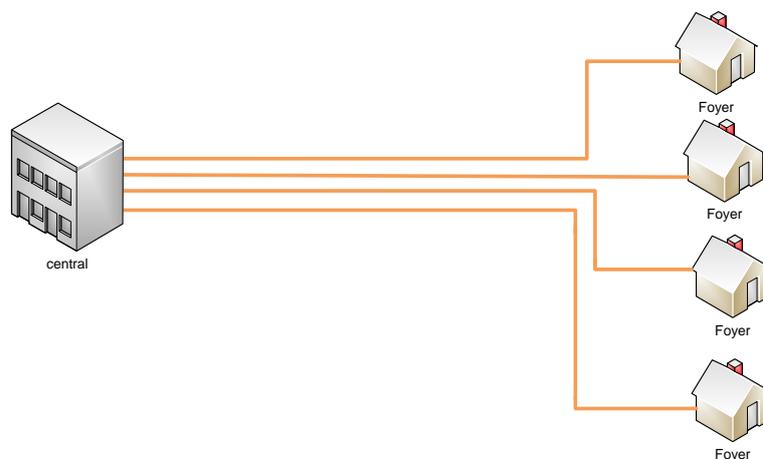
données,...). Le champ DATA est celui qui contient les données encapsulées, il est de longueur variable et peut atteindre 2048 octets. Le champ CRC contrôle la validité de la trame.

### 2.3.2 Architectures

L'architecture de ces réseaux se propose de déployer la fibre de bout en bout du réseau, jusqu'au domicile même de l'utilisateur final. Elle ne fait appel à aucune autre technologie intermédiaire. C'est la technologie la plus intéressante en termes de débit pour l'abonné (pas de partage) et de sécurité de transfert (les données des différents utilisateurs sont séparées), mais la plus onéreuse en termes de coût de déploiement pour l'opérateur. Dans ce cas de figure, deux options sont principalement utilisées qui ne diffèrent que par l'architecture de la liaison terminale en fibre optique. Ici aussi, on découvrira pléthore d'acronymes divers et variés qui recouvrent parfois des notions identiques.

#### 2.3.2.1 Point à point passif

La fibre optique est véritablement déployée de bout en bout depuis les locaux de l'opérateur (OLT Optical Line Termination) ou depuis un nœud de son réseau (NRO nœud de raccordement optique) jusqu'au domicile de chacun des abonnés. Inconvénient pour les opérateurs, chaque fibre étant dédiée à un abonné, il y a autant de fibres que d'abonnés, un handicap lorsqu'il y a peu de place dans les fourreaux ou dans les NRO déjà existants. Un NRO peut en effet recevoir plus de 10 000 lignes. Différents protocoles pour le transport des données peuvent être utilisés mais le plus souvent c'est Ethernet qui est choisi. Il permet des débits de 10 Gb/s avec le standard IEEE.802.3ah. Commercialement, les débits sont limités à des valeurs moindres, par exemple 100 Mb/s symétriques.

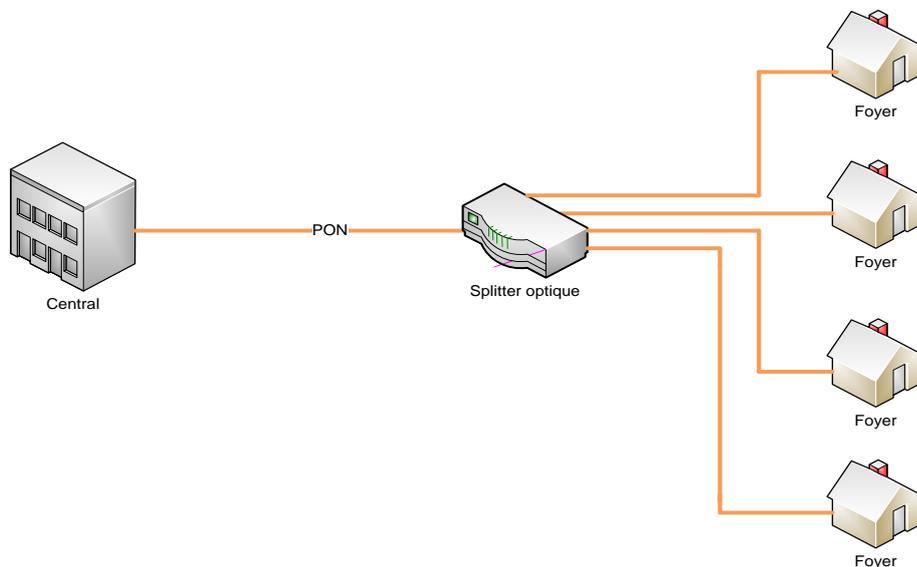


**Figure 2.03** : Architecture point à point

### 2.3.2.2 Point à multipoint passif

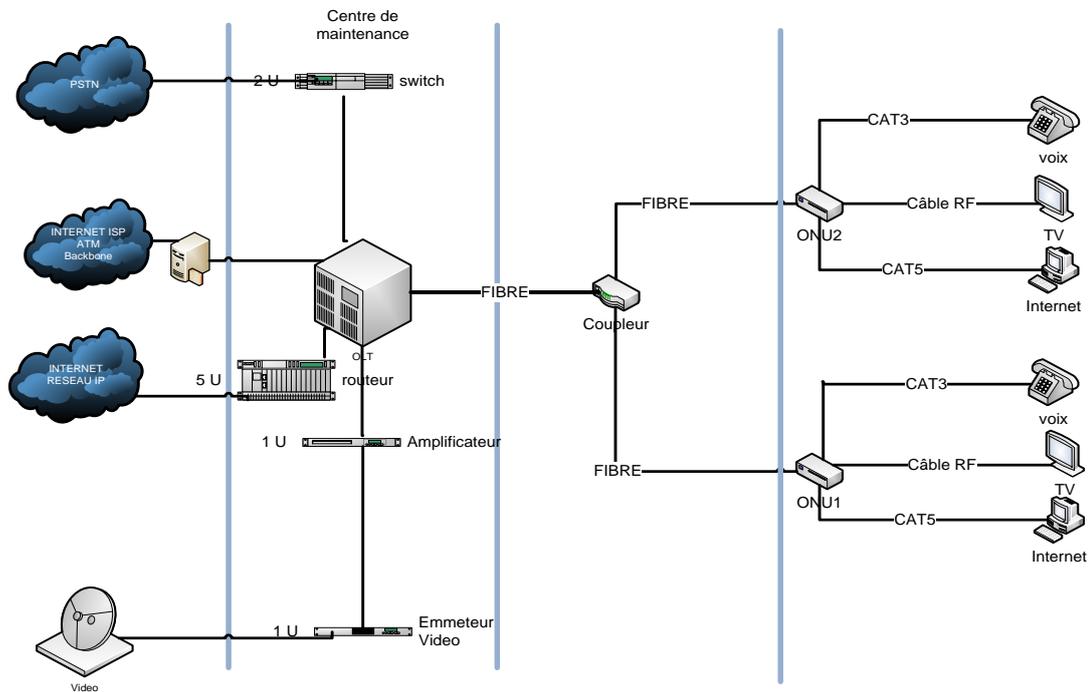
Les inconvénients cités précédemment, ont favorisé le développement d'une seconde option, de type point à multipoint. Ce schéma consiste à globaliser la partie la plus importante du réseau (on utilise une même fibre optique commune pour N abonnés), puis sur la partie terminale, à partir d'un coupleur optique à créer des dérivations en fibre optique en direction de chacun des usagers finaux (ce qui revient alors sur cette partie terminale, à déployer une fibre par usager). Le flux lumineux dans la fibre optique principale est simplement rediffusé et « éclaire » simultanément chacune des fibres terminales : les données transmises sur la partie commune du réseau sont donc diffusées vers la totalité des équipements optiques terminaux chacun d'entre eux n'exploitant que les données qui concernent l'utilisateur qui y est raccordé.

Ces coupleurs optiques sont des composants passifs de faible coût et d'encombrement réduit. Ce type de réseau est souvent désigné sous le terme de PON, le terme de passif s'appliquant au splitter qui ne comporte aucun élément électronique (par opposition à des réseaux ayant une architecture semblable mais qui seraient actifs (AON = Active Optical Network), car comportant des commutateurs électroniques qui nécessitent donc une alimentation électrique). Aujourd'hui, on ne dépasse pas 64 utilisateurs par splitter (en pratique, plutôt 32). Différents protocoles pour le transport des données peuvent être utilisés : APON, BPON...mais les deux principaux sont : le GPON (Giga PON) et le EPON (Ethernet PON).



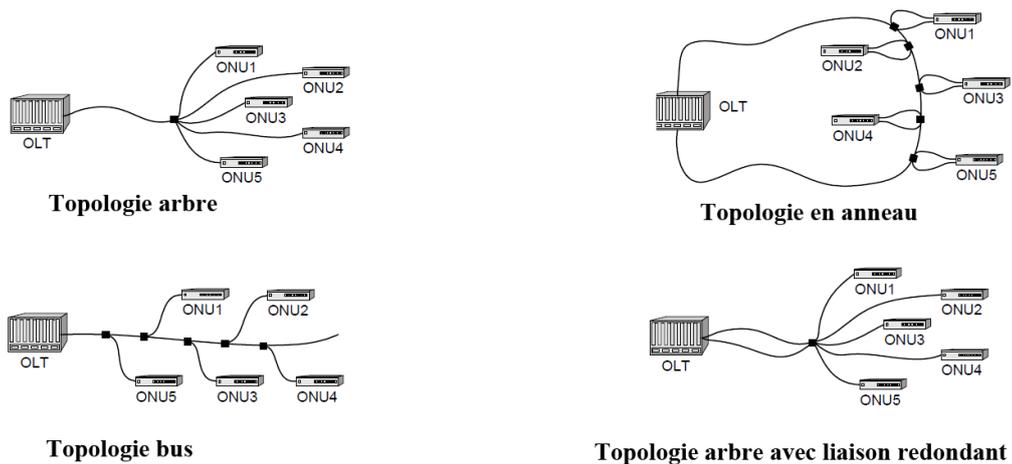
**Figure 2.04** : Architecture point à multipoint

Outre le câble optique, trois éléments principaux constituent un PON : un OLT (Optical Line Terminal), un coupleur (ou splitter) et plusieurs ONU (Optical Network Unit). Typiquement, un réseau PON est représenté par la figure 2.02



**Figure 2.05 :** Schéma global d'un réseau optique passif

Différentes topologies peuvent être également adoptées pour les réseaux de type point à multipoints qui incluent : la topologie en arbre utilisant un coupleur optique 1 : N, la topologie bus ou la topologie en anneau.



**Figure 2.06 :** Topologies PON

Les normes établies par les opérateurs de télécommunications dans le cadre des futurs réseaux d'accès haut débit de type PON, imposent entre autres : un taux de charge de 32 utilisateurs, un débit par utilisateur d'environ 155Mbit/s, et un Taux d'Erreur Binaire (TEB) inférieur à  $10^{-9}$ .

### **2.3.3 Les équipements de l' EPON**

#### 2.3.3.1 Les Fibres optiques

Les fibres optiques sont les éléments clés de cette architecture. Elles sont déployées de bout en bout du réseau d'accès. Au départ de l'OLT on retrouve une fibre monomode unique jusqu'au coupleur, cette fibre est dite de distribution. A la sortie du coupleur les fibres sont généralement multimodes.

#### 2.3.3.2 L'ONU (Optical Network Unit)

Cet équipement figure parmi les équipements utilisateurs, il est placé au sein même des maisons et bureaux souscrit au réseau. L'ONU reçoit les signaux provenant de l'OLT et le converti en signal électrique utilisable (voix, TV, ou données numériques). Cet équipement fournit également les services pour les communications en voie montante (vers l'OLT) utilisant le protocole IP comme les requêtes pour les pages Web, les changements de canaux TV ou bien les communications VoIP. La norme 802.3ah définit les tâches qui incombent à l'ONU pour l'établissement de la liaison comme l'exécution des procédés d'auto-découvertes (attribution de lien logique, extensions, attribution de bande passante), synchronisation avec l'horloge de l'OLT pour la transmission, reçoit le message GATE (développé plus amplement dans la suite du chapitre )de l'OLT et le transmet durant une période déterminé.

#### 2.3.3.3 L'OLT (Optical Line Termination)

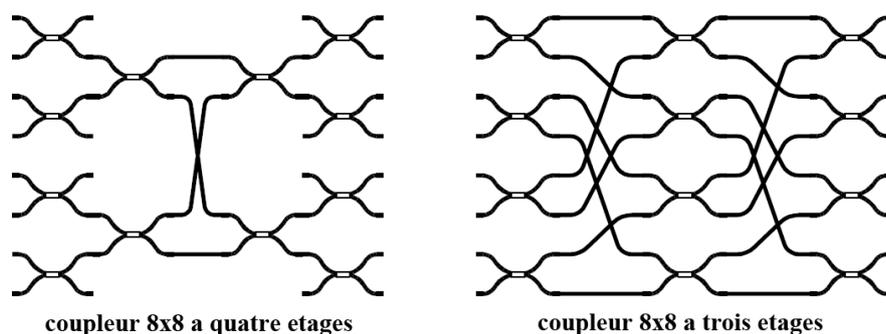
Le terminal de ligne optique réside au sein des installations de l'opérateur de télécommunications et assure trois fonctions suivantes : terminaison du réseau de transport, le brassage des données issues du réseau de transport et du réseau d'accès et la terminaison du réseau d'accès.

Du côté du réseau de transport, le terminal de ligne optique présente des interfaces standardisées. La terminaison du réseau de transport, également appelé interface de service, joue le rôle d'interface entre le PON et le réseau de transport comme par exemple dans le cas d'une interface SDH, l'insertion de cellules ATM dans la partie utile d'une trame SDH et l'extraction des cellules

ATM contenues dans la partie utile d'une trame SDH y sont réalisées. Du côté du réseau d'accès, il présente des interfaces optiques variant en termes de taux binaire (155,52 ou 622,08 Mbps) et en termes de budget optique (pertes optiques dues aux différentes connexions et aux composants passifs) (classes B ou C) suivant le type de terminaison de ligne du réseau d'accès utilisé. La terminaison du réseau d'accès assure l'interface vers le PON en effectuant la conversion optoélectronique du signal : elle effectue la désencapsulation (selon la norme utilisée) de la partie utile de la trame dans le sens montant et l'encapsulation dans le sens descendant. Outre la désencapsulation l'OLT se charge également de générer l'horloge utilisé comme temps de référence durant toute la transmission, de la découverte des nouveaux ONU (contrôle et enregistrement).

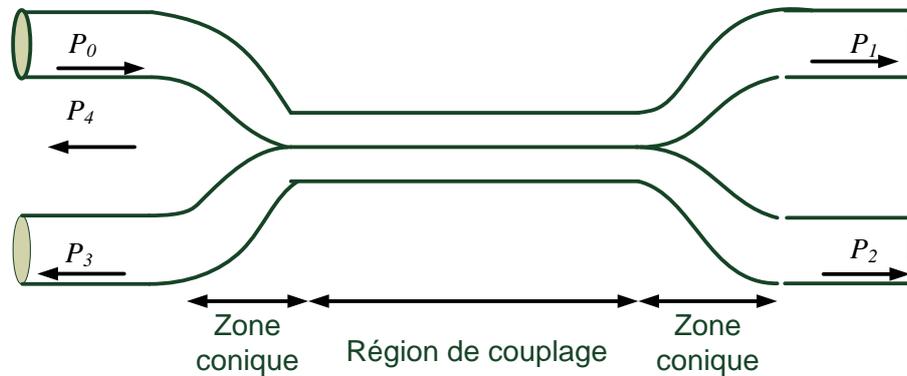
#### 2.3.3.4 Les Coupleurs passifs

Les coupleurs passifs consistent en la combinaison des signaux optiques provenant de plusieurs fibres vers un seul. Dans sa forme la plus simple le coupleur consiste en une fusion de deux fibres optiques, tous les signaux provenant d'une entrée sont partagés entre les deux. Les coupleurs  $N \times N$  sont obtenus en créant des étages de coupleurs  $2 \times 2$  comme le montre la figure (2.02). Trois paramètres caractérisent principalement les coupleurs optiques. Le premier paramètre est la perte de couplage, mesurée en dB, et idéalement autour de la valeur 3dB ; les pertes par insertions résultent des imperfections dans le processus de fabrication, ces pertes sont comprises entre 0.1dB 1dB. Troisième paramètre est la directivité : les coupleurs sont des matériels hautement directifs ils se doivent de transmettre la plus grande partie de la puissance à l'entrée vers une autre entrée. Le plus souvent, les coupleurs sont fabriqués avec une seule entrée ou une seule sortie. Un coupleur avec une entrée est dit diviseur alors que s'il a une seule sortie il est dit : combineur.



**Figure 2.07 :** Structure des coupleurs passifs

Le concept du coupleur passif est assez simple si on prend exemple sur un coupleur 2x2 obtenu en fusionnant les cœurs de deux fibres. Sa structure détaillée illustré par la figure 2.07 présente deux zones coniques intercalées par la région de couplage.



**Figure 2.08 :** Représentation schématique du concept de coupleur 2x2

Lors du passage de la lumière à travers les zones coniques, il y a une baisse significative de l'angle de réflexion dû à la diminution du rapport rayon sur longueur d'onde. A l'entrée du signal dans la région de couplage, une grande partie du signal (dépendant de la dimension de cette région) peuvent se propager en dehors du cœur de la première fibre et passant dans le second puis réfléchi une seconde fois, de cette manière on retrouvera une partie de la puissance en entrée sur une seconde fibre. En posant  $P_0$  la puissance du signal lumineux en entrée,  $P_1$  la puissance à la sortie de la première fibre,  $P_2$  puissance obtenue après couplage aura une expression dépendant de la longueur  $z$  de la région de couplage et d'un coefficient de couplage  $k$  (décrivant l'interaction des champs dans les deux fibres).

$$P_2 = P_0 \sin^2(kz) \quad (2.01)$$

En raison de la conservation de la puissance,  $P_1$  sera la différence entre la puissance en entrée et la puissance couplée.

$$P_1 = P_0 \cos^2(kz) \quad (2.02)$$

Pour spécifier la performance d'un coupleur passif, on indique le pourcentage de la division des puissances optiques provenant des sorties par le rapport de couplage.

$$\text{rapport de couplage} = \left( \frac{P_2}{P_1 + P_2} \right) * 100 \quad (2.03)$$

La perte dans le coupleur 2x2 est considéré comme le rapport entre la puissance en entrée et les puissances en sortie. Exprimé en dB, l'expression de cette perte est donnée par la formule 2.04.

$$E_L = 10 \log \left( \frac{P_0}{P_1 + P_2} \right) \quad (2.04)$$

Une autre type de perte dite perte par insertion caractérise aussi les coupleurs passif. Elle se réfère à la baisse du signal lorsqu'il entre sur le port i et sort par le port j, la perte par insertion se calcule par le rapport entre les puissances entre ces deux points.

$$I_L = \frac{P_i}{P_j} \quad (2.05)$$

### **2.3.4 Technologie d'accès multiple associés**

Dans le sens descendant (de l'OLT à l'ONU), un EPON est un réseau point à multipoint, l'OLT possède la totalité de la bande passante disponible à tout moment. Dans le sens montant, ce même réseau est un réseau multipoint à point : les données provenant de multiples ONU convergent tous vers le même OLT et les propriétés des coupleurs (ou combineurs) passifs sont telles que les ONU ne peuvent se découvrir les uns les autres. De ce fait les flux de données transmis simultanément de ces derniers peuvent se heurter. Ainsi, dans le sens montant, le réseau doit user d'un certain mécanisme pour éviter la collision des données et partager la capacité et les ressources du canal de la fibre de distribution.

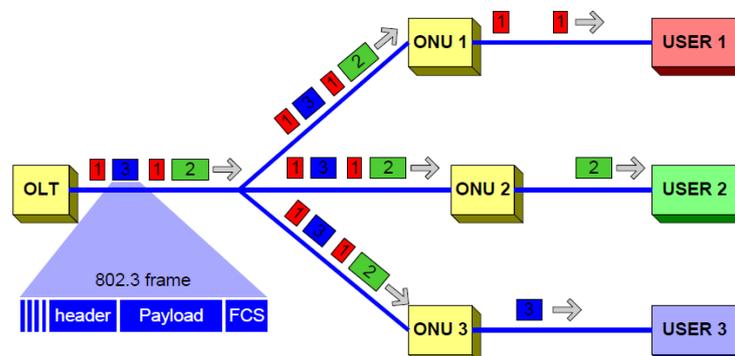
Un moyen de ce faire est d'utiliser la technologie WDM (Wavelength Division Multiplexe), dans lequel chaque ONU opère d'une longueur d'onde différente. L'idée est d'injecter plusieurs trains de signaux numériques de manière simultanée et dans une même fibre. Chaque signal se comporte donc comme s'il était véhiculé par une seule fibre et de ce fait peut être de format ou de débits différents (On peut ainsi trouver des trames transportant des voix dans des trames SDH, des vidéos dans des cellules ATM ou encore des données dans des trames IP) c'est d'ailleurs pour cela que ce type de multiplexage est une technologie de transport indépendante des protocoles utilisés. Dans cette pratique on utilise la bande C et L avec un distance de 0,1nm entre les canaux. Bien que cette technique reste une solution simple avec un coût assez prohibitif pour un réseau d'accès, elle se heurte cependant à de sérieux inconvénients comme la nécessité d'avoir des récepteurs ajustable (pour éviter une multitude de récepteur opérant chacun à une longueur d'onde spécifique).

Une autre approche plus modeste est d'utiliser le TDM (Time Division Multiplexe) où chaque ONU transmet dans un intervalle de temps nommé timeslot. Le principe est de diviser le temps de transmission en petites intervalles pendant lequel chaque ONU transfère ses données vers l'OLT. A la différence de la technologie WDM où les trames sont transmises simultanément sur le même média, dans cette approche les trames sont placés les unes après les autres un peu à la manière d'un train suivi de plusieurs wagon. Le format des trames sont préservé pour chaque time slot, c'est-à-dire que toutes les trames comportent les mêmes champs que dans une trame ethernet normal.

### 2.3.5 Principe et opération de l'EPON

La norme 802.3 définit deux configurations de base pour un réseau Ethernet. Dans l'un, il peut être déployé sur un média partagé et usant protocole du CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect). L'autre configuration, les stations peuvent être connecté au media via un commutateur utilisant une liaison point à point configuré en full-duplex. Les propriétés de l'EPON sont telles qu'il ne peut être classé ni dans la première configuration ni dans la seconde mais plutôt considéré comme une combinaison des deux.

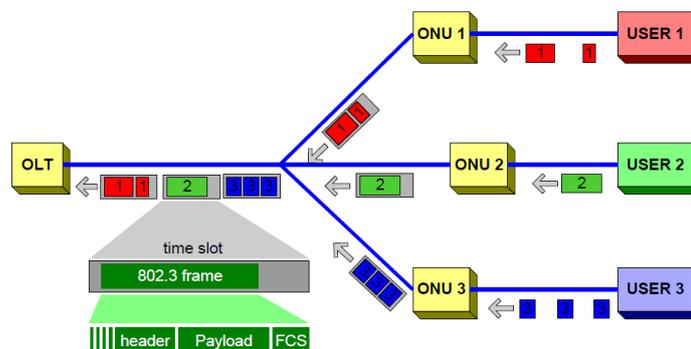
Dans le sens descendant, les trames Ethernet sont transmises à l'OLT à travers un coupleur passif 1:N pour atteindre chaque ONU. N, le nombre d'ONU dans le réseau, est typiquement compris entre 4 et 64 (généralement 32), ici le comportement du réseau s'apparente à la première configuration (mais sans CSMA/CD). De nature, l'Ethernet est une diffusion ; chaque ONU reçoit donc toutes les trames partant de l'OLT mais ne retient que ceux dont leurs adresses MAC sont contenus dans la trame. L'opération normale dans la liaison descendante est simplifiée par la figure 2.09.



**Figure 2.09 :** Transmission des trames ethernet dans le sens descendant

Dans le sens montant (partant des ONU vers l'OLT) les opérations sont plus complexes. En raison de la propriété directionnelle du coupleur passif, chaque ONU doit atteindre le même OLT. Dans ce cas, le comportement du réseau est similaire à la seconde configuration. Le vrai problème, dans ce cas, est que les données transmises simultanément des utilisateurs vers le réseau peuvent entrer en collision. Il est donc nécessaire d'établir le mécanisme d'arbitration afin de partager les ressources. Une technologie similaire au CSMA/CD serait difficile voire impossible à mettre en place puisque les ONU ne peuvent pas détecter les collisions à l'OLT (en raison des mêmes propriétés directive des coupleurs). Pour ce faire, un autre schéma a été adopté ; il se base sur des principes simples : les ONU sont synchronisés à l'aide d'une horloge unique et un time slot capable de véhiculer de multiples trames ethernet est alloué à chacun d'eux. Les ONU doivent stocker les flots de données provenant des utilisateurs dans leurs mémoires tampons jusqu'à l'arrivée du time slot suivant, et les renvois par la suite vers l'OLT à la vitesse du canal. Si les trames dans les mémoires tampons ne sont pas suffisantes pour remplir un time slot on y ajoute 10 bits non significatifs. Un time slot peut être attribué de manière dynamique (TDMA ou Time Division Multiple Access).

Les approches décentralisées permettant l'implémentation de l'allocation dynamique est aussi possible. Dans ce cas les ONU, en envoyant un message spécial, décide à quel moment il veut commencer à transmettre et pour combien de temps. Ce schéma est quelque peu similaire au concept de jeton puisque le prochain ONU qui doit émettre doit surveiller la transmission du précédent et doit chronométrer son envoi jusqu'à la réception ainsi aucune collision n'est possible et il n'y a aucun gaspillage de bande passante. Cette approche semblable à la technique du hub-polling présente un inconvénient majeur : elle exige la communication entre les ONU ce qui impose d'autres contraintes au réseau comme l'adoption de la topologie en anneau.



**Figure 2.10 :** *Trafic en sens montant de l'EPON*

### 2.3.6 Protocole MPCP (*Multipoints Control Protocol*)

Le MPCP est un protocole de signalisation et bien qu'il ne soit concerné par l'attribution de la bande passante il s'avère être très utile pour l'implémentation du DBA (Dynamic Bandwidth Allocation). Le MPCP agit sur la couche liaison de données (plus précisément la sous-couche MAC ou Medium Access Control) et se fonde sur deux types de messages de contrôle Ethernet, les messages GATE et REPORT pour fournir l'infrastructure de signalisation. A ceci s'ajoute trois autres messages durant le processus de découverte automatique des ONU, dans cette phase l'ONU envoie un message REGISTER REQUEST à l'OLT ; ce dernier répond par un message REGISTER et enfin l'ONU accuse réception de ce dernier message par un REGISTER ACK. Tous ces messages ont une structure commune, représenté par le tableau 2.01 et permet le contrôle de chaque élément du réseau grâce à la sous-couche MAC.

en-tête	opcode	time stamp	paramètres obligatoires	paramètres optionnels	En-queue
---------	--------	------------	-------------------------	-----------------------	----------

**Tableau 2.02 :** *Structure des messages de contrôles MAC*

Le champ opcode est utilisé pour distinguer le type de message, le champ time stamp codé sur 4 octets contient la valeur de l'horloge dans le PON au moment où le message passe à la sous-couche MAC ; les ONU doivent mettre à jour leurs horloges dès qu'ils reçoivent un message valide. Les champs de paramètres dépendent de chaque type de message, les paramètres optionnels sont définis par les fournisseurs des matériels et peuvent contenir des paramètres propriétaires ou les identifiants des fabricants.

En opération normale le MPCP reçoit une requête de la couche MAC control client pour transmettre un message GATE vers un ONU particulier spécifiant le moment où ce dernier peut commencer la transmission et la longueur de la transmission. Le MPCP ajoute le time stamp au message avec l'horloge locale. L'ONU dont l'adresse est spécifiée dans la trame reçoit le message et commence à mettre à jour ses registres locaux et de même pour son horloge. Lorsque la réception du « starttimer » est faite l'ONU peut commencer à transmettre. La transmission peut inclure de multiples trames ethernet, dépendant de la fenêtre de transmission qui lui est allouée et des paquets en attente dans les buffers de l'ONU. Les trames ne peuvent pas être fragmentées durant cette transmission c'est-à-dire que si un time slot ne peut contenir la trame, celle-ci sera reportée sur le prochain. Des messages REPORT sont envoyés avec les données au début du time slot et contiennent la taille du prochain time slot que l'ONU désire obtenir en fonction de l'occupation de ses mémoires tampons.

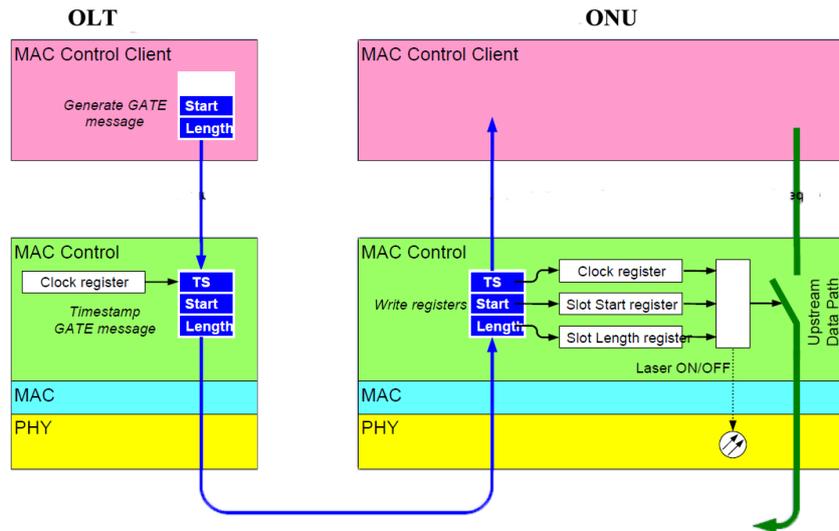
Dans le cas d'un processus d'auto-découverte un seul message GATE sera envoyé vers tous les équipements présents, les ONU répondent par un REGISTER\_REQ pour demander à l'OLT de l'enregistrer sur le réseau, L'OLT renvoi un message REGISTER pour signaler à l'ONU le succès ou l'échec de l'opération. Dans le cas où tout est normal l'ONU répond par un message REGISTER\_ACK avant que la fenêtre de découvertes ne se referme.

### 2.3.6.1 Le message GATE

Le message GATE, codé sur 64 octets, est généré par l'OLT pour assigner des timeslots dynamiquement à l'ONU actif. Pour le GATE les champs d'adresses compris dans l'en-tête sont codés sur 6 octets, ils contiennent les adresses MAC des deux équipements en communication (pour les processus d'auto-découvertes la valeur de l'adresse multicast y sera spécifiée). Le champ ethertype est codé sur 2 octets et peut prendre les valeurs 88 ou 80. Le champ opcode est codé sur 2 octets et prend obligatoirement la valeur 02. Le time stamp est codé sur 4 octets dont 2 octets sont utilisés pour la résolution des horloges. Les trois champs des paramètres obligatoires sont codés respectivement sur 1, 4 et 2 octets, le MSB (Most Significant Bit) du champ number of grant est utilisé pour connaître le type de message selon la valeur qu'il prend : 0 pour les opérations normales et 1 pour le processus d'auto-découverte ; le champ grant start contient la valeur de la période où le laser est autorisé à émettre et la grant length : la période où le laser doit s'éteindre. Le dernier champ contrôle les erreurs durant la transmission à l'aide du CRC (Contrôle de Redondance Cyclique). Le contenu de ce type de message est donné par le tableau 2.02 et sa transmission est illustrée par la figure 2.07.

En-tête	Adresse source
	Adresse destinataire
	Ethertype
Opcode	Opcode
Time stamp	Time stamp
Champ obligatoire	Number of grant
	Grant start
	Grant length
Paramètres optionnels	Champ additionnel
En-queue	CRC

**Tableau 2.03 :** *Structure du message GATE*



**Figure 2.11 :** Illustration de la transmission de message GATE

Régulièrement, L'OLT envoie un message GATE en broadcast pour ouvrir une fenêtre de découverte (intervalle de temps pendant lequel les ONU désirant interagir avec le réseau doivent s'identifier en répondant par un REGISTER\_REQ), en dehors de cette fenêtre de découverte toutes tentatives de s'enregistrer sur le réseau seront rejetées par l'OLT. En opération normale le GATE est envoyé en unicast (c'est-à-dire vers une seule adresse spécifique), un message pour chaque ONU enregistré leur autorise une fenêtre de transmission.

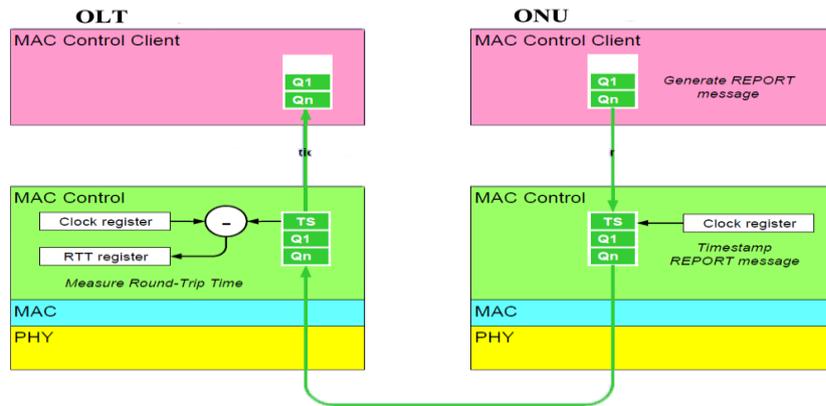
### 2.3.6.2 Le message REPORT

Le REPORT est le message passé par l'ONU à l'OLT de manière périodique en réponse au GATE. Il contient le nombre d'octet requis pour les queues prioritaires et peut être utilisé avec seulement le time stamp. La Structure du REPORT est donnée par le tableau 2.03.

En-tête	Adresse source
	Adresse destinataire
	Ethertype
Opcode	Opcode
Time stamp	Time stamp
Paramètres obligatoires	Report bitmap
	Queue report
Paramètres optionnels	Champ additionnel
En-queue	Zero padding
	CRC

**Tableau 2.04 :** Structure du message REPORT

Les valeurs contenues dans le champ en-tête ne diffèrent pas de celui du message précédent. L'opcode prend la valeur 03. Le champ report bitmap est codé sur 1 octet un bit pour chaque file d'attente rapporté (chaque bit numéro  $i$  de ce champ prend la valeur 0 s'il n'y a pas de trafic numéro  $i$  et la valeur 1 dans le cas contraire). Le champ queue report est codé sur 4 octets et revient autant de fois que le nombre de trame en attente. Toutes les opérations sur le REPPORT sont schématisées par la figure 2.08.



**Figure 2.12 :** Transmission du message REPORT

### 2.3.6.3 Le message REGISTER\_REQ

Ce message est utilisé par l'ONU pour solliciter l'enregistrement sur le réseau. Une description du contenu du REGISTER\_REQ est résumée dans le tableau 2.03.

Champ	Taille en octets
Adresse destinataire	6
Adresse source	6
Ethertype	2
Opcode	2
Time stamp	4
Flags	1
Pending grants	1
Réservé	38
FCS	4

**Tableau 2.05 :** Structure du message REGISTER\_REQ

Les champs adresse destinataire et adresse source contiennent respectivement les adresses MAC de l'ONU en transmission et l'adresse MAC de l'OLT auquel le message s'adresse. L'opcode prend la valeur 00-04. Les informations spécifiques à ce type de message sont contenues dans le

champ Flags qui contient la valeur 1 si l'ONU souhaite s'enregistrer ou 3 s'il souhaite annuler un enregistrement déjà effectué, les valeurs 0, 2 ou 4 à 255 sont non significatives et seront ignorés à la réception.

La transmission de ce type de message ne doit se faire qu'après réception d'un message GATE d'auto-découverte et seulement à l'intérieur de la fenêtre de découverte. Cependant pour minimiser les risques de collision (durant ce processus les collisions sont possibles dans le cas où toutes les ONU répondent simultanément), l'ONU observe un petit intervalle de temps (calculé de manière aléatoire) avant d'envoyer la requête pour l'enregistrement.

#### 2.3.6.4 Le message REGISTER

Ce message est envoyé par l'OLT à l'ONU en formalité pour communiquer le succès ou l'échec de l'enregistrement sur le réseau. Il renferme l'horloge que l'ONU doit utiliser pour toutes les futures transmissions et le lien logique qui lui est attribué : on nomme familièrement LLID (Logical Link Identifier) une entité qui a reçu un message GATE et a répondu un message REPORT, c'est le message REGISTER qui se charge d'attribuer les éventuels LLID à l'ONU. La structure de ce type de message, représenté dans le tableau 2.04, n'est que légèrement différente des autres. Il utilise comme 00-05 comme valeur de l'opcode. Pour le champ Flag le second bit est utilisé pour demander à l'ONU de se ré-enregistrer sur le réseau, le bit numéro 2 pour demander le changement de port, les bits 3 et 4 informent l'ONU sur l'état de l'enregistrement qu'il vient d'effectuer : le bit numéro 3 pour le succès et le 4 pour l'échec.

Champ	Taille en octet
Adresse destination	6
Adresse source	6
Ethertype	2
Opcode	2
Timestamp	4
Assigned LLID	2
Flags	1
Sync time	2
Echoed pending grant	1
Pad	34
FCS	4

**Tableau 2.06 :** *Contenu du message REGISTER*

### 2.3.6.5 Le message REGISTER\_ACK

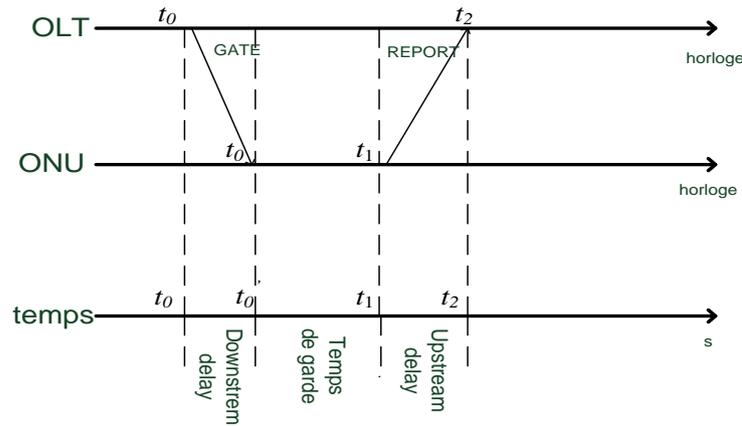
Utilisé par l'ONU pour accuser réception du REGISTER qu'il a reçu précédemment. Cette trame est identifiée par la valeur de son opcode qui est 0006 et contient l'intégralité des champs sync time et assigned LLID du message REGISTER. Le champ Flag contient la valeur 0 pour signaler l'échec de l'enregistrement et 1 si ce dernier a été effectué avec succès, les valeurs 2 à 255 sont réservés et seront ignorés à la réception. Le tableau 2.06 montre l'intégralité de la structure du message.

Champ	Taille en octet
Adresse destination	6
Adresse source	6
Ethertype	2
Opcode	2
Timestamp	4
Flags	2
Echoed assigned port	1
Echoed sync time	2
Pad	35
FCS	4

**Tableau 2.07 :** *Structure du message REGISTER\_ACK*

### 2.3.6.6 Mesure du RTT (Round-Trip-Time)

Le RTT, nommé également round-trip delay, est le temps requis pour qu'une impulsion ou bien une trame partant d'une source spécifique, atteigne sa destination et revient à la source (c'est-à-dire la somme des délais de transmission de l'utilisateur vers le réseau et du réseau vers l'utilisateur). Le résultat dépend de divers facteurs incluant notamment le débit de la source d'information et de la nature du canal de transmission (fibre, paire cuivrées...). Le RTT est l'une des facteurs principaux influant sur le temps de latence (durée entre la requête émis par un client et la réception des données), et puisqu'il ne peut être inférieur à la durée totale mis par le signal pour se propager dans le canal, un minimum théorique lui est imposé. Pour l'EPON le processus de mesure est illustré par la figure 2.13.



**Figure 2.13 :** Principe du mesure du RTT

Dans le cas de l'EPON, la mesure du RTT prend une place prépondérante puisque celui-ci est utilisé pour connaître la dimension de la fenêtre de transmission qui sera alloué à un ONU particulier. Au final, la longueur de cette fenêtre sera calculée comme il est indiqué dans la formule 2.06.

$$W = T_{size} + RTT_{max} - RTT_{min} \quad (2.06)$$

Le composant  $T_{size}$  représente ici la taille de la fenêtre de transmission qui peut être utilisé par l'ONU pour transférer ses données. Pour le réseau EPON en particulier le RTT se calcule à partir de la valeur des champs du message GATE et du message REPORT, c'est-à-dire que si l'OLT envoi le GATE au moment  $t_0$  il marquera cette valeur dans le champ time stamp du message, L'ONU en le recevant mettra à jour la valeur de son horloge et, après un temps de garde, commencera à émettre le message REPORT au moment  $t_1$  qui sera également marqué dans le champ time stamp. Finalement, l'OLT recevra le REPORT au moment  $t_2$  et peut commencer à calculer le RTT en soustrayant, dans un premier temps, le moment où il a envoyé le message GATE et celui où il reçoit le message REPORT. Ensuite il enlèvera la valeur du temps de garde qui sera égale à la différence entre les contenus des champs times stamp des deux messages. Ce processus est concrétisé par la formule 2.07.

Au final on obtiendra le RTT exactement égale à la différence du moment où l'OLT reçoit le REPORT et la valeur contenue dans le time stamp de ce message. Pour plus de commodité l'OLT ne retiendra que cette opération pour le calcul de ce paramètre.

$$RTT = (t_0 - t_2) - (t_1 - t_0) = t_2 - t_1 \quad (2.07)$$

## **2.4 Avantages de l'EPON**

L'EPON hérite directement à la fois des avantages d'un réseau ethernet et d'un réseau de type PON. Face à l'ATM l'ethernet possède un avantage de taille puisque une erreur dans la cellule ATM invalide tout le datagramme IP. De plus l'ethernet est la technologie la plus utilisée dans le monde, il est parfaitement s'interconnecter avec différentes équipements et différents protocoles.

Du fait que l'EPON soit un réseau de type PON, il possède des qualités essentielles qui sont : la largeur de sa bande passante et la qualité de service qu'il peut offrir.

## **2.5 Conclusion**

L'EPON est une technologie basée sur le type optique passif. Cette technique faisant partie de la famille des FTTH (Fiber to the home ou littéralement fibre jusqu'à la maison) offre une facilité d'implémentation c'est pourquoi l'EPON est un choix judicieux pour les opérateurs. D'autres solutions entièrement optique existent comme l'APON (ATM PON) qui est un réseau de type PON mais utilisant l'ATM en protocole de niveau 2 le BPON (Broadband PON) mais l'évolution logique de la technologie EPON serait tout logiquement : le GEPON (Giga-Ethernet PON) qui est un réseau EPON mais usant de divers mécanismes pour accroître la bande passante et offrir ainsi plus de 10GBps.

## **CHAPITRE 3:**

### **MODELE ANALYTIQUE ET PLAN DE CONTROLE QoS POUR L'EPON**

#### **3.1 Introduction**

Lors de l'étude et de la mise en place d'un réseau de télécommunication, on ne peut pas réellement parler de stratégie d'allocation des ressources sans étude préalable de la qualité de service. En effet, la QoS (Quality of Service), qui elle-même nécessite une étude poussée du volume des trafics dans le réseau, est un élément clé pouvant influencer les décisions sur la gestion des ressources. Pour l'EPON en particulier, de nombreux algorithmes pour l'allocation dynamique de bande passante ont été proposés. La présentation d'un plan de contrôle QoS pour l'EPON (le plus adopté à ce jour) fera l'objet de ce chapitre.

#### **3.2 Introduction à la notion de QoS**

##### **3.2.1 Généralités**

La QoS est la capacité à séparer le trafic ou à différencier différents types de trafic afin de traiter certains flux différemment d'autres flux. L'enjeu du QoS repose sur la mise en place de mécanismes pour s'assurer la disponibilité des applications, c'est-à-dire le contrôle des paquets perdus au dépend de sa simplicité, sa fiabilité et son universalité. Quatre paramètres techniques sont à prendre en compte dans la qualité de service notamment : la disponibilité du réseau, le temps de réponse, le débit garanti par flux, la stabilité des paramètres précédents.

Du point de vue réseau, différents raisonnements définissent le QoS, toutes les couches traversées introduisent des délais : emballage/déballage, gestion de PDU, attente en file (in et out), commutation de contexte processeur pour le traitement des piles protocolaires, interruptions avec interface réseau.

- Niveau Physique : raisonnement en bande passante, on cherche les plus hauts débits, une fiabilité intrinsèque, et si possible des propriétés temporelles.
- Niveau liaison : raisonnement en débit, et en allocation de ressources d'accès, le contrôle des flux et la gestion des ressources.

- Niveau réseau : raisonnement en débits à travers plusieurs réseaux, allocation et gestion des ressources (contrôle de congestion, approche de type connexion préférée, gestion des pannes de nœuds, gestion de file, approches intserv diffserv).
- Niveau transport : Raisonnement en contraintes temporelles de bout en bout, de processus applicatif à processus applicatif allocation de ressources mémoire (tampons) avec mécanisme zéro copie, reprise sur erreurs suivant le type de trafic.

Afin de soutenir cette qualité de service, trois modèles, dont la standardisation a été effectuée par l'IETF (Internet Engineering Task Force), se sont imposés. La première est l'Intserv (Integrated Service), qui repose sur un mécanisme de réservation des ressources. Dans la pratique, il dédie une partie de la bande passante pour assurer l'acheminement des messages prioritaires. Sa grande complexité est cause que ce modèle n'est pas vraiment adapté à un réseau de grande envergure et de ce fait très peu utilisé.

Le modèle Diffserv (Differentiated Services) a été adopté pour palier à ce problème. Ce modèle assure une distinction des paquets par classe de flux. Les données sont donc marquées au moyen d'un champ ToS (Type of Service, champ réservé dans l'en-tête dans un datagramme IP) qui fixe les priorités, chaque nœud du réseau apporte un traitement différencié en fonction de la classe de service du paquet. Par ailleurs, c'est ce modèle que l'on adoptera dans la suite du chapitre.

Le modèle MPLS (MultiProtocol Label Switching) est le modèle le plus récent. Il permet de véhiculer davantage de trafic IP à des vitesses de transmission très élevées. Le MPLS reprend le système de classe de service proposé par le Diffserv mis à part que dans son cas les paquets sont directement étiquetés à l'entrée du réseau et que leur chemin sont déjà prédéfinis.

Une bonne qualité de service sur le réseau EPON suppose une implémentation correcte d'un plan de contrôle efficace.

### ***3.2.2 Modèle Diffserv appliqué à l'EPON***

Malgré que les réseaux d'accès optiques disposent d'une très large bande passante, les services résidentiels qui y sont implémenté auront vite fait de le rendre insuffisant. Le tableau 3.01 montre quelques applications et les débits requis pour chacun d'eux.

Applications	Débits (Mbps)
Vidéo haute définition	20
Vidéosur IP standard	7
Web	1
Internet	1
Jeux en ligne	2
Vidéo conférences	2
Audio haute qualité	0.5

**Tableau 3.01:** *Débits requis pour chaque applications sur le réseau*

Un plan de contrôle efficace doit donc être implémenté sur le réseau pour assurer le transport des flux provenant de ces différentes applications.

La gestion des ressources et l'ordonnement adéquat des différentes classes de services jouent un rôle capital dans l'étude de la qualité de service dans un réseau EPON. Le modèle DiffServ fournit une méthode pour classifier les trafics dans le réseau. La différenciation de services consiste, dans un cas de congestion, à reporter les pertes de paquets sur certaines classes de trafic, pour en protéger d'autres.

Dans ce modèle ci, le trafic sera subdivisé en trois niveau de priorités dont : la classe Expedited Forward (EF), l'Assured forwarding (AF) et le Best Effort (BE).

### 3.2.2.1 La classe Expedited Forwarding

L'objectif de la classe Expedited Forwarding est de fournir un service de transfert équivalent à une ligne dédiée à travers le réseau d'un opérateur.

Le contrat porte sur un débit constant. Les paquets excédentaires sont lissés ou rejetés à l'entrée pour toujours rester conforme au contrat. L'opérateur s'engage à traiter ce trafic prioritairement. Pour que le service soit performant, il faut qu'il ne présente qu'une faible partie du trafic total pour qu'aucun paquet marqué EF ne soit rejeté dans le cœur du réseau.

Pour atteindre ces performances, les paquets d'un service EF ne devraient pas subir de file d'attente ou passer par des files de très petite taille et strictement prioritaires. De plus, les flux de cette classe est très sensible aux pertes, la variation de délai de transit n'est pas supporté et la bande passante garantie.

### 3.2.2.2 La classe Assured Forwarding

La classe Assured Forwarding définit trois priorités décrivant l'ordre de rejet en cas de congestion. Le marqueur utilisé actuellement est basé sur deux *tokenbuckets*: si le trafic est conforme au deux, les paquets sont marqués en vert, s'il n'est conforme qu'à un des deux les paquets seront marqués en orange et s'ils ne sont conformes à aucun, ils seront marqués en rouge. Les paquets marqués en rouge, ont une probabilité de rejet plus importante que les oranges.

Cette classe est peu sensible au délai de transit mais requiert tout de même une bande passante garantie.

### 3.2.2.3 La classe Best Effort

Le principe du Best Effort se traduit par une simplification à l'extrême des équipements d'interconnexion. Quand la mémoire d'un routeur est saturée, les paquets sont rejetés.

Le principe de bout en bout de l'Internet est aussi adopté pour le contrôle de flux grâce à différents algorithmes comme le *Congestion Avoidance* introduit dans TCP. Les principaux inconvénients de cette politique de contrôle de flux sont un trafic en dents de scie composé de phases où le débit augmente puis est réduit brutalement et une absence de garantie à long terme.

Dans l'architecture Diffserv, le traitement différencié des paquets s'appuie sur 3opérations fondamentales :

- la classification des flux en classes de services
- l'introduction de priorités au sein des classes (*Scheduling*)
- et la gestion du trafic dans une classe donnée (*Queue management*).

La deuxième opération est assurée par les algorithmes d'ordonnancement servant à contrôler la distribution de ressources entre les classes de service. On peut donner en exemple 2 types d'ordonnanceurs : **PQ** (*Priority Queueing*) et **WRR** (*Weighted Round Robin*).

Le modèle PQ utilise plusieurs files d'attente logiques. Les paquets classifiés sont mis dans une file d'attente correspondant à la valeur du DSCP (Diffserv Point Code). Les files sont ensuite servies suivant un algorithme spécifique. Celle qui contient les paquets avec la plus haute priorité sera favorisée par rapport aux autres files.

Le modèle WRR utilise aussi plusieurs files d'attentes mais qui sont servies à tour de rôle. A chaque tour, on transmet un nombre de bits (ou de paquets) correspondant au poids de la file.

### 3.3 Plan de contrôle QoS pour l'EPON

#### 3.3.1 Modèles gestion des ressources : DBA

Le concept d'allocation dynamique de bande passante repose sur l'échange d'information sur l'occupation des files d'attente entre la terminaison de réseau optique et la terminaison de ligne optique. De cette manière, la terminaison de ligne peut adapter sa fréquence de transmission de permis (permis d'émettre à un moment déterminé) et de facto, la bande passante en voie montante de chaque terminaison de réseau.

Un algorithme efficace permettant une allocation dynamique des ressources est la clé pour permettre, aux réseaux de type PON, l'application du modèle Diffserv. Avant d'assigner une fenêtre de transmission quelconque, différents paramètres doivent être pris en compte. Comme pour la classe EF le délai est se doit d'être une priorité. La classe AF demande un certain niveau d'assurance sur le fait que les trames doivent bien arriver à destination et la classe BE qui n'a pas de contrainte face à la QoS. Deux messages du protocole MPCP sont impliqués dans l'allocation dynamique des ressources : le message REPORT est utilisé par l'ONU périodiquement pour communiquer à l'OLT la longueur de la file en attente dans ses mémoires. En face, l'OLT communique à l'ONU le temps de transmission assigné à chaque classe de service via le message GATE. Il existe deux types d'algorithme d'allocation des ressources : dans une allocation statique à chaque ONU (ou chaque classe) sont assigné une bande passante de longueur fixe. En allocation dynamique une bande passante proportionnelle à la longueur de chaque file leur est allouée.

##### 3.3.1.1 DBA avec priorité et ordonnancement de la transmission

Dans cet algorithme une bande passante proportionnelle à celui qui a été demandée est assignée à chaque classe de service située au premier étage. En considérant un système avec N ONU ayant chacun trois classes de services (donc trois files). La bande passante allouée  $B_{i,c}$  est un pourcentage de la bande passante totale requise et allouée à la classe c et l'ONU numéro i.

$$B_{i,c}^{assigned} = \frac{B_{i,c}^{requested}}{\sum_{i,c} B_{i,c}^{requested}} \quad (3.01)$$

Dans une amélioration de la performance de cet algorithme, pour un cas de trafic élevé avec une haute priorité, chaque ONU a une chance de transmettre les trames de la classe EF au début de chaque cycle.

### 3.3.1.2 DBA avec une allocation minimum garantie

Cette approche est un compromis entre un schéma d'allocation statique et dynamique. A chaque classe est assignée une part minimale de la bande passante qui est agréé au niveau Service Level Agreement entre l'opérateur et l'utilisateur. Cette quantité minimale dépend de la priorité des trafics. La bande passante allouée à une classe  $c$  sur l'ONU numéro  $i$  est donc donnée par la formule 3.03.

$$B_{i,c}^{assigned} = B_{i,c}^{min} + \frac{B^{avail}}{B^{excess}} (B_{i,c}^{requested} - B_{i,c}^{min}) \quad (3.02)$$

Les valeurs de  $B^{min}$ ,  $B^{avail}$  et  $B^{excess}$  nécessaire à l'établissement de la formule 3.03 sont calculées à partir des formules 3.04, 3.05 et 3.06.

$$B^{min} = \sum_{i,c} B_{i,c}^{min} \text{ avec } B^{min} < 1 \quad (3.03)$$

$$B^{avail} = 1 - B^{min} \quad (3.04)$$

$$B^{excess} = \sum_{i,c} B_{i,c}^{requested} - B^{min} \quad (3.05)$$

Comme dans le DBA avec priorité, pour minimiser le délai et gigue critique dans la classe EF, les trames de ces classes sont ordonnées au début de chaque cycle.

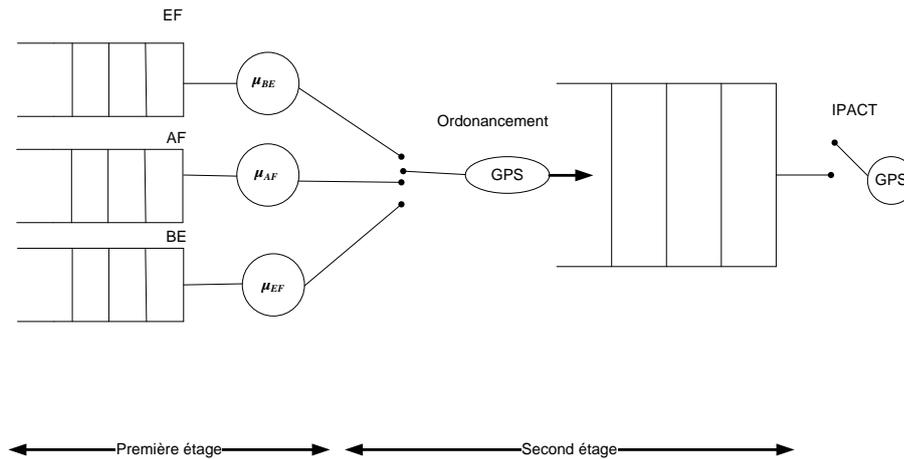
### 3.3.2 Ordonnement des classes de services au niveau de l'ONU

Le modèle ONU, représenté par la figure 3.01, consiste en deux étapes séparées. Le premier étage se divise en trois files d'attente contenant trois classes de services avec des niveaux de priorités différentes, alors que le second étage contient une seule et unique file résultant de l'ordonnement des paquets effectué à l'aide d'une stratégie de partage généralisé (GPS).

Chaque file a une part de service que l'on notera  $\sigma_c$ . Pour distribuer de manière appropriée la bande passante entre les trois classes, on définit la part de chaque classe de service en considérant la charge.

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c}{\gamma} * \delta_c \quad (3.06)$$

$\gamma_c$  désigne la charge du trafic dans la classe  $c$  ( $c=EF, AF, BE$ ) et  $\gamma$  la charge globale du trafic (c'est-à-dire la somme des charges dans chaque classe),  $\delta_c$  est le poids assigné à la classe  $c$  établi suivant sa priorité.



**Figure 3.01 : Modèle de l'ONU**

Notons que dans la formule 3.02 aucun des termes ne dépend de l'index  $i$ , ce qui traduit que cette formule est indépendante du numéro de l'ONU. La stratégie du GPS est de partager la bande passante allouée simultanément entre les files non vides des différentes classes de services, la règle de décision est donnée par la formule 3.07.

$$\mu_c^i = \frac{\sigma_c}{\sum_{c \in Q} \sigma_c} \Lambda_{MIN}^i \quad (3.07)$$

$Q$  est ici l'ensemble des files non vides.  $\Lambda_{MIN}^i$  est la bande passante minimale garantie son expression est donnée par la formule 3.08.

$$\Lambda_{MIN}^i = \frac{8 * W_{MAX}^i}{T_{MAX}} \quad (3.08)$$

$W_{MAX}^i$  est la longueur maximale de la fenêtre de transmission.  $T_{MAX}$ , dont la valeur sera définie dans la suite du chapitre, est le temps maximal de cycle.

### 3.3.3 IPACT (*Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time*)

#### 3.3.3.1 Définition de l'IPACT

L'IPACT est un schéma proposé pour l'EPON en vue de mettre en œuvre l'allocation dynamique des ressources dans le réseau. Ces ressources sont allouées en fonction de l'occupation des mémoires tampons rapportée par l'ONU. L'IPACT fournit un multiplexage statistique et l'usage efficace du canal dans le sens montant. Le principe consiste à choisir l'ONU à servir de manière périodique : l'ONU numéro  $i$  pendant que l'ONU numéro  $i-1$  est en train de transférer ses données

vers l'OLT, des messages lui indiquant qu'il sera le prochain sont échangés ainsi il peut préparer ses données pour une transmission imminente, de cette manière on peut minimiser le temps de transition. Par convention, une trame qui n'est pas transmise durant la fenêtre de transmission sera remise au prochain cycle. Pour éviter qu'un ONU ne monopolise le canal avec un grand volume de données une valeur maximale de la fenêtre de transmission est imposée à chaque ONU, le choix spécifique de la dimension de cette fenêtre détermine le temps de cycle maximal dans les conditions de trafic élevé.

$$T_{MAX} = \sum_{i=1}^N \left( G + \frac{8 * W_{MAX}^i}{R_U} \right) \quad (3.09)$$

Le terme G représente ici un temps de garde observé par l'EPON calculé sur le temps mis par l'OLT pour procéder à deux opérations physiques, d'autre part quelques fluctuations peuvent être remarquées sur la valeur du RTT.  $W_{MAX}^i$  et  $R_U$  traduisent respectivement la fenêtre de transmission maximale imposée à l'ONU<sub>i</sub> et le débit du canal de transmission en bits par seconde. Bien que sur la valeur obtenue dans la formule 3.01 n'est atteint que si elle est nécessaire à l'ONU, dans le cas d'un faible volume de données provenant de ce dernier, une fenêtre bien plus courte lui est assignée afin de garantir un temps de cycle plus court. En conséquence, le temps de cycle n'est pas statique mais adapté, à chaque instant, à la charge du réseau.

### 3.3.3.2 Modèle de trafic

Considérons un système porté sur l'IPACT comportant N ONU servis par un seul OLT de manière cyclique. On supposera la capacité de chaque file infinie. Les trames arrivent dans les files suivant la loi de Poisson avec un taux  $v_i$  avec  $i=1, 2, 3, \dots, N$ . Ces trames sont servies dans l'ordre où ils sont arrivés avec un temps de service exponentiel avec une moyenne statistique  $E[B_i]$  et un second moment  $E[B_i^2]$ . Le temps de garde est le temps mis par le système pour passer de la file i à la file i+1 c'est-à-dire le moment où la transmission de la file i s'arrête et la transmission de la file i+1 commence. Ce temps de garde est caractérisé par sa moyenne  $E[S_i]$  pour la file i et une totale  $E[S]$  qui est égale à la somme des temps de garde observé par le système durant un cycle.

Le taux d'occupation du système  $\rho_i$  (le temps de garde exclus) est défini par la formule 3.08. Le taux d'occupation total  $\rho$  est la somme de tous les taux observé pour chaque file. La condition nécessaire à la stabilité du système est que  $\rho < 1$ .

$$\rho_i = v_i E[B_i] \quad (3.10)$$

Pour que le système soit stationnaire, le temps de cycle  $T$ , qui est le temps mis par le l'OLT pour servir deux fois successivement une même file ne dépend pas de la file. Sa moyenne est simplement la solution de l'équation 3.09.

$$E[T] = \sum_{i=1}^N (\rho_i E[T] + E[S_i]) = \rho E[T] + E[S] \quad (3.11)$$

Cependant, on sait que cette valeur ne sera jamais inférieure à la valeur du RTT d'où en tenant compte de cette contrainte on trouve la valeur attribué au temps de cycle.

$$E[T] = \begin{cases} \frac{E[S]}{1 - \rho}, & \text{si } \frac{E[S]}{1 - \rho} > RTT \\ RTT, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.12)$$

### 3.3.4 Implémentation du « Conformance control »

Une approche bien plus intéressante est d'associer les algorithmes DBA avec le trafic conformance mechanism (TCM) pour une vérification de conformité dans l'exécution du SLA (Service Level Agreement) négocié. Cette approche rassemble les caractéristiques suivantes :

- Force l'ONU à se conformer avec le SLA en vérifiant la conformité du trafic. L'OLT filtre les requêtes et prend en compte un schéma d'ordonnement précis lorsqu'il calcule la dimension de la fenêtre de transmission à allouer.
- Il permet des temps de cycle variable tout en imposant une valeur limite sur le temps maximale de cycle  $T_{max}$ .
- Basé sur un mécanisme de priorité inter-ONU c'est-à-dire l'algorithme gère tout d'abord une classe de service avant de servir les classes avec une priorité moins élevée.
- Il commande directement l'ONU au moyen de l'OLT c'est-à-dire chaque ONU applique exactement sa bande passante alloué à chaque classe de service. Cette communication se fait via le message GATE.

L'idée du mécanisme de contrôle de conformité du trafic est simple : au lieu d'introduire un schéma d'ordonnement pour la liaison montante, l'OLT filtre directement les requêtes d'allocation de ressource rapportée par le message REPORT et tient compte d'un schéma d'ordonnement virtuel. Le plus grand avantage de cette technique est que si l'ONU filtrait ses requêtes lui-même et ne demandais l'allocation que pour les trafics de conformité, l'OLT n'aurait pas pu tirer profit des moments où aucune transmission ne se fait pour écouler les trafics excédentaires.

### **3.4 Conclusion**

L'importance de ces algorithmes repose sur le fait que la charge du réseau est assez lourde. Les différents services imposent de fortes contraintes comme Le domaine de l'implémentation des plans de contrôle de l'EPON reste encore à élargir. Des recherches portant sur les algorithmes DBA et IPACT sont encore en phase expérimentale. Néanmoins les modèles proposés ont un rendement élevé même en cas de trafic avec de volume élevé et simultanément sur de multiples ONU.

## CHAPITRE 4: LES SERVICES ENVISAGES SUR L'EPON

### 4.1 Introduction

Bien qu'un réseau d'accès utilisant la fibre comme média physique de transmission soit difficilement justifiable dans une époque où les paires cuivrées sont en bonne état et encore très utilisés. Les services font la différence entre les hauts débits et les très hauts débits. En effet, les réseaux de types PON sont fortement indiqués dans le cas du service triple play. Ce chapitre développera plus amplement les différents composants de cette offre sur un accès EPON.

### 4.2 Présentation du triple play

Le triple play est une offre combinant à la fois voix, vidéo et data. L'expression triple play n'est qu'un terme marketing qui désigne la prestation sur les trois services : transfert de données haut débit, télévisions (Vidéo à la demande VOD ou broadcaste régulier) et la téléphonie, tout ceci sur une seule connexion à large bande. L'architecture générale de cette offre est représentée par la figure 4.01.

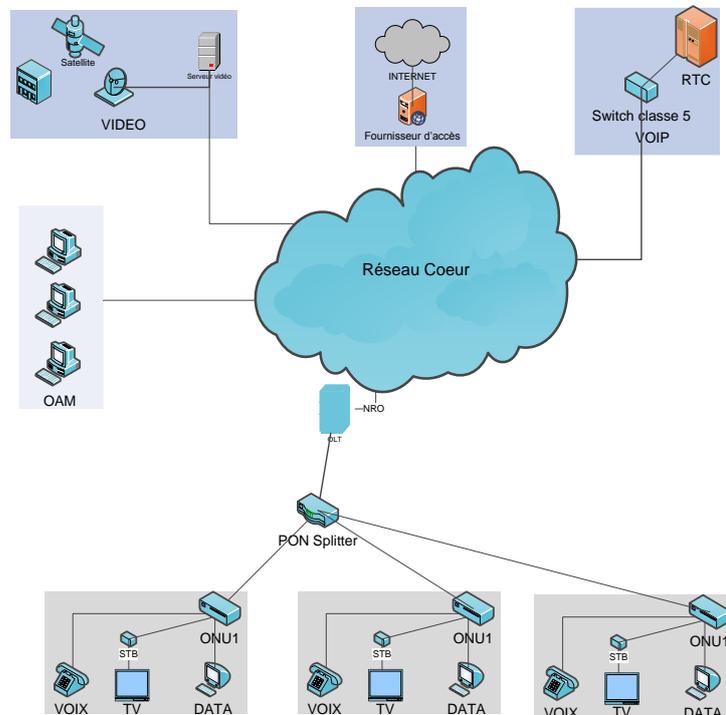


Figure 4.01 : Architecture de l'offre triple play

Un système triple play basique se compose des fournisseurs de services (vidéo, liaison vers RTC ou réseau téléphonique commuté et un fournisseur d'accès internet), d'un réseau cœur, du réseau d'accès et les équipements au niveau de l'utilisateur (ONU, step-to-box...). Un centre d'exploitation et de maintenance dans l'architecture représenté par la figure 4.01 qui se charge des facturations et de la surveillance de l'état du réseau. Chaque élément de cette architecture joue un rôle important dans l'approvisionnement de ces services à travers le réseau.

Pour la vidéo, le *head-end* est l'équipement placé au niveau des fournisseurs de ce service utilisé en tant que source des contenus vidéo. Il renferme tous les flux provenant des stations d'émission TV, des serveurs VOD (Vidéo on Demand) et plusieurs autres. Puis ces flux sont encapsulés dans des paquets IP.

Le réseau cœur est constitué de multiples switch et de lignes de transmissions formées de fibres à hautes capacités. Le protocole utilisé peut être divers mais les principaux sont l'ATM et l'Ethernet sur SONET.

Le DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) est un équipement inséré entre le réseau cœur et l'accès. Ce dernier se charge du multiplexage des flots de données (vidéo, voix ou data) partant du cœur vers l'accès.

L'accès est le dernier kilomètre séparant les opérateurs et les abonnés. Il consiste en l'utilisation de paires cuivrées ou des fibres optiques. L'ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), le VDSL (Veryhigh-speed Digital Subscriber Line) et les réseaux de types PON sont les technologies les plus utilisées actuellement.

Outres les équipements réseaux (ONUs) un appareil nommé step-to-box (STB) est implanté chez l'utilisateur pour lui permettre de visualiser les flux vidéos sur son téléviseur. La principale mission de cet outil est tout d'abord de débrouiller le signal, ensuite il est chargé de désencapsuler le paquet IP pour en extraire le flux MPEG et de le délivrer au décodeur qui décompresse le signal et l'envoi vers le poste TV. Lorsque l'utilisateur sollicite un programme IPTV en particulier une des deux choses suivantes se présente : si le programme est en multicast (c'est-à-dire envoyé à plusieurs abonnés simultanément) le STB effectue une requête pour avoir une copie du flux multicast qui doit se trouver dans le réseau, si le signal est en unicast, la requête doit parvenir directement jusqu'au head-end. Le IP phone figure également comme un équipement spécifique du service, ces postes téléphoniques spécialisés ressemblent à des postes ordinaires, cependant à la place d'un connecteur RJ-11 ils ont des prises ethernet RJ-45.

### 4.3 Cahier de charge des services

L'offre triple play peut distribuer 50 à 150 chaînes TV, un service VOIP et une connexion internet haut débit. L'offre internet est certainement le plus simple à fournir car il est habituellement rendu en « best effort » et, de ce fait, il peut tout à fait s'adapter face aux contraintes imposées par les services avec lesquels il doit coexister.

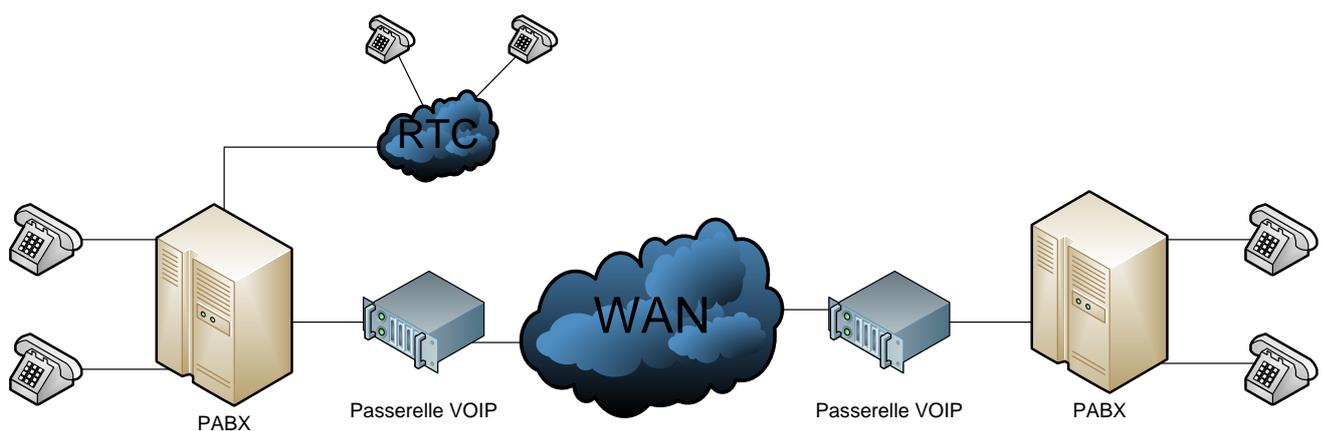
L'offre de services téléphonie sur IP doit se substituer au service de téléphonie classique. Le client s'attend donc à un service assez proche de ce dernier. Bien que le débit nécessaire à ce service ne soit pas très important, il n'en va pas de même avec les contraintes de qualité de service qui lui sont liées. Il sera nécessaire de maintenir les paramètres giques et de latences (latence maximale : 150ms pour une qualité confortable) à des valeurs aussi faible possible afin de préserver une meilleure qualité de service.

La composante vidéo du coffret triple play est basée sur la télévision sur IP. Ce service est de type multimédia, des flux dont la présentation est assujettie à des contraintes temporelles (par exemple pour la vidéo haute définition à 200Mbps soit environ 25 images par seconde).

### 4.4 Le service VOIP

#### 4.4.1 Architecture et principe

La VoIP s'appuie à ses extrémités sur les réseaux téléphoniques commutés (RTC). En effet, les équipements restent inchangés (Téléphone, PABX...), tandis qu'une passerelle réalise l'interfaçage avec les réseaux IP.



**Figure 4.02 :** Schéma explicatif de l'architecture VOIP

Les passerelles VoIP (Gateway) jouent un rôle essentiel dans l'architecture du réseau de téléphonie IP. Elles sont en fait des ordinateurs réalisant, d'une part, une jonction dans un environnement hétérogène (physique), et d'autre part, apportant une intelligence logicielle : le Gatekeeper.

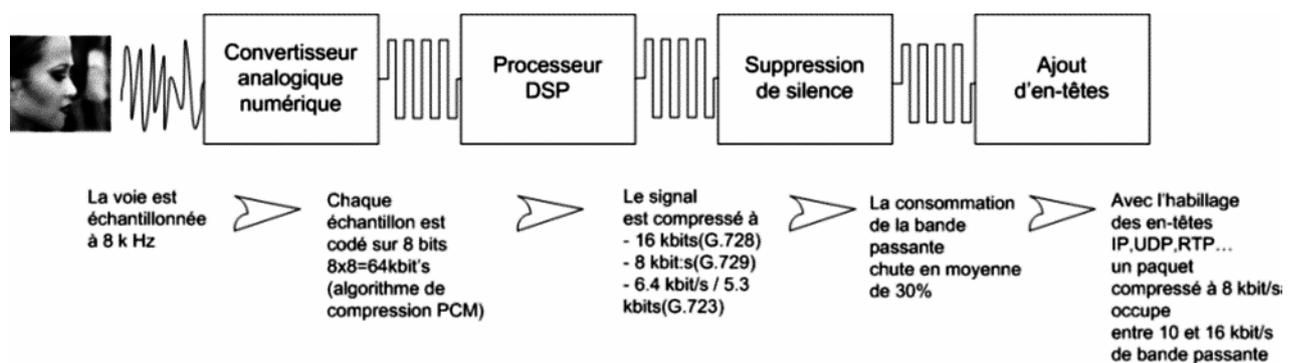
Le Gatekeeper joue 2 rôles principaux: la gestion des permissions et la résolution d'adresse. Outre cela, il va non seulement router les appels, mais aussi leur attribuer une bande passante sur le réseau, connaître l'état des autres passerelles pour éviter les redondances et faire en sorte que tout appel puisse aboutir avec la meilleure qualité possible. Quand un client veut émettre un appel, il doit le faire au travers du gatekeeper. C'est alors que celui-ci fournit une résolution d'adresse du client de destination.

Dans le cas où il y a plusieurs gateways sur le réseau, il peut rediriger l'appel vers un autre couple gateway/gatekeeper qui essaiera à son tour de router l'appel. Pendant la résolution d'adresse, le gatekeeper peut aussi attribuer une certaine quantité de bande passante pour l'appel. Il peut agir comme un administrateur de la bande passant disponible sur le réseau. Le gatekeeper répond aux aspects suivant de la téléphonie IP :

- Le routage des appels : en effet, le gatekeeper est responsable de la fonction de routage. Non seulement, il doit tester si l'appel est permis et faire la résolution d'adresse mais il doit aussi rediriger l'appel vers le bon client ou la bonne passerelle.
- Administration de la bande passante : le gatekeeper alloue une certaine quantité de bande passant pour un appel et sélectionne les codecs à utiliser. Il agit en tant que régulateur de la bande passante pour prémunir le réseau contre les goulots d'étranglement (bottle-neck).
- Tolérance aux fautes, sécurité : le gatekeeper est aussi responsable de la sécurité dans un réseau de téléphonie IP. Il doit gérer les redondances des passerelles afin de faire aboutir tout appel. Il connaît à tout moment l'état de chaque passerelle et route les appels vers les passerelles accessibles et qui ont des ports libres.
- Gestion des différentes gateways : dans un réseau de téléphonie IP, il peut y avoir beaucoup de gateways. Le gatekeeper, de par ses fonctionnalités de routage et de sécurité, doit gérer ces gateways pour faire en sorte que tout appel atteigne sa destination avec la meilleure qualité de service possible.

Ainsi, le gatekeeper peut remplacer le classique PABX. En effet, il est capable de router les appels entrant et de les rediriger vers leur destination ou une autre passerelle. Mais il peut gérer bien d'autres fonctions telles que la conférence ou le double appel. Il n'existe pas les mêmes contraintes avec un gatekeeper qu'avec un PABX.

La TOIP (Téléphonie over IP) quant elle, profite également des réseaux IP mais de bout en bout (aucune intervention des réseaux RTC). En effet ce sont les terminaux qui se chargent de convertir la voix en trame IP. La numérisation de la voix suit un procédé assez élaboré. La bande voix qui est un signal électrique analogique utilisant une bande de fréquence de 300 à 3400 Hz, elle est d'abord échantillonnée numériquement par un convertisseur puis codé sur 8 bits, puis compressé par des codecs, et ensuite, on peut éventuellement supprimer les pauses de silences observés lors d'une conversation, pour être ensuite habillé RTP, UDP et enfin en IP. Une fois que la voix est transformée en paquets IP, ces paquets IP identifiés et numérotés peuvent transités sur n'importe quel réseau IP.



**Figure 4.03 :** Principe de la numérisation de la voix

## 4.4.2 Les protocoles

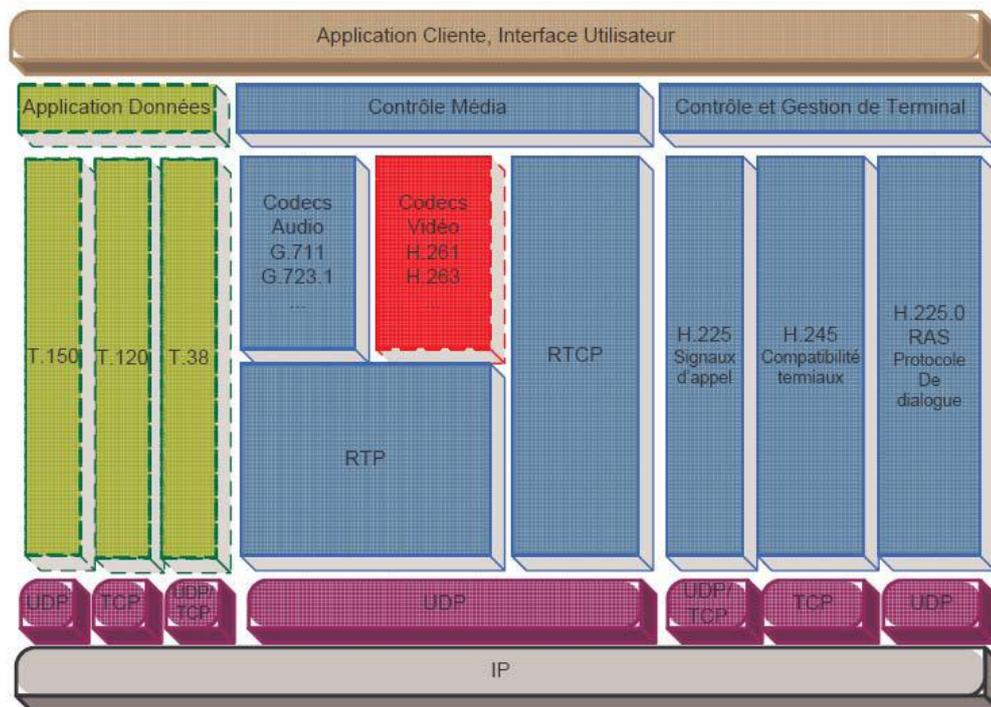
### 4.4.2.1 Le protocole H.323

Le protocole H.323 est utilisé pour l'interactivité en temps réel, notamment la visioconférence (signalisation, enregistrement, contrôle d'admission, transport et encodage). C'est le leader du marché pour la TOIP. Il s'inspire du protocole H.320 qui proposait une solution pour la visioconférence sur un réseau numérique à intégration de service (RNIS Réseau Numérique à intégration de services). Le protocole H.323 est une adaptation de H.320 pour les réseaux IP. A l'heure actuelle, la visioconférence sur liaison Rnis est toujours la technique la plus déployée.

Les réseaux utilisés sont à commutation de circuits. Ils permettent ainsi de garantir une Qualité de Service (QoS) aux utilisateurs (pas de risque de coupure du son ou de l'image). Aujourd'hui, c'est encore un avantage indiscutable. Par contre, comme pour le téléphone, la facturation est fonction du débit utilisé, du temps de communication et de la distance entre les appels.

Une communication H.323 se déroule en cinq phases : établissement d'appel, échange de capacité et réservation éventuelle de la bande passante, établissement de communication audio-visuelle, invocation éventuelle de services en phase d'appel (transfert, changement de bande passante) et enfin libération d'appel.

La pile protocolaire utilisée par H.323 est représenté dans le modèle OSI de la figure 4.04.



**Figure 4.04 :** La norme H.323

#### 4.4.2.2 Le protocole SIP

Le protocole Sip (Session Initiation Protocole) a été initié par le groupe MMUSIC (Multiparty Multimedia Session Control) et désormais repris et maintenu par le groupe SIP de l'IETF. SIP est utilisé pour le contrôle de session. A savoir : Créer, réguler et terminer une session vidéo ou audio entre plusieurs terminaux, sur un réseau à commutation de paquet.

Ce protocole a pour unique but de permettre la communication. Cette dernière doit ensuite être gérée par d'autres moyens. Il intervient dans différentes phases de l'appel : localisation du terminal correspondant, analyse du profil et des ressources du destinataire, négociation du type de média (voix, vidéo, données...) et des paramètres de communication, disponibilité du correspondant, détermine si le poste appelé souhaite communiquer, et autorise l'appelant à le contacter, établissement et suivi de l'appel, avertit les parties appelant et appelé de la demande d'ouverture de session, gestion du transfert et de la fermeture des appels, gestion de fonctions évoluées : cryptage, retour d'erreurs.

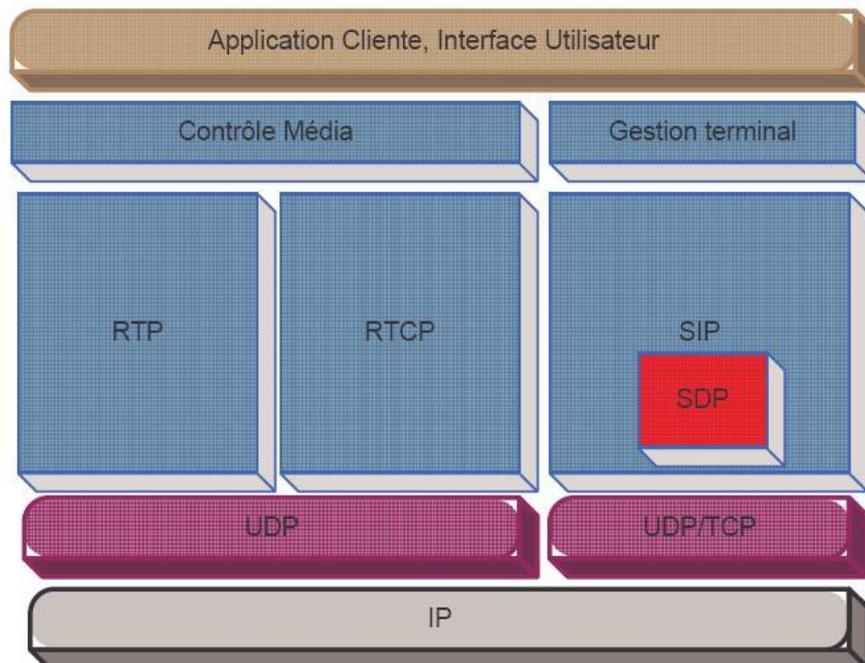
Il se compose de plusieurs éléments du réseau : le User Agent : Élément final de l'architecture ; composé d'un User Agent Client (UAC), et d'un User Agent Server (UAS). L'UAC est une application cliente qui envoie des requêtes SIP (Ex : station de travail, téléphone IP, Gateway...), tandis que l'UAS est une application serveur qui dialogue avec l'utilisateur quand une requête SIP est reçue. Le serveur Proxy (PS : Proxy Server) : Ils sont chargés du routage d'une session SIP.

Lorsqu'il réceptionne une requête SIP, il la transmet à un autre serveur proxy sur la route, ou directement à l'User Agent concerné (si en liaison directe avec lui). Le serveur de redirection (RS Redirect Server) : Il convertit l'adresse contenue dans la requête SIP en 0 ou plusieurs adresses (suivant qu'elle a été reconnue ou non) destinataires, et les transmet aux clients. Et enfin le Registrar (RG : ReGistration) : Il fournit les informations relative à la localisation d'un utilisateur.

Le déroulement d'un appel se fait en six étapes :

- Localisation du terminal correspondant,
- Analyse du profil et des ressources du destinataire,
- Négociation du type de média (voix, vidéo, données...) et des paramètres de communication,
- Disponibilité du correspondant, détermine si le poste appelé souhaite communiquer, et autorise l'appelant à le contacter,
- Établissement et suivi de l'appel, avertit les parties appelant et appelée de la demande d'ouverture de session, gestion du transfert et de la fermeture des appels,
- Gestion de fonctions évoluées : cryptage, retour d'erreurs.

Les protocoles de transport utilisés sont le SDP (Session Description protocol) et le RTP (Real Time Transport Protocol).



**Figure 4.05 :** Pile protocolaire utilisé par le SIP

#### 4.4.3 Avantages du VOIP

La VoIP offre de nombreuses nouvelles possibilités aux opérateurs et utilisateurs qui bénéficient d'un réseau basé sur IP. Les avantages sont diverses mais la plus marquée reste la réduction des couts : en déplaçant le trafic voix RTC vers le réseau privé WAN/IP les entreprises peuvent réduire sensiblement certains coûts de communications. Réductions importantes mises en évidence pour des communications internationales, ces réductions deviennent encore plus intéressantes dans la mutualisation voix/données du réseau IP inter-sites (WAN). Dans ce dernier cas, le gain est directement proportionnel au nombre de sites distants.

#### 4.5 La télévision sur IP (TVIP)

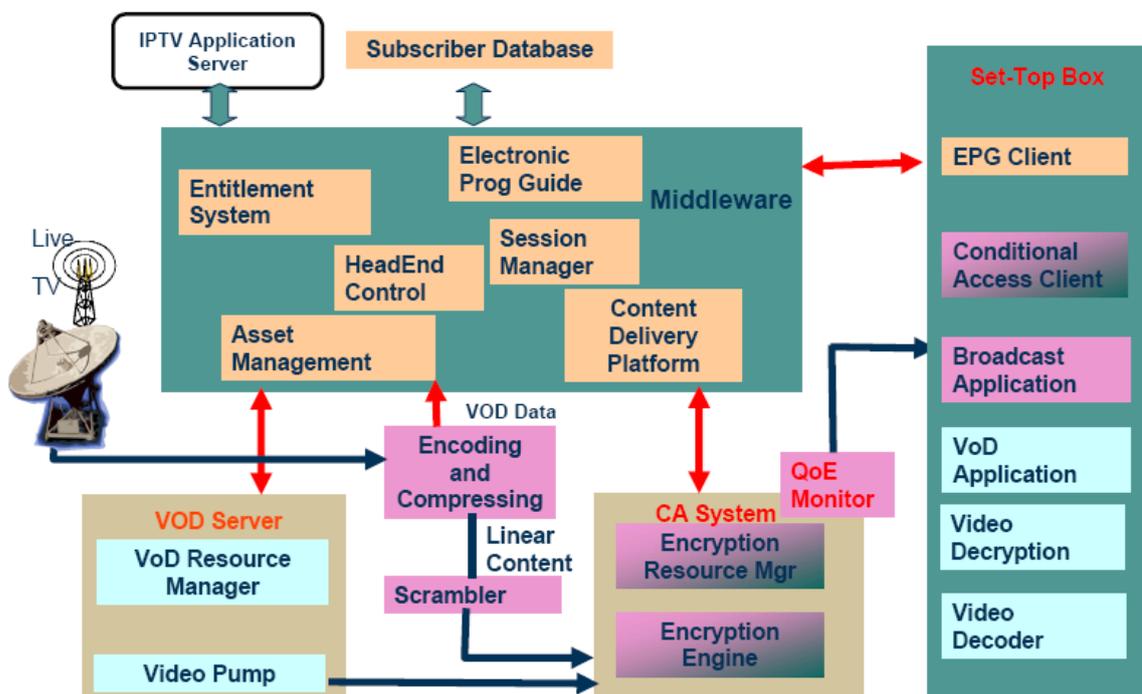
La transmission de vidéo est assurément un des points les plus importants dans la mise en œuvre d'un réseau EPON. Ce service, bien qu'il ne soit pas aussi exigeant que le service voix en termes de gigue et de latence, est assez gourmand en bande passante. Deux standards sont principalement étudiés lors de la mise en place d'un service TVIP, leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 4.01.

Format	Taille de l'image	Rapport	Vitesse de projection
HDTV	1920x1080	16:9	30I, 30P, 24P
HDTV	1280x720	16:9	60P, 30P, 24P
SDTV	704x480	16:9	30I, 60P, 30P, 24P
SDTV	640x480	4:3	30I, 60P, 30P, 24P

**Tableau 4.01 : Différents formats TV**

#### 4.5.1 Architecture et principe

L'IPTV est un système qui permet de délivrer des contenus vidéo aux abonnés à travers des infrastructures IP. Au départ du fournisseur de ce service la vidéo est d'abord acquise, traité et enfin sécurisé avant de passer dans le réseau. Un schéma bloc du système IPTV simple est représenté par la figure 4.06.



**Figure 4.06 : Schéma explicatif du système IPTV**

L'IPTV s'accompagne généralement de plusieurs services associés aux besoins de l'utilisateur :

- Un support pour le TV interactif : les systèmes IPTV doivent autoriser les fournisseurs à délivrer une large gamme d'applications interactives comme le SDTV live, les jeux interactifs.
- Le décalage temporel : l'IPTV combiné à la numérisation devra permettre un décalage dans le temps.
- La personnalisation : un système IPTV end-to-end supporte une communication bidirectionnelle, ce qui permet aux utilisateurs d'apprécier la télévision suivant leurs habitudes.

#### **4.5.2 Le HDTV**

##### 4.5.2.1 Le Streaming

On peut désormais transmettre des flux vidéo sur le Web sans avoir à les télécharger. C'est ce qu'on appelle le Streaming. Le Streaming ne tient pas compte de la taille des fichiers. Contrairement au téléchargement où le temps de transfert est variable suivant la taille du fichier.

Le Streaming permet :

- La diffusion de flux vidéo et audio sur Internet
- D'effectuer de la VOD
- De diffuser en live (ex: une chaîne de télévision diffusée sur Internet)

Dans un premier temps, le serveur envoie le fichier vidéo par paquets de données. Ces paquets sont traités au fur et à mesure de leur arrivée par l'ordinateur client. A cause du « trafic perturbé » sur le réseau, les paquets n'arrivent pas dans le bon ordre. Pour les ordonner on utilise une mémoire tampon (buffer). Ce buffer est créé par le lecteur média du client.

Au bout de quelques secondes, une fois que les données sont bien reçues par le buffer, la lecture du flux commence. Si la connexion est mauvaise, l'arrivée des paquets sera ralentie. Lorsque le buffer de réception est vide, la lecture s'arrête. La lecture reprendra lorsque le buffer possèdera assez de données.

#### 4.5.2.2 La VOD

L'idée de la VOD s'apparente à la location de film dont les utilisateurs ont l'habitude de faire. Ce service leur permet de regarder le programme TV qu'ils désirent au moment où ils le veulent, de plus ces mêmes utilisateurs sont autorisés à pauser, stopper, avancer ou reculer le programme à leur guise un peu à la manière d'un magnétoscope.

Le concept de base du VOD s'appuie sur des programmes stockés sur des serveurs VOD placés au sein de l'opérateur équipés pour les envoyer simultanément à plusieurs utilisateurs. Une connexion unicast est établie par la suite partant du serveur vers les utilisateurs.

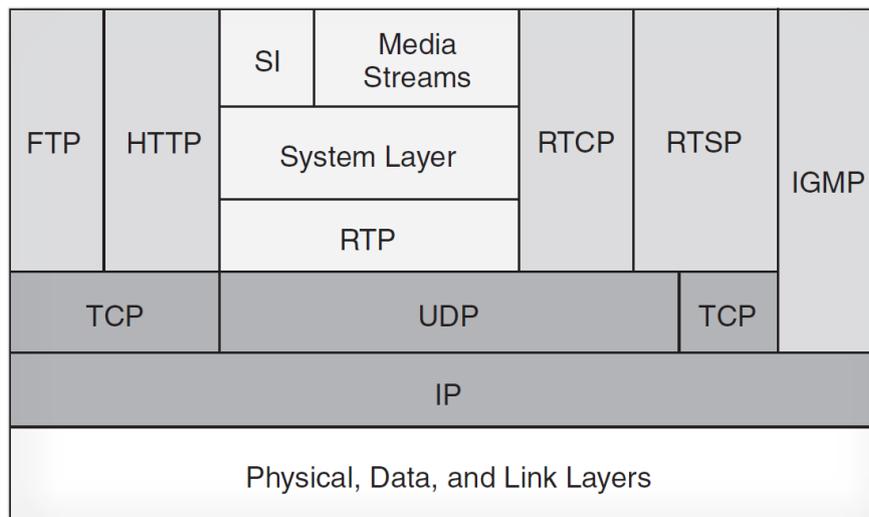
Malgré la surabondance de bande passante dans les réseaux optiques, la diffusion unicast vers plusieurs utilisateurs d'une même donnée vidéo va poser des problèmes au niveau du réseau cœur et s'apparenterait d'ailleurs à un gaspillage de bande passante. L'Unified VOD qui a été créée dans ce sens est donc toujours d'actualité. Son principe est assez simple : si un abonné A souhaite visualiser un film *f*, le serveur vidéo va diffuser le film en multicast vers l'abonné A. Si un autre abonné B arrive quelques minutes plus tard et demande le même film *f*. Le serveur va se rendre compte que le film est en cours de diffusion, et va réémettre, cette fois-ci en unicast, le début du film que l'abonné B a manqué.

De son côté, la Set-Top-Box de l'abonné B va mettre en cache le déroulement actuel du film en cours de diffusion pour l'abonné A. En parallèle, elle va lire directement le flux unicast du début du film qui lui est dédié. Une fois le début du film manqué récupéré, la Set-Top-Box poursuit la lecture dans son cache, tout en continuant son remplissage avec le film en cours de diffusion. La lecture du film se poursuivra donc avec le cache.

#### **4.5.3 Les protocoles**

Le streaming et le décodage des vidéos et audio numériques sur des réseaux IP fournissent un nouvel ensemble de contraintes pour les transmissions traditionnelles utilisant les câbles ou les satellites. Depuis toujours, les réseaux IP n'offrent aucun service en temps réel ; le rejet des trames, l'importance des délais et la variation du délai end-to-end étaient acceptables du moment que les données arrivaient à destination. Cependant, la TVIP ne supporte pas ces ruptures. Pour pallier à cela, différents protocoles ont été mis en place.

La pile protocolaire pour l'envoi de données vidéo en streaming est représentée par la figure 4.07



**Figure 4.07** : Les protocoles utilisés en streaming

#### 4.5.3.1 Le RTP (Real-Time Protocol)

Le RTP (un protocole de niveau 3) a été conçu pour porter une attention particulière au délai critique requis lors d'une transmission vidéo (ou audio). Il fournit un support de transport pour les données multimédias en temps réel de la source vers le destinataire. Pour ce faire, le RTP fournit un champ supplémentaire (le timestamp) dans la trame RTP et une numérotation des séquences vidéo.

Le timestamp est la pièce la plus importante dans une application en temps réel. Ce champ est ajouté par la source : une valeur donnée à ce champ au début de la transmission augmente au fur et à mesure que les séquences suivantes sont transmises. Le récepteur peut utiliser ce champ pour déterminer à quel moment les données doivent être traitées.

#### 4.5.3.2 Le RTCP (Real-time Control Protocol)

Le RTCP est un protocole élaboré pour soutenir le RTP. C'est un mécanisme utilisé pour le report QoS et s'appuie sur l'envoi périodique d'une trame de contrôle par tous les participants.

La première fonction du RTCP est de faire un « *feedback* » sur la qualité des services RTP. Avec ce type d'information le service peut effectuer des actions correctives.

#### 4.5.3.3 Le RTSP (Real-Time Streaming Protocol)

Le RTSP est un protocole de la couche application conçu pour fonctionner avec des protocoles multimédia du niveau inférieure tel que le RTP. Son principal rôle est de fournir un contrôle sur les streaming (autorise les actions tels que pause, stop ou play très utilisé lors d'un VOD). Pour cela il supporte les méthodes :

- Options : permet aux serveurs et aux clients de communiquer à l'autre partie les options qu'ils supportent.
- Describe : le mécanisme utilisé par les serveurs pour indiquer aux clients la description du média en objet.
- Announce : cette méthode a deux objectifs. L'un est que le client soit capable de poster la description du média vers le serveur. Le second est que le serveur soit capable de mettre à jour dynamiquement et en temps réel la description de ce média.
- Setup : permet au client de changer les paramètres de transport du flux.
- Play : le client ordonne au serveur de commencer la transmission. Le client ne peut exécuter cette méthode que si le serveur valide les paramètres de transport indiqué dans la méthode Setup.
- Pause : cause l'arrêt temporaire de l'envoi des flux sans perte des ressources. Cependant le serveur peut clore la session si au bout d'un délai.
- TearDown : arrête le flux média et libère toutes les ressources du réseau consacré à cette session.

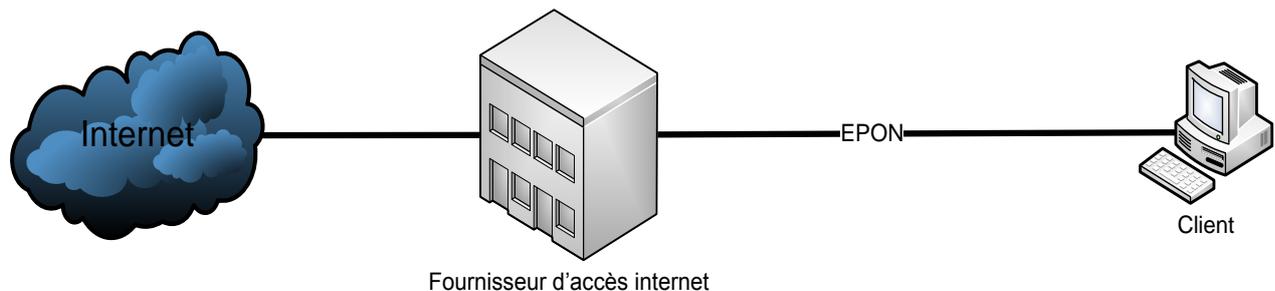
#### 4.5.4 Les avantages du TVIP

Les avantages de disposer d'un TVIP sont nombreuses. En comparaison avec la télévision classique, la TVIP est entièrement numérique et peut de ce fait transiter sur n'importe quel réseau IP existant. En outre, les programmes peuvent être stockés ce qui fournit plus de confort pour les utilisateurs qui privilégient les moments télé.

## 4.6 L'internet

### 4.6.1 Architecture

L'internet est assurément le service le plus simple à réaliser. Dans le cas de l'EPON, aucun équipement intermédiaire n'est interposé. Dans sa forme la plus simple l'architecture du système délivrant ce type de service est schématisée dans la figure 4.08.



**Figure 4.08 :** Schéma simplifié de la connexion internet sur l'EPON

Dans la figure 4.08, le client représente tous les équipements coté utilisateur dont : l'ONU et le PC. Le rôle du fournisseur d'accès est d'offrir un moyen de se connecter au Web via des routeurs et des passerelles.

### 4.6.2 Les protocoles

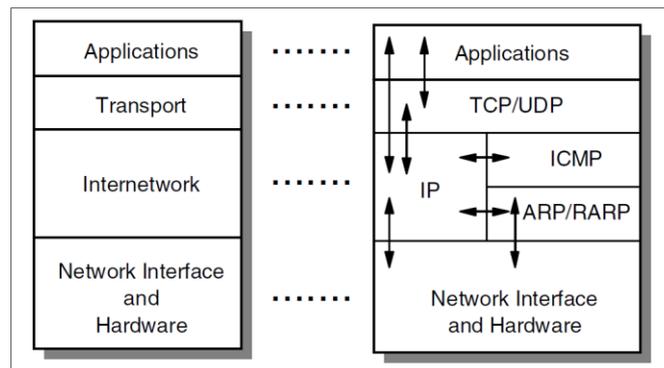
Bien que les techniques d'accès à internet aient beaucoup changé ces derniers temps, les protocoles sont presque restés inchangés.

#### 4.6.2.1 Le TCP/IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol)

Le but principal du TCP/IP est de construire une interconnexion de réseau connue comme étant « *l'internetwork* » ou l'internet. Il fournit une communication universelle entre des réseaux physiques hétérogènes. La pile protocolaire présentée par la figure 4.09 inclue les couches a été développé avant l'OSI et de ce fait il ne concerne que quatre couches :

- La couche application correspond à la couche application du modèle OSI. Quelques exemples bien connue de protocole au niveau application sont : le FTP (File Transfert Protocol), le telnet, le http (Hypertext Transfert Protocol), le SMTP (Simple Mail Transfert Protocol).

- La couche transport du modèle TCP/IP correspond à la couche transport du modèle OSI de référence, les protocoles de ce niveau sont le TCP ou le UDP (User Datagram Protocol).
- La couche internet ressemble à la couche réseau de l'OSI. Le protocole le plus important à ce niveau est l'IP mais beaucoup des protocoles de routages TCP/IP sont classifiés dans cette couche.
- La couche accès réseau est la couche la plus basse du modèle. Un exemple de couche accès réseau rassemble : l'ethernet, le PPPoE (Point-to-point over ethernet), l'ATM.



**Figure 4.09** : Pile protocolaire TCP/IP

#### 4.7 Evolution du service triple play : vers le quad-play

La fibre est un support évolutif c'est-à-dire qu'il peut s'adapter aux changements initiés par le progrès. La structure des réseaux de type PON et ses ressources sont telles que d'autres applications beaucoup plus gourmandes en bande passante peut y être implémenté. Outre les trois services de l'offre triple play un quatrième service qui est l'audio haute définition peut être intégré ce qui constitue l'offre quad-play. D'autres services comme le TV 3D à la maison sont encore en phases expérimentales sur les réseaux PON

#### 4.8 Conclusion

La combinaison voix, vidéo et internet constitue une excellente exploitation du réseau EPON bien qu'ils nécessitent la mise en place d'autres mécanismes non existant dans le réseau. Cependant, les dispositions prises par le réseau en terme de qualité de service (IPACT, DBA...) convergent déjà vers le seul et unique but : de pouvoir intégrer à la fois des services en temps réel en grande majorité et des services rendu en « *best effort* » à l'instar du service internet.

## CHAPITRE 5: SIMULATION D'UN RESEAU EPON AVEC OMNET++

### 5.1 Introduction

Lors de l'étude technique ou de faisabilité d'un réseau, on est appelé à modéliser le réseau à l'aide de schémas et liens logiques. Simuler un réseau serait, en quelques sortes, égale à le réaliser mais de manière purement théorique. Dans le cas de notre étude, nous exposerons dans ce chapitre, un modèle schématique de l'EPON et évaluerons sa performance avec un nombre important de clients.

### 5.2 Scénarios

Ce chapitre se propose d'étudier le comportement du réseau EPON lors de sa mise en œuvre. Il y sera observé, dans un premier temps le fonctionnement du protocole de signalisation et en second lieu : la transmission des données, voix et vidéo. Pour ce faire le scénario supposera tout d'abord un serveur (faisant office à la fois de serveur vidéo, voix et données) desservant 32 utilisateurs via un réseau EPON. Le réseau sera composé d'un OLT, un coupleur passif. Durant la simulation les clients émettront ou répondront de manière aléatoire.

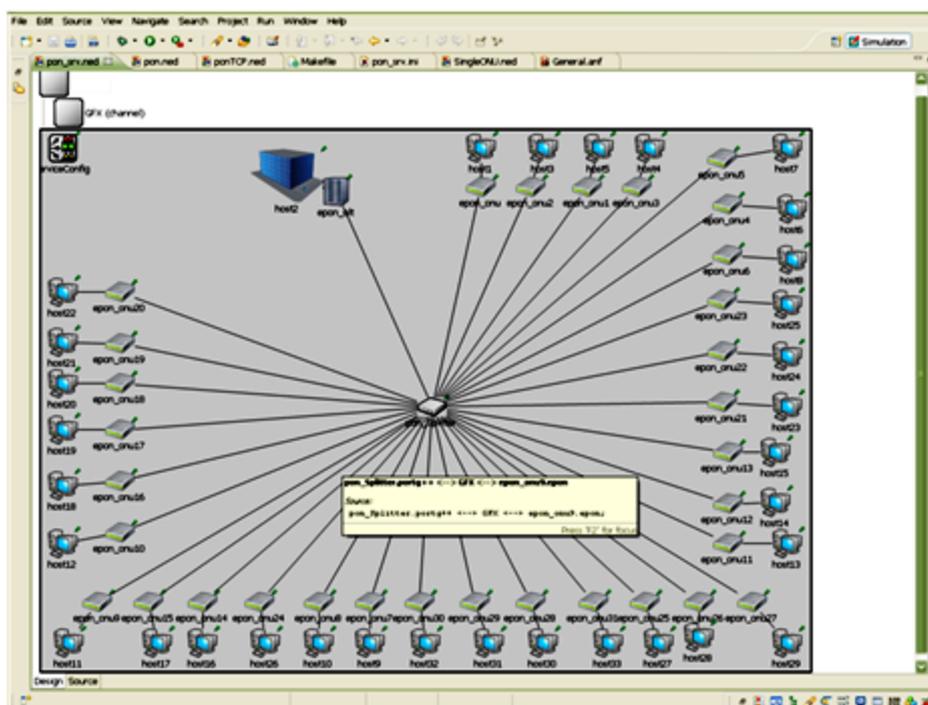


Figure 5.01 : Modélisation du réseau avec 32 clients

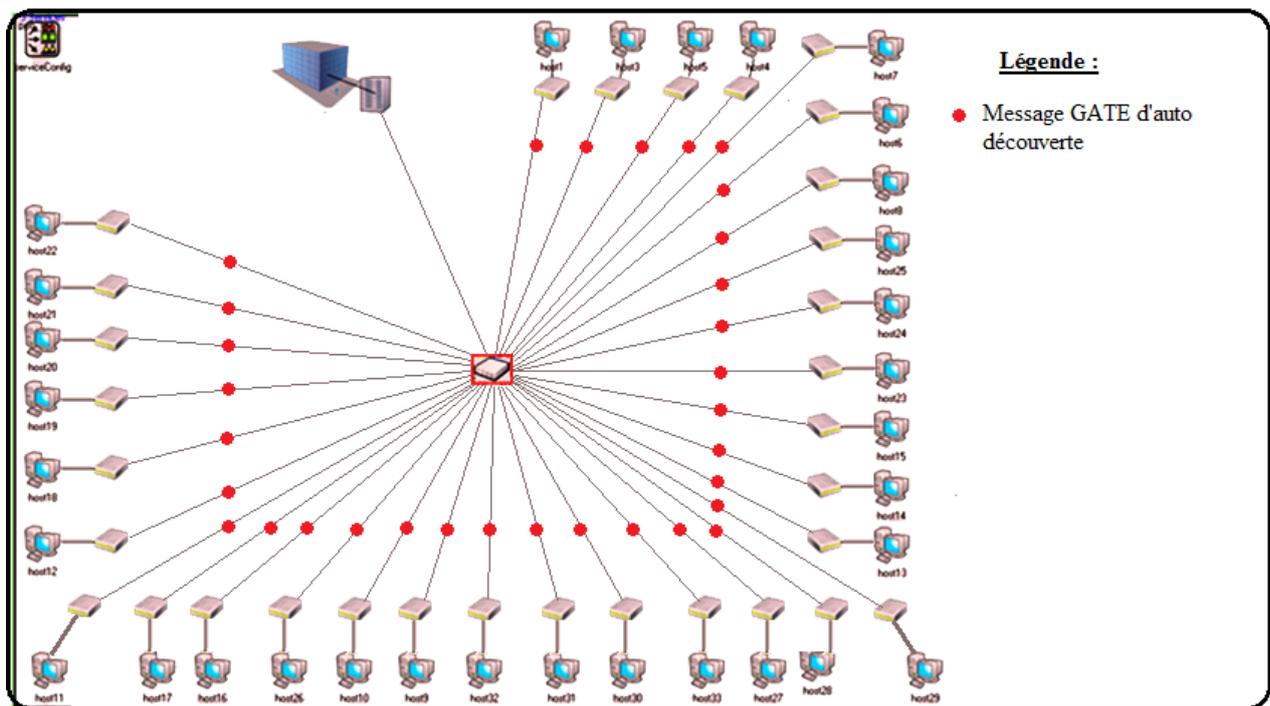
### 5.3 Définition des paramètres pour chaque module

Afin de reproduire le plus fidèlement possible toutes les propriétés du réseau. La simulation devra nécessairement redéfinir certains paramètres du modèle.

- Pour l'OLT nous imposerons des paramètres suivants :
  - Débit de transmission au niveau MAC : 100 Mbps,
  - Taille d'un time slot attribuable : 3000 ns,
  - Nombre de time slot attribuable : 128,
  - Dimension de la fenêtre de découverte : 500 ms,
  - Nombre maximale de trame qui peut être mis file : 1000.
  
- Le canal de transmission sera modélisé avec les paramètres :
  - Délai de propagation dans le canal : 1ns,
  - Débit du canal : 1,25 Gbps,
  - Taux d'erreur binaire :  $10^{-9}$ .
  
- Pour les stations client on définira des paramètres standard et uniforme :
  - Temps de garde avant la prochaine transmission : 5.1 ms,
  - Délai d'attente : 0 à 0.015 ms,
  - Taille d'une requête : 1 Mo,
  - Taille d'une trame : 2 Mo,
  - Débit au niveau MAC : 100Mbps.
  
- Le module ServiceConfig fourni les trois types de services supportés par le réseau, il y sera défini les paramètres suivant :
  - Services : data, voix, vidéo,
  - Priorités : 0.2 0.5 0.3.

## 5.4 Observation du comportement du réseau pendant la simulation

Dans la phase d'auto-découverte :

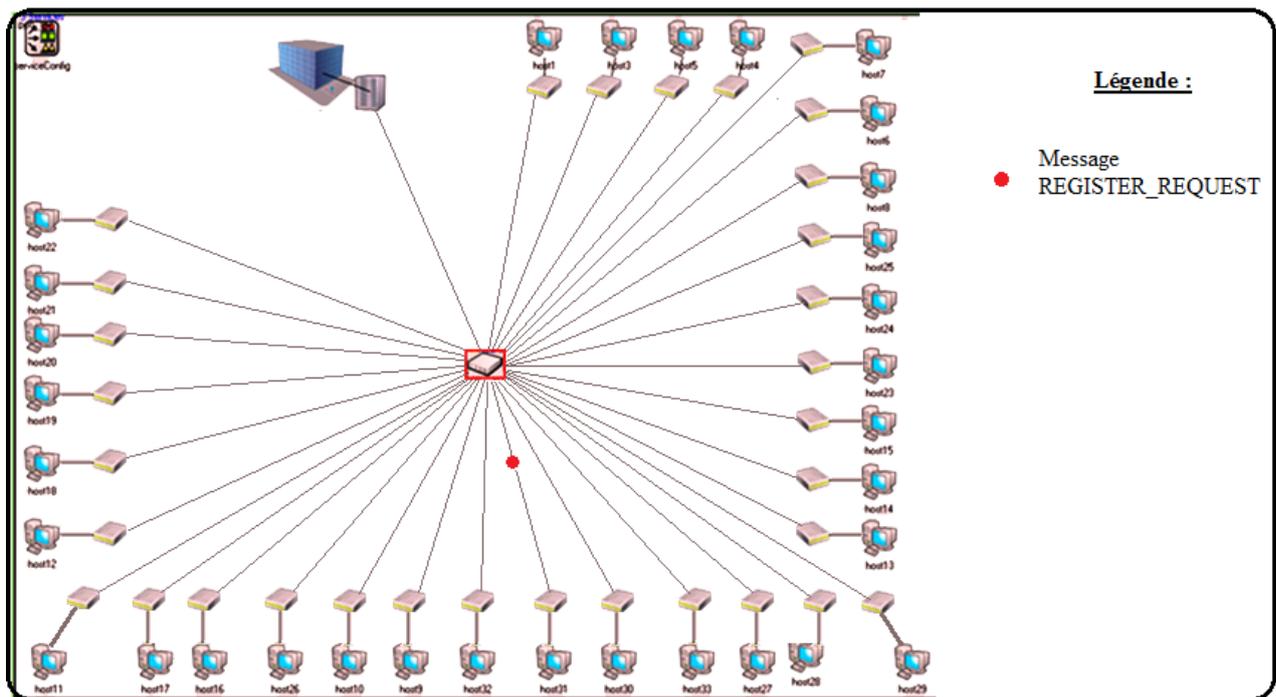


**Figure 5.02 :** *Transmission du message GATE d'auto découverte*

La propriété des coupleurs passifs est telle que toutes les trames partant de l'OLT et transmises dans le sens descendant soit émises en multicast vers toutes les ONU. Ce qui est intéressant pour la transmission du message GATE d'auto découverte puisque par nature ce message doit être diffusé vers tous les ONU.

Notons qu'en opération normale c'est par l'adresse contenu dans le champ adresse source du message qu'un ONU reconnaît si un message lui est destiné ou non, dans ce cas précis le contenu de ce champ sera l'adresse multicast.

Ce processus, initié par l'OLT, se fait de manière périodique et de façon à ne pas octroyer des ressources à un ONU s'il devient inactif ; ou dans le cas contraire : attribuer les ressources qui lui est dû s'il s'active inopinément.

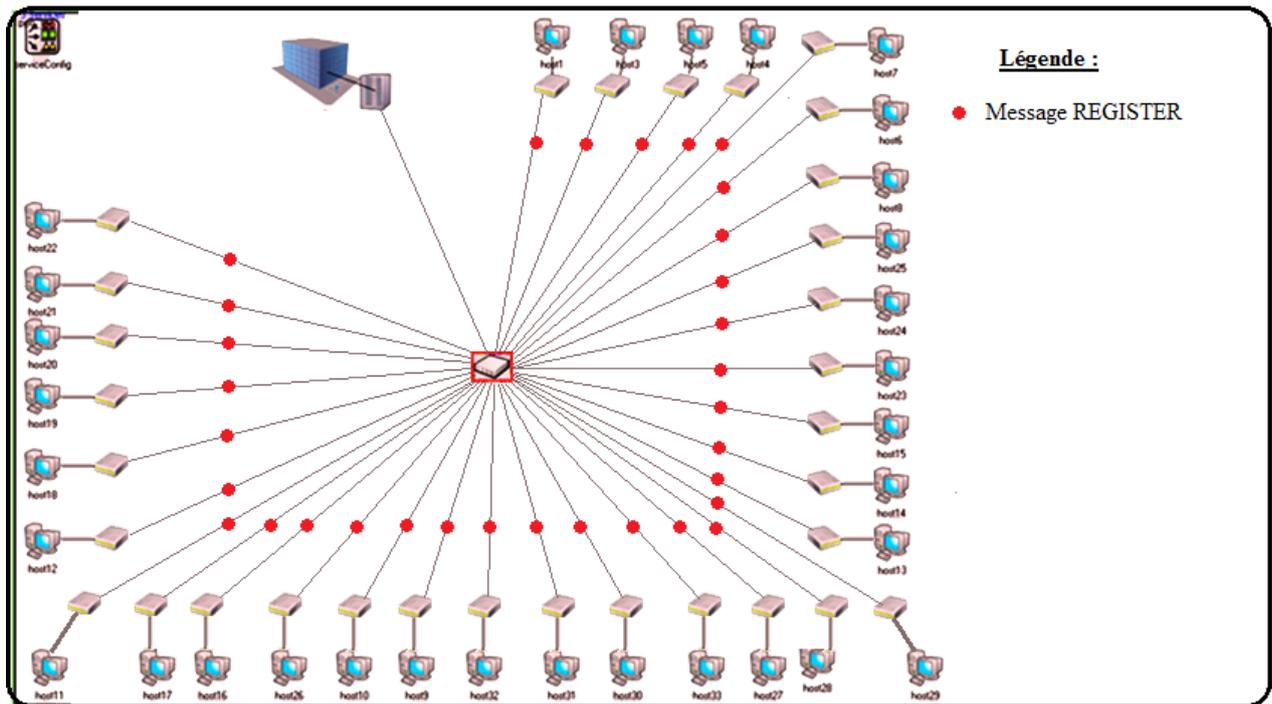


**Figure 5.03 :** *Transmission du REGISTER\_REQUEST*

En réponse au message GATE d'auto-découvertes les ONU qui souhaitent interagir avec le réseau sont obligés de transmettre individuellement un message REGISTER\_REQ pour que l'OLT prend en compte ses besoins en terme de bande passante dans ses calculs.

Dans la figure 5.03 un message de requête est envoyé par l'ONU « epon\_onu29 » vers l'OLT. Notons jusqu'ici les stations clients ne participent pas encore aux différentes transmissions qui se passent dans le réseau, la discussion s'effectue au niveau des ONU et de l'OLT.

Comme le seul mécanisme d'arbitrage repose sur l'observation (par les ONU) d'un temps de garde calculé de manière aléatoire (aucune notion de fenêtre de transmission), le risque de collision est plus élevé que pendant une opération normale. On remarque toutefois sur la figure 5.03 qu'un seul ONU à la fois transmet le message ce qui interprète l'efficacité de l'algorithme de calcul de ce temps de garde.

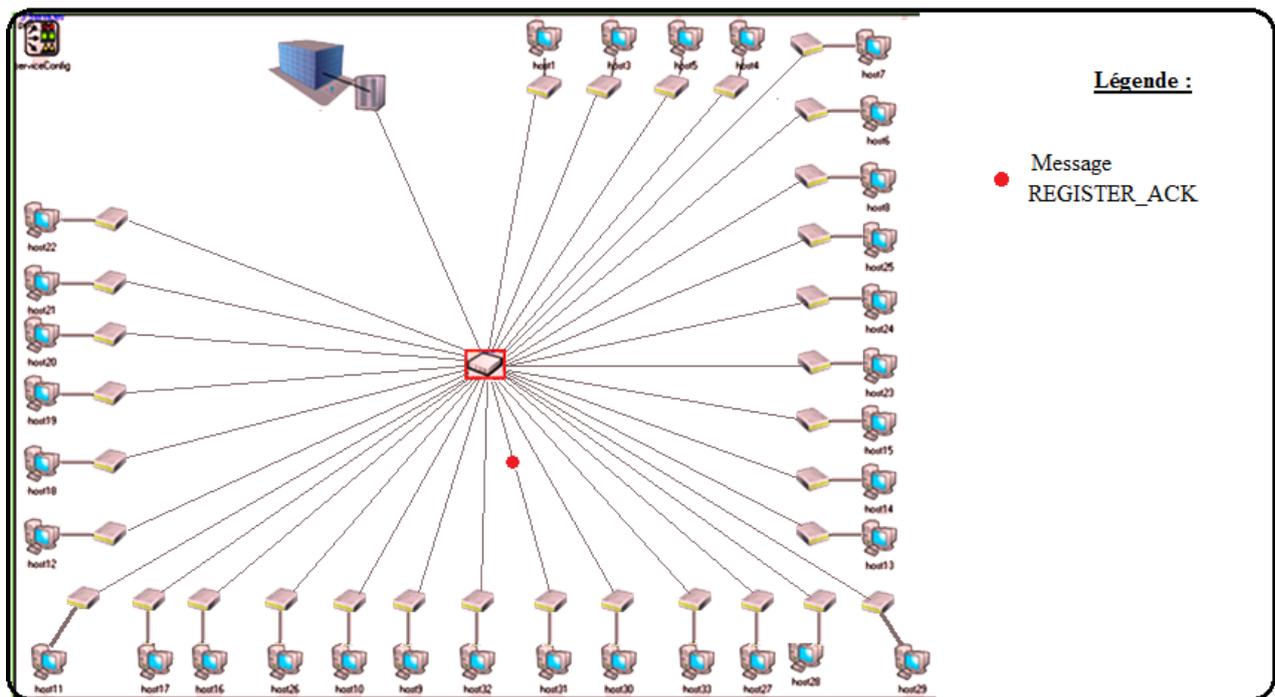


**Figure 5.04 :** *Transmission du message REGISTER*

La figure 5.04 montre la transmission du message REGISTER à partir de l'OLT indiquant à l'ONU concerné que son rattachement au réseau est à présent effectif et qu'il doit préparer les données à transmettre.

En raison de la fusion des cœurs des fibres constituant le coupleur passif (qui se comporte en tant que diviseur dans le sens descendant), les flux lumineux constituant le message vont être divisés et diffusés vers tous les ONU présent dans le réseau (aucune commutation ne s'effectue au niveau de cet équipement).

Notons toutefois que contrairement au message GATE d'auto découverte, le REGISTER est destiné à un seul ONU repéré par l'adresse contenue dans le champ AD du message, c'est donc à ce champ que les ONU vont se référer pour décider s'ils doivent rejeter le message ou non.



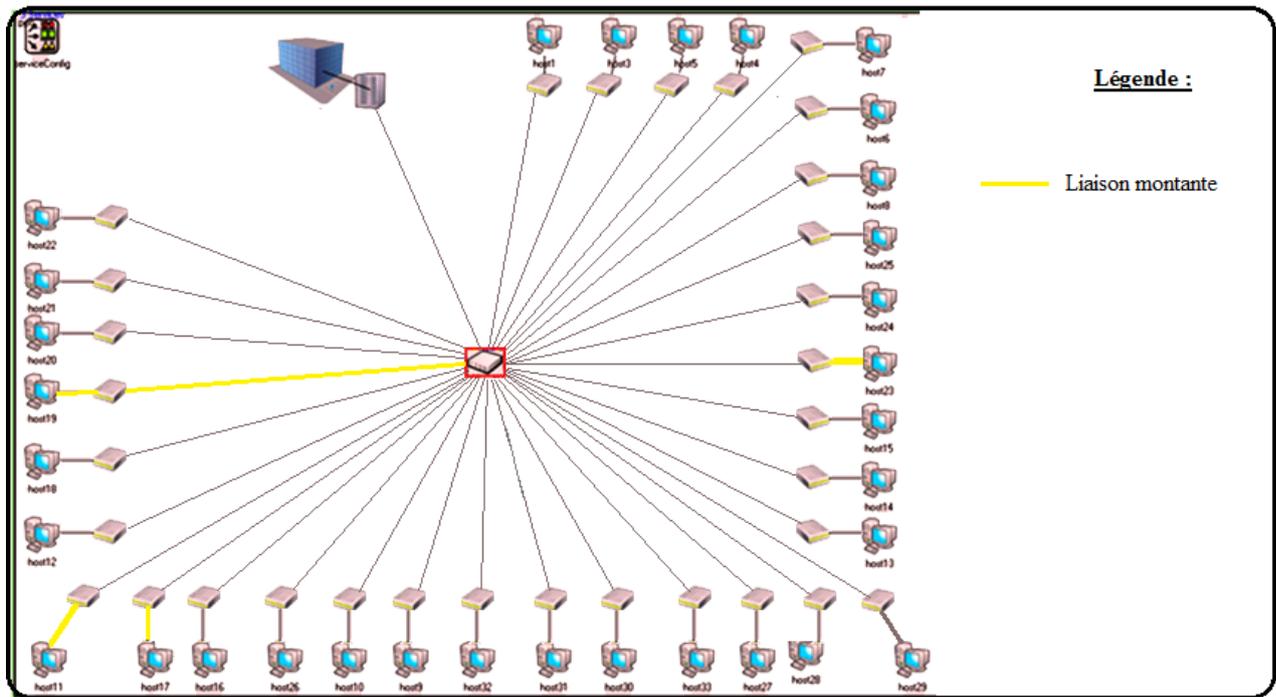
**Figure 5.05 :** *Transmission du message REGISTER\_ACK*

Le message REGISTER\_ACK indique la fin du processus d'auto découverte. Ce message est envoyé individuellement par l'ONU destinataire du message REGISTER précédent vers l'OLT lui communiquant que tout est prêt pour une transmission imminente (l'horloge à été mis à jour, les instructions comme le temps d'allumage et d'extinction des lasers ont été enregistrés).

Dans la figure 5.05 L'ONU destinataire du message REGISTER précédent procède à l'envoi de ce message. Notons qu'ici aussi l'utilisation du média de transmission n'est arbitrée que par le mécanisme d'un temps de garde aléatoire, durant cette phase les risques de collisions sont donc relativement grande. Pourtant on remarque d'après cette figure que les autres ONU restent inactifs pendant que le « epon\_onu29 » est en train de transmettre.

Notons toutefois qu'en raison de la faible taille des messages d'auto-découvertes (de l'ordre de 64 kb) et du débit de transmission très élevé dans la fibre optique constituant le support de transmission, ces messages ne transitent pas longtemps dans le support qui est presque immédiatement libre (apte à transporter de nouveaux messages), ce qui rend efficace le mécanisme d'arbitrage évoqué précédemment.

En opération normale :

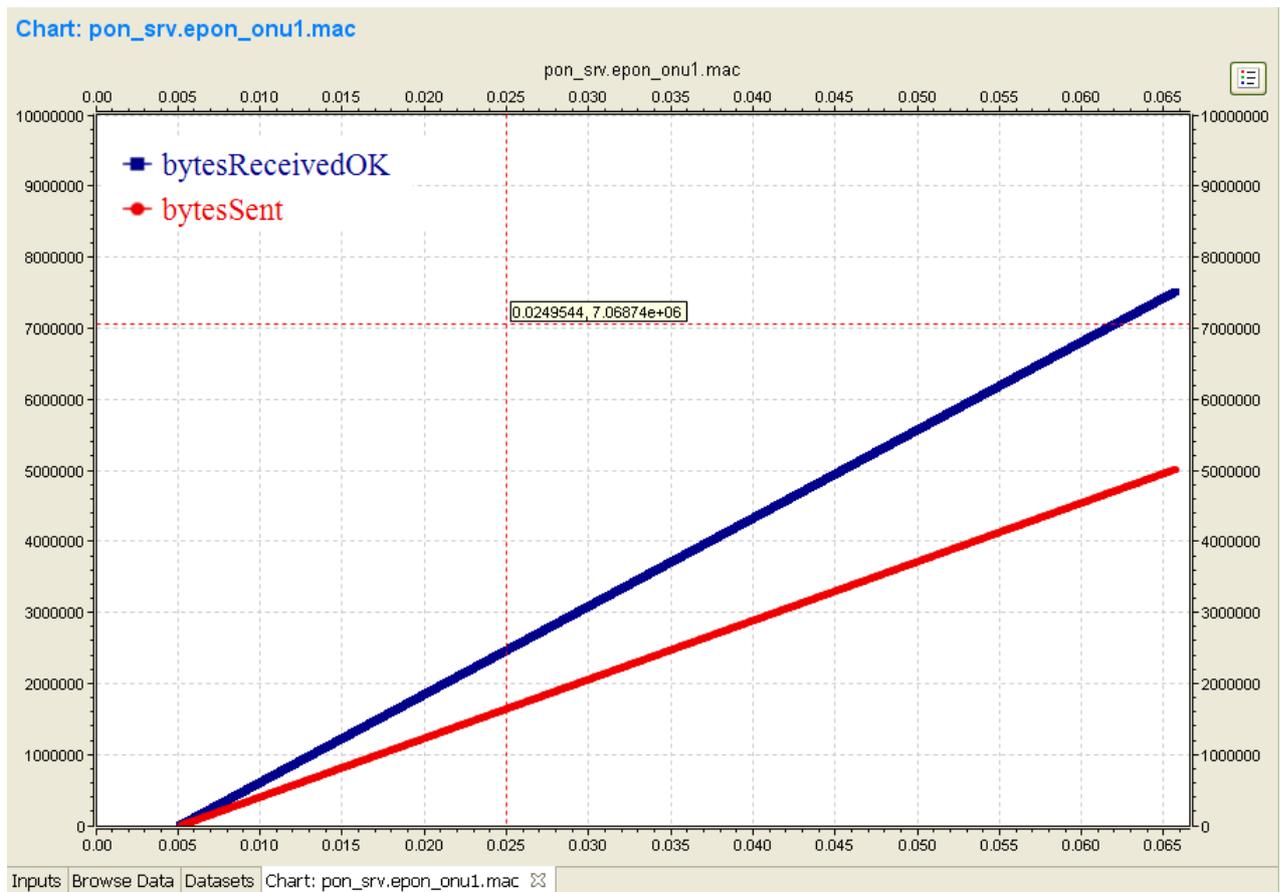


**Figure 5.06 :** *Etablissement de la liaison dans le sens montant*

Une fenêtre de transmission est spécifiée à chaque ONU. Tout au long de cette fenêtre le comportement du réseau, dans le sens montant, s'apparente à un réseau point à point (seules les deux entités du réseau, notamment l'OLT et l'ONU, sont acteurs de la transmission). Il incombe à l'ONU de décider à quel moment il est propice de transmettre vers l'OLT.

Dans la figure 5.06 l'ONU « epon\_onu16 » utilise le média de transmission pendant une durée définie alors que la station cliente « host19 » qui lui est rattaché continue à remplir ses mémoires tampons. Les autres terminaux « host11 », « host 7 » et « host 24 », de la même figure effectuent leurs transmission vers l'ONU qui leurs sont assignés. Les flots de données provenant de ces clients seront mis en file dans les mémoires tampons de ces équipements pour être transmis ultérieurement (durant la prochaine fenêtre de transmission qui leur sera assigné).

## 5.5 Collecte et analyse des résultats



**Figure 5.07** : Octet sortantes et entrantes en fonction du temps au niveau MAC

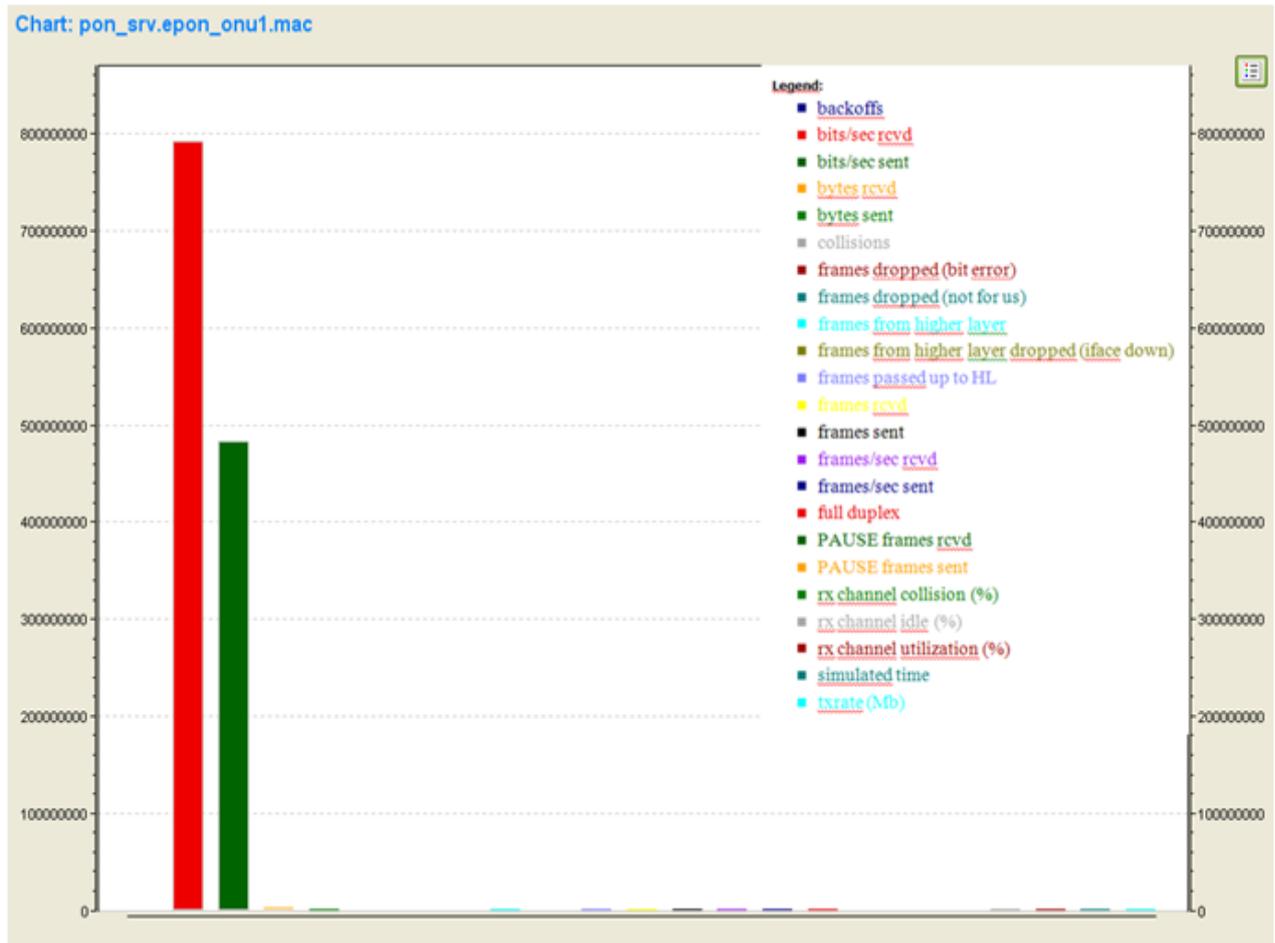
La figure 5.07 représente les données collectées au niveau MAC (couche liaison de données) du « epon\_onu1 ». Les différentes courbes présentes dans cette figure définissent respectivement les données envoyées (courbes en rouge), et les octets reçus (courbe en bleue). On peut observer que la transmission ne débute qu'après 5ms, ceci est dû au fait qu'avant cela le réseau a procédé à l'auto-découverte.

On remarque tout d'abord que les deux courbes sont parfaitement linéaires ce qui traduit une constance du débit dans les deux sens.

Les deux courbes accusent une monotonie croissante pendant toute la durée de la simulation une, à la fin de la simulation ; au temps  $t = 0.065s$  la valeur des octets reçus tendent vers 6000000 et celui des octets envoyés vers la valeur 7500000.

Cette continuité réside principalement à un taux d'erreur binaire quasi-nul grâce aux propriétés du support de transmission qui est la fibre optique ( $TEB < 10^{-9}$ ).

Par ailleurs, le débit de l'ordre de quelques centaines de Mbps, qui est suffisamment grand pour rendre les microcoupures ou les discontinuités au niveau des courbes imperceptibles de part et d'autres du media de transmission (coté OLT/coté ONU).

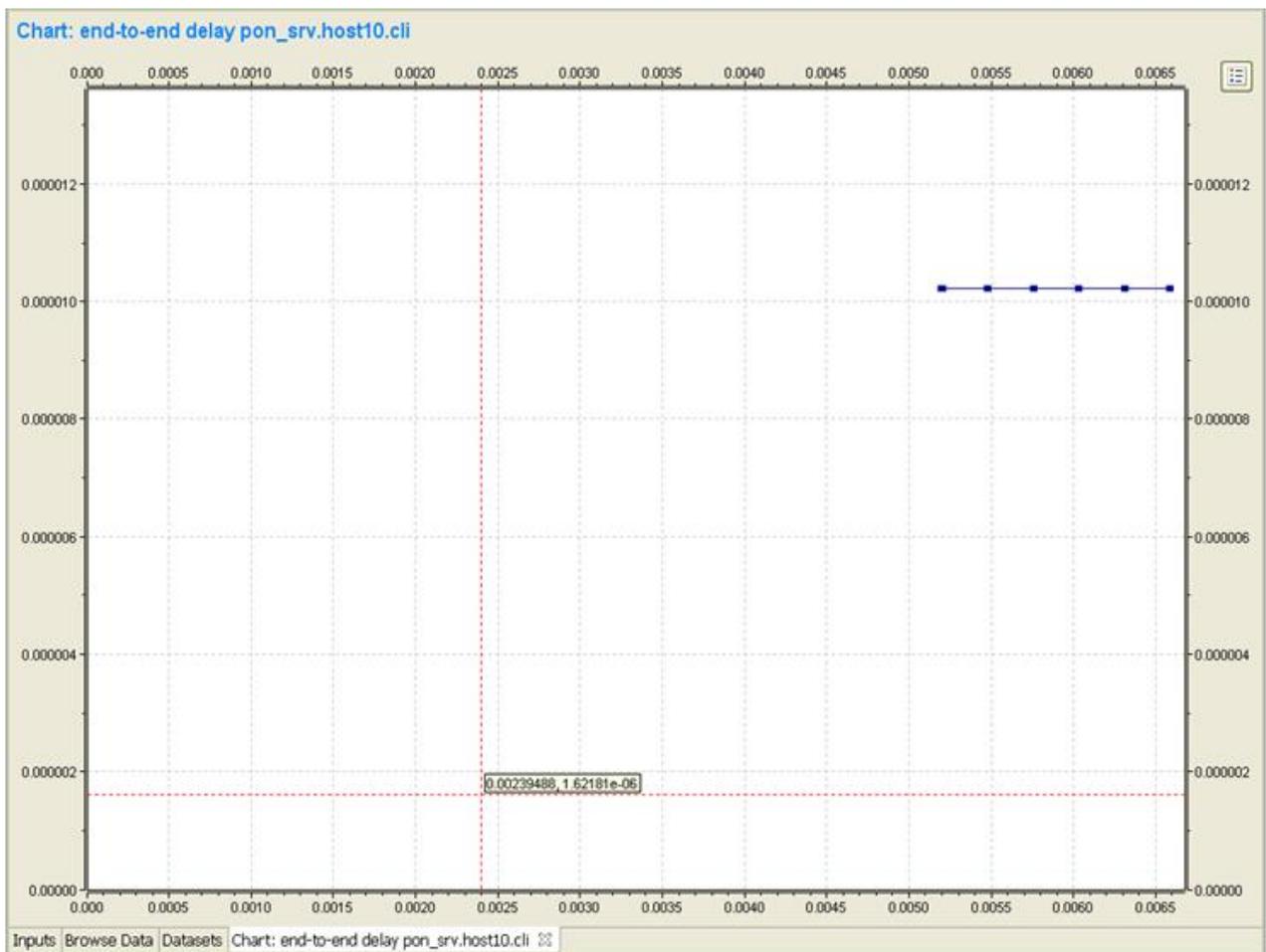


**Figure 5.08 :** Histogramme sur l'activité de l'ONU numéro 1

La figure 5.08 rapporte statistiquement l'activité de l'ONU numéro 1 au niveau MAC pendant toute la durée de la simulation.

L'histogramme en rouge représente le volume total des données(en octet) traité par cet équipement pendant une unité de temps c'est-à-dire les octets que l'ONU reçoit par seconde des entités qui lui sont périphériques (OLT/Utilisateur). Il traduit de ce fait la capacité de l'ONU à gérer un grand volume de trafic pendant un temps relativement court. Le pic d'environ 800 Mo/s provient de l'adaptation de l'ONU au débit conçu pour le support de transmission de l'EPON (fibres optiques).

L'histogramme en vert représente les octets envoyés par seconde vers les équipements périphériques (OLT/utilisateurs). Son pic (aux environs de 480Mo/s) est nettement inférieur à celui des octets reçus. Cette différence est due au fait que les octets reçus par L'ONU sont des données de réponses (assez lourdes puisqu'ils s'agissent de données TV, voix et internet) et des requêtes des clients vers les serveurs alors que les octets envoyé ne sont essentiellement que des données voix et des requêtes (le client n'envoie pas de données TV en streaming vers le serveur). En raison du temps de simulation assez faible les volumes de données échangés sont également très faibles par rapport aux deux histogrammes cités précédemment. Néanmoins on peu remarquer sur la même figure la présence de collision (histogramme en gris) et de bits rejetés en raison d'erreurs pendant la transmission (histogramme en grenat), mais ces derniers n'ont pas impactés sur le débit et la qualité de transmission représenté dans la figure 5.07.



**Figure 5.09:** *Délai de bout en bout*

Dans la figure 5.09 expose une courbe représentant le délai de bout en bout du réseau. Outre la faible valeur qui y figure, on peu remarquer son incroyable constance (aucune variation du délai).

Ces qualités s'expliquent tout d'abord par le fait que le réseau hérite des propriétés intéressantes de la fibre optique notamment le débit élevé qu'il peut offrir. Par ailleurs, la grande capacité des composants du réseau (ONU/OLT) à traiter de volumes élevés de données joue grandement en sa faveur.

## **5.6 Conclusion**

Tout au long de ce chapitre on a développé un modèle de simulation du réseau EPON. Cette simulation se base sur le simulateur OMNET++ version 4. Notre étude a été consacrée sur la mise en œuvre et l'évaluation de la performance de ce type de réseau, plus précisément au niveau de la sous-couche MAC de la couche liaison de données : les octets entrants et sortants de l'ONU, le rapport statistique de l'activité de l'ONU et enfin le délai de bout en bout. D'après cette étude, nous pouvons conclure que le réseau est performant car les débits qui lui sont associés dépassent largement les exigences en termes de qualité de service des applications envisagées sur l'EPON ; aussi, le délai de bout en bout est très petit par rapport à ceux des autres réseaux (ADSL...). En bref, l'EPON répond positivement aux contraintes de qualité de services pour les applications gourmandes en ressources (par exemple le HDTV).

## CONCLUSION

C'est dans un contexte où il est difficile de prévoir l'avenir des applications exploitables sur un réseau que la solution optique trouve sa justification.

En effet, il a été développé tout au long de cet ouvrage que constituer un réseau d'accès en utilisant les caractéristiques intéressantes de la fibre optique fournit des avantages diverses en termes de débits et d'exploitation.

Pour en arriver à cette conclusion nous avons dû présenter la fibre optique et ces différentes propriétés. C'est ensuite que nous avons développé dans les grandes lignes le réseau EPON ce qui a permis de comprendre le fonctionnement d'un réseau de type PON et découvrir les protocoles qui s'y implémente.

Le troisième chapitre à été consacré à la présentation des gestions de ressources et les plans de contrôle Qos qui a permis d'analyser les différentes contraintes sur les services qui peuvent être implantés dans le réseau et d'en mesurer la capacité du réseau à accueillir de telles applications. Et au cours du chapitre quatre nous avons étudiés les différentes services composant l'offre triple play qui a permis de sonder les conséquences en termes de bande passante de ces trois services.

Enfin, à l'aide d'un simulateur nous avons pu modéliser un réseau de type EPON pour évaluer et analyser les données collectées au niveau de différentes entité du réseau. Ce dernier nous a instruits sur les capacités réelles du réseau grâce aux équipements et du support de transmission.

Outres, ces différentes assertions de nouvelles normes ont été établis afin de succéder à l'EPON. L'évolution est donc possible par le biais de nouvelles implémentations matériels et logiciels sans aucune modification du support de transmission. On peut donc affirmer que la fibre optique est un support évolutif, capable de rendre pérenne les infrastructures des opérateurs même pour implémenter de nouvelles applications qui sont encore en cours de développement.

**ANNEXE 1 :**  
**LES EQUATIONS DE MAXWELL EN OPTIQUE**

La génération et la propagation de la lumière sont régies par les lois de l'électrodynamique. En particulier, les équations de Maxwell, associées aux conditions aux limites des champs électrique et magnétique et d'un modèle physique du milieu de propagation, grâce aux équations de constitution, permettent la description exacte de la propagation de la lumière générée par une source. Cependant, sauf pour quelques cas particuliers, une solution exacte est extrêmement difficile à décrire en termes mathématiques pratiques. C'est pourquoi plusieurs théories approximatives ont été introduites pour décrire simplement la propagation de la lumière.

Une propagation de la lumière dans un milieu inhomogène, isotrope, linéaire et sans perte est parfaitement décrite par les équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A1.01})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A1.02})$$

Les relations constitutives sont décrites par A1.03 et A1.04 :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{A1.03})$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 n^2 \vec{E} \quad (\text{A1.04})$$

Notons que l'indice de réfraction  $n$  peut dépendre de la position de la lumière dans l'espace.

Nous savons qu'une distribution spectrale quelconque, des sources qui génèrent les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  peut s'analyser au moyen de la théorie de Fourier comme une superposition d'ondes sinusoïdales. Ce qui nous amène à étudier, d'abord, une dépendance sinusoïdale pure des champs, en introduisant la notation phaseur pour la fréquence angulaire,  $\Omega$ :

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}\{\vec{E}(x, y, z, t)e^{i\Omega t}\} \quad (\text{A1.05})$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re}\{\vec{H}(x, y, z, t)e^{i\Omega t}\} \quad (\text{A1.06})$$

En introduisant l'impédance du vide défini par la formule A1.07, et le nombre d'onde A1.08 afin de se conformer aux usages de l'optique moderne on spécifiera la fréquence de la source à partir de la longueur d'onde dans le vide  $\lambda_v$ .

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (\text{A1.07})$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_v} \quad (\text{A1.08})$$

Les équations de Maxwell pour les champs E et H se transforment donc et deviennent les équations A1.09 et A1.10 pour permettre l'étude complète d'un système optique

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -ik_0\eta_0\vec{H} \quad (\text{A1.09})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = in^2 \frac{k_0}{\eta_0} \vec{E} \quad (\text{A1.10})$$

## ANNEXE 2 : PRESENTATION DE OMNET ++

OMNET++ est un outil de simulation réseau à évènement discret orienté objet. Il a une architecture générique, donc peut être exploité dans divers domaines :

- Modélisation des réseaux câblés et sans fils
- Modélisation des protocoles
- Modélisation des trafics et files d'attente
- Validation des architectures systèmes
- Evaluation des performances des réseaux complexes
- Modélisation des systèmes multiprocesseurs
- Simulation et modélisation de tous systèmes où une approche par évènement discret peut convenir.

OMNET++ n'est pas un logiciel de simulation de quelque chose de concret, il ne fait que fournir une infrastructure et des outils pour concevoir des simulations. Un élément fondamental de cette infrastructure est une architecture des composants pour les modèles de simulation. Les modèles sont des associations de plus petits composants nommés modules. Un module bien écrit est parfaitement réutilisable (pour un autre modèle ou une autre simulation), et associé de différentes manières un peu comme dans les blocs lego.

Les modules sont connectés les uns aux autres via des ports nommés « gates » la combinaison de plusieurs module forme un module composé. Par ailleurs, aucune limite n'est imposée sur la profondeur de l'emboîtement de ces modules.

L'échange de message est un point important lors de la conception d'un module. En effet la communication entre modules se fait par des messages qui peuvent être porteurs de données ou non, et passent par des chemins prédéfinis (via les ports et les connexions) ou bien adressé directement aux destinataires. Des paramètres peuvent être implémentés dans les modules pour personnaliser leurs comportements et/ou pour paramétrer la topologie du modèle. Au niveau le plus bas de la hiérarchie des module on retrouve les modules simples qui sont écrit en C++ et encapsulent des modèles de comportement.

## ANNEXE 3 :

### PRESENTATION DU LANGAGE NED

NED est un acronyme mis pour Network Description. C'est un langage spécifique utilisé par les utilisateurs du logiciel pour décrire la structure du modèle de simulation. Il permet la déclaration de modules simples et l'assemblage de ces derniers en modules composés.

La notion de hiérarchie introduite par le langage est un bon moyen de combattre sa complexité. En OMNET++, un module qui semble très complexe peut être découpé en module plus petits et peu ou non complexe.

La réutilisabilité des modules simples et composés, ne permet pas seulement la réduction de la réécriture et copie des codes, mais aussi ces modules peuvent être intégrées dans la base des bibliothèques.

Le langage NED possède une représentation équivalente à une structure arborescente qui peut être exporté en tant que fichier XML, les fichiers NED peuvent, d'ailleurs, être convertis en fichier XML et reconvertis en fichier NED sans pertes ni des données ni des commentaires qui y sont inclus.

La syntaxe qui compose une ligne de code en langage NED est assez proche des différents langages de programmation informatiques dont nous avons l'habitude. La structure en bloc (lignes successives délimités par des accolades) et les paquetages ressemblent à peu près aux langages orientés objets.

## ANNEXE 4 :

### CODE SOURCE DE LA MODELISATION DE L'ONU

```
import inet.linklayer.ethernet.EthernetInterface;
import Vlans.linklayer.EtherMacVlan;

package PON.ONU;
//
// TODO auto-generated module
//
module EPON_ONU
{
parameters:
@node();
@display("i=device/modem");
string relayUnitType = default("EPON_ONU_relayDefault");
gates:
inout ethg;
inout epon;

submodules:
onu_port: ONU_Port {
@display("p=78,134");
}
epon_ONU_relay: <relayUnitType>like EPON_ONU_relay {
@display("p=147,56");
}
mac: EtherMacVlan {
@display("p=212,137");
promiscuous = true;
}

connections allowunconnected:
mac.upperLayerIn<--epon_ONU_relay.ethOut;
mac.upperLayerOut-->epon_ONU_relay.ethIn;
mac.phys<-->ethg;

epon_ONU_relay.toPONout-->onu_port.netwIn;
epon_ONU_relay.toPONin<--onu_port.netwOut;

onu_port.phys<-->epon;
}
```

## ANNEXE 5 :

### CODE SOURCE DE LA MODELISATION DE L'OLT

```
import inet.linklayer.ethernet.EtherMAC;
import Vlans.linklayer.EtherMacVlan;
import PON.common.*;

package PON.OLT;

//
// TODO auto-generated module
//
module EPON_OLT
{
  parameters:
  @node();
  @display("i=device/router");
  string relayUnitType = default("EPON_OLT_relayDefault");
  gates:
  inout ethg;
  inout epon;
  submodules:
  epon_OLT_relay: <relayUnitType>like EPON_OLT_relay {
    @display("p=106,105");
  }
  mac: EtherMacVlan {
    @display("p=47,185");
    promiscuous = true;
  }
  olt_if: OLT_IF {
    @display("p=165,185");
  }
  onuTable: ONUTable {
    @display("p=39,26");
  }
  connections:

  mac.upperLayerIn<--epon_OLT_relay.ethOut;
  mac.upperLayerOut-->epon_OLT_relay.ethIn;
  mac.phys<-->ethg;

  epon_OLT_relay.toPONout-->olt_if.netwIn;
  olt_if.netwOut-->epon_OLT_relay.toPONin;

  olt_if.phys<-->epon;
}
```

**ANNEXE 6 :**  
**CODE SOURCE DE LA MODELISATION DU COUPLEUR PASSIF**

```
#include "PON_Splitter.h"
Define_Module(PON_Splitter);
void PON_Splitter::initialize()
{
    numMessages = 0;
    col_downstream = 0;
    col_upstream = 0;
    previousMsg = 0;
    WATCH(numMessages);
    WATCH(col_downstream);
    WATCH(col_upstream);
    ports = gateSize("portg");
    haltOn = par("haltOn");
    // Put the gates on instant transmission
    // (or suffer from collisions)
    gate("portu$i")->setDeliverOnReceptionStart(true);
    for (int i=0; i<ports; i++)
        gate("portg$i",i)->setDeliverOnReceptionStart(true);

    // Display analogy
    chartmp[20];
    sprintf(tmp, "1:%d", ports);
    getDisplayString().setTagArg("t",0,tmp);
}
void PON_Splitter::handleMessage(cMessage *msg)
{
    // Handle frame sent down from the network entity: send out on every other port
    cGate *ingate = msg->getArrivalGate();
    EV << "Frame " << msg << " arrived on port " << ingate->getName() << "...\n";
}
```

```

if (ingate->getId() == gate( "portu$i" )->getId()){
EV << "sending to clients\n";
// DownStream
if (ports==0)
{
deletemsg;
return;
}

for (int i=0; i<ports; i++)
{
// if it is the last port to send, do NOT duplicate
boolisLast = (ingate->getIndex() ==ports-1) ? (i==ports-2) : (i==ports-1);
// Check if we have 1 port to ONU...
if (ports==1) isLast=true;
cMessage *msg2 = isLast ? msg : (cMessage*) msg->dup();

if (gate( "portg$o",i)->getTransmissionChannel()->isBusy() ) {
EV << "PON_Splitter: DOWNSTREAM COLLISION (#: "<<col_downstream<<)" <<endl;
EV << "PON_Splitter: Tx Finish time: " <<
gate( "portg$o",i)->getTransmissionChannel()->getTransmissionFinishTime()
<<endl;
EV << "PON_Splitter: Diff: " <<
gate( "portg$o",i)->getTransmissionChannel()->getTransmissionFinishTime() -simTime()
<<endl;
col_downstream++;
delete msg2;
deletemsg;
return;
} else {
send(msg2, "portg$o",i);
}
}

```

```

    }
}
else{
EV << "sending to UpLink\n";
if (gate("portu$o")->getTransmissionChannel()->isBusy() ) {

printUpStreamDebug(msg);
col_upstream++;

if (col_upstream>= haltOn)
error("Simulation HALTED DUE TO COLLISIONS ON THE SPLITTER.. "
"To disable this error change the 'haltOn' parameter...");
deletemsg;
return;
}else
send(msg,"portu$o");
}

// Here only if message sent
previousMsg=msg;
numMessages++;

}

voidPON_Splitter::printUpStreamDebug(cMessage * msg){
EV << "PON_Splitter: UPSTREAM COLLISION (#: "<<col_upstream<<)" <<endl;
EV << "PON_Splitter: Tx Finish time: " <<
gate("portu$o")->getTransmissionChannel()->getTransmissionFinishTime() <<
" simTime: "<<simTime()<<endl;
EV << "PON_Splitter: Diff: " <<
gate("portu$o")->getTransmissionChannel()->getTransmissionFinishTime() -simTime()<<endl;

```

```

EV << "PON_Splitter: Message Info:" <<endl<<
"\tFirst : "<<previousMsg->getArrivalGate()->getIndex()
<<" Time: "<<MPCPTools::simTimeToNS16(previousMsg->getSendingTime().raw())<<endl<<
"\tSecond: "<<msg->getArrivalGate()->getIndex()
<<" Time: "<<MPCPTools::simTimeToNS16(msg->getSendingTime().raw());
}

```

```

voidPON_Splitter::finish ()
{
simtime_t t = simTime();
recordScalar("simulated time", t);
recordScalar("messages handled", numMessages);
recordScalar("downstream collisions", col_downstream);
recordScalar("upstream collisions", col_upstream);
if (t>0) {
recordScalar("messages/sec", numMessages/t);
recordScalar("downstream collisions/sec", col_downstream/t);
recordScalar("upstream collisions/sec", col_upstream/t);
}
}

```

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michel F. « *les fibres optiques et les transmissions de données par voie optique* », Avril 2006
- [2] Mathis P. « *Interconnexions optiques* », Ecole spéciale de mécanique et d'électricité, 2003
- [3] [www.wikipédia.org](http://www.wikipédia.org), Avril 2011
- [4] Philippe G., « *Réseau avancé Partie 1 : Réseau de Télécommunication* », Sciences Technologies, Master SDRP, Session 2007
- [5] Philippe E., « *Approche concrète des télécommunications* », cours d'appuis sur l'étude des systèmes électroniques, Mars 2010
- [6] Jean-Marie F., David M., « *Introduction aux technologies réseaux informatique et téléphonie* », Gulliver, 1<sup>er</sup> Mars 2005.
- [7] Heyninck G., Meyers P., Van De Woestyne K., « *Evolution des réseaux de données* », Revue des télécommunications d'Alcatel, 3<sup>e</sup> Trimestre 2002
- [8] Bernard J.L., Pascal D., « *La problématique de l'optique dans le réseau d'accès* », OFC 2008
- [9] Simpson W., « *Ethernet in the first mile consortium* », University of New Hampshire Interoperability Laboratory, septembre 2005
- [10] Bob G., « *MPCP : Multi-point control protocol for EPONs* » Focal Press, Avril 2009
- [11] Pesavento G., M. Kelsey, « *PONs for the broadband local loop* », Lightwave, Septembre 1999.
- [12] Assi C., Yinghua Y., and Al., « *Dynamic Bandwidth Allocation for Quality-of-Service Over Ethernet PONs* », IEEE Journal on Selected Areas in communications , November 2003.
- [13] Antoine D., Vincent P., « *Nouvelles technologie de réseau, Système intégré INTERNET / TELEPHONE / TELEVISION* », Février 2005
- [14] [www.omnet.org](http://www.omnet.org), Février 2011

- [15] Ehrensberger J., « *Performances des réseaux et qualité de service* », Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Juin 2006.
- [16] Werner O., « *Broadcasters' requirements for IPTV* » EBU Technical Review, pp. 1-11, April 2007
- [17] Goldberg J., Kern T., « *Network structure – the internet, IPTV and QoE* », Cisco System, EBU Technical Review, October 2007