

Technologie PON adaptée aux très hauts débits

Mamadou D. Diouf⁽¹⁾, A. D. KORA⁽²⁾, S. OUYA⁽¹⁾, S. A. FARSY⁽¹⁾

Laboratoire Informatique Réseaux et Télécommunication

(1) Université Cheikh Anta Diop de Dakar

(2) Ecole Supérieure Multinationale des Télécommunications, Dakar

Dakar

lodjemail@yahoo.fr

.....
RÉSUMÉ. Le besoin en bande passante dans le réseau d'accès submergé par les technologies déjà connus que sont les DSL (Digital Subscriber Line) et FTTx (Fiber To The x) constitue un défi. Ce travail se propose de déterminer les contraintes des émetteurs et récepteurs pour une migration souple vers les réseaux optiques passifs communément appelé NG-PON (Next Generation Passive Optical Network). Il se base sur l'élaboration d'un modèle validé par le logiciel de simulation COMSIS. Ce modèle prend en compte le débit, la portée et le nombre d'utilisateurs pour un taux d'erreur fixé de 10^{-9} . Cette étude est une contribution à l'Union International des télécommunications (UIT) dans la mise en oeuvre des normes des réseaux 100G/200G PON.

ABSTRACT. The need for more bandwidth in the access network submerged by technologies already known which are DSL (Digital Subscriber Line) and FTT x (Fiber To The x) is a challenge. This work aims to determine the main constraints of transmitters and receivers for a smooth migration to passive optical networks commonly known as NG-PON (Next Generation Passive Optical Network). It is based on a developed model which is validated by the simulation software named COMSIS. This model has taken into account the speed, range and number of users for a fixed bit error rate of 10^{-9} . This study could be considered as a contribution to the International Telecommunication Union (ITU) in the implementation of 100G/200G PON network standards.

MOTS-CLÉS : réseaux passifs optiques, très haut débit, émetteurs-récepteurs 100G/200G.

KEYWORDS: passive optical networks, high data rate, 100G/200G transceivers.

.....

1. Introduction

Aujourd'hui, l'augmentation sans cesse des services multimédias entraîne un grand besoin en bande passante. En effet, avec l'arrivée de la télévision très haut débit, l'augmentation des tailles des photos et vidéos numériques, la multiplication du nombre des jeux vidéos haute qualité en ligne et le besoin de partager et d'échanger des fichiers entre internautes le plus rapidement possible et depuis n'importe quel terminal dans le monde, l'arrivée d'autres services tels que la télé-médecine, le besoin de bande passante est en constante croissance

L'objectif des fournisseurs d'accès à internet est d'assouvir ce besoin et d'offrir un réseau de plus en plus symétrique en débit montant et descendant. Actuellement, c'est la technologie xDSL (Digital Subscriber Line) qui domine le marché d'accès haut débit. Le xDSL commence cependant à céder du terrain face aux technologies FTTx qui, seules, peuvent répondre aux futurs besoins de services exigeant un très haut débit. L'architecture FTTH (Fiber To The Home) qui a été retenue est une architecture PON (Passive Optical Network). La technologie PON consiste à déployer la fibre optique jusqu'à l'abonné avec des équipements passifs. Grâce à leur topologie point à multipoints elles permettent de minimiser la place occupée pour les fibres dans les alvéoles. Sur le plan de l'ingénierie, les études technico-économiques sur les différents scénarii de déploiement d'une architecture point à multipoint ont montré l'impact important de l'occupation des interfaces PON sur les coûts. Au niveau du déploiement opérationnel, les règles d'ingénierie doivent être simples, fiables et robustes, et garantir un équilibre entre une montée en charge des clients sur ce réseau et un investissement raisonnable les premières années.

La montée en débit est un sujet majeur des organismes de normalisation comme le FSAN (Full Service Access Network) qui rassemble les principaux opérateurs historiques, dont France Télécom, ainsi que les équipementiers. Sur cette thématique, un groupe de travail y a été formé en 2006 pour étudier l'évolution du G-PON (giga PON) et établir les caractéristiques de la future génération des réseaux d'accès optiques qui offriront un débit de plus de 10 Gbit/s descendants.

En dehors du FSAN, IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) dispose aussi d'un groupe de normalisation travaillant sur l'accès optique. Elle a également normalisé le E-PON (Ethernet PON) permettant un débit symétrique (montant/descendant) de 1.25 Gbit/s partagé entre 16 ou 32 utilisateurs. L'augmentation du débit global à 10 Gbit/s est envisagée par ce groupe de normalisation avec la future norme 10G-EPON.

Mais les réseaux existants utilisent la technique d'accès TDMA optique (OTDMA). D'autres techniques d'accès multiple par les usagers existent pour densifier le trafic des données, comme le multiplexage en longueur d'onde (WDM), la répartition par code

(CDMA) ou un système hybride. Cette étude se propose une architecture système de composants optiques susceptibles de répondre aux exigences (débit, portée, nombre de clients raccordés) de la future génération du réseau d'accès optique de type PON. En effet les réseaux optiques passifs existants ont une portée maximale de 20 km en pratique. La zone rurale souvent étant très éloignées du fournisseur n'a pas accès aux services fournis par ce dernier. Notre travail consistera dans une première partie à élaborer un modèle théorique de réseaux optiques passifs prenant en compte le débit, le nombre d'utilisateurs pouvant être raccordés et la portée. Cette expression dont les résultats seraient comparés à ceux du logiciels de simulation de systèmes optiques COMSIS servirait de base pour vérifier les performances des réseaux XPON existants et de confirmer leurs limites. La seconde partie sera consacré à évaluer les performances des émetteurs et récepteurs pour des liaisons à haut débit et à grande portée.

2. Elaboration de modèles des réseaux PON

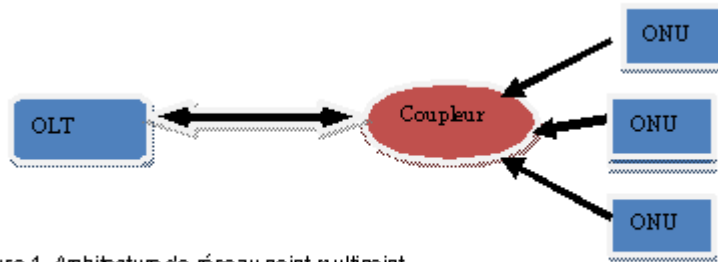


Figure 1. Architecture de réseau point-multipoint

L'élément clé de l'architecture est un coupleur optique passif (1 vers N) qui divise la puissance optique d'un émetteur central (OLT), sur plusieurs fibres chacune est liée à un récepteur spécifique pour un client spécifique (Figure.1). Les différents clients renvoient des signaux au point central de distribution, ainsi les utilisateurs partagent toute la capacité du système de transmission

La détermination du bilan de liaison [4] permet de dimensionner les différents éléments lors de la conception de liaisons optiques. Il s'agit d'analyser l'évolution de la puissance optique qui transite tout au long de la chaîne de transmission. Pour un réseau PON, le bilan de liaison s'écrit :

$$P_e - P_c - M - A.L = P_r , \quad (1)$$

Ou les pertes P_c sont dues aux coupleurs et dépendent du nombre N d'utilisateurs et des pertes des connecteurs (environ 0,5dB par connecteur). P_e est la puissance de la source, P_r la sensibilité du récepteur et M désigne la marge de fonctionnement. L'atténuation de la fibre optique est notée A en dB.km /s et sa longueur est L . Si nous remplaçons P_c par sa valeur dans (1), nous pouvons établir la relation entre la portée et le nombre d'utilisateurs le débit étant fixé.

$$P_c = 10 \log(N) - 4 * 0,5 \quad (2)$$

$$L = \frac{P_e - P_r - M - 10 \log(N) - 4 * 0,5}{A} \quad (3)$$

D'autre part, pour les calculs du bilan de liaison on considère une puissance seuil du récepteur P_r correspondant à un taux d'erreurs TEB inférieur à 10^{-9} pour un débit fixé R .

$$P_r = n_o . h v . n_{dr} R \quad (4)$$

Donc pour un nombre d'utilisateur connu, nous pouvons établir une relation entre la portée et le débit de la liaison.

$$L_{\max} = L_0 - \frac{10 \log R}{A} \quad (5)$$

$$\text{Avec } L_0 = \frac{P_e - P_c - M - 10 \cdot \log(n_o . h v . n_{dr})}{A} \quad (6)$$

Nous pouvons aussi déterminer une relation entre le nombre d'utilisateurs, la portée et le débit d'une liaison optique PON en considérant les relations (2), (3) et (4). Nous obtenons la relation (6) :

$$L_{\max} = L_1 - \frac{10 \log(N) - 10 \log R}{A} \quad (7)$$

$$\text{Avec } L_1 = \frac{P_e - M - 10 \cdot \log(n_o . h v . n_{dr}) - 4 * 0,5}{A} \quad (8)$$

Ces modèles établis (relation (1), (5) et(7)) sont validés grâce à des simulations avec COMSIS et sont vérifier sur les technologies XPON existantes.

La montée en débit des réseaux PON-TDM jusqu'à plus de 10Gbit/s [7] représente l'évolution logique pour le multiplexage temporel afin d'augmenter la bande passante de chaque utilisateur. La problématique est en cours de discussion au sein des groupes de normalisation afin de trouver les solutions techniques pour une telle évolution. En effet, le défi est de concilier la montée en débit et la réutilisation de l'infrastructure existante. La difficulté réside dans la conception de modules optoélectroniques bas coût, à l'émission et à la réception à plus de 10Gbit/s.

Pour atteindre ses objectifs, nous pouvons d'abord agir sur les récepteurs en construisant des équipements de sensibilité P_r (définie dans la relation (4)). Pour un débit $R=10\text{Gbit/s}$ et une longueur d'onde $\lambda=1550$ nous obtenons un récepteur de sensibilité de -28,75 dB, et pour 100Gbit/s et la même longueur d'onde on trouve -18,75 dB.

Après le changement des équipements pour chaque utilisateur, il est nécessaire de concevoir un émetteur pour le sens descendant. Si nous considérons l'équation (3.2), nous pouvons remarquer que le budget optique est d'autre part indépendant du débit. Pour les réseaux PON, nous pouvons écrire :

$$P_e - P_r = A.L + 10 \log(N) + M - 4 * 0,5 \quad (9)$$

Nous pouvons en déduire une relation entre la puissance minimale d'émission, le débit de liaison, la portée et le nombre d'abonné pouvant être raccordé

$$P_e = 1000 \frac{h\nu R}{A} + A.L + 10 \log(N) + M - 4 * 0,5 \quad (10)$$

Pour un nombre connu $N=32$ utilisateurs situés à une distance $L=20$ Km de l'émetteur, il faut une puissance d'émission de -5.4 dB, pour un débit de la liaison de 10Gbits sachant que nous émettons avec une longueur d'onde de 1550 nm.

4. Simulations et résultats

4.1. Paramètres de simulations

Nous avons utilisé d'une part le modèle élaboré et d'autre part le logiciel COMSIS pour simuler un exemple de réseau PON existant, l'EPON, puis proposer un réseau PON de génération futur de type 10G-PON.

Le module d'émission est constitué de cinq blocs : le modulateur externe ou nous utilisons des pertes de -13dB, une tension de référence de -4V, un coefficient de l'exposant de la fonction d'absorption de 2 et un facteur de couplage phase-amplitude de -0,5, le laser système ou le courant laser utilisé est de 100mA, les données électriques au format NRZ ou nous utilisons un débit binaire de 1,250Gbps et une longueur de registre de 23 et le détecteur à seuils ou nous considérerons un driver idéal

qui fera passer le niveau bas de -1 V à -4 V, et le niveau haut de +1 V à 0 V, sans perturber l'allure du signal.

Les paramètres laser et de fibres utilisés sont regroupés dans les tableaux 2 et 3.

| <i>Paramètres caractéristiques du laser.</i> | |
|----------------------------------------------|---------------------|
| Paramètres système du laser | |
| Longueur d'onde | 1550 nm |
| Courant de seuil | 25 mA |
| Rendement | 0,25 W/A |
| Largeur de raie | 5 MHz à 60 mA |
| Taux d'amortissement | 2 GHz à 100 mA |
| Bande à -3 dB | 10 GHz à 100 mA |
| Espacement entre mode | 1 nm |
| Chirp | 100 MHz/mA |
| Bruit RIN | -145 dB/Hz à 100 mA |

| | |
|--------------------------------------------|----------------------------|
| Longueur (km) | 33 |
| Atténuation (dB/km) | 0,25 |
| Dispersion chromatique (ps/nm/km) | $17 + 0,07\lambda(1-1552)$ |
| Effet Kerr | Oui |
| Effet Raman | Non |
| Coefficient de non linéarité (m^2/W) | $2,7 \cdot 10^{-10}$ |
| Aire effective de la section (μm^2) | 80 |
| Dispersion Modale de Polarisation | Non |
| Retard (ns) | 4 |

Tableau 2 : Paramètres du laser.

Tableau 3: Paramètres de fibres

Le réseau de transport est constituée d'une fibre monomode et d'un coupleur qui peut raccorder 32 utilisateurs. Les pertes de coupleurs considérées sont de 0,35 dB par connexion. Les caractéristiques de la fibre considérée sont résumées dans le tableau 3 :

Le module de réception a pour objectif de convertir l'information portée par la modulation du signal lumineux en impulsions électriques. Il est souvent composé d'une photodiode, d'un amplificateur électrique, d'un filtre et d'un régénérateur. Le module le plus important est la photodiode. Le modèle utilisé dans COMSIS pour cette simulation est une photodiode PIN. Les paramètres caractéristiques de la photodiode sont : une sensibilité de 0.9A/W et un courant d'obscurité de 5 nA.

4.2. Simulation du modèle théorique

Si nous considérons la relation (2), pour un débit de 1,25Gb/s, on obtient une sensibilité de 26,5 dBm. Pour une puissance d'émission de 2 dB et une marge de 2,5 dB, nous pouvons tracer une courbe représentant la portée en fonction du nombre d'utilisateurs (figure 2) si le support utilisé est la fibre avec une atténuation de 0.35dB/Km.

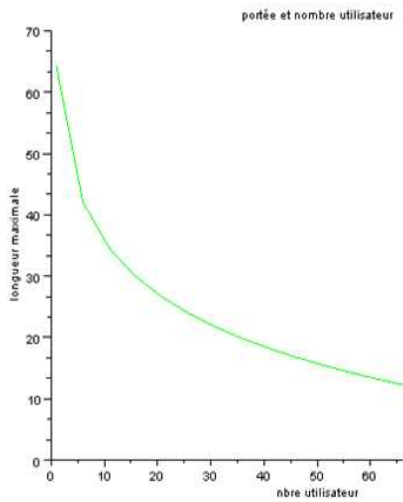


Figure 2 : la portée en fonction du nombre d'utilisateurs

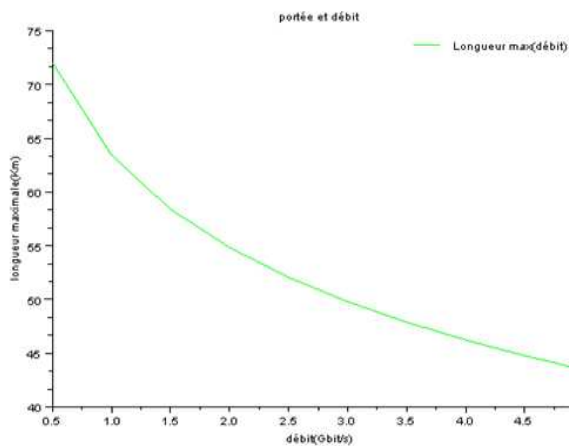


Figure 3 : la portée en fonction du débit

La figure 2 prouve que l'augmentation du nombre d'utilisateurs entraîne une diminution de la portée du signal. Cela est majoritairement dû aux pertes enregistrées au niveau du coupleur qui augmentent avec le nombre d'utilisateurs.

Pour une puissance d'émission de 2 dB, une marge de 2 dB, nous pouvons tracer une courbe (figure 3) représentant la portée en fonction du débit si le support utilisé pour raccorder 32 utilisateurs est la fibre avec une atténuation de 0.35dB/km. Nous pouvons remarquer que l'augmentation du débit d'une liaison entraîne une diminution de la portée du signal. Cela se justifie par une augmentation de la sensibilité du récepteur en fonction du débit (3).

4.3. Simulation avec ComSis:

En utilisant les paramètres de simulation (décrits dans 4.1), nous nous sommes proposé d'étudier le Taux d'Erreur Binaire (TEB) en fonction de la longueur de fibre utilisée. La figure 4 montre que le taux d'erreur binaire augmente en fonction de la longueur de la fibre. Nous constatons que le TEB dépasse 10^{-9} après 23km. Cela nous permet de dire que les abonnés doivent se situer à une distance de 23 km pour une bonne réception du signal. Donc la portée maximale pour ce réseau optique passif est de 23km. Dans la pratique, une distance de 20 km est considérée, d'où un TEB de 10^{-10} .

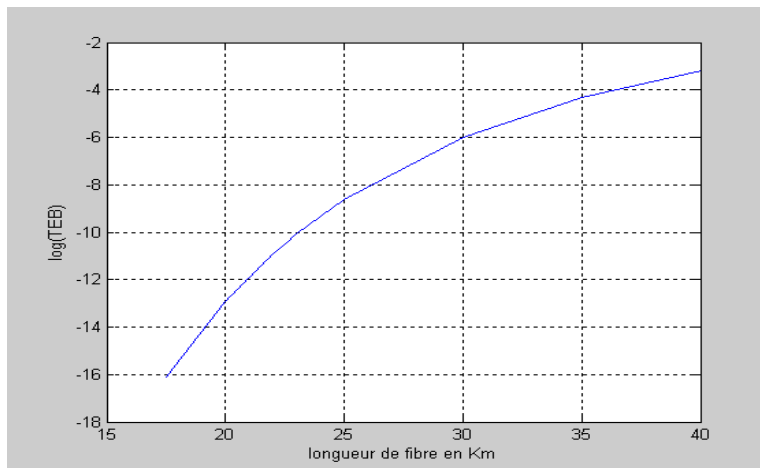


Figure 4 : évolution du TEB en fonction de la portée

Cette simulation nous a permis de vérifier les performances d'un exemple de réseau optique passif (EPON) déjà standardisé dans le marché. Cette étude va nous servir d'hypothèse pour concevoir et simuler un réseau optique de génération futur : le 10-PON.

4.4 Simulation d'un Réseau optique 10-PON

Dans cette partie, nous allons simuler un réseau optique 10G-PON raccordant à 32 utilisateurs avec une modulation directe.

Dans le module d'émission, nous avons utilisé deux blocs. Un même bloc regroupe les données et la modulation directe du laser (bloc courant-laser). Les paramètres de simulation utilisés sont : un débit binaire de 10 gigabits, une longueur de registre de 25,

un courant minimum de 12mA et un courant maximum de 200mA. Les caractéristiques du bloc laser-système et de fibres considérées sont regroupées dans les tableaux 4 et 5.

Dans la partie transmission, nous avons utilisé un coupleur à 32 utilisateurs de pertes de 0.35dB et une fibre dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 5:

Pour le module de réception, nous considérons des photodiodes avec une sensibilité de 0.9 et un courant d'obscurité de 5nA.

| <i>Paramètres caractéristiques du laser.</i> | |
|----------------------------------------------|-------------------|
| Paramètres système du laser | |
| Longueur d'onde | 1550nm |
| Courant de seuil | 10 mA |
| Rendement | 0,25 W/A |
| Largeur de raie | 5 MHz à 25mA |
| Taux d'amortissement | 20 GHz à 10mA |
| Bande à -3 dB | 20GHz à 100 mA |
| Espacement entre mode | 1 nm |
| Chirp | 100 MHz/mA |
| Bruit RIN | -145dB/Hz à 400mA |

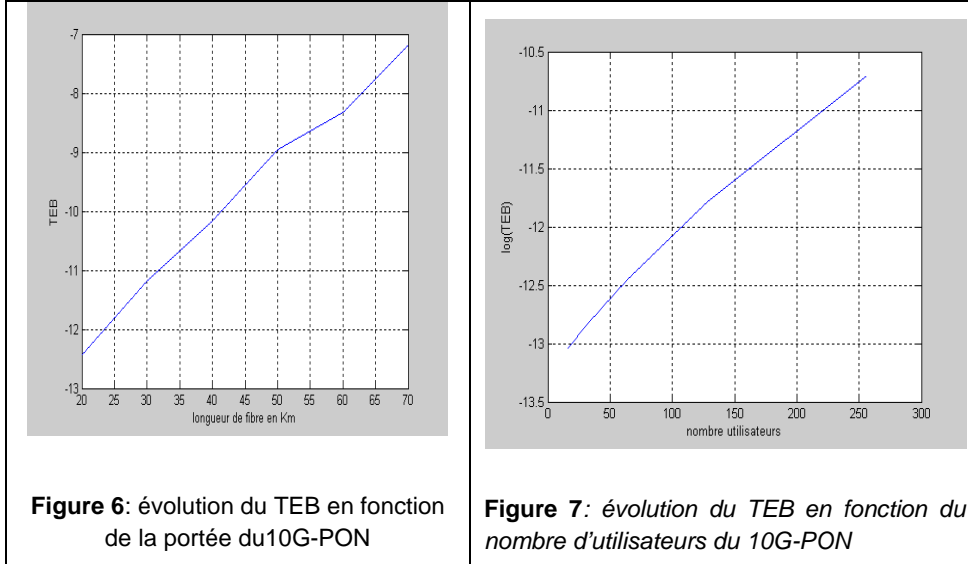
| | |
|--------------------------------------------|------------------------------|
| Longueur (km) | Variable |
| Atténuation (dB/km) | 0,22 |
| Dispersion chromatique (ps/nm/km) | $17 + 0,07*(\lambda - 1552)$ |
| Effet Kerr | Oui |
| Effet Raman | Oui |
| Gain Raman (m^2/W) | $7.48e^{-21}$ |
| Fréquence de résonance (THz) | 12 |
| Demi-largeur de raie de Raman(THz) | 6.432 |
| Coefficient de non linéarité (m^2/W) | $2,7.10^{-10}$ |
| Aire effective de la section (μm^2) | 80 |
| Dispersion Modale de Polarisation | Non |
| Retard (ns) | 0.1 |

Tableau 4: Paramètre du laser 10G

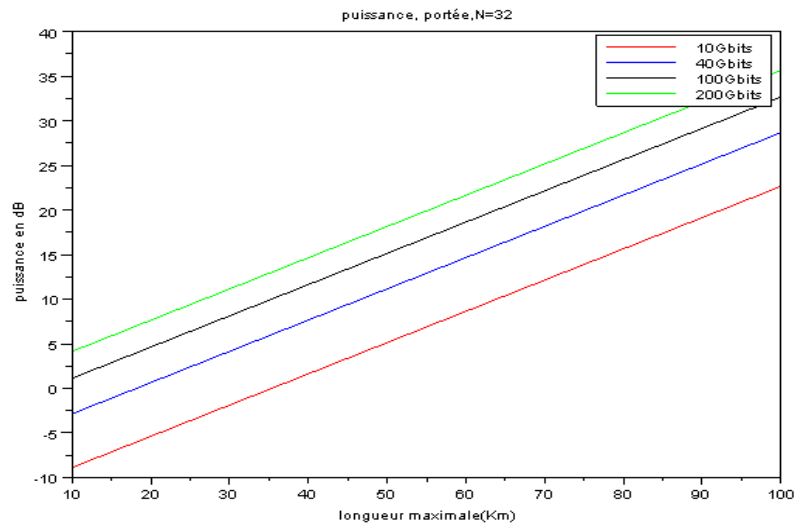
Tableau 5 : paramètre de fibre 10Gbits.

Dans la figure 6 nous nous pouvons, comme en (4.2), évaluer le TEB en fonction de la longueur de fibre utilisée, pour un nombre d'utilisateurs fixé à 32, un choix judicieux d'un émetteur pouvant émettre jusqu'à 10gigabits. Nous constatons que le TEB augmente en fonction de la longueur de fibre utilisée. C'est-à-dire plus les utilisateurs sont éloignés du fournisseur, plus la détection d'erreurs à la réception est probable. Nous constatons aussi que le TEB dépasse 10^{-9} après 50km. Cela nous permet de dire que les abonnés doivent se situés à une distance de 50 km pour une bonne réception du signal. Donc la portée maximale pour ce réseau optique passif est de 50km.

Dans l'architecture proposée, nous allons maintenant fixer la longueur de la fibre à 25km, toujours avec un débit de 10gigabits. Nous obtenons les résultats de la figure 7. Cette dernière montre le TEB augmente en fonction du nombre d'utilisateurs. Mais nous constatons que jusqu'à 256 utilisateurs, nous avons un TEB de 10^{-9} . Donc l'architecture proposée fournit un débit de 10gigabits à 32 utilisations qui doivent se situer à une distance de 25km pour recevoir le signal avec un TEB de 10^{-9} .



4.5 contraintes des émetteurs récepteurs 100G/200G-PON



La formule (10) nous donne l'évolution de la puissance d'émission en fonction de la portée et du débit le nombre d'utilisateurs étant fixé à 32. La figure 7 constitue une synthèse des projections sur les contraintes des émetteurs et récepteurs pour les très hauts débits notamment 100G/200G-PON. Nous pouvons déjà observer sur cette figure que la pente de ces courbes assimilées à des droites affines est proportionnelle aux débits simulés. Pour même distance les contraintes en puissance des émetteurs augmentent lorsque le débit supporté par le réseau augmente. Nous en déduisons un besoin minimum de 7dB (37dBm) et 3dB (33dBm) pour des débits respectifs de 200G-PON et de 100G-PON pour une distance approximative de 20km et pouvant raccorder 32 utilisateurs comparativement aux technologies XPON existants : APON, EPON, BPON et GPON.

5. Conclusion :

L'étude des Technologies PON (Passive Optical Network) de nouvelle génération est une préoccupation d'actualité. Après la présentation dans ce travail du modèle théorique simplifié et adapté à ces réseaux supposés supporter de très hauts débits, les simulations sous ComSis des réseaux existants et de leurs performances ont été réalisées afin de confirmer la validité du dit modèle.

Une première partie, il a été établie une relation entre le débit d'une liaison, le nombre maximal d'utilisateurs que le réseau peut supporter et la distance maximale où doivent se situer les abonnés pour recevoir le signal avec un taux d'erreur requis de 10^{-9} . Cette étude a aussi permis d'établir une relation entre la puissance d'émission, la portée et le débit.

La deuxième partie de ce travail a permis de déterminer les caractéristiques des émetteurs/réceptions pour une liaison à grande portée pouvant ainsi raccorder des utilisateurs se situant à de grandes distances du fournisseur. Le réseau 10G-PON actuellement en cours de normalisation a été l'objet de simulation dans ce travail permettant ainsi de proposer des paramètres physiques appropriés des émetteurs et récepteurs capables de garantir des taux d'erreurs escomptés. Nous avons aussi à cet effet étudié l'évolution du TEB en fonction de la distance, le nombre d'utilisateurs étant fixé, et celle du TEB en fonction du nombre d'utilisateurs, la distance fixée.

Il ressort que les émetteurs et récepteurs 100G/200G-PON étudiés dans ce travail requièrent de puissance plus élevée comme le montrent les simulations réalisées. L'intérêt de ces résultats est certains dans la mesure où ils serviront dans la mise en œuvre de la migration aux futures réseaux PON et la définition de leurs normes.

6. Références

[1] Alex Vukovic, Khaled Maamoun, Heng Hua, Michel Savoie “*Performance Characterization of PON Technologies : Broadband Applications and Optical Networks*”, Communications Research Centre (CRC), Ottawa, ON, Canada, K2H 8S2.

[2] ITU-T, “*Réseaux optiques passifs gigabitaires: Spécification de la couche dépendante du support physique*”. G.984.2, Mars 2003

[3] ITU-T Recommendation G.984.5: *Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Enhancement band*.

[4] Zeno Toffano : *Composants photoniques et fibres optiques* : Ellipses Edition Marketing S.A., 2001.

[5] Jean-Louis VERNEUIL, *Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s*, 2003limo0021.