

ÉVALUATION DES PERTES D'UN FAISCEAU LASER D'UNE LONGUEUR D'ONDE $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (FENÊTRE DES TÉLÉCOMS) SE PROPAGEANT DANS UN FILTRE OPTIQUE À BASE DE MICRO-RÉSONATEUR POLYMÈRE UTILISÉ DANS UN RÉSEAU PON

A. MAMANOU⁽¹⁾, M. GADONNA⁽²⁾, F. KHELFAOUI⁽¹⁾ et K.E. AÏADI⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire LENREZA, Département de Physique,

Faculté des Sciences, de Technologie et des Sciences de la Matière,

Université Kasdi Merbah – Ouargla, 30000 Ouargla, Algérie

⁽²⁾ Centre Commun Lannionais d'Optique, 6 Rue de Keramont, 22305 Lannion Cedex, France

E-mail : abdellatif_mamanou@yahoo.fr

RÉSUMÉ : Dans la pratique, un PON (*Passive Optical Network*) est un réseau qui propose une offre d'accès basée sur les fibres optiques jusqu'au domicile du client. Il fournit à la fois : la téléphonie, la vidéo, l'accès internet (ADSL) et la TVHD à très hauts débits qui peut atteindre les 100 Mbit/s. Son avantage consiste dans le fait qu'il est le plus économique en fibre et en génie civil. Par contre, la propagation du Laser dans les différentes branches du PON est toujours accompagnée par des pertes. Le but de ce présent travail est d'évaluer par simulation les pertes au niveau des guides d'onde qui font partie des filtres passifs de longueurs d'onde placés chez les abonnés [1]. Dans notre cas, ces filtres sont à base de polymères (une gaine de PMATRIFE d'indice de réfraction $n=1,409$ et un cœur de PVCi d'indice de réfraction $n=1,562$). Par ailleurs pour que les fonctions optiques puissent s'intégrer dans les réseaux des télécommunications, les guides d'onde doivent être monomodes. La simulation par le logiciel OlympIOs donne la taille maximale $L_{\text{max}} = 1,5 \mu\text{m}$ pour qu'un guide préserve sa monomodalité, à ce stade les pertes calculées par les différences finies sont estimées à $1,35015 \cdot 10^{-08}$ dB/cm. On remarque que les pertes augmentent avec le rétrécissement du guide puisqu'une grande partie de l'intensité se trouve en dehors des frontières du cœur. Pour confirmer ces résultats, il est indispensable d'effectuer une caractérisation optique de ce type de guides. En perspective, nous proposons le calcul des pertes au niveau du micro- résonateur en anneau en employant d'autres techniques : analytiques et numériques adéquates.

MOTS-CLÉS : réseau PON, guide d'ondes, polymères, filtre optique, micro-résonateur en anneau, pertes, longueur d'onde, zone de couplage, propagation de laser, guide monomode, différences finies.

Introduction : Les débits offerts par l'ADSL en utilisant la paire torsadée classique (à base de cuivre) ont montré leurs limitations et deviennent insuffisants pour assurer le fonctionnement de ce qu'on appelle à l'heure le "triple-play" (voix, vidéo et accès Internet) et de la TVHD. D'où une migration entamée vers l'ère du Très Haut Débit (THD), qui exploite l'énorme progrès réalisé dans les technologies basées sur les fibres optiques notamment le déploiement de réseau dit : Passive Optical Network «PON». Le PON qui présente une des solutions privilégiées qui satisfont aux exigences précitées, il fournit un débit pouvant atteindre les 100 Mbit/s. En fait, Le PON consiste à utiliser une seule fibre pour plusieurs abonnés (jusqu'à 64 par fibre) une longueur d'onde par abonné (voir Fig.1). Pour chacun des sens de transmission et sans utiliser de routeur de réseau d'accès, ce qui représente un grand atout en plus d'autres avantages comme : la flexibilité dans l'allocation de la bande passante, une Infrastructure plus légère et à coûts réduits (en termes de génie civil), une mutualisation de la fibre...etc. Par ailleurs à travers le PON, pour acheminer le flux de l'information (vidéo, Internet et téléphonie classique) à partir du central jusqu'à l'utilisateur final, on utilise une seule fibre de transport (pour N abonnés) accordée par un coupleur passif et enfin un filtre accordable placé chez chaque abonné qui assure une connexion optique (Laser) caractérisée par λ_i à l'entour de $1,55 \mu\text{m}$ différente des autres. L'envoi et la réception des données depuis le central vers le terminal et vis versa dépend de la nature des données par exemple : des longueurs d'ondes λ_i entre 1480-1500 nm sont utilisées pour la téléphonie et les données. Pour la réception, λ_i se situe dans une fourchette de 1260-1360 nm. Pour assurer le transport de la vidéo (tels que la visioconférence, la télésurveillance, la télévision numérique) λ_i se situe entre 1550-1560 nm. Par contre la propagation du Laser dans les différentes branches du PON est toujours accompagnée par des pertes qui doivent être limitées par le cahier de charge du constructeur des différents composants formant ce type de réseaux. Le but de ce présent travail est l'évaluation par simulation des pertes au niveau des guides d'onde qui font partie des filtres passifs placés chez l'abonné. Ces filtres sont à base des micros résonateurs polymères. En effet ce travail entre dans le cadre d'un projet baptisé SELECTACCES mené par le : Centre Commun Lannionais d'Optique (CCLO) [8]. Les faibles pertes dans le domaine des télécoms, les très bonnes propriétés non linéaires ainsi que le modeste coût de mise en œuvre et d'assemblage rendent le polymère un candidat favori parmi les matériaux utilisés dans l'optique intégrée.

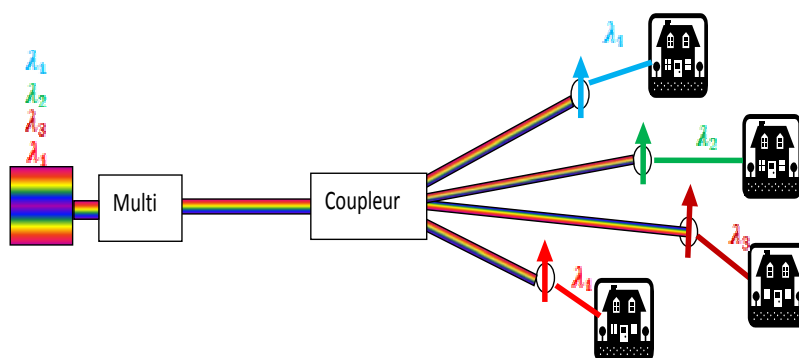


Figure 1 : Principe du réseau PON

1. Principe de guidage

D'une manière générale, la propagation d'un phénomène dans un système donné se fait le long de directions particulières en satisfaisant à des conditions propres à ce système [2]. Le guidage dans les guides d'ondes repose sur le principe de réflexion totale obtenue par la relation de Snell –Descartes (Fig.2a). $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, tel que n_1, n_2 , ($n_2 < n_1$) indices des deux milieux avec d'où :

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1)$$

Les guides d'ondes optiques sont définis par un cœur entouré par une gaine. La propriété de guidage est assurée par la réflexion interne totale car l'indice de réfraction du cœur est plus élevé que celui du matériau de la gaine (Fig.2a, Fig2b).

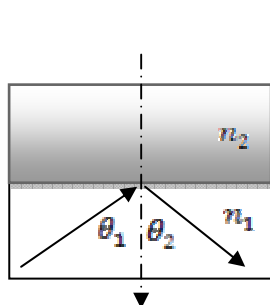


Figure 2a loi Snell-Descartes

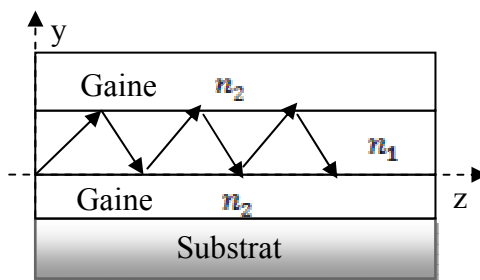


Figure 2b section longitudinale d'un guide d'onde

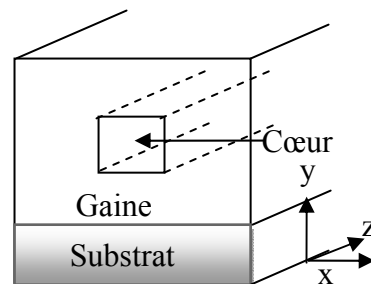


Figure 2c section transversale d'un guide

1. 2. Fonction de filtrage

La fonction de filtrage est assurée à l'aide d'un micro-anneau. La géométrie de ce dernier permet le couplage à plusieurs guides d'onde comme cela est représenté sur la figure 3. Dans le cadre d'applications aux télécommunications, on utilise le même principe de filtrage : on injecte un signal incident IN qui comporte plusieurs longueurs d'onde dont une seule correspond à une résonance de la cavité. Seule cette partie de signal sera extraite et couplée au deuxième guide (port Drop). La structure étant symétrique on peut faire transiter cette même longueur d'onde du deuxième (port ADD) au premier guide (port OUT) [4].

1. 2. 1 Model de la zone de couplage : Méthode des matrices

On adapte la méthode des matrices de diffusion développée par A. Yariv. L'idée est d'exprimer le champ en entrée (E_i) et en sortie (E_d) de la structure en fonction des coefficients de couplage (k, k') et de transmission (t et t') (Figure 4). Dans un premier temps, une approche simplifiée consiste à ne pas considérer les champs contra-préparatifs. Cette approximation ne semble pas déraisonnable, car les effets donnant lieu à ces champs sont minoritaires (réflexion dans la zone de couplage, diffusion dans l'anneau due à l'état de surface).

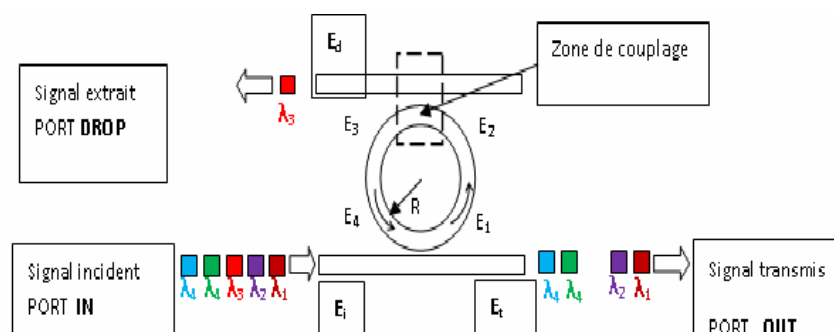


Figure 3 : Principe d'un filtre de longueur d'onde à base d'un micro-résonateur

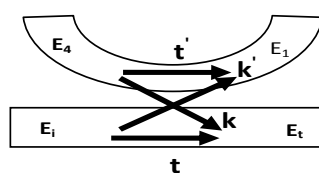


Figure 4 : Zone de couplage entre un guide d'onde et un micro- résonateur

Tout d'abord, aux points de couplage guide-anneau on a la matrice de transfert suivante :

$$\begin{pmatrix} t & jk' \\ jk & t' \end{pmatrix} \quad (2)$$

avec

$$k^2 + t^2 + \epsilon = 1 \quad (3)$$

(k, k' et ϵ') où ϵ représentent les pertes de couplage, ce qui nous donne les relations :

$$\begin{cases} E_2 = tE_1 + jk'E_4 \\ E_1 = t'E_4 + jkE_2 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} E_4 = jk'E_2 \\ E_3 = t'E_2 \end{cases} \quad (4)$$

Considérant sur un demi-tour de propagation, le déphasage accumulé $\Phi = \frac{2\pi n_{\text{eff}}L}{\lambda_0}$ et les coefficients d'atténuation $a = \exp(\alpha L)$ avec α les pertes linéiques en intensité et L la longueur effective de la propagation de mode sur un demi-tour d'anneau), il est possible d'exprimer les champs E_2, E_4 :

$$\begin{cases} E_2 = \sqrt{ae^{j\Phi}} E_1 \\ E_4 = \sqrt{ae^{j\Phi}} E_3 \end{cases} \quad (5)$$

Par substitution on aboutit aux deux fonctions de transfert :

$$\frac{E_4}{E_1} = - \frac{kk' \sqrt{ae^{j\Phi}}}{1 - t'^2 ae^{2j\Phi}} \quad (6)$$

$$\frac{E_2}{E_1} = t - \frac{kk' t' ae^{j\Phi}}{1 - t'^2 ae^{2j\Phi}}$$

Ces deux équations nous permettent d'obtenir aisément la largeur spectrale des résonances l'ISL ainsi que l'efficacité d'extraction. k et k' sont les coefficients de couplage, t et t' sont les coefficients de transmission entre le résonateur et le guide d'onde.

2. Dimensionnement d'un guide monomode

Pour obtenir la distribution du champ modal dans un guide optique, il faut chercher les solutions des équations de Maxwell qui satisfassent les conditions aux limites imposées physiquement par la forme du guide. Malheureusement une solution analytique n'est obtenue que pour des cas particulièrement simples comme le cas de guide planaire ou circulaire à saut d'indice. En ajoutant une autre dimension au guide confiné (2D) comme par exemple le guide rectangulaire, le problème devient plus difficile et il n'y a pas à l'heure actuelle, de solution analytique [5, 6, 7]. Les guides enterrés carrés possèdent toujours un mode fondamental guidé. Ce n'est pas le cas des guides rectangulaires semi-enterrés pour lesquels les profils d'indices suivant la largeur et l'épaisseur sont différents [5]. Les guides intégrés doivent être monomodes pour que les fonctions optiques puissent s'intégrer dans les réseaux des télécommunications. La conception doit prendre en considération la largeur et l'épaisseur du cœur qui garantissent que le guide d'onde soit monomode. Pour cela nous nous sommes proposé d'étudier dans un premier temps des guides carrés :

- Le cœur de ces guides est composé de PVCi ($n=1,562$) et de différentes dimensions ($l = h = 1,4\mu\text{m}$; $l = h = 1,5\mu\text{m}$; $l = h = 1,6\mu\text{m}$) ;
- Une gaine de PMATRIFE ($n=1,409$) d'épaisseur $20\mu\text{m}$ qui entoure le cœur ;
- Un substrat de Si ($n=3,4$), sur lequel la couche de PMATRIFE est déposée.

Notre étude a pour but de déterminer l'arête maximale L_{max} , pour laquelle le guide reste monomode. Ce problème peut être résolu de deux manières :

1. Analytiquement en utilisant la méthode de l'indice effectif ;

2. Numériquement en utilisant un logiciel appelé OlympIOs.

Cette dernière repose sur la simulation en utilisant la méthode de FD-Geniric qui nous permet de tracer et d'examiner les profils des modes se propageant au sein du guide.

En changeant la valeur de l dans les paramètres (Desgin sheet), on constate que le guide demeure monomode jusqu'à la dimension: $L_{\max} = 1,5 \mu\text{m}$; au-delà de cette valeur un deuxième mode apparait. Dans une deuxième étape : Pour les valeurs $> L_{\max}$: $(L_{\max} + 0,1) \mu\text{m}$ et $(L_{\max} + 0,2) \mu\text{m}$, on cherche la valeur de hauteur h_0 correspondante pour lesquelles le guide reste monomode? Pour cela on utilise la même méthode ; nous obtenons les résultats suivants :

- 1- Pour la largeur de $l = 1.6 \mu\text{m}$, la hauteur correspondante est $h_0 = 1.4 \mu\text{m}$
- 2- Pour la largeur de $l = 1.7 \mu\text{m}$, la hauteur correspondante est $h_0 = 1.3 \mu\text{m}$

3. Evaluation des pertes et de l'indice effectif

La courbe de la figure 5, représente la variation de N_{eff} en fonction de différentes arêtes l . On remarque que l'indice effectif du guide d'onde est proportionnel à la dimension de ce dernier. N_{eff} diminue avec la diminution de la taille du guide d'onde droit, par contre les pertes augmentent au fur et à mesure qu'on diminue la largeur de guide, cela résulte des solutions de l'équation de Maxwell. Les pertes du guide calculées pour différentes dimensions de guide sont représentées par la courbe de la figure 6.

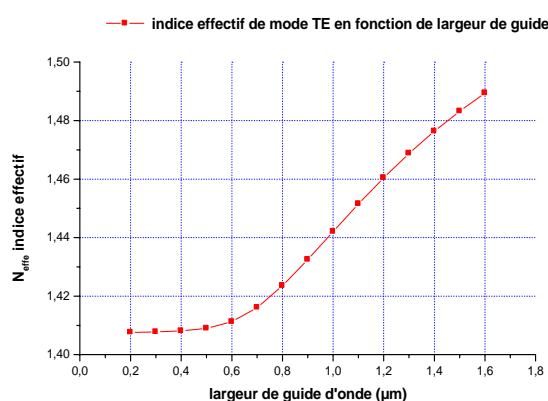


Figure 5 : Indice effectif N_{eff} en fonction de dimension de guide

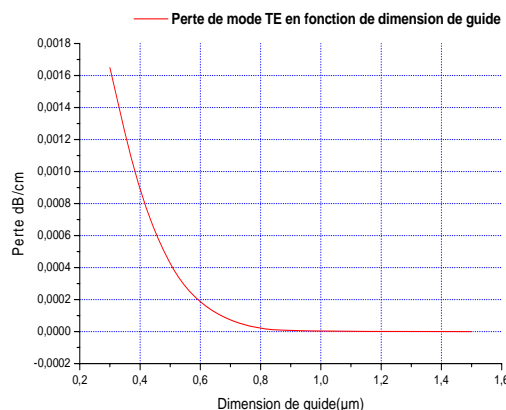


Figure 6 : Pertes calculées du guide en fonction des dimensions

3. 1. Indice effectif et pertes en fonction des dimensions de guide d'onde

Les pertes augmentent rapidement avec le rétrécissement des dimensions du guide d'onde. La figure 7 montre les profils des modes (TE) fondamentaux au sein d'un guide rectangulaire, pour différentes tailles : Figure 7 (a) $1,6 \mu\text{m}$ (b) $1,5 \mu\text{m}$ (c) $1 \mu\text{m}$ (d) $0,5 \mu\text{m}$. On constate qu'une grande partie de l'intensité (couleur rouge) se trouve en dehors des frontières des guides d'ondes de petites tailles. Par conséquent des grandes pertes résultent au niveau du cœur. Rappelons que, le coefficient de confinement qui est le rapport entre la puissance à l'intérieur de guide et la puissance totale. La figure 8 montre la variation de confinement en fonction de la taille de guide (la taille du faisceau est $5 \mu\text{m}$).

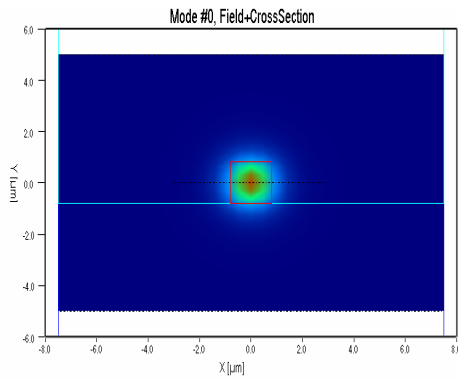


Figure 7a : Profile de mode TE guide $l=1,6 \mu\text{m}$

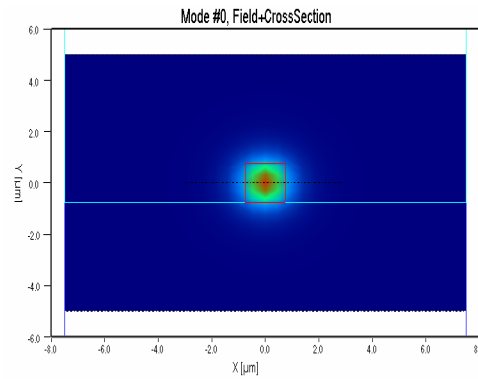


Figure 7b : Profile de mode TE guide $l=1,5 \mu\text{m}$

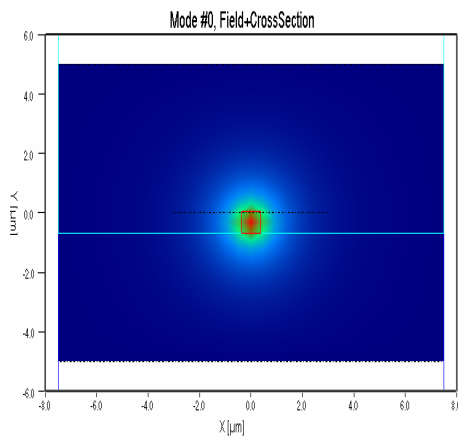


Figure 7c : Profile de mode TE guide $l=1,4 \mu\text{m}$

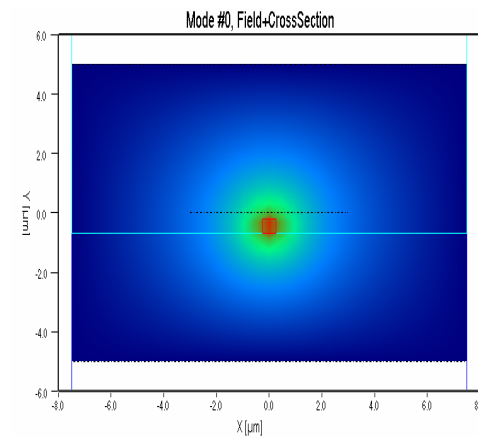


Figure 7d : Profile de mode TE guide $l=0,5 \mu\text{m}$

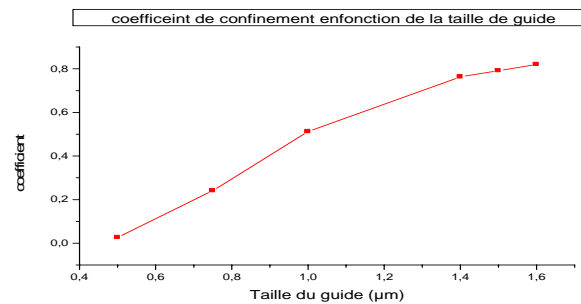


Figure 8 : Coefficient de confinement en fonction de la taille de guide

Conclusion

A la lumière des résultats obtenus en se servant de logiciel OlympIOs, nous concluons que la taille maximale pour avoir un guide monomode est bien $l = 1,5 \mu\text{m}$. L'évaluation des pertes par simulation à l'aide de la méthode FD-Geniric a donné une valeur de $1.35015 \text{ E}^{-08} \text{ dB/cm}$, pour la même dimension. Pour confirmer ces résultats il est indispensable d'effectuer une caractérisation optique de ce guide. En perspective, le calcul des pertes au niveau des micro-résonateurs en anneau nécessite l'emploi d'autres techniques : analytiques et numériques à la fois qui se basent sur des modèles théoriques.

Références

- [1] LIVRE BLANC : Les réseaux PON : éléments d'appréciation techniques, économiques et réglementaires ; Alcatel. Lucent (2006).
- [2] A. Maalouf. ; Thèse de doctorat : contribution à l'étude des procédés de réalisation de circuits intégrés optiques en matériaux polymères ; ENSSAT-CCLO (2007).
- [3] A. Yariv. ; Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides Electronics Letters; Vol. **36**, p. 321, (2000).
- [4] C. Arnaud ; Thèse de doctorat : étude de fonctions actives et/ou passives de base micro-résonateur à modes de galerie ; Université de Rennes 1 (2004).
- [5] P. Roger. ; Etude et optimisation du couplage entre guide intégré simulant celui de l'injection dans un micro- résonateur (2004).
- [6] G. Rottier. ; Adaptateur de modes pour couplage fibre optique intégré, guide optique à gradient d'indice suivant l'axe de propagation ; Rapport de stage DEA sciences et technologies des télécommunications option communications optiques ; ENSSAT-CCLO, (2003).
- [7] J. Yao.; PhD thesis: Tunable Optical Microresonators with Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS) Integration (2007).
- [8] A. Mamanou ; conception et réalisation de filtres accordables a base de micro-résonateurs polymères ; Rapport de stage DEA physique photonique et optique des télécommunications ENSSAT-CCLO Lannion (2007).