

MESURE DE L'ATTÉNUATION ET DE LA LONGUEUR D'ONDE DE COUPURE DANS UNE FIBRE OPTIQUE DOPÉE CHROME

R. SIFODIL, A. KELLOU et S. BENDAHMANE
*Laboratoire d'Électronique Quantique, Département Rayonnement,
Faculté de Physique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, Alger*
E-mail : sifodilrachid@yahoo.fr

RÉSUMÉ : La fibre optique est utilisée pour conduire la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire des milliers de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques. Les principaux paramètres qui caractérisent les fibres optiques utilisées pour les télécommunications sont : l'atténuation, la dispersion chromatique, la non-linéarité, la dispersion modale de polarisation, la propagation monomode et multi modes, et la longueur d'onde de coupure.

Notre travail porte sur la mesure de l'atténuation et de la longueur d'onde de coupure sur une fibre optique (à base de silice pure) dopée chrome. La fibre utilisée est multi modes, à saut d'indice, et de diamètre 125 μm (cœur + gaine). Les fibres dopées au chrome (Cr^{3+} et Cr^{4+}) sont utilisées pour la réalisation d'amplificateurs et de lasers compacts largement accordables. Cet intérêt provient de l'association des propriétés de confinement de l'énergie des fibres optiques avec les larges bandes d'absorption et d'émission des ions métalliques. L'autre objectif est la génération d'impulsions dans une cavité laser totalement fibrée.

MOTS-CLÉS : laser, fibre optique, atténuation

1. Introduction

Les dispositifs à fibres optiques aux terres rares résultent de deux domaines de recherche : La spectroscopie des matériaux massifs dopés aux terres rares (pour les lasers solides) et les télécommunications optiques. La fibre optique fut inventée pour répondre au besoin sans cesse croissant de transmettre de grandes densités d'informations à grandes distances. Leurs propriétés de transparence ont été associées aux qualités d'amplification de la lumière par les terres rares pour donner naissance aux fibres optiques dopées aux terres rares, puis aux systèmes (lasers, amplificateurs, capteurs, ...) qui révolutionneront nos moyens de communication.

Au début des années 60, les solides dopés aux terres rares (cristaux ou verres) furent les plus intéressants pour réaliser des lasers efficaces, optiquement excités dans le visible. Les nombreuses bandes d'absorption du néodyme (qui émet principalement autour de 1060 nm) dans les domaines visibles et proche infrarouge permettaient de l'exciter transversalement par des flashes de lampes électriques.

La première réalisation d'un laser à néodyme à configuration guidée pompé transversalement fut rapportée par E. Snitzer, en 1961 [1], dans une fibre unimodale ou faiblement multimodale est né en 1964 [2]. Enfin, en 1973, Stone et Burrus (Bell Labs) ont fait la démonstration du pompage longitudinal en continu d'une fibre multimodale (cœur de 15 à 800 μm et 1cm de longueur) par un laser à colorant [3]. La fantastique aventure des fibres optiques a démarré dès 1970 : abaissant toujours leurs pertes optiques (de 1000dB/Km au début à 20dB/Km en 1970), [4], elles

approchent maintenant de la limite inférieure théorique de 0.15dB/Km à la longueur d'onde de 1550nm .

Une fibre optique est un guide d'onde diélectrique de géométrie cylindrique dans lequel la lumière se propage dans le cœur longitudinalement.

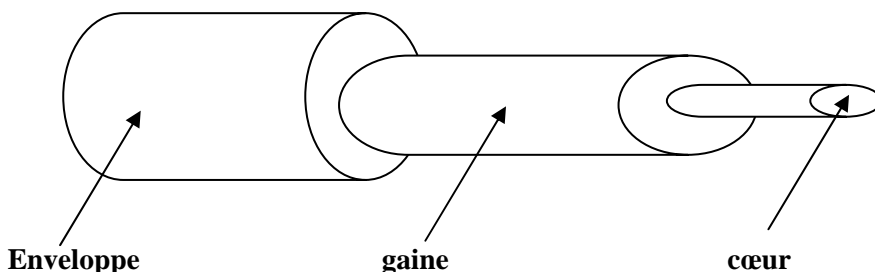


Figure 1 : Schéma d'une fibre optique.

Les fibres sont constituées de différentes couches dont en partant du centre, le cœur de rayon a (5 à 10 μ), la gaine optique et la gaine mécanique . Le diamètre typique est de 125 μ . Un revêtement de silicone recouvre le tout afin de rendre la fibre moins cassante.

Pour que la lumière puisse se propager , il est nécessaire d'avoir une différence d'indice $\Delta n = n_c - n_g > 0$ entre le cœur et la gaine optique ; n_c étant l'indice du cœur et n_g celui de la gaine . Du fait de cette condition, les fibres optiques ont un profil d'indice . On distingue trois sortes de formes d'indice : le saut d'indice, le gradient constant, et le gradient linéaire.

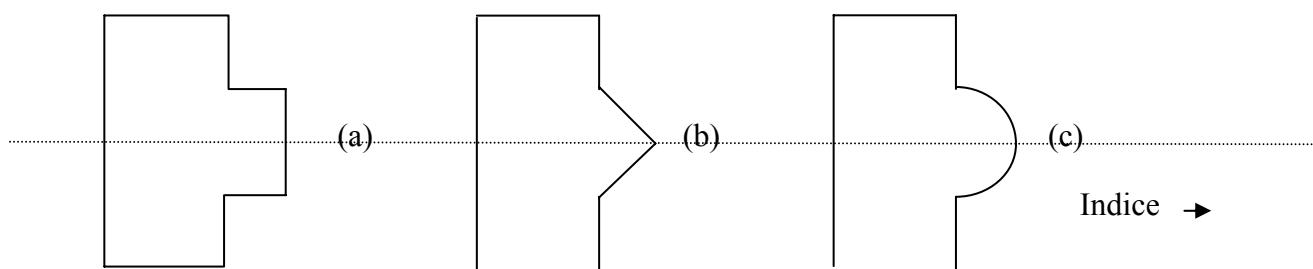


Figure 2. Différents profils de gain .

Dans une fibre optique à saut d'indice Fig: 2 (a) , tous les trajets optiques se font à la même vitesse , les temps de propagation sont directement proportionnels aux distances parcourues , et dépendent donc de l'angle d'incidence à l'entrée de la fibre. Pour augmenter le débit , il faut n'accepter que des rayons d'incidence normale . Le meilleur moyen est de réduire le diamètre du cœur , mais alors la puissance transmise dans le cœur est faible .

Par contre dans une fibre à gradient d'indice constant Fig: 2(b) , l'indice diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'axe , ce qui veut dire que la célérité augmente : un trajet plus long est parcouru plus rapidement , et cela permet de réduire la dispersion modale .

Dans le cas où le profil d'indice est un gradient linéaire (ou parabolique) Fig: 2(c) , on arrive à obtenir en très bonne approximation un chemin optique constant , et donc de réaliser un débit très grand .

L'autre caractéristique de la fibre est son ouverture numérique . Elle caractérise le cône d'acceptance . Si un rayon lumineux tente de pénétrer la fibre en provenant du cône , alors le rayon sera guidé par réflexion totale interne ; dans le cas contraire le rayon ne sera pas guidé . Ainsi tout rayon qui arrive à l'entrée de la fibre multimodale avec un angle supérieur à α_{\max} ne sera pas guidé . L'ouverture numérique $ON = \sin\alpha_{\max} = [n_c^2 - n_g^2]^{1/2}$, avec n_c et n_g les indices respectivement du cœur et de la gaine optique .

Aussi pour une fibre multimodale , on doit définir sa longueur d'onde de coupure λ_c au-delà de laquelle toute propagation de la lumière dans la fibre est unimodale . Elle est définie par la relation : $\lambda_c = (2\pi/V_c).a.ON$, avec a le rayon du cœur et V_c la fréquence normalisée de coupure . Cette formule sert à déterminer les caractéristiques de la préforme à fabriquer et le diamètre à obtenir lors du tirage afin de concevoir une fibre définie.

2. Atténuation dans une fibre optique.

L'atténuation correspond à une diminution de l'amplitude de l'onde au cours de sa propagation dans la fibre . Nous pouvons distinguer deux sortes d'atténuation dans les fibres, celles qui sont inhérentes à la nature du matériau et qui sont dites intrinsèques, et celles qui sont causées par les imperfections des méthodes de fabrication et par les ions dopants .

2.1 L'atténuation intrinsèque.

Trois effets principaux provoquent l'atténuation d'une fibre supposée exempte d'impuretés et de défauts .

* L'absorption ultraviolette qui est due aux résonances avec la structure électronique. Elle est située en dessous de 200 nm. Elle est négligeable au-delà de 600 nm et dans le proche infrarouge.

* L'absorption infrarouge est due aux différents modes de vibration du réseau de silice et des modes des liaisons formés par les dopants. La queue des bandes dues aux harmoniques des modes de vibration fondamentaux de la silice pure s'étale jusqu'à la région de 1600 nm, mais pas en dessous. Dans la silice dopée au phosphore ou au bore, d'autres modes de vibration ont des harmoniques qui s'étendent jusqu'à 1500 nm. Pratiquement, les fibres destinées à l'utilisation dans l'infrarouge ont des compositions comprenant de faibles concentrations en P et B.

* La diffusion de Rayleigh provoque des pertes suivant une loi en λ^{-4} , prépondérante dans le domaine des courtes longueurs d'onde. Dans la silice, cette diffusion est due à des fluctuations locales de son indice provoquées par des variations de densité du matériau vitreux. Celles-ci diminuent avec la température de vitrification, et sont donc réduites lorsque du phosphore est incorporé à la silice en tant que fondant.

2.2. L'atténuation réductible.

Cette atténuation est causée par les imperfections géométriques de la fibre, par la présence d'impuretés chimiques, mais aussi par l'introduction d'ions dopants. Aussi les impuretés chimiques qui jouent le rôle le plus important dans l'infrarouge sont les groupes – OH. La présence de ces ions se traduit principalement par l'existence d'un pic d'absorption situé à 1380 nm. Ces ions peuvent provenir de la diffusion d'eau depuis le tube substrat en silice ou de la solution utilisée pour le dopage du cœur.

3. Mesures. (*)

3.1. Mesure de l'atténuation dans les fibres optiques par la méthode de la fibre coupée .

Cette méthode de mesure est généralement utilisée pour les fibres dont l'absorption n'est pas trop forte, c'est-à-dire pour lesquelles on peut travailler avec des longueurs supérieures à un mètre. Soit une onde lumineuse d'intensité $I_1(\lambda)$ qui arrive à l'entrée de la fibre, au bout d'une certaine distance d parcourue dans le milieu elle devient :

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) 10^{-\alpha(\lambda)d/10} \quad \text{où } \alpha(\lambda) \text{ est le coefficient d'absorption .}$$

Le coefficient d'absorption $\alpha(\lambda) = \frac{10}{d} \log \left(\frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} \right)$ en dB / m .(1)

L'intensité $I_1(\lambda)$ est d'abord enregistrée à l'extrémité d'une certaine longueur de fibre . Puis la fibre est coupée de la longueur d , et $I_2(\lambda)$ est mesurée sans modification du couplage d'entrée. Cette technique de la fibre coupée permet de s'affranchir de la fonction d'appareil de montage. Une source de lumière blanche est focalisée à l'entrée du monochromateur à l'aide de deux lentilles. Un moteur commandé par ordinateur permet de faire varier la longueur d'onde de la lumière à la sortie du monochromateur. Un jeu de fentes fines (de largeur autour du mm) influent sur la résolution. Il existe un compromis entre l'intensité à l'entrée et sortie du monochromateur, et la résolution. La plage de longueur d'onde couverte par le monochromateur va de 400 nm à 1600 nm. L'onde lumineuse arrive sur un hacheur qui tourne à une certaine fréquence afin de réaliser des mesures en détection synchrone. L'amplificateur à détection synchrone ne conserve du signal qu'il reçoit que la partie qui est à la même fréquence et phase que le hacheur. On peut ainsi éliminer le bruit ambiant et ne détecter que la lumière transmise par la fibre. A la sortie du hacheur, le signal est couplé dans une fibre à l'aide d'un objectif d'ouverture numérique 0.35 et de grossissement 20. Le signal en sortie de la fibre est récolté par un détecteur. Deux détecteurs sont utilisés :

+ Un détecteur silicium pour les mesures dans le visible et le proche infrarouge (400 nm – 1000 nm).

++ Un détecteur InGaAs (ou Ge) pour les mesures dans l'infrarouge (850 nm – 1600 nm). Le signal est ensuite transmis à l'amplificateur à détection synchrone, puis au pc, qui trace en temps réel l'évolution de la tension en fonction de la longueur d'onde.

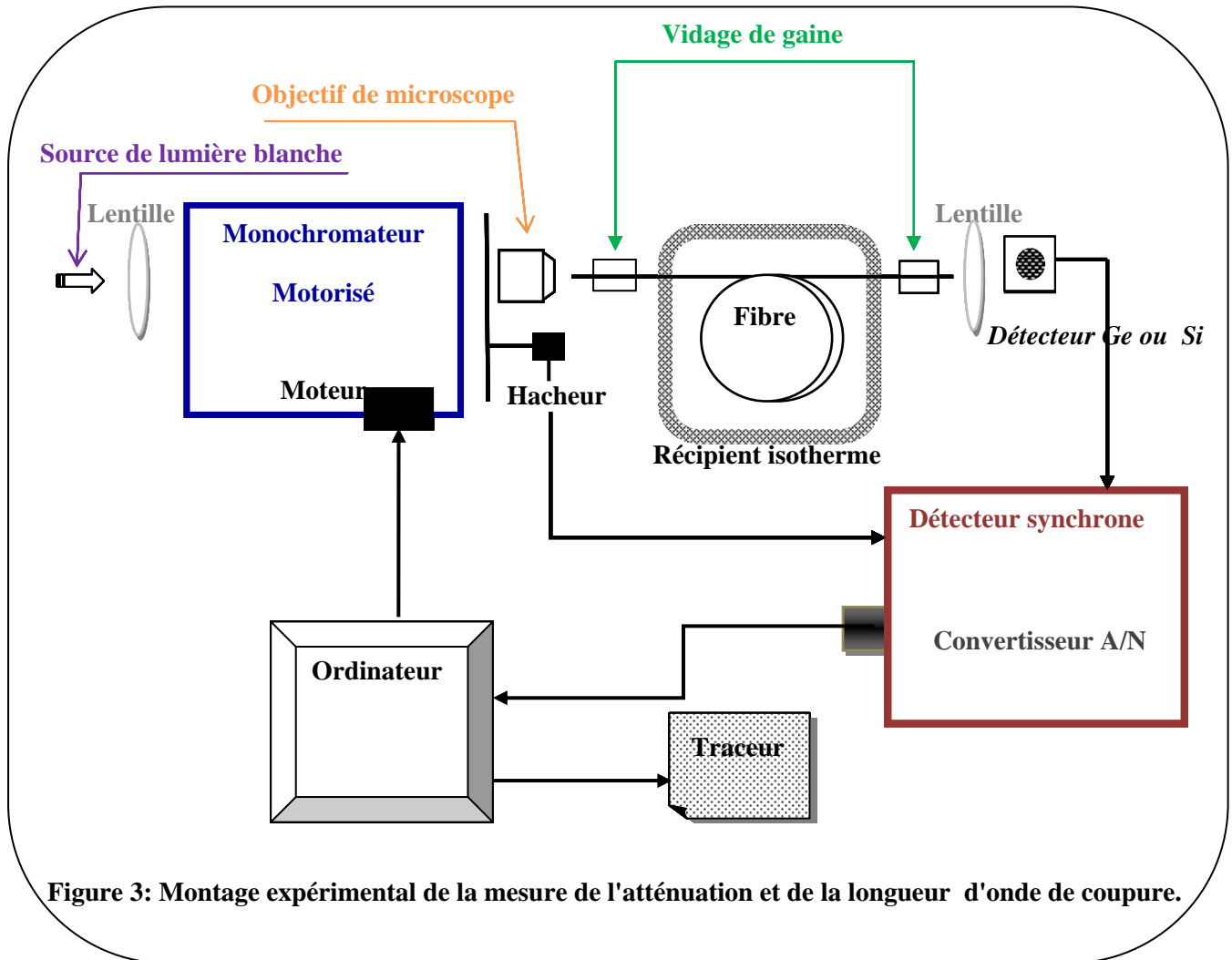


Figure 3: Montage expérimental de la mesure de l'atténuation et de la longueur d'onde de coupure.

3.1.1. Résultats.

La mesure de l'atténuation s'est faite sur une fibre dopée au chrome. Cette dernière a été fabriquée (préforme et fibrage) au laboratoire LPMC de Nice. Cette fibre est multi modes de diamètre 125 μm et à saut d'indice. On a utilisé l'expression du coefficient d'absorption (1). Le premier relevé de mesure s'est fait pour une longueur de fibre $d_1 = 5.78 \text{ m}$ et la deuxième mesure a été prise pour une longueur de fibre $d_2 = 1.41 \text{ m}$ sans modifier l'injection d'entrée. La différence de longueur $d = d_1 - d_2 = 4.39 \text{ m}$.

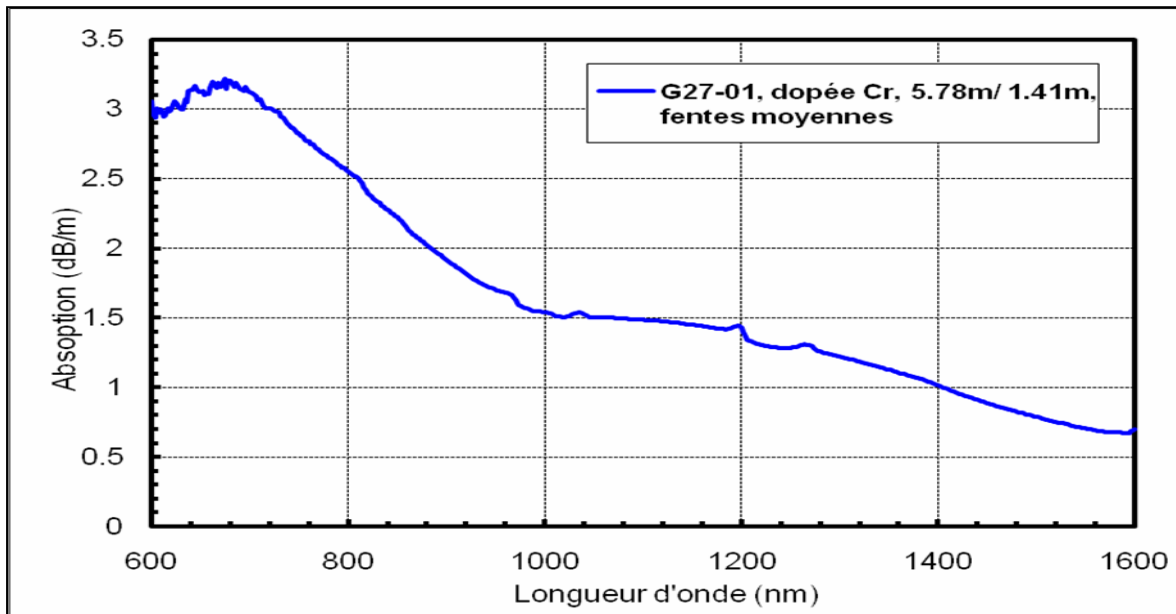


Fig.4. Coefficient d'absorption dans une fibre optique dopée Cr.

Le spectre d'absorption semble typique de la présence de Cr^{3+} (pic à 680nm), il devrait y en avoir un autre à 450 nm , qui absorbe beaucoup plus . Et la présence de Cr^{4+} se manifeste par cette large bosse située entre 1000 et 1500 nm . Par contre on ne trouve pas d'explication à ces pics d'absorption autour de 1200 -1300 nm .

Aussi on pense que cette fibre n'absorbe pas beaucoup (absorption à 1100 nm de l'ordre de 1.4 dB/m , voire moins s'il y a des pertes de mesure) , eut égard à la concentration relativement élevée de chrome dans la solution .

3.2. Mesure de la longueur d'onde de coupure.

La mesure consiste à comparer les puissances transmises par une fibre dans des conditions de contraintes (donc de pertes) différentes pour le mode LP11 : on mesure $I_0(\lambda)$ avec la fibre laissée libre , et la puissance de $I(\lambda)$ avec la fibre enroulée très serrée sur un mandrin de petit diamètre (on a pris 3cm dans la manipulation) . Les pertes par courbures étant beaucoup plus importantes dans la deuxième configuration , l'extinction du mode LP11 se produit pour des longueurs d'onde plus courtes et plus abruptement .

En calculant le rapport $R(\lambda) = 10\log_{10} (I_0(\lambda)/ I(\lambda))$, on obtient une courbe en cloche , non nulle seulement sur la plage séparant les deux longueurs d'onde de coupure effectives . La longueur d'onde de coupure de la fibre est définie comme étant la longueur d'onde la plus élevée pour laquelle $R(\lambda) = 0.1$ dB. [4].

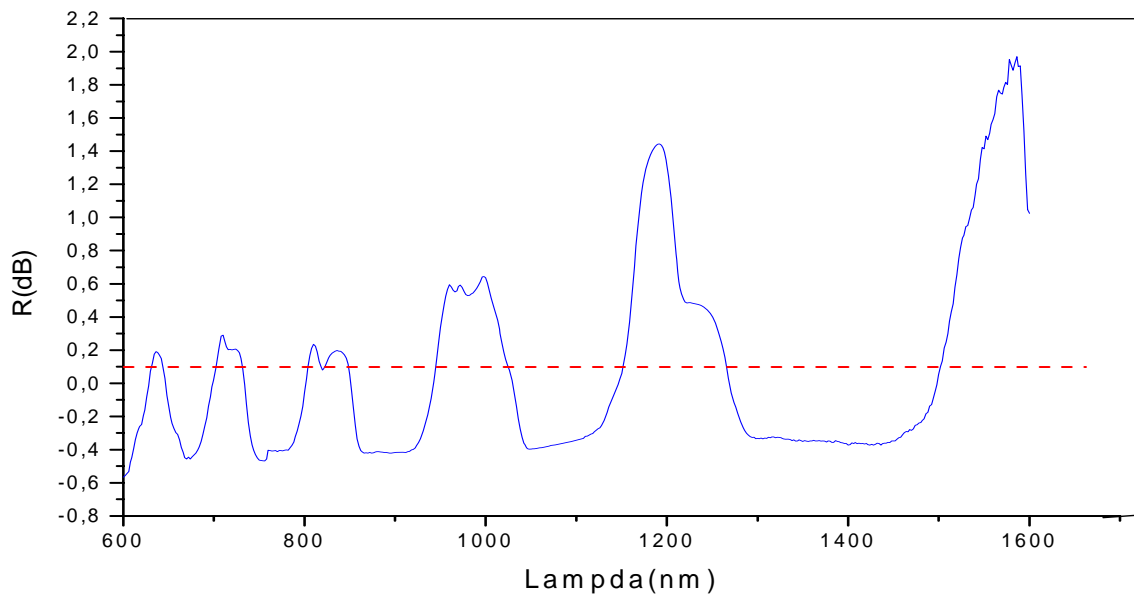


Figure 4. Mesure de la longueur d'onde de coupure dans une fibre optique dopée Chrome.

3.2.1. Commentaires.

On constate que la courbe expérimentale obtenue ne correspond pas aux résultats attendus. En effet au regard de cette courbe (qui devrait être en forme de cloche) , il est impossible de relever la longueur de coupure pour cette fibre dopée pour $R(\lambda) = 0.1$ dB , car on peut en lire plusieurs λ dans le domaine 600 -1600 nm.

Les défauts de la silice ainsi que les défauts du guide provoquent des pertes par diffusion dans la gaine de la fibre ; cette atténuation est peu dépendante de la longueur d'onde .Dans le domaine du visible et du proche infrarouge , les impuretés chimiques qui jouent le plus grand rôle dans l'absorption sont les métaux de transition et les radicaux hydroxyles OH^\cdot .

L'absorption liée à la présence de radicaux hydroxyles dans la silice est due aux harmoniques de la vibration fondamentale de la liaison OH à 2730 nm , et à leurs combinaisons avec des bandes de vibration fondamentale du réseau de silice . Pratiquement , l'atténuation spectrale provoquée par des ions OH^\cdot se traduit par la présence de trois pics principaux dans le proche infrarouge ($\lambda = 1380$, 1240 ,et 950 nm) . Ces pics nuisent beaucoup à la transmission dans les fenêtres à 1320 et 1550 nm ; c'est pourquoi la réduction de la concentration en OH^\cdot est une opération très importante. Dans les fibres optiques dopées terres rares (FODTR) , il se peut que la longueur d'onde de coupure coïncide avec une bande d'absorption [5].

Les pertes lors de la seconde mesure sont très importantes et les signaux à détecter très faibles . Il aurait fallu , dans ce cas , veiller tout particulièrement à vider la gaine optique de la lumière diffusée par le cœur ..

4. Conclusion .

La caractérisation de cette fibre , fabriquée au laboratoire LPMC de l'université de Nice , a été faite pour la première fois . On s'aperçoit qu'elle absorbe très peu autour de 1100 nm , par contre on retrouve la présence du chrome qui se caractérise par ces pics d'absorption autour de 680 et dans la plage 1000 – 1500 nm . Cependant il est souhaitable de reprendre la mesure sur la longueur d'onde de coupure , en faisant le vidage de gaine , pour espérer déterminer la longueur d'onde de coupure de cette fibre . Cette dernière dopée au chrome pourrait être utilisée comme absorbant saturable dans un laser totalement fibré .

(*)L'expérience a été réalisée au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée - Université Sophia Antipolis de Nice.

Références .

- [1] E. Snitzer, *Phys. Rev.Lett.*, 7, p 444 (1961).
- [2] C.J. Koester and E. Snitzer , *Appl. Opt.*, 3 , p 1182 (1964).
- [3] J. Stone and C. A. Burrus , *Appl.phys.Lett.*, 23 , n°7 (1973).
- [4] B. Dussardier , *Thèse de doct.*, p 78 (1992).
- [5] B. Dussardier , *Thèse de doct.*, p 25 (1992).