

CARACTERISATION DE RESEAUX DE BRAGG PAR REFLECTOMETRIE OPTIQUE A FAIBLE COHERENCE

Anne-Françoise Obaton, Carlos Palavicini*, Yves Jaouën*, Marc Douay+, Pierre Niay+ et Martin Lièvre

BNM-LNE, 33, avenue du Général Leclerc, 92260 Fontenay-aux-Roses, France
courriel: anne-francoise.obaton@lne.fr

*ENST, CNRS URA 820, 46, rue Barrault, 75634 Paris Cedex 13, France

+ USTL, Bât. P5, Laboratoire PhLAM/CERLA, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

Résumé

La dispersion de vitesse de groupe induite dans la fibre perturbe la propagation du signal dans les réseaux de télécommunications optiques. Le phénomène se traduit par l'élargissement temporel des impulsions lumineuses constituant le signal, ce qui a pour effet d'introduire des distorsions dans le signal transmis en bout de fibre. Il est donc impératif de compenser la dispersion accumulée au cours de la propagation. Les réseaux de Bragg à pas variable sont des composants appropriés pour atteindre cet objectif. Ils doivent cependant être au préalable caractérisés. Nous présentons les résultats obtenus par réflectométrie optique à faible cohérence sur des réseaux de Bragg uniformes et à pas variable "apodisés".

Abstract

In optical communication networks, group velocity dispersion side-effect into the fiber disturbs the signal propagation. This effect broadens the pulse to the point that it eventually interferes with neighboring pulses and introduces errors in data. It is then necessary to compensate this dispersion. Chirped fiber Bragg gratings offer a solution to this problem. Preliminary, they have to be characterized. Low-coherence interferometric measurements on uniform and chirped-apodized Bragg gratings are presented.

Introduction

La plupart des fibres optiques utilisées dans les réseaux de télécommunications sont adaptées au standard de transmission à 1300 nm. A cette longueur d'onde la dispersion de vitesse de groupe est quasi nulle. Cependant, la longueur d'onde de transmission se situe actuellement autour de 1550 nm car dans cette zone spectrale l'atténuation de la fibre est plus faible. En revanche la dispersion y est anormale et n'est plus négligeable. Cette dispersion de vitesse de groupe engendre des différences de vitesse de propagation entre les différentes composantes spectrales d'un même signal à transmettre. Dans le cas des

fibres standards SMF (Single Mode Fiber), les faibles longueurs d'onde se propagent plus rapidement que les grandes. Ce phénomène provoque un élargissement temporel des impulsions si bien que deux trains d'onde consécutifs peuvent éventuellement se recouvrir. La portée maximale est respectivement de l'ordre de 1000 km pour un signal modulé à 2,5 Gbit/s, et se réduit à 60 km à 10 Gbit/s [1].

Les fibres de transmission sont classées en trois familles en fonction du paramètre de dispersion de vitesse de groupe : les fibres de type G652 très répandues (SMF : 17 ps/nm/km), les fibres de type G653 à dispersion nulle (DSF : Dispersion Shift Fiber < 1 ps/nm/km) et les fibres de type G655 à dispersion réduite (NZ-DSF : Non-Zero Dispersion Shift Fiber 4 à 8 ps/nm/km). Le paramètre de dispersion est ajusté en jouant sur le profil d'indice ou au moyen de dopants. La propagation de plusieurs porteuses optiques simultanées dans les systèmes WDM (Wavelength Division Multiplexing) imposent l'utilisation de fibres dispersives pour s'affranchir des interactions par effet non-linéaire entre canaux. La dispersion accumulée est compensée périodiquement le long de la ligne de transmission. Ces éléments compensateurs sont en fait des fibres de dispersion de signe opposé spécialement conçus à cet effet. Une solution alternative consiste à recourir à des réseaux de Bragg à pas linéairement variable photo-inscrits dans le cœur d'une fibre optique.

Afin de caractériser ces composants, notamment en terme de dispersion, la technique de réflectométrie optique à faible cohérence, OLCR (Optical Low Coherence Reflectometry) s'avère un outil particulièrement intéressant.

Dans cet article, nous présentons le dispositif expérimental du BNM-LNE ainsi que celui de l'ENST, complémentaires l'un de l'autre. Les résultats de mesures avec l'OLCR sur des réseaux de Bragg uniformes et à pas variable apodisés seront exposés. Nous montrerons comment ils permettent de déterminer plusieurs grandeurs caractéristiques majeures des réseaux de Bragg, comme leur longueur, la longueur d'onde de Bragg, la réflectivité, le temps de groupe et la dispersion.

Description du dispositif expérimental de réflectométrie optique à faible cohérence

Un interféromètre de Michelson est constitué d'une source lumineuse, d'une lame séparatrice ou d'un coupleur deux-vers-deux dans le cas de systèmes à fibre, de deux miroirs, l'un fixe (bras fixe) et l'autre mobile (bras de référence), et d'un détecteur. L'onde lumineuse issue de la source est divisée en deux par la lame ou le coupleur. Les deux faisceaux ainsi créés se réfléchissent respectivement sur le miroir fixe et sur le miroir mobile, puis viennent interférer sur le détecteur. On enregistre un *interférogramme*, résultant de cette recombinaison, en faisant varier la longueur du bras de référence. En fait, il n'y a interférence que lorsque la différence de marche entre les deux faisceaux est inférieure à la longueur de cohérence de la source. Cette longueur est inversement proportionnelle à la largeur spectrale du rayonnement émis par la source. En conséquence, une source à spectre large se caractérise par une faible longueur de cohérence et la technique interférométrique permet alors d'obtenir une grande résolution spatiale (interférogrammes très localisés) ; au contraire, pour une source monochromatique caractérisée par une grande longueur de cohérence, l'interférogramme consiste en une succession quasi-infinie de franges d'interférences.

Le dispositif du BNM-LNE se compose en fait de deux interféromètres de Michelson, l'un en lumière cohérente, l'autre en lumière incohérente, connectés par des réflecteurs de type "coin de cube" mis dos à dos et disposés sur un même chariot se déplaçant sur coussin d'air (figure 1).

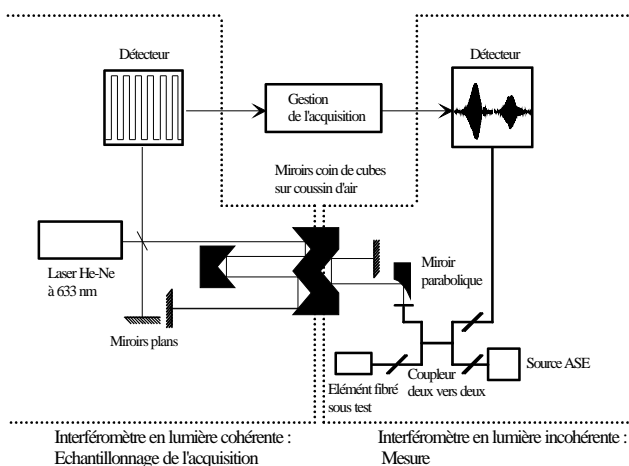


Figure 1 : Schéma du dispositif interférométrique.

Interféromètre en lumière cohérente : Cet interféromètre, en espace libre, comprend un laser He-Ne stabilisé en fréquence, une lame séparatrice, un miroir fixe, le miroir coin de cube monté sur coussin d'air et un détecteur au silicium. Le signal sinusoïdal généré par la source monochromatique est remis en forme, et une acquisition est alors réalisée sur chaque front montant du signal créneau. Ceci permet de réaliser un échantillonnage spatial

régulier tous les 80 nm. Ainsi le repérage de la position du chariot sur coussin d'air est rendu possible. Ce dispositif constitue l'horloge de notre dispositif interférométrique pour le système d'acquisition.

Interféromètre en lumière incohérente : Cet interféromètre permet la détection de la position des dioptries au sein des systèmes testés. Le bras fixe, entièrement fibré, constitue dans le cas présent le bras de test dans lequel est placé le dispositif à caractériser. En revanche, le bras de référence – comprenant le réflecteur coin de cube – est en espace libre. L'interféromètre comprend une source large bande ($\Delta\lambda \approx 80$ nm) de type ASE (pour "Amplified Spontaneous Emission") émettant autour de 1550 nm, et un photodétecteur InGaAs, respectivement connectés à l'entrée et à la sortie d'un coupleur monomode deux-vers-deux.

Le dispositif de l'ENST se compose également de deux interféromètres [2]. Celui en lumière cohérente est semblable à celui du BNM-LNE à ceci près qu'il réalise quatre fois moins d'acquisitions. Quant à l'interféromètre en lumière incohérente, il est doté d'une source super-fluorescente à fibre dopée erbium ($\Delta\lambda \approx 40$ nm) et d'une détection synchrone I&Q qui permet de séparer le signal utile de la puissance optique moyenne reçue par le détecteur.

Ces deux dispositifs présentent chacun leur propre avantage. Celui du BNM-LNE, grâce à sa plus petite période d'échantillonnage, permet d'obtenir une meilleure résolution spectrale. Celui de l'ENST, grâce à sa détection synchrone, possède une meilleure sensibilité de mesure (avec une dynamique de 60 dB) et un traitement numérique facilité par la séparation du signal en ses deux composantes en phase et en quadrature.

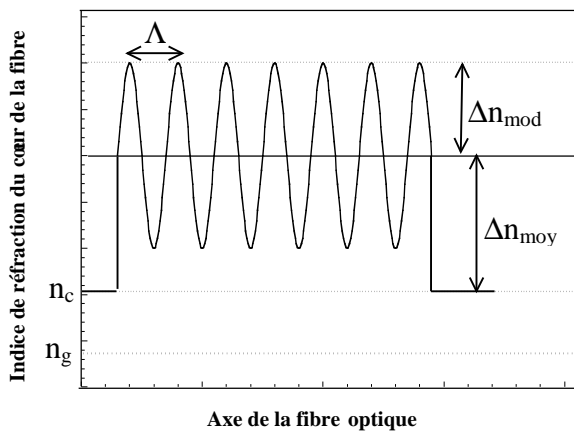
Principe d'un réseau de Bragg

Un réseau de Bragg photo-inscrit dans le cœur d'une fibre optique consiste en la variation périodique, selon l'axe de la fibre, de l'indice de réfraction du cœur de la fibre n_c (Fig. 2 a) [3]. Cette modulation d'indice réalise un filtre en longueur d'onde. En effet, les longueurs d'onde situées autour de la longueur d'onde de Bragg, λ_{Bragg} , vérifiant la relation suivante (loi de Bragg) :

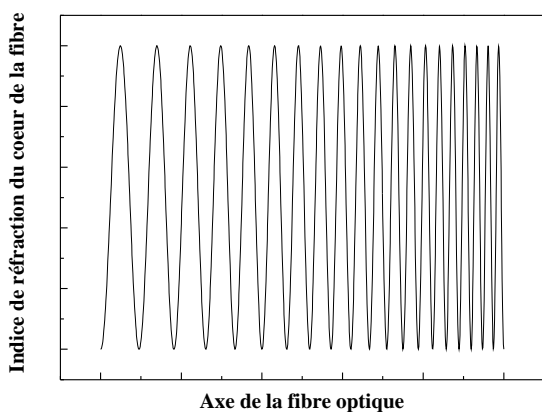
$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

sont partiellement réfléchies par le réseau ; les autres sont transmises. Dans cette relation Λ désigne la période de modulation d'indice et n_{eff} l'indice de réfraction effectif du mode fondamental.

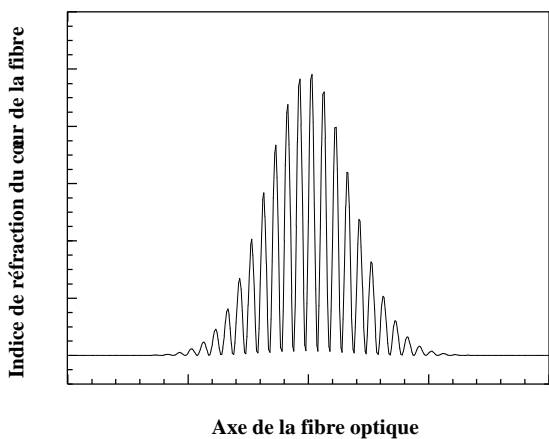
Structurellement, les réseaux sont caractérisés par la variation d'indice moyen photo-induit $\Delta n_{moy}(z)$, l'amplitude de modulation $\Delta n_{mod}(z)$ selon l'axe de la fibre (coefficient de Fourier au premier ordre) et le pas Λ . Dans le cas de réseaux uniformes Λ est constant (Fig. 2 a), tandis que dans le cas de réseaux à pas variable, Λ varie linéairement selon l'axe de la fibre (Fig. 2 b). Pour des réseaux apodisés, c'est l'amplitude de modulation qui varie (Fig. 2 c).



a



b



c

Figure 2 : Réseaux de Bragg à profil a) uniforme, b) à pas variable, c) apodisé.

Un réseau uniforme réfléchit la lumière centrée autour d'une seule longueur d'onde. Dans un réseau à pas variable les grandes longueurs d'onde sont réfléchies en début de réseau et les plus courtes en fin de réseau ; ainsi la dispersion peut être compensée et le signal d'origine rétabli (Fig. 3).

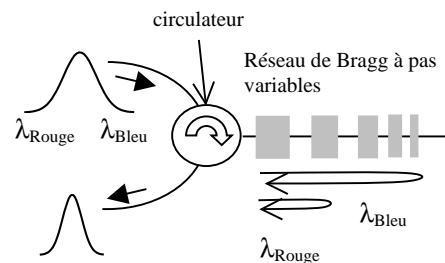


Figure 3 : Schéma d'un système compensateur de dispersion chromatique comprenant un réseau de Bragg.

L'apodisation, quant à elle, ne joue que sur la forme de la réponse spectrale du réseau comme nous le verrons par la suite.

Résultats OLCR obtenus sur un réseau de Bragg uniforme

L'interférogramme brut obtenu à l'OLCR pour un réseau de Bragg uniforme est représenté sur la figure 4. Ces données correspondent à la partie réelle du signal interférométrique.

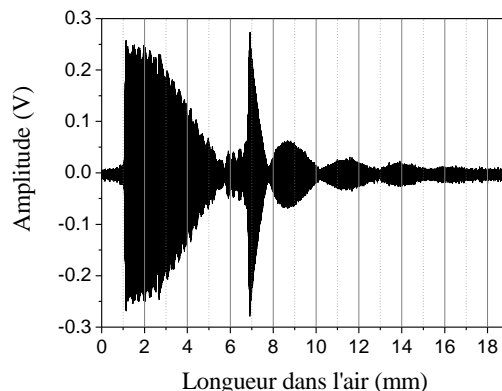


Figure 4 : Interférogramme d'un réseau de Bragg uniforme obtenu à l'OLCR.

L'interférogramme présente une montée abrupte autour de 1 mm et de 7 mm, points qui correspondent respectivement à l'entrée et à la sortie du réseau de Bragg. En effet, plus la différence d'indice entre deux milieux est importante, plus la réflexion à l'interface de ces deux milieux est grande. Notre observation est cohérente avec le fait que la différence d'indice est importante aux deux extrémités du réseau de Bragg. On peut ainsi, en localisant ces positions, déterminer la longueur optique du réseau. Cependant, afin de déterminer la longueur optique du réseau avec une plus faible incertitude, il est préférable de la mesurer à partir du module de l'interférogramme complexe (Fig. 5). Le montage expérimental de l'ENST donne directement les parties réelle et imaginaire de l'interférogramme par l'intermédiaire de la détection synchrone. Ce n'est pas le cas de celui du BNM-LNE. Il faut donc recourir au calcul de la transformée de Hilbert de l'interférogramme pour obtenir sa partie complexe. Pour le réseau de Bragg uniforme, objet de la figure 5, la longueur

optique est estimée à 5,567 mm avec une incertitude (k=1) de 0,011 mm.

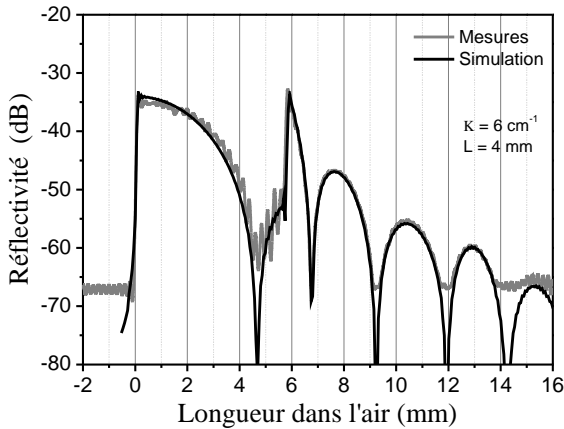


Figure 5 : Module de l'interférogramme complexe d'un réseau de Bragg uniforme.

Un réseau de Bragg dont la modulation d'indice est de l'ordre de 10^{-5} est un réseau dit "faible": la majeure partie de la lumière incidente est réfléchi à la moitié de la longueur du réseau. Au contraire, les réseaux dits "forts" ont des modulations d'indice pouvant aller jusqu'à 10^{-2} , la lumière incidente étant alors réfléchi à proximité de l'entrée du réseau [4]. Dans le cas du réseau de la figure 5, l'indice de modulation se situe à une valeur intermédiaire, de l'ordre de 4×10^{-4} , ce qui correspond à une réflexion de l'ordre de 95% à la longueur d'onde de Bragg. La majeure partie de la lumière incidente est alors réfléchi au quart de la longueur du réseau. Cela explique pour une part l'élargissement du premier pic de l'interférogramme. D'autre part, la résolution de l'interférogramme est inversement proportionnelle à la largeur spectrale de la source, ce qui contribue également à l'élargissement. Enfin, les multiples réflexions dans le réseau de Bragg entraînent plusieurs oscillations d'amplitude décroissante localisées dans le réseau mais également après la longueur physique du réseau [5].

On détermine le coefficient de réflexion complexe du réseau de Bragg, r , en procédant à la transformée de Fourier de l'interférogramme. Afin d'interpoler la courbe dans le domaine des longueurs d'onde, on utilise un tableau de 2^{18} points dans lequel on prolonge le signal dans le domaine spatial par des valeurs nulles. La réflectivité est donnée par $20\log(|r|)$ (Fig. 6). La réponse spectrale d'un réseau de Bragg faiblement réflecteur est peu différente de la transformée de Fourier de son profil spatial ce qui explique les lobes secondaires de part et d'autre du lobe principal. En effet, l'enveloppe de l'indice de modulation d'un réseau uniforme est une fonction porte dont la transformée de Fourier est une fonction sinus cardinal. Si le profil était gaussien ces lobes secondaires seraient fortement atténués.

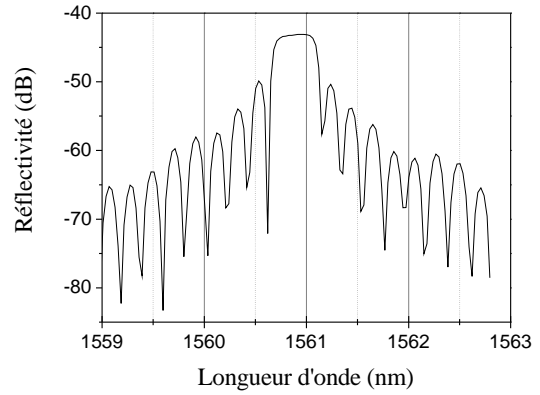


Figure 6 : Réflectivité d'un réseau de Bragg uniforme.

On définit la longueur d'onde de Bragg comme la longueur d'onde associée au centre du lobe principal du module du coefficient de réflexion. Elle est estimée à 1560,99 nm avec une incertitude (k=1) de 0,60 nm pour ce réseau de Bragg uniforme.

Le temps de groupe du réseau, quant à lui, est défini par:

$$t_g = \frac{1}{2\pi c} \frac{d\phi}{d\sigma} \quad (2)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, ϕ la phase du coefficient de réflexion dans l'espace de Fourier et σ le nombre d'ondes.

Pour un réseau uniforme, le temps de groupe est typiquement constant dans la bande interdite. Il en découle que la dispersion, proportionnelle à la dérivée du temps de groupe, est voisine de zéro. En fait, il est plus juste de dire que la dispersion est négligeable dans le réseau par rapport à la dispersion dans la fibre sur la même longueur. Si cette grandeur est peu significative pour un réseau uniforme elle le devient pour les réseaux à pas variables.

Résultats OLCR obtenus sur un réseau de Bragg à pas variable

Le traitement numérique effectué sur les réseaux de Bragg à pas variable est identique au traitement utilisé pour des réseaux uniformes.

L'interférogramme brut obtenu à l'OLCR et représenté sur la figure 7 caractérise un réseau de Bragg à pas variable et de profil "apodisé".

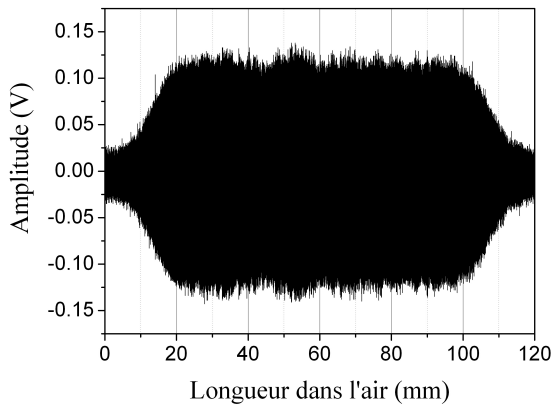


Figure 7 : Interférogramme d'un réseau de Bragg à pas variable et apodisé obtenu à l'OLCR.

L'apodisation permet de supprimer les lobes secondaires dans la réflectivité comme on peut le constater sur la figure 8. En contre-partie, les extrémités du réseau ne se caractérisent plus par des montées abruptes puisque la variation d'indice est faible aux deux extrémités du réseau. En conséquence, il n'est plus possible de déterminer la longueur optique du réseau de Bragg à partir du module de l'interférogramme complexe. En revanche, on peut estimer grossièrement la longueur optique d'un réseau de Bragg apodisé à partir de la phase de l'interférogramme dans le domaine spatial. En effet, la phase en fonction de la longueur dans l'air est linéaire avec une rupture de pente aux deux extrémités du réseau (Fig. 9). Cette méthode de détermination des points de rupture dans la phase nous donne une longueur optique d'environ 105 mm pour ce réseau. L'incertitude n'a pas été chiffrée mais elle est de toutes façons bien supérieure à celle obtenue dans le cas d'un réseau non-apodisé.

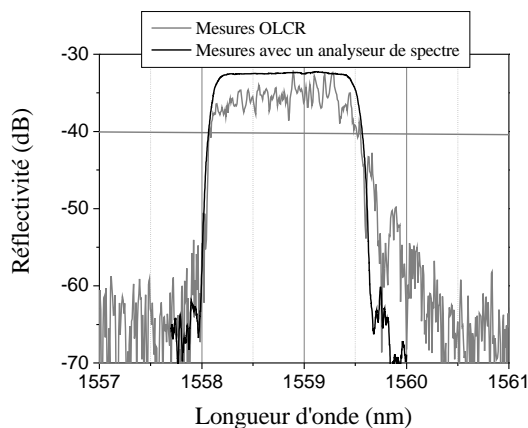


Figure 8 : Réflectivité d'un réseau de Bragg à pas variable et apodisé.

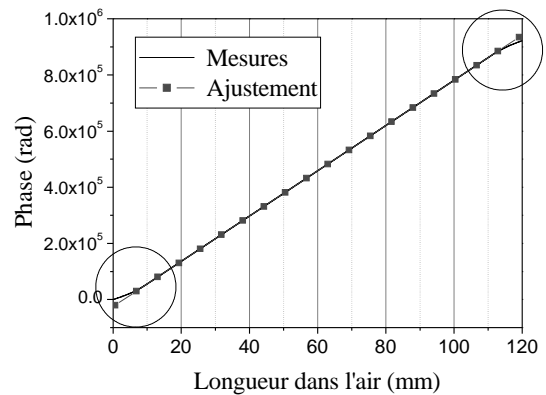


Figure 9 : Phase de l'interférogramme complexe d'un réseau de Bragg apodisé.

A partir du spectre en transmission de ce réseau de Bragg, on estime que son pouvoir réflecteur est d'environ 87 % et à partir de sa réflectivité (Fig. 8), la longueur d'onde de Bragg est estimée à 1568,83 nm avec une incertitude ($k=1$) de 0,60 nm. Compte-tenu de la longueur du réseau, on a utilisé un tableau de 2^{20} points dans lequel on a prolongé le signal interférométrique par des zéros pour le calcul du coefficient de réflexion complexe.

La mesure du temps de groupe est présentée sur la figure 10. Elle varie de manière linéaire dans la bande passante en réflexion du réseau de Bragg à pas variable. Pour déterminer la valeur du facteur de compensation introduit par le réseau, on fait un ajustement selon une loi linéaire de la pente de la courbe donnant le temps de groupe en fonction de la longueur d'onde. Pour le réseau étudié, on obtient $-437,9$ ps/nm avec une répétabilité de 10 ps. On a négligé le temps de groupe correspondant au dispositif interférométrique sans l'échantillon sous test dans ce calcul [6].

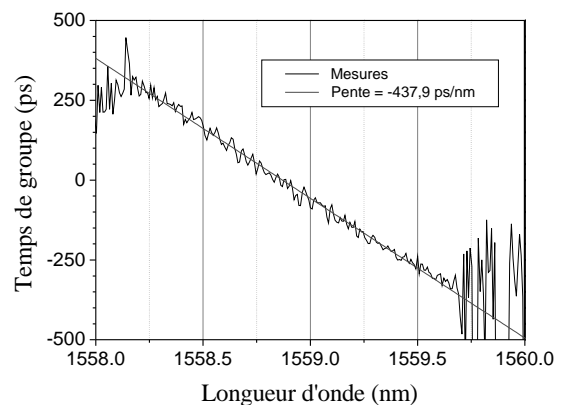


Figure 10 : Temps de groupe d'un réseau de Bragg à pas variable et apodisé.

Conclusion

Nous avons démontré les possibilités des réflectomètres à faible cohérence pour caractériser des réseaux de Bragg. Les réflectomètres permettent de déterminer la longueur des réseaux et leur longueur d'onde

avec des incertitudes ($k=1$) de 0,011 mm (réseau non-apodisé) et 0,60 nm, respectivement. Ils ouvrent également la possibilité de mesurer la réflectivité et la dispersion introduite par les réseaux. Cette méthode de caractérisation présente l'avantage sur les autres méthodes plus traditionnelles d'être beaucoup plus rapide et donc de minimiser les problèmes de stabilité en température auxquels sont sensibles les réseaux de Bragg.

Références

[1] I. Kaminow, T. Koch "Optical fiber telecommunications IIIA", Academic Press, San Diego, 1997.

[2] C. Palavicini, C. Martinez, D. Marris, Y. Jaouen, C. Chabran, G. Laffont, P. Ferdinand, "Quantification des discontinuités dans des réseaux de Bragg par réflectométrie complexe à faible cohérence", JNOG, Dijon, 2002.

[3] R. Kashap, "Fiber Bragg Gratings", Academic Press, 1994.

[4] L. Poladian, "Understanding the spectral response of fiber gratings", Oral communication, OFC2000.

[5] P. Lambelet, P. Fonjallaz, H. Limberger, R. Salathé, C. Zimmer, H. Gilgen, "Bragg grating characterization by optical low coherence reflectometry", IEEE Photon. Tech. Lett. 5, 5, 1993, pp. 565-566.

[6] S. Dyer, K. Rochford, "Low-coherence interferometric measurements of fibre Bragg grating dispersion", Electron. Lett. 35, 1999, pp. 1485-1486.