

Mesure de la dispersion chromatique de fibres micro-structurées par réflectométrie à faible cohérence

Chromatic dispersion measurement of micro-structured fibres using low-coherence reflectometry

Philippe HAMEL¹, Renaud GABET¹, Anne-Françoise OBATON²,
Ekaterina BUROV³, Gilles MELIN³ et Yves JAOUËN¹

¹ GET/Télécom Paris, CNRS UMR5141, 46 rue Barrault, 75634 Paris Cedex, France, yves.jaouen@enst.fr.

² LNE, 29 avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes Cedex, France, anne-francoise.obaton@lne.fr.

³ Alcatel Recherche et Innovation, route de Nozay, 91460 Marcoussis, France.

Résumé

Le LNE et Télécom Paris ont développé conjointement des bancs de caractérisation de composants photoniques passifs et actifs basés sur le principe de la réflectométrie à faible cohérence (OLCR : *Optical Low-Coherence Reflectometry*). Ces bancs de mesure sont particulièrement adaptés à la caractérisation exhaustive (dispersion chromatique, biréfringence, atténuation,...) de courts tronçons de fibre optique (< 0,5 m).

Le principe de la caractérisation de fibres par OLCR est présenté. Une mesure comparée d'un tronçon de fibre G652 a été effectuée afin d'évaluer les deux bancs OLCR. La dispersion chromatique obtenue était $16,9 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, en très bon accord avec les valeurs typiques pour cette famille de fibres. Par la suite seront exposés les résultats de caractérisation d'une fibre micro-structurée. Les valeurs de dispersion chromatique pour chacun des modes de polarisation étaient respectivement $140,6 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ et $142,4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, en très bon accord avec la mesure effectuée par la méthode du décalage de phase. Il est à noter que les mesures obtenues présentent des différences significatives avec la modélisation numérique, soulignant l'importance du traitement numérique du profil d'indice de la section de la fibre. Une série d'échantillons de fibre ont été prélevés le long d'une fibre micro-structurée complète. Les mesures effectuées ont mis en évidence une variation de la dispersion chromatique de quelques $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ suivant la longueur de la fibre, de manière similaire pour les deux polarisations. Outre l'aspect métrologique du travail, cette série de mesures a permis l'analyse de la dépendance spatiale de la dispersion chromatique inenvisageable avec d'autres méthodes de mesures.

MOTS CLÉS : FIBRE OPTIQUE, FIBRE MICRO-STRUCTURÉE, RÉFLECTOMÉTRIE À FAIBLE COHÉRENCE, DISPERSION CHROMATIQUE, BIRÉFRINGENCE.

Abstract

The LNE and Télécom Paris have developed both a measurement setting for the characterisation of passive and active photonic devices based on the principle of Optical Low-Coherence Reflectometry (OLCR). This measurement technique allows a complete characterisation (dispersion, birefringence, losses...) of short samples of optical fibres (< 0,5 m).

The principle of fibre characterisation using OLCR technique is described. Compared measurement of a G652 fibre sample has been carried out to evaluate the two OLCR measurement systems. The obtained chromatic dispersion was $16,9 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ in very agreement with typical values of this kind of fibres. In a second time, the characterisation results of a micro-structured fibre are presented. The obtained chromatic dispersion values are $140,6 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ and $142,4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ respectively. The values were in very good agreement with measurements realised using phase-shift method. However, we have observed significant differences between measurements and numerical modelling. We attribute this difference to the accuracy of numerical process of the fibre index profile. Finally, different fibres samples have been taken along the complete micro-structured fibre. The different measurements have shown a chromatic dispersion variation of some $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ along the fibre length with similar evolution for the two

polarisations. Beyond the metrological aspect of this work, this series of measurements has led to a study of the spatial evolution of the chromatic dispersion, which is not possible with other methods of measurement.

KEY WORDS: OPTICAL FIBRE, MICRO-STRUCTURED FIBRE, LOW-COHERENCE REFLECTOMETRY, CHROMATIC DISPERSION, BIREFRINGENCE.

1. Introduction

La technologie du multiplexage en longueur d'onde (WDM : *Wavelength Division Multiplexing*) consiste à coupler dans une même fibre un grand nombre de canaux modulés. La dispersion chromatique des fibres est une des principales sources de dégradation des signaux avec la propagation. Avec la « gestion de la dispersion » on peut choisir judicieusement les caractéristiques des fibres utilisées et calculer la répartition des longueurs de fibres de transmission et de compensation de dispersion tout au long de la ligne de transmission [1]. Il en résulte l'existence d'une vaste gamme de fibres optimisées en fonction de l'architecture du système WDM visé : fibre standard G652 (SSMF : *Standard Single Mode Fibre*), fibre à dispersion décalée non nulle G655 (NZ-DSF : *Non-Zero Dispersion Shifted Fibre*), fibre compensatrice de dispersion (DCF : *Dispersion Compensating Fibre*). Le domaine des fibres optiques fait actuellement l'objet d'intenses recherches liées à la maîtrise de nouveaux procédés verriers. Le dopage, l'inscription de réseaux de Bragg et surtout les micro-structurations permettent d'envisager le développement d'une nouvelle gamme de composants pour le traitement « tout-optique » des signaux : amplification, filtrage, conversion en longueur d'onde, régénération tout optique 2R et 3R [2,3].

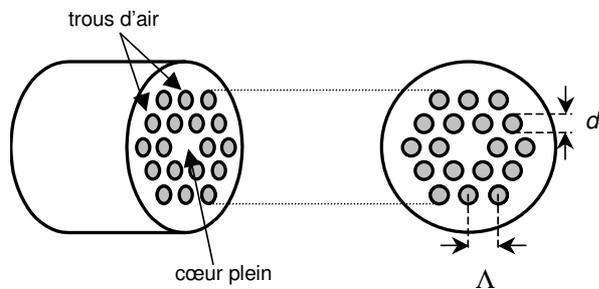


Fig. 1. – Géométrie d'une fibre micro-structurée avec un arrangement hexagonal des trous (diamètre d , interstice Λ).

Les fibres micro-structurées suscitent aujourd'hui un énorme intérêt scientifique et technologique. Elles sont constituées d'un arrangement périodique de tubes d'air suivant l'axe principal de la fibre (fig. 1). Le cœur en silice est formé par l'absence d'un ou plusieurs trous d'air. Les propriétés de guidage peuvent être ajustées par contrôle des paramètres opto-géométriques de la micro-structuration (diamètres et interstices entre les trous). Ces fibres offrent des propriétés particulièrement intéressantes par rapport aux fibres dites « conventionnelles » : grande plage de valeurs de la dispersion chromatique (GVD : *Group Velocity Dispersion*), faible surface effective de mode, cœur de la fibre en silice pure, ... Les multiples applications visées imposent un contrôle approfondi des

paramètres de guidage le long de la fibre. La difficulté de réalisation de ce type de fibre provoque des écarts entre la structure géométrique réelle et la structure périodique idéale. De fait, les propriétés modales sont modifiées de façon notable lors de la fabrication.

L'apparition de ces nouvelles fibres génère des besoins poussés en terme de caractérisation et de métrologie. L'optimisation des fonctions optiques utilisant ces nouvelles fibres nécessite une grande maîtrise de leurs paramètres de guidage. La réflectométrie à faible cohérence est un outil de caractérisation adapté pour ce type de fibres [4]. Elle permet une caractérisation exhaustive de courts tronçons (< 50 cm), contrairement aux techniques de mesures traditionnelles. Dans cet article, nous démontrons, au travers des mesures comparatives effectuées au LNE et à Télécom Paris, l'utilité, la fiabilité et l'efficacité de ce procédé de mesure autant d'un point de vue métrologique qu'en tant qu'aide à la conception de nouveaux composants optiques.

Après avoir exposé le principe de caractérisation de fibre par OLCR, nous présentons les bancs mis en œuvre au LNE et à Télécom Paris. Des mesures réalisées sur un même tronçon de fibre G652 ont permis de valider les mesures effectuées. Puis, nous présentons un outil de modélisation par une méthode des éléments finis basé sur le profil vrai de la fibre micro-structurée. Cette modélisation permet de prédire les propriétés de guidage des fibres et apporte une aide précieuse pour l'interprétation des résultats expérimentaux. Enfin, nous rendons compte des résultats de caractérisation d'une fibre micro-structurée réalisée dans les laboratoires de recherche de Alcatel R&I. L'objectif final de l'étude est de mesurer l'évolution du GVD en fonction de la position dans la fibre grâce à la méthode OLCR.

2. Mesure de la dispersion chromatique d'un tronçon de fibre par la méthode OLCR

On rappelle brièvement le principe de la mesure de la dispersion chromatique de fibres par la méthode OLCR, avant de décrire les spécificités des bancs OLCR du LNE et de Télécom Paris et de présenter les mesures comparées pour un tronçon de fibre G652.

2.1. Principe

Un banc OLCR est un interféromètre de Michelson éclairé en lumière « blanche » dans lequel on insère le composant à tester dans l'un des bras [5]. En ce qui nous concerne, il s'agit d'un tronçon de fibre optique. Dans l'autre bras, dit bras de référence, se trouve un miroir mobile dont la translation permet l'acquisition de deux réflectogrammes correspondants aux réflexions sur les faces d'entrée et de sortie du tronçon de fibre sous test.

La dispersion chromatique et la biréfringence sont alors déterminées à partir des réflectivités complexes correspondantes. En effet, le déplacement du miroir de référence fait interférer l'onde optique réfléchie sur le miroir et celle réfléchie sur la face d'entrée/sortie de la

fibres dans le bras de mesure (fig. 2). L'interférogramme de sortie est donc élargi du fait de la dispersion chromatique de la fibre.

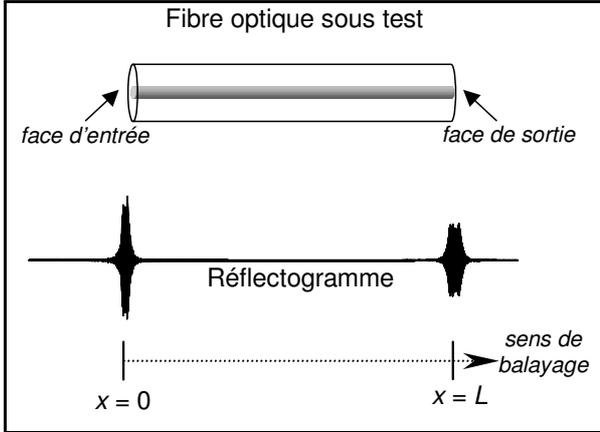


Fig. 2. – Principe de la caractérisation de fibre par OLCR.

L'interférogramme $r(\tau)$, encore appelé réflectogramme correspond à la transformée de Fourier de la réflectivité complexe $\tilde{r}(\omega)$ pondérée par le spectre $S(\omega)$ de la source « blanche » :

$$r(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \tilde{r}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega, \quad (1)$$

où $\tilde{r}(\omega) = |r(\omega)| e^{i\phi\omega}$ et

τ représente la différence de chemin optique.

Un OLCR « conventionnel » permet d'accéder uniquement à l'enveloppe de l'interférogramme. Ses applications concernent essentiellement la mesure des réflexions localisées à l'intérieur de composants photoniques actifs ou passifs. L'extraction de la phase de la réflectivité complexe nécessite l'acquisition de chaque frange d'interférences ainsi que leur position respective. Un OLCR sensible à la phase requière donc la mesure précise de la position du miroir de référence.

Les réflectogrammes sont traités numériquement au moyen d'un algorithme de FFT (*Fast Fourier Transform*) pour déterminer les réflectivités correspondantes aux faces d'entrée et de sortie de la fibre [6,7]. Le temps de groupe T_g résulte de la différence des phases de ces réflectivités :

$$T_g = \frac{d}{d\omega} [\phi_{\text{sortie}}(\omega) - \phi_{\text{entrée}}(\omega)]. \quad (2)$$

La mesure du GVD est effectuée simplement en calculant la pente de la courbe du temps de groupe rapportée à la longueur L de la fibre :

$$\text{GVD} = \frac{1}{2L} \cdot \frac{dT_g}{d\lambda}. \quad (3)$$

Dans le cas de fibres biréfringentes, un phénomène de variation périodique du contraste des franges peut être observé. Il provient du recouvrement des interférogrammes correspondant aux deux modes de

polarisation qui se propagent à des vitesses différentes [8]. La biréfringence de groupe peut être déterminée à partir de la période de battement dans le module de la réflectivité de la face sortie :

$$B_g = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda 2L}, \quad (4)$$

où λ est la longueur d'onde moyenne et $\Delta\lambda$ est l'intervalle spectral entre deux minimums du spectre cannelé.

2.2. Banc du LNE

La conception d'un OLCR sensible à la phase impose l'acquisition du signal d'interférence à faible cohérence avec grande précision. Pour ce faire, le signal issu d'un interféromètre cohérent permet, par comptage des franges d'interférence, de connaître la position du miroir de référence avec une grande précision.

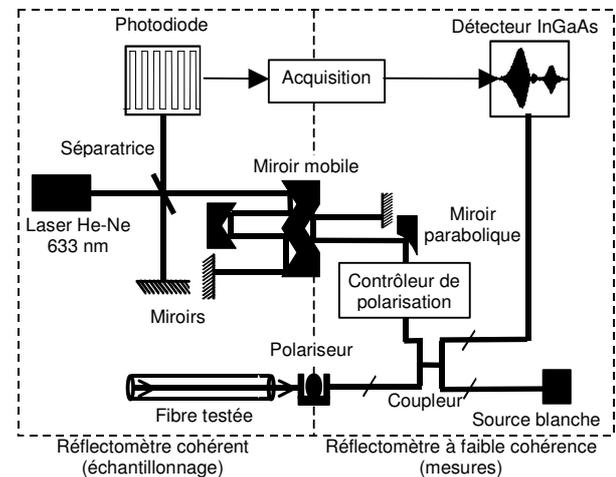


Fig. 3. – Banc de mesure OLCR du LNE.

La figure 3 présente l'architecture du banc OLCR du LNE. Il est constitué de deux interféromètres reliés par des réflecteurs de type « coin de cube » mis dos à dos et disposés sur un même chariot se déplaçant sur coussin d'air. L'interféromètre cohérent, en espace libre, comprend un laser He-Ne ($\lambda_{\text{He-Ne}} = 632,8 \text{ nm}$), une lame séparatrice, un miroir fixe et enfin le miroir « coin de cube » monté sur coussin d'air. Le signal sinusoïdal détecté est remis en forme et sert d'horloge pour l'acquisition des mesures. Cette méthode permet, grâce à la démultiplication des allers-retours sur le bras mobile dus aux différents « coin de cube », de réaliser un échantillonnage du signal interférométrique à faible cohérence avec une période spatiale $\approx 80 \text{ nm}$. L'interféromètre faiblement cohérent comprend une source « blanche » de type ASE émettant en bande C+L (1 525 nm – 1 605 nm), des coupleurs 50/50 et un photodétecteur équilibré InGaAs. Mis à part l'étage de translation et le comptage des franges, la partie interféromètre à faible cohérence est entièrement constituée de tronçons de fibre. La longueur de fibre dans

chacun des bras étant similaire, les variations du signal interférométrique dues aux fluctuations de température restent faibles. Un polariseur peut être inséré en amont du tronçon de fibre à caractériser afin de s'affranchir des phénomènes liés à la biréfringence.

2.3. Banc de Télécom Paris

Le montage mis en œuvre à Télécom Paris est présenté sur la figure 4. Il est relativement similaire à celui du LNE avec un interféromètre cohérent pour le comptage de frange et un interféromètre à faible cohérence partiellement fibré.

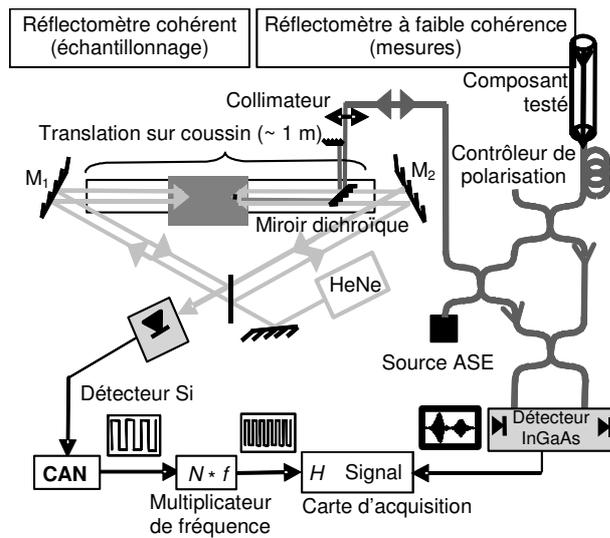


Fig. 4. – Banc de mesure OLCR de Télécom Paris.

La principale différence se situe au niveau de l'interféromètre cohérent. En effet, la configuration choisie permet de s'affranchir des phénomènes de contre-réaction optique susceptibles de perturber la stabilité en fréquence du laser, et par conséquent les éventuelles variations de la période d'échantillonnage. De part l'utilisation de « coin de cube », la géométrie retenue fait que le faisceau de sortie non-utilisé de l'interféromètre se trouve décalé spatialement et ne retourne pas dans le laser d'émission. Un multiplicateur de fréquence électronique a été ajouté après le convertisseur analogique/numérique de manière à faire varier le nombre d'échantillons par période de l'interférogramme (facteur de sur-échantillonnage : 1, 2 ou 4) enregistrés par frange. La vitesse de déplacement du banc de translation sur coussin d'air est de $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.4. Résultats comparés

Une étude comparative des deux bancs OLCR a été réalisée afin de confronter les sensibilités sur la mesure de temps de groupe. Les mesures ont été effectuées sur un même tronçon de fibre G652 de longueur 50 cm. Les courbes obtenues sont présentées sur la figure 5.

On constate que les fluctuations sont similaires pour une même période d'échantillonnage. Il est bien connu que la dispersion chromatique d'une fibre G652 est

dominée par la dispersion du matériau. Dans ce cas, l'évolution du temps de groupe est généralement approximée par un polynôme de Sellmeier [9]. La dispersion chromatique obtenue de $16,9 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ à 1550 nm est identique sur les deux bancs.

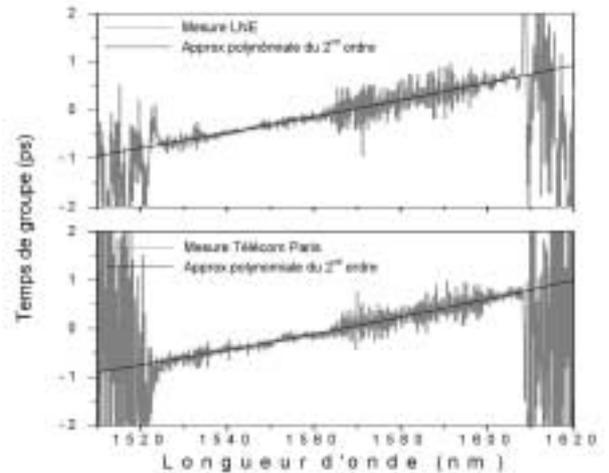


Fig. 5. – Évolution du temps de groupe dans une fibre G652 mesurée par les bancs OLCR du LNE et de Télécom Paris.

La variation des paramètres d'acquisition des mesures (nombre total d'échantillons, période d'échantillonnage) est susceptible de modifier le niveau des fluctuations de l'enregistrement du temps de groupe. La mise à zéro de l'interférogramme en dehors de la réflexion à caractériser permet de réduire la contribution du bruit. Il en résulte des fluctuations plus faibles du temps de groupe comme le montre la figure 6. Par la suite, cette technique de fenêtrage sera appliquée aux interférogrammes avant traitement numérique.

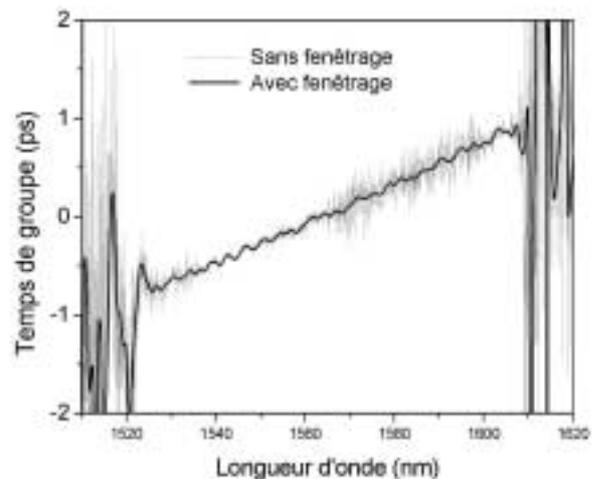


Fig. 6. – Evolution du temps groupe d'un tronçon de fibre G652 avec et sans fenêtrage des données exploitées.

En définitive, bien que la configuration des deux bancs OLCR soit légèrement différente, notamment au niveau de l'architecture de l'interféromètre cohérent, ils présentent des mesures de temps de groupe similaires.

3. Modélisation des fibres micro-structurées

3.1. Méthode des éléments finis

Les propriétés de guidage des fibres optiques micro-structurées sont liées à leur structure et à leur géométrie, en particulier au diamètre des trous d et à leur espacement Λ . Il est important de mettre en place, en parallèle des expérimentations, un outil de modélisation afin de prédire les propriétés de guidage. La présence de trous dont la dimension est de l'ordre de la longueur d'onde dans le cristal nous oblige à tenir compte de l'aspect vectoriel des champs électromagnétiques \vec{E} et \vec{H} .

La méthode des éléments finis permet de calculer la distribution des champs et des constantes de propagation des modes guidés [10, 11]. Pour les guides diélectriques, l'approche consiste à tenir compte des trois composantes du champ \vec{H} et à résoudre l'équation de Helmholtz :

$$\nabla \times \epsilon_r^{-1} (\nabla \times \vec{H}) = \beta^2 \vec{H} \quad (5)$$

Dans cette équation, β désigne la constante de propagation des différents modes et ϵ_r est la permittivité diélectrique relative. Cette méthode permet la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles en le transformant en un système continu d'équations algébriques. On obtient ainsi un système matriciel aux valeurs propres qui peut s'écrire sous la forme générale :

$$[M][H] = \beta^2 [H] \quad (6)$$

La résolution de celui-ci donne les valeurs propres $\beta = k_o n_{eff}$ où $k_o = 2\pi/\lambda_o$ désigne le vecteur d'onde et n_{eff} l'indice effectif. On obtient également, pour chaque valeur propre, la répartition des champs \vec{E} et \vec{H} .

Les conditions de fabrication engendrent des différences entre la géométrie théorique « parfaite » et la géométrie réelle. En effet, l'arrangement des trous (taille, forme et position) peut être modifié de manière significative lors du fibrage. C'est pourquoi la modélisation numérique, effectuée au moyen du logiciel FEMLAB, a été effectuée sur la section droite réelle de la fibre. La figure 7a présente l'image de la section transverse de la fibre étudiée, obtenue avec un microscope électronique à balayage (MEB). L'acquisition d'une image sans déformation et de grande résolution de la section transverse est requise pour une détermination précise des paramètres de guidage.

Les différentes étapes de la modélisation sont présentées sur la figure 7. La 1^{re} étape consiste à prendre une photographie MEB, sans déformation et à l'échelle. L'étape suivante consiste à déterminer les contours des trous, réalisée au moyen d'un programme Matlab. La structure est finalement maillée dans la 3^e étape pour permettre le calcul numérique par une méthode des éléments finis. La figure 7d présente la répartition de l'intensité pour le mode de propagation fondamental.

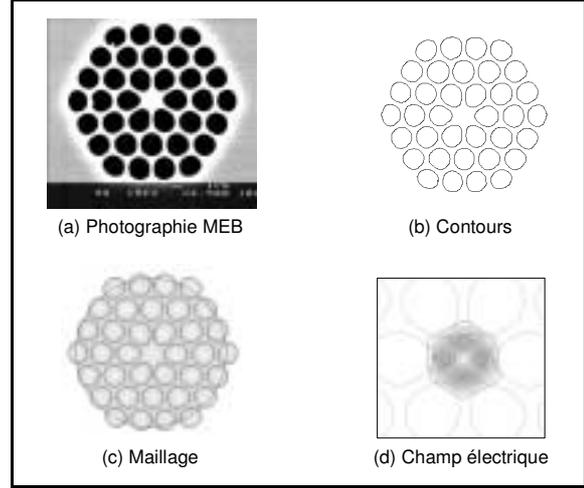


Fig. 7 – Étapes du procédé de simulation des fibres micro-structurées avec le logiciel FEMLAB.

3.2. Dispersion chromatique et biréfringence

La modélisation numérique permet la détermination des indices effectifs n_{eff} des différents modes de propagation pour la gamme de longueurs d'onde étudiées. La maille non idéale de la fibre micro-structurée engendre un phénomène de biréfringence de polarisation. La modélisation met alors en évidence l'existence de deux modes linéairement polarisés pour le mode fondamental. La biréfringence de groupe B_g est calculée à partir de l'évolution de la biréfringence de phase $B_{ph} = \Delta n_{eff}$ par la relation :

$$B_g = \Delta n_{eff} - \lambda \frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial \lambda} \quad (7)$$

La dispersion chromatique théorique quant à elle est déterminée à partir de la relation suivante :

$$\text{GVD}_{\text{théorique}} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial \lambda^2} \quad (8)$$

3.3. Résultats

La fibre micro-structurée étudiée a été réalisée par Alcatel R&I. La photographie MEB de la section droite de la fibre est présentée sur la figure 7a. La structure de base du cristal photonique est une maille hexagonale. Les trous ont une dimension $d = 2,1 \mu\text{m}$ et les interstices une dimension $\Lambda = 2,5 \mu\text{m}$, soit un rapport $d/\Lambda = 0,85$. La modélisation fait apparaître l'existence de deux modes fondamentaux linéairement polarisés ainsi que plusieurs modes d'ordre supérieur.

L'évolution de la dispersion chromatique est présentée sur la figure 8. Son niveau très élevé ($134 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ à 1550 nm) met clairement en évidence la prédominance de la dispersion guide. Les valeurs différentes pour les deux modes de polarisation s'expliquent par la très forte biréfringence de la fibre. Les valeurs calculées de la biréfringence de phase et de groupe du mode fondamental

sont présentées sur la figure 9. La biréfringence de groupe, à 1 550 nm, est $B_g = 1,75 \cdot 10^{-4}$.

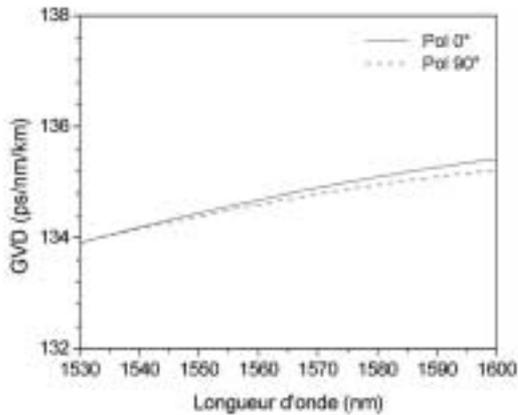


Fig. 8. – Paramètre de dispersion de la fibre micro-structurée déterminé par simulation.

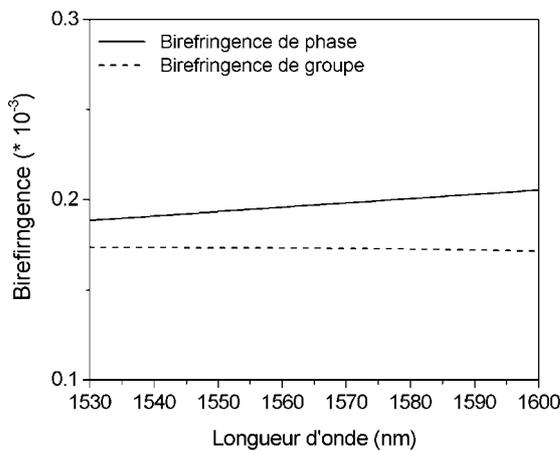


Fig. 9. – Paramètre de biréfringence de la fibre micro-structurée déterminé par simulation.

4. Caractérisation d'un tronçon préliminaire

L'objectif de ce chapitre est de présenter, au travers d'un exemple, les différentes étapes de la caractérisation d'un tronçon de fibre micro-structurée. Comme nous l'avons vu précédemment, la caractérisation débute par un relevé des interférogrammes d'entrée et de sortie du tronçon de fibre à caractériser. L'interférogramme de la face de sortie met généralement en évidence un phénomène de battement. Les variations de la position des trous et de leur diamètre engendrent une biréfringence de forme significative. La source « blanche » de l'OLCR étant non polarisée, l'interférogramme de sortie résulte alors de la superposition des signatures réflectométriques des deux modes de polarisation [8]. L'insertion d'un polariseur, placé à l'entrée de la fibre à caractériser et correctement orienté, permet de s'affranchir du phénomène de battement et de sélectionner l'un ou l'autre des deux modes.

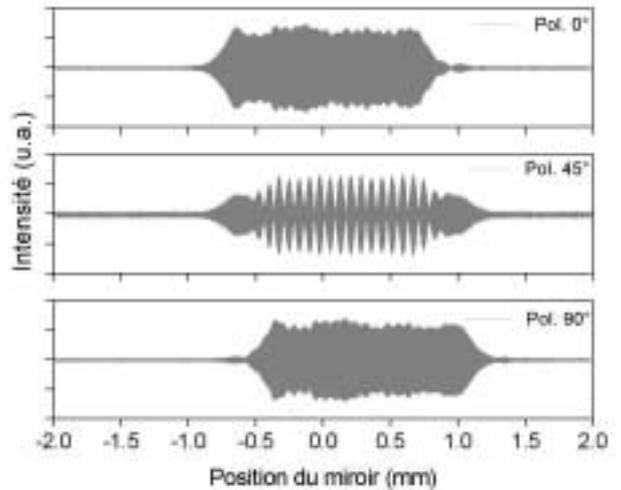


Fig. 10. – Interférogrammes obtenus par réflexion sur la face de sortie de la fibre testée.

Les mesures ont été effectuées sur un échantillon de 800 mm prélevé sur une bobine de fibre de 20 m. La figure 10 présente les interférogrammes enregistrés pour trois orientations différentes du polariseur. Les positions angulaires 0° et 90° correspondent aux deux modes de polarisation et sont déterminées en minimisant les battements dans l'interférogramme. Comme on peut le voir, les interférogrammes correspondant sont spatialement décalés du fait d'un indice de groupe différent. Pour la polarisation 45° , le phénomène de battement est bien observé dans la zone de recouvrement des deux modes de polarisation.

Les modules des réflectivités complexes des faces d'entrée et de sortie pour la polarisation 45° sont présentés sur la figure 11.

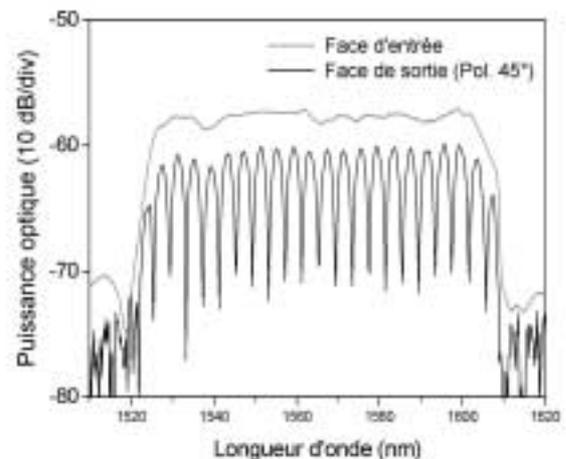


Fig. 11. – Spectres obtenus par transformée de Fourier des interférogrammes enregistrés.

Le spectre de la face d'entrée est similaire au spectre de la source « blanche » de l'OLCR. Le motif cannelé du spectre de la face de sortie est caractéristique d'un phénomène de biréfringence. La biréfringence de groupe

est directement déterminée à partir de l'expression (4). La biréfringence obtenue est $B_g = 4,5 \cdot 10^{-4}$. Elle est du même ordre de grandeur que celle obtenue par modélisation. La variation de la différence des phases entre les réflectivités complexes des faces d'entrée et de sortie provient de la dispersion chromatique dans le tronçon de fibre. Le temps de groupe et la dispersion chromatique sont déterminés à partir des expressions (2) et (3).

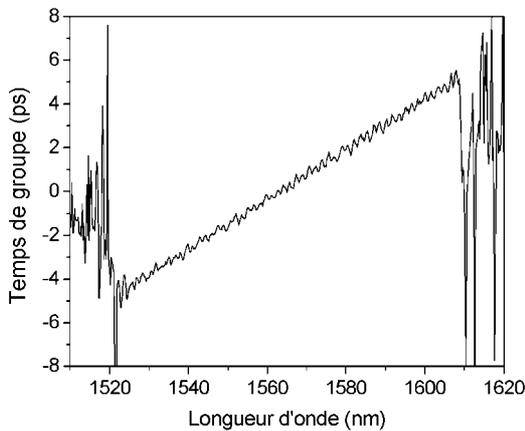


Fig. 12. – Évolution du temps de groupe du tronçon de fibre.

La figure 12 présente l'évolution du temps de groupe du tronçon de fibre pour la polarisation 0° . Compte-tenu de la dimension et de la distance des trous d'air, la dispersion guide est prépondérante. Dans ce cas, le temps de groupe peut être simplement ajusté par des polynômes du 1^{er}, 2^e ou 3^e ordre. La figure 13 présente l'évolution du GVD pour dix acquisitions successives. Les temps de groupe ont été ajustés sur la bande spectrale 1 530 nm – 1 600 nm correspondant à la plage couverte par la source blanche. Il en résulte un croisement des évolutions de GVD autour de la longueur d'onde centrale à 1 565 nm. Les valeurs moyennes de la dispersion chromatique sont :

$$\begin{aligned} \text{GVD}_{0^\circ} &= 140,6 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1} \text{ et} \\ \text{GVD}_{90^\circ} &= 142,4 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}. \end{aligned}$$

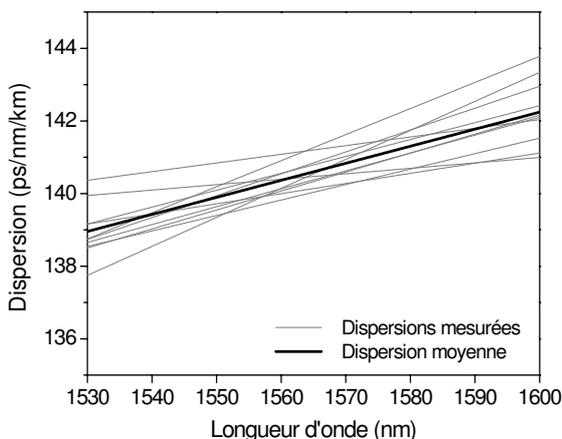


Fig. 13. – Résultats obtenus pour dix mesures successives de dispersion avec leur valeur moyenne.

Le tronçon de fibre caractérisé est issu d'une bobine de fibre de 20 m de longueur. Cette longueur a permis

d'effectuer des mesures comparatives entre les méthodes OLCR et de décalage de phase (*phase-shift*) couramment utilisée. Rappelons que la méthode de décalage de phase consiste à moduler en puissance une source optique ajustable en longueur d'onde injectée dans le tronçon de fibre à caractériser [9]. La variation de la différence de phase entre les signaux électriques d'entrée et de sortie de la fibre après détection en fonction de la longueur d'onde correspond à l'évolution du temps de groupe.

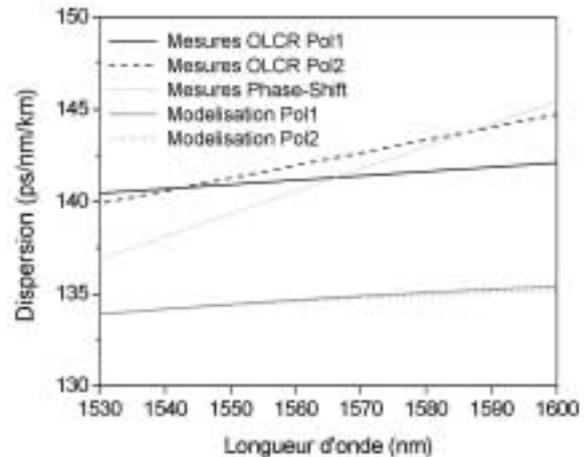


Fig. 14. – Comparaison des résultats de simulation et de mesures par les méthodes « *phase shift* » et OLCR.

La figure 14 montre un bon accord* entre les résultats obtenus avec la méthode OLCR et la méthode du décalage de phase. Par contre, les différences observées entre les mesures et les résultats de simulation sont significatives. Le traitement de la photographie MEB, la précision de la détermination des contours peuvent engendrer des erreurs sur les paramètres de guidage et, en conséquence, sur le calcul de la dispersion chromatique. Une petite différence d'échelle du profil d'indice fait apparaître des différences notables au niveau des résultats de simulation. Nous avons montré qu'une variation de 5 % de l'échelle de la photographie MEB pouvait faire varier la valeur de la dispersion chromatique de quelques pour cents, pour le mode fondamental, à plus de 500 %, pour certains modes d'ordre supérieur [12, 13].

5. Évolution spatiale de la dispersion chromatique

La fabrication des fibres micro-structurées, notamment lors du fibrage, engendre une variation du profil d'indice réel. La position des trous d'air et leurs diamètres sont susceptibles d'évoluer le long de la fibre. Une dizaine de tronçons (40 cm) ont été prélevés suivant une loi logarithmique dans une fibre complète de 1 km. Un premier ensemble de neuf tronçons, situés aux distances 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 50 m, 100 m, 200 m et 500 m

* Il est à noter que des écarts importants ont pu être observés sur certaines fibres qui s'expliquent par les longueurs de tronçons mesurés. En effet, la méthode de décalage de phase donne une moyenne sur un très long tronçon de fibre là où l'OLCR utilise un tronçon très court et est donc plus sensible aux variations spatiales.

dans la fibre, ont été caractérisés parallèlement avec les bancs OLCR de Télécom Paris et du LNE. La position des tronçons, appelés fibres A à L, était inconnue au moment des mesures. Le tableau 1 présente l'ensemble des résultats obtenus pour les neuf tronçons de fibre pour les modes de polarisation 0° et 90°. La longueur de chaque tronçon, la valeur moyenne de la dispersion (sur les vingt mesures) ainsi que les écarts types correspondant y apparaissent. Les valeurs de la dispersion présentées ont été obtenues par une approximation avec un polynôme du 2° ordre. Les valeurs avancées par le LNE et Télécom Paris présentent une bonne concordance mettant ainsi en avant la fiabilité et la cohérence des deux bancs de mesure. Par exemple, pour les mesures de la polarisation 0° faites à Télécom Paris, le GVD varie entre $141,9 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ et $144,7 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, ce qui représente une variation de 2 %. L'écart type (σ) sur les séries de mesure n'excédant pas $0,59 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. Les écarts types déterminés sont en moyenne bien inférieur à 1 % ce qui conforte la fiabilité de cette technique de mesure. Le LNE et Télécom Paris ont montré une évolution similaire de la dispersion dans la fibre et ce sans concertation préalable quant aux résultats déterminés par l'un et l'autre.

Tableau 1
Comparaison ENST/LNE.

GVD ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)		Polarisation 0°			
		ENST		LNE	
longueur (mm)		moyenne	σ	moyenne	σ
Fibre A	388	143,83	0,27	143,37	0,41
Fibre B	429	143,28	0,08	143,30	1,50
Fibre C	405	144,41	0,19	144,31	0,63
Fibre D	430	143,74	0,08	143,48	0,88
Fibre E	382	143,60	0,17	143,99	0,40
Fibre F	416	143,38	0,09	–	–
Fibre G	400	141,87	0,59	140,92	0,42
Fibre H	389	143,15	0,35	143,07	0,62
Fibre I	423	144,68	0,35	145,02	0,46

GVD ($\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)		Polarisation 90°			
		ENST		LNE	
longueur (mm)		moyenne	σ	moyenne	σ
Fibre A	388	146,34	0,47	146,30	0,54
Fibre B	429	145,92	0,15	145,86	1,69
Fibre C	405	147,07	0,38	146,79	0,83
Fibre D	430	147,22	0,13	146,58	0,64
Fibre E	382	147,14	0,12	147,40	1,10
Fibre F	416	146,40	0,11	–	–
Fibre G	400	142,28	0,47	142,61	0,32
Fibre H	389	146,22	0,59	146,28	0,88
Fibre I	423	148,20	0,43	147,93	0,64

Des tronçons supplémentaires ont été sélectionnés suivant une loi linéaire pour compléter les grandes zones non couvertes par la précédente expérimentation. La figure 15 présente l'évolution de la dispersion pour chaque mode de polarisation à différentes positions dans la fibre. Les deux modes montrent une évolution cohérente sur l'ensemble des douze tronçons mesurés. La dépendance spatiale de la dispersion chromatique est faible. Les

résultats de ces nouvelles mesures se sont parfaitement intégrés aux précédents renforçant ainsi la validité de ces mesures. Ils mettent en évidence une variation plutôt de longue distance de la dispersion chromatique.

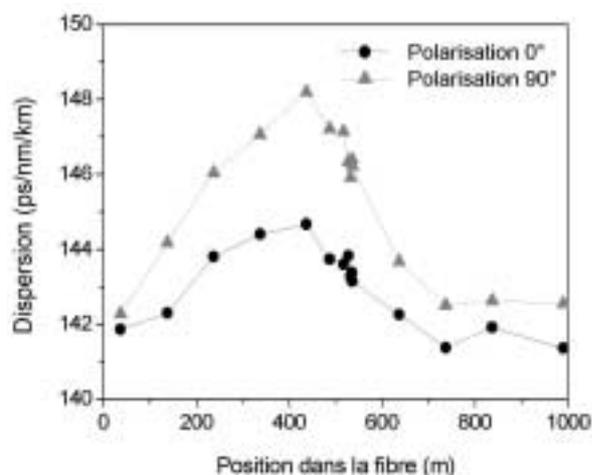


Fig. 15. – Évolution de valeurs de dispersion mesurées pour chaque tronçon prélevé dans la fibre.

6. Conclusion

Les fibres optiques micro-structurées font l'objet d'un effort de recherche soutenu. Les domaines d'applications recherchés concernent bien évidemment le domaine des télécommunications (conversion en longueur d'onde, régénération 2R et 3R, ...) mais diffuse également vers d'autres secteurs d'activités : capteurs (sources à *super-continuum*), lasers à fibre de très forte puissance, ... Les applications visées exigent généralement une caractérisation rigoureuse des paramètres de guidage (dispersion chromatique, biréfringence, aire effective, pertes). Nous venons ici de démontrer que la caractérisation par la méthode OLCR s'avère répondre à ces exigences. En reprenant les principes de fonctionnement des deux bancs mis en œuvre à Télécom Paris et au LNE, nous avons vu que de courts tronçons de fibre (quelques dizaines de centimètres) permettaient de déterminer la biréfringence de groupe et la dispersion dans une fibre optique. La comparaison des deux bancs OLCR a aussi montré une bonne concordance des résultats, par conséquent une régularité et une fiabilité de cette technique de mesure. De plus, en couplant cette méthode à un outil de simulation utilisant la géométrie réelle de la fibre, on dispose d'outils performants pour l'analyse des propriétés des fibres. Dans la dernière partie, nous avons vu en quoi le fait d'utiliser de petits tronçons permettait une caractérisation locale des paramètres de guidage le long d'une fibre. Cette technique de caractérisation, outre le fait d'être un outil de métrologie, peut être un outil très pertinent pour l'aide à la conception de fibres optiques innovantes et plus généralement de nouveaux composants photoniques.

Références

- [1] KAMINOW I.P. et KOCH T.L., "Optical fiber telecommunications IIIA", *Academics Press*, 1997.
- [2] KNIGHT J.C., BIRKS T.A., RUSSEL P.St.J. et ATKIN D.M., "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding", *Opt. Lett.*, **21**, octobre 1996, 1547-1549.
- [3] HANSEN K., FOLKENBERG J., PETERSSON A. et BJARKLEV A., "Properties of nonlinear photonic crystal fibers for telecommunications applications", *OFC'03*, FI2, mars 2003.
- [4] PALAVICINI C., KERRINCKX E., JAOUËN Y., OBATON A-F. et al., "Characterization of photonic crystal fiber properties using phase-sensitive OLCR", *Opt. Lett.*, **30**, février 2005, 361-363.
- [5] TAKADA K., YOKOHAMA I., CHIDA K. et NODA J., "High sensitivity and submillimeter resolution optical time-domain reflectometry based on low-coherence interference", *J. Lightwave Technol.*, **10**, décembre 1992, 1998-2005.
- [6] CHAPELEAU X., PALAVICINI C., JAOUËN Y., LEDUC D., LUPI C. et BOISROBERT C., « Caractérisation de composants photoniques innovants par réflectométrie à faible cohérence sensible à la phase », *Bulletin du BNM*, **126**, 2004-3, 2004.
- [7] DYER S.D. et ROCHFORD K.B., "Low-coherence interferometric measurements of fibre Bragg grating dispersion", *Electron. Lett.*, **35**, août 1999, 1485-1486.
- [8] THEVENAZ L., PELLAUX J.-P., GISIN N. et VON DER WEID J.-P., "Birefringence measurements in fibers without polarizer", *J. Lightwave Technol.*, **7**, août 1989, 1207-1212.
- [9] MECHELS S.E., SCHLAGER J.B. et FRANZEN D.L., "Accurate measurements of the zero-dispersion wavelength in optical fibers", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **102**, mai-juin 1997, 333-347.
- [10] BRECHET F., MARCOU J., PAGNOUX D. et ROY P., "Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method", *Opt. Fiber Technol.*, **6**, avril 2000, 181-191.
- [11] CUCINOTTA A., SELLERI S., VINCETT L. et ZOBOLI M., "Holey fiber analysis through the finite-element method", *Photon. Technol. Lett.*, **14**, novembre 2002, 1530-1532.
- [12] GABET R., CLÉMENT K., MELIN G., OBATON A.-F., BUROV E. et JAOUËN Y., « Caractérisation modale de fibres microstructurées par réflectométrie à faible cohérence », *JNOG'05*, novembre 2005, 2.5.
- [13] GABET R., HAMEL P., OBATON A.-F., BUROV E., MELIN G. et JAOUËN Y., "Modal analysis and spatial dispersion evolution in PCF fibres", *ECOC'06*, septembre 2006, Th.1.5.7.