

DÉPENDANCE TEMPORELLE DE LA MATRICE DE TRANSMISSION D'UNE FIBRE LÉGÈREMENT MULTIMODE DE SPÉCIALITÉ

Jean Yammine¹, Arsène Tandjè^{1,2}, Monica Bouet¹, Michel Dossou², Laurent Bigot¹, et Esben Ravn Andresen¹

¹ Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000 Lille, France.

² École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Univ. d'Abomey-Calavi (UAC), Cotonou, Bénin
esben.andresen@univ-lille.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons une mesure résolue en temps de la matrice de transmission complète d'une courte longueur de fibre à cœur annulaire légèrement multimode. Notre méthode est capable d'isoler la matrice de transmission propre à la fibre des contributions de "désalignement" provenant d'optiques en amont et en aval de la fibre. Nous extrayons la dérive temporelle de la matrice de transmission de la fibre et proposons un modèle empirique pour décrire cette dérive.

MOTS-CLEFS : *Fibre à cœur annulaire ; Matrice de transmission ; Modulateur spatial de lumière ; Modes vectoriels*

1. INTRODUCTION

Les fibres optiques légèrement multimodes (qui guident jusqu'à une dizaine de modes) sont actuellement une des pistes explorées pour aller vers de futurs réseaux de fibres optiques à capacité plus élevée que celle physiquement atteignable avec les fibres monomodes actuelles. En effet, une fibre légèrement multimode guidant N modes peut, en principe, relayer autant d'information sur un mode qu'une fibre monomode : la fibre légèrement multimode offre alors une capacité N fois plus élevée qu'une fibre monomode. Une fibre légèrement multimode peut être mathématiquement représentée par sa *matrice de transmission fibre* et sa *matrice de diaphonie*. La matrice de transmission fibre est la transformation linéaire qu'un champ électrique subit entre l'entrée et la sortie de la fibre. La matrice de diaphonie est le module carré de la matrice de transmission fibre. Afin de dimensionner correctement un système de communication basé sur des fibres légèrement multimodes, des connaissances sur ces deux matrices sont à priori nécessaires : les valeurs maximales de diaphonie peuvent être utilisées pour choisir un code de correction des erreurs dues à une dégradation de rapport signal sur bruit (causée par diaphonie) alors que le comportement temporelle de la matrice de transmission permet de choisir un code de traitement numérique (modèle de canal) qui s'adapte à la même échelle de temps. Cependant, la question de savoir comment la matrice de diaphonie et la matrice de transmission fibre évoluent dans le temps n'a pas encore été traitée, même si on s'attend à ce que ces matrices, pour une fibre légèrement multimode en situation "réaliste", soient des fonctions complexes des paramètres environnementaux le long de la fibre.

2. MESURE DE LA MATRICE DE TRANSMISSION PROPRE À LA FIBRE

Nous étudions une fibre à cœur annulaire guidant 10 modes vectoriels et fabriquée à la centrale technologique FiberTech Lille avec les paramètres suivants : rayon intérieur et extérieur du cœur annulaire de $7\text{ }\mu\text{m}$ et $10\text{ }\mu\text{m}$; différence d'indice cœur/gaine de l'ordre de $20 \cdot 10^{-3}$; longueur = 1.5 m.

Le montage et la méthode que nous utilisons sont détaillés dans les travaux de Yammine et al. [1]. En pratique, nous déplaçons un spot laser sur la face d'entrée de la fibre à l'aide d'un modulateur spatial de lumière simultanément à un enregistrement, par holographie hors-axe sur une caméra, du champ sur la face de sortie de la fibre. Un spot en entrée et un pixel sur la caméra sont appelés des *modes localisés*. La Fig. 1(a) présente un exemple la *matrice de transmission système* ainsi mesurée. Il convient de noter

qu'il s'agit de la matrice de transmission complète, résolue en polarisation : chaque quadrant correspondant ainsi à une combinaison de polarisation en entrée et en sortie. Celle-ci est égale à la *matrice de transmission fibre* propre à la fibre, multipliée par un *opérateur de désalignement amont* et un *opérateur de désalignement aval* représentant, respectivement, le chemin optique entre le modulateur spatial de lumière et la fibre et celui entre la fibre et la caméra. Grâce à un algorithme itératif, nous identifions ces trois différentes matrices et nous procédons ensuite à une transformation de base de la matrice de transmission fibre pour l'exprimer dans la base des modes vectoriels de la fibre, nommés (l,p) , où l est le numéro azimutal et p la polarisation. Un exemple d'une telle matrice de transmission fibre est présenté dans la Fig. 1(b). Nous soulignons que cette méthode, basée sur l'utilisation d'un modulateur spatial de lumière et de la base de modes localisés, permet d'isoler la matrice de transmission fibre indépendamment des contributions des optiques ou des désalignements en amont ou en aval de la fibre. Ceci n'aurait pas pu être le cas si on avait utilisé des multiplexeurs spatiaux, car la contribution des multiplexeurs eux-mêmes n'aurait pu être isolée de celle de la fibre. Comme attendu pour cette fibre, la matrice de transmission fibre indique qu'une diaphonie peut apparaître principalement entre modes ayant le même l , la différence d'indice effectif entre les modes présentant des nombres l différents étant suffisamment élevée pour éviter la diaphonie dans ces cas.

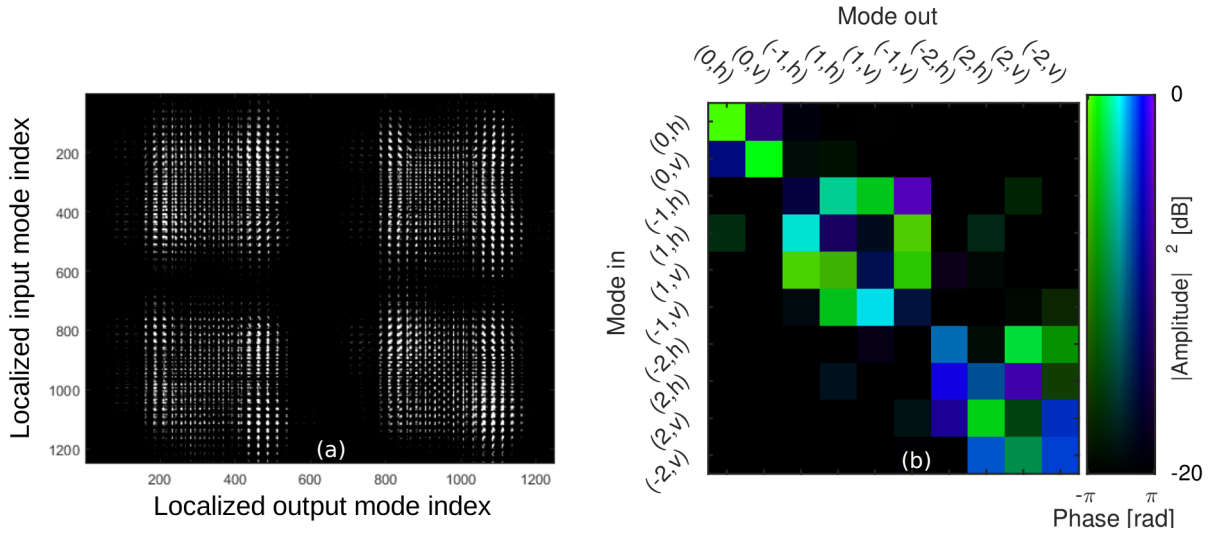


FIGURE 1 : (a) Module carré de la matrice de transmission système mesurée, exprimée dans la base de modes localisés. (b) Matrice de transmission fibre, i.e. matrice de transmission système dont les contributions de désalignement ont été numériquement soustraites, exprimée dans la base de modes (l,p) . L'échelle de couleurs est doublement graduée pour visualiser les valeurs complexes de la matrice.

3. DÉRIVE TEMPORELLE ET PARAMÉTRISATION DE LA MATRICE DE TRANSMISSION FIBRE

Sur une durée de deux jours, nous mesurons ensuite une séquence de 11 matrices de transmission fibre et nous extrayons la dépendance temporelle des éléments des blocs diagonaux. Les Figure 2(a) et 2(b) présentent la variation de l'amplitude normalisée et de la phase de ces éléments. On peut remarquer que – pour les conditions expérimentales appliquées ici – l'évolution temporelle provient principalement d'une dérive de la phase de ces éléments.

À partir de la séquence temporelle de la matrice de transmission fibre mesurée, nous établissons un modèle empirique de la dérive de la matrice de transmission fibre, ici paramétrisée en un seul paramètre. Pour ce faire, (i) nous effectuons une décomposition en valeurs singulières de l'argument de la séquence de matrices de transmission fibre, (ii) nous retenons le premier vecteur singulier, U_1 , qui est une matrice ayant les mêmes dimensions que la matrice de transmission fibre et (iii) nous l'exprimons sous la forme $\exp(j \cdot U_1)$. Cette matrice complexe, représentée graphiquement dans la Fig. 2(e), peut alors

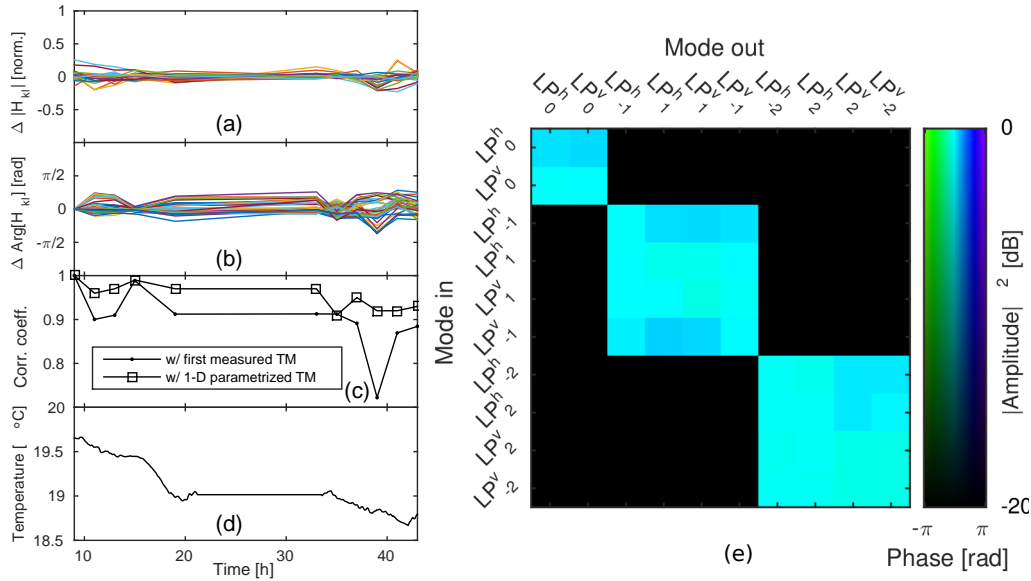


FIGURE 2 : Évolution temporelle de la matrice de transmission fibre. (a) Amplitudes normalisées des éléments sur les blocs diagonaux. (b) Variation de phase des mêmes éléments. (c) Intégrals de recouvrement entre matrice de transmission fibre mesurée en premier avec (points) celle mesure à t_i ; et (carrés) celle paramétrisée en un paramètre; (e) opérateur de dérive dans le cas de paramétrisation en un paramètre.

être considérée comme un *opérateur de dérive*. La matrice de transmission fibre, paramétrisée dans le paramètre α , est alors

$$H_{kl}^{(\text{param})}(\alpha) = \begin{cases} H_{kl}(t_0) \cdot \exp(j\alpha U_1) & , (k, l) \in \mathcal{D} \\ H_{kl}(t_0) & , (k, l) \notin \mathcal{D} \end{cases} \quad (1)$$

où \mathcal{D} est le groupe d'indices (k, l) sur les blocs diagonaux et $H_{kl}(t_0)$ la première matrice de transmission fibre. Sur la Fig. 2(c), nous montrons que l'intégrale de recouvrement (une mesure de la similarité) entre matrice de transmission fibre mesurée à temps t_i avec la première matrice mesurée décroît. A contrario, l'intégrale de recouvrement avec la matrice paramétrisée reste proche de 1 sur toute la plage temporelle de la mesure. Ainsi, pour les conditions expérimentales appliquées ici, la dérive de la matrice de transmission fibre peut être décrite par une évolution le long d'une direction dans l'espace paramétrique, celle représentée par l'opérateur de dérive dans Fig. 2(e). La dérive temporelle pourrait être partiellement due à la variation de température (reportée Fig. 2(d)) dans la salle d'expérimentation, même si aucune conclusion définitive ne peut être tirée à ce stade.

CONCLUSION

Nous avons présenté une méthode permettant de mesurer la matrice de transmission propre à une fibre légèrement multimode, libre des contributions d'optiques ou de désalignements en amont ou en aval de la fibre. Nous avons montré qu'un modèle simple de la matrice de transmission, paramétrisée avec un seul paramètre, peut donner une bonne description de son évolution temporelle sur l'espace de deux jours. Nous estimons que notre méthode pourra aider à développer des modèles de canal pour les systèmes de transmission de données sur fibre légèrement multimode ainsi qu'une meilleure maîtrise de composants multi-modes.

RÉFÉRENCES

- [1] J. Yammine, A. Tandjè, M. Dossou, L. Bigot et E. R. Andresen, "Time-dependence of the transmission matrix of a specialty few-mode fiber", Appl. Phys. Lett. Photon. vol. 4, no. 2, Art. ID 022904, 2019.