NOUVELLES GENERATIONS DE FIBRES MULTIMODES ADAPTEES AUX TRANSMISSIONS OPTIQUES MULTIPLEXEES SPATIALEMENT

Pierre Sillard

Prysmian Group, 644 boulevard Est, BILLY BERCLAU, 62092 Haisnes Cedex, France

Pierre.Sillard@prysmiangroup.com

RÉSUMÉ

Nous présentons les dernières avancées sur les fibres multimodes adaptées aux transmissions multiplexées spatialement. Nous discutons également des limitations à l'augmentation du nombre de modes que ces fibres peuvent supporter.

MOTS-CLEFS : *fibres ; multimodes ; multiplexage spatial.*

1. INTRODUCTION

Le multiplexage spatial utilisant de nouvelles générations de fibres multimodes fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches [1-4], car il permet d'augmenter de plus d'un ordre de grandeur la capacité des réseaux optiques actuels qui approchent sérieusement de leurs limites.

Dans cet article, nous décrivons comment optimiser ces nouveaux types de fibres qui se classent en 2 catégories [5]. Dans la 1ère catégorie, dite faiblement couplée [1], le couplage entre modes est minimisé afin de pouvoir les détecter séparément à la réception, ce qui simplifie considérablement le traitement du signal. Dans la 2ème catégorie, dite fortement couplée [2-4], les Différences de Temps de Groupe (***DTG***) entre modes sont minimisées afin de pouvoir les détecter simultanément à la réception, ce qui permet de s'affranchir des effets de couplage mais ce qui rend beaucoup plus complexe le traitement du signal.

Jusqu'à présent, seules des fibres ayant 2 [2,3], 4 [1,4] et 6 [6,7] modes LP ont été rapportées. Nous discuterons donc également des possibilités d'augmenter le nombre de modes dans ces fibres et des potentielles limitations à ces augmentations.

2. FIBRES MULTIMODES FAIBLEMENT COUPLEES

Pour optimiser ces fibres faiblement couplées, nous considérons des profils d'indice en échelon (voir encadré Fig.1(b)), qui sont très bien adaptés à cette catégorie, et nous appliquons la stratégie décrite en [5]. Pour toute fibre comportant $\boldsymbol{N}$ modes LP, nous choisissons la valeur la plus élevée de la fréquence normalisée ($\boldsymbol{V} = 2\pi a/\lambda\sqrt{n_c^2 - n_g^2}$, avec n_c and n_g les indices respectivement du cœur et de la gaine, a le rayon du cœur, et λ la longueur d'onde, ici 1550nm) qui permet aux $\boldsymbol{N}$ 1ers modes LP d'être guidés tout en coupant les modes LP d'ordres supérieurs. De cette façon, les $\boldsymbol{N}$ 1ers modes LP ont les constantes de propagation normalisées ($\boldsymbol{B} = (n_{eff}^2 - n_g^2)/(n_c^2 - n_g^2)$ avec n_{eff} l'indice effective du mode LP) les plus élevées possibles (voir Fig.1(a)), ce qui leur assure plus facilement de faibles pertes par courbures (qui sont choisies <10dB/tour pour un rayon de courbure de 10mm). Une fois $\boldsymbol{V}$ fixée, a est ensuite optimisé (n_c étant déduit de la formule de $\boldsymbol{V}$).

Lors de ces optimisations, menées pour $\boldsymbol{N}$=2 à 9, il y a un compromis à trouver entre le minimum des différences de n_{eff} entre modes LP guidés, Min$|\boldsymbol{\Delta n_{eff}}|$, qui doit être le plus grand possible (de préférence $\geq 1\times10^{-3}$) afin de limiter le couplage de mode, et le minimum des Surfaces effectives de ces modes, Min$|\boldsymbol{S_{eff}}|$, qui doit également être le plus grand possible (de préférence ≥80µm²) afin de limiter les effets non-linéaires (voir Fig.1(b)). Pour $\boldsymbol{N}$ fixé, c'est-à-dire pour $\boldsymbol{V}$ et $\boldsymbol{B}$ fixés, on peut augmenter Min$|\boldsymbol{\Delta n_{eff}}|$ en augmentant n_c (voir formule des $\boldsymbol{B}$) et donc en diminuant a (voir formule de $\boldsymbol{V}$). Cela a pour conséquence de réduire Min$|\boldsymbol{S_{eff}}|$ (voir Fig.1(b)). Ensuite, lorsque $\boldsymbol{N}$ augmente à Min$|\boldsymbol{\Delta n_{eff}}|$ fixé, Min$|\boldsymbol{S_{eff}}|$ diminue par paliers. En effet, Min$|\boldsymbol{S_{eff}}|$ doit être réduit pour garder un Min$|\boldsymbol{\Delta n_{eff}}|$ constant quand on passe de $\boldsymbol{N}$=2 (Min$|\boldsymbol{\Delta n_{eff}}|$= $|n_{eff,01}-n_{eff,11}|$, **LP$_{01}$** et **LP$_{11}$** ayant des $\boldsymbol{B}$ très différents) à $\boldsymbol{N}$=4, 5, 6, et 7 (Min$|\boldsymbol{\Delta n_{eff}}|$= $|n_{eff,21}-n_{eff,02}|$, **LP$_{21}$** et **LP$_{02}$** ayant des $\boldsymbol{B}$ plus

proches), puis à N=9 (Min|Δn_{eff}|= |$n_{eff,22}$-$n_{eff,03}$|, LP_{22} et LP_{03} ayant des B encore plus proches, voir Fig.1(a)). C'est un facteur limitant à l'augmentation de N dans ce type de fibre. Ainsi, si les fibres avec 7 modes LP ont des caractéristiques acceptables (Min|S_{eff}|=80µm² pour Min|Δn_{eff}|=1.25×10^{-3}), les fibres avec 9 modes LP atteignent déjà des niveaux critiques (Min|S_{eff}|≤70µm² pour Min|Δn_{eff}|≥1×10^{-3}).

Il est intéressant de noter qu'à N fixé, les confinements des modes LP sont assez similaires du fait de la structure d'indice en échelon. Ainsi, pour toutes ces fibres, (Max|S_{eff}|-Min|S_{eff}|)≤20µm² et les différences d'atténuations sont <0.01dB/km, ce qui limite significativement les effets de pertes dépendant des modes [8].

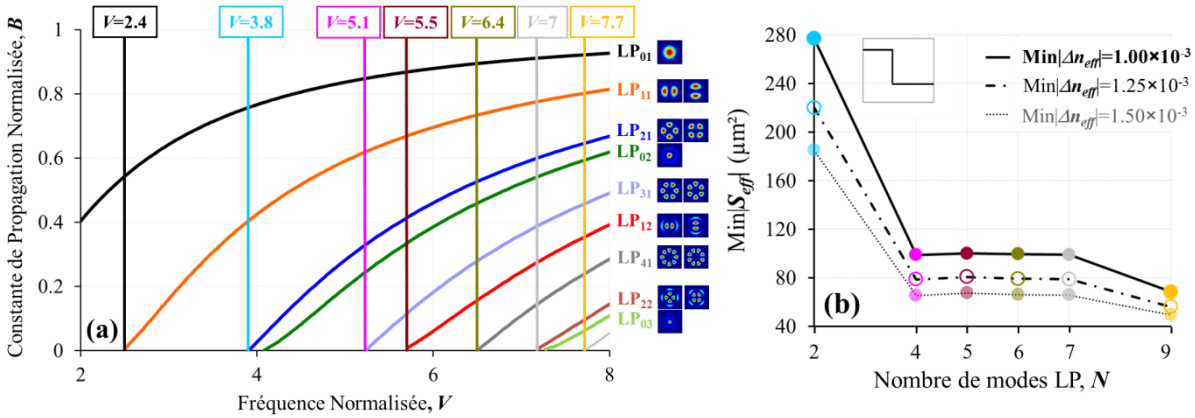

Fig.1 : Fibres faiblement couplées avec profils d'indice en échelon : B en fonction de V (a) ; Min|S_{eff}| en fonction de N pour Min|Δn_{eff}|=1, 1.25 et 1.5×10^{-3}, les lignes sont des guides pour l'œil (b).

3. FIBRES MULTIMODES FORTEMENT COUPLEES

Pour optimiser ces fibres fortement couplées, nous considérons des profils d'indice avec cœur en gradient et avec tranchée dans la gaine (voir encadré Fig.2(b)), qui sont très bien adaptés à cette catégorie, et nous appliquons la stratégie décrite en [5]. Pour N=2 à 9, nous choisissons V, et donc B, comme précédemment (voir Fig.2(a)) pour des profils d'indice sans tranchée. Puis, nous ajoutons une tranchée dans la gaine pour garantir aux N modes LP guidés de faibles pertes par courbures (<10dB/tour pour un rayon de courbure de 10mm). Nous nous assurons également que les modes LP d'ordres supérieurs, qui deviennent des modes de fuites du fait de la tranchée, ont des pertes suffisamment grandes pour être effectivement coupés (>19.34dB après 22m de propagation avec 2 boucles de 40mm de rayon selon le document IEC 60793-1-44). Les fibres sont ensuite optimisées pour que le maximum des DTG entre modes LP guidés, Max|DTG|, soit le plus faible possible.

Comme attendu, quand N augmente, Max|DTG| augmente (voir points de la Fig.2(b)). C'est un facteur limitant car cela complexifie le traitement du signal à la réception et peut *in fine* réduire les distances de transmission [8]. Ces faibles DTG sont également très sensibles aux faibles variations de profils qui peuvent se produire lors de la fabrication de la fibre et qui peuvent empêcher d'atteindre les valeurs optimisées [6]. Pour rendre compte de cet effet, nous avons considéré, pour chacune de ces fibres, 1000 profils aléatoires provenant de distributions Gaussiennes ayant comme moyennes les profils optimisés et comme écarts types, σ, les tolérances usuelles de fabrication (3σ=0.5×10^{-3} pour les différences d'indices, 3σ=0.5µm pour les rayons, et 3σ=0.02 pour l'Alpha (exposant du cœur en gradient d'indice)). Ces populations de profils, représentatifs d'une fabrication réelle, ont des valeurs moyennes de Max|DTG| très élevées (≥100ps/km pour N≥6), ce qui illustre bien la grande sensibilité de ce paramètre. Une façon de compenser cette sensibilité est de concaténer des fibres avec des modes LP avec DTG de signes opposés. Pour chacune de ces populations de profils, nous avons simulé les meilleures concaténations possibles et cela s'est avéré être très efficace (voir zone grise de la Fig.2(b) qui délimite les valeurs obtenues les plus basses et les plus hautes). Des expériences récentes de

concaténations, également indiquées sur la Fig.2(b), sont en bon accord avec nos calculs. Les fibres avec 9 modes semblent ainsi réalisables avec les procédés de fabrication actuels (Max|***DTG***| des concaténations entre 20 et 45ps/km).

Enfin, contrairement à la 1ère catégorie, les confinements des modes LP de ces fibres sont très différents. Il y a ainsi de grandes différences de S_{eff} entre modes, mais les Min|S_{eff}| sont toujours ≥90µm², ce qui réduit efficacement les effets non-linéaires. Plus critiques sont les différences d'atténuations qui atteignent 0.02dB/km pour des fibres avec 9 modes LP ; qui peut être considérée comme la limite haute acceptable pour contenir les effets de pertes dépendant des modes.

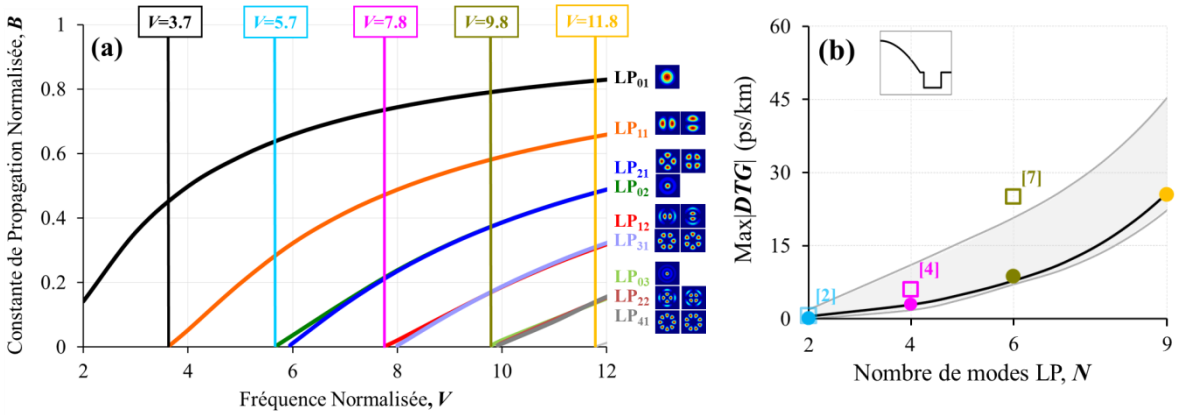

Fig.2 : Fibres fortement couplées : ***B*** en fonction de ***V*** (a) pour des profils d'indice en gradient ; Max|*DTG*| en fonction de ***N*** pour des profils d'indice en gradient avec tranchée (points pour les valeurs théoriques optimisées, zone grise pour les valeurs des concaténations prenant en compte la variabilité de la fabrication, et carrés pour les valeurs expérimentales), les lignes sont des guides pour l'œil (b).

CONCLUSION

Les nouvelles générations de fibres multimodes adaptées au multiplexage spatial offrent des perspectives prometteuses pour augmenter la capacité des réseaux optiques actuels.

D'un point de vue de la conception, il est possible d'optimiser un grand nombre de modes en choisissant le type de profil d'indice adapté et en adoptant la stratégie adéquate. Nous avons ainsi montré que des fibres faiblement couplées avec 7 modes LP et des fibres fortement couplées avec 9 modes LP étaient d'ores et déjà réalisables. Augmenter encore le nombre de modes reste possible et fera certainement l'objet de nouvelles recherches.

Un dernier point important à souligner est que ces fibres peuvent être réalisées avec les procédés de fabrication actuels, ce qui permet une bonne compatibilité avec les fibres monomodes et multimodes standard et autorise des productions à grandes échelles.

REFERENCES

[1] C. Koebele et al., "40km Transmission of Five Mode Division Multiplexed Data Streams at 100Gbps with low MIMO-DSP Complexity," ECOC'11, Th.13.C.3, 2011

[2] R. Ryf et al., "209km Single-Span Mode- and Wavelength-Multiplexed Transmission over Hybrid Few-Mode Fiber," ECOC'12, paper Tu.1.C.1

[3] V.A.J.M. Sleiffer et al., "73.7Tb/s (96X3×256Gb/s) mode-division-multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM-EDFA," ECOC'12, Th.3.C.4, 2012

[4] R. Ryf et al., "708km Combined WDM/SDM Transmission over Few-Mode Fiber Supporting 12 Spatial and Polarization Modes," ECOC'13, We.2.D.1, 2013

[5] P. Sillard et al, "Few-Mode Fibers for Mode-Division-Multiplexed Systems," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 16, p. 2824, 2014

[6] P. Sillard et al., "Low-DMGD 6-LP-Mode Fiber," OFC'14, paper M3F.2, 2014

[7] T. Mori et al., "Six-LP-mode transmission fiber with DMD of less than 70ps/km over C+L band," OFC'14, paper M3F.3, 2014

[8] S. Randel, "Space-Division-Multiplexed Transmission," OFC'13, OW4F.1, 2013