

# Un outil de CAD pour fibres optiques monomodes

Autor(en): **Kotrotsios, G. / Parriaux, O.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **78 (1987)**

Heft 15

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-903896>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Un outil de CAD pour fibres optiques monomodes

G. Kotrotsios, O. Parriaux

**Les fibres optiques monomodes prennent une part croissante en télécommunications et dans le domaine des capteurs. Les caractéristiques principales d'une fibre sont gouvernées par la distribution du profil d'indice de réfraction de son cœur. Un outil de conception assistée par ordinateur basé sur la résolution numérique de l'équation d'onde vectorielle à l'aide d'un PC est présenté ici.**

**Der Anteil der Monomode-Lichtleiterfasern in der Telekommunikation nimmt ständig zu. Die Hauptcharakteristiken einer solchen Faser werden bestimmt durch die Brechungsindexverteilung seiner Kernfaser. In diesem Beitrag wird ein Hilfsmittel zur Dimensionierung von Monomodefaseren beschrieben, das auf der numerischen Lösung der vektoriellen Wellengleichung basiert.**

## Adresse der Autoren

G. Kotrotsios et O. Parriaux, Centre suisse d'électronique et de microtechnique CSEM, recherche et développement, Maladière 71, 2000 Neuchâtel.

G. Kotrotsios est stagiaire de l'ENSIEG, Institut national polytechnique de Grenoble.

## 1. Introduction

Il est maintenant établi que les fibres monomodes vont prendre une part importante du marché des télécommunications grâce aux progrès rapides de la technologie de fabrication. Cette tendance a abouti à la définition de tâches nouvelles en caractérisation et en conception. Alors que dans le cas des fibres multimodes le profil d'indice de réfraction est un paramètre déterminant, il n'en fut pas de même, au début, pour les fibres monomodes, où l'on adopta des grandeurs électromagnétiques, comme le diamètre de mode, plutôt que des grandeurs géométriques pour les caractérisations essentielles et pour la fixation des standards.

Il n'en est plus de même aujourd'hui, au moment où il s'agit d'exploiter au maximum les possibilités offertes par les transmissions monomodes, où les perspectives de systèmes «tout-fibre» comparables dans leur structure aux systèmes micro-ondes ne sont plus très lointaines [1], et où les applications des effets non-linéaires requerront des conditions de propagation très précises [2]. Dans la plupart de ces applications futures, on se trouvera devant la nécessité de produire de façon contrôlée des caractéristiques de dispersion prescrites. Le producteur de fibres n'a pas d'autre moyen d'action que le contrôle du profil d'indice. Il doit non seulement le mesurer mais il doit disposer d'un outil de synthèse permettant de prévoir, corriger un profil, et examiner la stabilité d'une solution technologique. Cet outil de synthèse est le calcul des constantes de propagation, de leurs variations par rapport aux paramètres opto-géométriques de la fibre, de la forme des champs ainsi que des grandeurs électromagnétiques utilisées jusqu'à maintenant. Ce problème n'est pas nouveau. Il a été traité en Suisse au niveau académique [3; 4], appliqué au calcul

de la bande passante de fibres multimodes [5]. Le but de cette contribution est de spécifier une telle technique aux problèmes actuels et futurs de la fibre monomode et de démontrer son application comme outil de conception.

## 2. La méthode de calcul

Le principe est la résolution numérique de l'équation de dispersion [5] du mode considéré avec un profil d'indice à symétrie circulaire donné par l'expression:

$$n = n(r) \quad (1)$$

L'équation de dispersion est obtenue par la décomposition du profil d'indice de réfraction réel en une fonction escalier, puis la définition dans chacun des  $N$  anneaux homogènes d'une matrice de transition, et enfin le raccord à la frontière cœur-gaine [5] de la solution numérique ainsi obtenue dans le cœur et de la solution exacte dans la gaine. L'indice effectif  $n_e$  d'un mode propagé est calculé par recherche numérique du zéro de l'équation de dispersion. L'équation d'onde considérée est l'équation vectorielle, qui est résolue sans faire l'approximation de faible guidance (l'accroissement d'indice dans le cœur peut être important). L'obtention de la dispersion chromatique  $D(\lambda)$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  s'effectue en faisant la dérivation analytique d'un polynôme du deuxième degré, trouvé par «curve fitting» local.

Le programme tourne sur Olivetti M24 en langage compilé (Basic Microsoft), sur Apple IIe (Basic Applesoft, interprété) et sur HP87 en Basic interprété. Il fournit une courbe de dispersion chromatique  $D = D(\lambda)$  avec une vingtaine de points dans la longueur d'onde de points entre 1,25 et 1,6  $\mu\text{m}$  en  $N = 80$  itérations radiales pour l'es-

timation de la fonction de dispersion en 6 min et 30 s sur Olivetti M24 par exemple.

En option, le programme calcule et dessine les composantes des champs normalisés à la puissance propagée de 1 W, le diamètre du mode, ainsi que les longueurs d'onde de coupure des modes supérieurs.

### 3. La dispersion en fibre monomode

Si l'on suppose dégénérés les deux modes de polarisation (symétrie circulaire parfaite), la dispersion dans une fibre monomode est essentiellement une dispersion chromatique en ce sens qu'elle n'existe que du fait de la largeur spectrale non nulle de la source et que celle-ci est modulée; les différentes composantes du spectre de la source modulée se propagent à des vitesses de groupe  $v_g$  différentes. La dispersion s'exprime usuellement en picosecondes d'élargissement d'impulsion par nanomètre de largeur spectrale et par kilomètre de longueur de fibre et est donnée par l'expression [6]:

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{V_g} \right) \quad (2a)$$

avec

$$V_g = \left( \frac{\partial b}{\partial \omega} \right)^{-1} \quad (2b)$$

$$b = n_e k_0 = n_e \omega / c \quad (2c)$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda \quad (2d)$$

On gagne

$$D = - \frac{1}{c} \frac{d}{d\lambda} \left[ n_e - \lambda \frac{dn_e}{d\lambda} \right] \quad (2e)$$

$\beta$  est la constante de propagation,  $n_e$  l'indice effectif du mode dominant HE11,  $k_0$  le vecteur d'onde dans l'espace libre à la longueur d'onde  $\lambda$ , et  $\omega$  la fréquence angulaire.

Pour un signal de largeur spectrale équivalente  $\Delta\lambda$  et une longueur de fibre  $L$ , l'élargissement temporel d'impulsion  $\Delta\tau$  est donné par

$$\Delta\tau = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (3)$$

Il y a deux sources bien distinctes de dispersion dans  $D$ . Elles sont pédagogiquement décrites à la figure 1, illustrant la constante de propagation  $\beta$  en fonction de  $\omega$  pour le mode fondamental. En 1a, le cœur et la gaine ont un indice  $n_c$  et  $n_{cl}$  indépendant de la fréquence optique. La courbe s'appuie à basse fréquence sur la droite de dispersion d'une onde plane dans la gaine, de pente  $n_{cl}/c$ . A haute fréquence, elle s'appuie sur la droite de pente  $n_c/c$  d'une onde plane dans un milieu infini ayant l'indice du cœur.  $v_g$  est l'inverse de la tangente à la courbe de  $\beta(\omega)$ . Sa variation en terme de la longueur d'onde est la *dispersion de guide*. En figure 1b est illustré l'effet de la *dispersion de matériau* qui est de rendre courbes les droites d'appui citées plus haut et donc de rajouter un effet de courbure à la courbe de dispersion.

Le terme «dispersion de matériau» est quelque peu impropre, car si l'essentiel de la variation d'indice dans le cœur est dû au dopage de la silice, la contribution de l'effet photoélastique n'est pas négligeable, non plus que la

variation en température de ce dernier. On convient en général cependant d'exprimer la dépendance de l'indice en la concentration  $x$  de dopant au moyen des expressions [7]:

$$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + x(GA_i - SA_i)] \lambda^2}{\lambda^2 - [Sl_i + x(Gl_i - Sl_i)]^2} \quad (4)$$

où  $SA_i$ ,  $Sl_i$  sont les coefficients de Sellmeier pour la silice;  $GA_i$ ,  $Gl_i$  sont les mêmes coefficients pour le  $GeO_2$ . Les valeurs de ces coefficients sont [7]:

$SA_1 = 0,696166$	$GA_1 = 0,806866$
$SA_2 = 0,407942$	$GA_2 = 0,718158$
$SA_3 = 0,897479$	$GA_3 = 0,854168$
$Sl_1 = 0,068404 \mu m$	$Gl_1 = 0,689726 \mu m$
$Sl_2 = 0,116241 \mu m$	$Gl_2 = 0,153966 \mu m$
$Sl_3 = 9,896161 \mu m$	$Gl_3 = 11,841931 \mu m$

Il est cependant habituel de n'exprimer que l'indice de la silice à partir des coefficients de Sellmeier, la différence étant considérée constante, ce qui est très près de la réalité.

Le présent programme utilise cette méthode pour exprimer les indices qui apparaissent dans la fonction  $n = n(r)$ .

### 4. Fibres à zéro de dispersion chromatique déplacé

Il est bien connu qu'une concentration croissante de  $GeO_2$  dans la silice du cœur accroît l'écart d'indice cœur-gaine et déplace le zéro de dispersion chromatique vers de plus grandes longueurs d'onde, le zéro de dispersion de la silice du cœur étant voisin de  $1,3 \mu m$ , celui du  $GeO_2$  voisin de  $1,74 \mu m$  [7].

Ce cas désormais classique est montré en exemple à la figure 2 avec le profil d'indice considéré, qui est un profil parabolique. La courbe 2a correspond à l'effet cumulé des deux dispersions de guide et de matériau. La courbe 2b illustre le changement de la courbe 2a dû à la présence d'un trou central d'indice de rayon  $a/5$  ( $a$  rayon du cœur) de différence d'indice avec la gaine égale à 0,0025 au lieu de 0,005.

### 5. Fibres à dispersion compensée

Bien qu'impliquées de manière non séparable à l'intérieur de la dispersion effective  $n_e$ , les dispersions de matériau et de guide peuvent être séparées

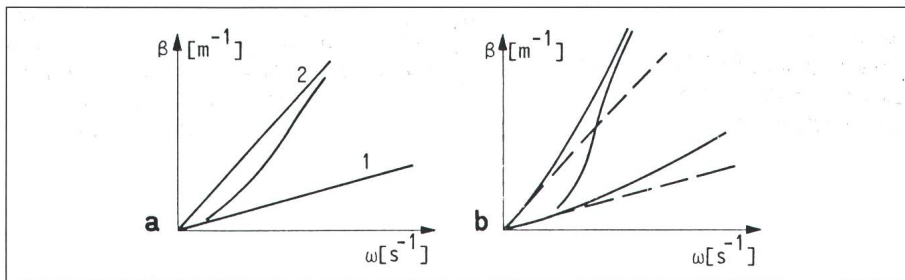
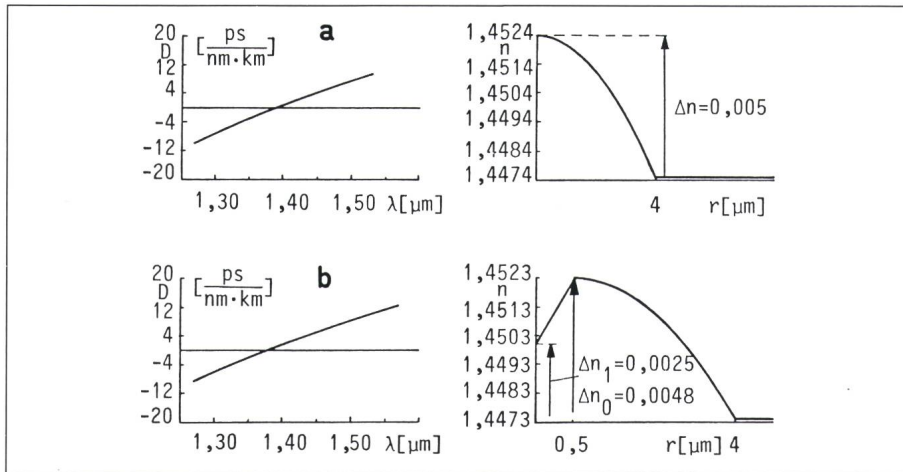


Figure 1 Illustration des deux sources de dispersion

$\beta$  Constante de propagation  $c$  Vitesse de la lumière  $n_{cl}$  Indice de la gaine  
 $\omega$  Fréquence optique  $n_c$  Indice du cœur

a Avec un indice de réfraction indépendant de la fréquence optique, la courbe de dispersion  $\beta(\omega)$  se trouve entre les deux droites de pente  $n_{cl}/c$  (1) et  $n_c/c$  (2).

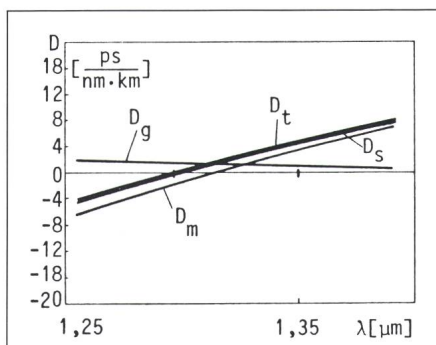
b La dispersion de matériau ( $n_{cl}(\omega)$ ,  $n_c(\omega)$ ) incurve les droites d'appui vers le haut aux fréquences croissantes dans le visible et proche infra-rouge pour la silice.



**Figure 2 Déplacement du zéro de dispersion chromatique dû à la présence d'un trou central**

$D$  Dispersion  $\lambda$  Longueur d'onde  $a$  Rayon du cœur  
 $n$  Indice de réfraction  $r$  Distance radiale  
 a Dispersion chromatique d'une fibre avec un profil parabolique représenté à droite,  $a = 4 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n = 0,005$ .  
 b Dispersion chromatique pour la même fibre avec un trou central de rayon  $a/5$  et de profondeur  $\Delta n_1 = 0,0025$  représenté à droite.

en pratique [6], donnant du mécanisme de dispersion chromatique totale la représentation simple de la somme de deux effets. La figure 3 montre, pour une fibre à saut d'indice à  $\Delta n = 0,005$  et  $r = 3,8 \mu\text{m}$ , l'erreur que l'on fait en calculant la dispersion totale en faisant la somme des deux dispersions de matériau et de guide au lieu du calcul direct des deux dispersions non séparées. On voit que l'erreur est négligeable. Cette même figure 3 suggère par ailleurs l'idée d'une compensation possible sur une région étendue du spectre des deux dispersions. Plusieurs études ont déjà été effectuées dans ce sens [8; 9], le problème posé étant celui de la recherche d'un profil d'indice compensant la dispersion de matériau.



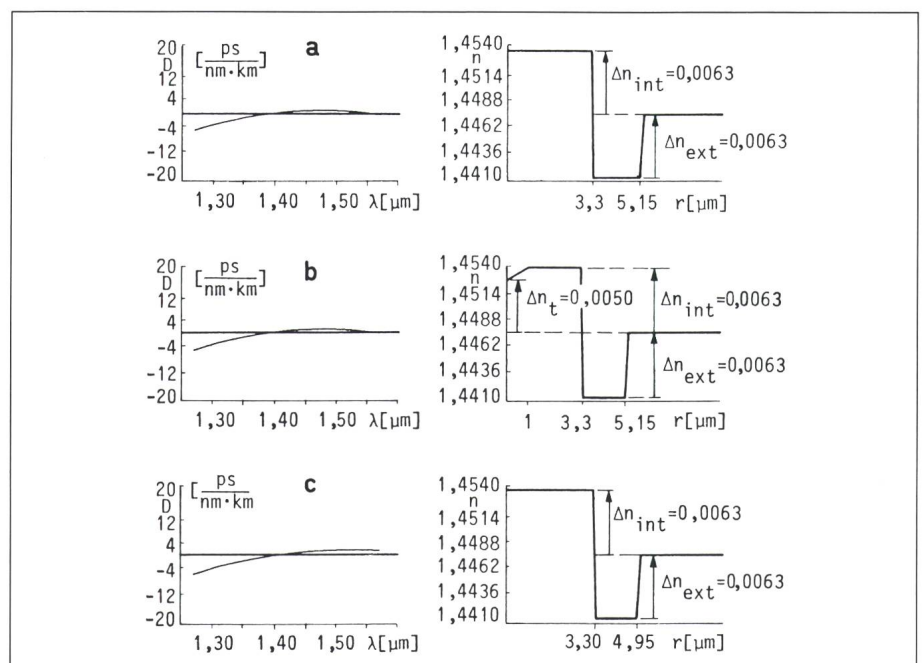
**Figure 3 Séparation des dispersions de matériau et de guide**

La somme  $D_g$  de la dispersion du matériau  $D_m$  et de la dispersion du guide  $D_g$  est pratiquement égale à la dispersion totale  $D_t$  pour le cas d'une fibre à saut d'indice ( $r = 3,8 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n = 0,005$ ).

L'idée initiale [9] était d'utiliser la propriété d'une fibre à profil en W de causer une détente du mode lorsque son indice effectif s'approche de l'indice de la gaine. La figure 4a montre, pour une configuration déjà optimisée [9], l'effet de compensation. Cette configuration souffre toutefois de nombreux handicaps. La sensibilité aux cour-

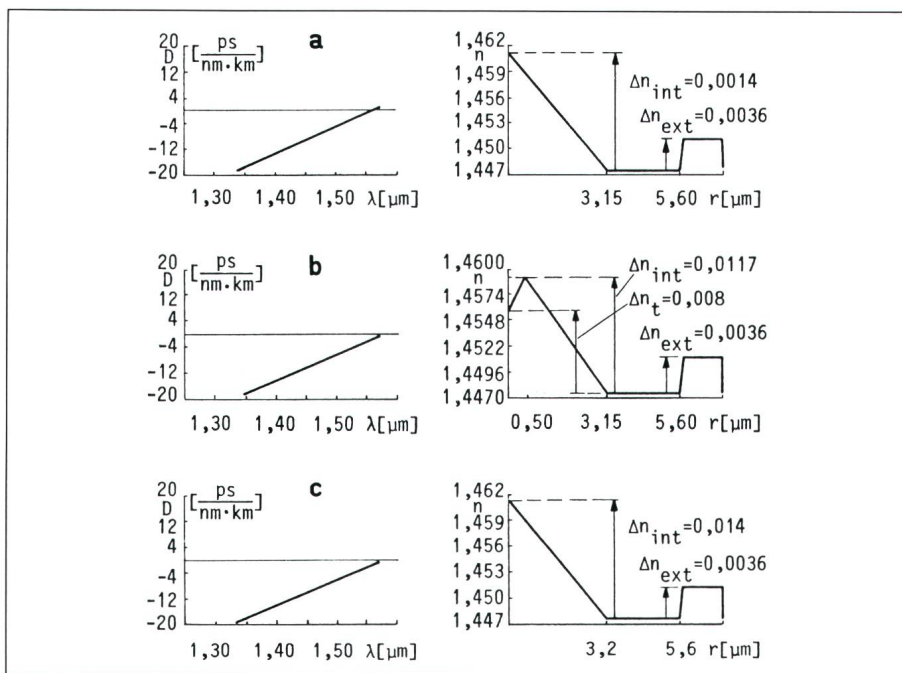
bures sera importante du fait que le mode est relativement près de sa condition de coupure. D'autre part, la condition de compensation est critique. Les figures 4a,b,c montrent, que l'effet de l'existence d'un trou central de rayon  $a/5$  et de différence d'indice de 0,005 au lieu de 0,0063 (courbe 4b) est relativement faible alors que l'effet de la largeur du fossé latéral est beaucoup plus important (courbe 4c). Il est possible de provoquer le même type de détente modale en plaçant une couronne de haut indice de réfraction autour du cœur, empêchant la fuite du mode. Une nouvelle configuration est actuellement à l'étude [10] où, en plus de la présence d'une couronne de haut indice, le profil central est de type triangulaire. La figure 5 illustre la dispersion chromatique dans une telle fibre (courbe 5a). La courbe 5b montre l'effet du tronquage du profil triangulaire et la courbe 5c celui d'une erreur sur le rayon du cœur.

Les possibilités de façonnage de la dispersion n'en sont qu'en leur début et il existe là tout un champ à explorer où la notion même de guidage des ondes pourra être enrichie par un certain degré de guidage de Bragg [11]. En guise de vision futuriste, la figure 6 illustre la dispersion d'une fibre de Bragg.



**Figure 4 Compensation de la dispersion à l'aide des fibres à profil en W**

a Dispersion totale dans une fibre à profil W déjà optimisée pour compensation ( $r_{int} = 3,3 \mu\text{m}$ ,  $r_{ext} = 5,15 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_{int} = 0,0063$ ,  $\Delta n_{ext} = 0,0063$ ).  
 b Modification due à un trou central de rayon  $r = a/5$  et de profondeur  $\Delta n_1 = 0,0013$ .  
 c Effet d'une erreur de  $0,2 \mu\text{m}$  sur la largeur du fossé latéral ( $r_{ext} = 4,95 \mu\text{m}$ ).



**Figure 5** Dispersion dans une fibre à profil central triangulaire avec une couronne de haut indice  
 a Fibre à profil d'indice triangulaire ( $\Delta n_{int} = 0,014$ ,  $\Delta n_{ext} = 0,0036$ ,  $r = 3,15$ , longueur d'onde de coupure =  $1,2851 \mu\text{m}$ ).  
 b Effet d'un trou central de rayon  $0,5 \mu\text{m}$  et de profondeur de  $\Delta n_t = 0,006$  sur la dispersion totale.  
 c Effet d'une erreur sur le rayon de  $0,05 \mu\text{m}$  sur la dispersion totale.

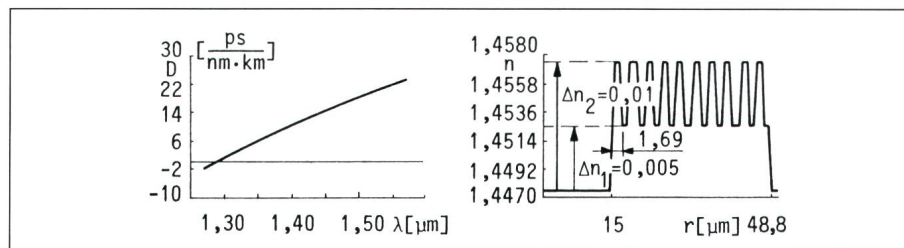
### 6. Amplificateur optique à quatre photons

Le mélange à quatre photons est l'un des effets non-linéaires présents dans une fibre optique [12]. Il a déjà été observé et étudié dans les fibres multimodes du fait que la relation d'accord de phase qui le conditionne est à coup sûr assurée dans une fibre multimode où existe une profusion de modes [13]. Très récemment, cet effet a été utilisé en fibre monomode pour l'amplification optique, où la condition d'accord de phase est assurée et contrôlée par un effet thermique [12]. Là également, la condition d'accord de phase doit pouvoir être favorisée, sélectivement ou non, par un façonnage approprié des propriétés de dispersion de la fibre.

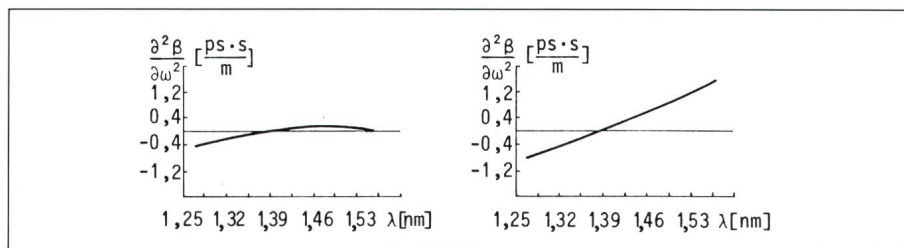
Les deux conditions pour le mélange à quatre photons portent sur la conservation de l'énergie:  $2\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ , où  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont les fréquences angulaires optiques des photons de pompe, de signal et de l'idler respectivement, et sur la conservation de l'impulsion:  $2\beta_0 = \beta_1 + \beta_2$ , où  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  sont les constantes de propagation à  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  et  $\omega_2$ . Une amplification à large bande devrait pouvoir être réalisée si la condition d'accord de phase est satisfaite sur un large domaine spectral. Autrement

dit, la pente de la courbe  $\beta = \beta(\omega)$  doit être constante, ce qui s'exprime par la relation:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) = 0 \tag{5}$$



**Figure 6** Dispersion chromatique d'une fibre de Bragg  
 Couche centrale de  $15 \mu\text{m}$ , couches intermédiaires de  $1,69 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_1 = 0,005$ ,  $\Delta n_2 = 0,01$ , indice effectif  $1,4518$ , nombre total de couches 21, nombre azimutal  $m = 0$ .



**Figure 7** Amplification à large bande  
 La condition de conservation d'énergie et d'impulsion sur large bande spectrale pour le processus de «Four Wave Mixing» (mélange à quatre photons).  
 a Courbe correspondant au profil de la figure 4a      b Courbe correspondant au profil de la figure 2a

En utilisant (2c) la condition (5) s'exprime:

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right) = - \frac{\lambda^2}{2nc^2} \frac{d}{d\lambda} \left[ n_e - \lambda \frac{dn_e}{d\lambda} \right] \tag{6}$$

A un facteur multiplicatif près, cette condition est la même que celle assurant une compensation de la dispersion. Elle est illustrée par la figure 7a pour la fibre en W optimisée en compensation de dispersion, dont le profil est donné à la figure 4b, et par la figure 7b concernant la fibre à profil d'indice parabolique (fig. 2a) (l'ordonnée des fig. 7a et 7b est en  $\text{ps} \cdot \text{s}/\text{m}$ ).

Il est par conséquent indiqué de s'orienter vers des fibres compensées en dispersion pour l'effet d'amplification à quatre photons puisqu'elles permettent de s'approcher de la condition d'accord de phase en mélange à quatre photons est très exigeante et qu'une vérification expérimentale devrait plutôt viser un domaine spectral restreint et non toute la fenêtre de longueur d'onde  $1,3 \dots 1,6 \mu\text{m}$ . Comme dans le cas de la fibre monomode à dispersion chromatique compensée, un choix judicieux d'un profil d'indice doit permettre d'assurer la condition d'accord de phase sur un domaine de longueur d'onde prescrit.

## 7. Représentation du champ proche

La distribution du champ modal sur une section transverse du cœur est importante à plus d'un titre: elle permet de calculer le diamètre de spot, duquel dépendent les propriétés essentielles de propagation dans une fibre à profil d'indice quelconque [14]; par ailleurs, la mesure de la distribution transverse du champ permet la reconstitution du profil d'indice [15] et, par conséquent, le calcul de la longueur d'onde de coupure du mode supérieur LP11 (super-

position des modes propres TE01, TM01 et HE21) en résolvant l'équation de dispersion pour le ou les modes concernés à la coupure (i.e. lorsque l'indice effectif tend vers l'indice de la gaine) en utilisant le profil d'indice mesuré [16]; la même mesure, effectuée à différentes longueurs d'onde, donne également accès à la dispersion modale [17].

La figure 8a représente le champ électrique transverse du mode fondamental HE11 dans une fibre à saut d'indice bi-modale: le champ électrique transverse des modes TE01, TM01 et HE21. Il est représenté pour

la même fibre dans les figures 8b, 8c et 8d respectivement. Les figures 8e et 8f représentent le mode polarisé linéairement, LP11 obtenu par superposition des modes propres (8e: TE01 + HE21, 8f: TM01 + HE21). Le mode LP11 présente actuellement peu d'intérêt en télécommunications en dehors de sa longueur d'onde de coupure, mais il devrait permettre d'intéressantes applications de multiplexage modal à l'usage des capteurs à fibres optiques.

## 8. Conclusion

Une méthode de calcul des caractéristiques des fibres monomodes (dispersion du guide ou dispersion totale, longueur d'onde de coupure, carte du champ proche, diamètre du mode) a été établie. Cette méthode est basée sur la solution d'équation d'onde vectorielle et ne nécessite comme données que le profil d'indice circulairement symétrique et les coefficients de Sellmeier.

### Bibliographie

- [1] C.G. Atkins a.o.: Applications of Brillouin amplification in coherent optical transmission. *Electronics Letters* 22(1986)10, p. 556...558.
- [2] J.P. Pocholle a.o.: Raman and four photon mixing amplification in single mode fibers. *Optical Engineering* 24(1985)4, p. 600...608.
- [3] O. Parriaux and F.E. Gardiol: Propagation of guided electromagnetic waves in symmetrical circularly cylindrical structures. *Wave Electronics* 1(1974/76), p. 363...380.
- [4] J.-D. Decotignie et F.E. Gardiol: Méthodes d'analyse de la propagation dans les fibres optiques. *Bull. ASE/UCS* 70(1979)15, p. 830...837.
- [5] F. Bernoux and O. Parriaux: Bandwidth calculation in actual multimode fibers. *Journal of Optical Communications* 5(1984)2, p. 56...62.
- [6] L.B. Jeunhomme: *Single-mode fiber optics*. New York/Basel, Marcel Dekker Inc., 1983.
- [7] J.W. Fleming: Dispersion in GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses. *Applied Optics* 23(1984)24, p. 4486...4493.
- [8] K. Okamoto a.o.: Dispersion minimisation in single mode fibres over a wide spectral range. *Electronics Letters* 15(1979)22, p. 729...731.
- [9] M. Monerie: Propagation in doubly clad single-mode fibers. *IEEE Trans. MTT* 30(1982)4, p. 381...388.
- [10] V.A. Bhagavatula, J.E. Ritter and R.A. Modavis: Bend-optimized dispersion-shifted single-mode designs. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* 3(1985)5, p. 954...957.
- [11] P. Yeh, A. Yariv and E. Marom: Theory of Bragg fiber. *Journal of the Optical Society of America* 68(1978)9, p. 1196...1201.
- [12] C. Lin a.o.: Phase matching in the minimum-chromatic-dispersion region of single-mode fibers for stimulated four-photon mixing. *Optics Letters* 6(1981)10, p. 493...495.
- [13] R.H. Stolen and W.N. Leibolt: Optical fiber modes using stimulated four-photon mixing. *Applied Optics* 15(1976)1, p. 239...243.
- [14] K. Petermann: Constraints for fundamental-mode spot size for broadband dispersion-compensated single-mode fibers. *Electronics Letters* 19(1983)18, p. 712...714.
- [15] G. Goppa, P. Di Vita and U. Rossi: Characterization of single-mode fibres by near-field measurement. *Electronics Letters* 19(1983)8, p. 293...294.
- [16] M. Ohashi a.o.: Simple approximations for chromatic dispersion in single-mode fibers with various index profiles. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* 3(1985)1, p. 110...115.
- [17] G. Goppa a.o.: A new technique for chromatic dispersion measurement in monomode fibres. *ECOC-83 - 9th European Conference on Optical Communications, Geneva, 23...26 October 1983*; p. 189...192.

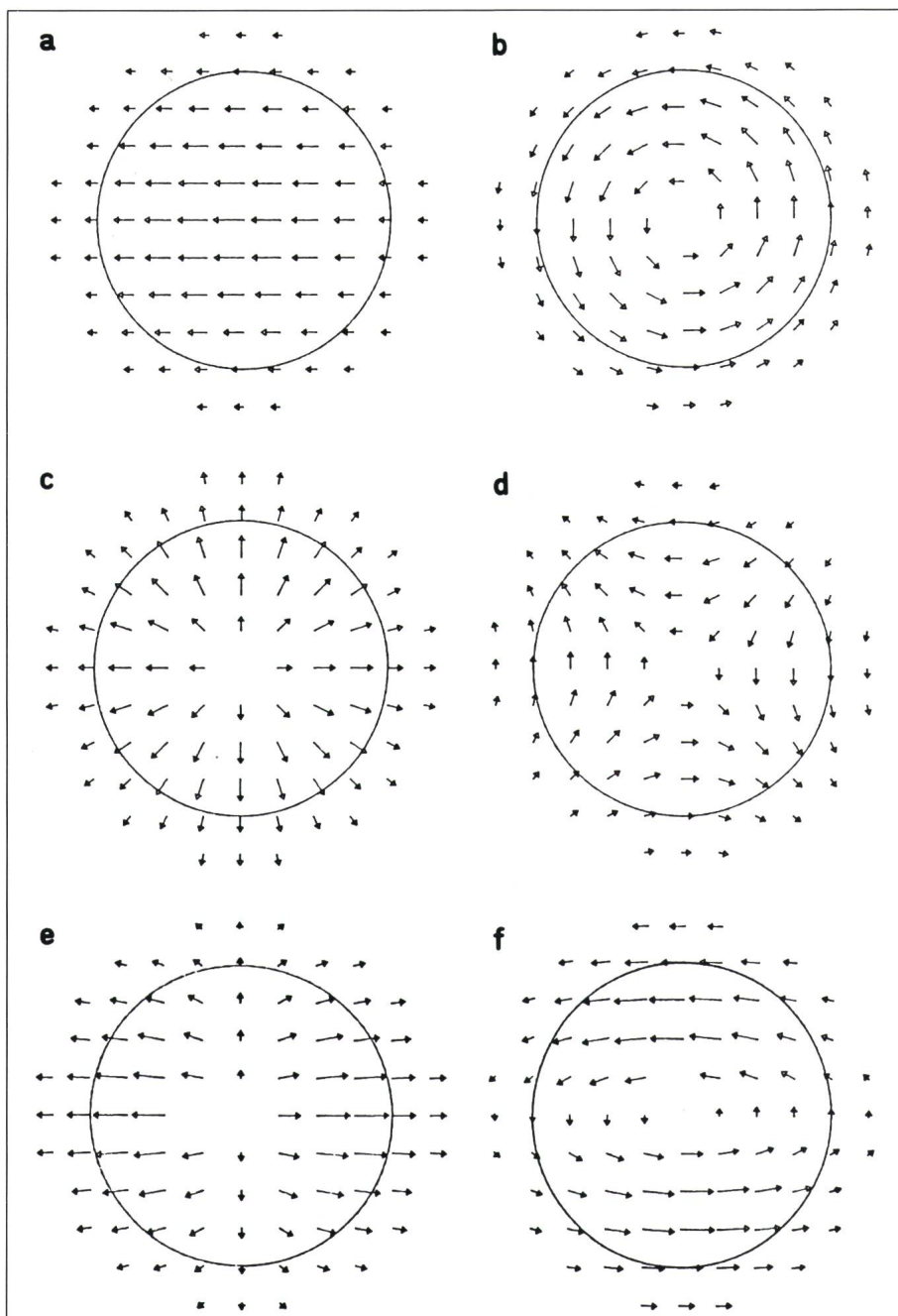


Figure 8 Carte de la distribution du champ à la section transverse d'une fibre

a HE11 b TE01 c TM01 d HE21 e LP11 pair f LP11 impair

# Das Sicherheitskabel von Studer

# BETAflam<sup>®</sup>

**BETAflam – die sichere und wirtschaftliche Installation  
mit Funktionserhalt im Brandfall**

- flammwidrig
- halogenfrei
- geringste Rauchgasentwicklung
- nicht toxisch

BETAflam – Starkstrom- und Steuerkabel von  
0,75 mm<sup>2</sup> bis 240 mm<sup>2</sup> in drei Sicherheitsstufen.

Verlangen Sie unsere Dokumentation.



*Vorbeugen ist*

*immer  
besser!*



Studer  
Draht- und  
Kabelwerk AG  
4658 Däniken SO

Tel. 062 · 65 82 82  
Telex 981 715 sdk ch  
Telefax 062 · 65 83 83



# ALUCOBOND. Kaum zu glauben, was sich aus dieser farbenfrohen Platte alles machen lässt.

ALUCOBOND: Das sind Verbundplatten mit Deck-  
schichten aus Aluminium. Und Polyäthylen dazwischen.  
Das Ganze ist auf jeden Fall höchst stabil, völlig  
plan, absolut spannungsfrei und leicht in Form zu  
bringen. Durch Biegen, Abkanten, Sägen, Stanzen.  
In vielen Farben ab Lager ALLEGA.  
ALUCOBOND: unglaublich vielseitig anwendbar.

**Allega AG**  
Verkaufsgesellschaft der Schweizerischen Aluminium AG  
Buckhauserstrasse 5  
8048 Zürich  
Telefon 01/497 41 11  
Telefax 01/497 43 44  
Telex 822 339



**ALLEGA für Aluminium**  
☎ **01/497 41 11**



**Un système de surveillance  
mobile avec une installation  
minimale?**

**Oui!  
Avec des produits Feller!**

*L'œil électronique pour tous les cas.*



**Feller AG**  
CH-8810 Horgen  
Tél. 01 725 65 65

**Coupon**  
*Oui, je m'intéresse à votre  
documentation détaillée.*

Nom

Rue

NP, Lieu

Feller AG, 8810 Horgen