

Fibres microstructurées

un survol des principales propriétés linéaires

G. Renversez

Institut Fresnel (UMR CNRS 6133) & Université Paul Cézanne Aix-Marseille III
Marseille, France

gilles.renversez@fresnel.fr
www.fresnel.fr/perso/renversez

Réseau Optique et Photonique du CNRS, Giens, 10 octobre 2007



1

Introduction

- Tentative de définition
- Bref historique
- Les principales techniques de fabrication
- Ordres de grandeurs pour les pertes mesurées dans des fibres

2

Guidage dans une fibre conventionnelle

- Optique dans une fibre
- Modes et conditions de guidage

3

Différence entre une fibre à saut d'indice et une FM

- Pour une fibre à saut d'indice
- Pour une fibre microstructurée

4

Principales propriétés des FM à coeur solide et à inclusions de bas indice

- Les pertes de guidage du mode fondamental
- Rôle de l'indice de la matrice
- Comment définir le caractère monomode?
- Transition du second mode: du localisé à l'étendu
- Un diagramme de phase du 2nd mode
- Diagramme de phase généralisé et loi d'échelle
- Un diagramme de phase pour le mode fondamental
- Dispersion chromatique

5

Conclusion

Introduction

Tentative de définition

- Une **fibre microstructurée** est une fibre formée d'un ensemble d'inclusions de forme ou d'indice variés, disposé au sein d'une matrice et parcourant toute la longueur de la fibre.
- Ceux sont ces inclusions qui assure le confinement du champ électromagnétique.

On peut définir plusieurs types de fibres microstructurées comme nous le verrons par la suite. Elles disposent d'au moins 2 avantages:

- l'espace des paramètres géométriques est immense
- les contrastes d'indice possibles sont très variables: de moins de 1% à 200%

Introduction

Bref historique

- L'idée de construire une fibre microstructurée est apparue dans le début des années 1990.
- Le premier article décrivant la **réalisation d'une fibre microstructurée** date de **1996** (Université de Bath, RU, équipe de P.St. Russell et J.C. Knight)
- La première **fibre microstructurée à coeur creux** a été décrite en **1999**.
- La première fibre microstructurée de type Bragg a été décrite en 2000 (X-lim/université de Limoges).
- Le premier article décrivant la réalisation d'une fibre microstructurée en verre de chalcogénure date de 2000 (Université de Southampton)
- Le premier article décrivant la réalisation d'une fibre microstructurée guidante et régulière en verre de chalcogénure date de 2006 (LVC/Université de Rennes et PERFOS)

Introduction

Les principales techniques de fabrication

- Empilement et étirage "stack-and-draw" de capillaires et de cylindres (la plus répandue)
- Extrusion (pas pour la silice mais pour des verres de haut indice ou les polymères)
- Perçage (rare)
- Croissance sol/gel (pour des fibres de Bragg, structures concentriques)

Introduction

Quelques ordres de grandeurs pour les pertes mesurées dans des fibres en silice

- Pour les fibres conventionnelles (à saut d'indice):
 - ▶ \simeq 1970: fabrication de fibre monomode à $1.55 \mu\text{m}$ avec des pertes de 20 dB/km
 - ▶ 1979: niveau de pertes descendu à 0.2 dB/km à $1.55 \mu\text{m}$
- Pour les fibres microstructurées:
 - ▶ 2002: niveau de pertes descendu à 13 dB/km à $1.55 \mu\text{m}$ pour une fibre à coeur creux
 - ▶ 2004: niveau de pertes descendu à 1.1 dB/km à $1.55 \mu\text{m}$ pour une fibre à coeur creux

Guidage dans une fibre conventionnelle

optique dans une fibre

- La fibre est une excellente approximation d'une structure invariante par translation: $\lambda \sim 1\mu\text{m}$ et $L \sim 1\text{m}$
- On cherche des solutions pour les champs électromagnétiques, les modes, sous la forme: $\exp(-i(\omega t - k_z \cdot z))$
- On a conservation de la composante tangentielle du vecteur d'onde \mathbf{k} au travers de l'interface coeur/matrice

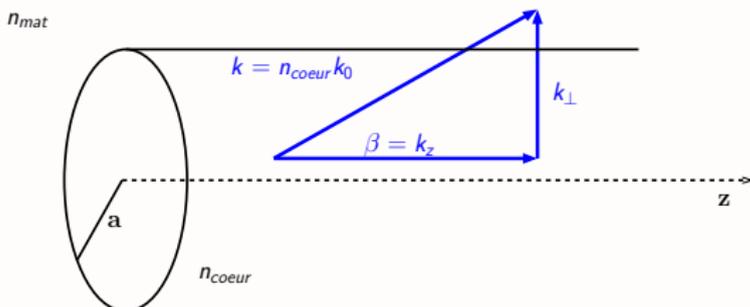


Figure: Fibre à saut d'indice et décomposition du vecteur d'onde en partie transverse et longitudinale. On a $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{vide}}}$.

La constante de propagation β est le paramètre clef des modes.

Guidage dans une fibre conventionnelle

Modes et conditions de guidage

- On va définir **un mode** comme étant la solution (dans le cadre rigoureux d'une théorie électromagnétique):
 - ▶ de l'équation de propagation dans la fibre (issue des équations de Maxwell)
 - ▶ tenant compte des relations de passages des champs aux différentes interfaces de la structure
 - ▶ tenant compte du comportement à l'infini des champs électromagnétiques

- Conditions pour l'obtention de **modes guidés**
 - ▶ Dans un milieu homogène d'indice n_{milieu} , on a $n_{eff} = \beta/k_0 < n_{milieu}$
 - ▶ pour $\beta/k_0 > n_{milieu}$ on obtient des ondes évanescentes: c-a-d des ondes décroissant exponentiellement avec la distance parcourue
 - ▶ pour obtenir un mode guidé dans le coeur de la fibre, il faut que ce mode ne puisse pas être guidé dans par la structure entourant le coeur c-a-d la matrice, ce qui correspond à: $\beta/k_0 > n_{mat}$

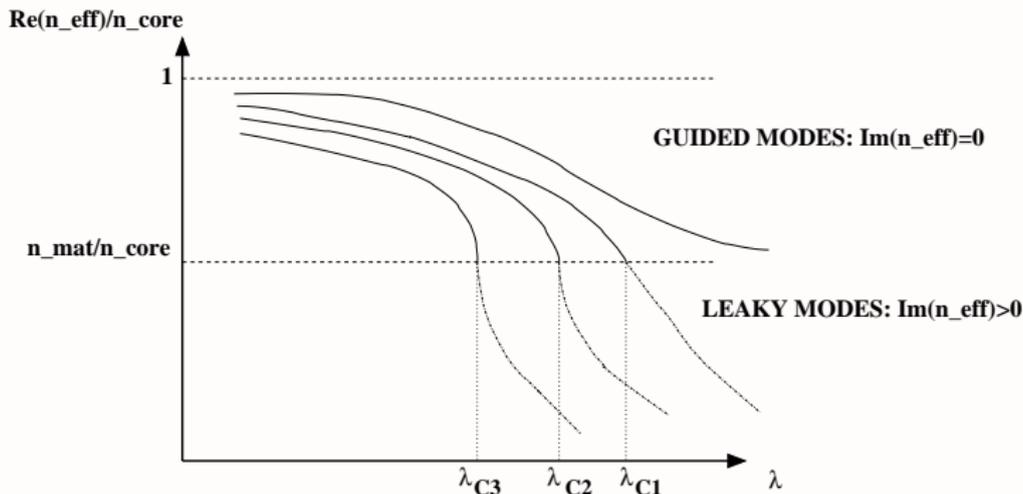
Pour une fibre à saut d'indice on a l'encadrement:

$$n_{mat} < \beta/k_0 = n_{eff} < n_{coeur}$$

Différence entre un fibre à saut d'indice et une FM

Pour une fibre à saut d'indice

Si on néglige les pertes matériaux:



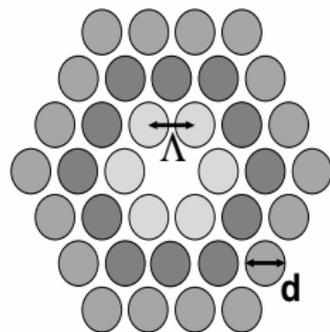
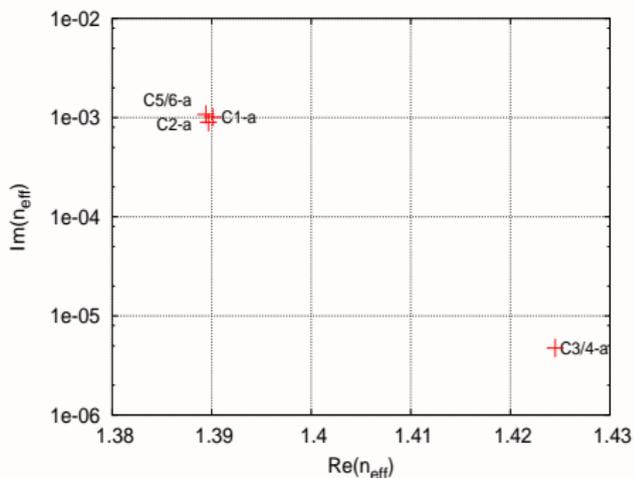
- Les modes existent après la longueur d'onde decoupure λ_C : ils deviennent des **modes à pertes** (leaky modes)
- Les pertes de guidage sont directement liées à $\Im m(n_{\text{eff}}) = \Im m(\beta/k_0)$

Différence entre une fibre à saut d'indice et une FM

Pour une fibre microstructurée

- Les modes ne sont pas parfaitement guidés, ils sont **à pertes**:

$$\Im m(n_{eff}) > 0$$

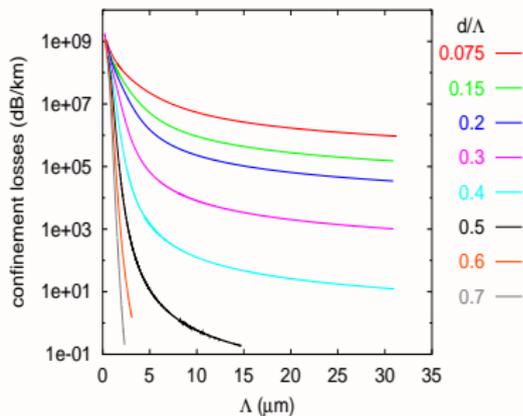
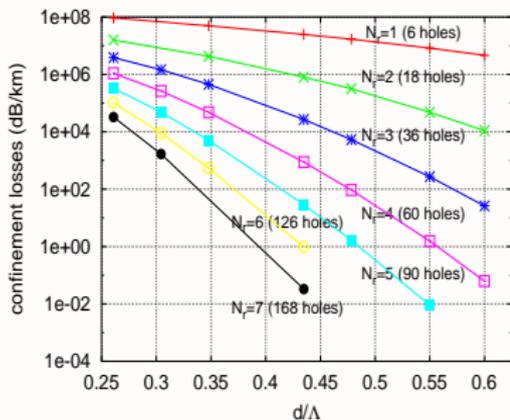


Profil d'une FM à coeur plein

Figure: Indices effectifs complexes des 'premiers' modes d'une FM à inclusions de bas indice et à coeur plein (noter l'échelle log sur l'axe y).

Principales propriétés des FM à coeur solide et à inclusions de bas indice

Les pertes de guidage



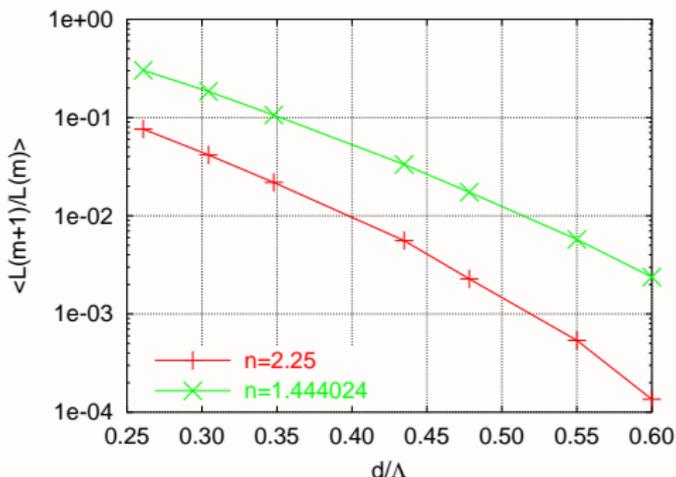
Pertes en dB/km pour le mode fondamental en fonction de d/Λ et du nombre de couches N_r . $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, and $n_{\text{mat}} = 1.444$.

- Les pertes décroissent exponentiellement quand N_r augmente
- plus d/Λ est grand, plus les pertes sont réduites
- Les pertes diminuent avec Λ pour une valeur fixée d/Λ .

Principales propriétés des FM à coeur solide et à inclusions de bas indice

Rôle de l'indice de la matrice

On considère comme précédemment une FM avec des trous d'air dans une matrice homogène.



Rapport $L(m+1)/L(m)$ des pertes de guidage d'une FM avec $m+1$ couches de trous et d'une FM avec $m+1$ couches de trous, en fonction de d/Λ pour deux valeurs de l'indice de la matrice

Principales propriétés des FM à coeur solide

Comment définir le caractère monomode?

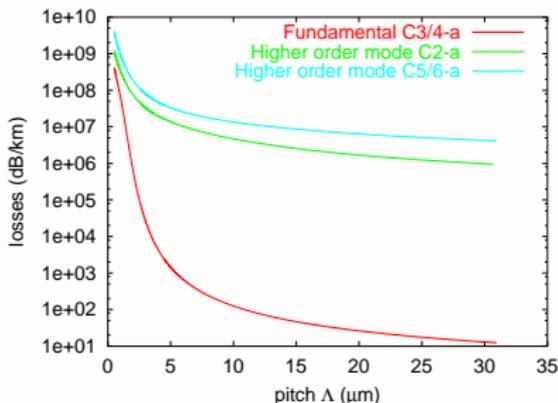
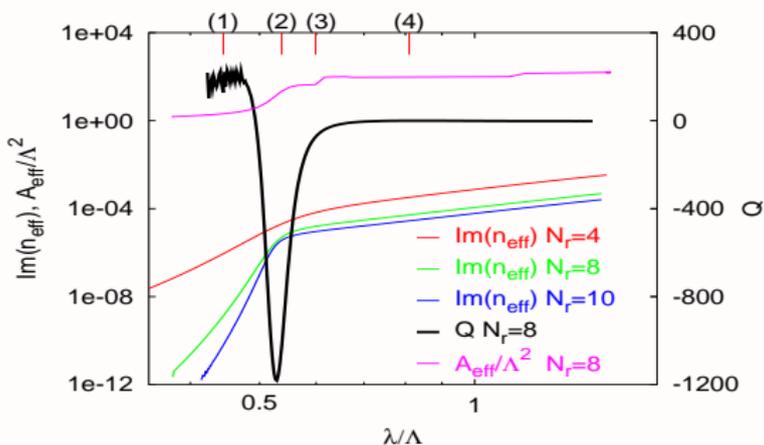


Figure: Pertes de "3" premiers modes en fonction de Λ pour $d/\Lambda = 0.4$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $N_r = 3$.

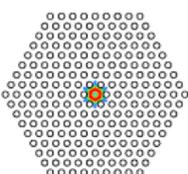
- Si on considère seulement des pertes relatives: **pas de différence qualitative** entre le mode fondamental et le second mode
- Si on introduit un seuil absolu: le caractère monomode dépend de la **longueur de la fibre**

Principales propriétés des FM à cœur solide

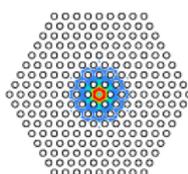
Transition du second mode: du localisé à l'étendu



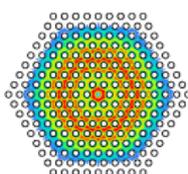
Transition du 2nd mode, $d/\Lambda = 0.55$



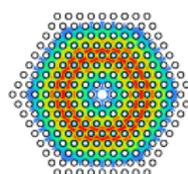
(1)



(2)



(3)



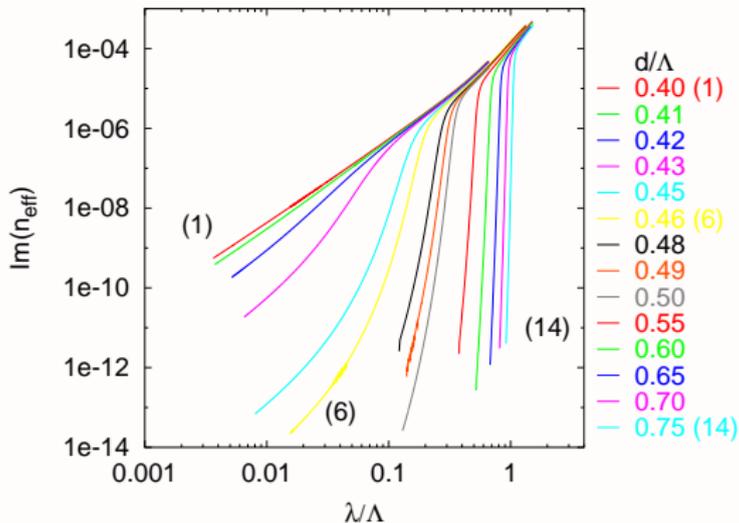
(4)

Module de la composante longitudinale du vecteur de Poynting vector pour le 2nd mode



Principales propriétés des FM à coeur solide

Un diagramme de phase du 2nd mode: vers la définition des régimes opératoires des FM



$\Im(n_{\text{eff}})$ en fonction de λ/Λ for $N_r = 8$ and $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

Principales propriétés des FM à coeur solide

Un diagramme de phase du 2nd mode: vers la définition des régimes opératoires des FM

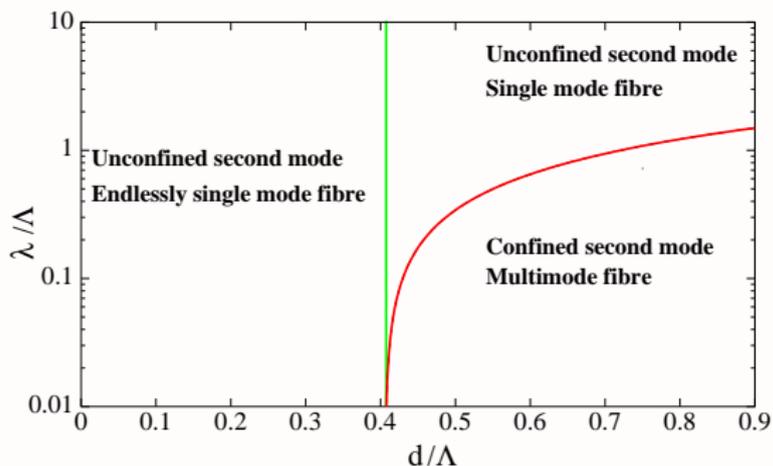


Diagramme de phase défini par la position du minimum de Q

Equation de la position de la transition du 2nd mode transition (courbe rouge) dans le plan $(d/\Lambda, \lambda/\Lambda)$: $\frac{\lambda}{\Lambda} \simeq 2.8\left(\frac{d}{\Lambda} - (0.41)\right)^{0.9}$

- Confirmations expérimentales par Folkenberg *et al.* (Opt. Lett., 28(20), 2003) et par Labonté *et al.* (Opt. Lett. 31(12), 2006).

Principales propriétés des FM à coeur solide

Diagramme de phase généralisé et loi d'échelle

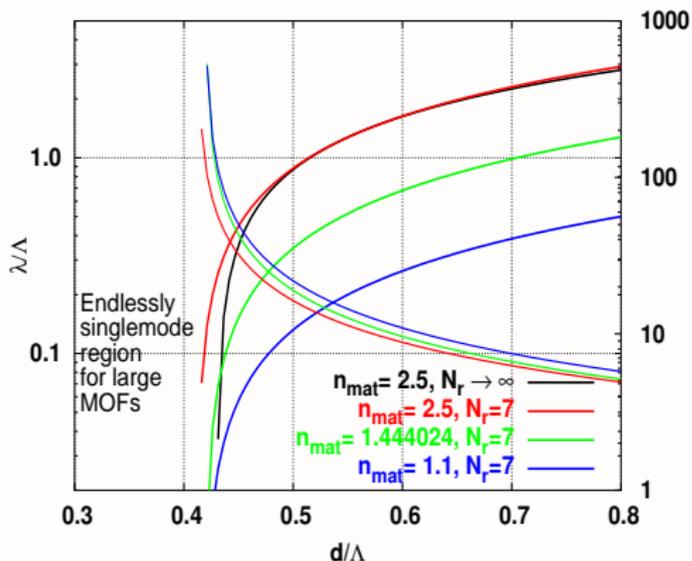


Diagramme de phase pour le 2nd mode pour trois valeurs de n_{mat} for $N_r = 7$ (échelle de gauche).

Diagramme de phase généralisé (échelle de droite): exprimé avec l'invariant ν .

Avec l'approximation scalaire on obtient:

$$\nu = 2\pi \frac{\Lambda}{\lambda} (n_{\text{mat}}^2 - n_{\text{inc}}^2)^{1/2}$$

>

est un invariant.

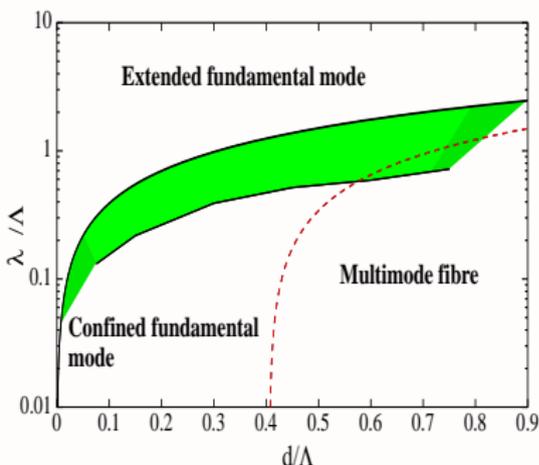
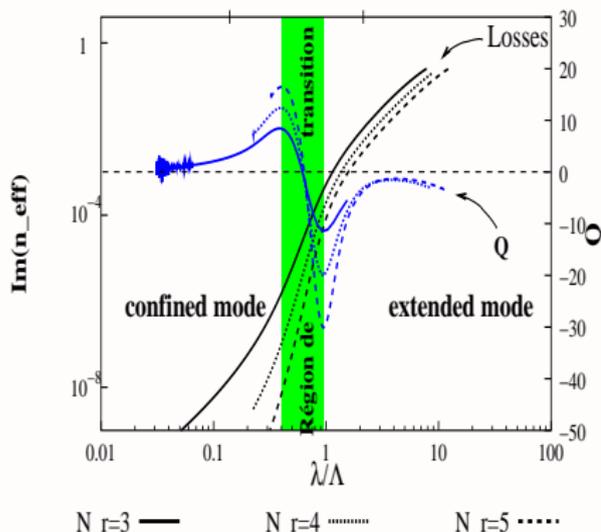
Finalement nous obtenons une **loi d'échelle**:

$$(\lambda/\Lambda)'_{\text{S.M.}} = (\lambda/\Lambda)_{\text{S.M.}} \left(\frac{n_{\text{mat}}^{n/2} - n_{\text{inc}}^{n/2}}{n_{\text{mat}}^2 - n_{\text{inc}}^2} \right)^{1/2}$$

L'extension du domaine "infiniment monomode" est préservée pour les verres de haut indice pour les grandes valeurs de N_r uniquement.

Principales propriétés des FM à coeur solide

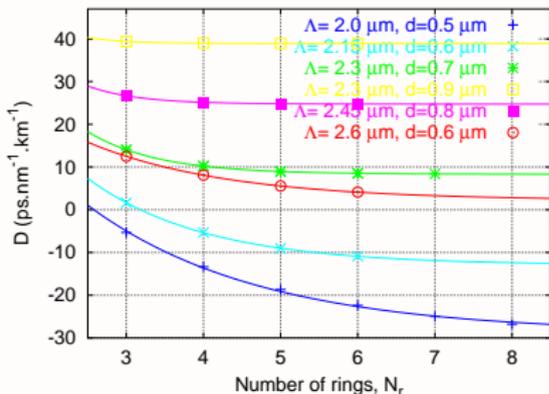
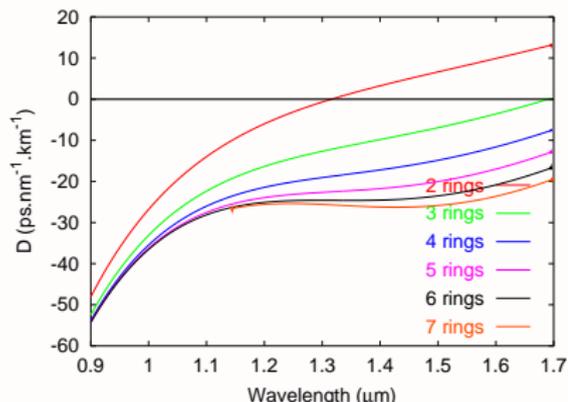
Un diagramme de phase pour le mode fondamental



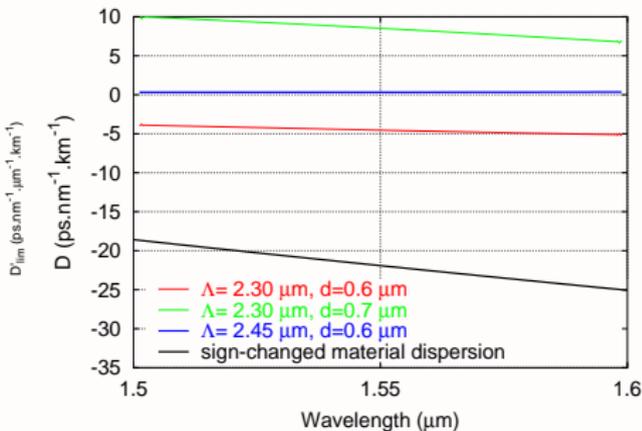
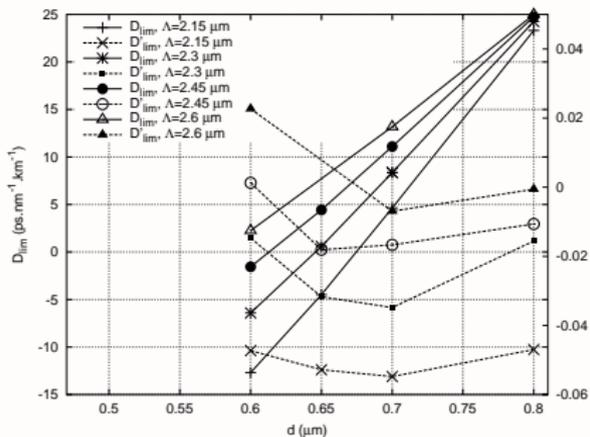
- Dans la **région de transition**, les FM disposent de leur remarquables propriétés.
- En dehors, on trouve un comportement qui peut être modélisé par des fibres conventionnelles à profil en W (modèles asymptotiques).
- Quand le mode fondamental est confiné, ses propriétés convergent avec N_r .

Principales propriétés des FM à coeur solide

Dispersion chromatique



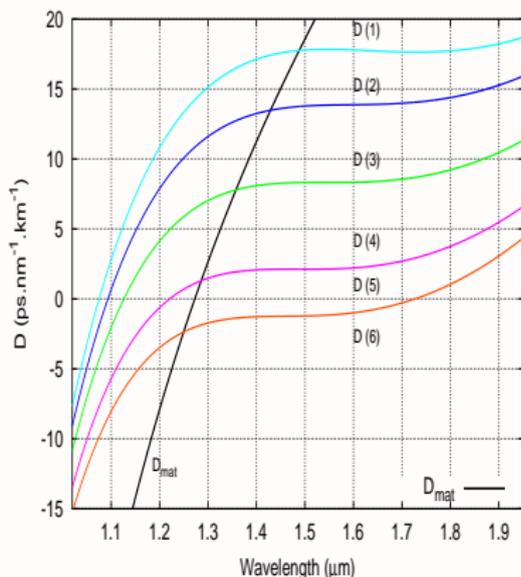
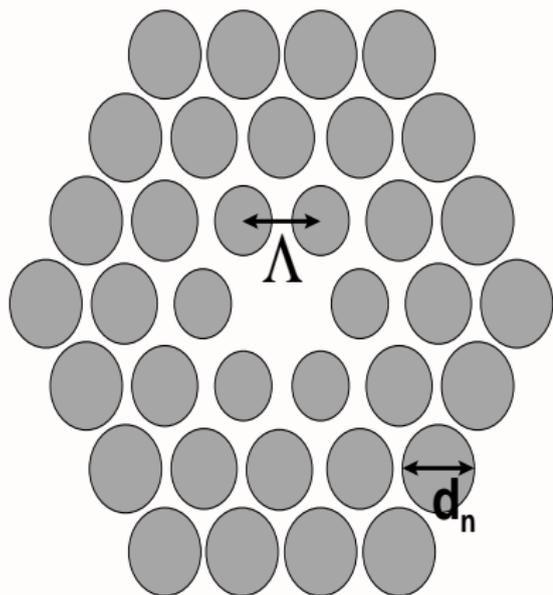
- La dispersion chromatique peut dépendre fortement de N_r , le nombre de couches d'inclusions.



- Un FM régulière peut fournir la dispersion chromatique plate requise mais elle nécessite 18 couches de trous pour obtenir des pertes sous les 1 dB/km!

Principales propriétés des FM à coeur solide

Un nouveau profil de FM pour le contrôle de la dispersion chromatique



- Avec ce profil 7 couches d'inclusions de 3 diamètres différents suffisent pour obtenir une dispersion chromatique ultra-plate avec des pertes sous les 0.2 dB/km

Conclusion

- Le très **grand espace des paramètres optogéométriques** disponibles permet un très grand **contrôle des propriétés linéaires** des FM.
- Ces propriétés permettent une utilisation plus poussée et mieux maîtrisée des propriétés nonlinéaires
- Il y a d'autres types de FM: fibres à bandes interdites photoniques à cour creux ou à coeur plein
- Les FM ne viennent pas remplacer les fibres conventionnelles mais les complètent.

Des **structures plus complexes** peuvent être obtenues à partir de FM:

- tapers: pour renforcer ces effets nonlinéaires, pour utiliser l'évanescence des champs
- fibres métallisées

Quelques références personnelles (à compléter...)



F. Zolla, G. Renversez, A. Nicolet, B. Kuhlmeiy, S. Guenneau, and D. Felbacq.

Foundations of Photonic Crystal Fibres.

Imperial College Press, London, 2005.



G. Renversez, P. Boyer, and A. Sagrini.

Antiresonant reflecting optical waveguide microstructured fibers revisited: a new analysis based on leaky mode coupling.

Optics Express, 14(12), 2006.



L. Brilland, F. Smektala, G. Renversez, T. Chartier, J. Troles, T. Nguyen, N. Traynor, and A. Monteville.

Fabrication of complex structures of holey fibers in chalcogenide glass.

Optics Express, 14(3):1280–1285, 2006.



L. Labonté, D. Pagnoux, P. Roy, F. Bahloul, M. Zghal, G. Mélin, E. Burov, and G. Renversez.

Accurate measurement of the cutoff wavelength in a microstructured optical fiber by means of an azimuthal filtering technique.

Optics Letters, 2006.



G. Renversez, F. Bordas, and B. T. Kuhlmeiy.

Second mode transition in microstructured optical fibers: determination of the critical geometrical parameter and study of the matrix refractive index and effects of cladding size.

Optics Letters, 30(11):1264–1266, 2005.



P. Boyer, G. Renversez, E. Popov, and M. Nevière.

A new differential method applied to the study of arbitrary cross section microstructured optical fibers.

Optical and Quantum Electronics, 38:217–230, 2006.



G. Renversez, B. Kuhlmeiy, and R. McPhedran.

Dispersion management with microstructured optical fibers: Ultra-flattened chromatic dispersion with low losses.

Les principales applications

- transport de faisceaux de puissance
- contrôle de la dispersion chromatique
- génération de supercontinuum
- support pour des lasers fibrés
- capteurs
- support pour l'optique nonlinéaire dans les gaz (creux creux)
- guidage de particules (creux creux)

Comparaison des dispersions chromatiques du guide en fonction de l'indice de la matrice

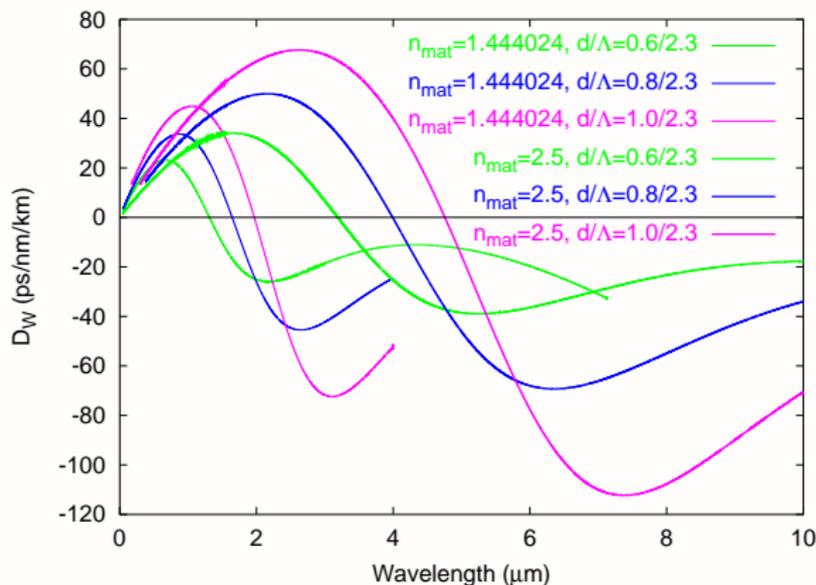


Figure: indices: $n_{\text{mat}} = 1.444024$ (traits fins) et $n_{\text{mat}} = 2.5$ (traits épais) pour plusieurs valeurs du rapport d/Λ pour des structures avec $N_r = 3$.

Ajustement du zéro de dispersion chromatique totale

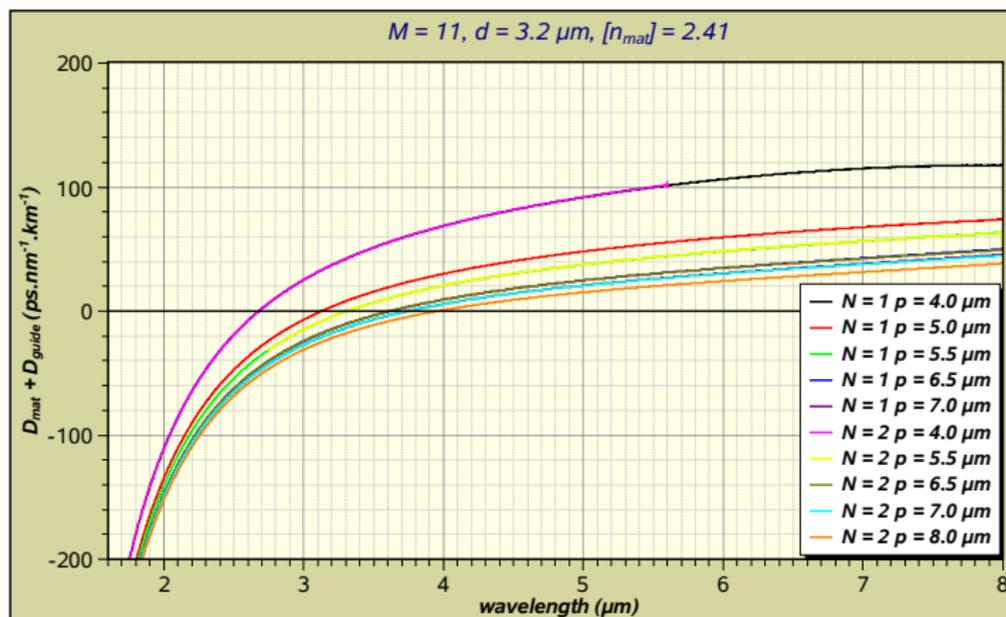


Figure: N est le nombre de couches de trous et p est le pas du réseau Λ