Elaboration d'une méthode différentielle pour l'étude des fibres optiques microstructurées

Philippe BOYER

Institut Fresnel

06 octobre 2006

Table des matières

1. Introduction
   - La méthode différentielle
   - Les fibres optiques microstructurées
2. La Méthode Différentielle en coordonnées cylindriques
   - Principe de la méthode différentielle
   - La méthode de la Factorisation de Fourier rapide
   - L'algorithme de propagation de la matrice S
   - Le problème de recherche de modes
3. Application numérique pour l'étude des FOMs
   - Validation
   - Etude de FOMs de type ARROW
4. Conclusion

Table des matières

1. Introduction
   - La méthode différentielle
   - Les fibres optiques microstructurées
2. La Méthode Différentielle en coordonnées cylindriques
   - Principe de la méthode différentielle
   - La méthode de la Factorisation de Fourier rapide
   - L'algorithme de propagation de la matrice S
   - Le problème de recherche de modes
3. Application numérique pour l'étude des FOMs
   - Validation
   - Etude de FOMs de type ARROW
4. Conclusion

Deux objectifs

Premier objectif

Développer la méthode différentielle en coordonnées cylindriques

☞ **Première année de thèse :**
Etude de la diffraction par des objets cylindriques

Deux objectifs

Premier objectif

Développer la méthode différentielle en coordonnées cylindriques

- **Première année de thèse :**
  Etude de la diffraction par des objets cylindriques

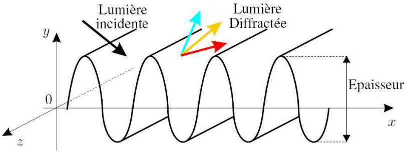
Deuxième objectif

Etudier la propagation des modes dans les fibres optiques

- **Deuxième et troisième années de thèse :**
  Application aux **fibres optiques microstructurées**

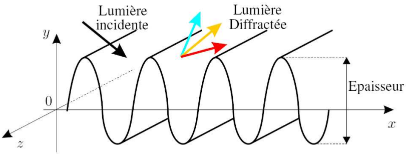
La Méthode Différentielle

- **Années 60 :** Développement de la Méthode Différentielle
  - *Objectif :* Modéliser rigoureusement la diffraction de la lumière par des objets périodiques
  - *Application :* réseaux (en coordonnées cartésiennes)



La Méthode Différentielle

- **Années 60 :** Développement de la Méthode Différentielle
  - ☞ *Objectif :* Modéliser rigoureusement la diffraction de la lumière par des objets périodiques
  - ☞ *Application :* réseaux (en coordonnées cartésiennes)



Milieux des années 70 :

Méthode Différentielle en coordonnées cylindriques (polarisations TE et TM)
Appellations :

- ☞ Méthode Différentielle "Classique"

- **Milieu des années 70 :** Premiers résultats numériques

MAIS des problèmes numériques subsistent dans certains cas

1. **Instabilités numériques** pour des réseaux profonds
2. **Convergence lente** des résultats en polarisation TM (réseaux métalliques)

- **Milieu des années 70 :** Premiers résultats numériques

MAIS des problèmes numériques subsistent dans certains cas

1. **Instabilités numériques** pour des réseaux profonds
2. **Convergence lente** des résultats en polarisation TM (réseaux métalliques)

- **Fin des années 90 :** Deux types de solutions indépendantes et complémentaires aux problèmes numériques

Algorithme de propagation de la matrice S

Assure la stabilité numérique pour des réseaux profonds

Méthode de la Factorisation de Fourier rapide

Assure la convergence des résultats quelle que soit la polarisation

- **Milieu des années 70 :** Premiers résultats numériques

MAIS des problèmes numériques subsistent dans certains cas

1. **Instabilités numériques** pour des réseaux profonds
2. **Convergence lente** des résultats en polarisation TM (réseaux métalliques)

- **Fin des années 90 :** Deux types de solutions indépendantes et complémentaires aux problèmes numériques

Algorithme de propagation de la matrice S

Assure la stabilité numérique pour des réseaux profonds

Méthode de la Factorisation de Fourier rapide

Assure la convergence des résultats quelle que soit la polarisation

Appellations :

- ☞ *Algorithme de propagation de la matrice S → Algorithme S*
- ☞ *Méthode de la Factorisation de Fourier rapide → Méthode FFF ("Fast Fourier Factorization")*

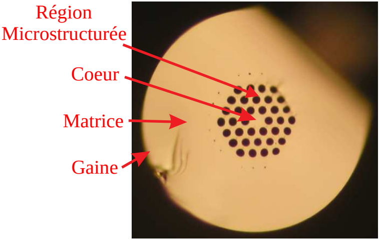
- **Depuis 2000 :**
  NOUVELLE VERSION de la Méthode Différentielle
  $\longrightarrow$ Algorithme S + Méthode FFF

Développements dans divers systèmes de coordonnées

- **Coordonnées cartésiennes :**
  Diffraction par des réseaux et cristaux photoniques
- **Coordonnées cylindriques :**
  Diffraction par des cylindres. Propagation des modes dans les FOMs
- **Coordonnées sphériques :**
  Diffraction par des objets tridimensionnels

Les fibres optiques microstructurées (FOMs)

FOM fabriquée en laboratoire



FOM en verre chalcogénure fabriquée à l'Université de Rennes

Section droite de la fibre

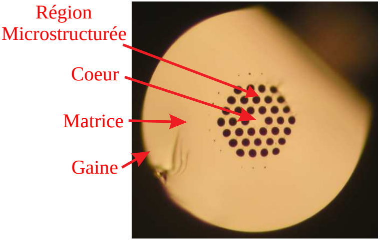
- Gaine
- Matrice
- Région microstructurée
- Coeur

Axe

de longueur finie

Les fibres optiques microstructurées (FOMs)

FOM fabriquée en laboratoire



FOM en verre chalcogénure fabriquée à l'Université de Rennes

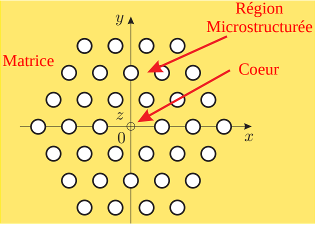
Section droite de la fibre

- Gaine
- Matrice
- Région microstructurée
- Coeur

Axe

de longueur finie

FOM modélisée



Section droite de la fibre

- Abscence de gaine
- Matrice
- Région microstructurée
- Coeur

Axe

de longueur infinie

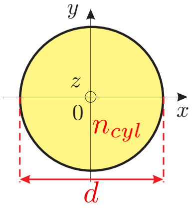
Intérêt des FOMs

- Contrôler le caractère monomode de la fibre
- Contrôler l'aire effective des modes (confinement)
- Contrôler la dispersion modale tout en limitant les pertes des modes

Intérêt des FOMs

- Contrôler le caractère monomode de la fibre
- Contrôler l'aire effective des modes (confinement)
- Contrôler la dispersion modale tout en limitant les pertes des modes

Fibre optique conventionnelle à saut d'indice



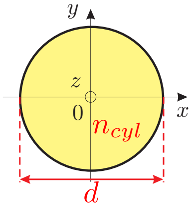
Paramètres opto-géométriques

- Indice de réfraction du cylindre
- Diamètre du cylindre

Intérêt des FOMs

- Contrôler le caractère monomode de la fibre
- Contrôler l'aire effective des modes (confinement)
- Contrôler la dispersion modale tout en limitant les pertes des modes

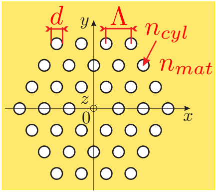
Fibre optique conventionnelle à saut d'indice



Paramètres opto-géométriques

- Indice de réfraction du cylindre
- Diamètre du cylindre

Fibre optique microstructurée



Paramètres opto-géométriques

- Indices de réfraction des inclusions
- Diamètre des inclusions
- Distance entre les inclusions ("pitch")
- Nombre de couches d'inclusions

Table des matières

1. Introduction
    - La méthode différentielle
    - Les fibres optiques microstructurées
2. La Méthode Différentielle en coordonnées cylindriques
    - Principe de la méthode différentielle
    - La méthode de la Factorisation de Fourier rapide
    - L'algorithme de propagation de la matrice S
    - Le problème de recherche de modes
3. Application numérique pour l'étude des FOMs
    - Validation
    - Etude de FOMs de type ARROW
4. Conclusion

Problématique : changement de système de coordonnées

coordonnées cartésiennes $(x, y, z) \longrightarrow$ coordonnées cylindriques (r, θ, z)

Problématique : changement de système de coordonnées

coordonnées cartésiennes $(x, y, z) \longrightarrow$ coordonnées cylindriques (r, θ, z)

Principe général de la méthode différentielle

☞ Réduire rigoureusement (sans approximation théorique) les équations de l'électromagnétisme

- **Maxwell-Faraday** : $r\vec{o}t\vec{E}\,(r, \theta, z, t) + \frac{\partial \vec{B}(r,\theta,z,t)}{\partial t} = \vec{0}$
- **Maxwell-Ampère** : $r\vec{o}t\vec{H}\,(r, \theta, z, t) - \frac{\partial \vec{D}(r,\theta,z,t)}{\partial t} = \vec{0}$
- **Relations constitutives linéaires des milieux** :
  $\vec{D}\,(r, \theta, z, t) = \bar{\bar{\epsilon}}\vec{E}\,(r, \theta, z, t)$ et $\vec{B}\,(r, \theta, z, t) = \bar{\bar{\mu}}\vec{H}\,(r, \theta, z, t)$

Problématique : changement de système de coordonnées

coordonnées cartésiennes $(x, y, z) \rightarrow$ coordonnées cylindriques (r, θ, z)

Principe général de la méthode différentielle

☞ Réduire rigoureusement (sans approximation théorique) les équations de l'électromagnétisme

- **Maxwell-Faraday** : $\vec{rot}\vec{E}\,(r,\theta,z,t) + \frac{\partial \vec{B}(r,\theta,z,t)}{\partial t} = \vec{0}$
- **Maxwell-Ampère** : $\vec{rot}\vec{H}\,(r,\theta,z,t) - \frac{\partial \vec{D}(r,\theta,z,t)}{\partial t} = \vec{0}$
- **Relations constitutives linéaires des milieux** :
  $\vec{D}\,(r,\theta,z,t) = \bar{\bar{\epsilon}}\vec{E}\,(r,\theta,z,t)$ et $\vec{B}\,(r,\theta,z,t) = \bar{\bar{\mu}}\vec{H}\,(r,\theta,z,t)$

☞ à un système différentiel linéaire du premier ordre selon la variable r :

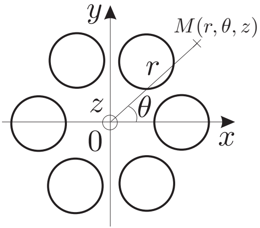
$$\frac{dF(r)}{dr} = \mathcal{M}(r)F(r)$$

où $F(r)$ dépendant des composantes du champ électromagnétique

Pourquoi ? Système différentiel intégrable numériquement

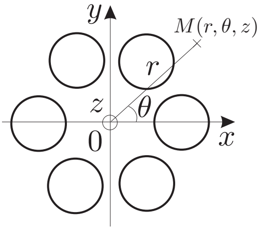
Expression du champ électromagnétique

- **Régime harmonique** :
  Dépendance en $e^{-i\omega t}$ avec ω : pulsation
- **Invariance opto-géométrique selon l'axe** z :
  Dépendance en $e^{i\beta z}$ avec β : constante ($\in \mathbb{C}$)
- **Périodicité opto-géométrique selon** θ (périodicité intrinsèque au système de coordonnées, de période 2π) :
  Développement en série de Fourier



Expression du champ électromagnétique

- **Régime harmonique** :
  Dépendance en $e^{-i\omega t}$ avec ω : pulsation
- **Invariance opto-géométrique selon l'axe z** :
  Dépendance en $e^{i\beta z}$ avec β : constante ($\in \mathbb{C}$)
- **Périodicité opto-géométrique selon θ** (périodicité intrinsèque au système de coordonnées, de période 2π) :
  Développement en série de Fourier



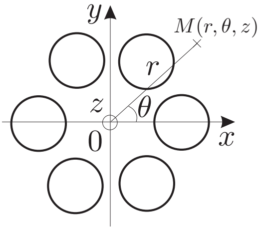
ESPACE DE FOURIER

$$U(r, \theta, z, t) = e^{i(\beta z - \omega t)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} U_n(r)\, e^{in\theta}$$

où U est une composante du champ électromagnétique.

Expression du champ électromagnétique

- **Régime harmonique** :
  Dépendance en $e^{-i\omega t}$ avec ω : pulsation
- **Invariance opto-géométrique selon l'axe** z :
  Dépendance en $e^{i\beta z}$ avec β : constante ($\in \mathbb{C}$)
- **Périodicité opto-géométrique selon** θ (périodicité intrinsèque au système de coordonnées, de période 2π) :
  Développement en série de Fourier



ESPACE DE FOURIER

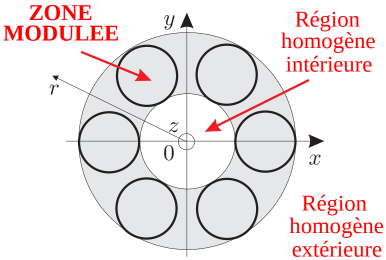
$$U\left(r,\theta,z,t\right) = e^{i(\beta z-\omega t)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} U_n\left(r\right) e^{in\theta}$$

où U est une composante du champ électromagnétique.

☞ *Notation* : $[U] = \begin{pmatrix} \vdots \\ U_n\left(r\right) \\ \vdots \end{pmatrix}$

Partage de l'espace en trois régions

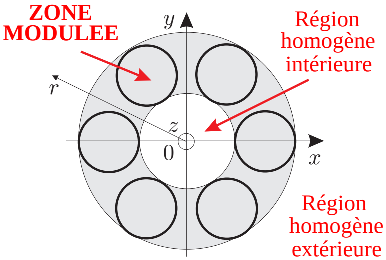
- **Deux régions homogènes :**
  Expressions explicites des champs



Partage de l'espace en trois régions

- **Deux régions homogènes :**
  Expressions explicites des champs
- **Zone modulée :**
  Système différentiel à intégrer

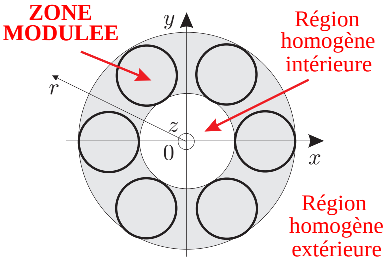
$$\frac{dF(r)}{dr} = \mathcal{M}(r)F(r) \text{ avec } F(r) = \begin{pmatrix} [E_\theta] \\ [E_z] \\ [H_\theta] \\ [H_z] \end{pmatrix}$$



Partage de l'espace en trois régions

- **Deux régions homogènes :**
  Expressions explicites des champs
- **Zone modulée :**
  Système différentiel à intégrer

$$\frac{dF(r)}{dr} = \mathcal{M}(r)F(r) \text{ avec } F(r) = \begin{pmatrix} [E_\theta] \\ [E_z] \\ [H_\theta] \\ [H_z] \end{pmatrix}$$



Après intégration numérique à travers la zone modulée

Matrice de transmission "T" de la zone modulée

$$U = TV \quad \text{avec} \begin{cases} \text{U : Coefficient de Fourier des champs} \\ \text{dans la région homogène extérieure} \\ \text{V : Coefficient de Fourier des champs} \\ \text{dans la région homogène intérieure} \end{cases}$$

La méthode FFF

Problématique

Description des relations constitutives des milieux dans l'espace de Fourier

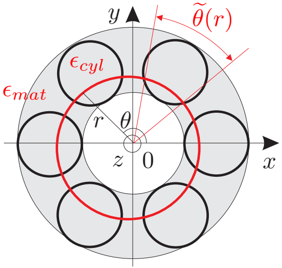
La méthode FFF

Problématique

Description des relations constitutives des milieux dans l'espace de Fourier

- Dans la **zone modulée** :

$$\vec{D}\,(r,\theta,z) = \epsilon(r,\theta)\vec{E}\,(r,\theta,z)$$



La méthode FFF

Problématique

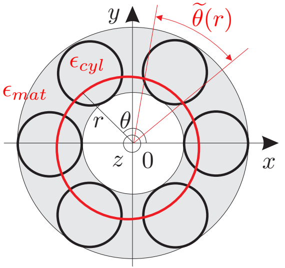
Description des relations constitutives des milieux dans l'espace de Fourier

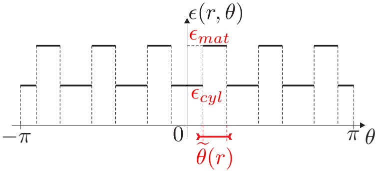
- Dans la **zone modulée** :

$$\vec{D}\,(r,\theta,z) = \epsilon(r,\theta)\vec{E}\,(r,\theta,z)$$

- $\epsilon(r,\theta)$ est la fonction permittivité, périodique selon θ (fonction créneau)
  $\Rightarrow$ **Développable en série de Fourier** selon θ :

$$\epsilon(r,\theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \epsilon_n(r) e^{in\theta}$$





$$\vec{D}\,(r,\theta,z) = \epsilon(r,\theta)\vec{E}\,(r,\theta,z)$$

- Développements de Fourier de $\begin{cases} \vec{D}\,(r,\theta,z) \\ \vec{E}\,(r,\theta,z) \end{cases}$
- Développement de Fourier de $\epsilon\,(r,\theta)$

$$\vec{D}(r,\theta,z) = \epsilon(r,\theta)\vec{E}(r,\theta,z)$$

- Développements de Fourier de $\begin{cases} \vec{D}(r,\theta,z) \\ \vec{E}(r,\theta,z) \end{cases}$
- Développement de Fourier de $\epsilon(r,\theta)$

Question :

Comment calculer les coefficients de Fourier de $\vec{D}$ en fonction de ceux de ϵ et de $\vec{E}$?

$$\vec{D}(r,\theta,z) = \epsilon(r,\theta)\vec{E}(r,\theta,z)$$

- Développements de Fourier de $\begin{cases} \vec{D}(r,\theta,z) \\ \vec{E}(r,\theta,z) \end{cases}$
- Développement de Fourier de $\epsilon(r,\theta)$

Question :

Comment calculer les coefficients de Fourier de $\vec{D}$ en fonction de ceux de ϵ et de $\vec{E}$?

Réponse :

Pour les **séries**, règle de factorisation de Laurent (règle directe)

$$\left[\vec{D}\right] = [\![\epsilon]\!] \left[\vec{E}\right]$$

utilisée dans la Méthode Différentielle Classique

☞ *Notation :* $[\![\epsilon]\!] = \begin{pmatrix} & \vdots & \\ & \epsilon_{n-m} & \dots \\ & & \end{pmatrix}$: Matrice de Toeplitz

MAIS application numérique de la méthode
⇒ Troncature des développements de Fourier

$$U\left(r,\theta,z,t\right)=e^{i(\beta z-\omega t)}\sum_{n=-N}^{+N}U_n\left(r\right)e^{in\theta}$$

MAIS application numérique de la méthode
$\Rightarrow$ Troncature des développements de Fourier

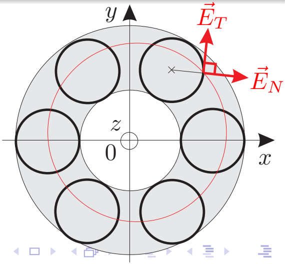
$$U(r,\theta,z,t) = e^{i(\beta z-\omega t)} \sum_{n=-N}^{+N} U_n(r)\, e^{in\theta}$$

Validité de la règle directe ?

- **L. Li (1996) :** Nouvelles règles de factorisation qui s'appliquent à $\vec{E}_T$ et $\vec{E}_N$
- **Règle directe :** $\left[\vec{D}_T\right] = [\![\epsilon]\!] \left[\vec{E}_T\right]$
- **Règle inverse :** $\left[\vec{D}_N\right] = \left[\!\left[\frac{1}{\epsilon}\right]\!\right]^{-1} \left[\vec{E}_N\right]$

Problème

- $\vec{E}_T$ et $\vec{E}_N$ définies seulement sur la surface !
- **Solution :** Extension en tout point de la zone modulée



Méthode FFF

Expression de $\left[\vec{E}_T\right]$ et $\left[\vec{E}_N\right]$ en fonction de $\left[\vec{E}\right]$

$$\Rightarrow \left[\vec{D}\right] = Q_\epsilon \left[\vec{E}\right]$$

où

$$Q_\epsilon = \begin{pmatrix} [\![\epsilon]\!][\![N_\theta^2]\!] + [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}[\![N_r^2]\!] & -\left([\![\epsilon]\!] - [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}\right)[\![N_r N_\theta]\!] & 0 \\ -\left([\![\epsilon]\!] - [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}\right)[\![N_\theta N_r]\!] & [\![\epsilon]\!][\![N_r^2]\!] + [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}[\![N_\theta^2]\!] & 0 \\ 0 & 0 & [\![\epsilon]\!] \end{pmatrix}$$

Méthode FFF

Expression de $\left[\vec{E}_T\right]$ et $\left[\vec{E}_N\right]$ en fonction de $\left[\vec{E}\right]$

$$\Rightarrow \left[\vec{D}\right] = Q_\epsilon \left[\vec{E}\right]$$

où

$$Q_\epsilon = \begin{pmatrix} [\![\epsilon]\!][\![N_\theta^2]\!] + [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}[\![N_r^2]\!] & -\left([\![\epsilon]\!] - [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}\right)[\![N_r N_\theta]\!] & 0 \\ -\left([\![\epsilon]\!] - [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}\right)[\![N_\theta N_r]\!] & [\![\epsilon]\!][\![N_r^2]\!] + [\![\frac{1}{\epsilon}]\!]^{-1}[\![N_\theta^2]\!] & 0 \\ 0 & 0 & [\![\epsilon]\!] \end{pmatrix}$$

Obtention du système différentiel

$$\left.\begin{matrix} \left[\vec{D}\right] = Q_\epsilon \left[\vec{E}\right] \\ + \\ \text{Equations de Maxwell} \end{matrix}\right\} \Rightarrow \frac{dF(r)}{dr} = \mathcal{M}(r)F(r)$$

Algorithme S

Origine des problèmes numériques

- **Coordonnées cartésiennes :** Croissance des fonctions exponentielles
- **Coordonnées cylindriques ?** $\longrightarrow$ Fonctions de Hankel

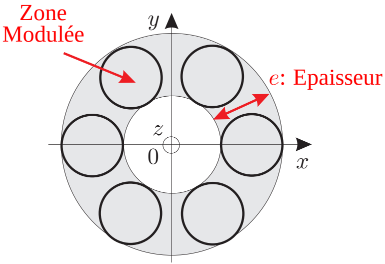
Algorithme S

Origine des problèmes numériques

- **Coordonnées cartésiennes :** Croissance des fonctions exponentielles
- **Coordonnées cylindriques ?** $\longrightarrow$ Fonctions de Hankel

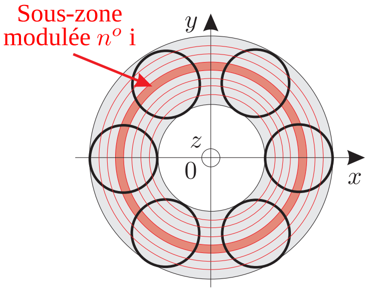
Lors de l'intégration

si e trop grand
$\Rightarrow$ Divergence de certains éléments de la matrice T
$\Rightarrow$ Pertes de digits
$\Rightarrow$ Contaminations numériques



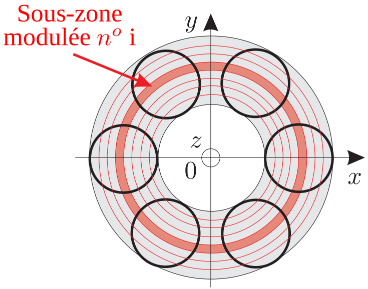
Principe de l'algorithme S

- ☞ Subdivision de la zone modulée en sous-zones modulées



Principe de l'algorithme S

- Subdivision de la zone modulée en sous-zones modulées
- Pour la sous-zone modulée n^o i :
  1. **Intégration** :
     Arrêt avant contaminations numériques
     $\Rightarrow$ matrice $T^{(i)}$ bien conditionnée
  2. **Calcul itératif :** $S^{(i)} = f\left(S^{(i-1)}, T^{(i)}\right)$
     dont les éléments sont bornés



Après propagation des matrices $S^{(i)}$ à travers la zone modulée

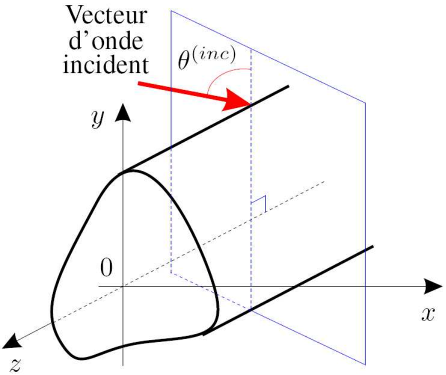
Matrice de diffraction "S" de la zone modulée :

$$B = SA \quad \text{avec} \left\{ \begin{array}{l} \text{B : Coefficient de Fourier des champs diffractés} \\ \text{A : Coefficient de Fourier des champs incidents} \end{array} \right.$$

Validation de l'implémentation de la Méthode Différentielle

Modélisation de la diffraction d'une onde plane par un objet cylindrique de section arbitraire

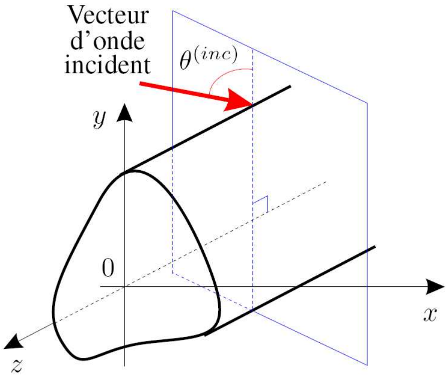
1. en polarisation TM : $\theta^{(inc)} = 0$



Validation de l'implémentation de la Méthode Différentielle

Modélisation de la diffraction d'une onde plane par un objet cylindrique de section arbitraire

1. en polarisation TM : $\theta^{(inc)} = 0$
2. en diffraction conique : $\theta^{(inc)} \neq 0$



Le problème de recherche de modes

Expression des champs électromagnétiques recherchés

$$U(r,\theta,z,t) = e^{i(\beta z-\omega t)} \sum_{n=-N}^{+N} U_n(r)\, e^{in\theta}$$

β : constante de propagation $\Rightarrow n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$: indice effectif

Le problème de recherche de modes

Expression des champs électromagnétiques recherchés

$$U(r,\theta,z,t) = e^{i(\beta z-\omega t)} \sum_{n=-N}^{+N} U_n(r)\, e^{in\theta}$$

β : constante de propagation $\Rightarrow n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$: indice effectif

Définition d'un mode dans la méthode différentielle

Champs "diffractés" en l'absence de champ incident

☞ Dans $B = SA$, recherche de $B \neq 0$ tel que $A = 0$

Le problème de recherche de modes

Expression des champs électromagnétiques recherchés

$$U(r,\theta,z,t) = e^{i(\beta z-\omega t)} \sum_{n=-N}^{+N} U_n(r)\, e^{in\theta}$$

β : constante de propagation $\Rightarrow n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$: indice effectif

Définition d'un mode dans la méthode différentielle

Champs "diffractés" en l'absence de champ incident

☞ Dans $B = SA$, recherche de $B \neq 0$ tel que $A = 0$

Problème homogène

$$S^{-1}B = 0$$

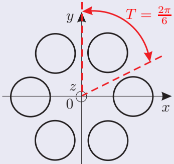
1. Recherche de n_{eff} solution de $det(S^{-1}) = 0$ (valeur propre nulle de S^{-1})
2. Calcul de B : vecteur propre de S^{-1} évaluée en n_{eff}

Prise en compte des symétries

Symétries opto-géométriques

FOMs de symétrie C_{nv} avec $n \in \mathbb{N}$

- ☞ Sous-périodicité en θ d'ordre n : $T = \frac{2\pi}{n}$
- ☞ Nombre de plans de symétrie : n



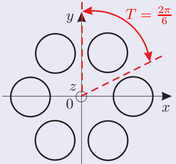
Cas d'une FOM C_{6v}

Prise en compte des symétries

Symétries opto-géométriques

FOMs de symétrie C_{nv} avec $n \in \mathbb{N}$

- ☞ Sous-périodicité en θ d'ordre n : $T = \frac{2\pi}{n}$
- ☞ Nombre de plans de symétrie : n



Cas d'une FOM C_{6v}

Symétries des modes d'une FOM C_{6v}

Classification des modes en classes de symétrie

Notation des modes :

- ☞ $Cm - u$ où $\begin{cases} m \in \mathbb{N} \\ u \in \mathbb{N} \end{cases}$

Remarque :

- ☞ Certaines classes de symétrie sont dégénérées

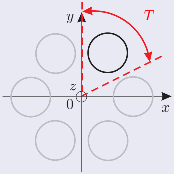
Classes de symétrie		Modes
$C1$		$C1$-1, $C1$-2,...
$C2$		$C2$-1, $C2$-2,...
$C3$, $C4$	$C3/4$	$C3/4$-1, $C3/4$-2,...
$C5$, $C6$	$C5/6$	$C5/6$-1, $C5/6$-2,...
$C7$		$C7$-1, $C7$-2,...
$C8$		$C8$-1, $C8$-2,...

Conséquences dans la méthode différentielle

$$
S^{-1}B = 0 \longrightarrow
\begin{cases}
S_1^{-1}B_1 = 0 \\
S_2^{-1}B_2 = 0 \longrightarrow \text{1 Mode} \\
\vdots \quad \vdots \qquad \vdots \\
S_n^{-1}B_n = 0
\end{cases}
$$

Symétries opto-géométriques C_{nv}

- Grandeurs opto-géométriques (ϵ, $\vec{N}$) :
  Développements de Fourier sur la période T
- Découplage des coefficients de Fourier des champs en n sous-ensembles



Symétries des modes d'une FOM classique

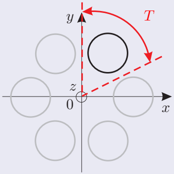
Un mode est décrit par 1 voire 2 (cas dégénéré) sous-ensembles

Conséquences dans la méthode différentielle

$$S^{-1}B = 0 \;\longrightarrow\; \begin{array}{l} S_1^{-1}B_1 = 0 \\ S_2^{-1}B_2 = 0 \;\longrightarrow\; \text{1 Mode} \\ \vdots \\ S_n^{-1}B_n = 0 \end{array}$$

Symétries opto-géométriques C_{nv}

- Grandeurs opto-géométriques (ϵ, $\vec{N}$) : Développements de Fourier sur la période T
- Découplage des coefficients de Fourier des champs en n sous-ensembles



Symétries des modes d'une FOM classique

Un mode est décrit par 1 voire 2 (cas dégénéré) sous-ensembles

- **Réduction du temps de calcul** d'un facteur n^2

Table des matières

1. Introduction
   - La méthode différentielle
   - Les fibres optiques microstructurées
2. La Méthode Différentielle en coordonnées cylindriques
   - Principe de la méthode différentielle
   - La méthode de la Factorisation de Fourier rapide
   - L'algorithme de propagation de la matrice S
   - Le problème de recherche de modes
3. Application numérique pour l'étude des FOMs
   - Validation
   - Etude de FOMs de type ARROW
4. Conclusion

Tests de validation

Validation par comparaison avec la Méthode Multipolaire (MM)

FOM considérée

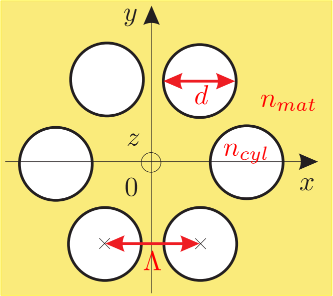
FOM classique : $n_{cyl} < n_{mat}$

Symétrie : C_{6v}

Inclusions : circulaires, homogènes et isotropes

Paramètres

- $\lambda = 1.55\mu m$
- $\left.\begin{array}{l} d = 1\mu m \\ \Lambda = 2.3\mu m \end{array}\right\} \frac{d}{\Lambda} = 0.435$
- $\left\{\begin{array}{l} n_{cyl} = 1 \text{ (air)} \\ n_{mat} = 1.4439 \text{ (silice)} \end{array}\right.$



Tests de validation

Validation par comparaison avec la Méthode Multipolaire (MM)

FOM considérée

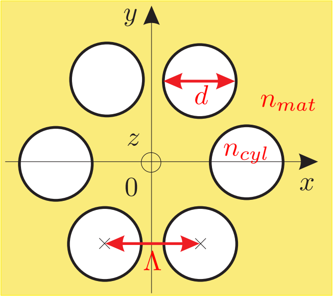
FOM classique : $n_{cyl} < n_{mat}$

Symétrie : C_{6v}

Inclusions : circulaires, homogènes et isotropes

Paramètres

- $\lambda = 1.55\mu m$
- $\left.\begin{array}{l} d = 1\mu m \\ \Lambda = 2.3\mu m \end{array}\right\} \frac{d}{\Lambda} = 0.435$
- $\left\{\begin{array}{l} n_{cyl} = 1 \text{ (air)} \\ n_{mat} = 1.4439 \text{ (silice)} \end{array}\right.$



Matrice infinie

Modes à pertes $\Rightarrow n_{eff} \in \mathbb{C}$

Pertes : $\Im m\,(n_{eff})$

Mode fondamental

Définition : $\Re e\,(n_{eff})$ la plus élevée et $\Im m\,(n_{eff})$ la plus basse

- ☞ Premier mode de la classe de symétrie $C3/4$: $C3/4$-1

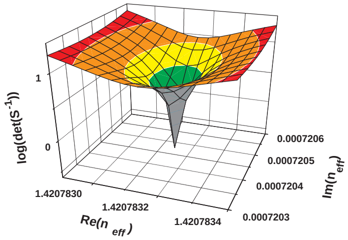
Mode fondamental

Définition : $\Re e\left(n_{eff}\right)$ la plus élevée et $\Im m\left(n_{eff}\right)$ la plus basse

☞ Premier mode de la classe de symétrie $C3/4$: $C3/4$-1

Recherche de n_{eff}

- Recherche d'un minima de $log\left[det\left(S^{-1}\right)\right]$ dans le plan complexe de n_{eff}
- Valeur trouvée pour $N = 90$:
  $n_{eff} = 1.42078315 + i7.2046510^{-4}$



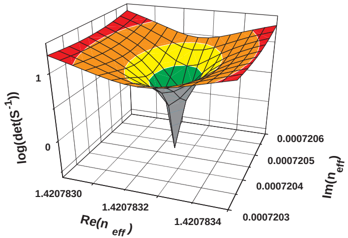
Mode fondamental

Définition : $\Re e\,(n_{eff})$ la plus élevée et $\Im m\,(n_{eff})$ la plus basse

☞ Premier mode de la classe de symétrie $C3/4$: $C3/4$-1

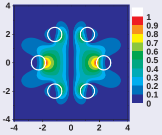
Recherche de n_{eff}

- Recherche d'un minima de $log\left[det\left(S^{-1}\right)\right]$ dans le plan complexe de n_{eff}
- Valeur trouvée pour $N = 90$: $n_{eff} = 1.42078315 + i7.2046510^{-4}$

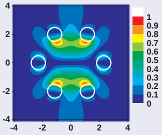


Cartes de champs du mode $C3$-1

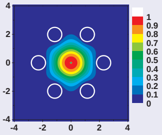
Carte de $|E_z|$



Carte de $|H_z|$

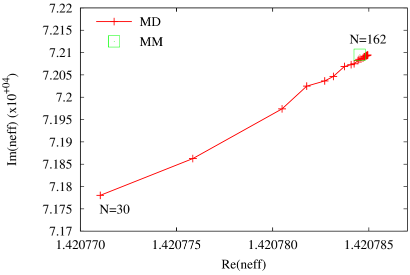


Carte de $|P_z|$

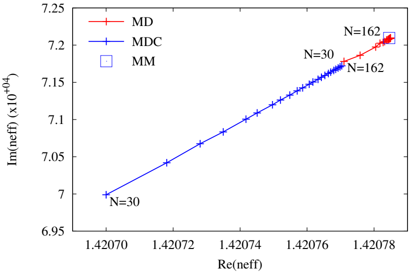


Convergence selon l'ordre de troncature des développements

Comparaison entre la MD et la MM



Comparaison entre la MD et la MDC



Ecarts relatifs entre la MD et la MM

N	$\Re e\,(n_{eff})$	$\Im m\,(n_{eff})$
60	$9.\ 10^{-7}$	$7.\ 10^{-4}$
162	$3.\ 10^{-7}$	$1.\ 10^{-5}$

Dispersion modale

☞ Dispersion modale = Evolution des grandeurs caractéristiques des modes (n_{eff}, D,...) en fonction de λ

Dispersion modale

- Dispersion modale = Evolution des grandeurs caractéristiques des modes (n_{eff}, D,...) en fonction de λ
- Coefficient de dispersion chromatique :

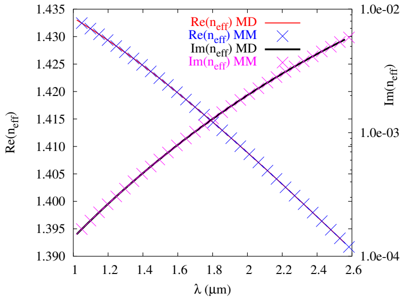
$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c}\frac{\partial^2 \Re e\left(n_{eff}\right)}{\partial \lambda^2}$$

Dispersion modale

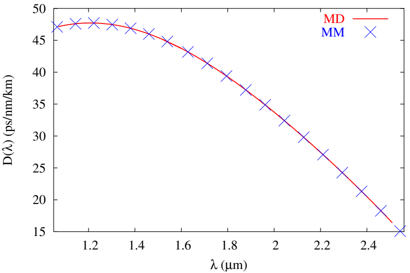
- Dispersion modale = Evolution des grandeurs caractéristiques des modes (n_{eff}, D,...) en fonction de λ
- Coefficient de dispersion chromatique :

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c}\frac{\partial^2 \Re e\left(n_{eff}\right)}{\partial \lambda^2}$$

$\Re e\left(n_{eff}\right)$ *et* $\Im m\left(n_{eff}\right)$ *en fonction de* λ



D *en fonction de* λ



Autres configurations

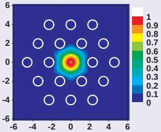
2 couches d'inclusions ($N = 150$)

$$n_{eff} = 1.42103608 + i2.37984\ 10^{-5}$$

Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $1.3\ 10^{-8}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $3.6\ 10^{-4}$

Carte de $|P_z|$



Autres configurations

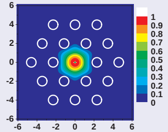
2 couches d'inclusions ($N = 150$)

$n_{eff} = 1.42103608 + i2.37984\ 10^{-5}$

Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $1.3\ 10^{-8}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $3.6\ 10^{-4}$

Carte de $|P_z|$



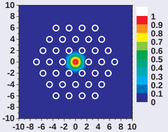
3 couches d'inclusions ($N = 150$)

$n_{eff} = 1.42104651 + i8.104\ 10^{-7}$

Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $1.1\ 10^{-8}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $1.7\ 10^{-3}$

Carte de $|P_z|$



Autres configurations

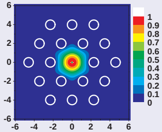
2 couches d'inclusions ($N = 150$)

$n_{eff} = 1.42103608 + i2.37984\ 10^{-5}$

Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $1.3\ 10^{-8}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $3.6\ 10^{-4}$

Carte de $|P_z|$



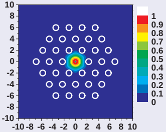
3 couches d'inclusions ($N = 150$)

$n_{eff} = 1.42104651 + i8.104\ 10^{-7}$

Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $1.1\ 10^{-8}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $1.7\ 10^{-3}$

Carte de $|P_z|$



Précision qui diminue avec le nombre de couche :

- Faible valeur de $\Im m\,(n_{eff})$
- Zone modulée plus épaisse $\rightarrow$ Intégration plus longue

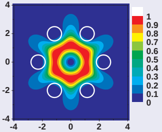
Autres modes : $C2$-1 pour la FOM C_{6v} $(N = 162)$

$$n_{eff} = 1.38733229 + i4.22772\ 10^{-3}$$

Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $7.8\ 10^{-7}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $3.0\ 10^{-5}$

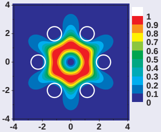
Carte de $|P_z|$



Autres modes : $C2\text{-}1$ pour la FOM C_{6v} $(N = 162)$

$$n_{eff} = 1.38733229 + i4.22772\ 10^{-3}$$

Carte de $|P_z|$



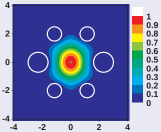
Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $7.8\ 10^{-7}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $3.0\ 10^{-5}$

Autres symétries opto-géométriquess : C_{2v} pour le mode $C3\text{-}1$ $(N = 60)$

$$n_{eff} = 1.4179222 + i5.1110\ 10^{-4}$$

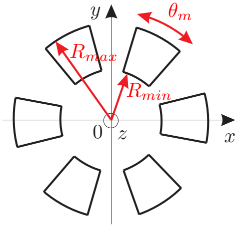
Carte de $|P_z|$



Ecarts relatifs/MM

- $\Re e\,(n_{eff})$: $3.0\ 10^{-6}$
- $\Im m\,(n_{eff})$: $7.0\ 10^{-4}$

FOM classique C_{6v} à inclusions sectorielles



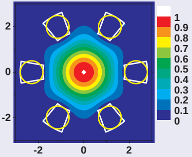
Paramètres opto-géométriques

- **Rayon minimal :** R_{min}
- **Rayon maximal :** R_{max}
- **Angle d'ouverture :** θ_m

FOM équivalente à la FOM à inclusions circulaires

- Aire d'une inclusion sectorielle = Aire d'inclusion circulaire
- **Applications numériques :**
  $R_{min} = 1.8\ \mu m$
  $R_{max} = 2.8\ \mu m$
  $\theta_m = 19.57^o$
- **Résultats :**
  $n_{eff} = 1.42050791 + i7.64101\ 10^{-4}$ pour le mode fondamental $C3/4$-1

Carte de $|P_z|$

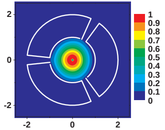


FOM C_{3v} à inclusions sectorielles

Paramètres

- $\lambda = 1.55\mu m$
- $R_{min} = 1\mu m$
- $R_{max} = 2\mu m$
- $\theta_m = 54^o$
- $n_{cyl} = 1.44402362$
- $n_{mat} = 1$

Carte de $|P_z|$



Comparaison entre la MD et la MEF

	$C3$-1	$C2$-1
n_{eff} **MEF**	$1.35580 + i4.95\ 10^{-5}$	$1.23950 + i5.67\ 10^{-4}$
n_{eff} **MD** $N = 60$	$1.3558867 + i5.012\ 10^{-5}$	$1.239615 + i5.138\ 10^{-4}$
n_{eff} **MD** $N = 150$	$1.3558863 + i5.011\ 10^{-5}$	$1.239619 + i5.140\ 10^{-4}$

Conclusion : La MD est plus précise que la MEF

Méthodes numériques de modélisation des FOMs

Méthodes numériques rigoureuses capables de calculer avec précision les pertes

Méthodes numériques de modélisation des FOMs

Méthodes numériques rigoureuses capables de calculer avec précision les pertes

Méthode Multipolaire (MM)

Temps de calcul :
Très faibles

Précision :
Très élevée

Avantages :
1. Calculs semi-analytiques
2. Nombre de couches d'inclusions élevé

Limitations :
1. Inclusions circulaires
2. Milieux homogènes et isotropes

Méthodes numériques de modélisation des FOMs

Méthodes numériques rigoureuses capables de calculer avec précision les pertes

Méthode Multipolaire (MM)

Temps de calcul :
Très faibles

Précision :
Très élevée

Avantages :
1. Calculs semi-analytiques
2. Nombre de couches d'inclusions élevé

Limitations :
1. Inclusions circulaires
2. Milieux homogènes et isotropes

Méthode des éléments finis (MEF)

Temps de calcul :
$>$ MM

Précision :
$<$ MM

Avantages :
1. Géométrie arbitraire
2. Milieux inhomogènes et anisotropes

Limitations :
1. Pertes : précision moyenne
2. Modes à pertes $\Rightarrow$ PML
3. Nombre de couches d'inclusions
4. Grosses matrices creuses

Méthodes numériques de modélisation des FOMs

Méthodes numériques rigoureuses capables de calculer avec précision les pertes

Méthode Multipolaire (MM)

Temps de calcul :
Très faibles

Précision :
Très élevée

Avantages :
1. Calculs semi-analytiques
2. Nombre de couches d'inclusions élevé

Limitations :
1. Inclusions circulaires
2. Milieux homogènes et isotropes

Méthode des éléments finis (MEF)

Temps de calcul :
$>$ MM

Précision :
$<$ MM

Avantages :
1. Géométrie arbitraire
2. Milieux inhomogènes et anisotropes

Limitations :
1. Pertes : précision moyenne
2. Modes à pertes $\Rightarrow$ PML
3. Nombre de couches d'inclusions
4. Grosses matrices creuses

Méthode différentielle (MD)

Temps de calcul :
$\approx$ MEF $>$ MM

Précision :
$>$ MEF mais $<$ MM

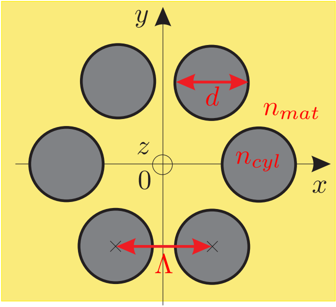
Avantages :
1. Géométrie arbitraire
2. Milieux inhomogènes et anisotropes
3. Pertes : bonne précision

Limitations :
1. Nombre de couches d'inclusions
2. Intégration numérique

FOM de type "AntiResonant Reflecting Optical Waveguide" (ARROW)

Comparaison avec les FOMs classiques

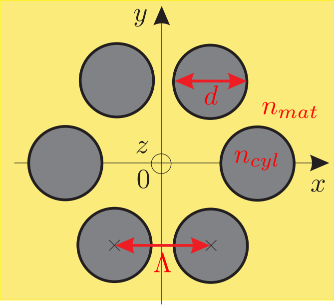
- **Symétrie identique :** C_{nv}, $n \in \mathbb{N}$
- **Géométrie identique :** Inclusions circulaires
- **Constraste d'indice inversé entre la matrice et les inclusions :** $n_{cyl} > n_{mat}$



FOM de type "AntiResonant Reflecting Optical Waveguide" (ARROW)

Comparaison avec les FOMs classiques

- **Symétrie identique :** C_{nv}, $n \in \mathbb{N}$
- **Géométrie identique :** Inclusions circulaires
- **Constraste d'indice inversé entre la matrice et les inclusions :** $n_{cyl} > n_{mat}$

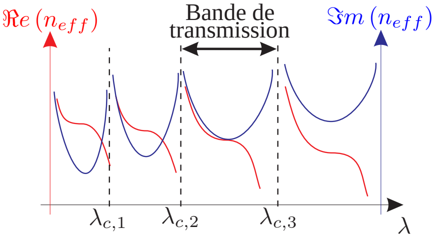


Conséquences

☞ 1 inclusion ≈ 1 fibre optique conventionnelle à saut d'indice (cas de milieux homogènes)

Effets de résonance entre les modes des FOMs et les modes des inclusions

Effet de bandes de transmission

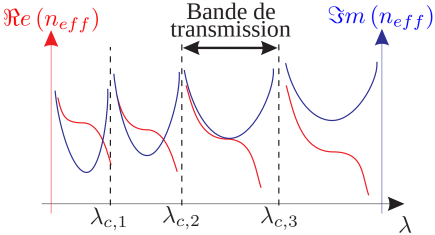


$\Re e\,(n_{eff})$ **et** $\Im m\,(n_{eff})$ **en fonction de** λ **pour le mode fondamental** $C3/4$

Effet de bandes de transmission

Première interprétation

Attribution des bords des bandes de transmission aux **coupures des modes (guidés) des inclusions isolées** ($\lambda_{c,1}$, $\lambda_{c,2}$, $\lambda_{c,3}$,...)

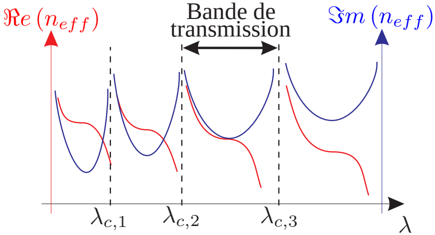


$\Re e\,(n_{eff})$ et $\Im m\,(n_{eff})$ en fonction de λ pour le mode fondamental $C3/4$

Effet de bandes de transmission

Première interprétation

Attribution des bords des bandes de transmission aux **coupures des modes (guidés) des inclusions isolées** ($\lambda_{c,1}$, $\lambda_{c,2}$, $\lambda_{c,3}$,...)



$\Re e\,(n_{eff})$ et $\Im m\,(n_{eff})$ en fonction de λ pour le mode fondamental $C3/4$

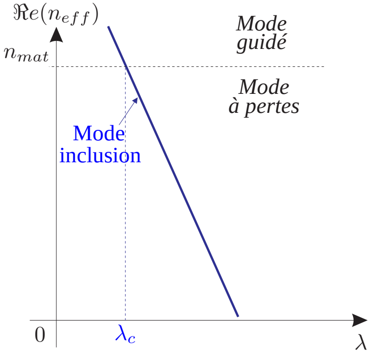
Nouvelle interprétation

- *Observations :* petites irrégularités des courbes aux bords des bandes de transmission
- Mise en évidence d'**anti-croisements** entre des modes à pertes de la FOM et des inclusions

Anti-croisement de modes à pertes

Intersection entre les courbes de dispersion

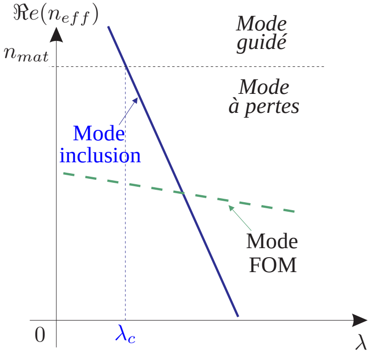
- d'un mode à pertes d'une seule inclusion (bleu)



Anti-croisement de modes à pertes

Intersection entre les courbes de dispersion

- d'un mode à pertes d'une seule inclusion (bleu)
- d'un mode à pertes de la FOM (courbe hypothétique en vert)



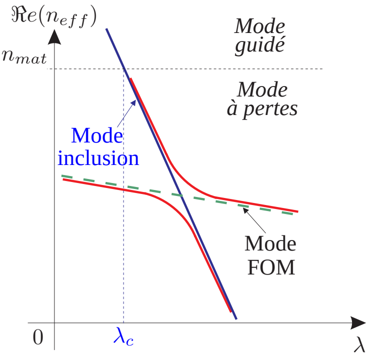
Anti-croisement de modes à pertes

Intersection entre les courbes de dispersion

- d'un mode à pertes d'une seule inclusion (bleu)
- d'un mode à pertes de la FOM (courbe hypothétique en vert)

Mais

Les résultats numériques montrent un anti-croisement pour le mode à pertes de la FOM (rouge)



☞ Anti-croisement de modes à pertes : Effet **sélectif en longueur d'onde**

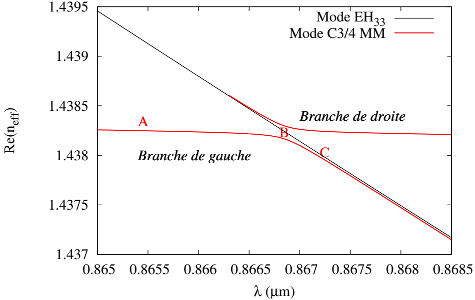
Transition de délocalisation du mode fondamental vers les inclusions

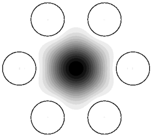
FOM à inclusions homogènes

- $d = 3.315\ \mu m$
- $\Lambda = 5.64\ \mu m$
- $n_{mat} = 1.44$
- $n_{cyl} = 1.8$

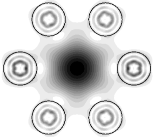
Anti-croisement entre

- le mode fondamental $C3/4$ de la FOM
- le mode à pertes EH_{33} d'une inclusion

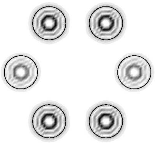




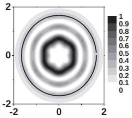
Point A



Point B



Point C



Mode EH_{33}

FOM de type ARROW à inclusions inhomogènes

Objectif : Vérifier expérimentalement l'existence de la transition de délocalisation du mode fondamental $C3/4$ de la FOM vers les inclusions

FOM fabriquée à l'IRCICA (Université de Lille I)

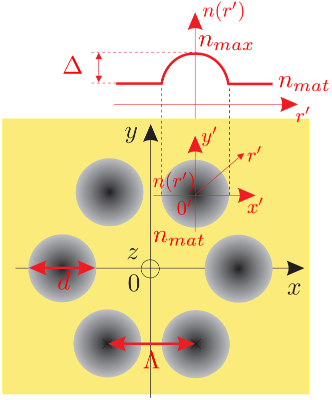
Caractéristiques :

- Inclusions à gradient d'indice (profil d'indice parabolique)
- Nombre de couches d'inclusions : 7
- Diamètre de la FOM (gaine) : 180 μm

Paramètres opto-géométriques :

- $\left.\begin{array}{l} d = 6.24\mu m \\ \Lambda = 9.136\mu m \end{array}\right\} \frac{d}{\Lambda} = 0.683$
- $\left.\begin{array}{l} n_{max} = 1.474 \\ n_{mat} = 1.444 \end{array}\right\} \Delta = 3.\ 10^{-2} \Rightarrow$

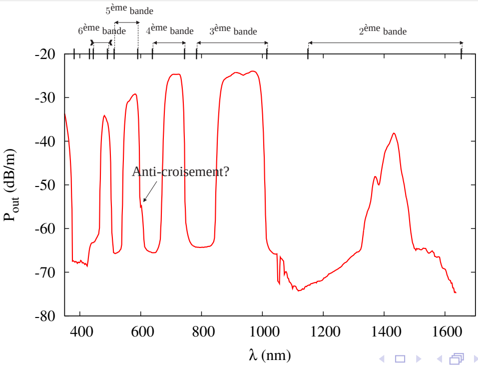
  Approximation du faible guidage (Modes LP)



Mesures expérimentales

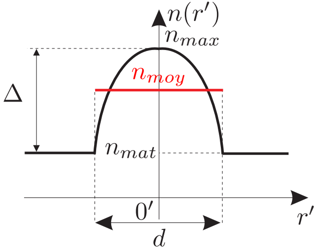
Spectre de puissance

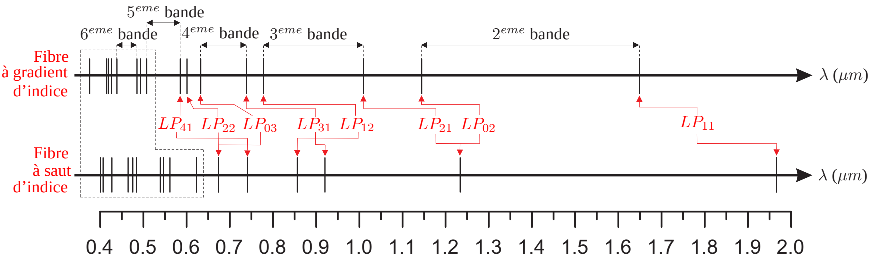
- **Grandeur mesurée :** puissance (dB) de sortie du **coeur** de la FOM à inclusions inhomogènes en fonction de λ
- **Observations :**
  1. Bandes de transmission
  2. Maxima des bandes $\longrightarrow$ Modes confinés dans le coeur (Mode fondamental)
  3. Petites irrégularités sur les bords de bande $\longrightarrow$ Anti-croisements de mode ?



FOM à inclusions homogènes équivalentes ?

- FOM à inclusions homogènes équivalente à la FOM à inclusions inhomogènes ?
- **Problèmatique :** Conservation des propriétés de guidage des modes $\rightarrow$ résonances avec les modes des inclusions
- **Moyenne du profil d'indice :** $n_{cyl} = n_{moy} = n_{mat} + \frac{2}{3}\Delta$ (profil parabolique)





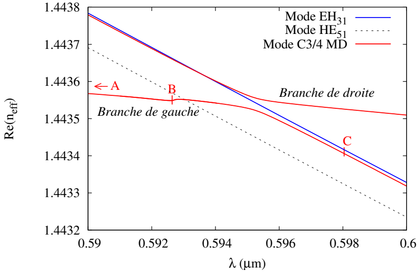
Observations :

- Localisation et largeur différentes des bandes de transmission
- Bords des bandes : modes des inclusions différents

Conclusion : MM non adaptée **MAIS MD OUI !**

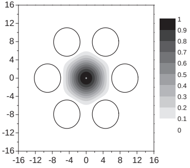
Résultats numériques obtenus avec la MD

- **FOM modélisée :** à inclusions inhomogènes à une couche d'inclusions
- **Anti-croisement :** vers $\lambda = 0.595\ \mu m$ ($5^{\text{ème}}$ bande de transmission)

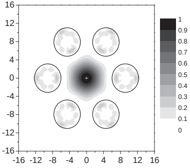


Anti-croisement entre

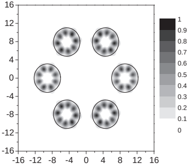
- le mode fondamental $C3/4$ de la FOM
- le mode à pertes EH_{31} (LP_{41}) d'une inclusion



Point A



Point B



Point C

Comparaison avec les mesures expérimentales

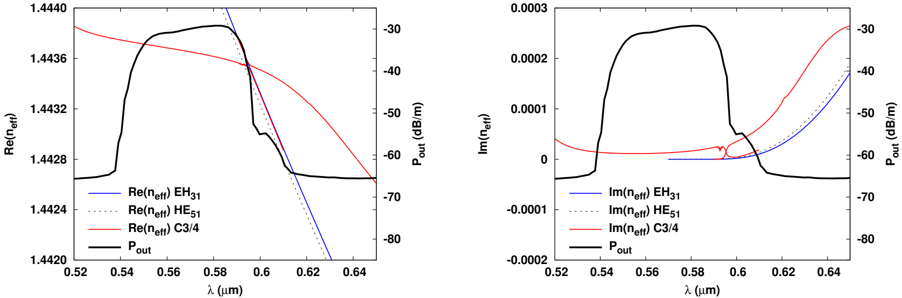


Table des matières

1. Introduction
   - La méthode différentielle
   - Les fibres optiques microstructurées
2. La Méthode Différentielle en coordonnées cylindriques
   - Principe de la méthode différentielle
   - La méthode de la Factorisation de Fourier rapide
   - L'algorithme de propagation de la matrice S
   - Le problème de recherche de modes
3. Application numérique pour l'étude des FOMs
   - Validation
   - Etude de FOMs de type ARROW
4. Conclusion

Conclusion

Implémentation de la MD en coordonnées cylindriques

- **Nouvelle version :** Méthode FFF + Algorithme S
- **Prise en compte des** symétries opto-géométriques du cylindre et des symétries des modes

⇒ **MD bien adaptée à l'étude des FOMs :**
Bonne précision sur n_{eff}, même pour plusieurs couches d'inclusions

Conclusion

Implémentation de la MD en coordonnées cylindriques

- **Nouvelle version :** Méthode FFF + Algorithme S
- **Prise en compte des** symétries opto-géométriques du cylindre et des symétries des modes

⇒ **MD bien adaptée à l'étude des FOMs :**
Bonne précision sur n_{eff}, même pour plusieurs couches d'inclusions

Résultats physiques

- Nouvelle interprétation du mécanisme de guidage dans les FOMs de type ARROW
- FOMs de type ARROW à inclusions inhomogènes :
  profil d'indice → nouveau degré de liberté

Conclusion

Implémentation de la MD en coordonnées cylindriques

- **Nouvelle version :** Méthode FFF + Algorithme S
- **Prise en compte des** symétries opto-géométriques du cylindre et des symétries des modes

$\Rightarrow$ **MD bien adaptée à l'étude des FOMs :**
Bonne précision sur n_{eff}, même pour plusieurs couches d'inclusions

Résultats physiques

- Nouvelle interprétation du mécanisme de guidage dans les FOMs de type ARROW
- FOMs de type ARROW à inclusions inhomogènes :
  profil d'indice $\longrightarrow$ nouveau degré de liberté

Intérêt de la MD pour l'étude des FOMs

- **Géométries arbitraires** des inclusions des FOMs
- **Milieux inhomogènes :** étude des FOMs de type ARROW à gradient d'indice

Perspectives

Travaux en cours sur les FOMs de type ARROW

- **FOM de type ARROW à gradient d'indice :** prise en compte de la dispersion matérielle et du nombre de couches d'inclusions
- **Etude des interactions avec des modes de couplage**

Perspectives

Travaux en cours sur les FOMs de type ARROW

- **FOM de type ARROW à gradient d'indice :** prise en compte de la dispersion matérielle et du nombre de couches d'inclusions
- **Etude des interactions avec des modes de couplage**

Couplage Méthode Différentielle et Méthode Multipolaire

objectif : Exploiter les avantages de chaque méthode

- **Méthode différentielle :** Matrice S d'une inclusion de géométrie arbitraire et de milieux inhomogènes et anisotropes
- **Méthode Multipolaire :** Modes dans les FOMs à plusieurs couches d'inclusions

Perspectives

Travaux en cours sur les FOMs de type ARROW

- **FOM de type ARROW à gradient d'indice :** prise en compte de la dispersion matérielle et du nombre de couches d'inclusions
- **Etude des interactions avec des modes de couplage**

Couplage Méthode Différentielle et Méthode Multipolaire

objectif : Exploiter les avantages de chaque méthode

- **Méthode différentielle :** Matrice S d'une inclusion de géométrie arbitraire et de milieux inhomogènes et anisotropes
- **Méthode Multipolaire :** Modes dans les FOMs à plusieurs couches d'inclusions

Généralisation à d'autres géométries

- **Ajout d'une périodicité selon l'axe du cylindre**
- **Objets tridimensionnels :** ajout de PML

Perspectives

Travaux en cours sur les FOMs de type ARROW

- **FOM de type ARROW à gradient d'indice :** prise en compte de la dispersion matérielle et du nombre de couches d'inclusions
- **Etude des interactions avec des modes de couplage**

Couplage Méthode Différentielle et Méthode Multipolaire

objectif : Exploiter les avantages de chaque méthode

- **Méthode différentielle :** Matrice S d'une inclusion de géométrie arbitraire et de milieux inhomogènes et anisotropes
- **Méthode Multipolaire :** Modes dans les FOMs à plusieurs couches d'inclusions

Généralisation à d'autres géométries

- **Ajout d'une périodicité selon l'axe du cylindre**
- **Objets tridimensionnels :** ajout de PML

Généralisation à d'autres matériaux

- **Milieux anisotropes**
- **Milieux non linéaires**

Diffraction

Méthode différentielle

- ☞ P. Boyer, E. Popov, M. Nevière, and G. Tayeb. **Diffraction theory in TM polarization : application of the fast Fourier factorization method to cylindrical devices with arbitrary cross section** *J. Opt. Soc. Am. A* 21(11) : 2146-2153, 2004

- ☞ P. Boyer, E. Popov, M. Nevière, and G. Renversez. **Diffraction theory : Application of the fast Fourier factorization method to cylindrical devices with arbitrary cross section lighted in conical mounting** *J. Opt. Soc. Am. A* 23(5) : 1146-1158, 2006

Cylindre anisotrope

- ☞ M. Nevière, E. Popov and P. Boyer. **Diffraction theory of an anisotropic circular cylinder** *J. Opt. Soc. Am. A* 23(7) : 1731-1740, 2006

Fibres optiques

Fibres optiques microstructurées

- P. Boyer, G. Renversez, E. Popov and M. Nevière. **A new differential method applied to the study of arbitrary cross section microstructured optical fibers** *Opt. and Quantum Elect.* 38 : 217-230, 2006
- P. Boyer, G. Renversez, E. Popov and M. Nevière. **The fast Fourier factorisation method as a modal method for arbitrary profile microstructured optical fibers** *soumise au J. Opt. Soc. Am. B*
- P. Boyer, G. Renversez, E. Popov and M. Nevière. **The fast Fourier factorisation method applied to the study of arbitrary cross section microstructured optical fibers** *Proc. SPIE* 5840 : 409-420, 2005

Trou métallique

- E. Popov, M. Nevière, P. Boyer and N. Bonod. **Light transmission through a subwavelength hole.** *Opt. Comm.* 255 : 338-348, 2005