

Propagation linéaire dans les fibres optiques et modélisation numérique

Partie 2 : Modes à fuite et fibres microstructurées

Olivier Vanvincq

Université de Lille - Laboratoire PhLAM



Université
de Lille



INNOV-FIBRE 2024

Lancement de Pluto

Pour ouvrir Pluto dans votre navigateur :

Lancement de Pluto

```
cd("InnovFibre2024")
using Pluto
Pluto.run()
```

Dans Pluto :

- La touche *Enter* permet d'aller à la ligne dans une cellule
- La combinaison *Shift+Enter* permet d'évaluer une cellule
- La combinaison *Ctrl+Enter* permet d'évaluer une cellule et d'en créer une nouvelle à la suite

Une cellule contenant plusieurs lignes de code doit forcément commencer par l'instruction *begin* et se terminer par l'instruction *end*

1 Modes à fuite

- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

Optique de transformation

On considère un système de coordonnées (x'_1, x'_2, x'_3) qui est relié au système de coordonnées cartésiennes (x_1, x_2, x_3) par le jacobien $J_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial x'_j}$.

On peut montrer que l'on peut utiliser les équations de Maxwell dans le système de coordonnées (x'_1, x'_2, x'_3) comme si nous étions en coordonnées cartésiennes en modifiant les tenseurs de permittivité et de perméabilité du matériau de la façon suivante :

$$\varepsilon' = \frac{J^{-1}\varepsilon(J^{-1})^T}{\det(J^{-1})} \text{ et } \mu' = \frac{J^{-1}\mu(J^{-1})^T}{\det(J^{-1})}$$

Si le milieu est isotrope, ces relations se simplifient en :

$$\varepsilon' = \varepsilon T^{-1} \text{ et } \mu' = \mu T^{-1} \text{ avec } T = \frac{J^T J}{\det(J)}$$

1 Modes à fuite

- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

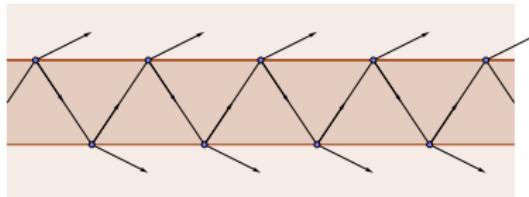
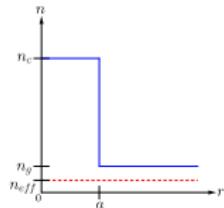
2 Fibres microstructurées

- Fibre à cœur creux
- Fibres BIP toute solides

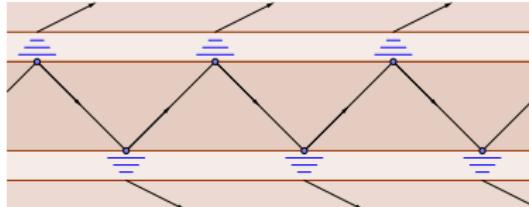
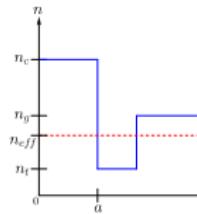
Problématique

Que devient un mode guidé

- lorsqu'il passe son cut-off ?



- lorsqu'une tranchée est ajoutée ?



Définition

Un mode à fuite est un mode qui possède une constante de propagation complexe

- La partie réelle est inférieure à l'indice de la gaine (sinon le mode est guidé)

$$\operatorname{Re}(n_{\text{eff}}) < n_g$$

- La partie imaginaire est reliée aux pertes linéiques :

$$\alpha = 2 \cdot \operatorname{Im}(\beta) = \frac{4\pi}{\lambda} \operatorname{Im}(n_{\text{eff}})$$

Modes à fuite	Définition
Fibres microstructurées	PML
	Fibres courbées
	Fibres torsadées

Définition et utilité

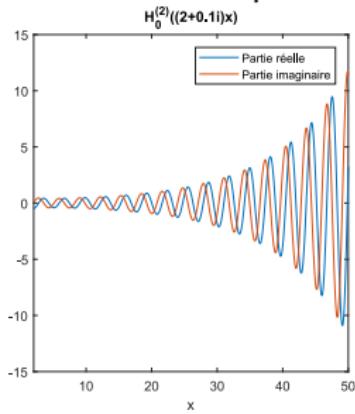
- Les modes à fuite sont issus du prolongement analytique des modes guidés sous le cut-off : l'ensemble des modes à fuite est infini mais discret.
- Mathématiquement les modes à fuites ne font pas partie du spectre de l'opérateur que l'on diagonalise pour obtenir les modes. Ils peuvent donc se décomposer sur la bases des modes radiatifs et évanescents.
- Il est souvent pratique de décomposer un champ électrique sous la forme suivante :

$$E(x, y, z) = \sum_{m=1}^{N_{\text{guidé}}} a_m e_m(x, y) \exp(i\beta_m z) + \sum_{n=1}^{N_{\text{fuite}}} a_n e_n(x, y) \exp(i\beta_n z) + E_{\text{res}}$$

$$E_{\text{res}} = \int_{-\infty}^{n_g^2} \varepsilon_\eta e_\eta(x, y) \exp(i\beta_\eta z) d\eta$$

Détermination

Pour une fibre à saut indice, on peut procéder comme pour les modes guidés, mais le champ dans la gaine n'est plus une fonction de Bessel K_ℓ mais une fonction de Hankel $H_\ell^{(2)} = J_\ell - iY_\ell$ et cette méthode nécessite de faire une recherche de racines dans le plan complexe



- Le champ ne tendant pas vers zéro à l'infini, comment faire numériquement dans les autres cas?

1 Modes à fuite

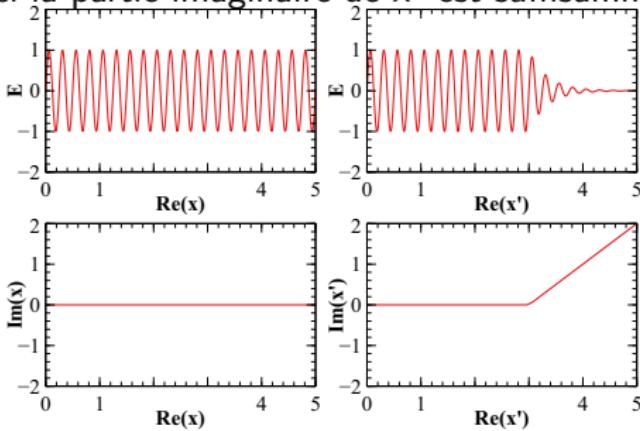
- Définition
- **PML**
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

Principe

- Pour une fibre quelconque, les modes à fuite ne peuvent pas être calculer directement puisque le champ ne s'annule pas à l'infini.
- L'idée est de résoudre le problème en effectuant une prolongation analytique du champ i.e. en changeant la variable x en $x' = x + if(x)$ avec $f(x) = 0$ pour $x \leq x_{\text{PML}}$ afin que le champ décroisse exponentiellement si la partie imaginaire de x' est suffisamment grande.



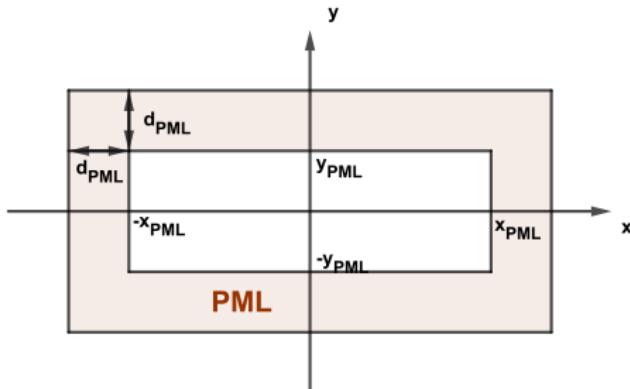
Principe

- La PML (Perfectly Matched Layer) ne donne lieu à aucune réflexion car la solution est la même si $x \leq x_{\text{PML}}$ puisque $x = x'$
- Ce prolongement analytique revient à résoudre les équations de Maxwell en changeant $\frac{\partial}{\partial x}$ en $\frac{1}{1+i\frac{df}{dx}} \frac{\partial}{\partial x}$
- Numériquement, la PML est discrétisée et d'extension finie. Il peut donc y avoir des réflexions qui seront atténuées en choisissant $f(x)$ quadratique ou cubique, un maillage suffisamment fin et une extension suffisamment grande.

Utilisation de l'optique de transformation

De façon générale, l'introduction d'une PML revient à considérer le profil d'indice réel dans le système de coordonnées (x', y', z) . En utilisant l'optique de transformation, on montre que cela revient également à utiliser un milieu anisotrope avec des coordonnées réelles.

Exemple : PML rectangulaire



$$\begin{aligned}x' &= \int_0^{x_c} S_x(x) dx \\y' &= \int_0^{y_c} S_y(y) dy \\z' &= z\end{aligned}$$

$$S_x = S_y = 1 \text{ hors de la PML et } S_x = 1 + i\alpha \left(\frac{x - x_{PML}}{d_{PML}} \right)^2 \text{ si } x \geq x_{PML}, \text{ etc.}$$

Utilisation de l'optique de transformation

- x' : coordonnées physiques après prolongement analytique, $\text{Re}(x') = x$
- x_c : variable réelle sur laquelle on va effectuer le calcul.

Le jacobien de la transformation est $J = \text{diag}(S_x, S_y, 1)$ donc $T = \frac{J^T J}{\det(J)} = \text{diag}(S_x/S_y, S_y/S_x, 1/(S_x S_y))$

Conclusion : dans la PML, la permittivité et la perméabilité doivent être multipliées par

$$T^{-1} = \text{diag}(S_y/S_x, S_x/S_y, S_x S_y)$$

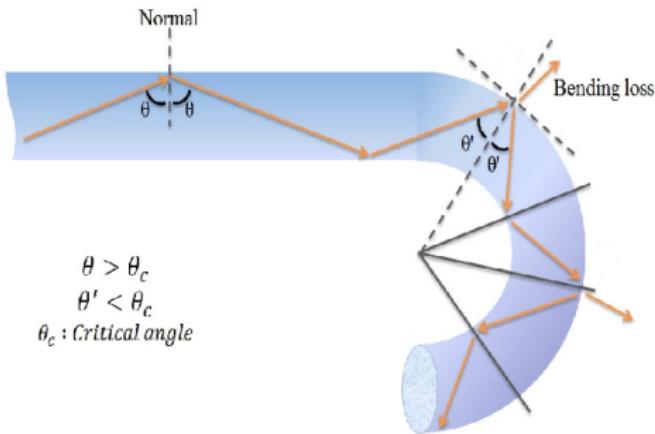
1 Modes à fuite

- Définition
- PML
- Fibres courbées**
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

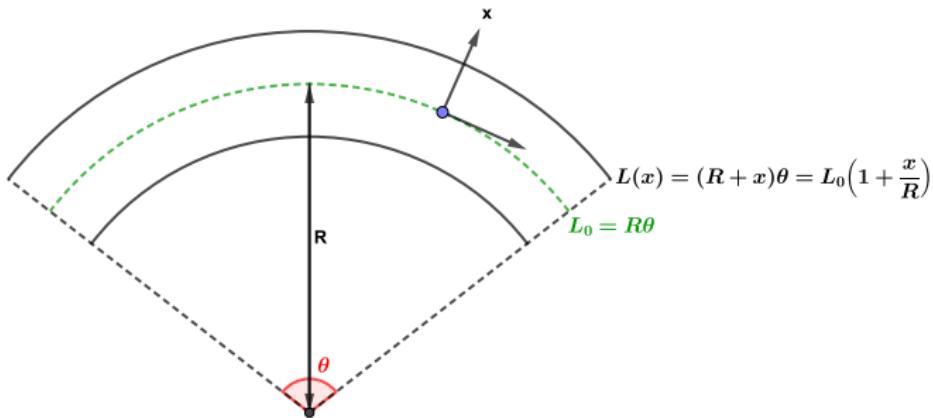
- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

Point de vue de l'optique géométrique



- Optique géométrique : le rayon subit des réfractions à l'interface cœur/gaine à l'extérieur de la courbure
- Electromagnétisme : le mode subira des pertes au cours de la propagation, il s'agit donc d'un mode à fuite.

Indice équivalent

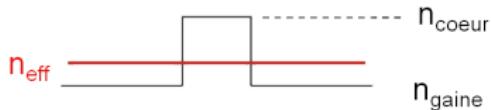


- Dans l'approximation scalaire, une courbure de rayon R revient à multiplier le chemin optique et donc l'indice de réfraction par $1 + \frac{x}{R}$ avec $x > 0$ à l'extérieur de la courbure.

Indice équivalent

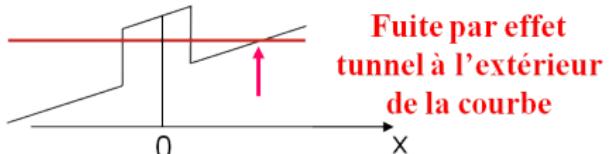
→ Fibre droite

$$n_S(x, y)$$



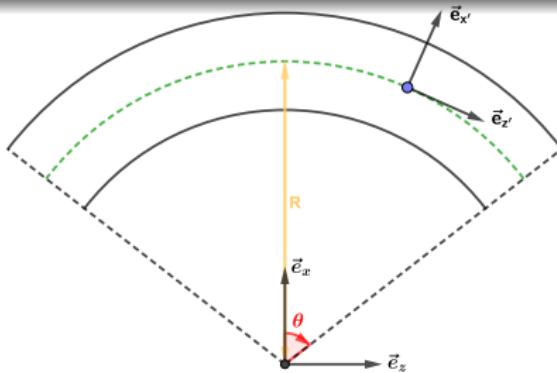
→ Fibre courbée

$$n_B(x, y) = n_S(x, y) \left(1 + \frac{x}{R}\right)$$



Remarque : En tenant compte de l'effet élasto-optique, le coefficient multiplicatif devient $1 + (1 + \chi) \frac{x}{R}$ avec $\chi \simeq -0.22$ pour la silice.

Utilisation de l'optique de transformation



$$x = (x' + R) \cos\left(\frac{z'}{R}\right)$$

$$y = y'$$

$$z = (x' + R) \sin\left(\frac{z'}{R}\right)$$

- L'étude dans le système de coordonnées (x', y', z') peut se faire en modifiant les tenseurs de permittivité et de perméabilité : $\epsilon'(x', y') = \epsilon(x', y') T^{-1}$ et $\mu'(x', y') = \mu(x', y') T^{-1}$ avec

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{x'}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{x'}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + \frac{x'}{R}} \end{pmatrix}$$

Utilisation de l'optique de transformation

Le problème de la fibre courbée peut donc être résolu en prenant une permittivité relative et une perméabilité relative anisotropes :

$$\epsilon'_r = \epsilon_r(x, y) \begin{pmatrix} 1 + \frac{x}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{x}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + \frac{x}{R}} \end{pmatrix} \text{ et } \mu'_r = \begin{pmatrix} 1 + \frac{x}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \frac{x}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + \frac{x}{R}} \end{pmatrix}$$

Remarque : Dans le cas scalaire (polarisé linéairement selon x ou y), l'indice de réfraction équivalent est :

$$n'(x, y) = \sqrt{\epsilon'_{r,xx} \mu'_{r,xx}} = \sqrt{\epsilon_{r,xx}} \left(1 + \frac{x}{R}\right) = n(x, y) \left(1 + \frac{x}{R}\right)$$

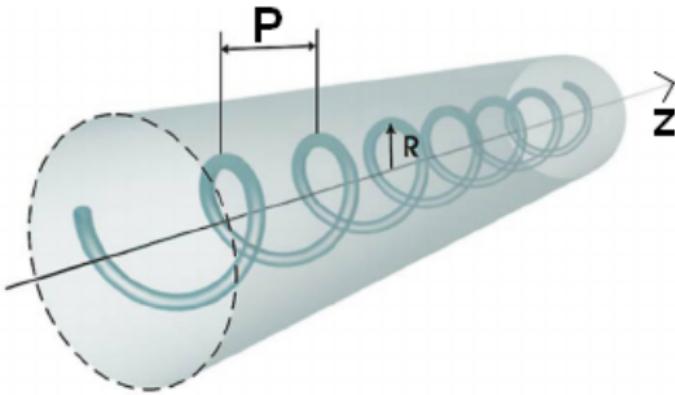
1 Modes à fuite

- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

Notations



- L'axe de l'hélice formée par le cœur est l'axe de la fibre (Oz)
- Rayon de l'hélice : R
- Pas de l'hélice : P

Approximation de l'indice effectif

Equation paramétrique décrivant la courbe suivie par le centre du cœur :

$$\gamma(t) = \begin{cases} x(t) = R \cos(t) \\ y(t) = R \sin(t) \\ z(t) = \frac{P}{2\pi} t \end{cases}$$

Entre 0 et une longueur z de fibre, la longueur de l'hélice est :

$$L(z) = \int_0^{\frac{2\pi z}{P}} \|\vec{\gamma}'(t)\| dt = \frac{\sqrt{(2\pi R)^2 + P^2}}{P} z$$

- Lorsque la fibre est torsadée, le chemin optique et donc l'indice effectif est multiplié par $\frac{\sqrt{(2\pi R)^2 + P^2}}{P}$

Approximation des pertes

On peut approximer les pertes en calculant le rayon de courbure local :

$$R'(t) = \frac{\|\vec{\gamma}'(t)\|^3}{\|\vec{\gamma}'(t) \wedge \vec{\gamma}''(t)\|} = R + \frac{P^2}{(2\pi)^2 R}$$

- On peut approximer les pertes en supposant la fibre courbée avec un rayon de courbure R'
- Plus P est faible, plus les pertes sont élevées
- Le rayon de courbure n'est pas monotone en fonction de R , il diminue puis augmente quand $R > \frac{P}{2\pi}$

Optique de transformation

- Dans le référentiel du laboratoire avec les coordonnées cartésiennes (x, y, z) , la fibre n'est pas invariante par translation
- La fibre est invariante par translation dans le système de coordonnées hélicoïdales (u, v, w) défini par (avec $\alpha = 2\pi/P$) :

$$\begin{cases} x = u \cos(\alpha w) + v \sin(\alpha w) \\ y = -u \sin(\alpha w) + v \cos(\alpha w) \\ z = w \end{cases}$$

Dans ce système de coordonnées, le calcul des modes peut se faire en utilisant $\varepsilon' = \varepsilon T^{-1}$ et $\mu' = \mu T^{-1}$ avec

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} 1 + \alpha^2 v^2 & -\alpha^2 u v & -\alpha v \\ -\alpha^2 u v & 1 + \alpha^2 u^2 & \alpha u \\ -\alpha v & \alpha u & 1 \end{pmatrix}$$

Optique de transformation

Néanmoins, l'étude de la fibre dans le système hélicoïdal lève la dégénérence des modes :

Dans le référentiel du laboratoire, le facteur de propagation est $e^{i\beta z}$ et le champ est proportionnel à $\sin(\nu\theta)$ ou à $\cos(\nu\theta)$ i.e. $e^{\pm i\nu\theta}$ avec ν nombre azimutal.

Dans le système de coordonnées hélicoïdales, le système tourne autour de l'axe de la fibre avec un taux α donc le champ est proportionnel à $e^{\pm i\nu(\theta-\alpha z)}$. Le facteur de propagation devient donc $e^{i(\beta \pm \nu\alpha)z}$ et l'indice effectif du mode est donc

$$n'_{\text{eff}} = n_{\text{eff}} \pm \nu \frac{\lambda}{P}$$

1 Modes à fuite

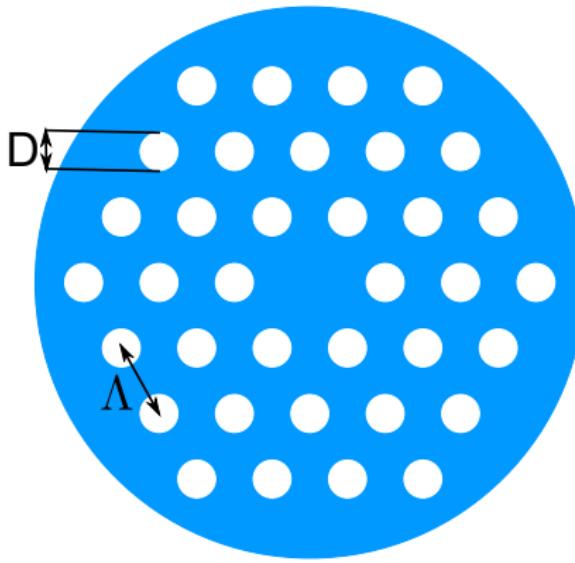
- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

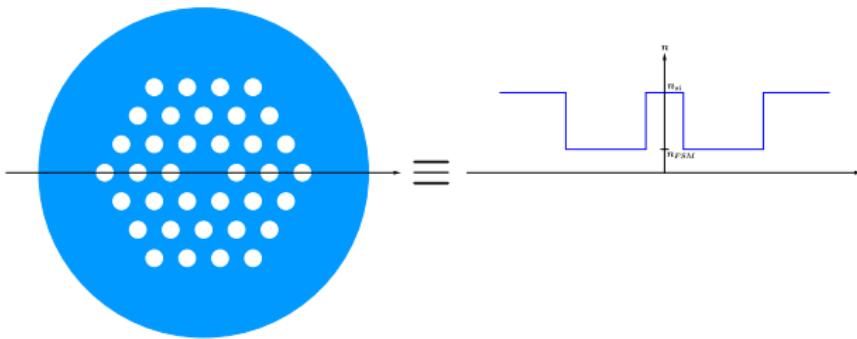
Notation

- Gaine composée d'un réseau périodique d'inclusion de bas indice de réfraction (généralement de l'air) de diamètre D . La période du réseau sera notée Λ .



Pertes par confinement

- Existence de pertes par confinement qui diminuent avec le nombre de couronnes de trous



- n_{FSM} = plus haut indice effectif parmi les modes pouvant se propager dans la structure infinie constituant la gaine microstructurée.
 n_{FSM} dépend de la longueur d'onde même si les matériaux ne sont pas dispersifs.
- Remarque : pour une gaine homogène n_{FSM} est égal à l'indice de réfraction n_g de la gaine

Comportement asymptotique de n_{FSM}

Réseau triangulaire d'inclusions d'indice n_V (facteur de remplissage f) plongées dans un milieu d'indice n_{Si} (facteur de remplissage $1 - f$)

- A courte longueur d'onde, le champ est confiné dans le milieu de haut indice

$$n_{\text{FSM}} \rightarrow n_{Si}$$

- A grande longueur d'onde, le champ est réparti uniformément :
Dans l'approximation scalaire :

$$\varepsilon_{\text{FSM}} \rightarrow f\varepsilon_V + (1 - f)\varepsilon_{Si}$$

Dans le cas vectoriel (théorie du milieu effectif en tenant compte des relations de passage) :

$$\varepsilon_{\text{FSM}} \rightarrow \varepsilon_{Si} \frac{\varepsilon_{Si} + \varepsilon_V - f(\varepsilon_{Si} - \varepsilon_V)}{\varepsilon_{Si} + \varepsilon_V + f(\varepsilon_{Si} - \varepsilon_V)}$$

Détermination numérique de n_{FSM}

Equation à résoudre :

$$\left(\vec{\nabla}_t^2 + k_0^2 \varepsilon \right) \vec{h}_t + \left(\vec{\nabla}_t \ln(\varepsilon) \right) \wedge \left(\vec{\nabla}_t \wedge \vec{h}_t \right) = \beta^2 \vec{h}_t$$

Périodicité \Rightarrow théorème de Bloch

$$\vec{h}_t(x, y) = \exp \left(i \vec{k}_t \cdot \vec{r} \right) \vec{u}(x, y)$$

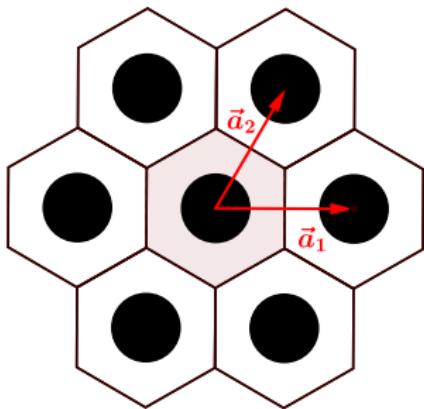
ou $\vec{u}(x, y)$ a la même périodicité que le réseau et \vec{k}_t est un vecteur relié à la différence de phase entre cellules élémentaires voisines (\vec{k}_t appartient à la zone de Brillouin)

Méthodes de résolution :

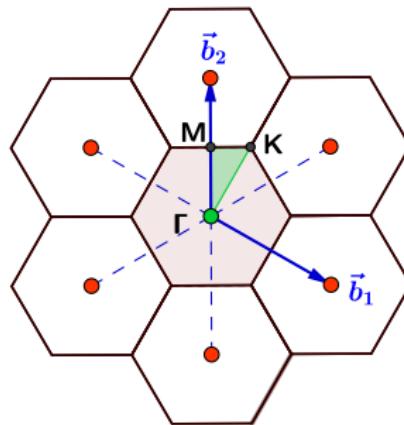
- Décomposition en ondes planes
- FD ou FEM avec conditions de bord périodiques

Zone de Brillouin

\vec{k}_t doit décrire la zone de Brillouin (en rose) ou la zone de Brillouin irréductible (en vert) si l'inclusion possède la même symétrie que la maille.



Espace réel

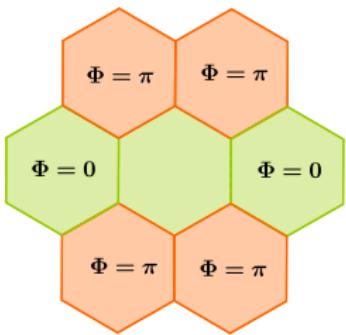


Espace réciproque

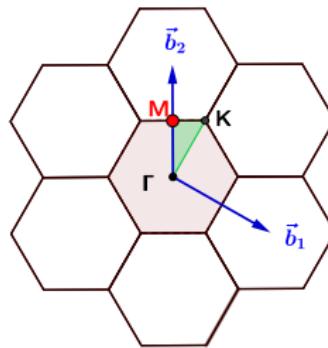
$$\vec{a}_i \cdot \vec{b}_j = 2\pi\delta_{ij}$$

Zone de Brillouin

→ Γ , M et K sont les points de plus haute symétrie.



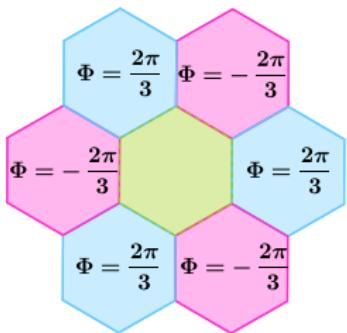
Espace réel



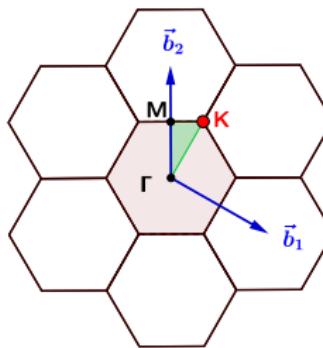
Espace réciproque

Zone de Brillouin

→ Γ , M et K sont les points de plus haute symétrie.



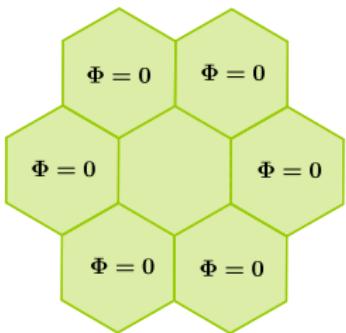
Espace réel



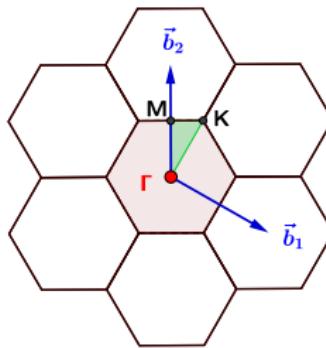
Espace réciproque

Zone de Brillouin

- Γ , M et K sont les points de plus haute symétrie.



Espace réel

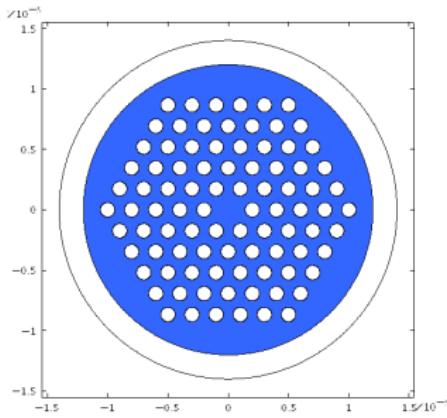
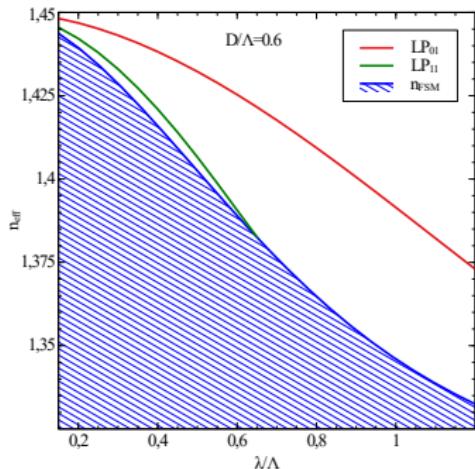


Espace réciproque

- n_{FSM} correspond au mode qui à la plus grande valeur de β i.e le mode qui présente le moins de variation transverse → calcul en Γ

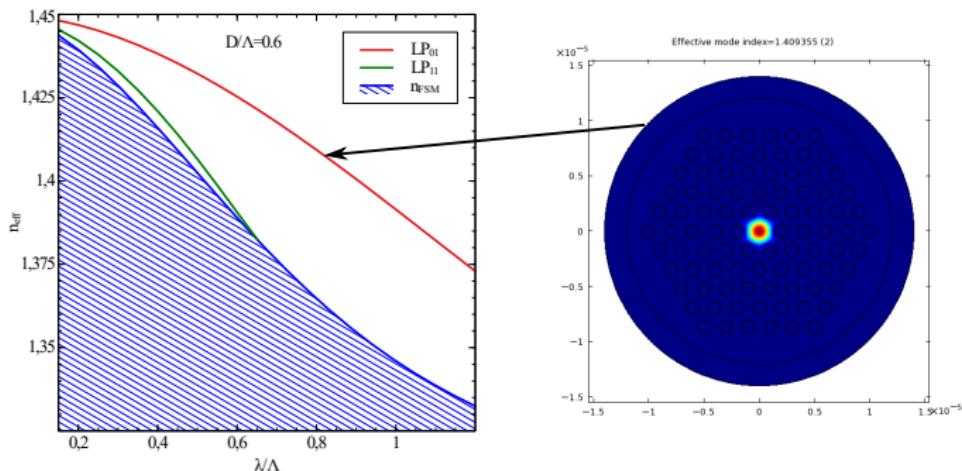
Calcul des modes de cœur

- FD ou FEM avec une PML
- Méthode multipolaire dans le cas d'inclusions circulaires



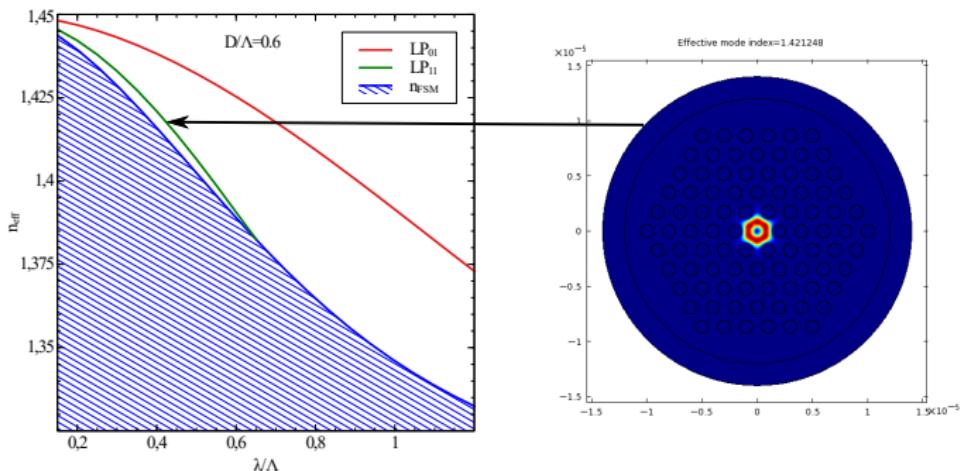
Calcul des modes de cœur

- FD ou FEM avec une PML
- Méthode multipolaire dans le cas d'inclusions circulaires



Calcul des modes de cœur

- FD ou FEM avec une PML
- Méthode multipolaire dans le cas d'inclusions circulaires



1 Modes à fuite

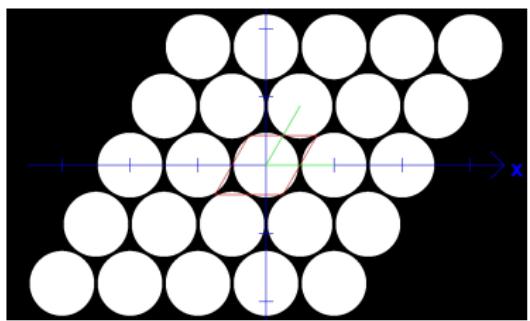
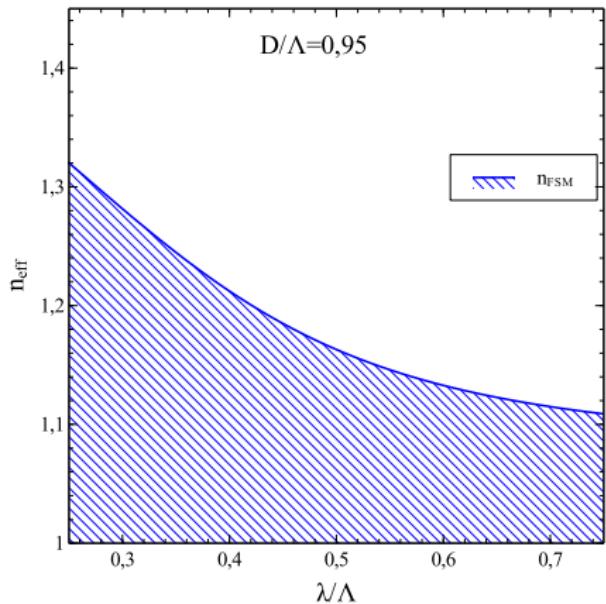
- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- **Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP**
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

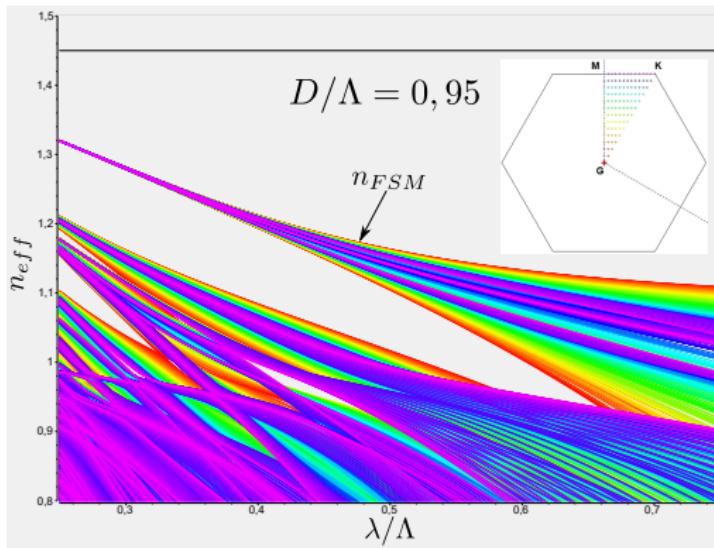
Problématique

→ Que se passe-t-il sous n_{FSM} ?



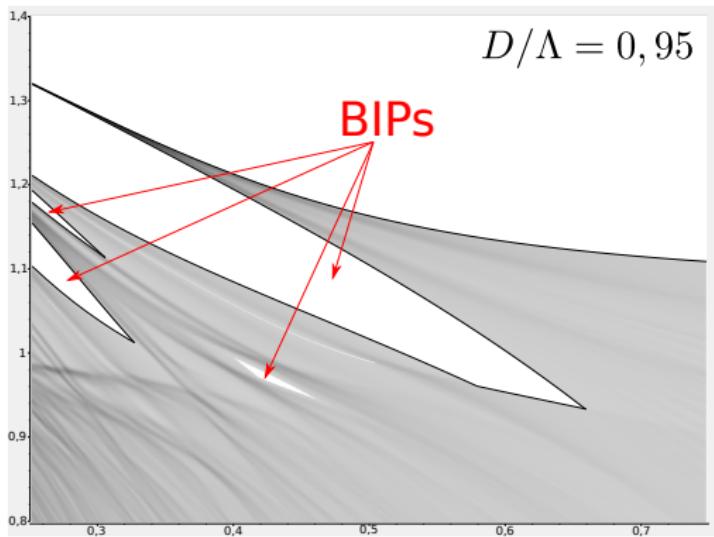
Bandes interdites photoniques

- Existence de zones sous n_{FSM} où aucun mode ne peut se propager dans la structure constituant la gaine : les bandes interdites photoniques.



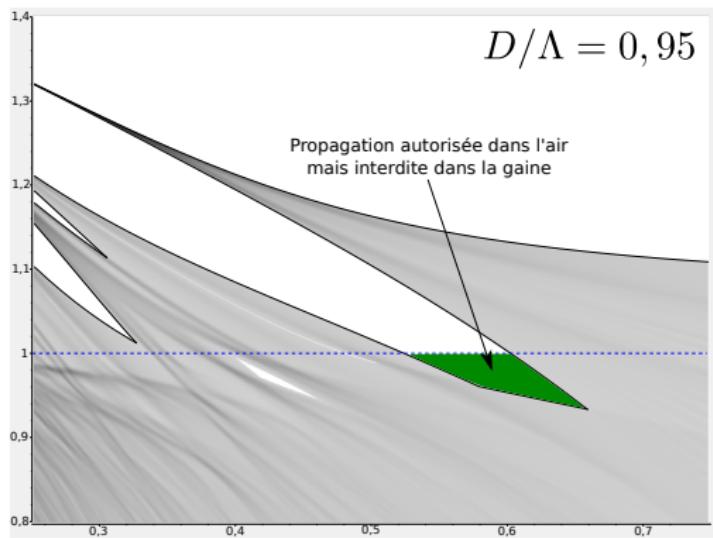
Bandes interdites photoniques

- Densité d'états (DOS) = nombre de modes par unité d'indice effectif à une longueur d'onde donnée
- BIP = zone de DOS nul



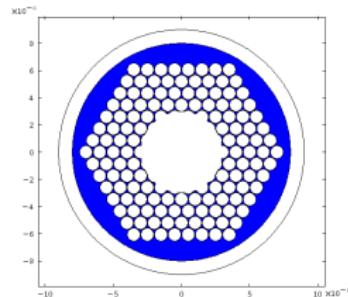
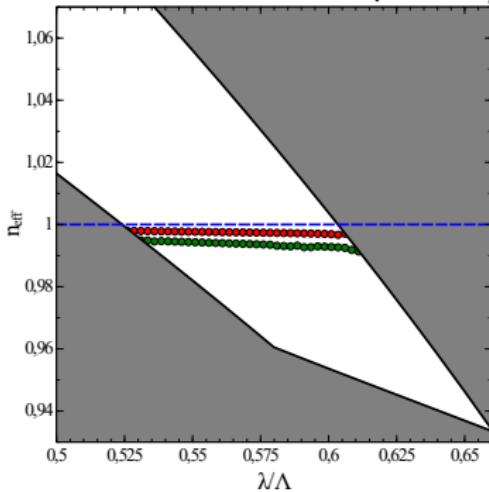
Guidage par BIP

- Pas de couplage possible entre un mode se situant dans un BIP et les modes se propageant dans la gaine
- Possibilité de guider la lumière dans un cœur en air



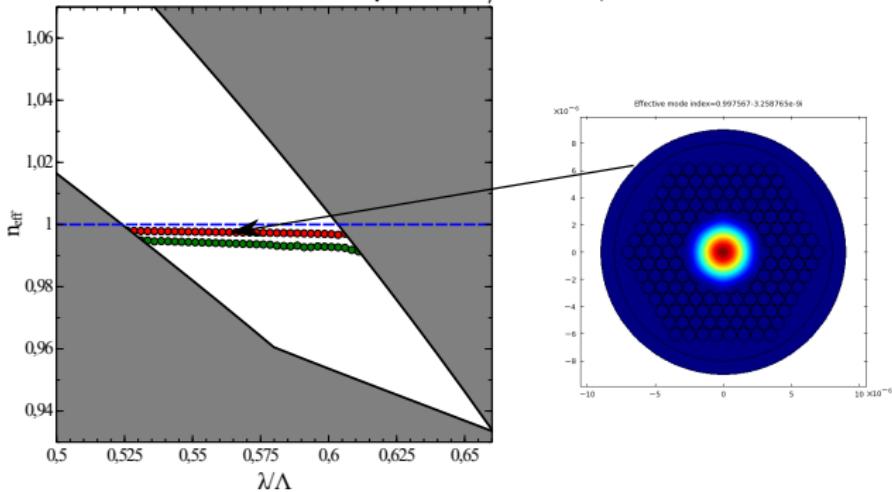
Mode de cœur

Exemple : $D/\Lambda = 0,95$



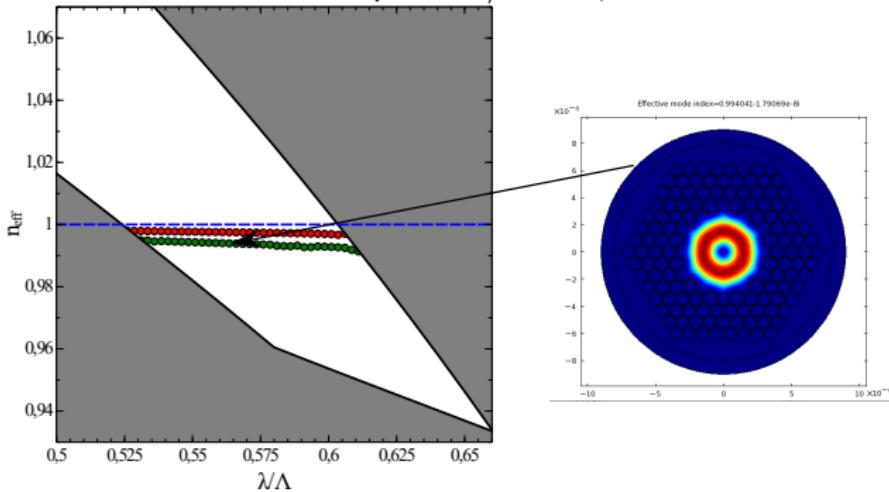
Mode de cœur

Exemple : $D/\Lambda = 0,95$



Mode de cœur

Exemple : $D/\Lambda = 0,95$



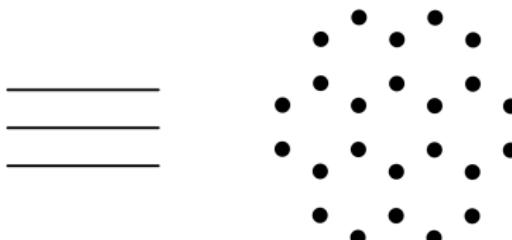
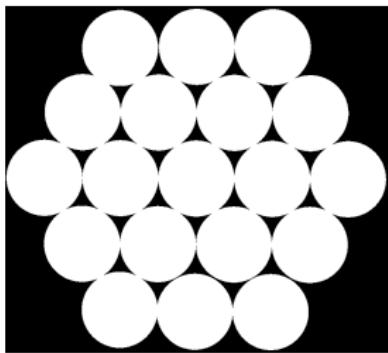
1 Modes à fuite

- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

Réseau d'inclusions de haut indice

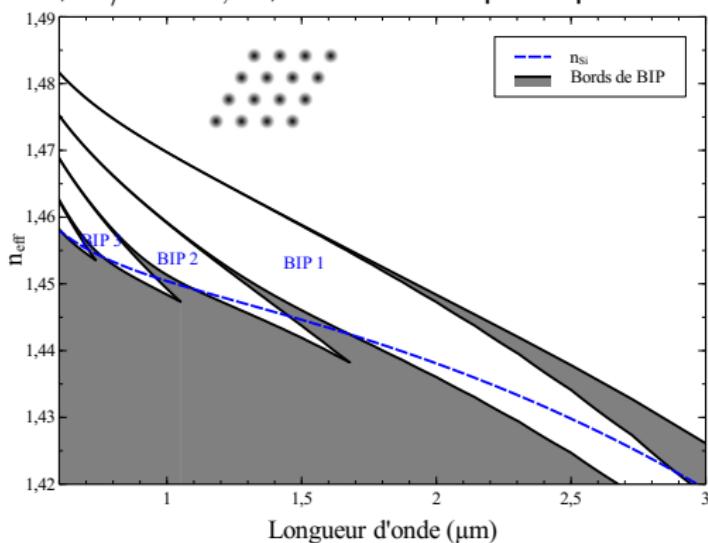


- En première approximation, un réseau triangulaire d'inclusions de bas indice est équivalent à un réseau en nid d'abeille d'inclusions de haut indice

Réseau d'inclusions de haut indice

- Possibilité d'obtenir des BIP avec un réseau d'inclusions de haut indice

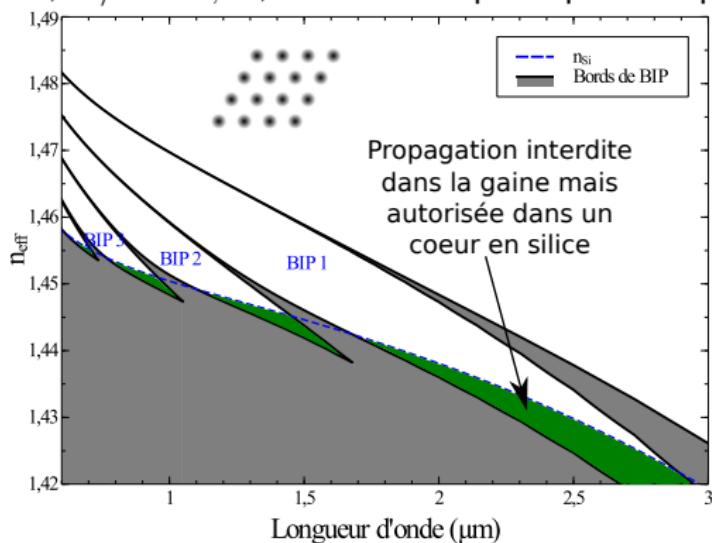
Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



Réseau d'inclusions de haut indice

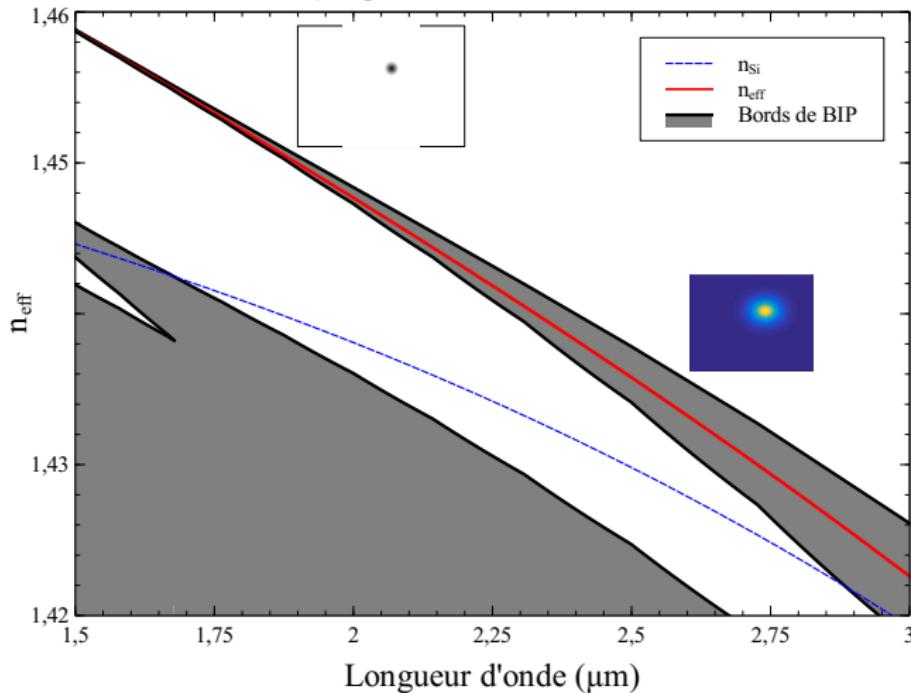
- Possibilité d'obtenir des BIP avec un réseau d'inclusions de haut indice

Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



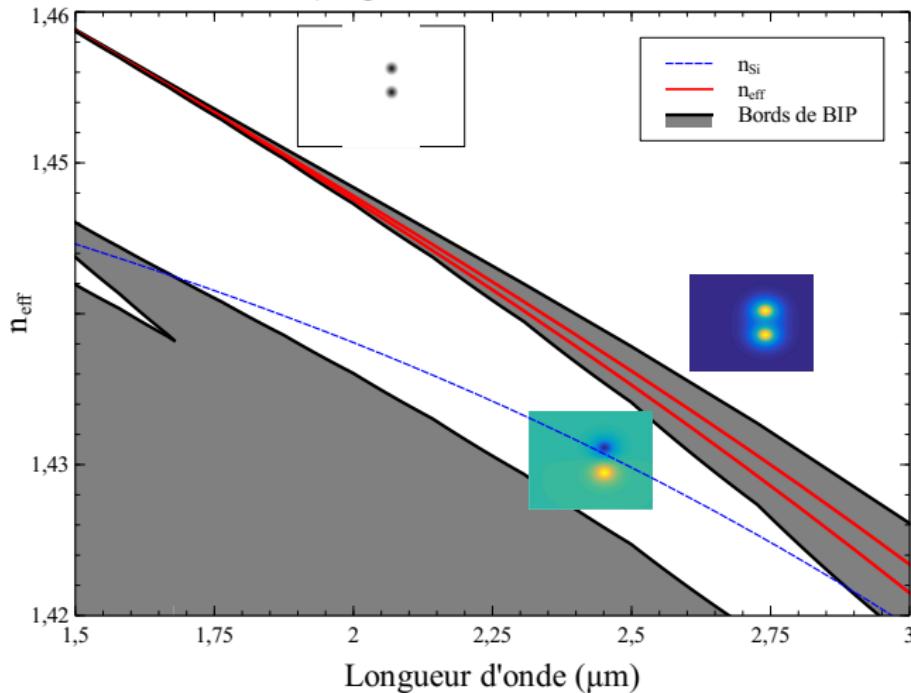
Origine des BIP

Supermodes issus du couplage du mode fondamental d'une inclusion



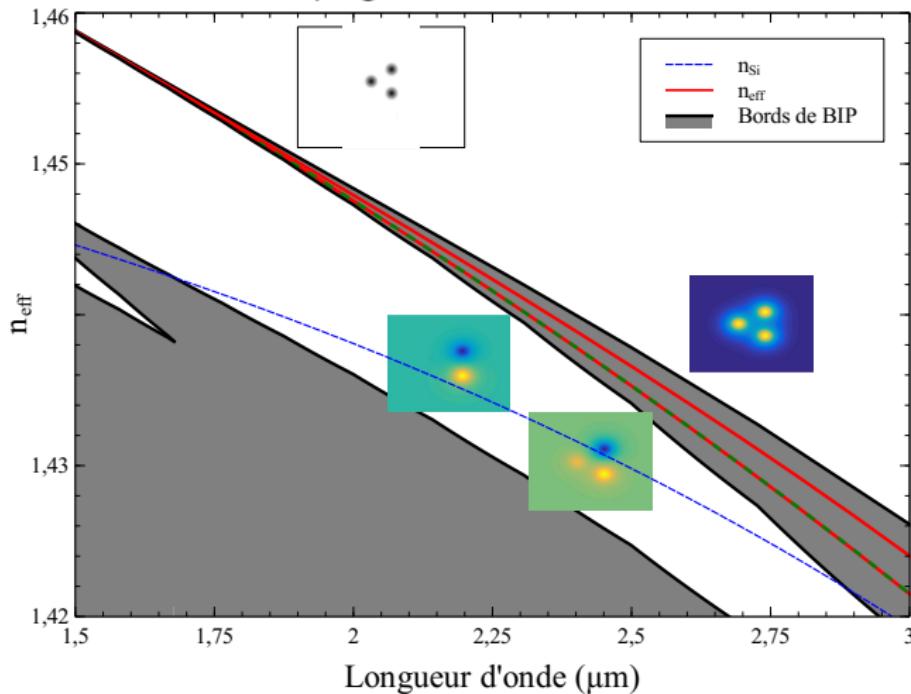
Origine des BIP

Supermodes issus du couplage du mode fondamental d'une inclusion



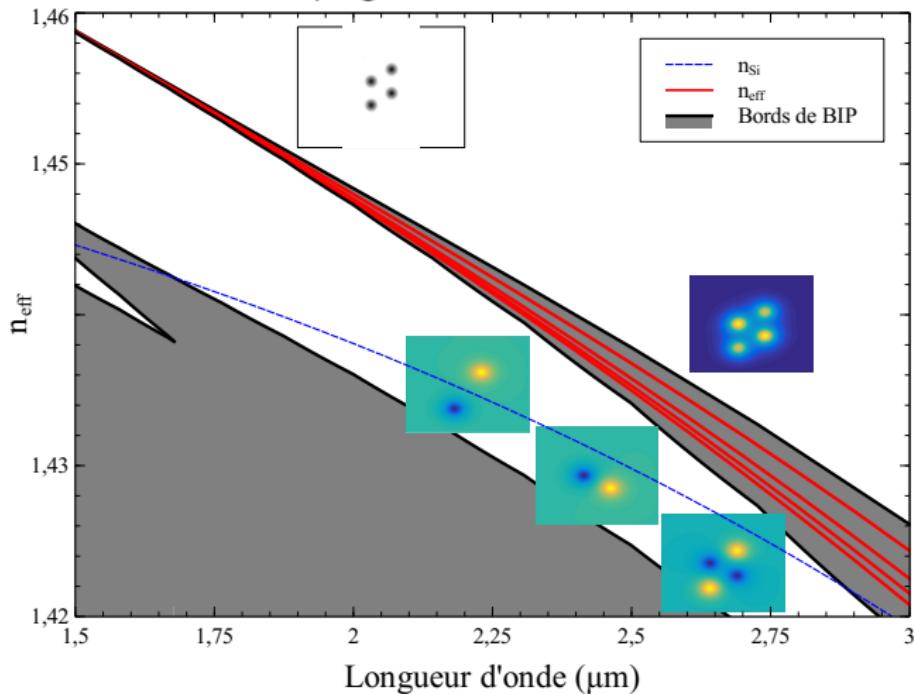
Origine des BIP

Supermodes issus du couplage du mode fondamental d'une inclusion



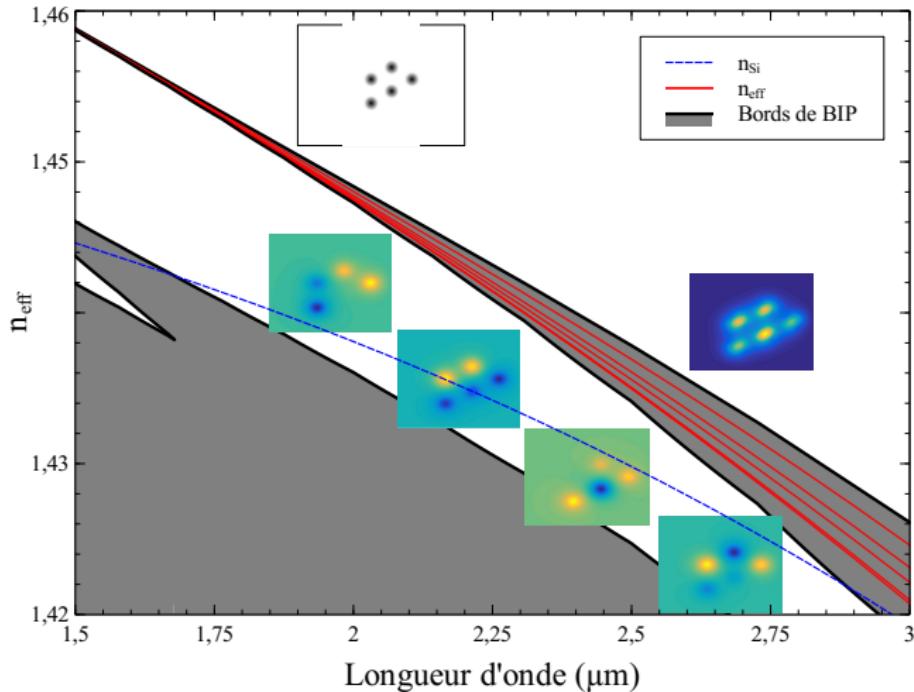
Origine des BIP

Supermodes issus du couplage du mode fondamental d'une inclusion



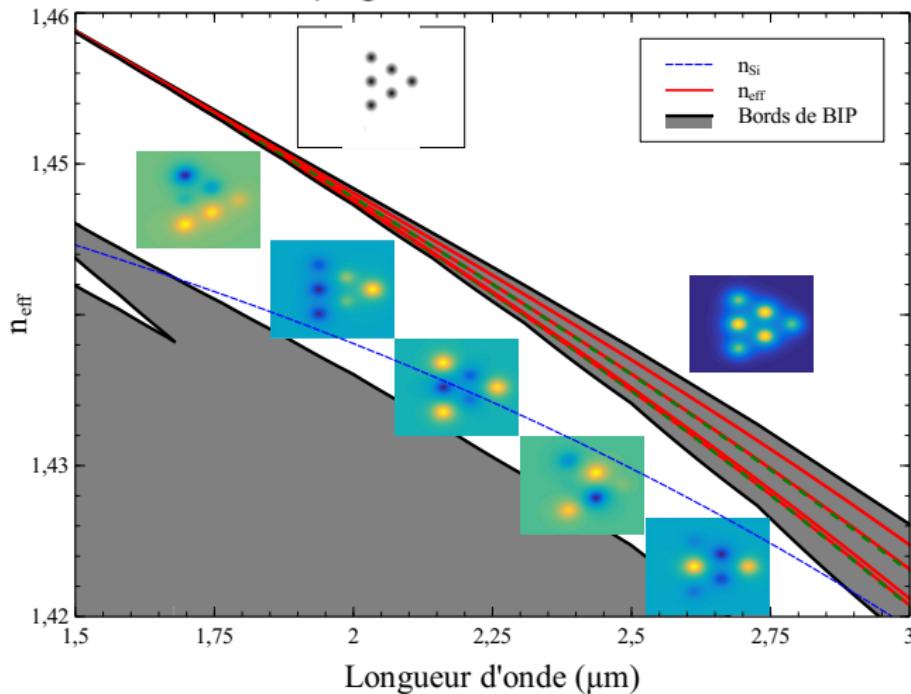
Origine des BIP

Supermodes issus du couplage du mode fondamental d'une inclusion



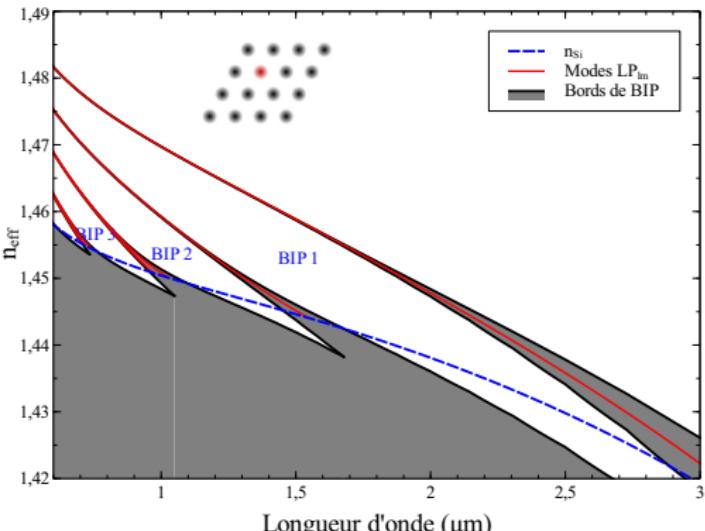
Origine des BIP

Supermodes issus du couplage du mode fondamental d'une inclusion



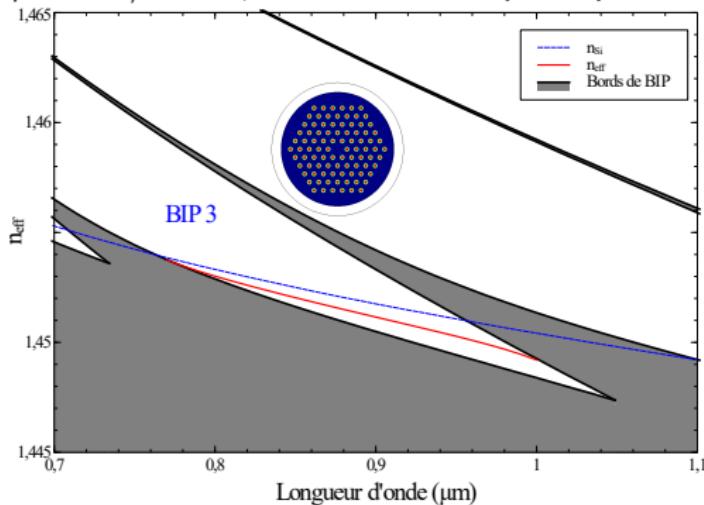
Origine des BIP

- Le nombre de supermodes est incrémenté de 1 à chaque ajout d'inclusion, mais l'écart entre les indices effectifs est de plus en plus faible
- Avec un nombre infini d'inclusions, on obtient une bande autorisée de largeur finie centrée sur le mode d'une inclusion unique



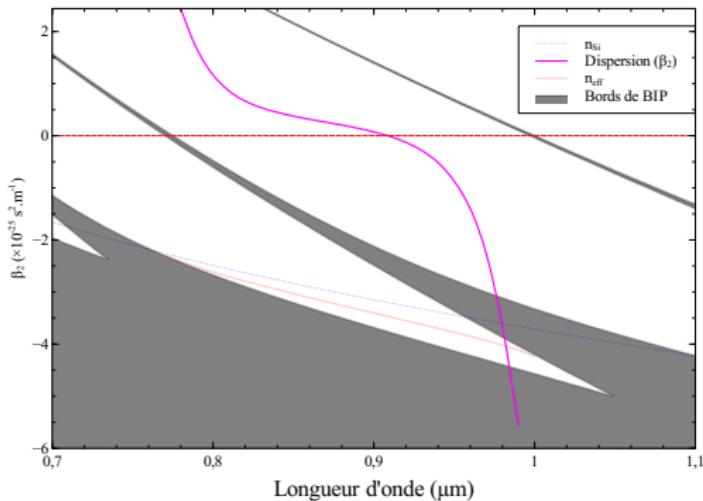
Propriétés des modes de cœur

Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



Propriétés des modes de cœur

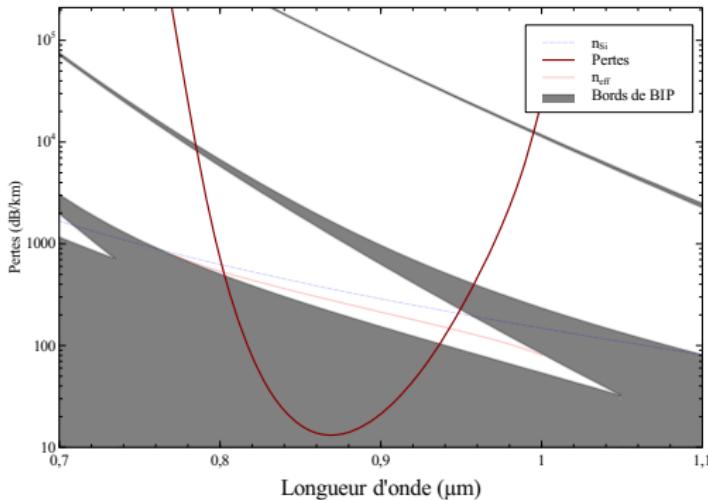
Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



- Un zéro de dispersion dans chaque BIP

Propriétés des modes de cœur

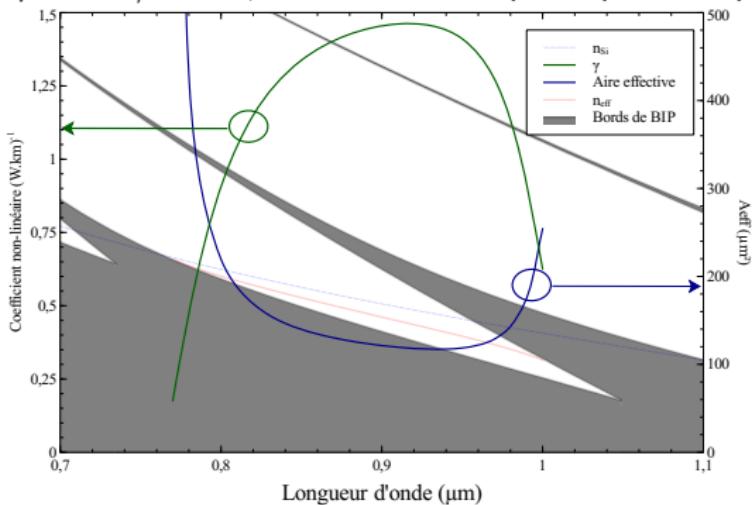
Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



- Un zéro de dispersion dans chaque BIP
- Forte augmentation des pertes et de l'aire effective au niveau des bords de bandes

Propriétés des modes de cœur

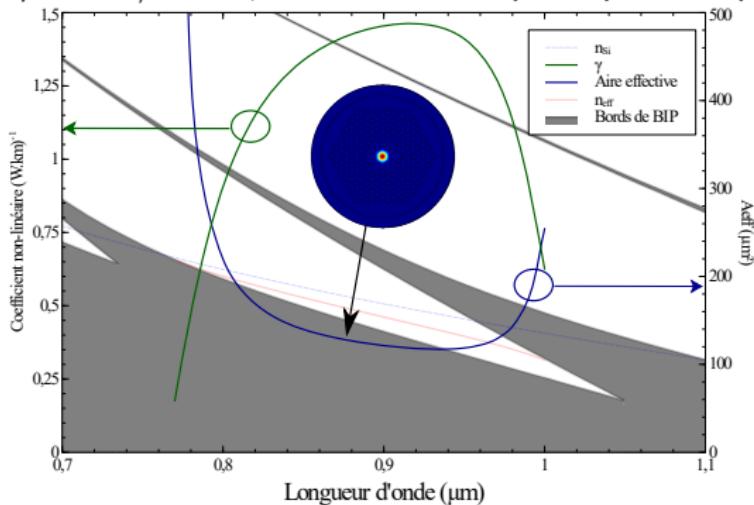
Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



- Un zéro de dispersion dans chaque BIP
- Forte augmentation des pertes et de l'aire effective au niveau des bords de bandes

Propriétés des modes de cœur

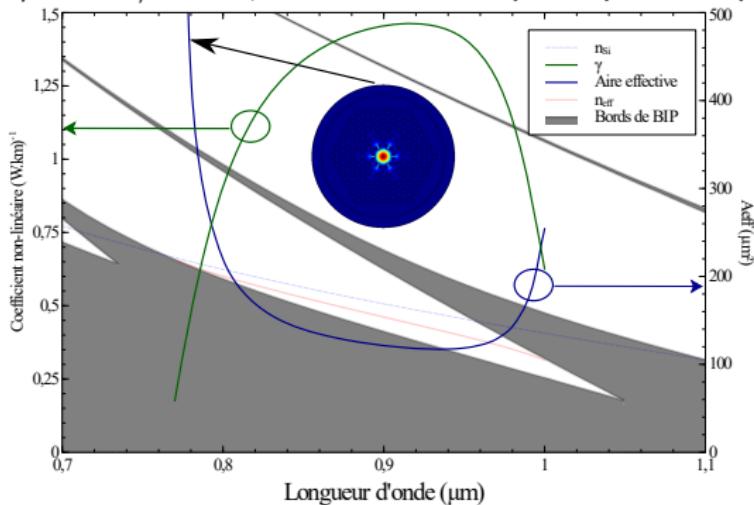
Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



- Un zéro de dispersion dans chaque BIP
- Forte augmentation des pertes et de l'aire effective au niveau des bords de bandes

Propriétés des modes de cœur

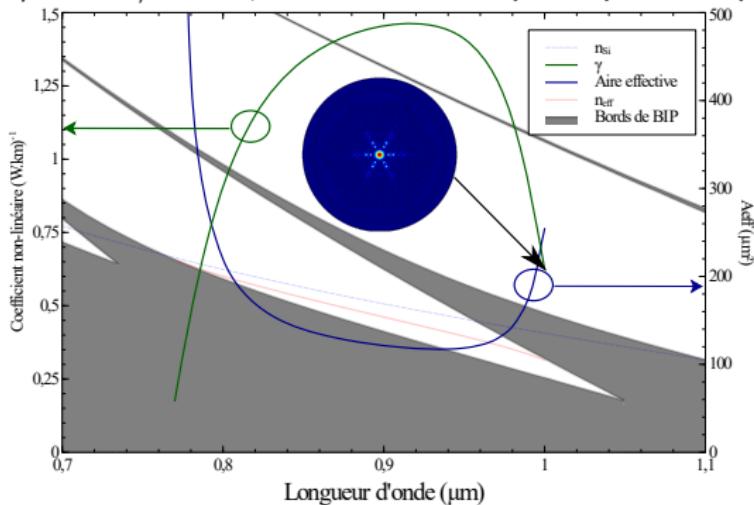
Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



- Un zéro de dispersion dans chaque BIP
- Forte augmentation des pertes et de l'aire effective au niveau des bords de bandes

Propriétés des modes de cœur

Exemple : $\Lambda = 10\mu\text{m}$; $D/\Lambda = 0,6$; inclusions à profil parabolique $\Delta n_{max} = 0,030$



- Un zéro de dispersion dans chaque BIP
- Forte augmentation des pertes et de l'aire effective au niveau des bords de bandes

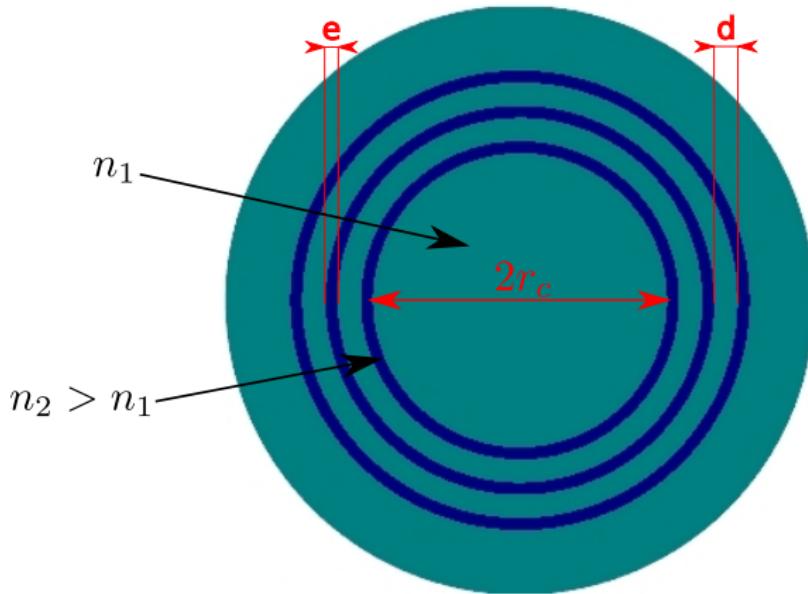
1 Modes à fuite

- Définition
- PML
- Fibres courbées
- Fibres torsadées

2 Fibres microstructurées

- Fibre à haut indice de cœur : guidage par RTIM
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par BIP
 - Fibre à cœur creux
 - Fibres BIP toute solides
- Fibre à bas indice de cœur : guidage par couplage inhibé

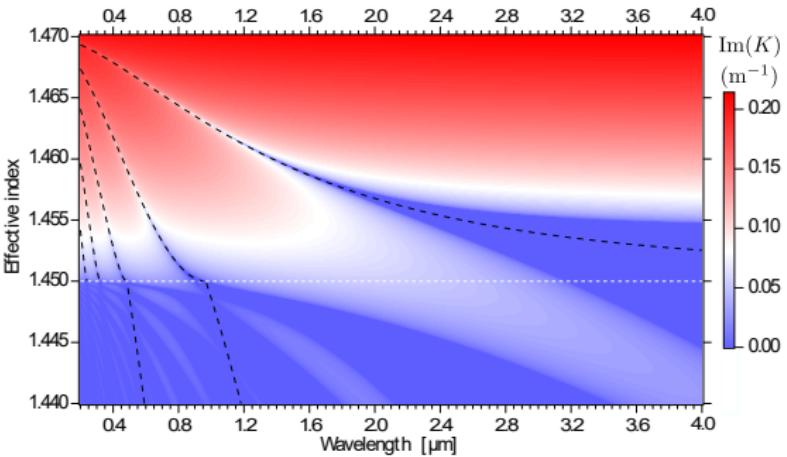
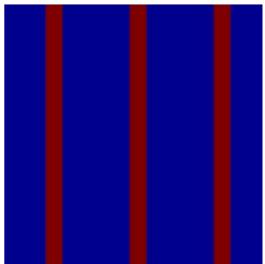
Fibre de Bragg



Approximation du guide plan

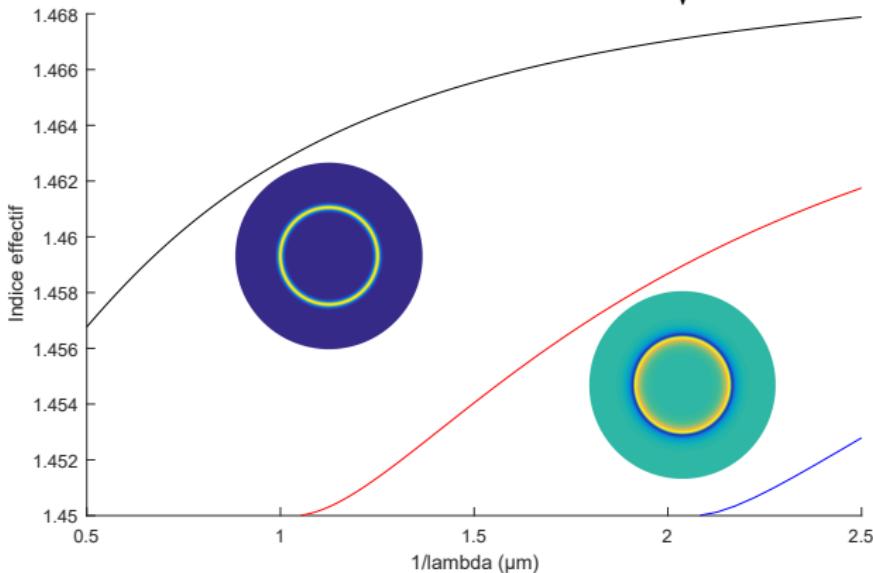
- Anneaux de haut indice approximés par un guide plan car $r_c \gg e$
- Longueur d'onde de coupure du guide plan : $\lambda_m = \frac{2e}{m} \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$ avec m entier.
- Présence de BIP dans la structure périodique infinie

$e = 2 \mu\text{m}$; $d = 8 \mu\text{m}$
 $n_1 = 1,45$; $n_2 = 1,47$



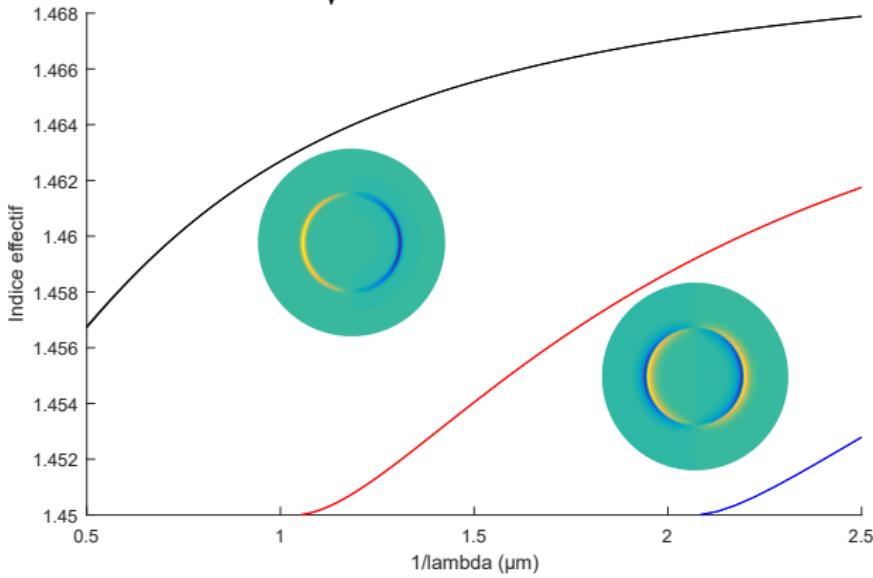
Modes d'anneau de haut indice ($R \gg e$)

Modes $LP_{0,x} \equiv$ mode de guide plan : $\beta \simeq \sqrt{k^2 - k_{r,m}^2}$



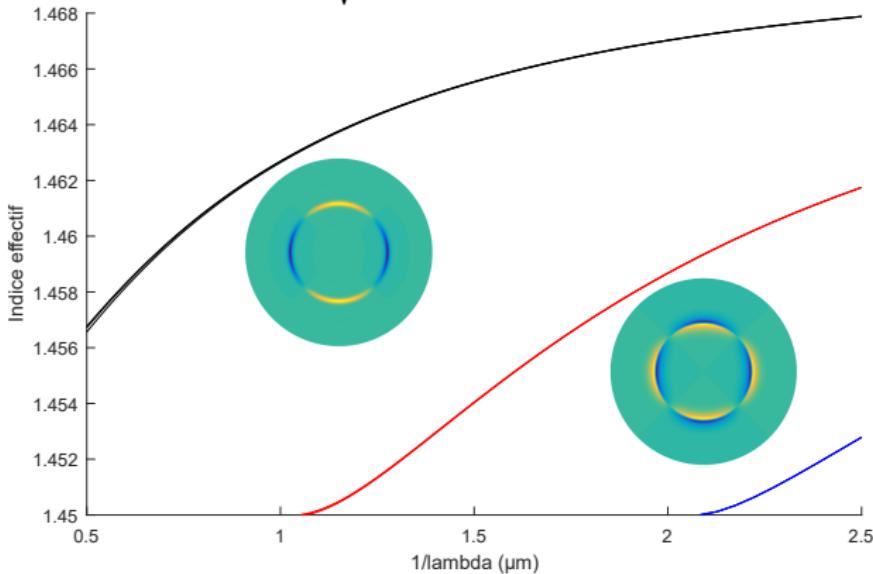
Modes d'anneau de haut indice ($R \gg e$)

Modes LP_{1,x} : $\beta \simeq \sqrt{k^2 - k_{r,m}^2 - k_\theta^2}$ with $k_\theta \simeq \frac{1}{R+e/2}$



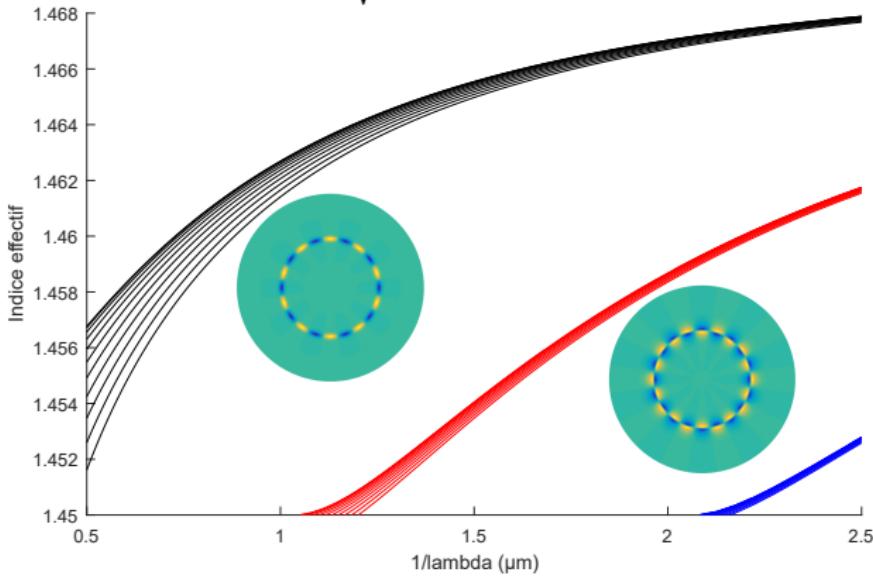
Modes d'anneau de haut indice ($R \gg e$)

Modes LP_{2,x} : $\beta \simeq \sqrt{k^2 - k_{r,m}^2 - k_\theta^2}$ with $k_\theta \simeq \frac{2}{R+e/2}$



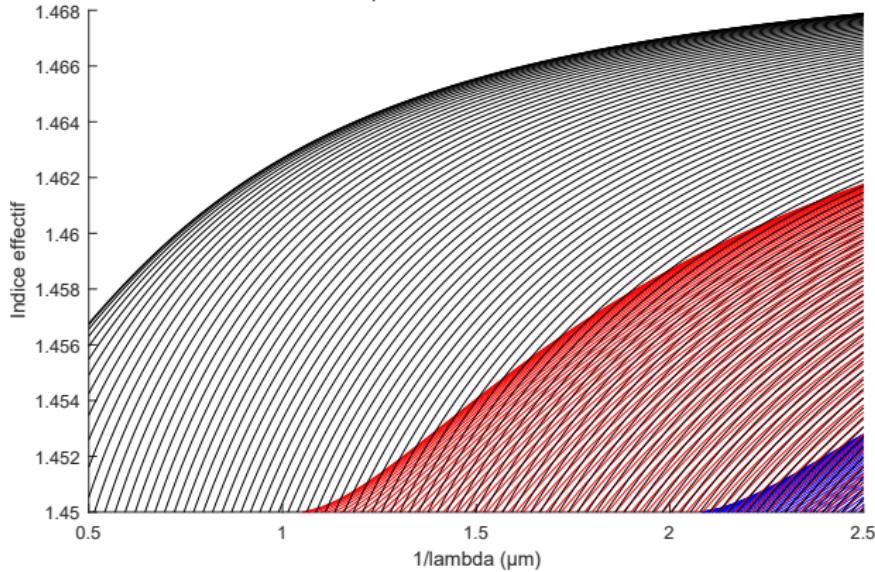
Modes d'anneau de haut indice ($R \gg e$)

Modes LP_{10,x} : $\beta \simeq \sqrt{k^2 - k_{r,m}^2 - k_\theta^2}$ with $k_\theta \simeq \frac{10}{R+e/2}$



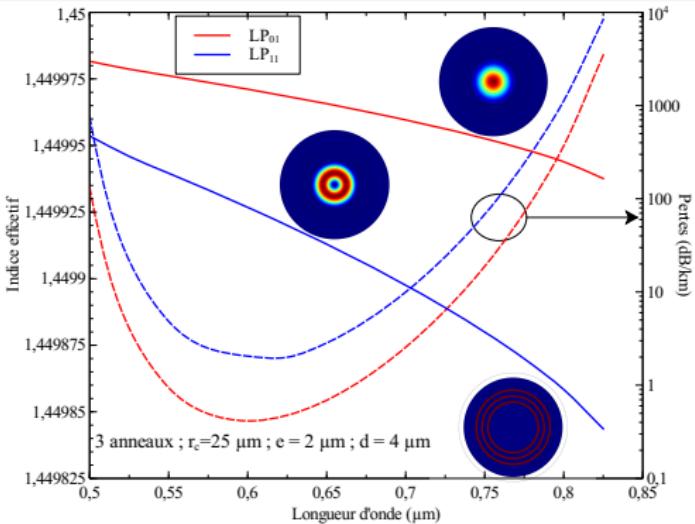
Modes d'anneau de haut indice ($R \gg e$)

Modes LP _{ℓ,m} : $\beta \simeq \sqrt{k^2 - k_{r,m}^2 - k_\theta^2}$ with $k_\theta \simeq \frac{\ell}{R+e/2}$



→ Pas de BIP si la gaine est constitués d'anneaux

Modes de cœur



→ Absence de BIP mais existence de modes de cœur!

Remarque : l'indice effectif du mode de cœur $LP_{\ell m}$ est $n_{\text{eff}}^{\ell m} \simeq \sqrt{n_1^2 - \left(\frac{u_{\ell m}}{k_0 r_c}\right)^2}$
où $u_{\ell m}$ est le m^{ième} zéro non nul de la fonction J_ℓ

Explication

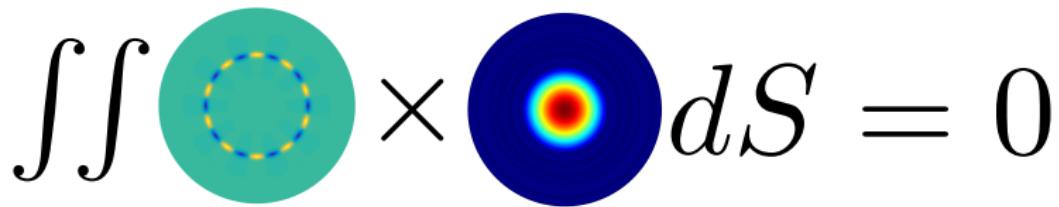
Conditions pour que deux modes se couplent :

- Egalité des indices effectifs
- Intégrale de recouvrement non nulle

Explication

Conditions pour que deux modes se couplent :

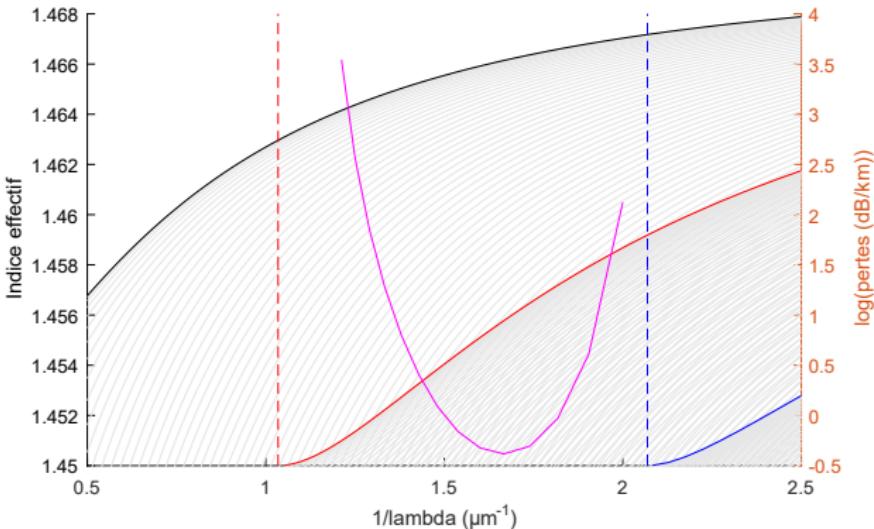
- Egalité des indices effectifs
- Intégrale de recouvrement non nulle



- L'intégrale de recouvrement entre le mode LP_{01} de cœur avec les modes $LP_{l \neq 0, m}$ des anneaux est nul par symétrie.

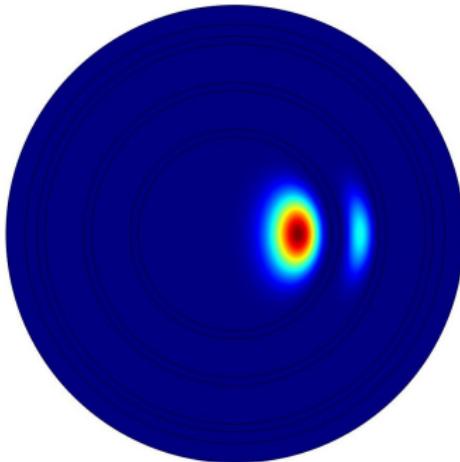
Explication

- Fenêtres de transmission délimitées par les cut-off des modes $LP_{0,m}$ d'anneaux



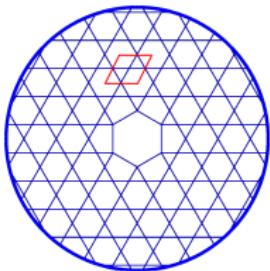
Un inconvénient

- Lorsque la fibre est courbée, le mode de cœur se déforme et perd sa symétrie. Il peut alors se coupler avec des modes de gaine et ses pertes augmentent fortement

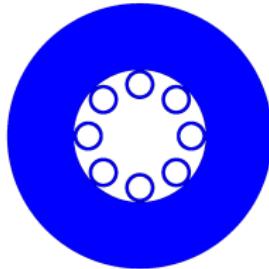


Autres types de fibres guidant par couplage inhibé

- Fibres Kagomé

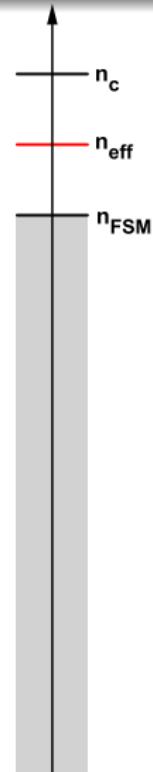


- Fibres à cœur creux tubulaires



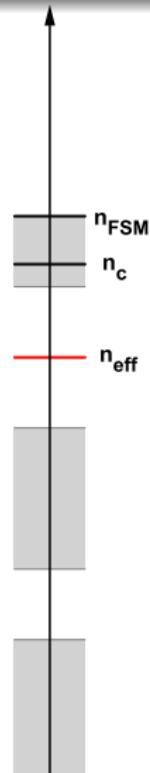
Conclusion

Guidage	Principe
RTI et RTIM	Indice effectif du mode guidé supérieur à ceux de tous les modes de gaine



Conclusion

Guidage	Principe
RTI et RTIM	Indice effectif du mode guidé supérieur à ceux de tous les modes de gaine
BIP	Indice effectif du mode de cœur différent de celui des modes de gaine



Conclusion

Guidage	Principe
RTI et RTIM	Indice effectif du mode guidé supérieur à ceux de tous les modes de gaine
BIP	Indice effectif du mode de cœur différent de celui des modes de gaine
Couplage inhibé	Indice effectif du mode de cœur différent de celui des modes de gaine qui peuvent se coupler avec lui (intégrale de recouvrement nulle)

