



Étalons de fréquence optique à base de fibres microstructurées à cœur creux

Benoît Debord

Thomas Billotte

GPPMM group, Institut de recherche XLIM, Université de Limoges, UMR CNRS 7252

benoit.debord@xlim.fr

[Contact : Fetah Benabid f.benabid@xlim.fr](mailto:f.benabid@xlim.fr)



DURAND FLORENCE/SIPA

Introduction

- Besoins importants de références de fréquences pour de nombreuses applications

« Métrologiques » Appliquées/industrielles
(définition de la seconde...)

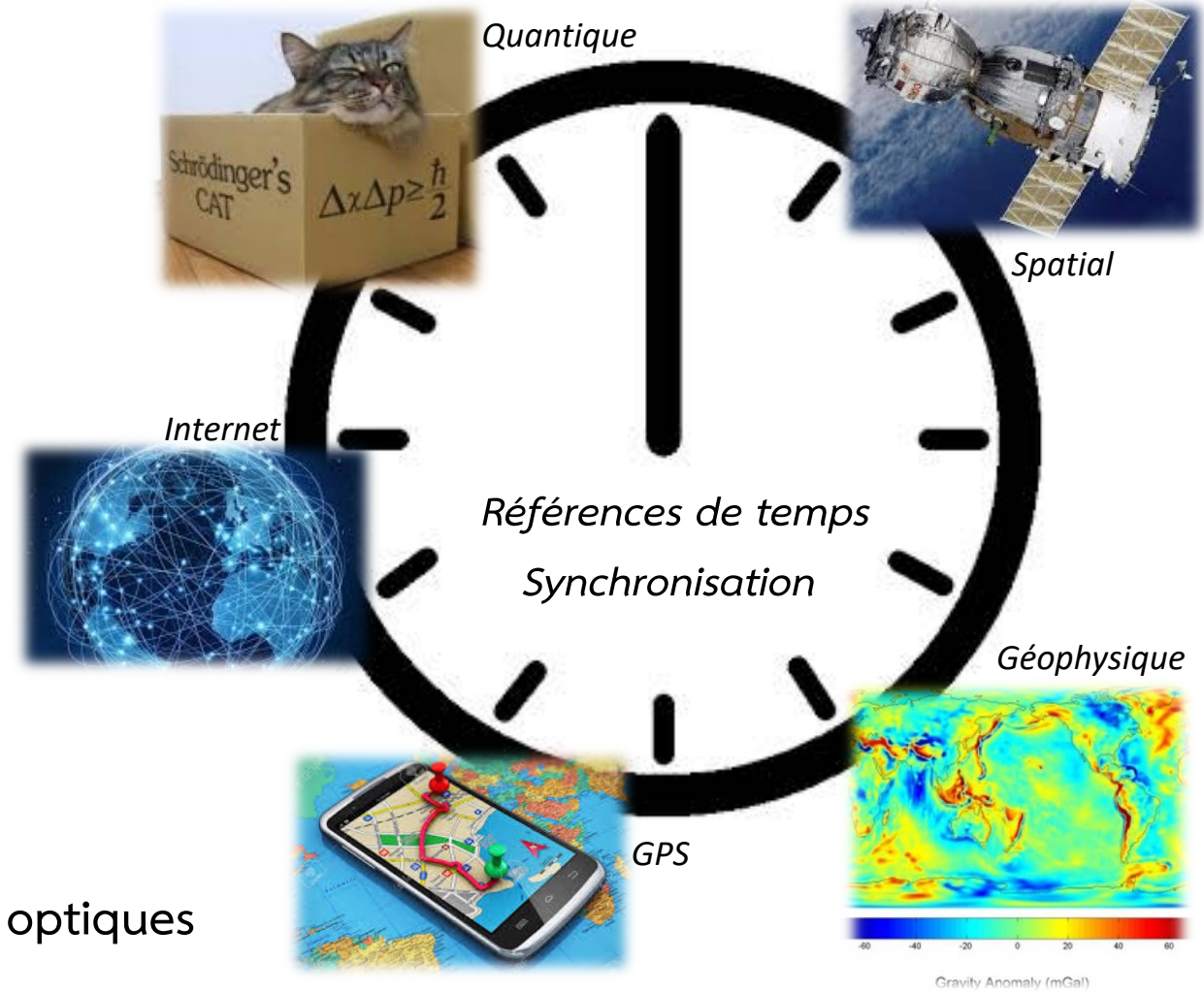
- Horloges atomiques : microondes et optiques
- Horloges optiques grâce aux lasers et techniques associées (atomes froids...).
- Intérêt grandissant pour les **références de fréquences optiques**

Actives

Passives

Source laser de fréquence connue et stabilisée

Système avec une réponse en fréquence bien définie (intégrable pour concevoir une référence « active ») : Etalons



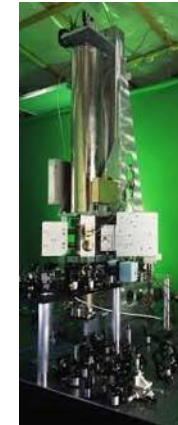
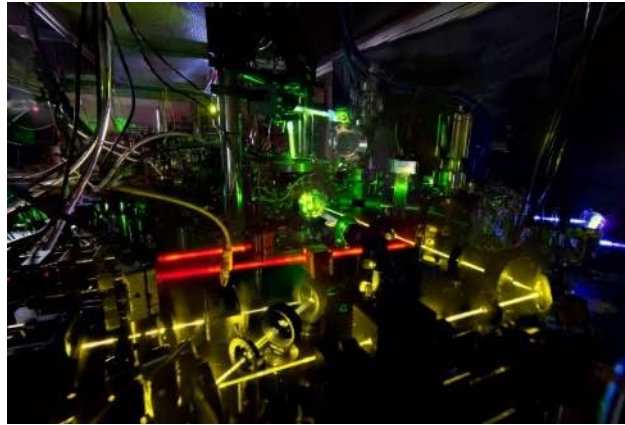
- Recherche en métrologie des fréquences

=> vers conception d'horloges **de plus en plus stables et exactes**

Performances / Etat de l'art

Instabilité en fréquence : 10^{-18}

Nicholson *et al.*, Nat. Comm., vol. 6,
6896, 2015



Horloge optique à base d'atomes froids *Fontaine atomique*



Système sur table optique encombrant
Difficilement transférable

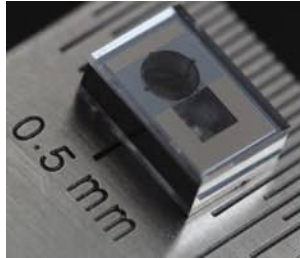
- Applications embarquées

=> vers miniaturisation et intégration de références de fréquences optiques (horloges) et étalons de fréquences

- Applications industrielles / Capteurs / Communication
=> vers miniaturisation et intégration de références de fréquences optiques (horloges) et étalons de fréquences **compactes**

Cellule de gaz miniatures

Cs cell, Femto ST (2007)

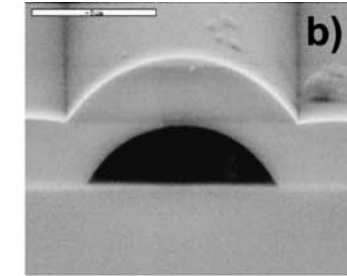
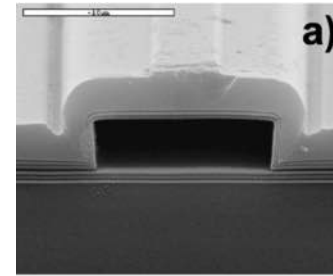


Stabilité de fréquence $4 \cdot 10^{-12}$ @1s

Chip scale atomic clock, Microchip



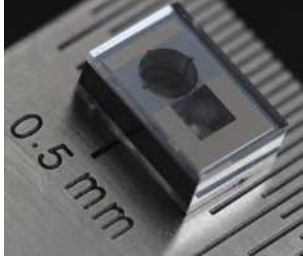

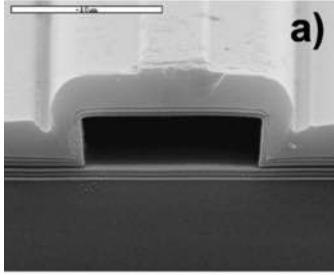
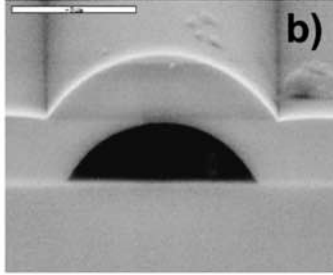
10^{-11} @1000s



Guide d'onde intégrés

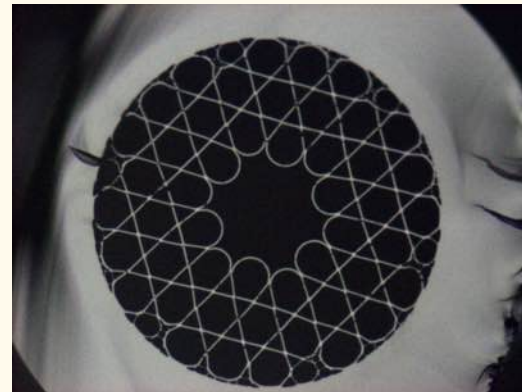
- Applications industrielles / Capteurs / Communication

=> vers miniaturisation et intégration de références de fréquences optiques (horloges) et étalons de fréquences **compactes**

Cellule de gaz miniatures	<i>Cs cell, Femto ST (2007)</i> 	<i>Chip scale atomic clock, Microchip</i> 			Guide d'onde intégrés
	Stabilité de fréquence 4.10^{-12} @1s	10^{-11} @1000s			

Fibre à cristal photonique à cœur creux

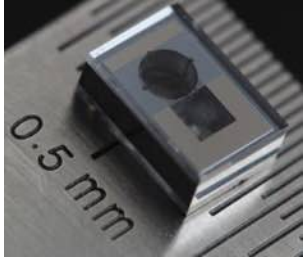

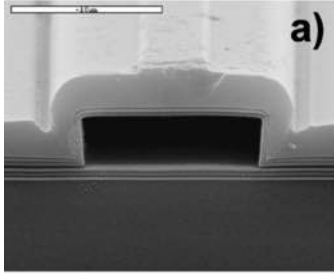
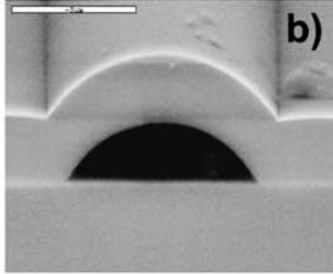
- Guide d'onde optique
- Conteneur de gaz (atomique ou moléculaires)
- « Photonic microcell » PMC :
 - Hermétisation du gaz
 - Compacité
 - Intégration tout fibré



Plateforme idéale pour le développement d'étalons de fréquences optiques

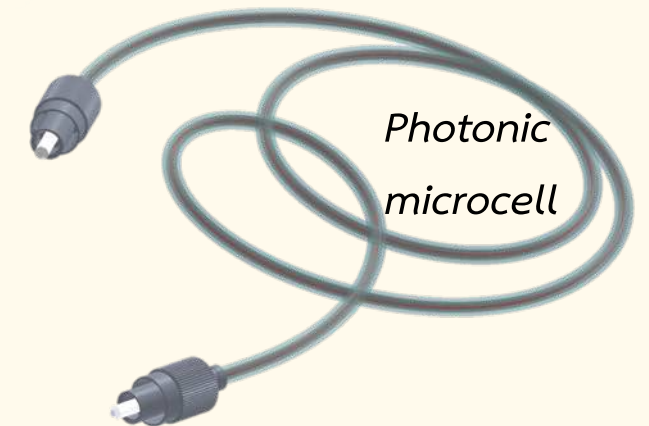
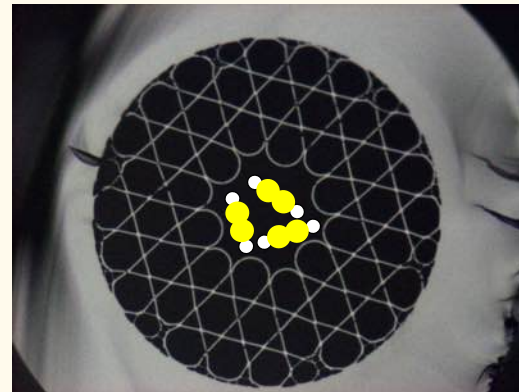
- Applications industrielles / Capteurs / Communication

=> vers miniaturisation et intégration de références de fréquences optiques (horloges) et étalons de fréquences **compactes**

Cellule de gaz miniatures	<i>Cs cell, Femto ST (2007)</i> 	<i>Chip scale atomic clock, Microchip</i> 			Guide d'onde intégrés
	Stabilité de fréquence 4.10^{-12} @1s	10^{-11} @1000s			

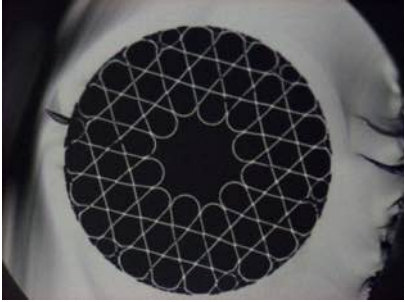
Fibre à cristal photonique à cœur creux

- Guide d'onde optique
- Conteneur de gaz (atomique ou moléculaires)
- « Photonic microcell » PMC :
 - Hermétisation du gaz
 - Compacité
 - Intégration tout fibré



Plateforme idéale pour le développement d'étalons de fréquences optiques

Fibres à cristal photonique à cœur creux remplies de gaz : outil pour la métrologie



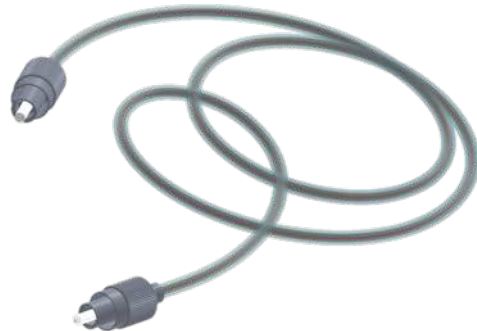
Familles de fibres creuses (bande interdite photonique, couplage inhibé)

Mécanismes de guidage

Performances optiques, caractérisation et limites

Avantages et inconvénients pour étalons de fréquence

Développement de « Photonic Microcell » pour références de fréquence



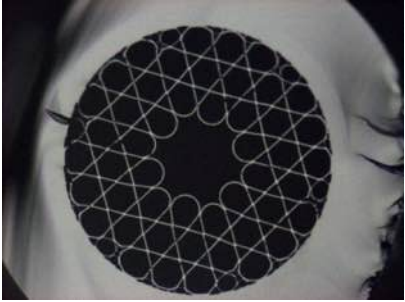
Définition d'une PMC « Photonic microcell » et les différentes variétés

Méthodes de fabrication

Conception d'étalon de fréquence optique

Application : stabilisation de faisceau laser

Fibres à cristal photonique à cœur creux remplies de gaz : outil pour la métrologie



Familles de fibres creuses (bande interdite photonique, couplage inhibé)

Mécanismes de guidage

Performances optiques, caractérisation et limites

Avantages et inconvénients pour étalons de fréquence

Développement de « Photonic Microcell » pour références de fréquence



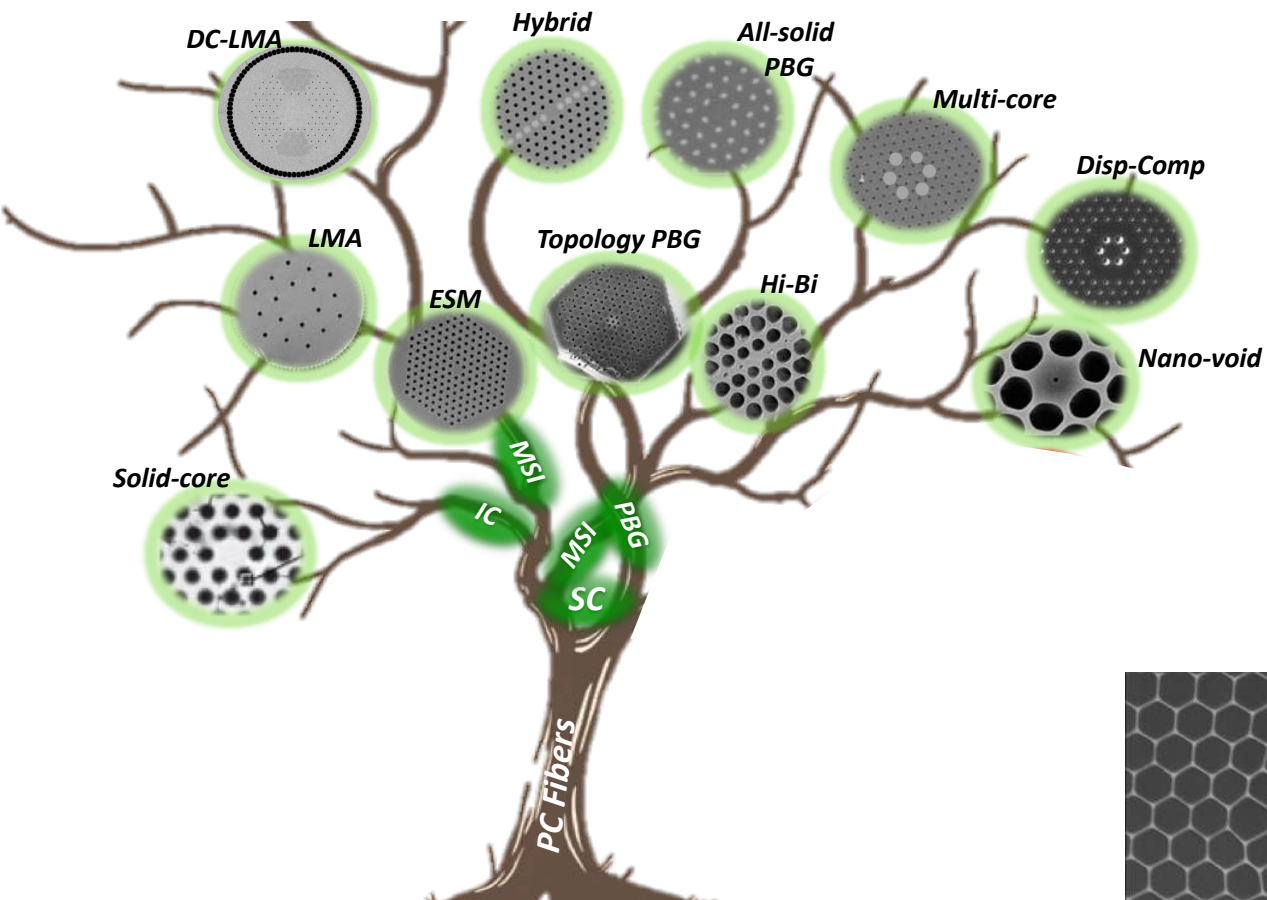
Définition d'une PMC « Photonic microcell » et les différentes variétés

Méthodes de fabrication

Conception d'étalon de fréquence optique

Application : stabilisation de faisceau laser

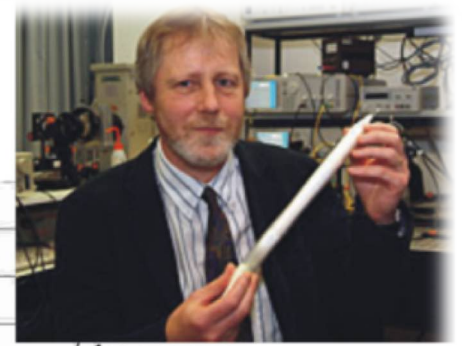
Fibres à cristal photonique



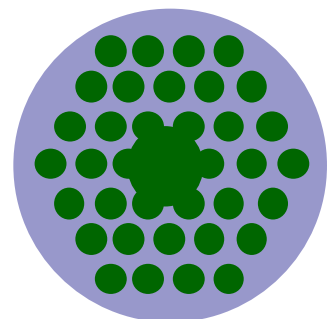
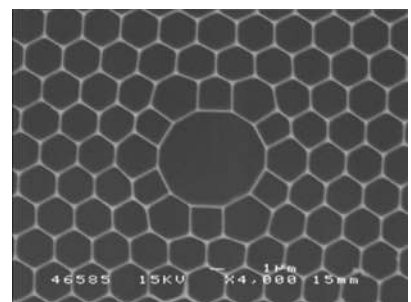
Proposal - Pr. P. Russell

13 mai 1991

P. Russell (Université de Bath, Angleterre)



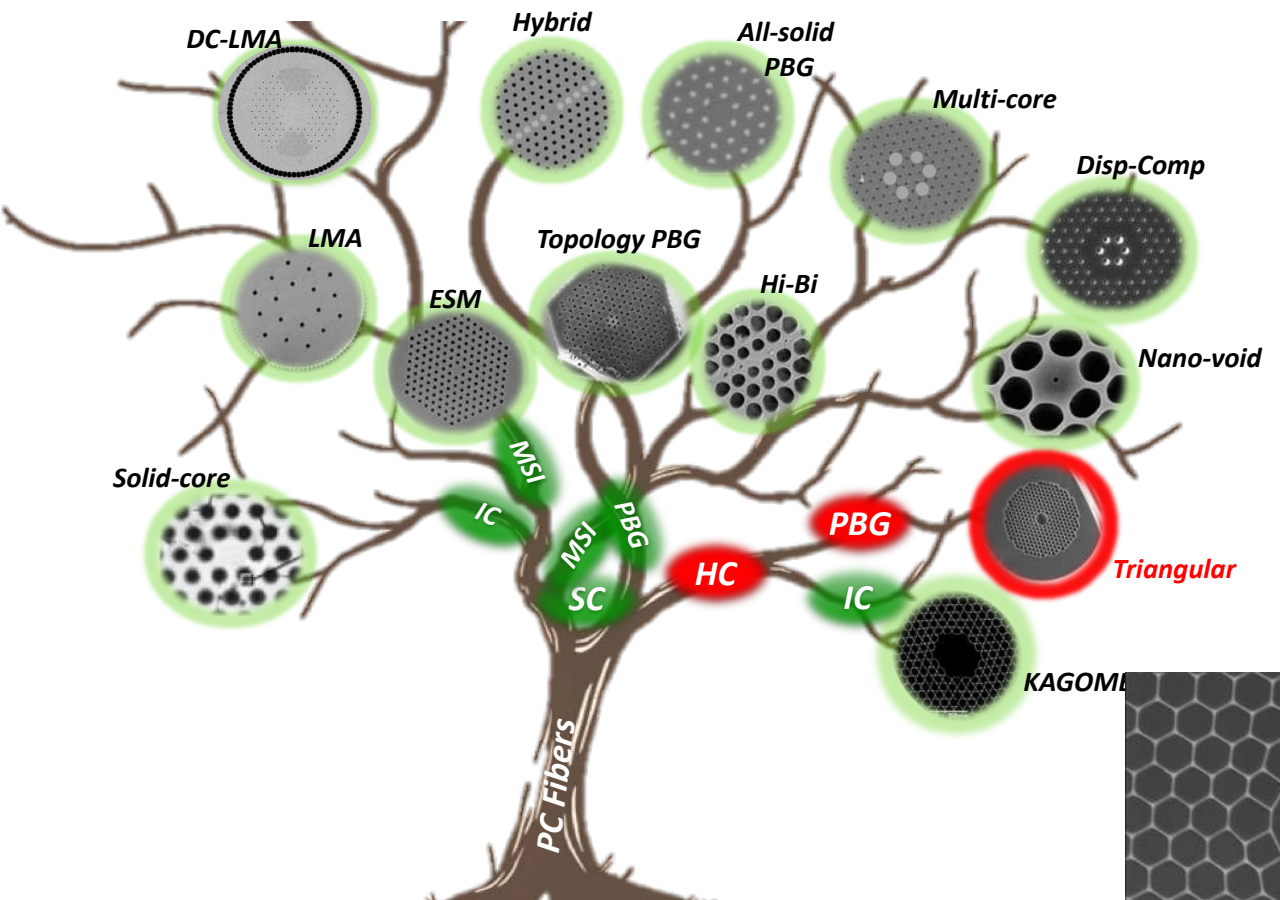
Proposal
 Soft glass $n > 2$
 preform with many holes
 pull \rightarrow structure with ϕ band gap laterally
 \rightarrow would guide? @ k
 \rightarrow like a metal!
 Structure with air core ϕ -band gap
 (or filled with cavity material) guides
 waveguide with vacuum core possible!
 Maybe good for ?? pumping guide int-laser



« Assemblage périodique d'inclusions (matériau A) au sein d'une matrice donnée (matériau B) »

- matériau A (n_1) \Rightarrow air
- matériau B (n_2) \Rightarrow silice

Fibres à cristal photonique à cœur creux

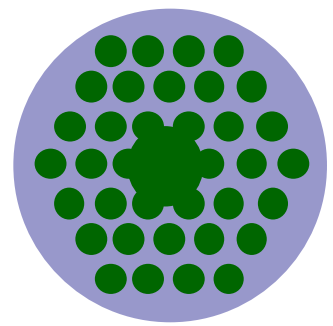
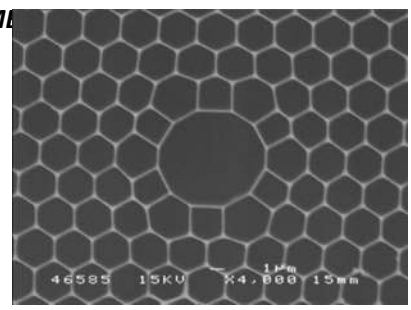


Proposal - Pr. P. Russell

13 mai 1991

P. Russell (Université de Bath, Angleterre)

Proposal
 Soft glass $n > 2$
 preform with many holes
 pull \rightarrow structure with ϕ band gap laterally
 \rightarrow would guide? @ λ
 \rightarrow like a metal!
 structure with air core ϕ -band gap
 (or filled with cavity material) guides
 waveguide with vacuum core possible!
 Maybe good for ??
 pumping guide int-laser

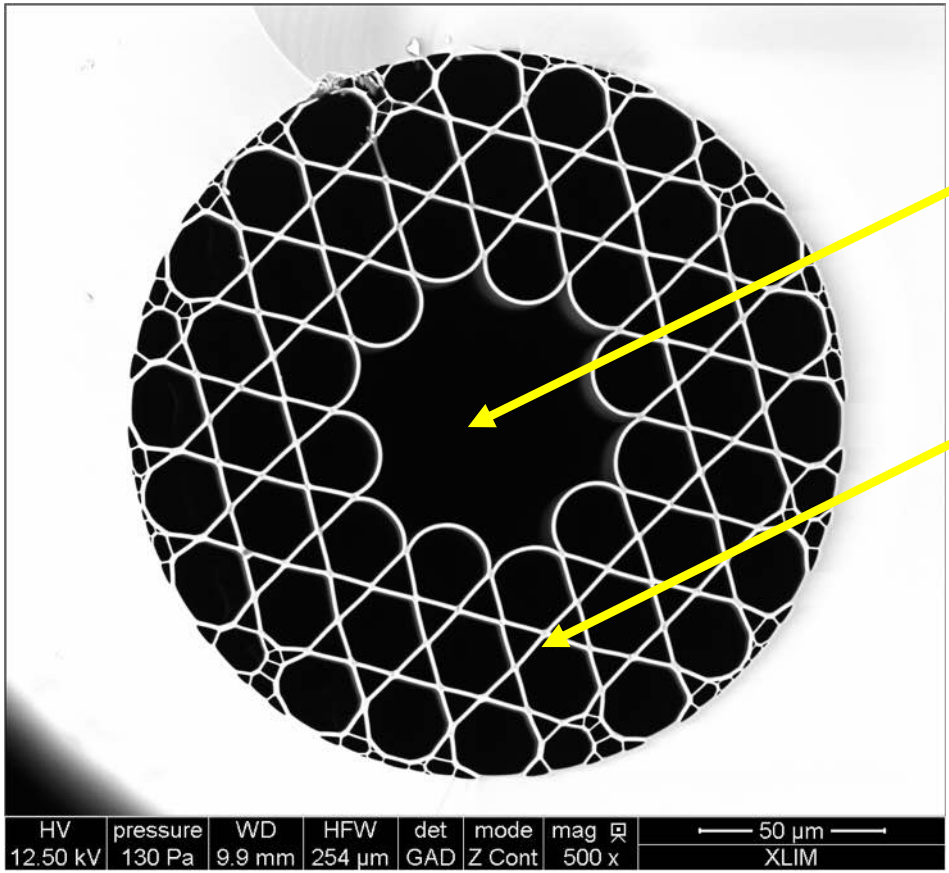


« Assemblage périodique d'inclusions (matériau A) au sein d'une matrice donnée (matériau B) »

- matériau A (n_1) \Rightarrow air
- matériau B (n_2) \Rightarrow silice

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Familles



Cœur creux

Gaine microstructurée
Air/Silice

2 FAMILLES

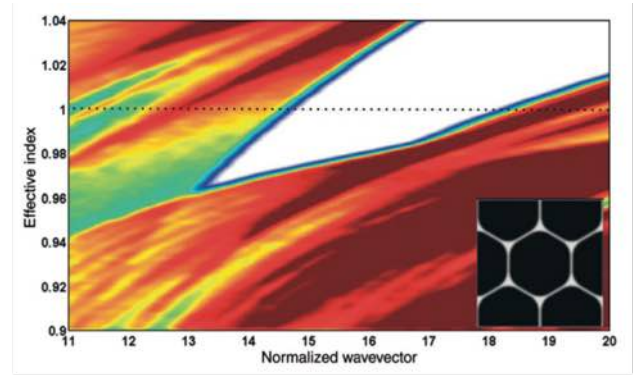
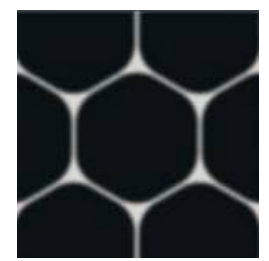
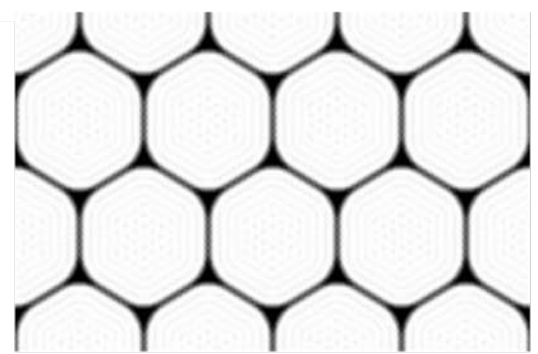
Guidage

Structure de la gaine

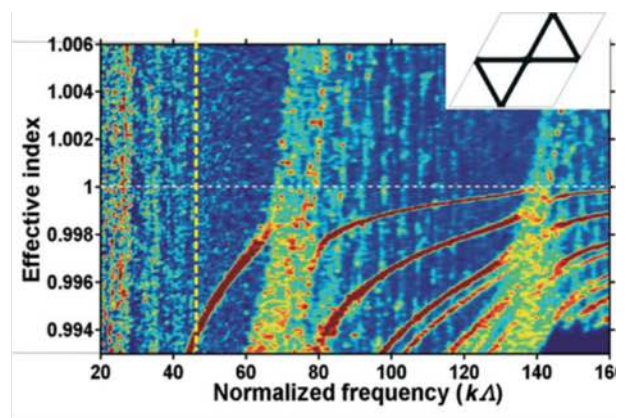
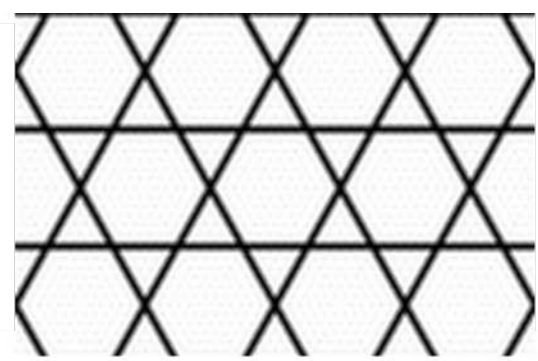
Cellule unitaire

Diagramme de densité d'états photoniques de la gaine

Fibres à bande interdite photonique

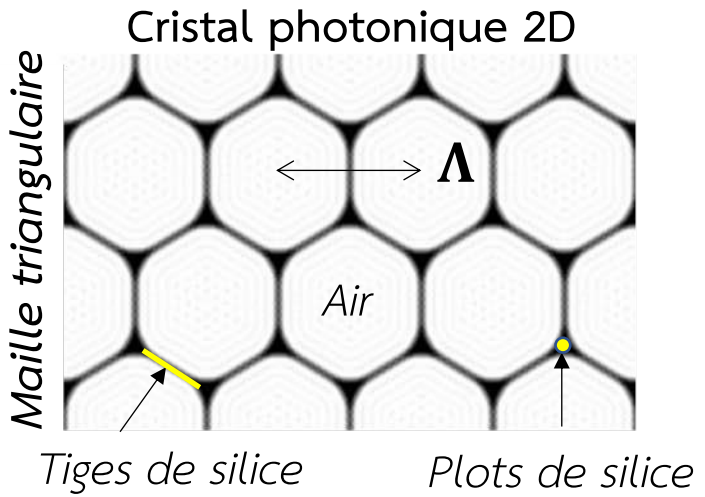


Fibres à couplage inhibé



Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)

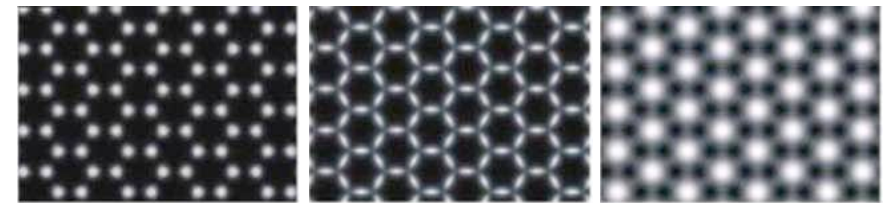
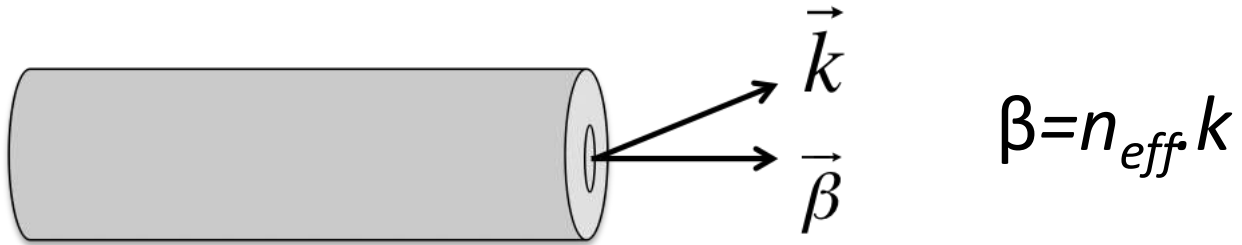
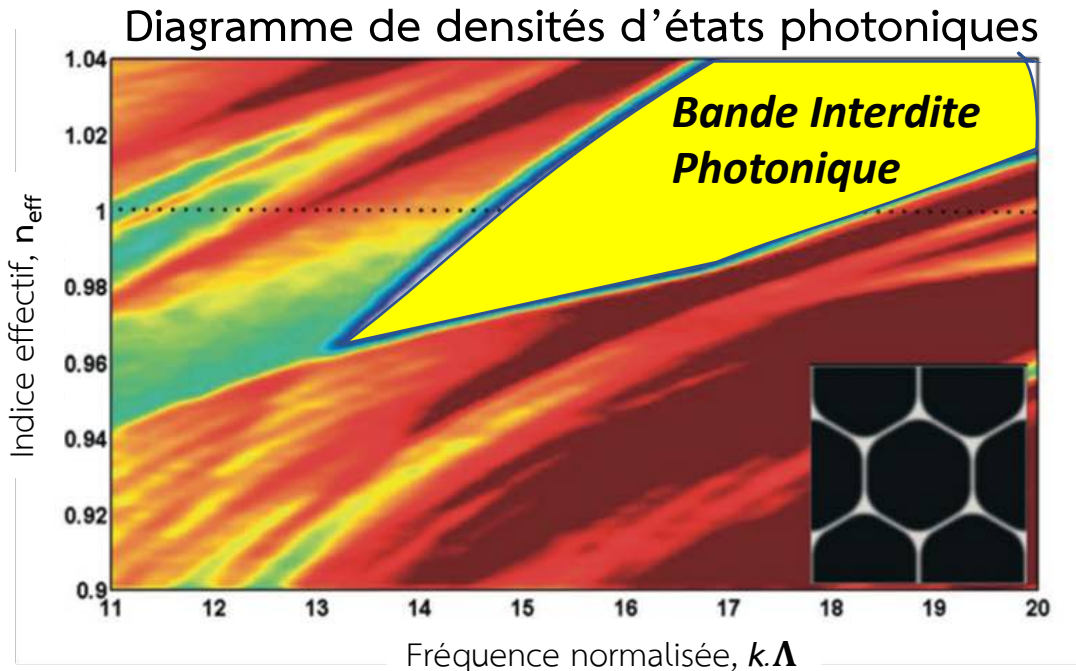


Simulation des modes supportées par la structure

Modes caractérisés par un couple (n_{eff}, k) ou (n_{eff}, ω)

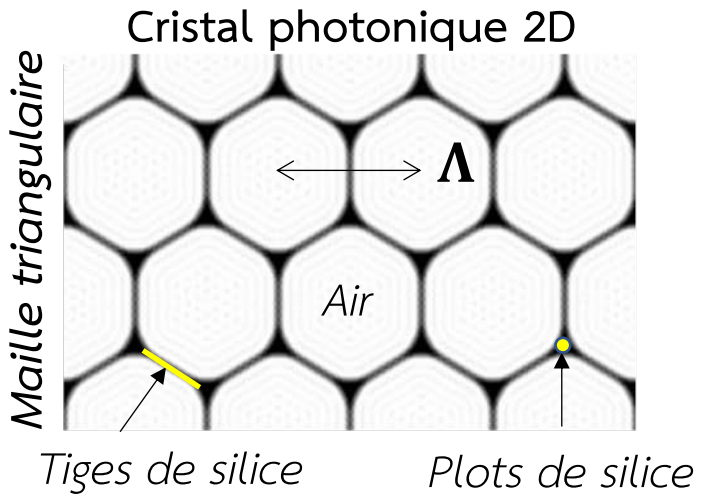
Indice effectif n_{eff}

Vecteur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)

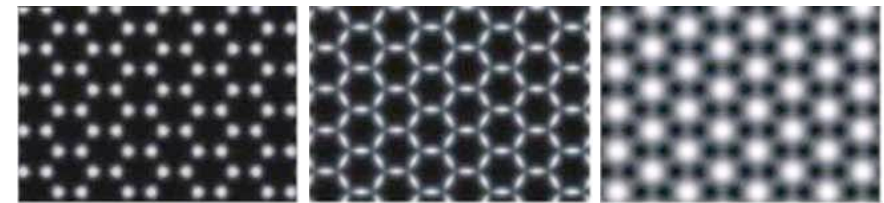
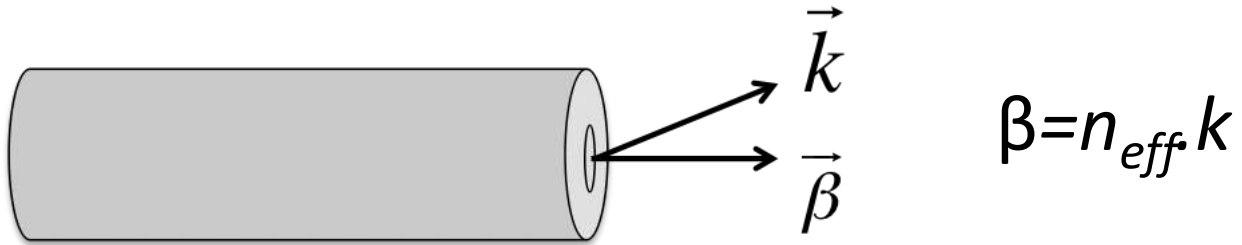
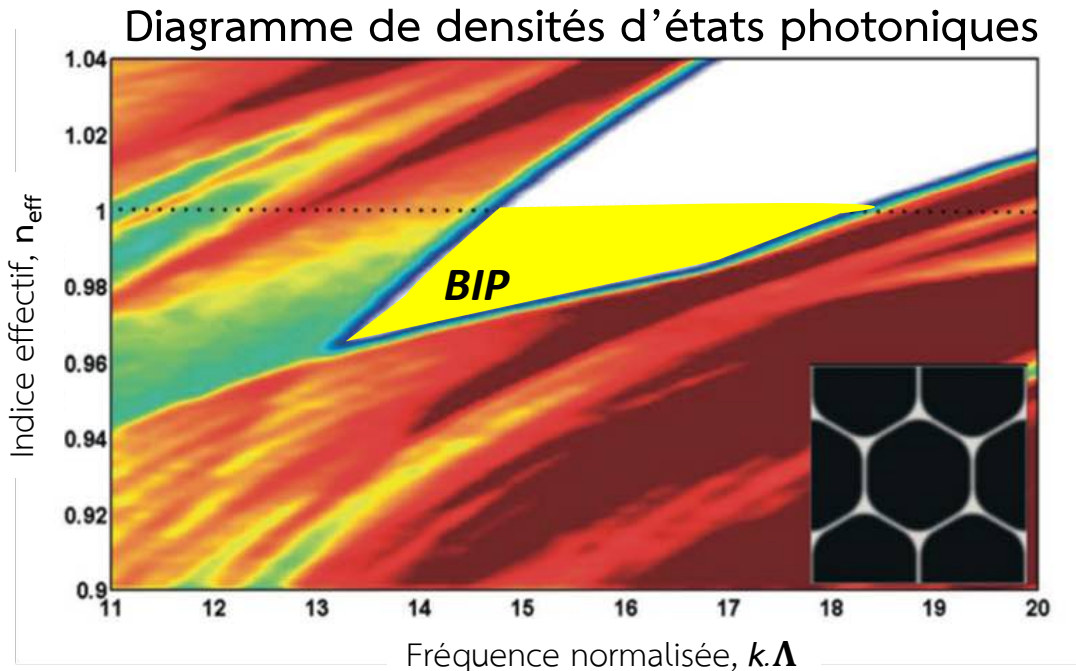


Simulation des modes supportées par la structure

Modes caractérisés par un couple (n_{eff}, k) ou (n_{eff}, ω)

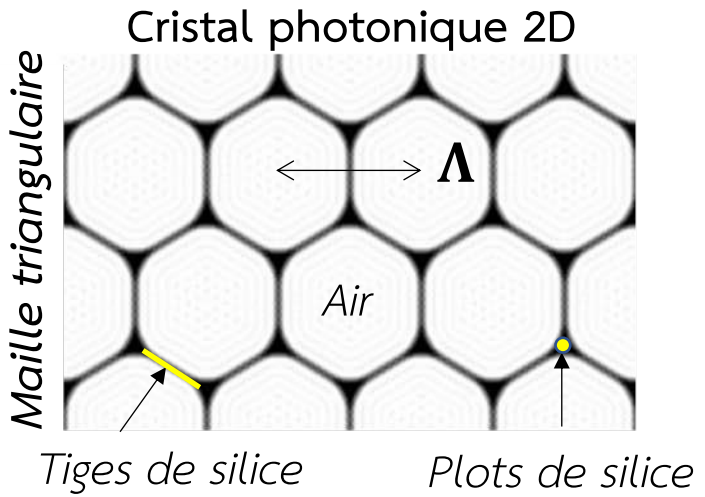
Indice effectif n_{eff}

Vecteur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



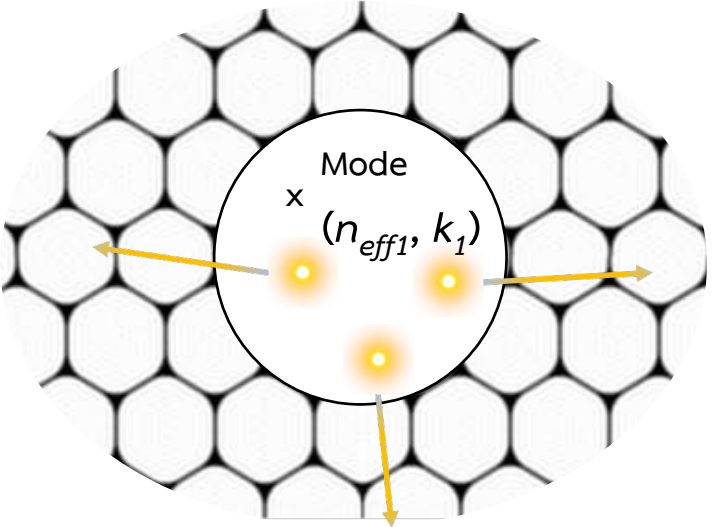
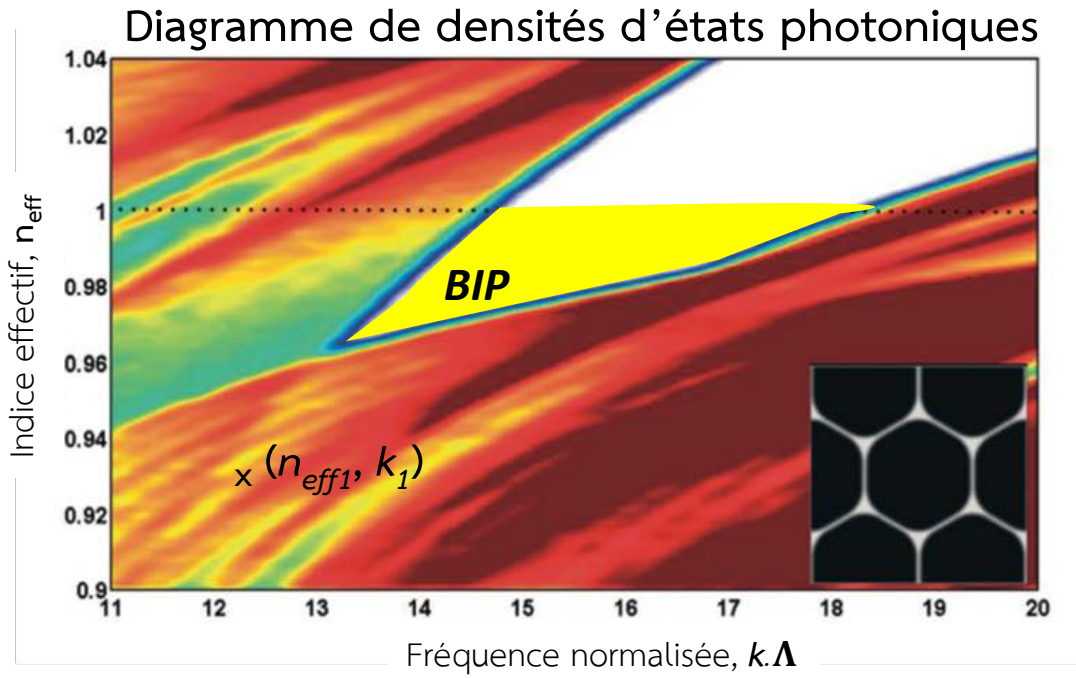
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)



Simulation des modes supportées par la structure

Modes caractérisés par un couple (n_{eff}, k) ou (n_{eff}, ω)
 Indice effectif n_{eff}
 Vecteur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

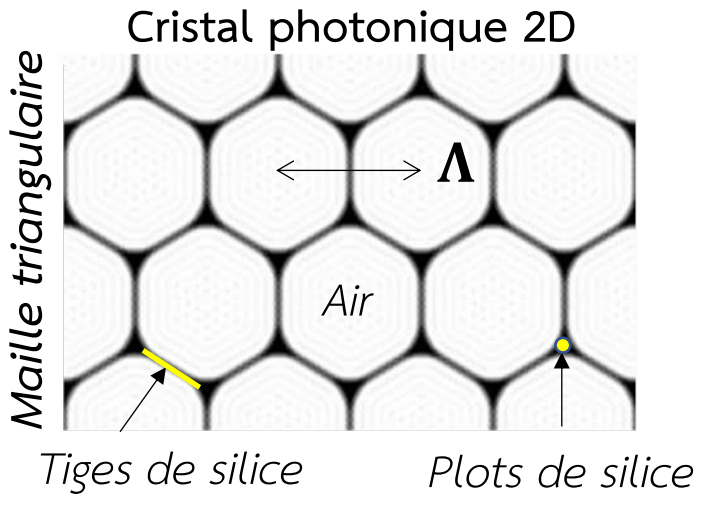


Indice mode de cœur = Indice mode de gaine

- ↳ Couplage modes cœur et gaine
- ↳ Pas de confinement

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)



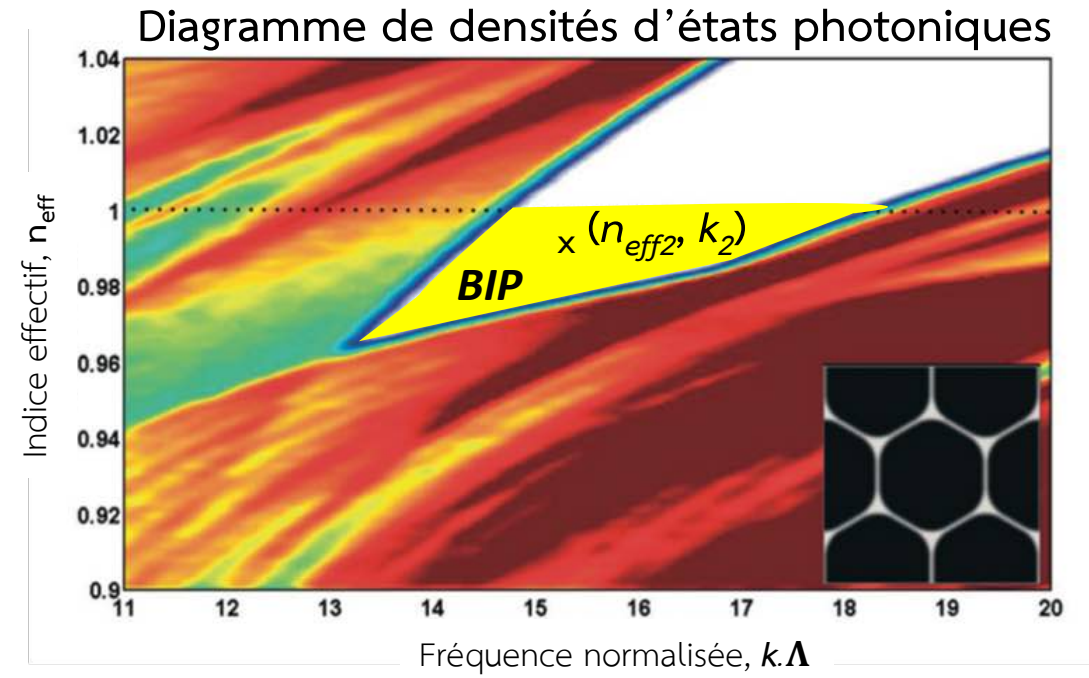
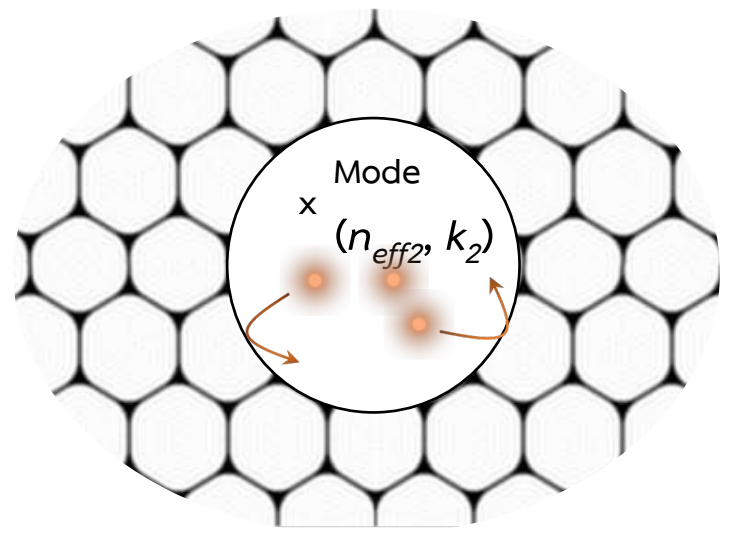
Simulation des modes supportées par la structure

➔

Modes caractérisés par un couple (n_{eff}, k) ou (n_{eff}, ω)

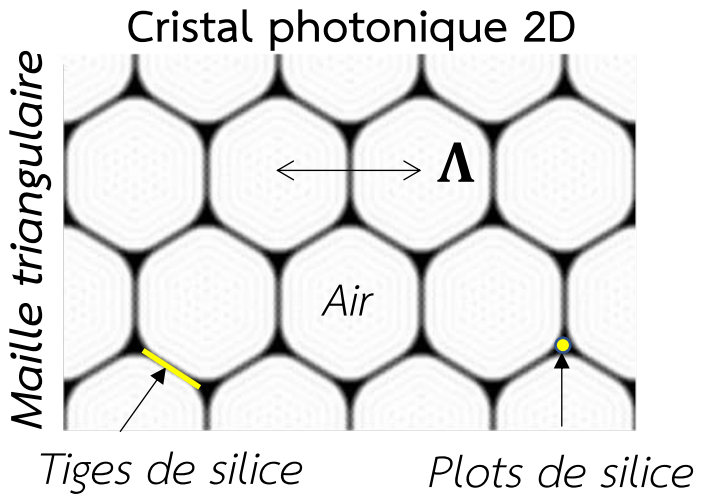
Indice effectif n_{eff}

Vecteur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)

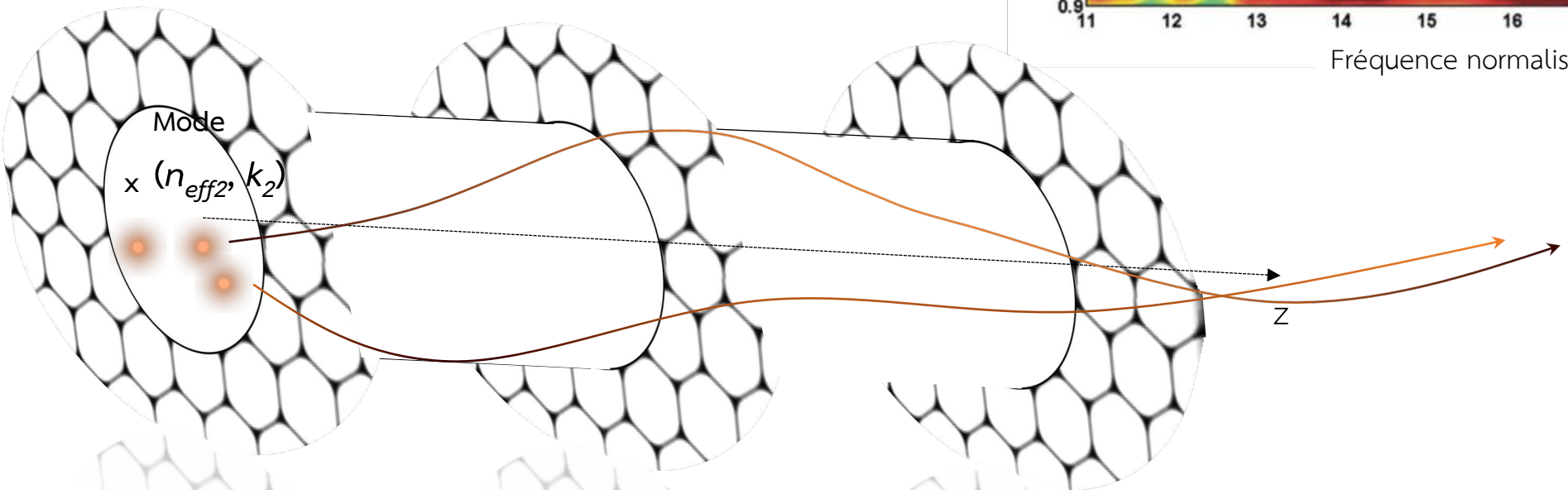
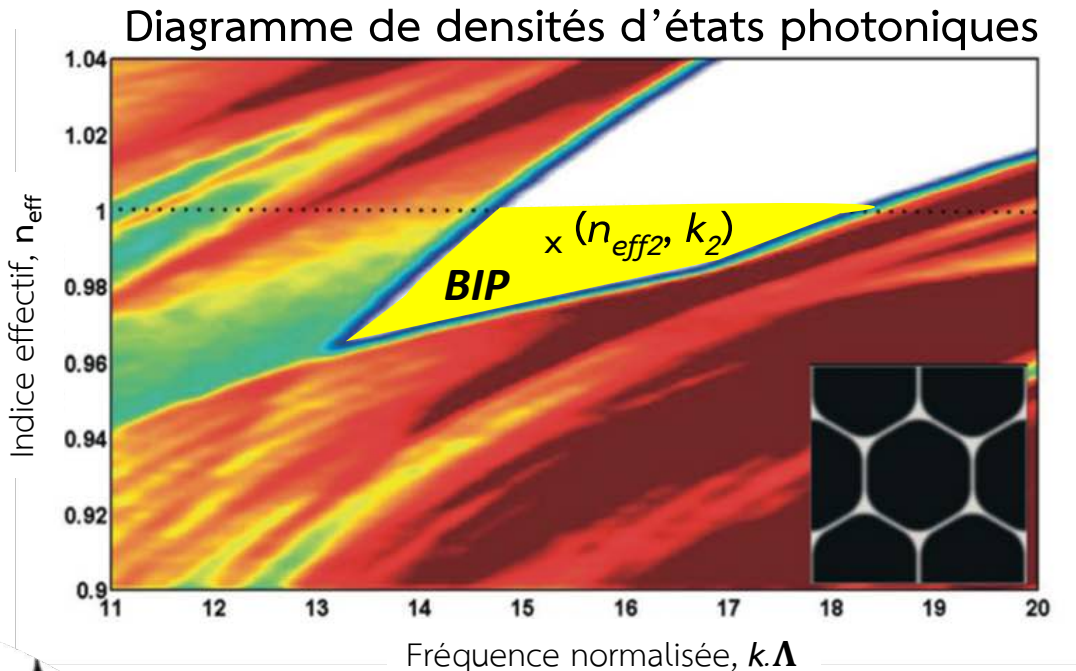


Simulation des modes supportées par la structure

Modes caractérisés par un couple (n_{eff}, k) ou (n_{eff}, ω)

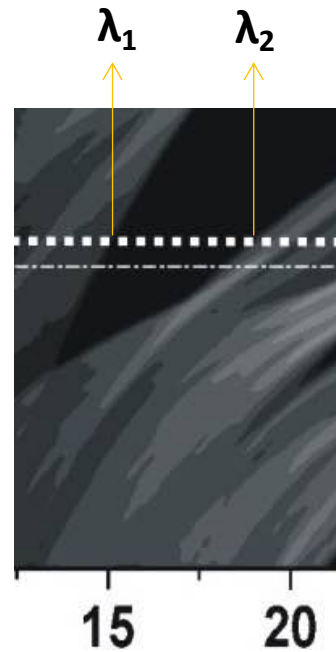
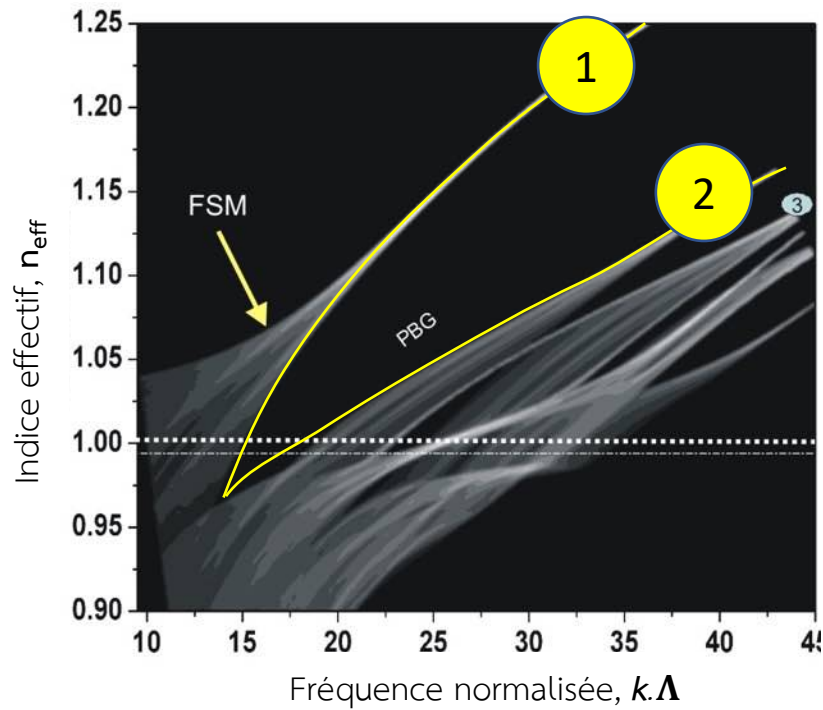
Indice effectif n_{eff}

Vecteur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$



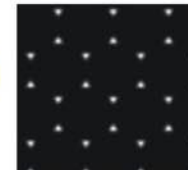
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)



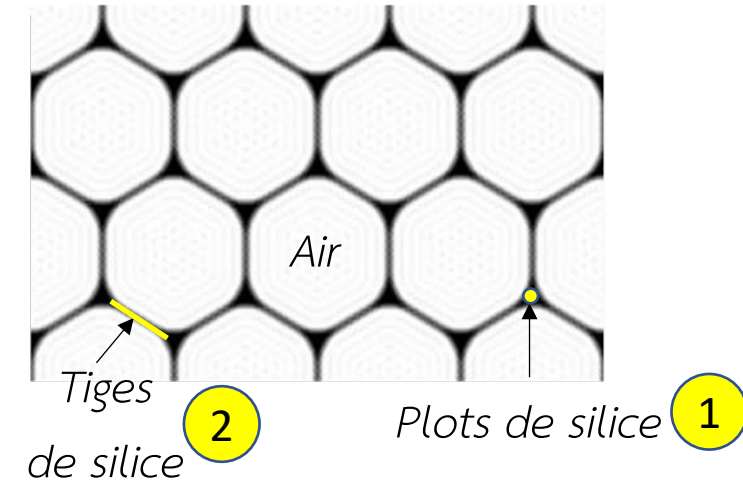
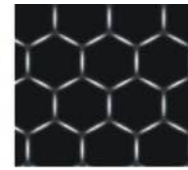
Mode fondamental des plots

1



Mode fondamental des tiges

2



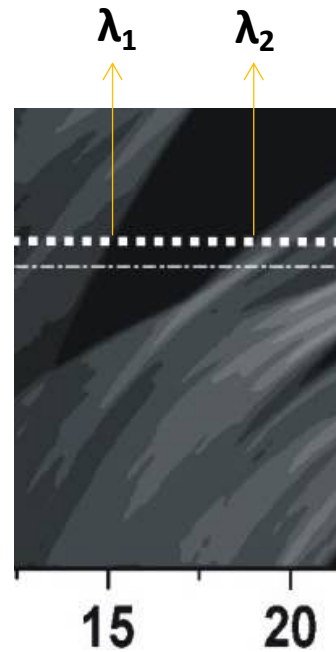
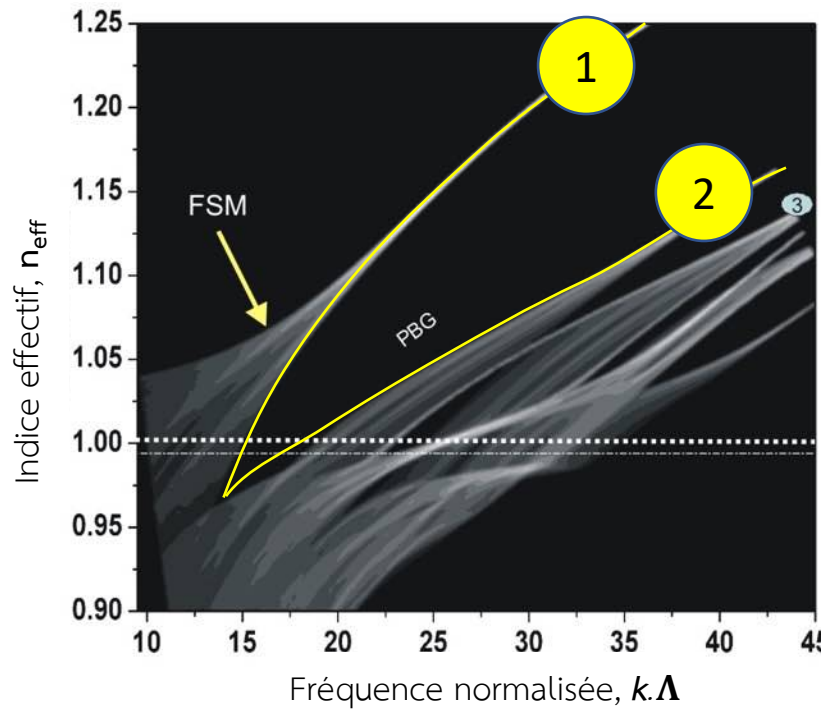
↳ Bande de transmission de la fibre :

BIP délimitée par deux longueurs λ_1, λ_2 (fréquences ω_1, ω_2)

↳ Position et largeur de la BIP dépendent de la taille des plots et ponts

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Bande interdite photonique (bandgap)



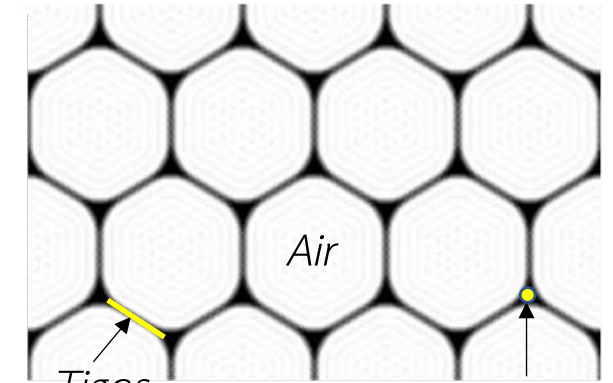
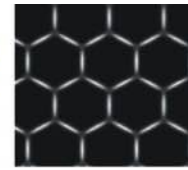
Mode fondamental des plots

1



Mode fondamental des tiges

2



Tiges
de silice

2

Plots de silice

1

↳ Bande de transmission de la fibre :
BIP délimitée par deux longueurs λ_1, λ_2 (fréquences ω_1, ω_2)

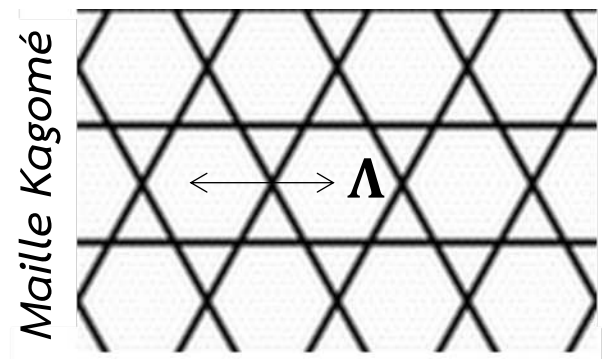
↳ Position et largeur de la BIP dépendent de la taille
des plots et ponts

Design de la structure de gaine
(indice du matériau et géométrique)
de sorte pour qu'il ne supporte
aucun mode à la longueur d'onde de
travail visée.

▷ Guidage par absence de canal de fuite

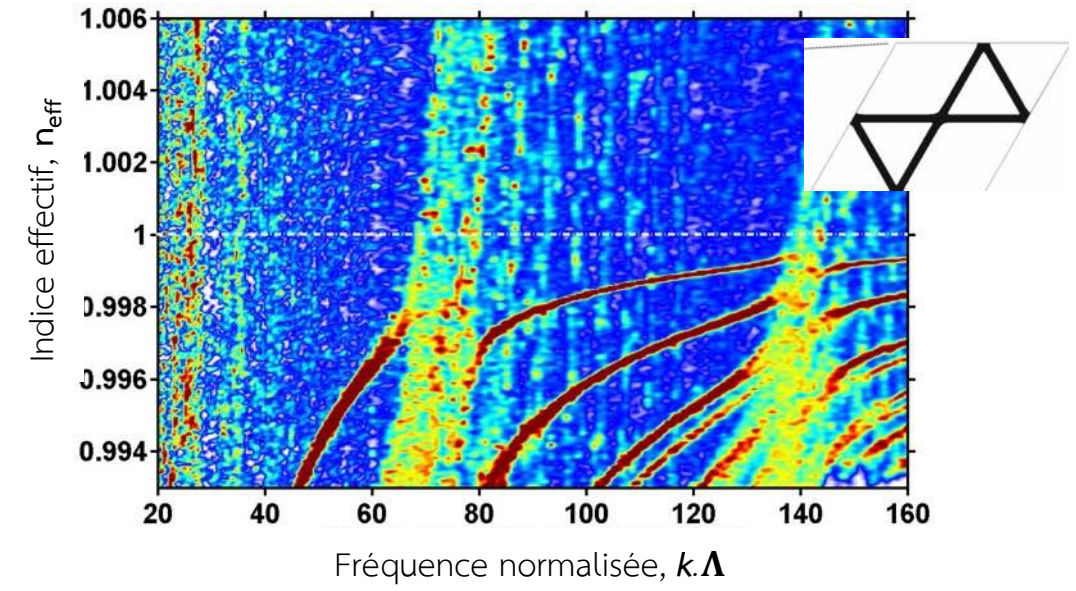
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé



Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)

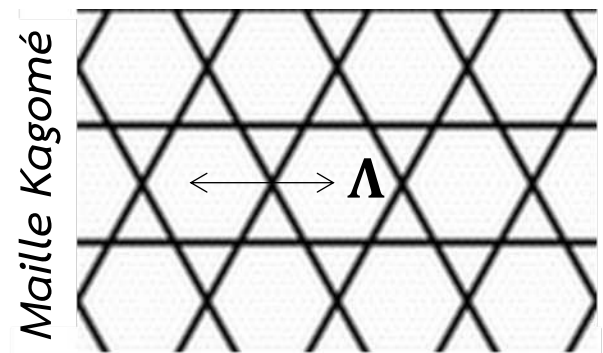
→



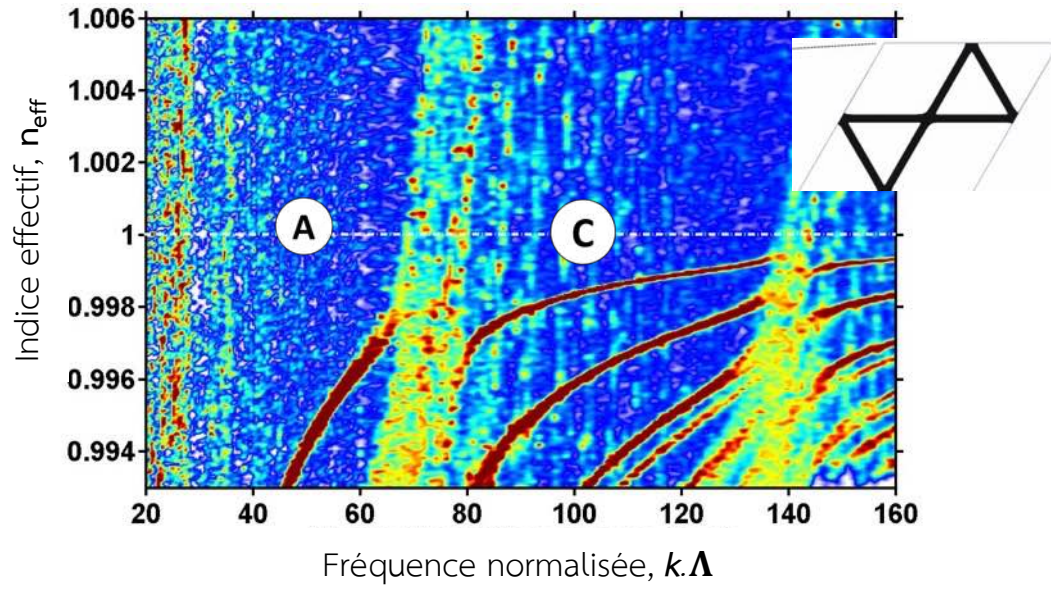
↙ Absence de bande interdite / Continuum de modes sur l'ensemble de l'espace (n_{eff}, k)

Fibres à cristal photonique à cœur creux

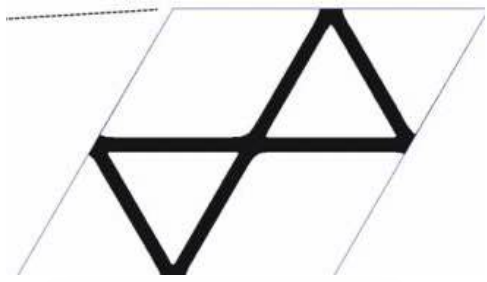
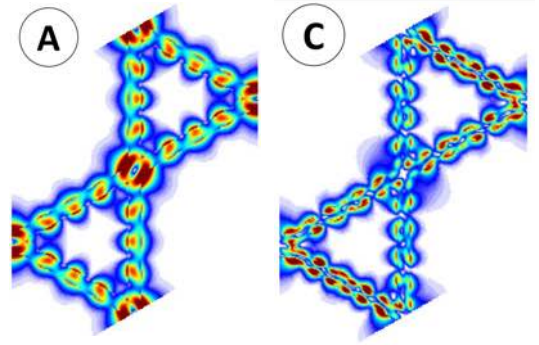
Guidage – Couplage inhibé



Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)



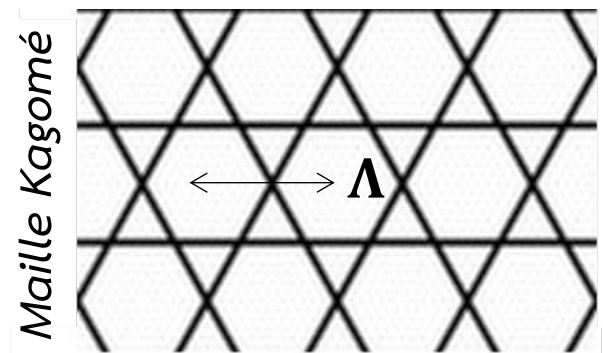
Modes de silice



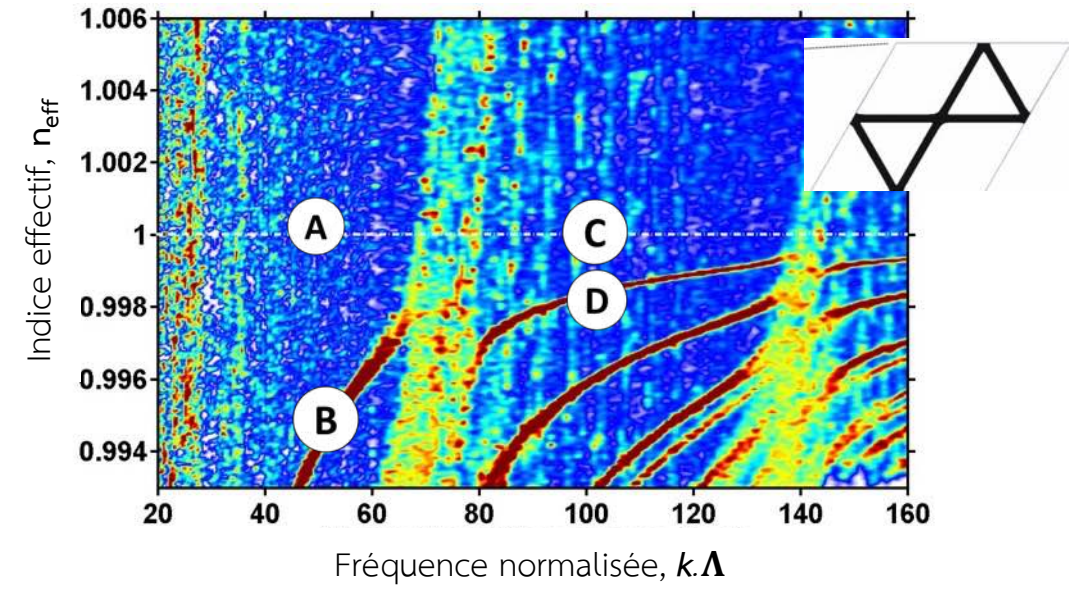
Cellule unitaire

Fibres à cristal photonique à cœur creux

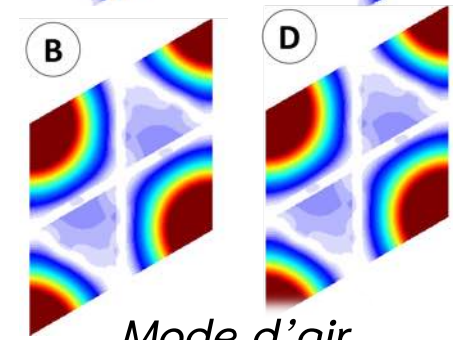
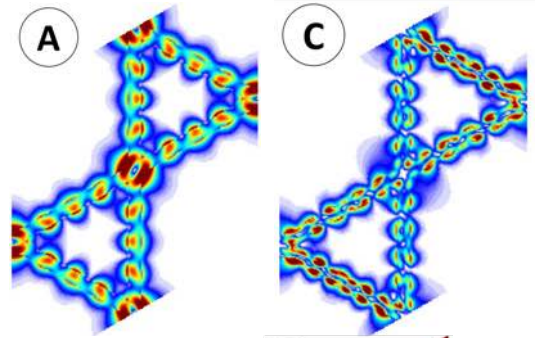
Guidage – Couplage inhibé



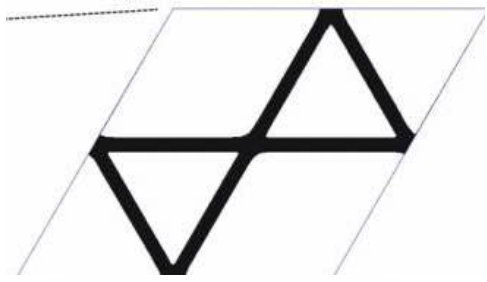
Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)



Modes de silice



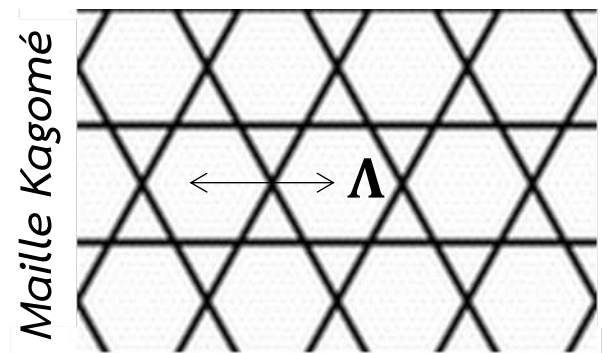
Mode d'air



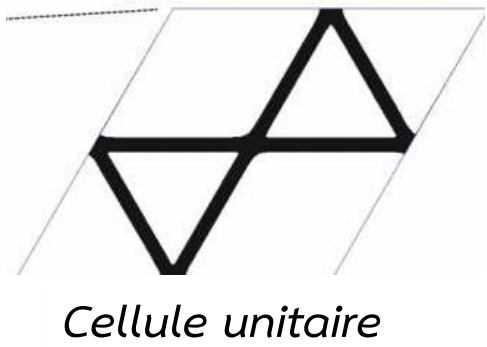
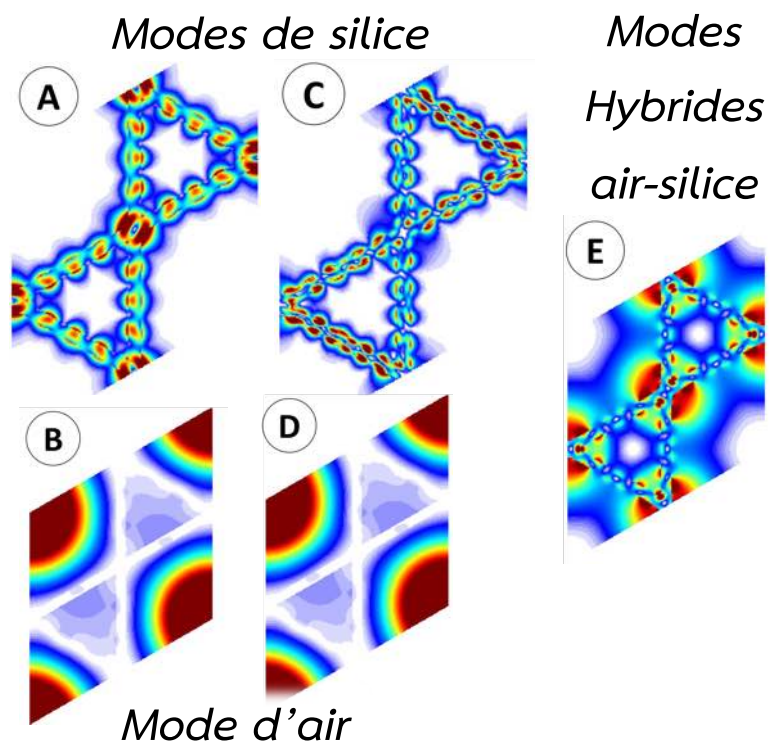
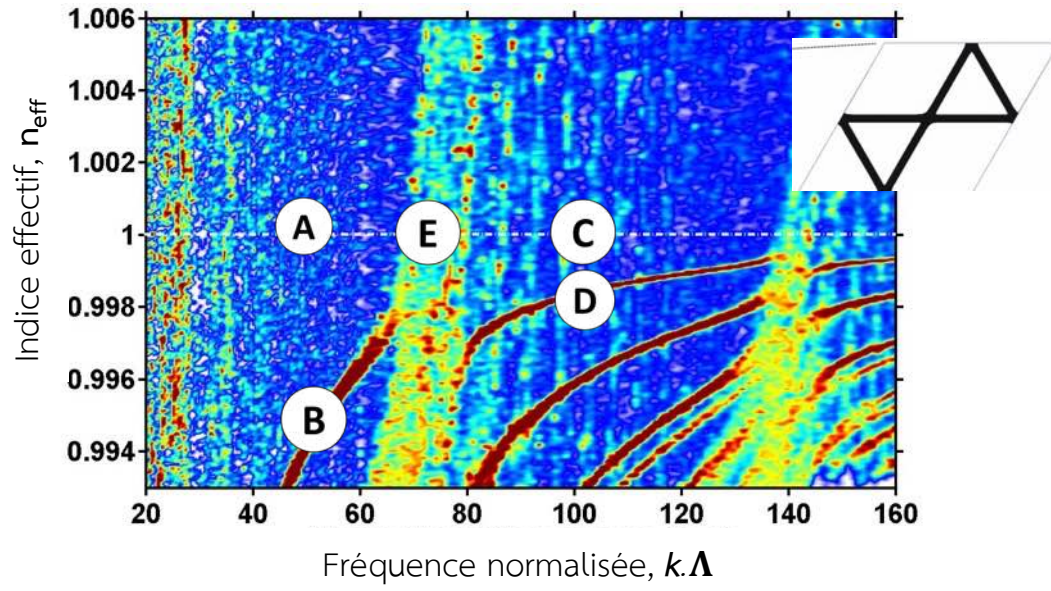
Cellule unitaire

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé

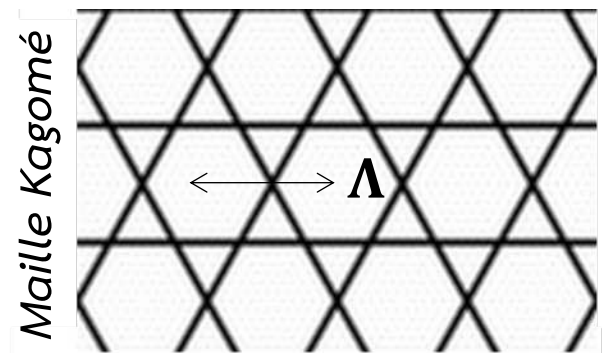


Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)

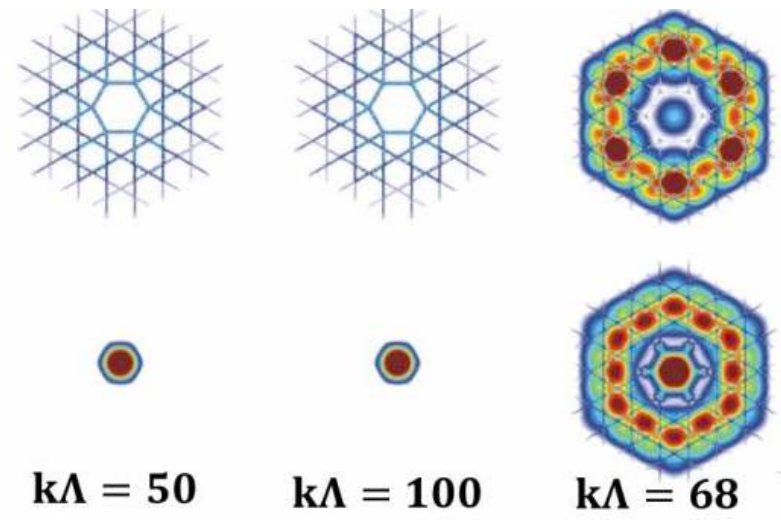
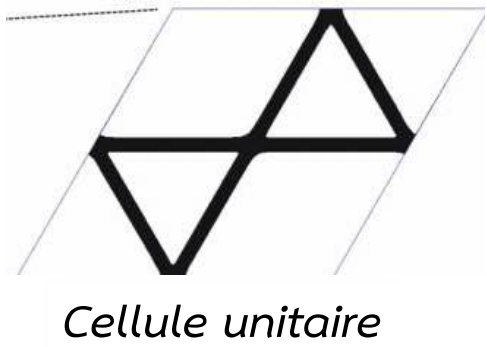
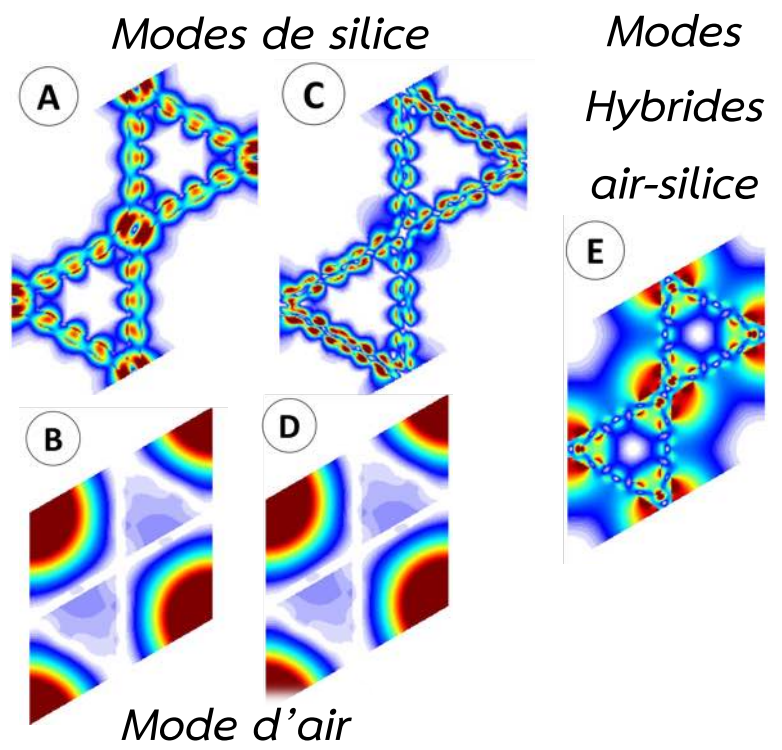
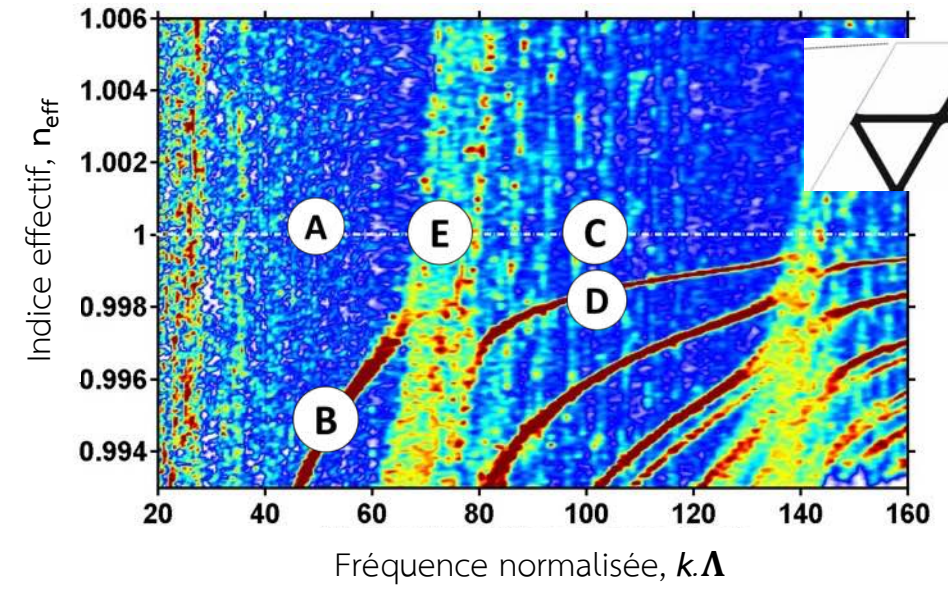


Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé

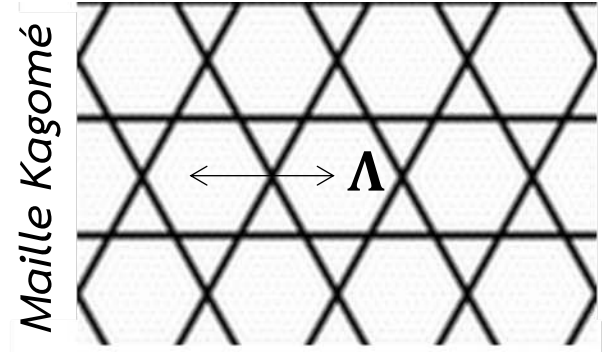


Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)

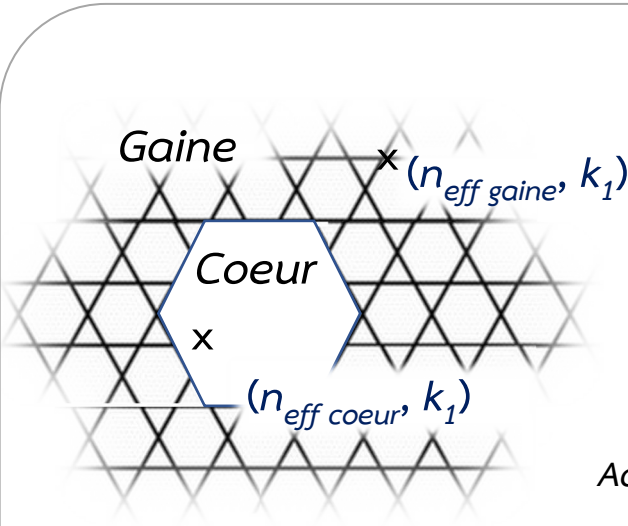
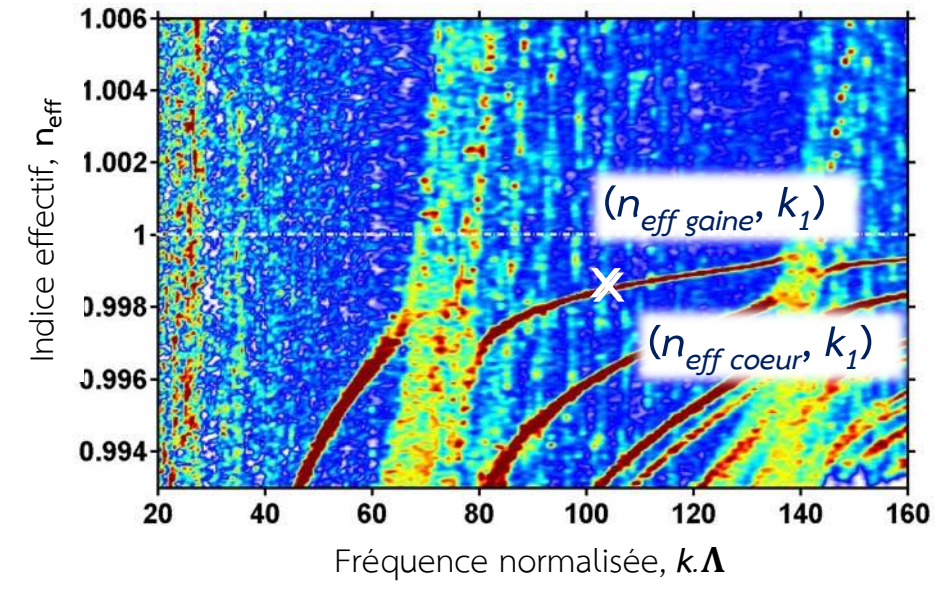


Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé



Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)



Mode de cœur et modes de gaine
 avec le **même indice effectif**

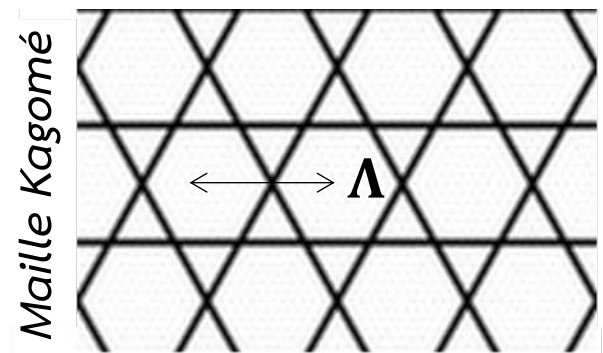
$n_{eff\ coeur} = n_{eff\ gain}$

Accord de phase entre modes longitudinal

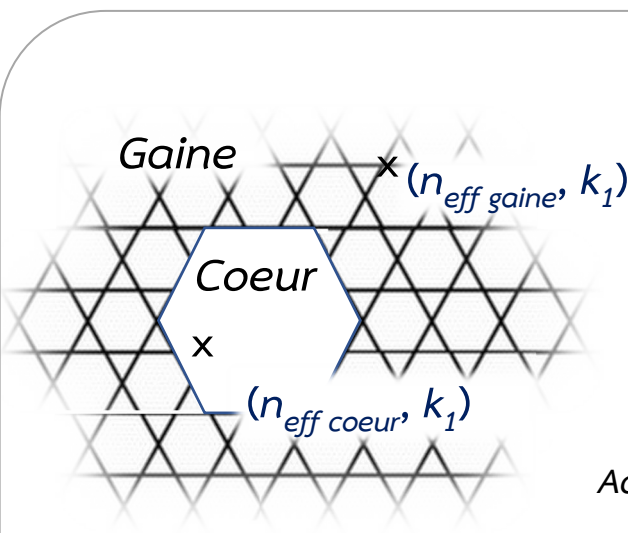
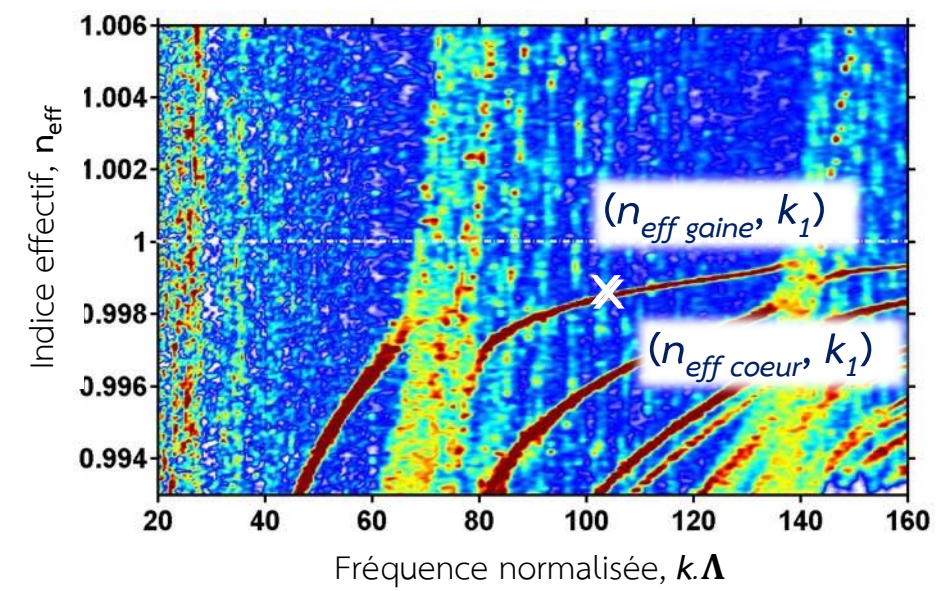
Interaction cœur-gaine / **couplage**

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé



Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)



Mode de cœur et modes de gaine avec le même indice effectif

$n_{eff\ coeur} = n_{eff\ gain}$

Accord de phase entre modes longitudinal

Interaction cœur-gaine / couplage

Guidage sur spectre large UV à IR !!!

Pertes : dB/m

Plusieurs bandes de transmission

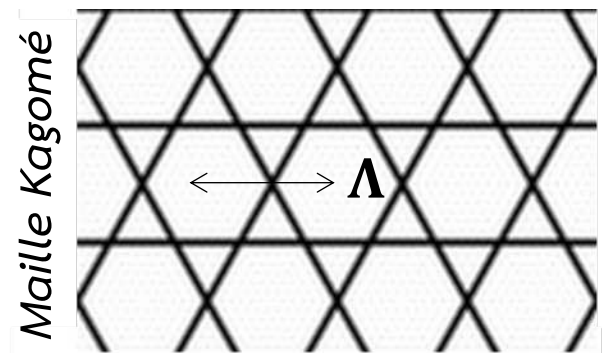
Output Power / dBm

Wavelength / nm

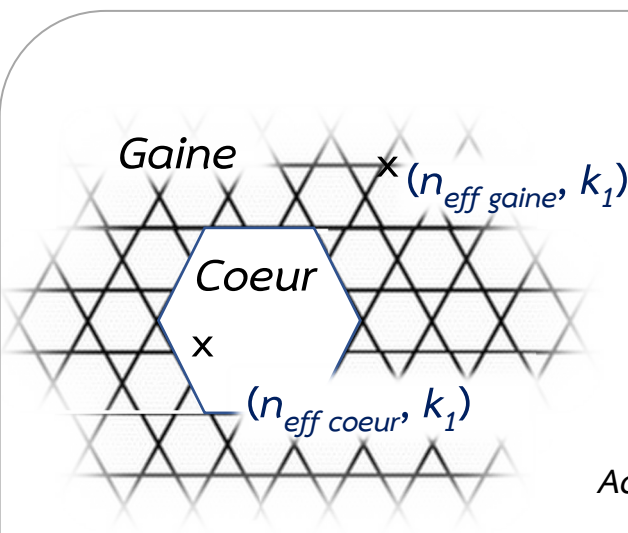
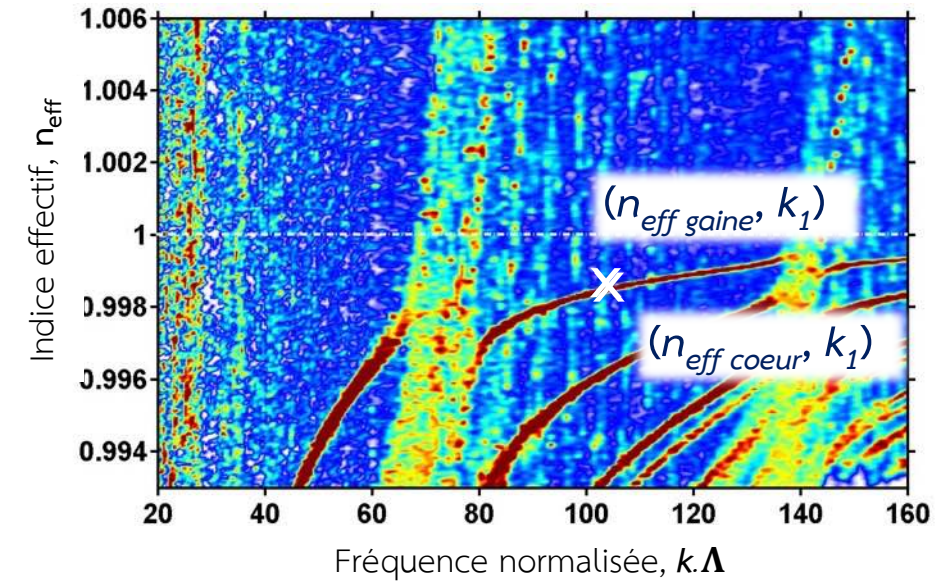
Benabid et al., Science, vol. 298, 399-402, (2002).

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé



Simulation des modes supportées par la structure (Maxwell)



Mode de cœur et modes de gaine avec le même indice effectif

$n_{eff\ coeur} = n_{eff\ gain}$

Accord de phase entre modes longitudinal

Interaction cœur-gaine / couplage



Guidage sur spectre large UV à IR !!!

Pertes : dB/m

Plusieurs bandes de transmission

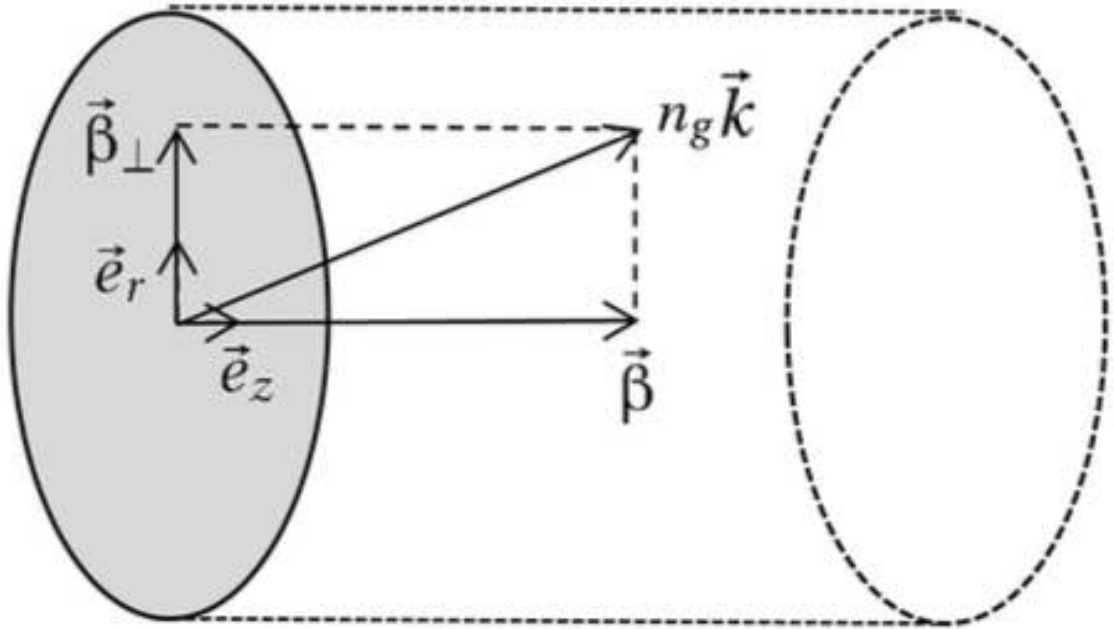
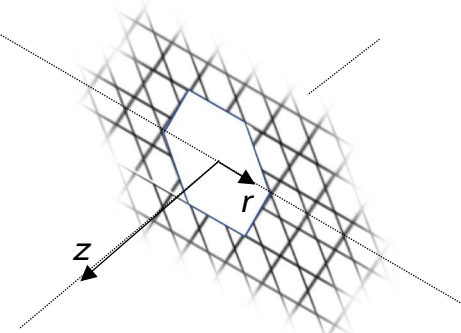
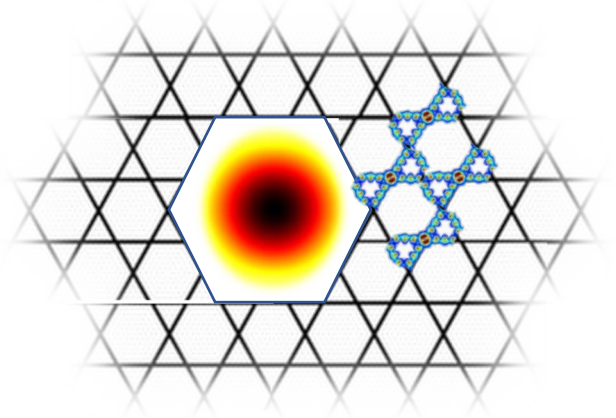
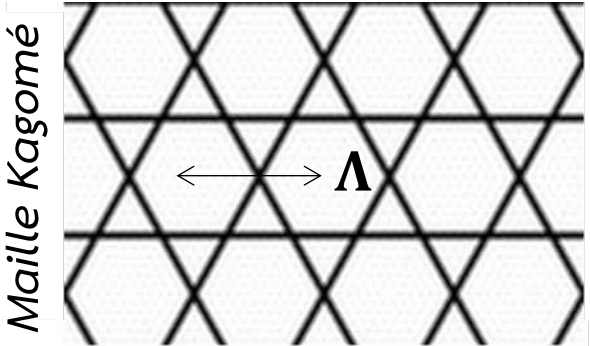
Output Power / dBm

Wavelength / nm

Benabid et al., Science, vol. 298, 399-402, (2002).

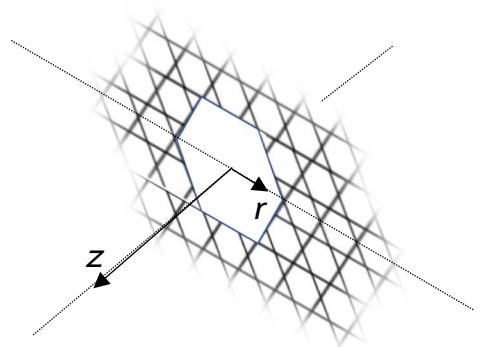
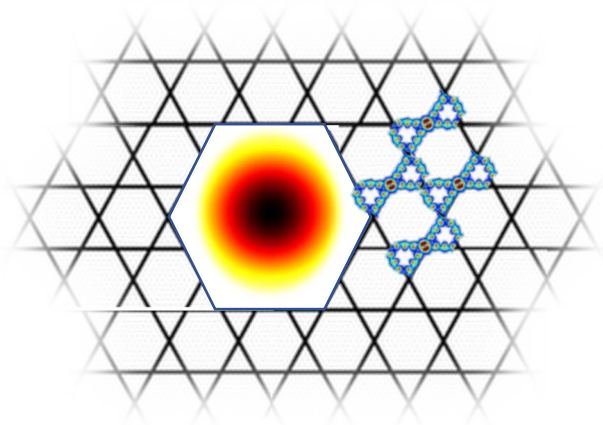
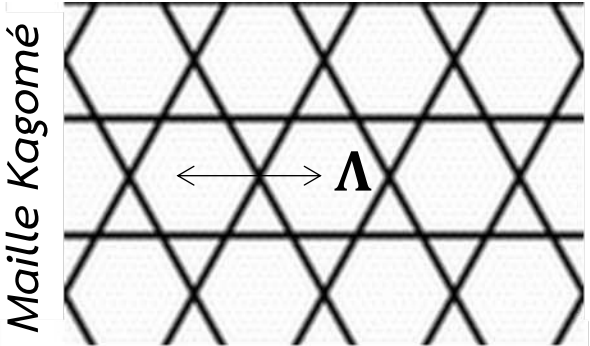
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé

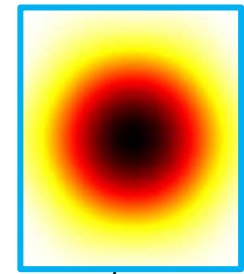


Fibres à cristal photonique à cœur creux

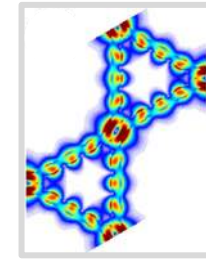
Guidage – Couplage inhibé



- Réduction de l'interaction entre les modes
- Réduire l'intégrale de recouvrement entre modes de cœur et de gaine $\langle \psi_{core} | \Delta n^2 | \psi_{clad} \rangle \rightarrow 0$
- Désaccord de phase TRANSVERSE



$$\psi_{core}(r, \theta, z) = \underbrace{F_{core}(r, \theta)}_{\text{Enveloppe du champ}} \underbrace{e^{i\phi_{core}(r, \theta)}}_{\text{Phase transverse (oscillation du champ)}} e^{i\beta z}$$

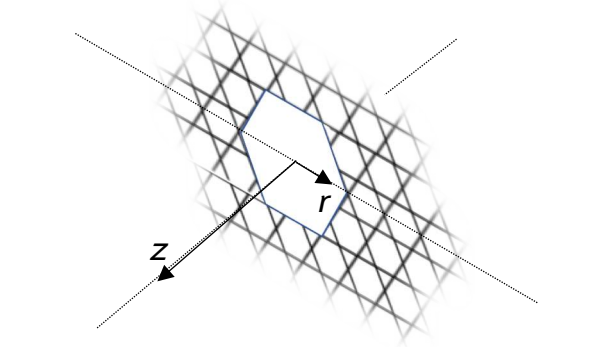
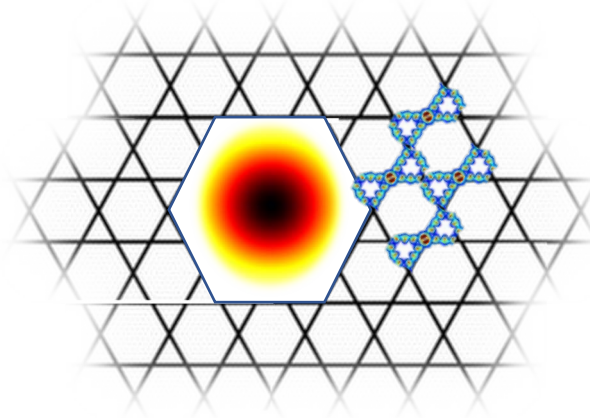
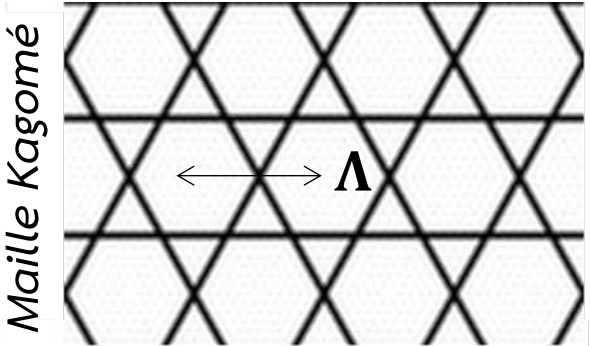


$$\psi_{clad}(r, \theta, z) = \underbrace{F_{clad}(r, \theta)}_{\text{Enveloppe du champ}} \underbrace{e^{i\phi_{clad}(r, \theta)}}_{\text{Phase transverse (oscillation du champ)}} e^{i\beta z}$$

$$\langle \psi_{core} | \Delta n^2 | \psi_{clad} \rangle \rightarrow 0$$

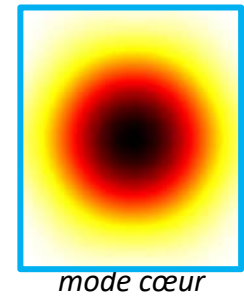
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé



Guidage

- Réduction de l'interaction entre les modes
- Réduire l'intégrale de recouvrement entre modes de cœur et de gaine $\langle \psi_{core} | \Delta n^2 | \psi_{clad} \rangle \rightarrow 0$
- Désaccord de phase TRANSVERSE



$$\psi_{core}(r, \theta, z) = \underbrace{F_{core}(r, \theta)}_{\text{Enveloppe du champ}} \underbrace{e^{i\phi_{core}(r, \theta)}}_{\text{Phase transverse (oscillation du champ)}} e^{i\beta z}$$



$$\psi_{clad}(r, \theta, z) = \underbrace{F_{clad}(r, \theta)}_{\text{Enveloppe du champ}} \underbrace{e^{i\phi_{clad}(r, \theta)}}_{\text{Phase transverse (oscillation du champ)}} e^{i\beta z}$$

$$\langle \psi_{core} | \Delta n^2 | \psi_{clad} \rangle \rightarrow 0$$

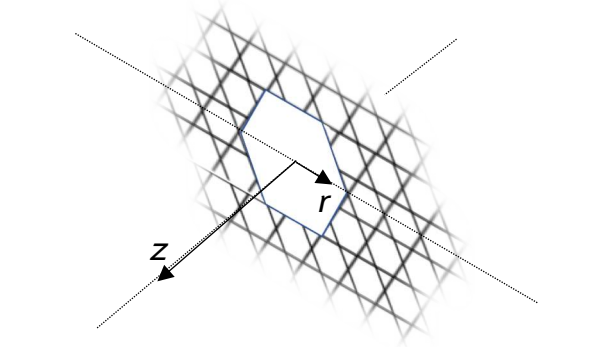
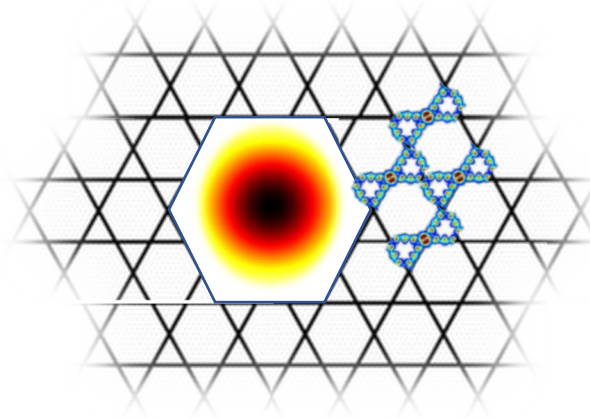
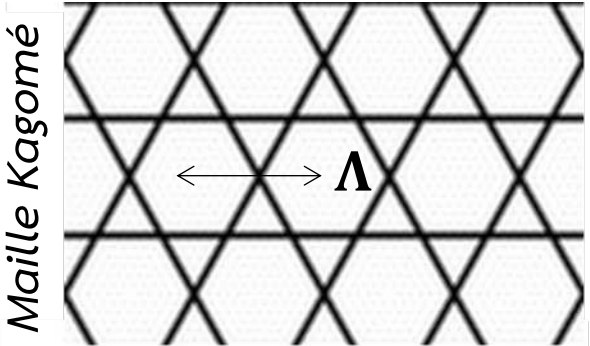
$$\sum_p \underbrace{\langle F_{clad}(r) | a_p(r) | F_{core}(r) \rangle}_{\text{Recouvrement spatial}} \langle e^{im_{clad}\theta} | e^{ip\theta} | e^{im_{core}\theta} \rangle \rightarrow 0$$

Recouvrement spatial entre modes à minimiser

Modes fortement confinés / localisés

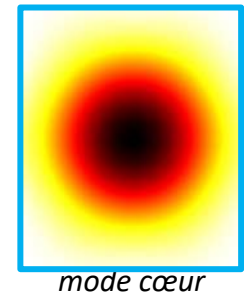
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Couplage inhibé



Guidage

- Réduction de l'interaction entre les modes
- Réduire l'intégrale de recouvrement entre modes de cœur et de gaine $\langle \psi_{core} | \Delta n^2 | \psi_{clad} \rangle \rightarrow 0$
- Désaccord de phase TRANSVERSE



$$\psi_{core}(r, \theta, z) = \underbrace{F_{core}(r, \theta)}_{\text{Enveloppe du champ}} \underbrace{e^{i\phi_{core}(r, \theta)}}_{\text{Phase transverse (oscillation du champ)}} e^{i\beta z}$$



$$\psi_{clad}(r, \theta, z) = \underbrace{F_{clad}(r, \theta)}_{\text{Enveloppe du champ}} \underbrace{e^{i\phi_{clad}(r, \theta)}}_{\text{Phase transverse (oscillation du champ)}} e^{i\beta z}$$

$$\langle \psi_{core} | \Delta n^2 | \psi_{clad} \rangle \rightarrow 0$$

$$\sum_p \underbrace{\langle F_{clad}(r) | a_p(r) | F_{core}(r) \rangle}_{\text{Recouvrement spatial}} \underbrace{\langle e^{im_{clad}\theta} | e^{ip\theta} | e^{im_{core}\theta} \rangle}_{\text{Fort désaccord de phase}} \rightarrow 0$$

Recouvrement spatial entre modes à minimiser

Fort désaccord de phase

Modes fortement confinés / localisés

Modes de gaine avec un ordre azimuthal élevé m

Minimiser

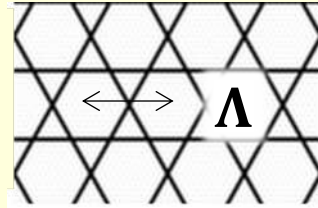
recouvrement spatial

entre modes

Modes fortement
confinés / localisés



- Régime à large pitch Λ



- Mode de cœur éloigné
de la gaine



Gaine avec des ponts :

- Longs
- Fins
- Sans attaches

Augmenter désaccord de

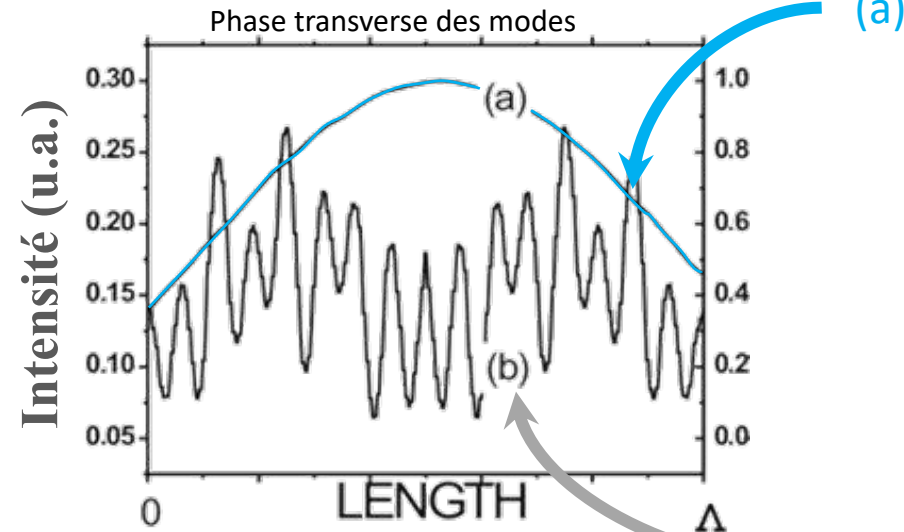
phase entre modes

Modes de gaine avec un
ordre azimuthal élevé m

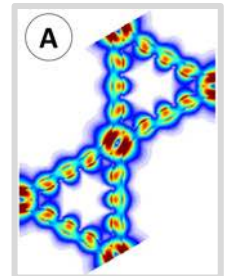
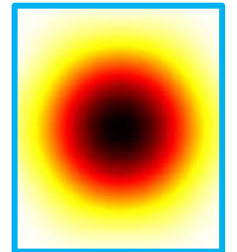
$$m = n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[1 - \pi \left(\frac{t}{L} \right) \right]$$

t : épaisseur des ponts

L : périmètre du contour du cœur



mode cœur



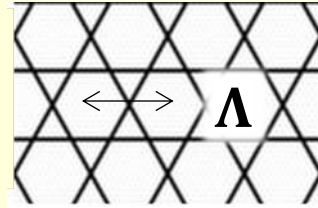
mode gaine

Minimiser recouvrement spatial entre modes

Modes fortement
confinés / localisés



- Régime à large pitch Λ



- Mode de cœur éloigné
de la gaine

Augmenter désaccord de phase entre modes

Modes de gaine avec un
ordre azimuthal élevé m

$$m = n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[1 - \pi \left(\frac{t}{L} \right) \right]$$

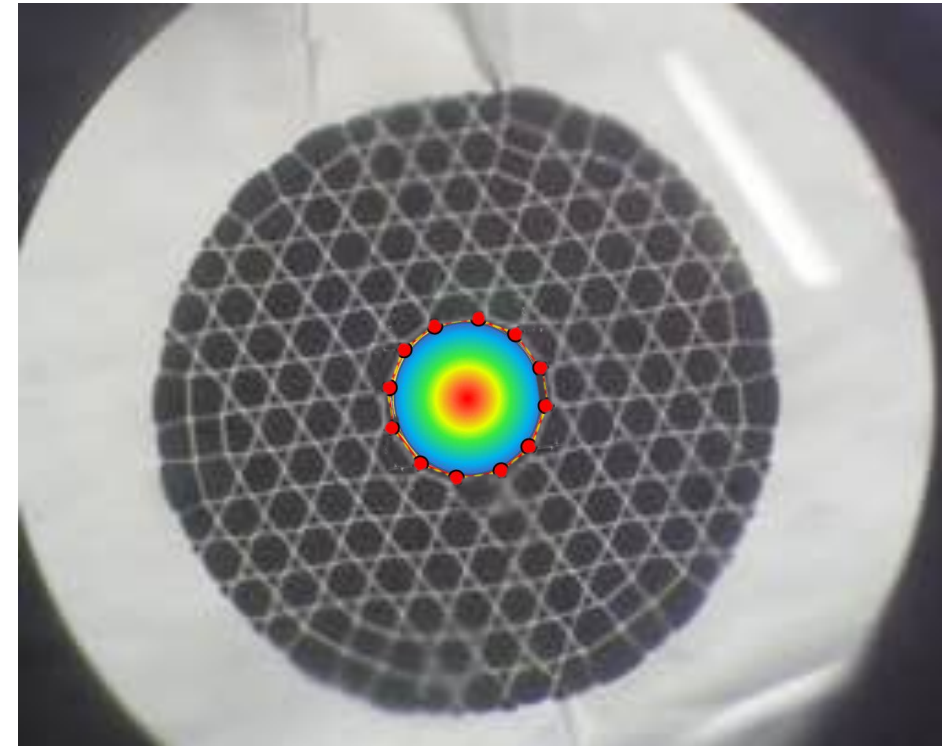
t : épaisseur des ponts

L : périmètre du contour du cœur



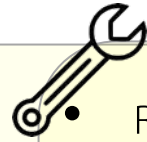
Gaine avec des ponts :

- Longs
- Fins
- Sans attaches

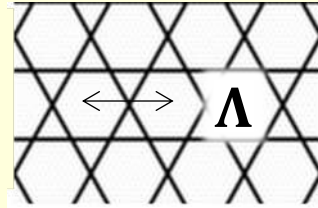


Minimiser recouvrement spatial entre modes

Modes fortement
confinés / localisés

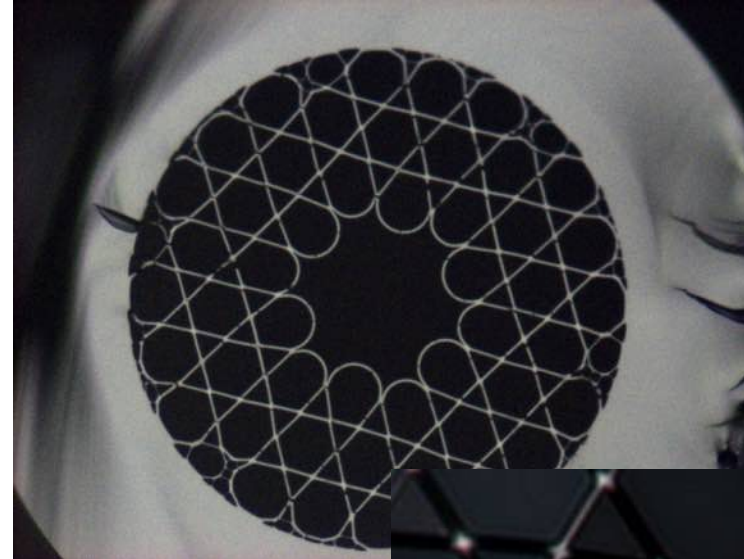


- Régime à large pitch Λ



- Mode de cœur éloigné
de la gaine

- Structure de fibre qui répond à ce « cahier de charge »
Fibre « à courbure négative » (hypocycloïdale)



Augmenter désaccord de phase entre modes

Modes de gaine avec un
ordre azimuthal élevé m

$$m = n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[1 - \pi \left(\frac{t}{L} \right) \right]$$

t : épaisseur des ponts

L : périmètre du contour du cœur



Gaine avec des ponts :

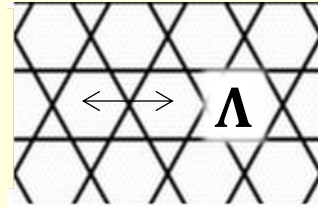
- Longs
- Fins
- Sans attaches

Minimiser
recouvrement spatial
entre modes

Modes fortement
confinés / localisés



Régime à large pitch Λ



- Mode de cœur éloigné de la gaine

Augmenter désaccord de
phase entre modes

Modes de gaine avec un
ordre azimuthal élevé m

$$m = n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[1 - \pi \left(\frac{t}{L} \right) \right]$$

t : épaisseur des ponts

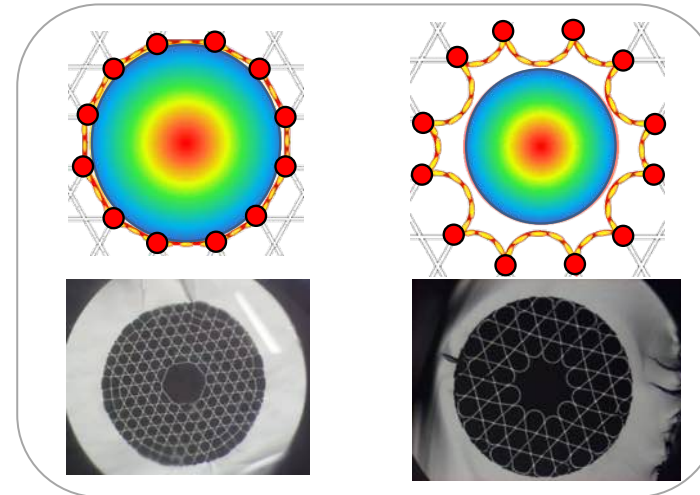
L : périmètre du contour du cœur



Gaine avec des ponts :

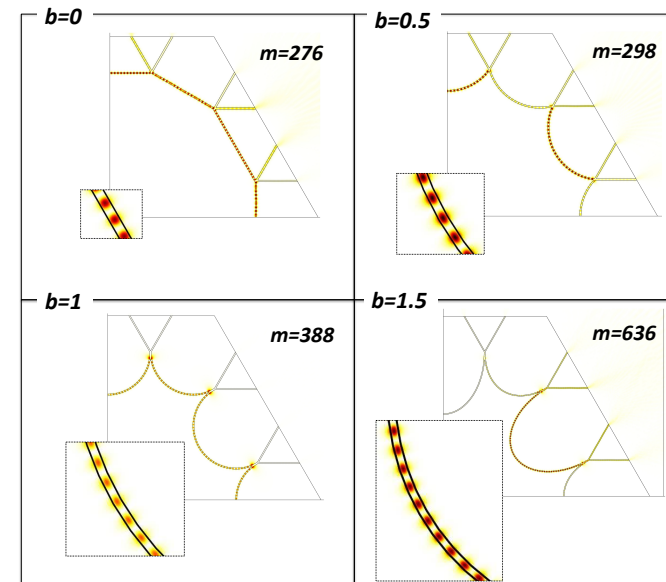
- Longs
- Fins
- Sans attaches

► Structure de fibre qui répond à ce « cahier de charge »
Fibre « à courbure négative » (hypocycloïdale)



Wang *et al.*, Opt. Lett.,
vol. 36, n°5, (2011).

- ✓ Mode de cœur éloigné du contour du cœur de silice et des plots de silice ● liés à un faible m



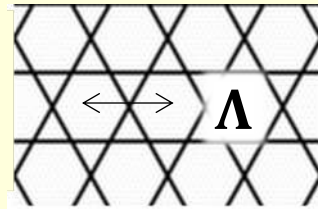
- ✓ Nombre azimuthal m augmente avec la courbure des ponts du contour du cœur

Minimiser
recouvrement spatial
entre modes

Modes fortement
confinés / localisés



• Régime à large pitch Λ



• Mode de cœur éloigné
de la gaine

Augmenter désaccord de
phase entre modes

Modes de gaine avec un
ordre azimuthal élevé m

$$m = n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[1 - \pi \left(\frac{t}{L} \right) \right]$$

t : épaisseur des ponts

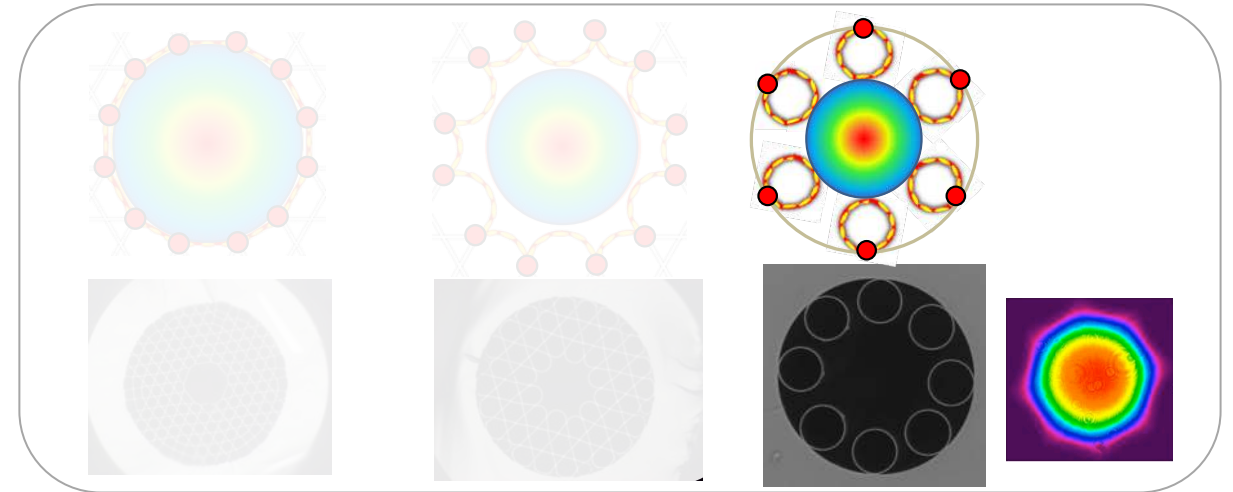
L : périmètre du contour du coeur



Gaine avec des ponts :

- Longs
- Fins
- Sans attaches

► Structure de fibre qui répond à ce « cahier de charge »
Fibre « à courbure négative » (hypocycloïdale)



Naissance d'une autre maille : la maille tubulaire

- ✓ Pas de plots de silice liés à un nombre m faible
Noeuds de connexions éliminés
- ✓ Long périmètre de contour de coeur

Nouvelles avancées en terme de records de transmission :

7.7 dB/km @ 780nm

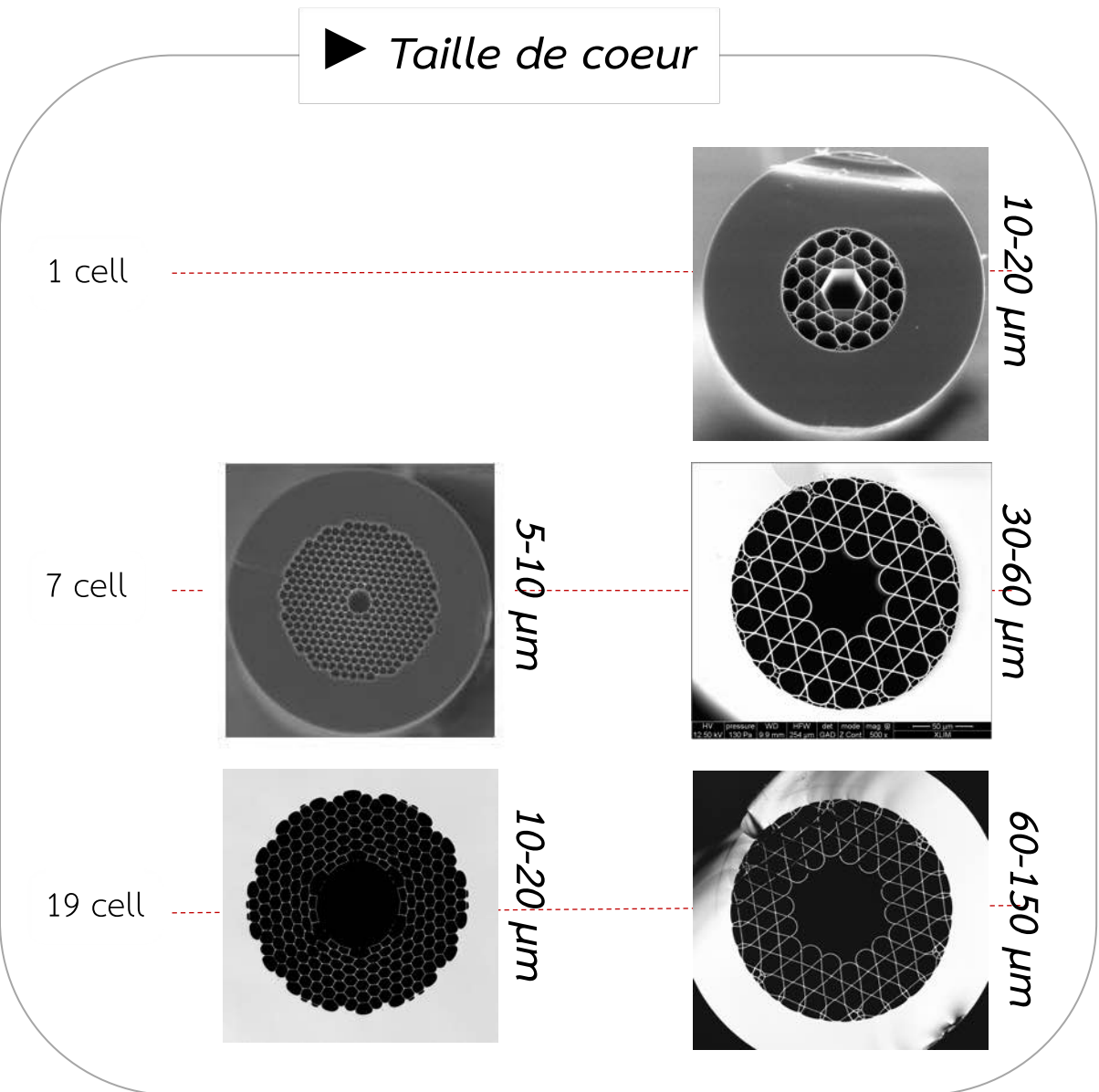


Debord *et al.*, *Optica*, vol. 4, n°2, (2017).

Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01

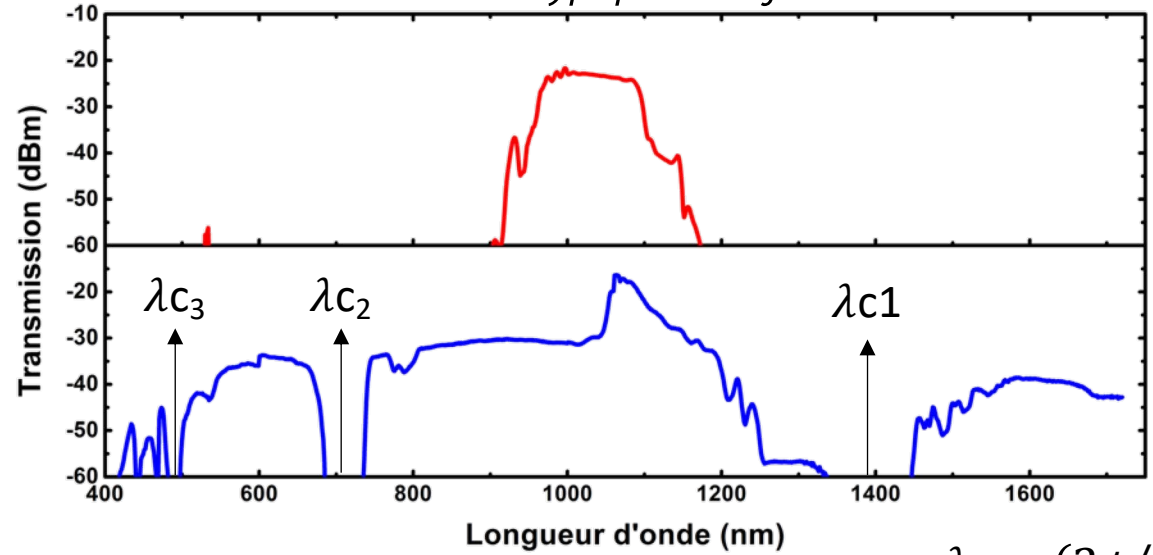


Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de cœur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz

► Transmissions typiques des fibres creuses



Bande interdite photonique

Couplage inhibé

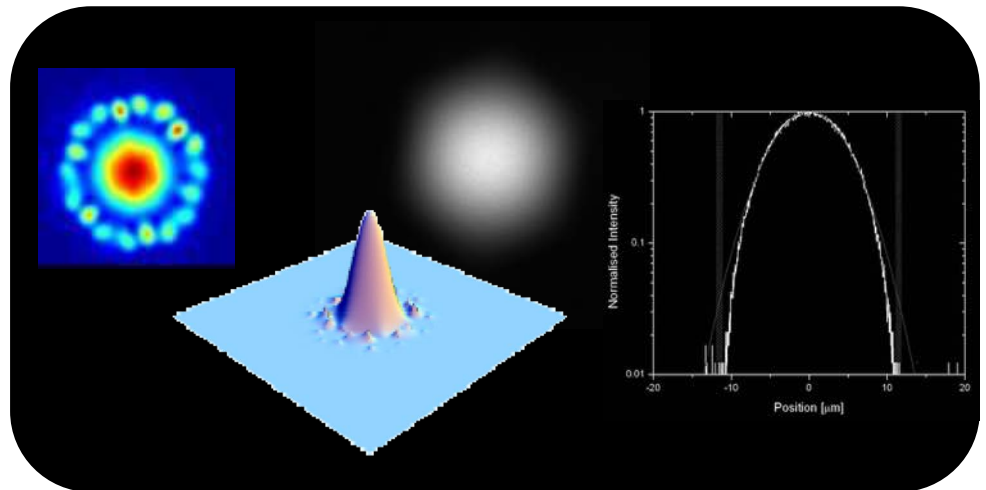
$$\lambda_{c_n} = (2t/n) \sqrt{n_g^2 - 1}$$

t : épaisseur des ponts de silice
n_g : indice du verre
n : integer

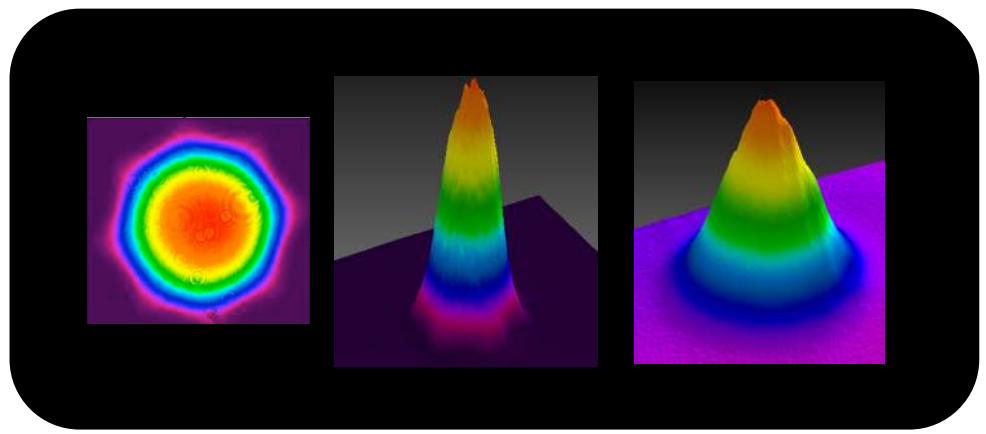
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface



Bande interdite photonique



Couplage inhibé

Fibres à cristal photonique à cœur creux

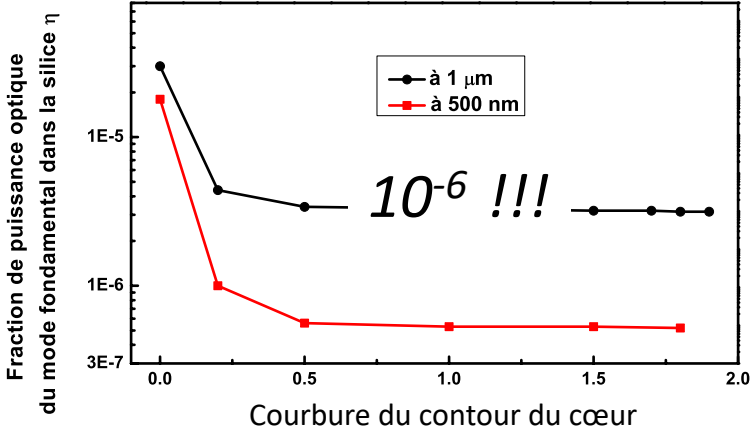
Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Facteur recouvrement champ cœur/silice</i>	10^{-2}	$\sim 10^{-6}$

► Fibre à BIP

10^{-2}

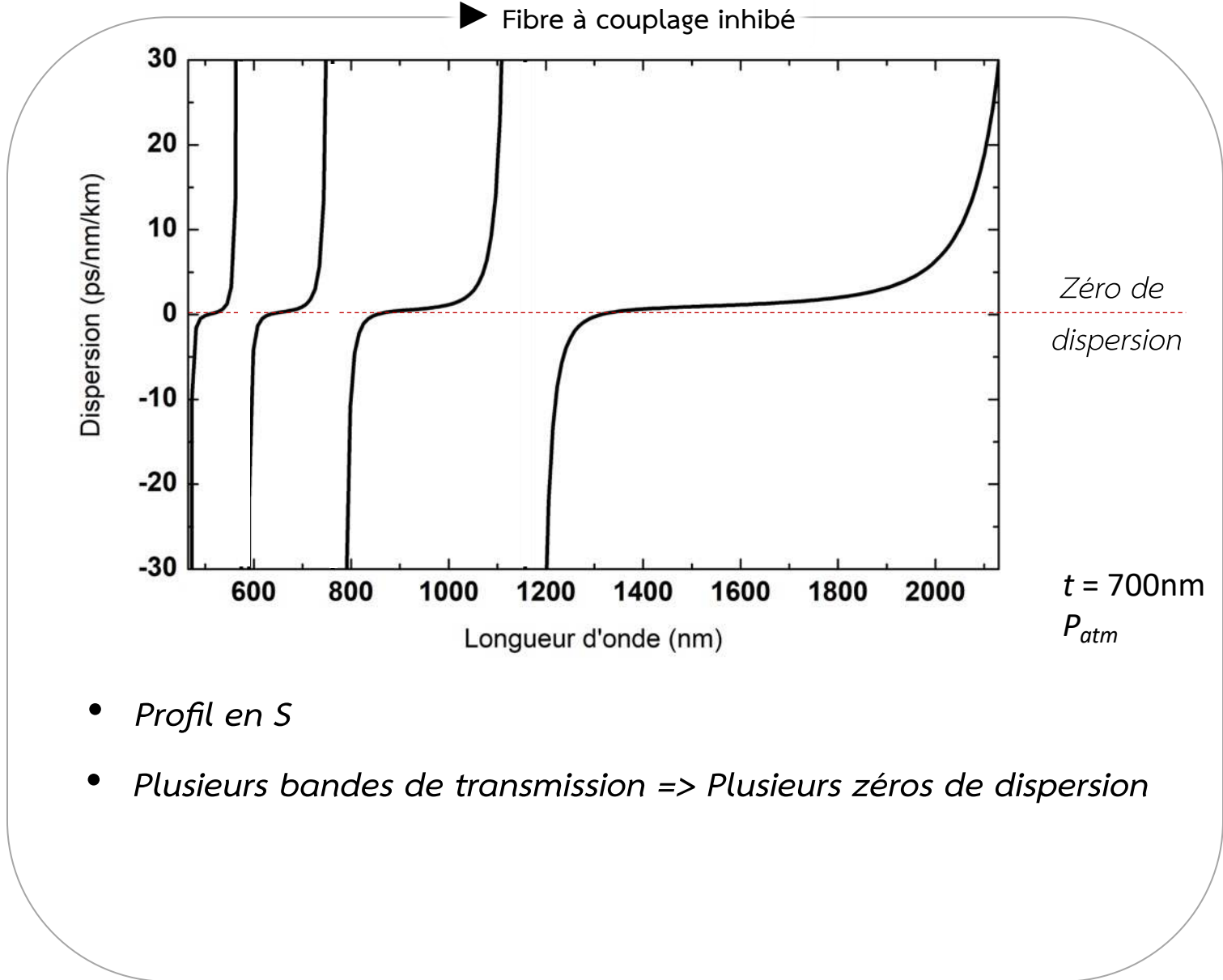
► Fibre à couplage inhibé



Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Facteur recouvrement champ cœur/silice</i>	10^{-2}	~ 10^{-6}
<i>Dispersion</i>	« forte »	« faible »

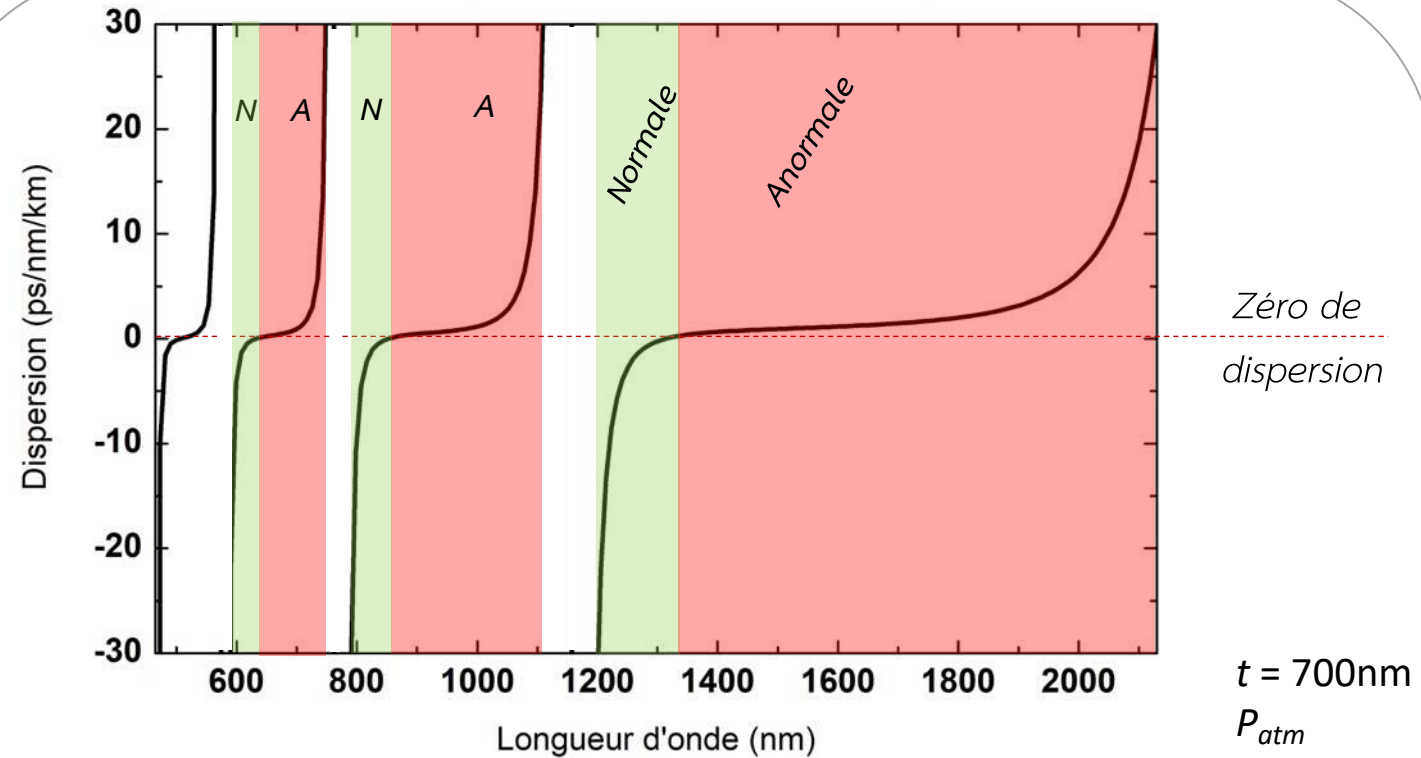


Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
Taille de cœur	5 à 20 μm	10 à 150 μm
Ouverture num.	0.2	0.01
Domaine spectral	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
Largeur de bande	~ 70 THz	~ 500 THz
Contenu modal	Modes de surface	Pas de mode de surface
Facteur recouvrement champ cœur/silice	10^{-2}	~ 10^{-6}
Dispersion	« forte »	« faible »

► Fibre à couplage inhibé



- Profil en S
- Plusieurs bandes de transmission => Plusieurs zéros de dispersion
- Dispersion normale et anormale

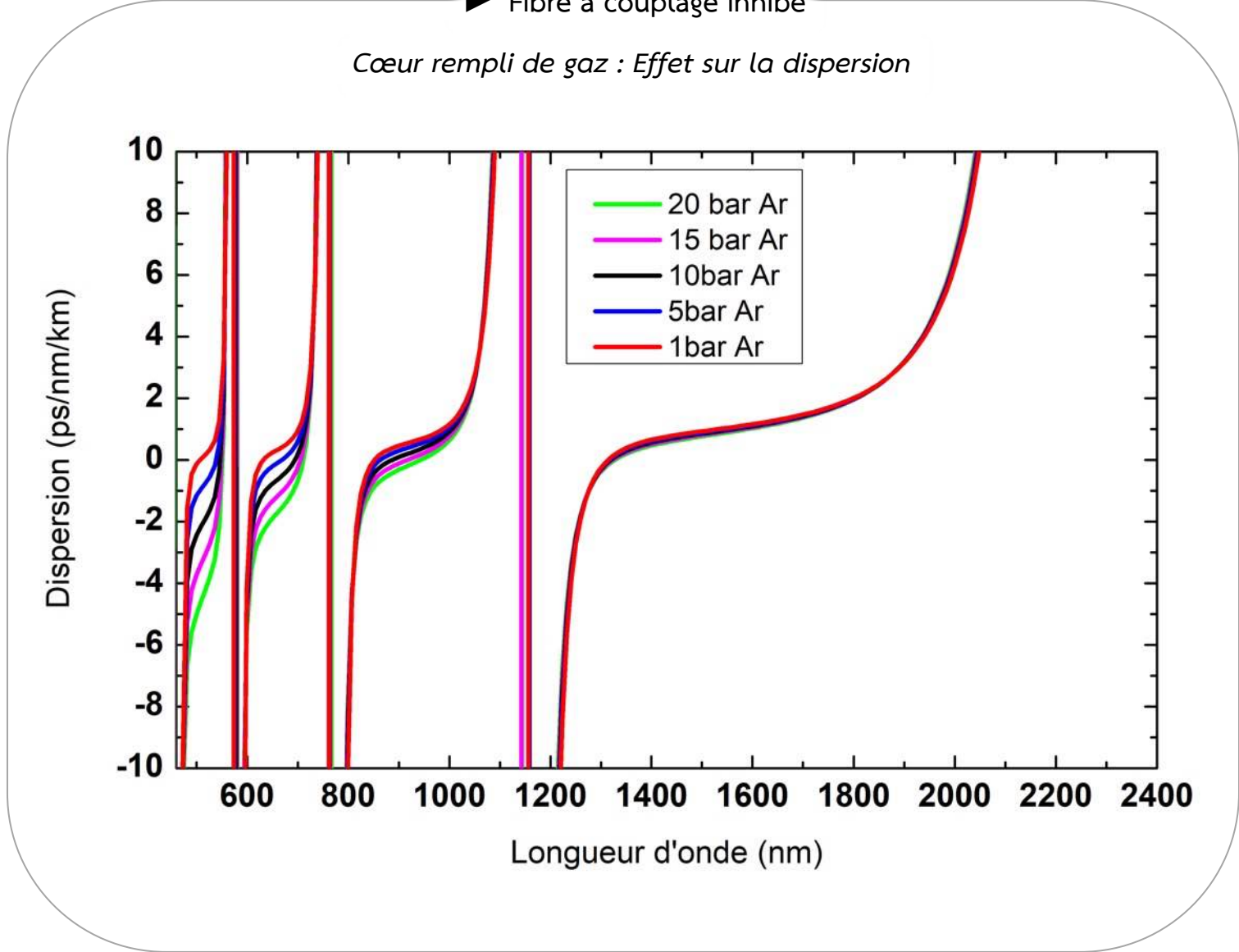
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du coeur avec gaine</i>	10^{-2}	~ 10^{-6}
<i>Dispersion</i>	« forte »	« très faible » Forte plage d'accordabilité

► Fibre à couplage inhibé

Cœur rempli de gaz : Effet sur la dispersion



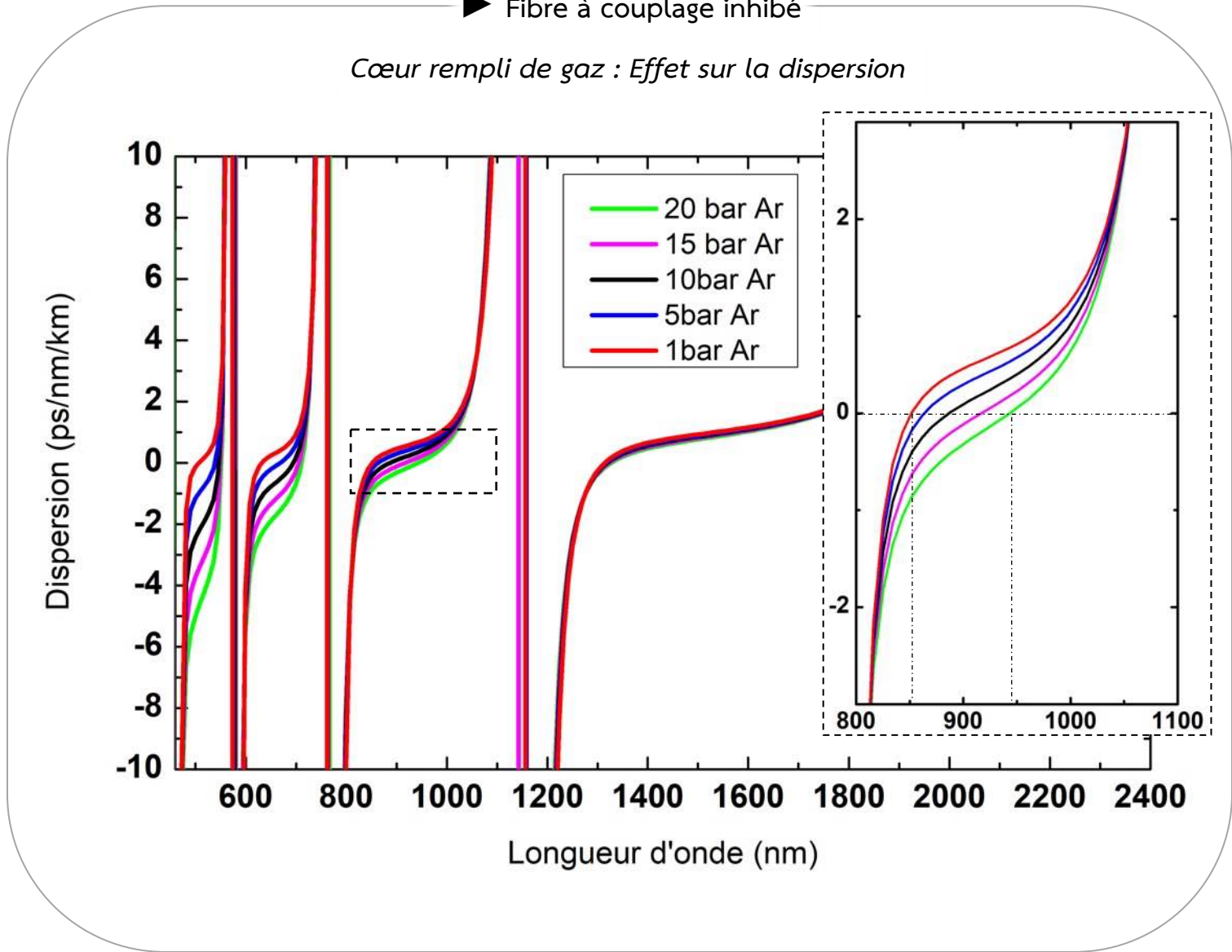
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du coeur avec gaine</i>	10 ⁻²	~ 10 ⁻⁶
<i>Dispersion</i>	« forte »	« très faible » Forte plage d'accordabilité

► Fibre à couplage inhibé

Cœur rempli de gaz : Effet sur la dispersion

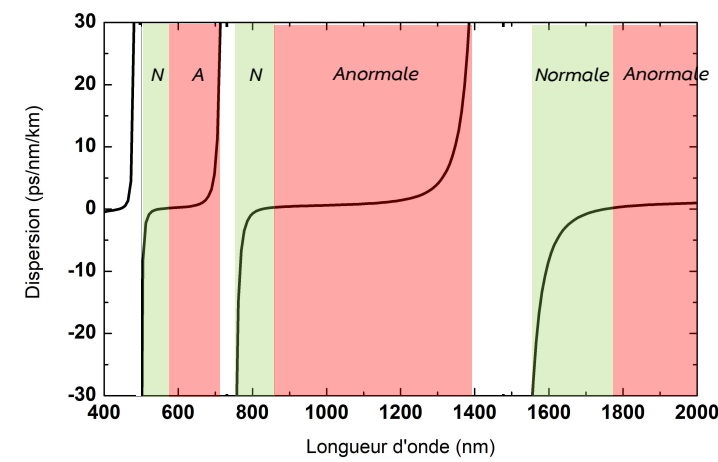


Fibres à cristal photonique à cœur creux

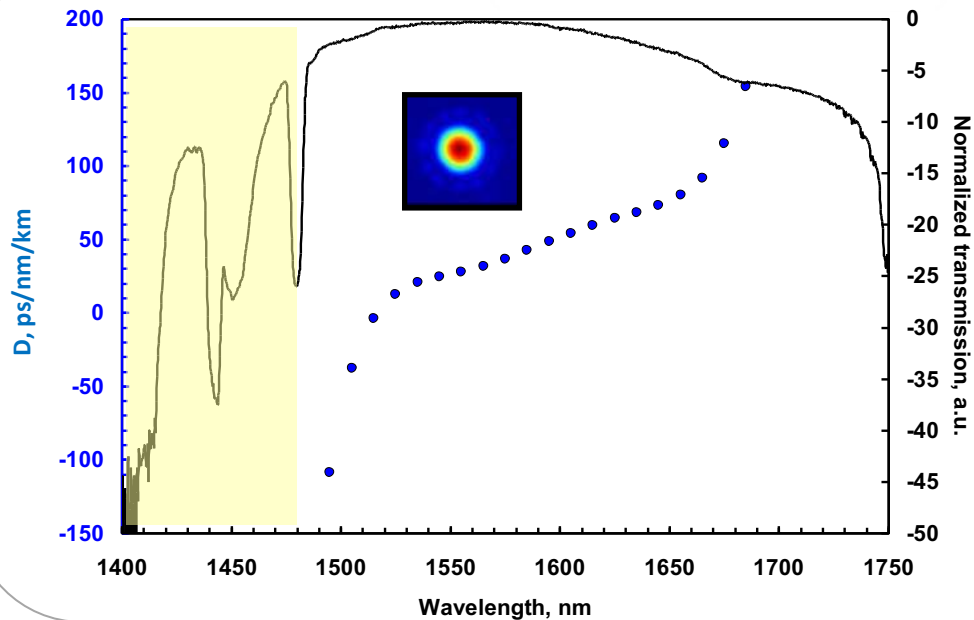
Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de cœur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du cœur avec gaine</i>	10^{-2}	~ 10^{-6}
<i>Dispersion</i>	« forte »	« faible » Forte plage d'accordabilité

► Fibre à couplage inhibé



► Fibre à bande interdite



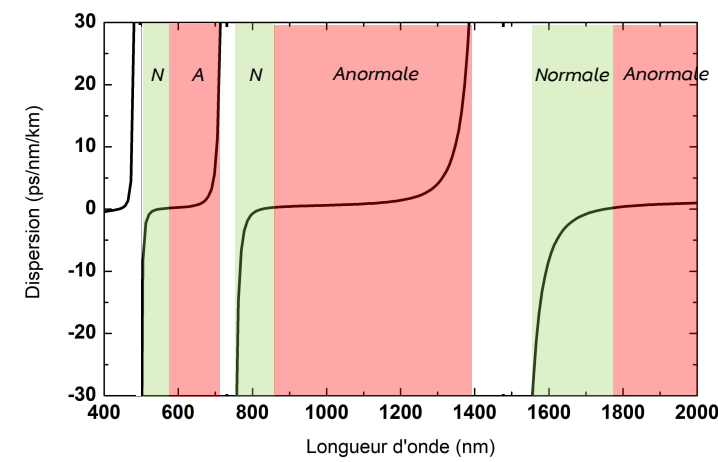
- Bande + étroite
- ↓
- Profil en S plus prononcé

Fibres à cristal photonique à cœur creux

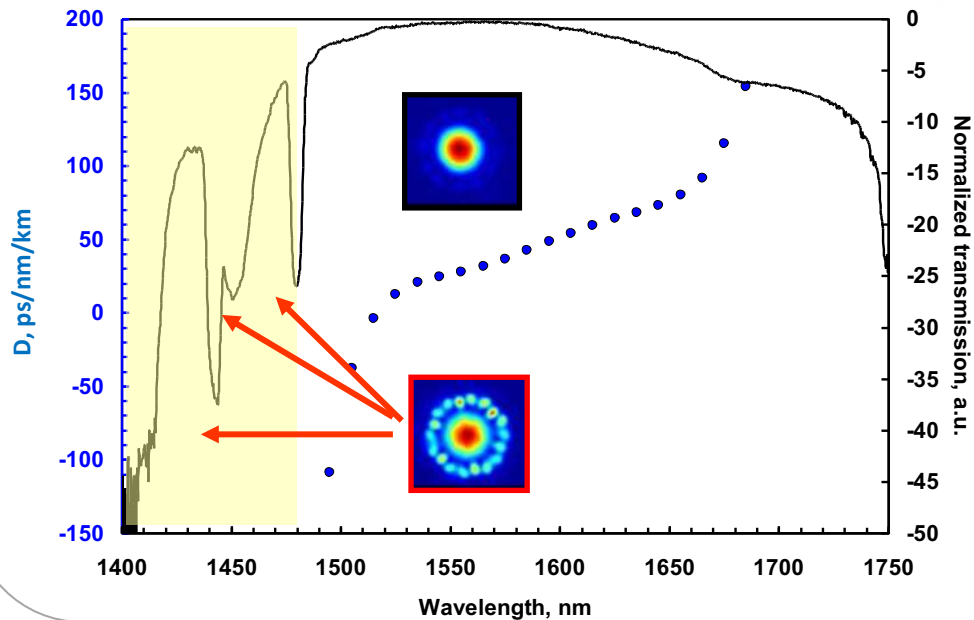
Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de cœur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du cœur avec gaine</i>	10^{-2}	$\sim 10^{-6}$
<i>Dispersion</i>	« forte »	« faible » Forte plage d'accordabilité

► Fibre à couplage inhibé



► Fibre à bande interdite



- *Bande + étroite*
- ↓
- *Profil en S plus prononcé*
- *Profil perturbé par modes de surface*

Fibres à cristal photonique à cœur creux

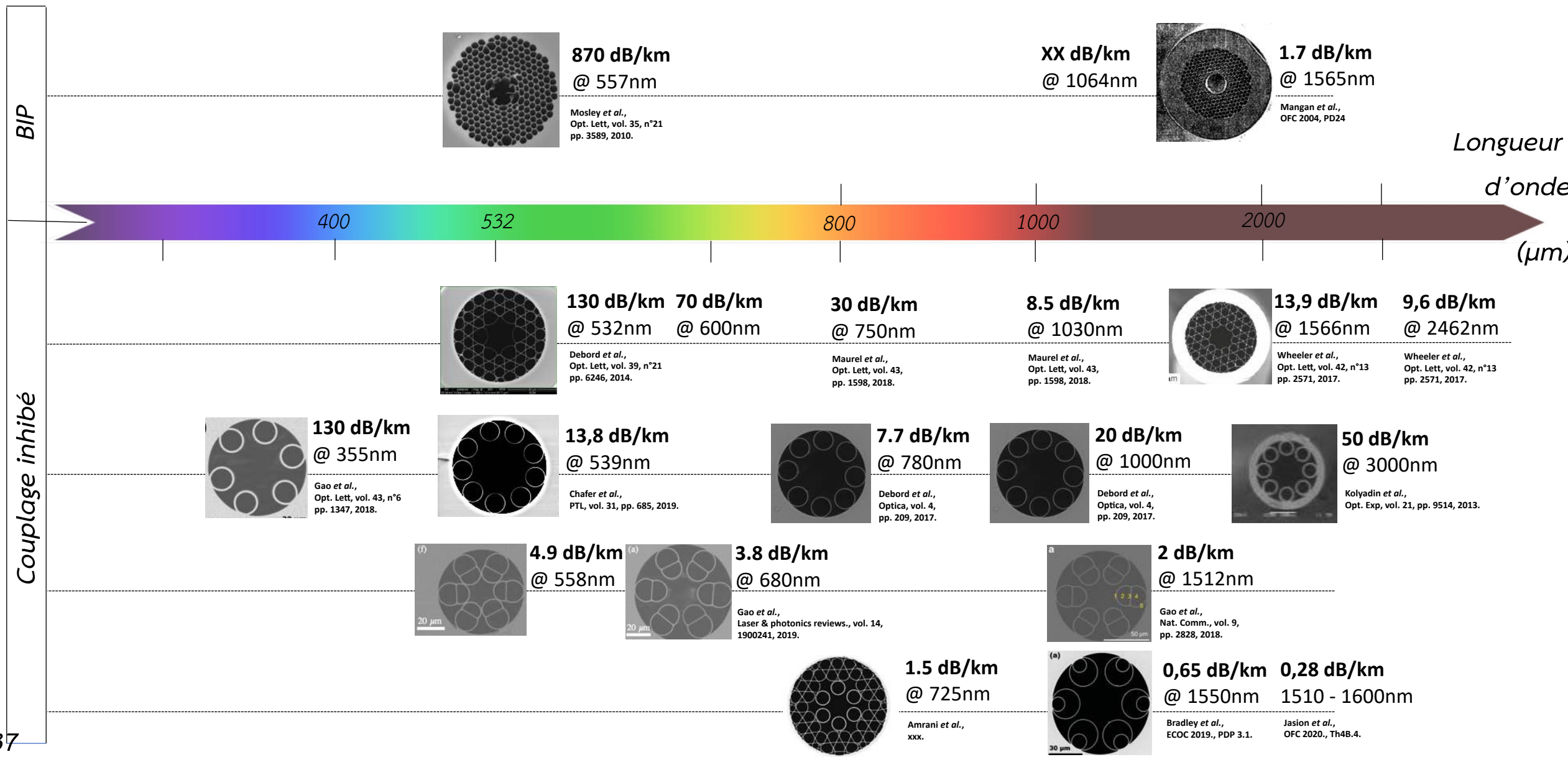
Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du coeur avec gaine</i>	10^{-2}	~ 10^{-6}
<i>Dispersion</i>	« forte »	« faible »
<i>Pertes</i>

...

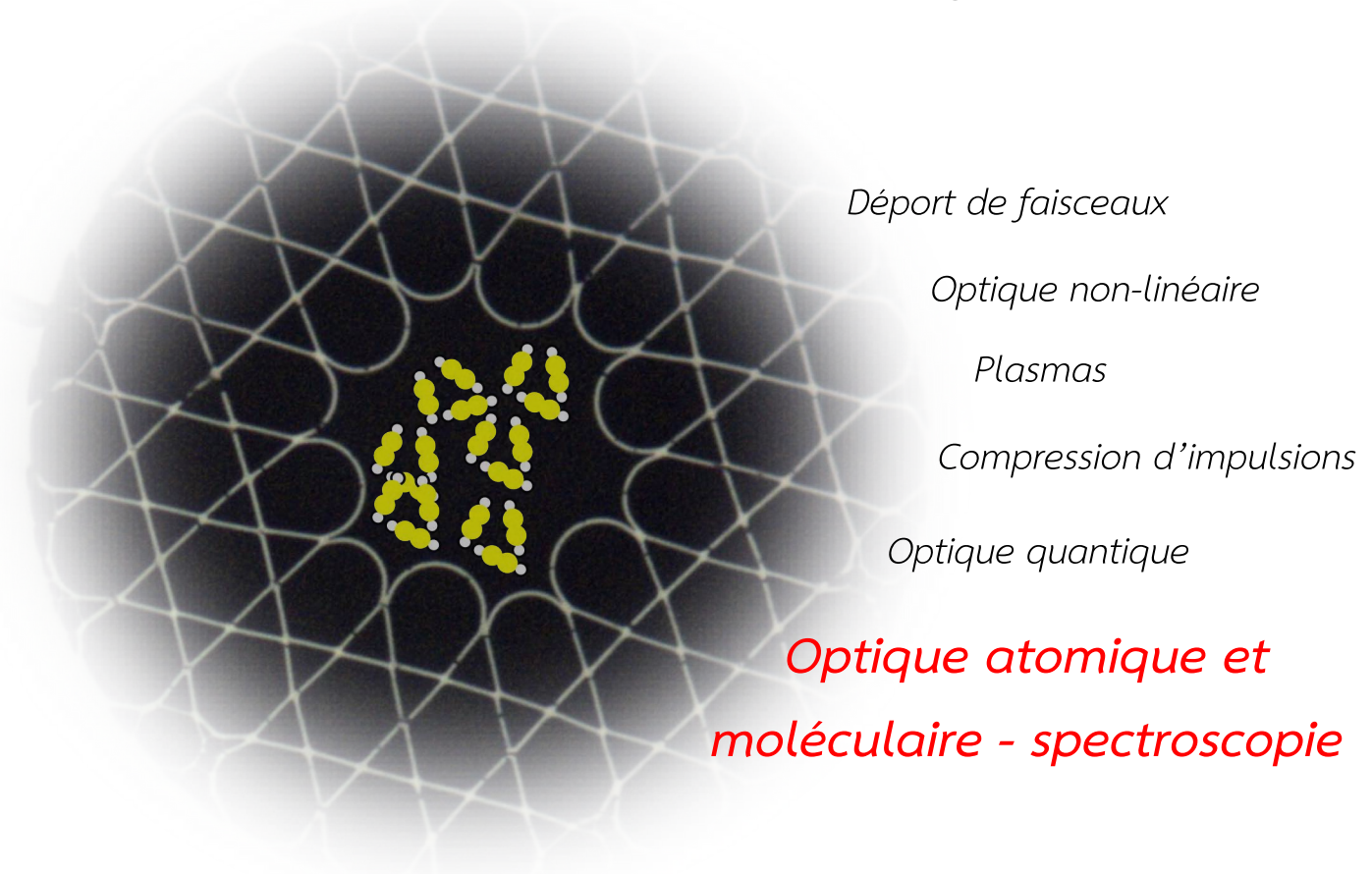
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage / Records pertes



	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du coeur avec gaine</i>	10^{-2}	~ 10^{-6}
<i>Dispersion</i>	« forte »	« faible »
<i>Pertes</i>	dB/km	

Fibres creuses remplies de gaz



Grande longueur d'interaction gaz-lumière

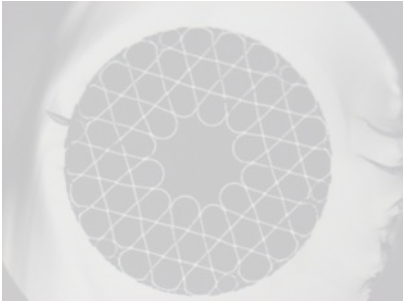
Fibres à cristal photonique à cœur creux

Guidage – Performances de guidage

	<i>BIP</i>	<i>CI</i>
<i>Taille de coeur</i>	5 à 20 μm	10 à 150 μm
<i>Ouverture num.</i>	0.2	0.01
<i>Domaine spectral</i>	> 800 nm	De l'UV à l'IR sur plusieurs bandes
<i>Largeur de bande</i>	~ 70 THz	~ 500 THz
<i>Contenu modal</i>	Modes de surface	Pas de mode de surface
<i>Recouvrement mode du coeur avec gaine</i>	10^{-2}	~ 10^{-6}
<i>Dispersion</i>	« forte »	« faible »
<i>Pertes</i>	« faible »	

Développement de PMC
-
Étalons de fréquence

Fibres à cristal photonique à cœur creux remplies de gaz : outil pour la métrologie



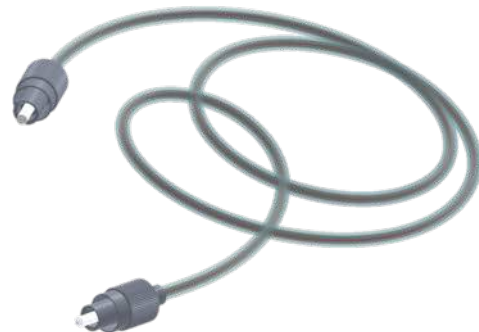
Familles de fibres creuses (bande interdite photonique, couplage inhibé)

Mécanismes de guidage

Performances optiques, caractérisation et limites

Avantages et inconvénients pour le dvt d'étalons de fréquence

Développement de « Photonic Microcell » pour références de fréquence



Définition d'une PMC « Photonic microcell »

Méthodes de fabrication

Spectroscopie et conception d'étalon de fréquence optique

Comparatif pour application de stabilisation de faisceau laser

PMC pour références de fréquence

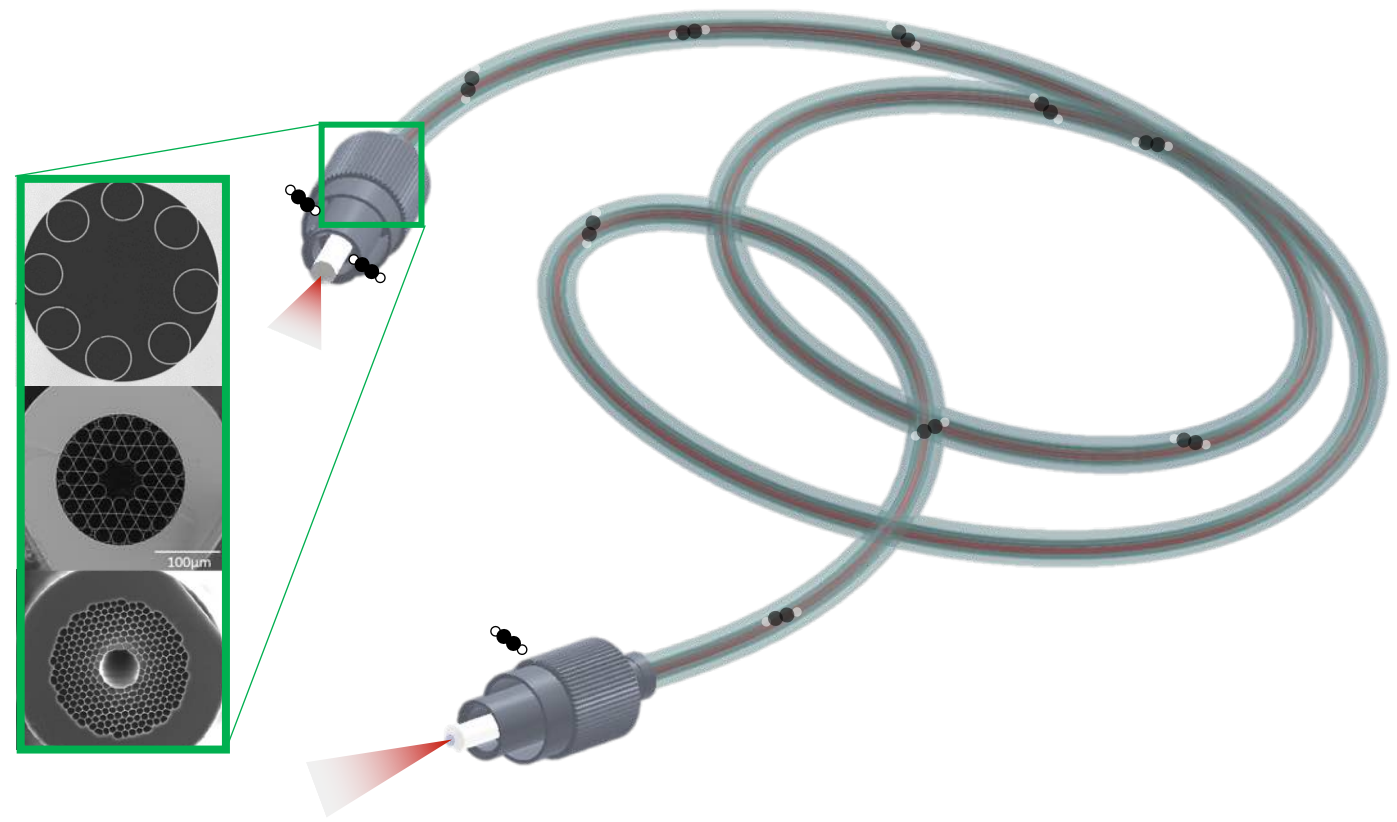
Description

Avantages de la fibre à cœur creux :

- Grande longueur d'interaction gaz-lumière
- Intégrabilité aux systèmes photoniques
- Compacité

A prendre en compte :

- Confinement du gaz – proximité des parois
- Perturbation engendrée par l'encapsulation



Hollow core fiber (HC-PCF)

*Couplage inhibé
Bande photonique interdite*

+

Chargement du gaz

Acétylène, dioxyde de carbone, hydrogène...

+

Encapsulation

Différentes méthodes décrites plus tard

PMC pour références de fréquence


Fabrication

Technique	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoins HCPCF	Potentiel contaminant
	cm's x cm's	Non	<0.3 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

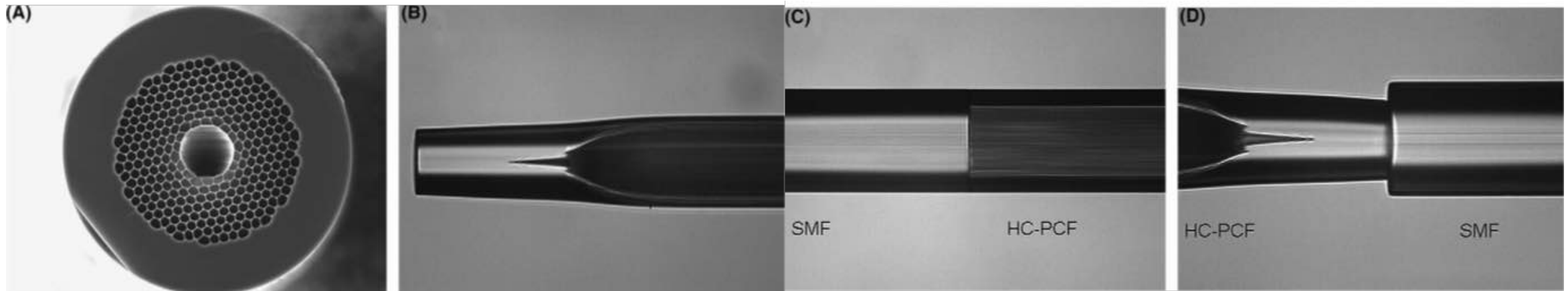


PMC pour références de fréquence

Fabrication


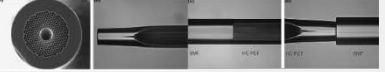
Technique	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoins HCPCF	Potentiel contaminant
	cm's x cm's	Non	<0.3 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

Couny et al., OptCom, 263(1), 28 (2006)

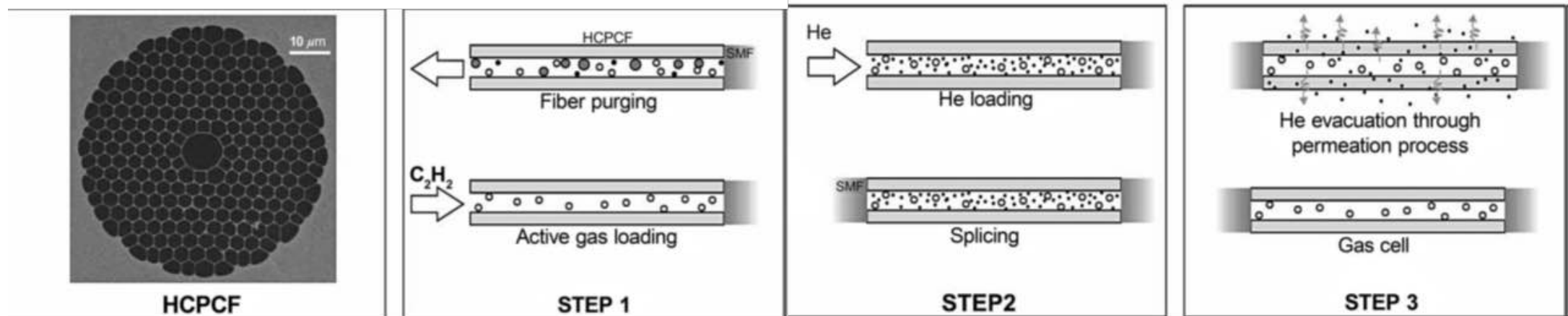


PMC pour références de fréquence

Fabrication


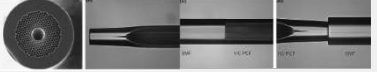
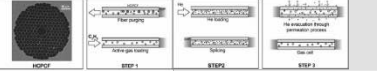
Technique	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoins HCPCF	Potentiel contaminant
	cm's x cm's	Non	<0.3 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

Light et al., OptLet, 32(10),1323 (2006)

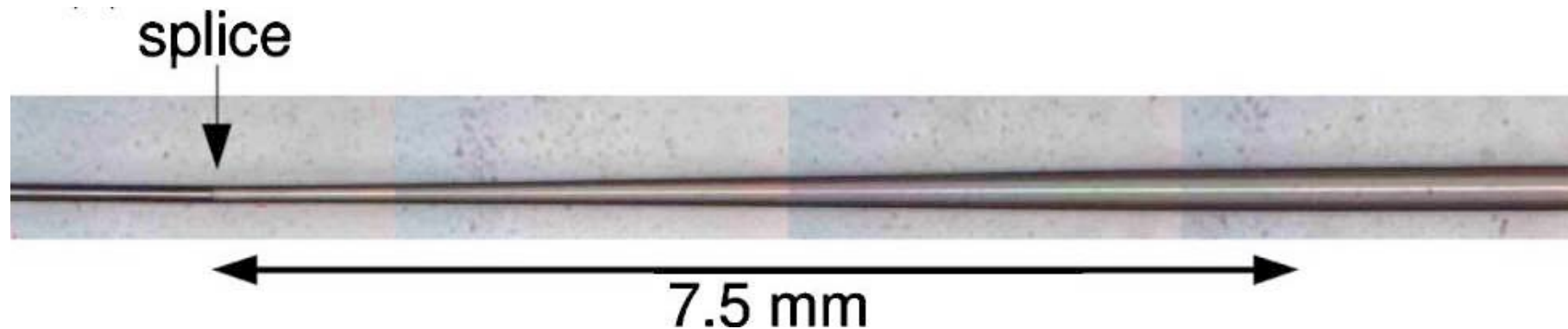


PMC pour références de fréquence

Fabrication


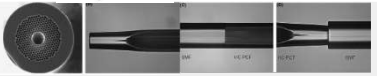
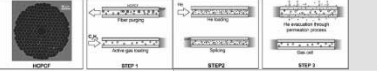
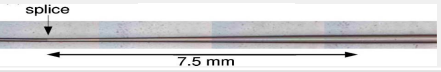
Technique	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoins HCPCF	Potentiel contaminant
	cm's x cm's	Non	<0.3 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

Wheeler et al., OptLet, 35(11), 1875 (2010)

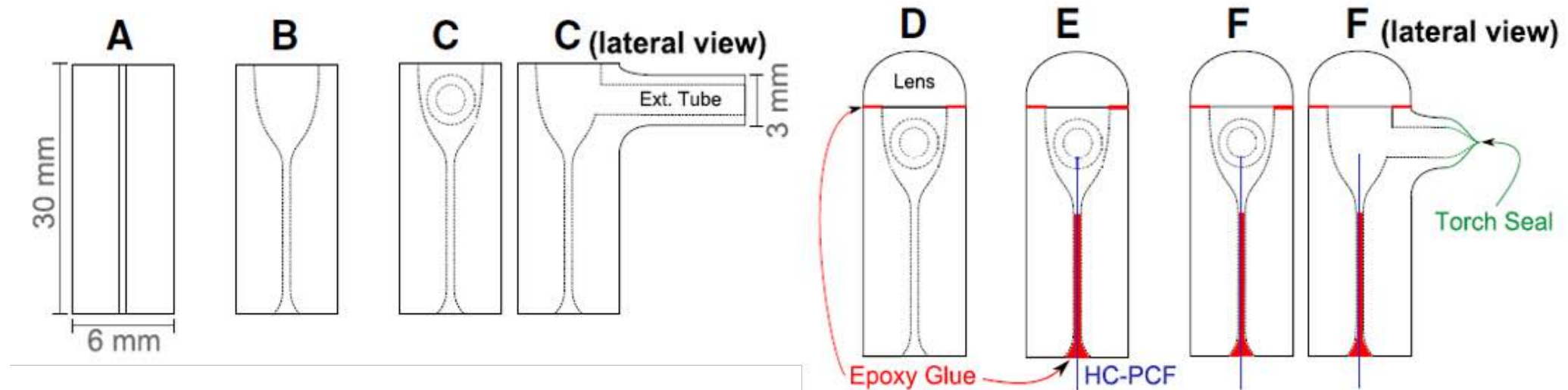


PMC pour références de fréquence

Fabrication


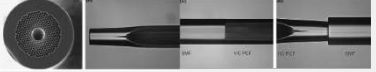
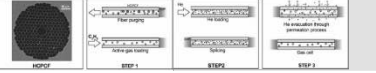
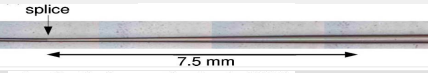
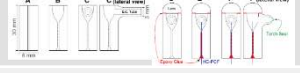
Technique	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoins HCPCF	Potentiel contaminant
	cm's x cm's	Non	<0.3 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

Triches et al., AppPhys, 23(9), 11227 (2015)

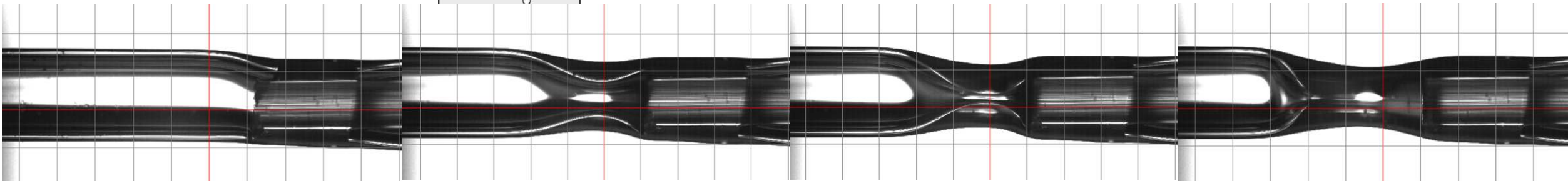
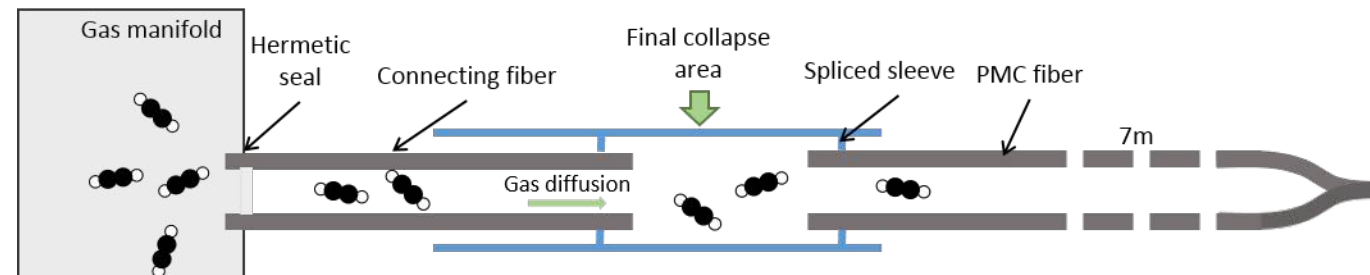


PMC pour références de fréquence

Fabrication




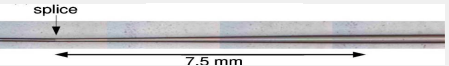
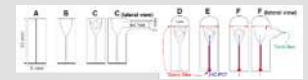

Technique	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoins HCPCF	Potentiel contaminant
	cm's x cm's	Non	<0.3 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

Modified end-cap



PMC pour références de fréquence

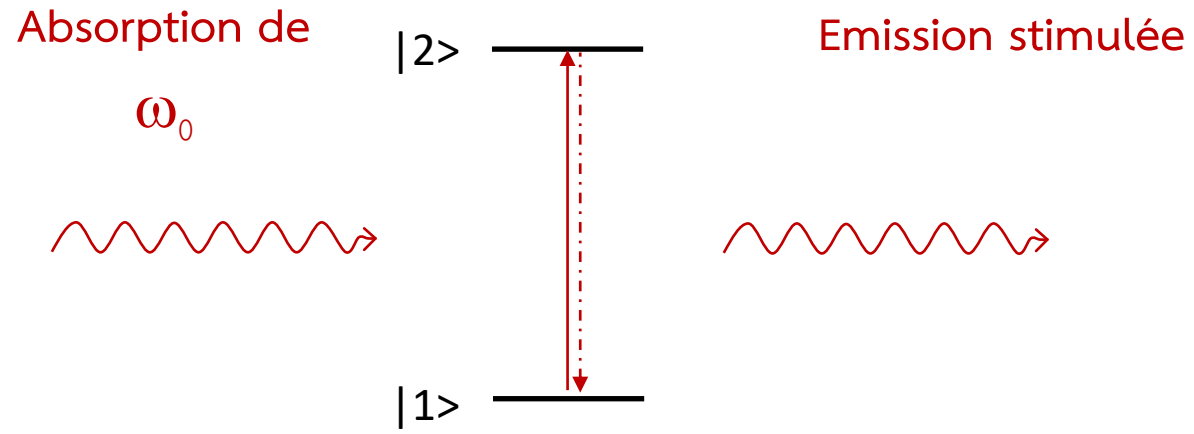
Fabrication

Technique	Compacité et intégration		Performances		
	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoin HCPCF	Potentiel contaminant
 <p>GLOphotonics</p>	cm's x cm's	Non	1 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
 <p>Couny et al., <i>OptCom</i>, 261(1), 28 (2006)</p>	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
 <p>Light et al. <i>Opt Lett</i>, 31(17), 2538 (2006)</p>	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
 <p>Wheeler et al. <i>Opt Lett</i>, 35(11), 1875 (2010)</p>	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
 <p>Triches et al., <i>AppPhys</i>, 23(9), 11227 (2015)</p>	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
 <p>Billotte et al., <i>CLEO Europe</i>, pp. 1-1, doi: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871523, (2019)</p>	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

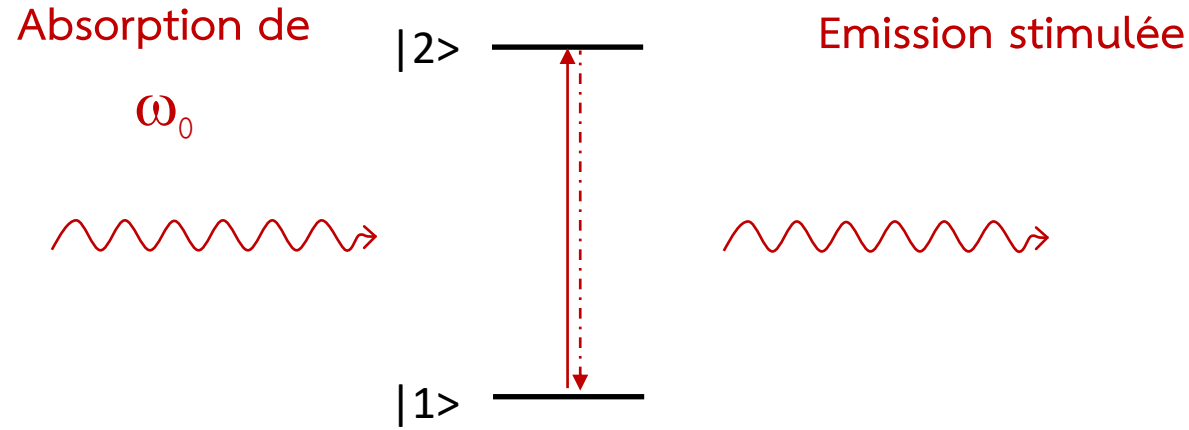
Absorption et émission stimulées



PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

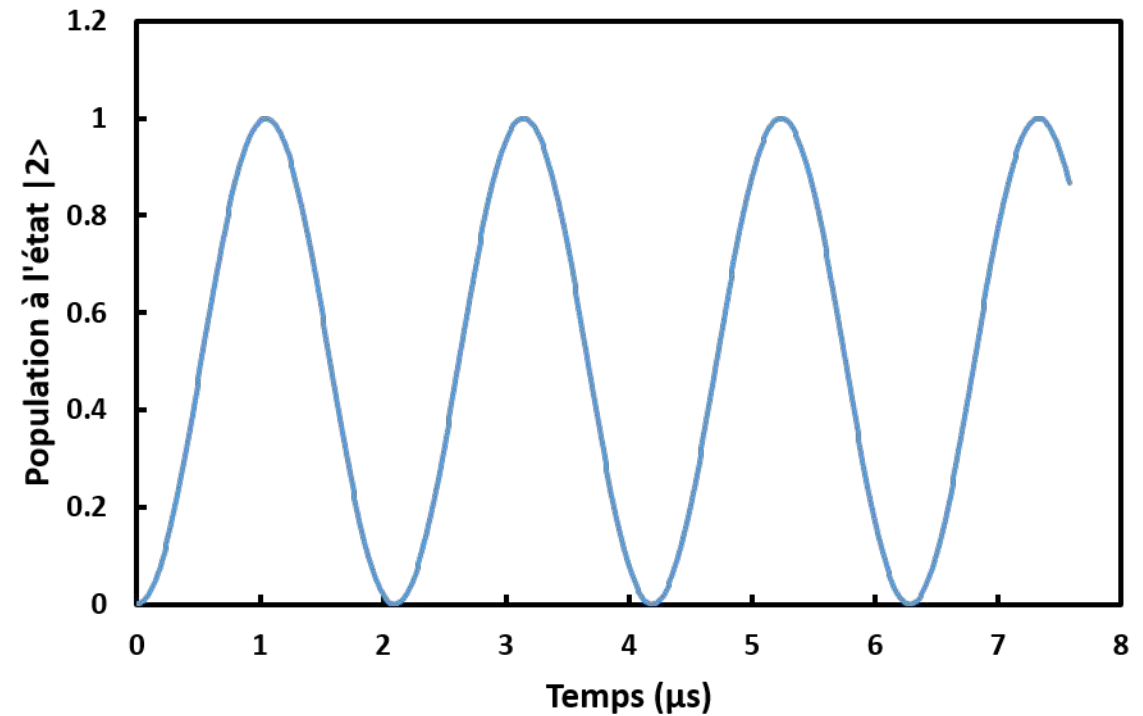
Absorption et émission stimulées



Fréquence de Rabi

$$\Omega_R = \frac{eE_0 \langle 1|x|2 \rangle}{\hbar} = \frac{E_0 \mu_{12}}{\hbar}$$

$$|c_2(t)|^2 = \sin^2(\Omega_R t)$$

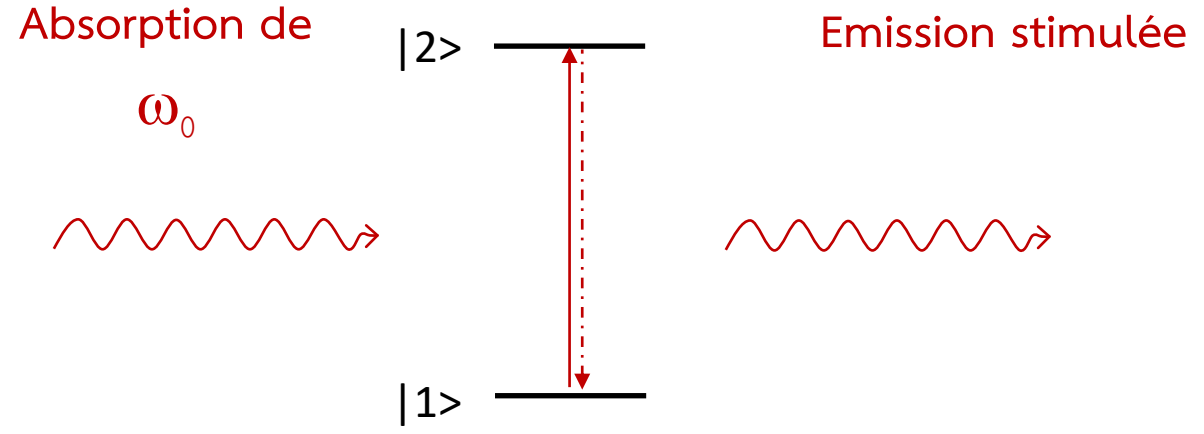


— Décalage nul

PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

Absorption et émission stimulées



Si l'interaction (ω_{las}) est différente de la résonance ω_0 :

$$|c_2(t)|^2 = \frac{\Omega_R^2}{4} * \left(\frac{2 \sin\left(\frac{\Omega_{Rg} t}{2}\right)}{\Omega_{Rg}} \right)^2$$

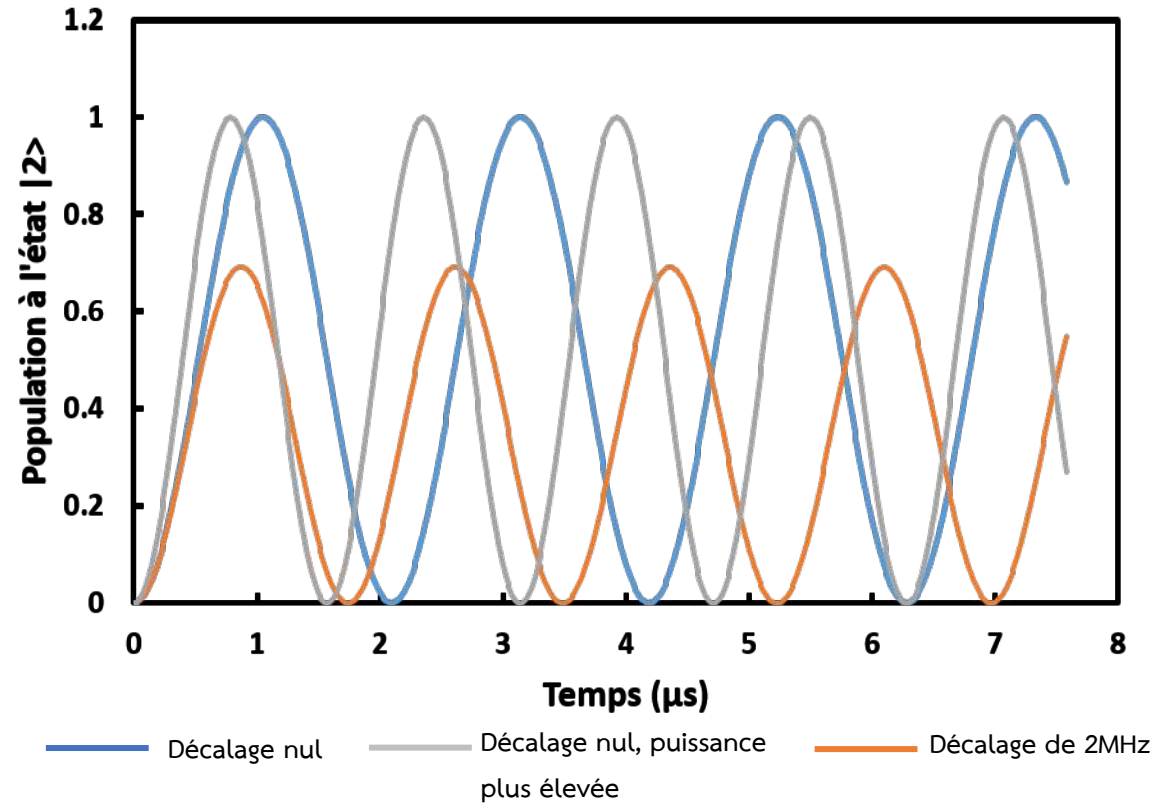
Avec :

$$\begin{cases} \Omega_{Rg} = \sqrt{\delta^2 + \Omega_R^2} \\ \delta = \omega_{las} - \omega_0 \end{cases}$$

Fréquence de Rabi

$$\Omega_R = \frac{eE_0 \langle 1|x|2 \rangle}{\hbar} = \frac{E_0 \mu_{12}}{\hbar}$$

$$|c_2(t)|^2 = \sin^2(\Omega_R t)$$

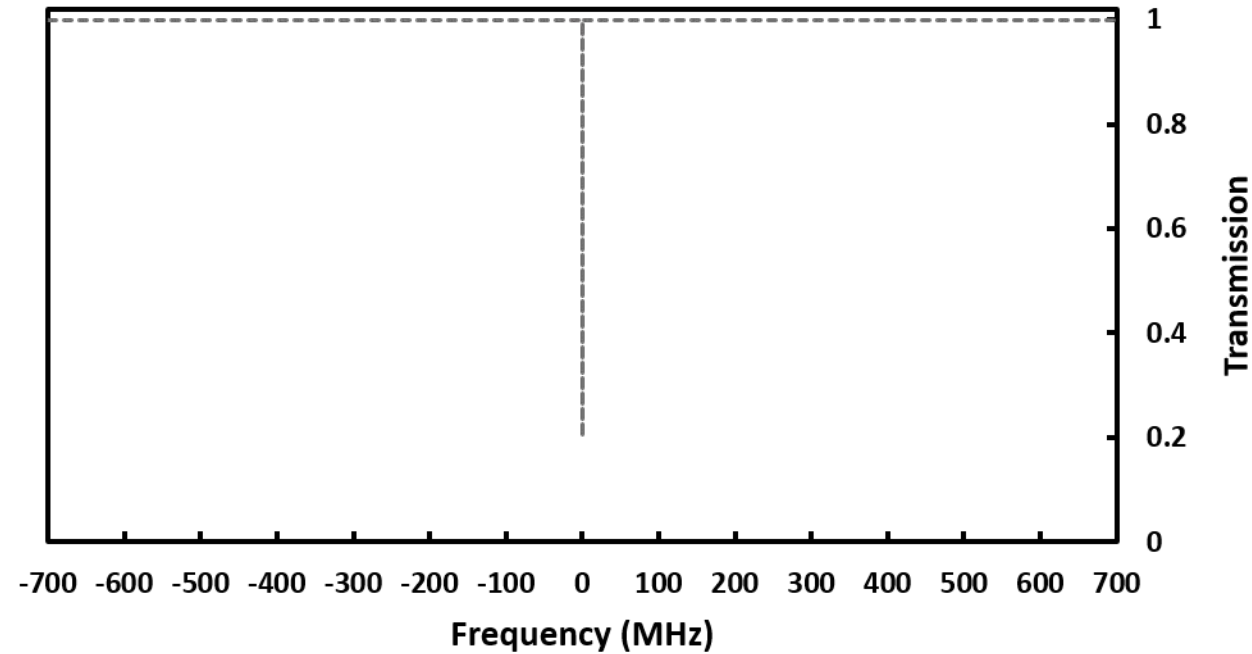
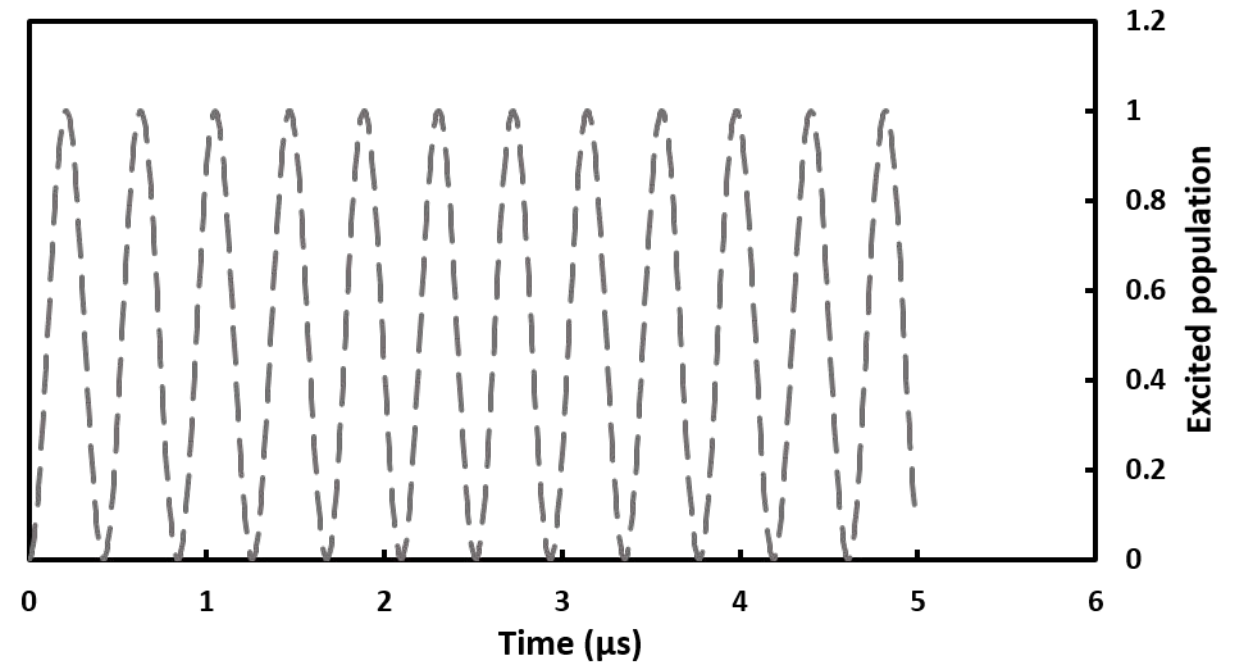


PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

La spectroscopie d'absorption peut être considérée comme la transformée de Fourier des oscillations de la transition atomiques

- Cas d'un oscillateur idéal

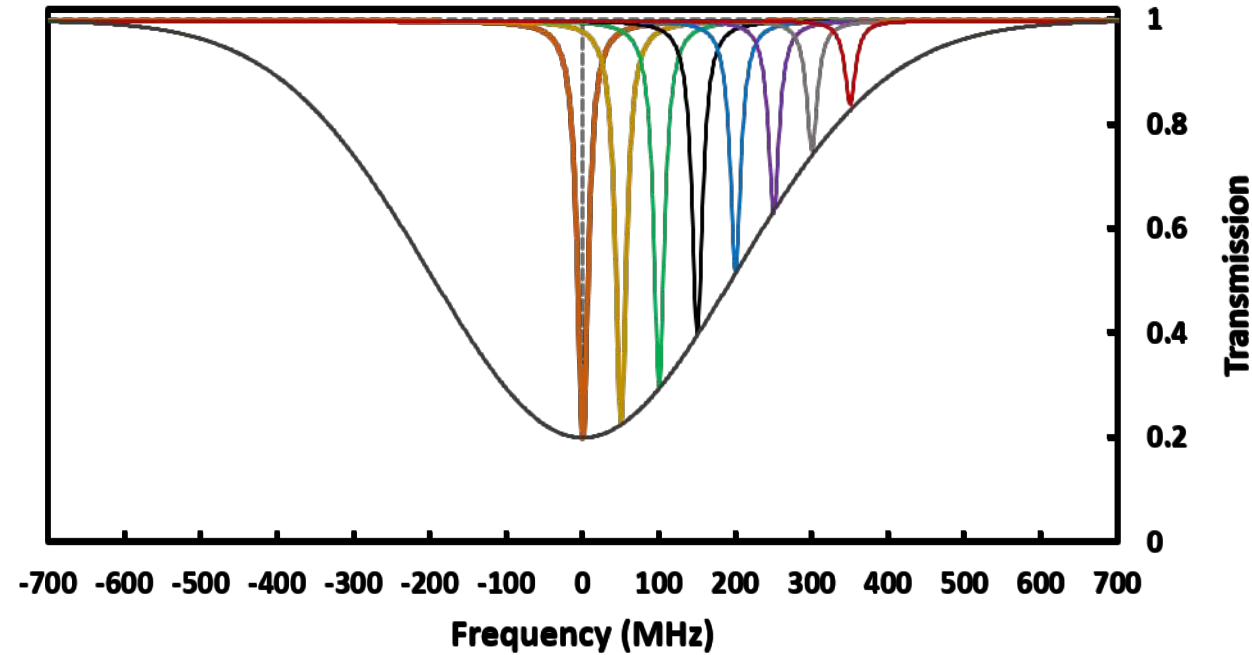
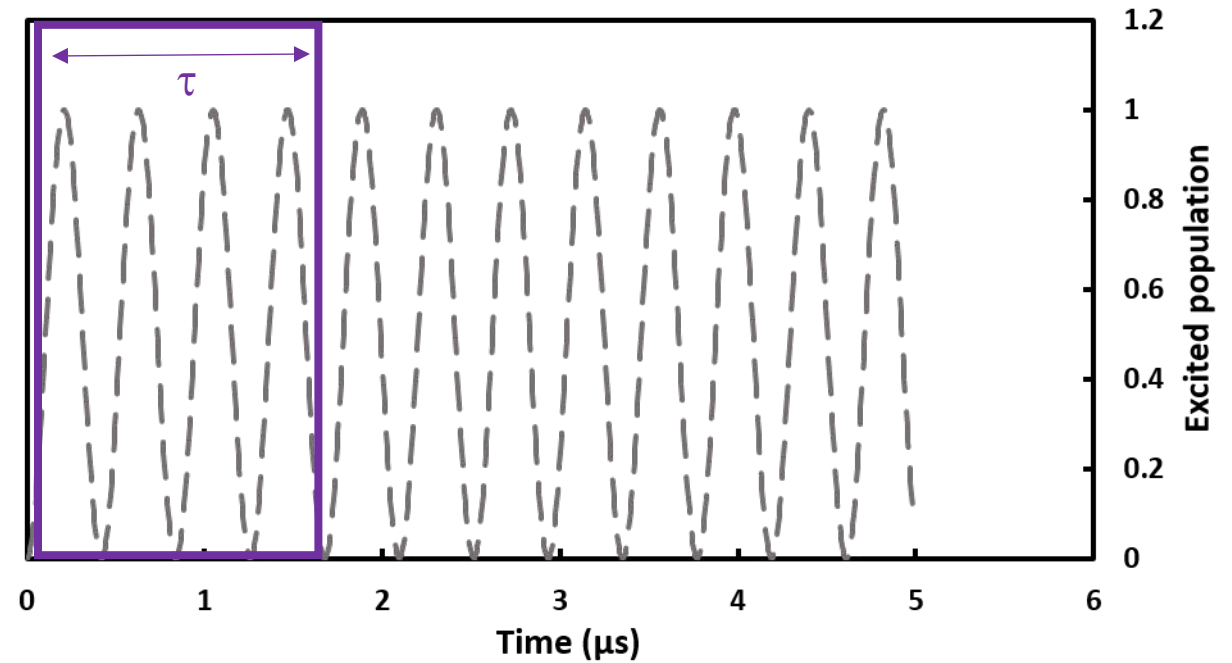
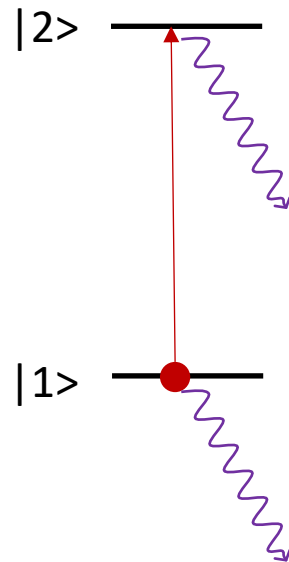
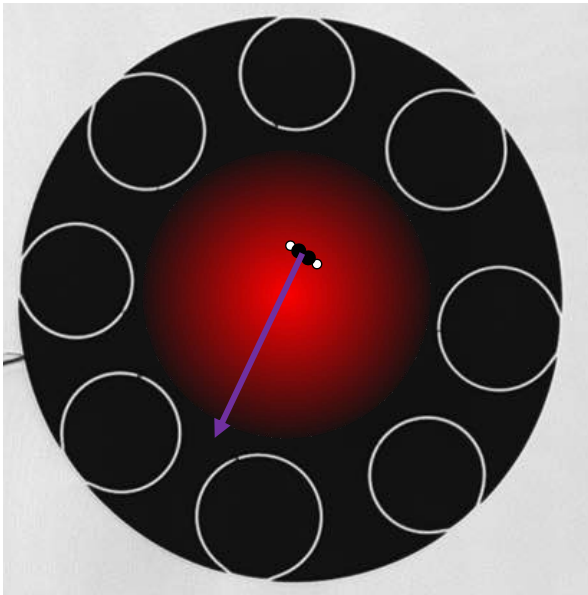


PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

La spectroscopie d'absorption peut être considérée comme la transformée de Fourier des oscillations de la transition atomiques

- Cas d'un oscillateur idéal
- Durée de vie de la transition avant d'être relaxé vers d'autres niveaux ou temps d'interrogation (temps passé par l'atome ou molécule dans le faisceau)

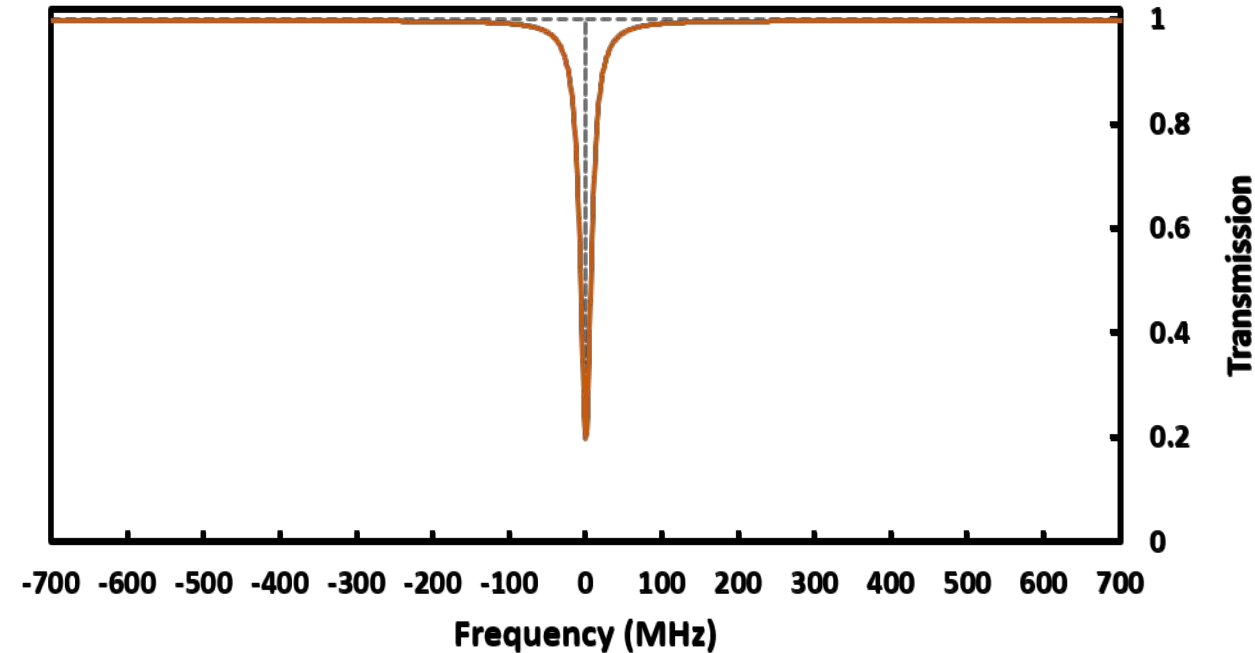
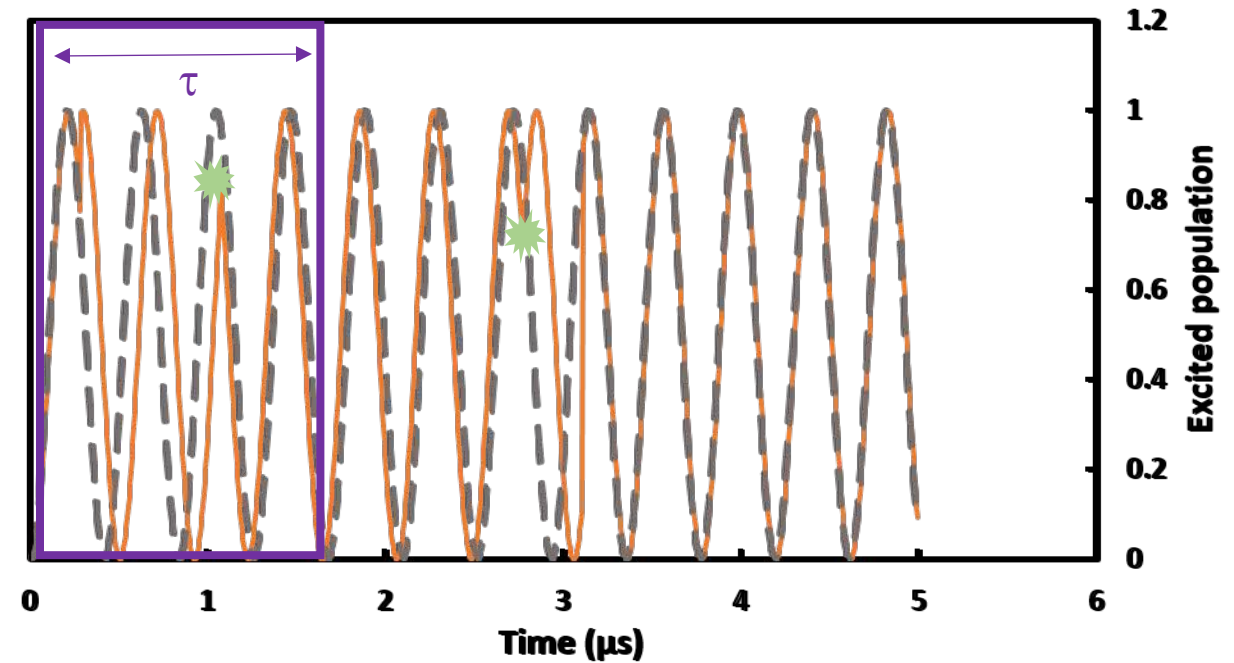
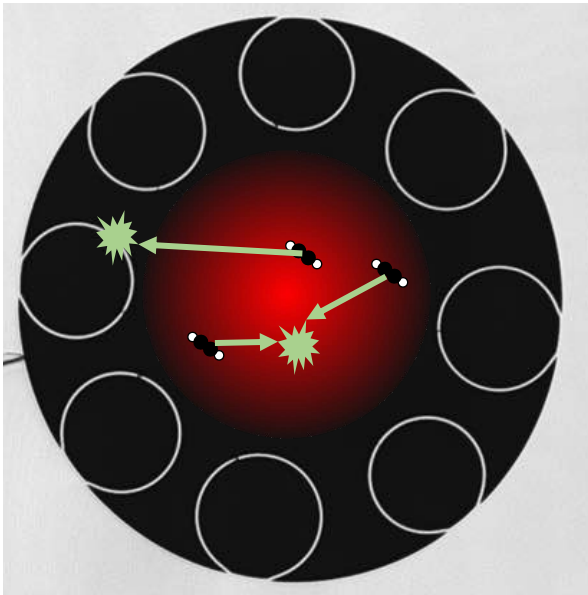


PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

La spectroscopie d'absorption peut être considérée comme la transformée de Fourier des oscillations de la transition atomiques

- Cas d'un oscillateur idéal
- Durée de vie de la transition avant d'être relaxé vers d'autres niveaux ou temps d'interrogation (temps passé par l'atome ou molécule dans le faisceau)
- Déphasage (due principalement aux collisions)



PMC pour références de fréquence

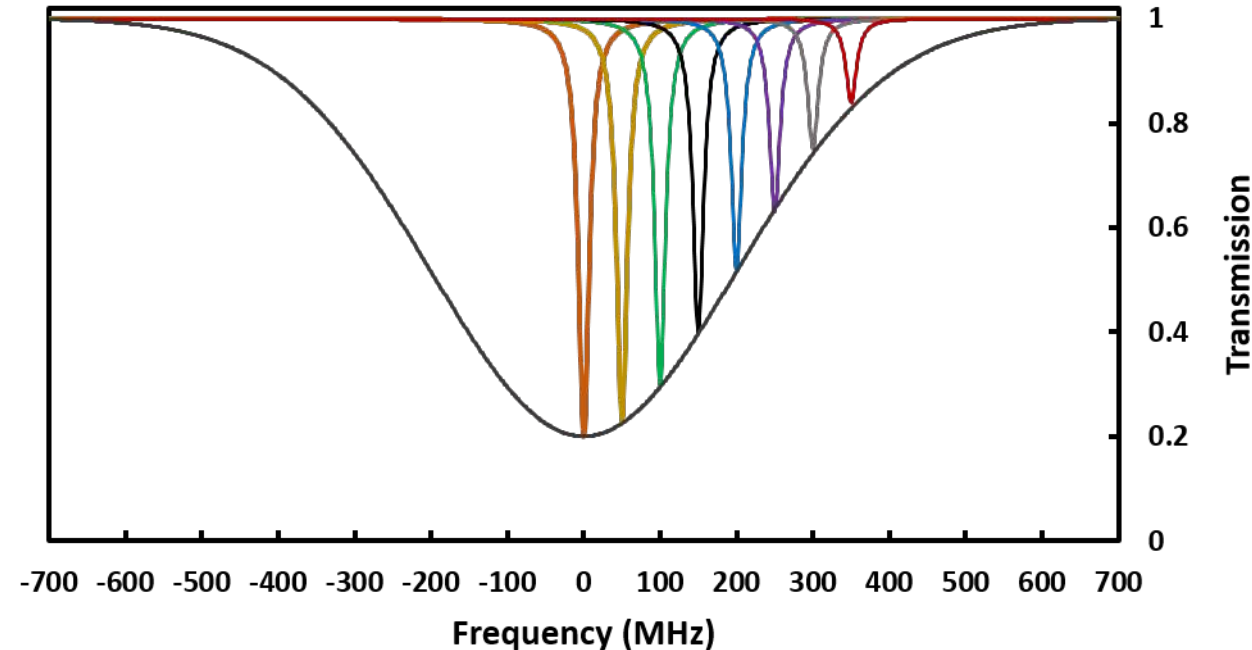
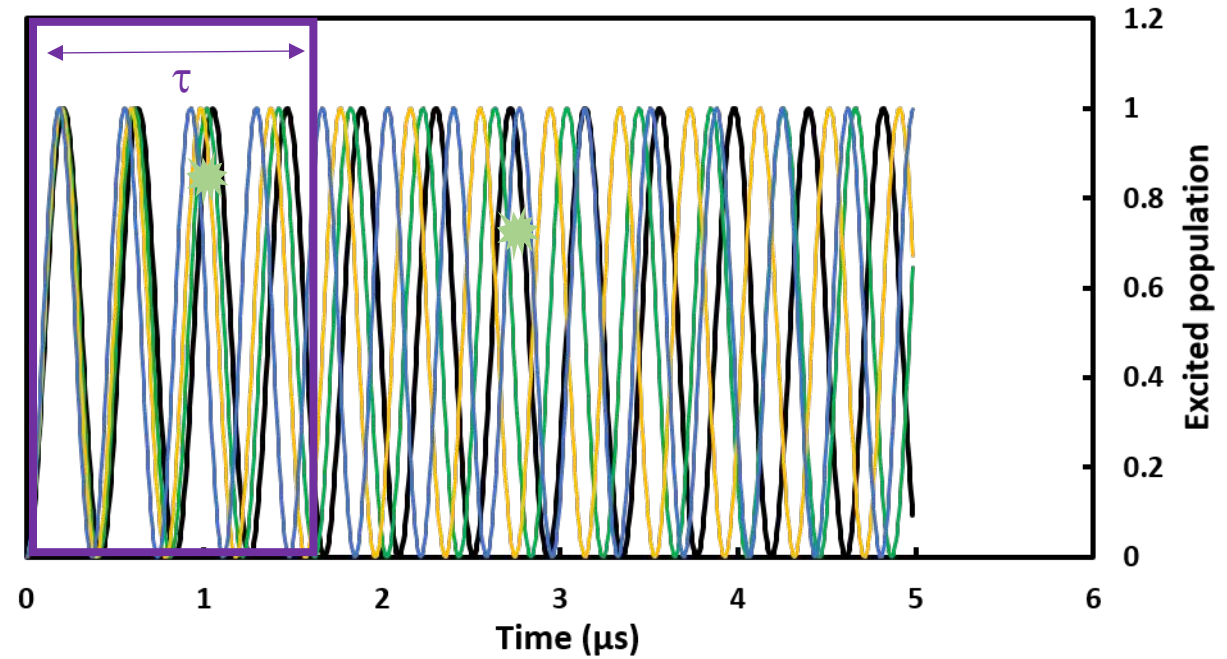
Spectroscopie

La spectroscopie d'absorption peut être considérée comme la transformée de Fourier des oscillations de la transition atomiques

- Cas d'un oscillateur idéal
- Durée de vie de la transition avant d'être relaxé vers d'autres niveaux ou temps d'interrogation (temps passé par l'atome ou molécule dans le faisceau)
- Déphasage (due principalement aux collisions)
- Vitesse des atomes ou molécules (effet Doppler)



Nouvelle énergie de transition : $\hbar\omega_{\delta} = \hbar(\omega_0 \pm \delta)$

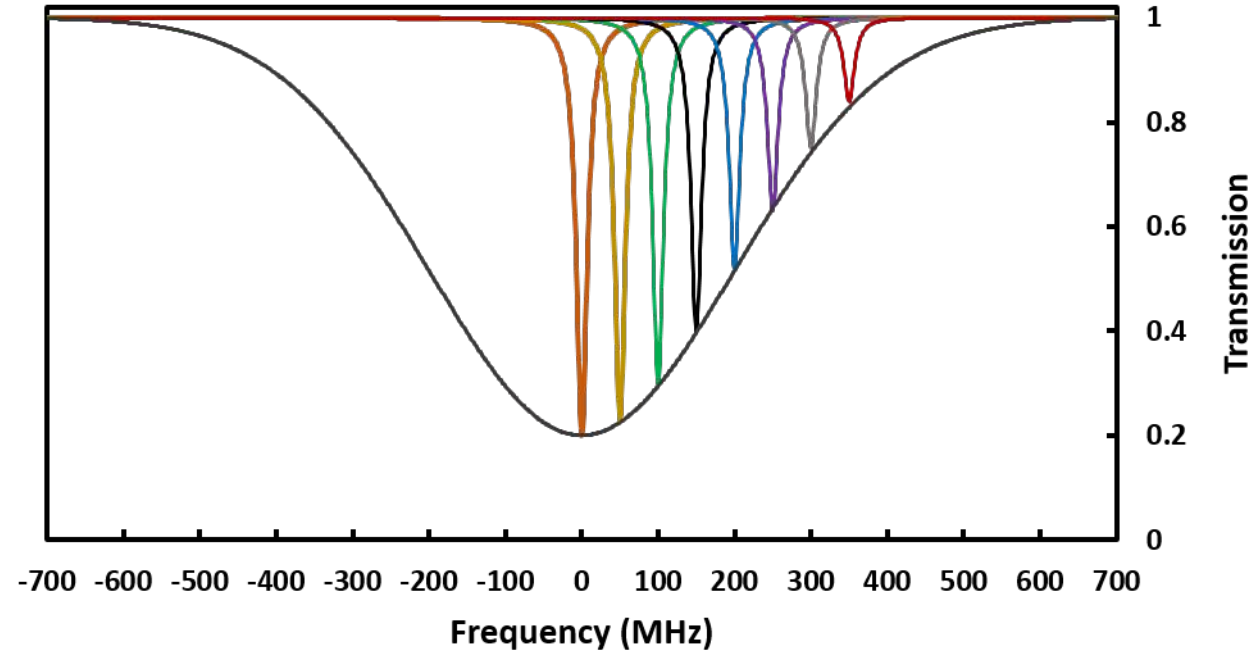
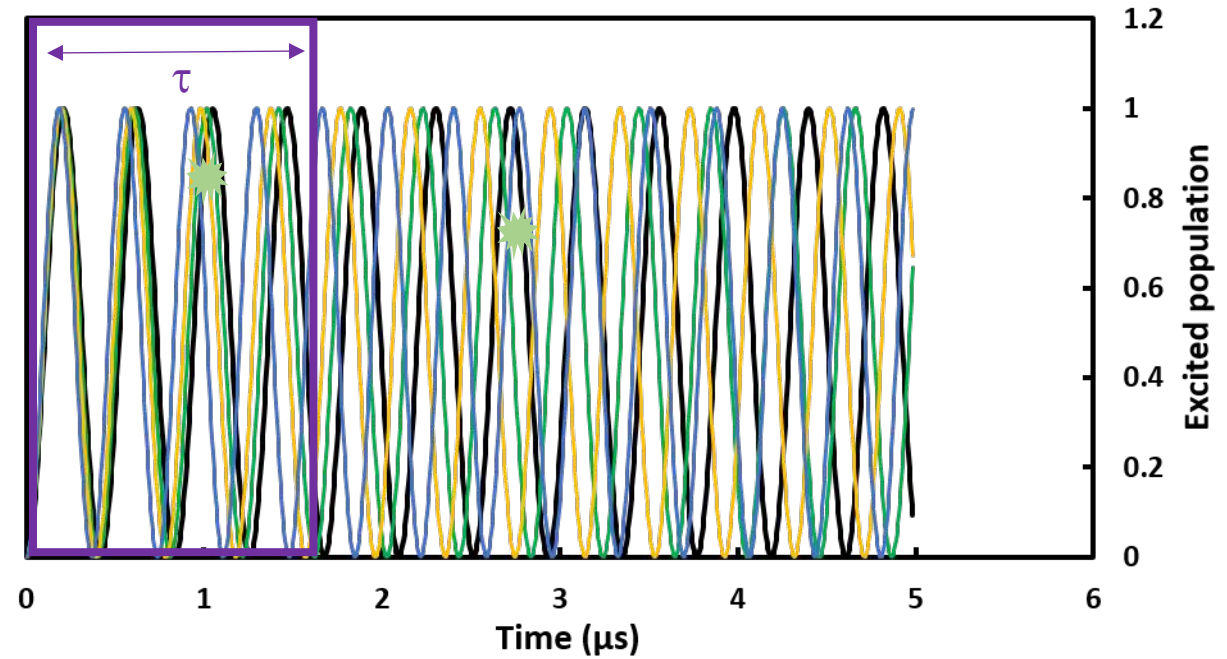


PMC pour références de fréquence

Spectroscopie

La spectroscopie d'absorption peut être considérée comme la transformée de Fourier des oscillations de la transition atomiques

- Cas d'un oscillateur idéal
- Durée de vie de la transition avant d'être relaxé vers d'autres niveaux ou temps d'interrogation (temps passé par l'atome ou molécule dans le faisceau)
- Déphasage (due principalement aux collisions)
- Vitesse des atomes ou molécules (effet Doppler)



Instabilité fractionnelle en fréquence d'un oscillateur atomique :

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\Delta\nu \tau^{1/2}}{\nu S/N}$$

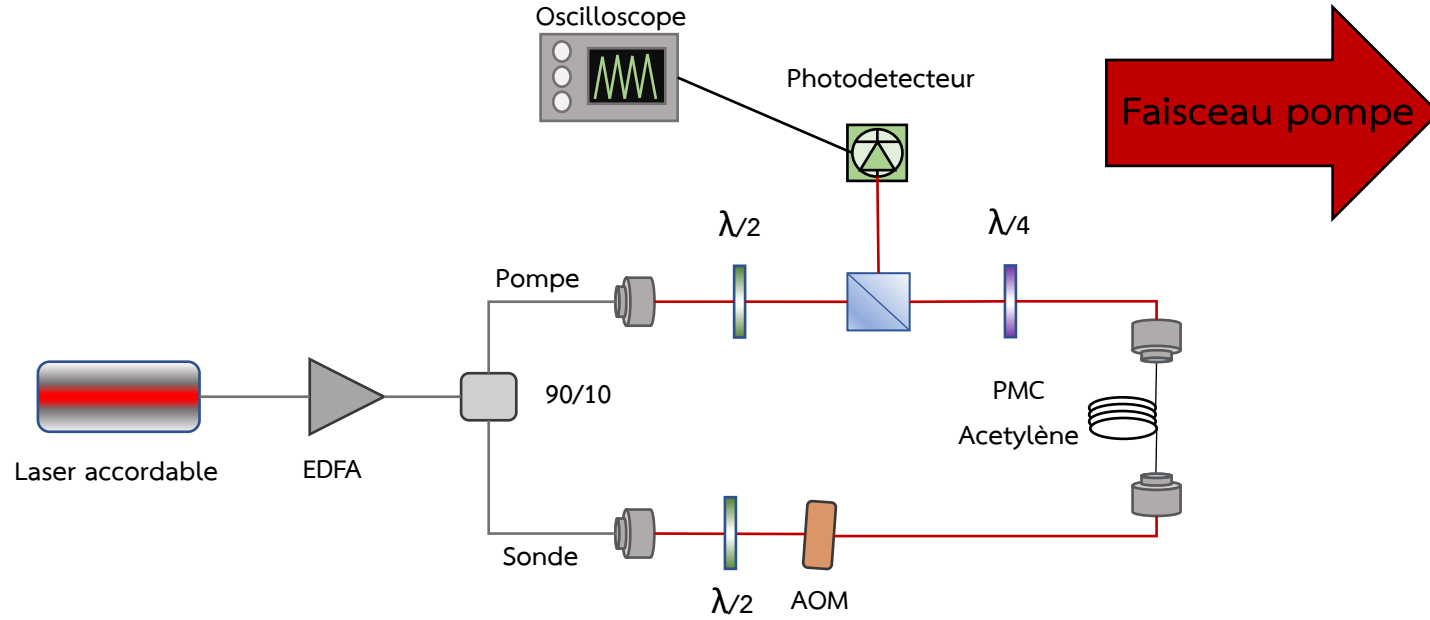
But : le minimiser



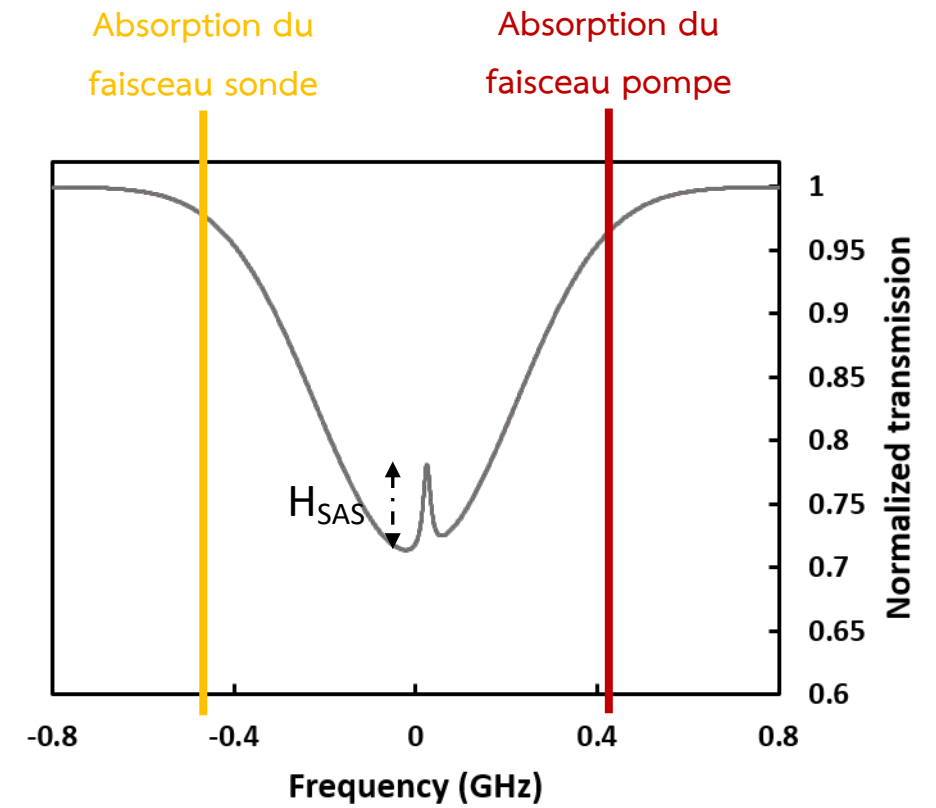
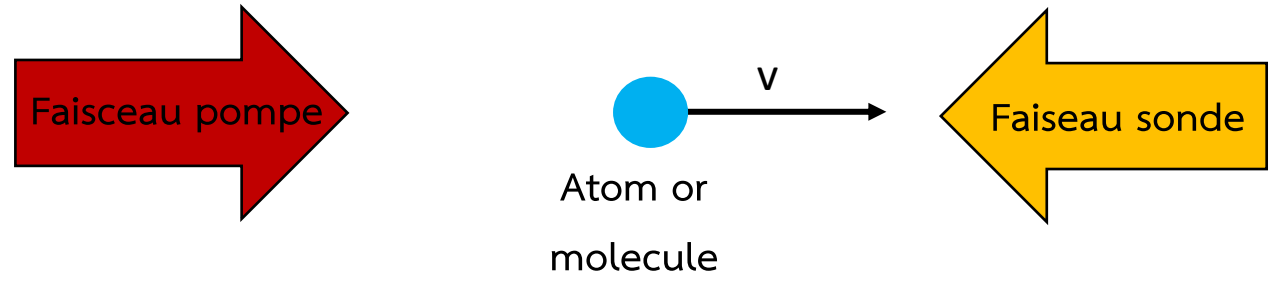
Augmenter S/N
Réduire $\Delta\nu$
Augmenter ν

PMC pour références de fréquence

Spectroscopie sub Doppler

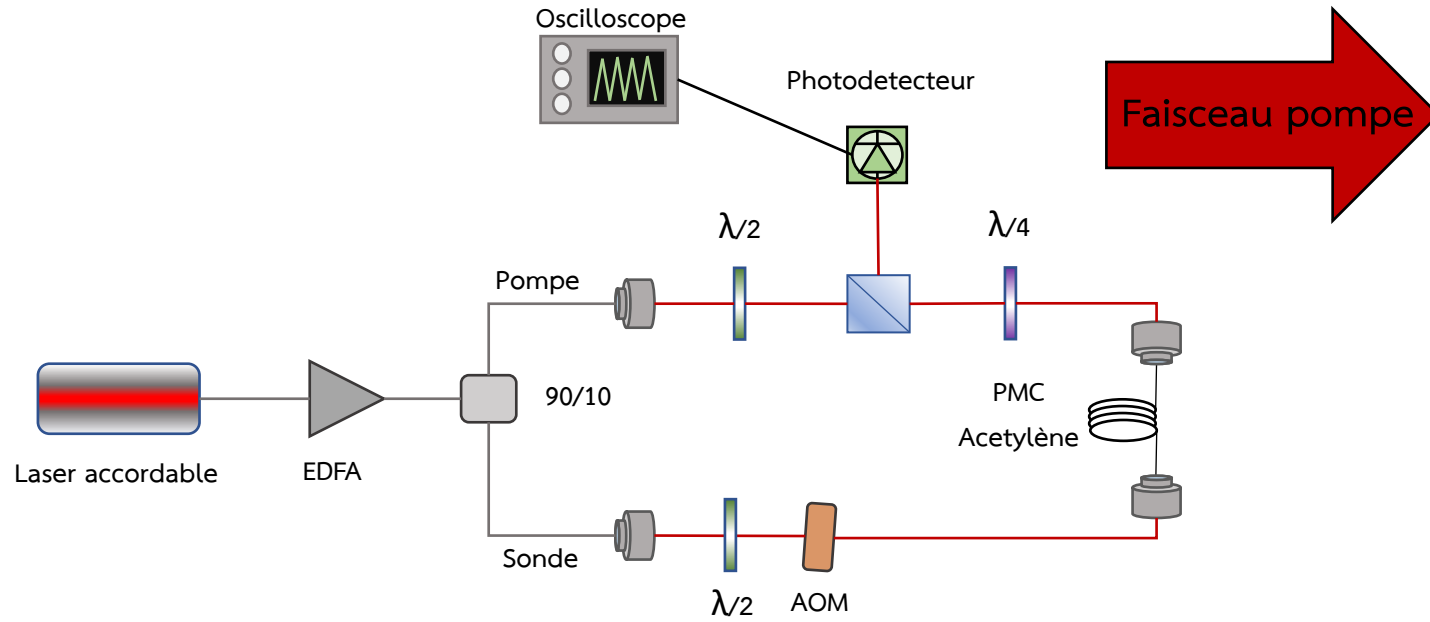


Avec l'effet Doppler :

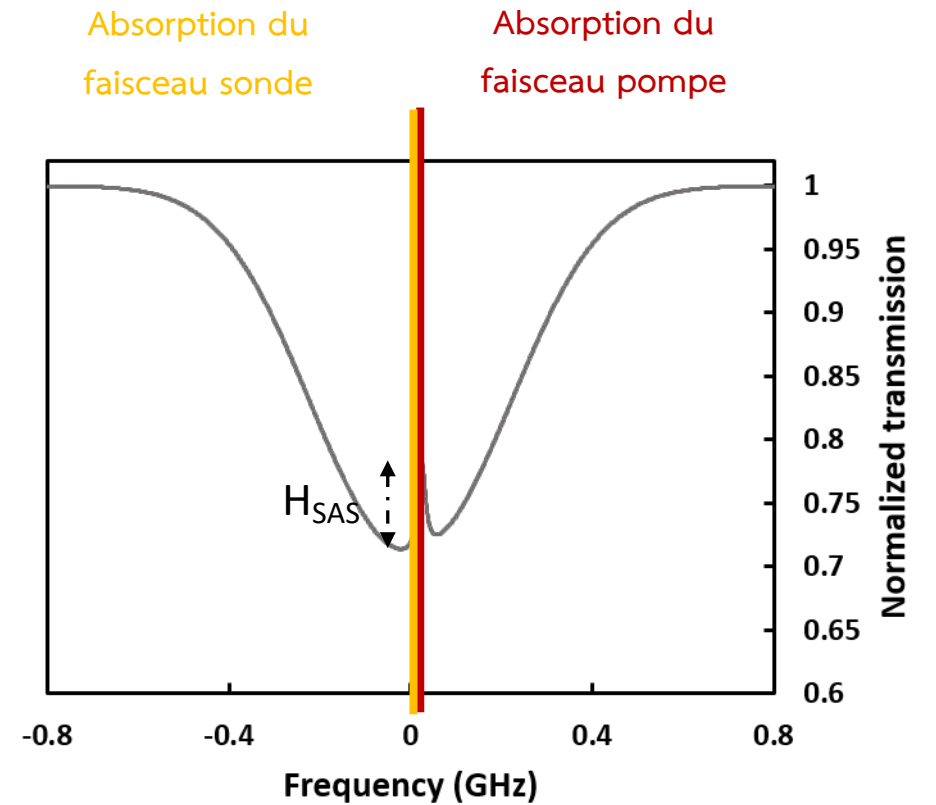
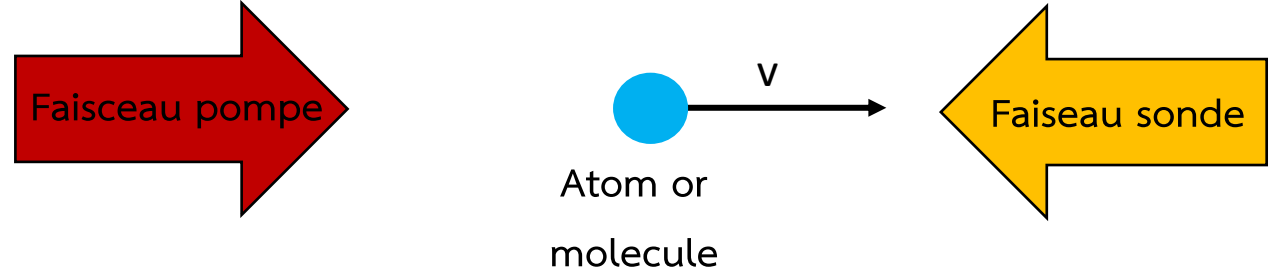


PMC pour références de fréquence

Spectroscopie sub Doppler

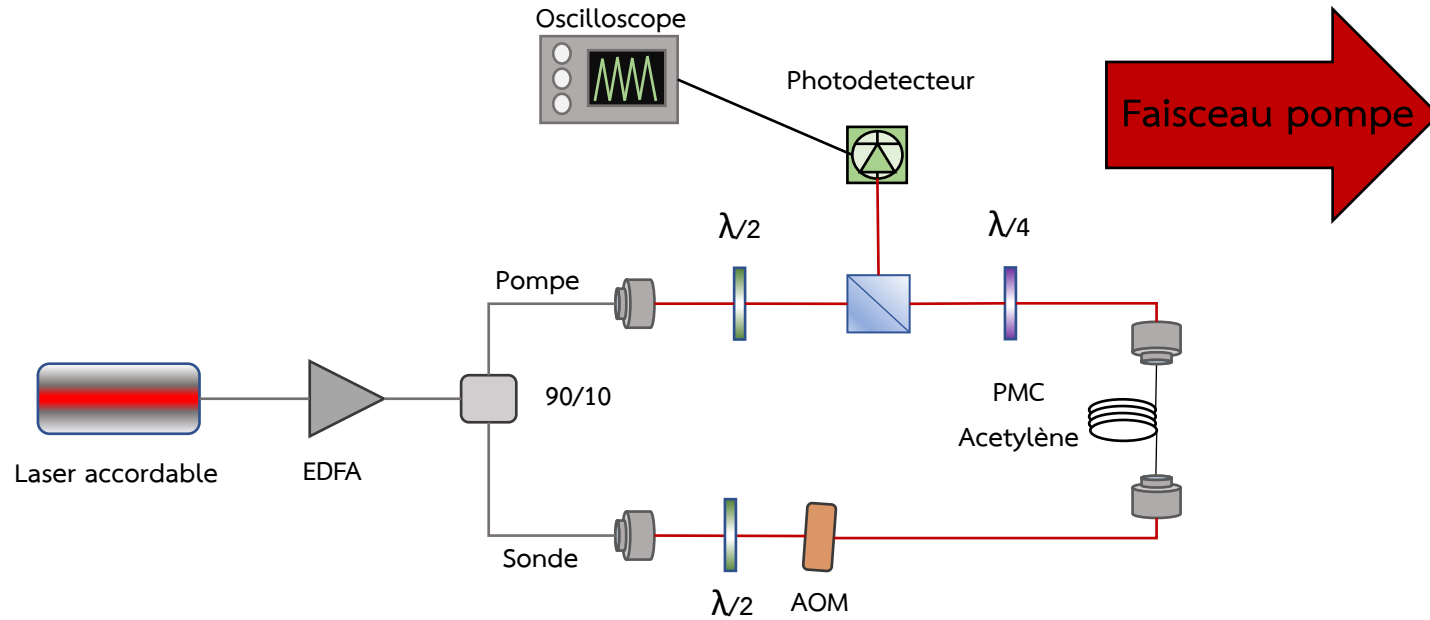


Avec l'effet Doppler :

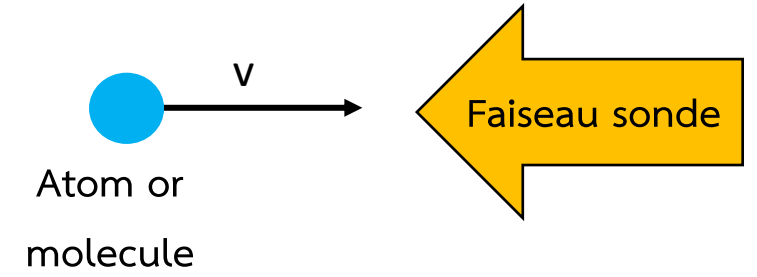


PMC pour références de fréquence

Spectroscopie sub Doppler

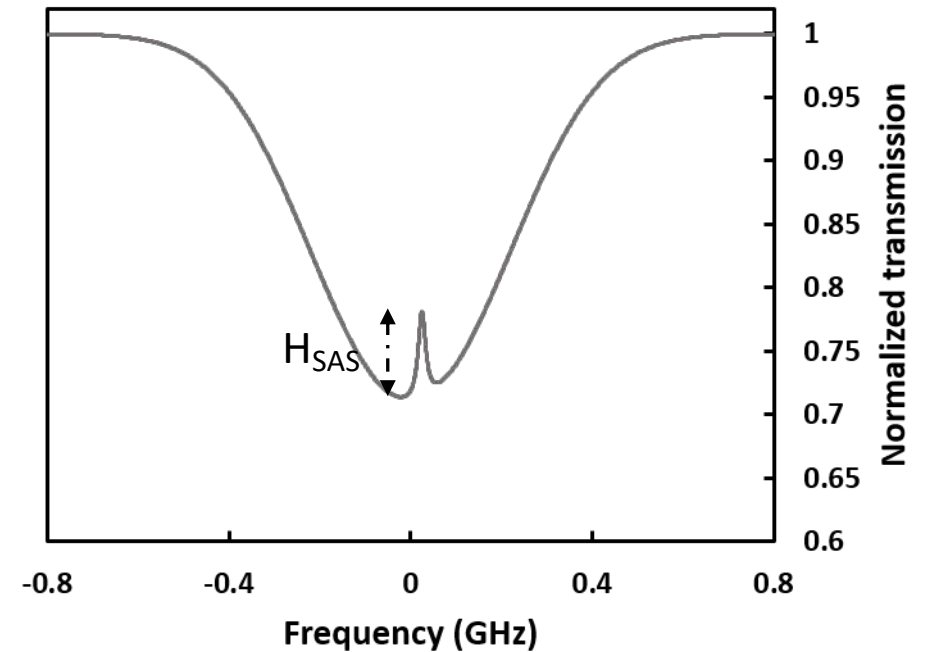


Avec l'effet Doppler :



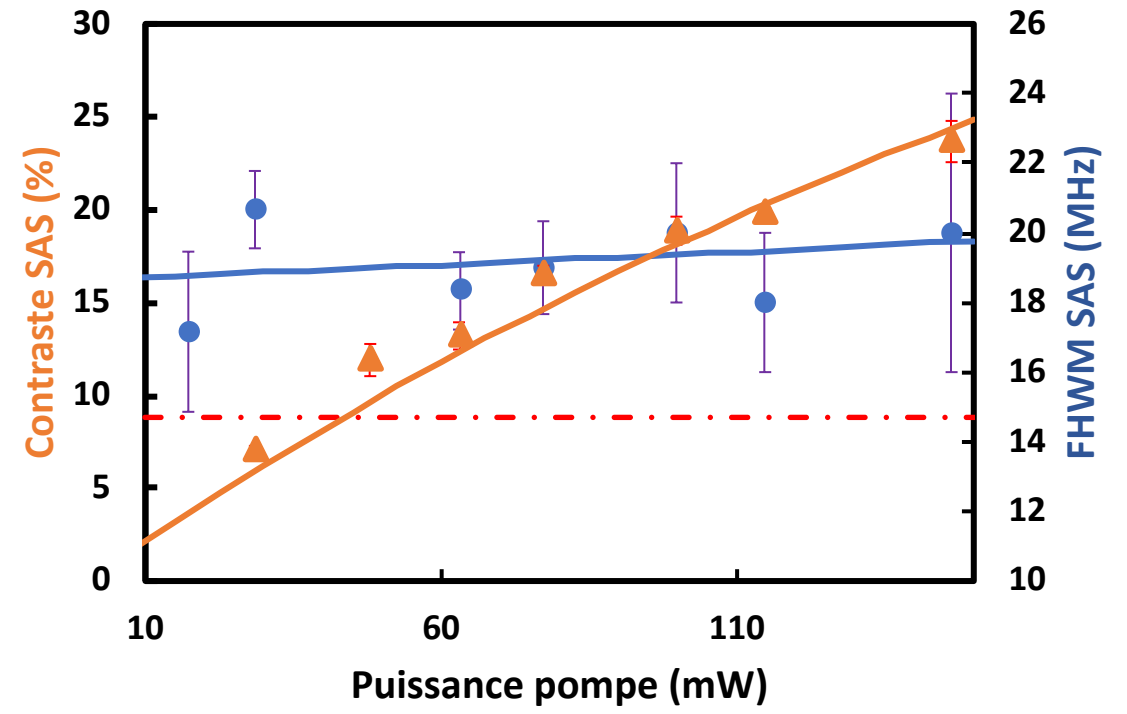
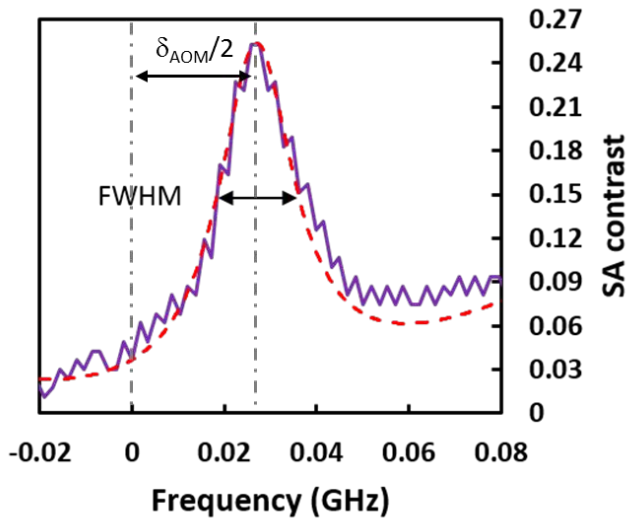
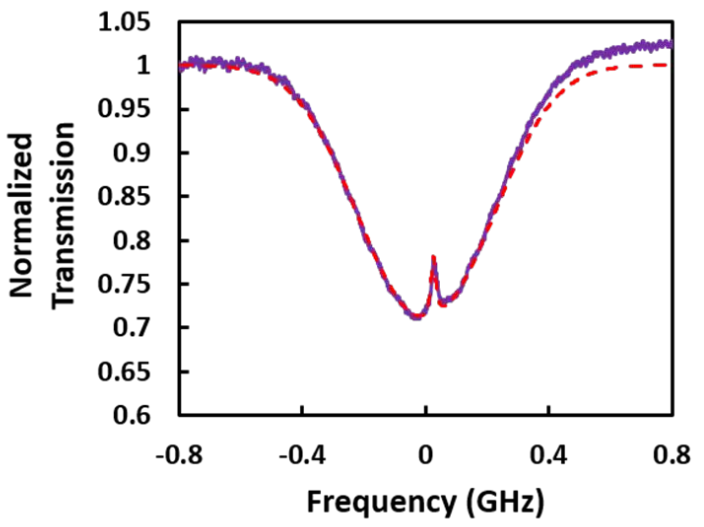
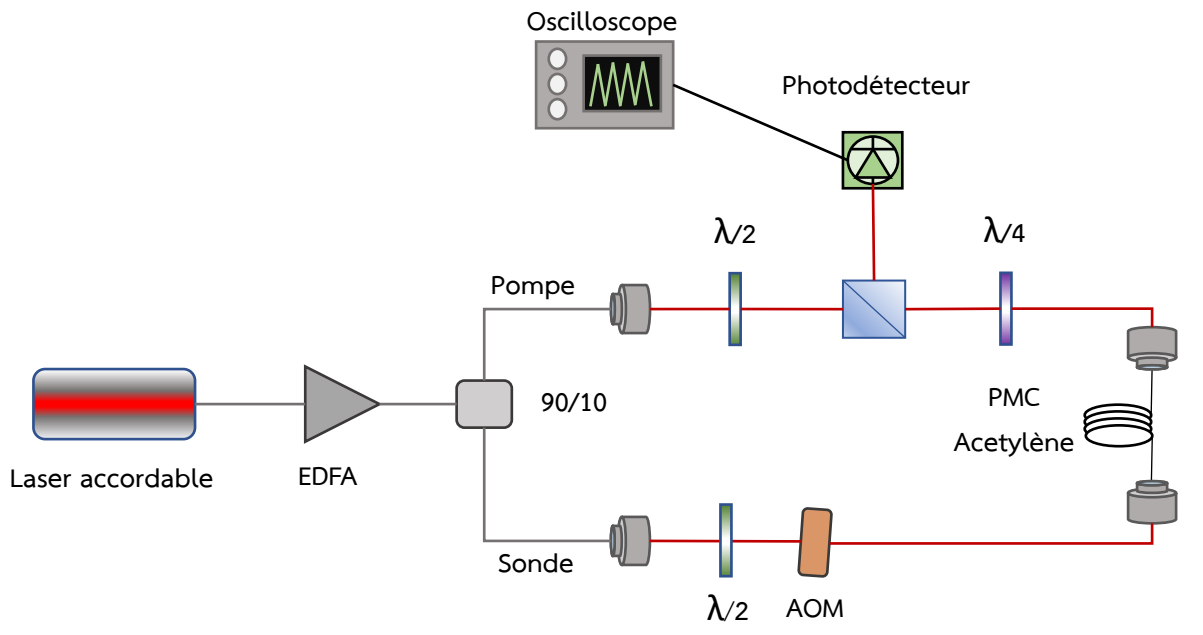
$$FWHM_{SAS} = \Delta\nu_{SAS} = \gamma_{dep} * \sqrt{1 + \frac{I}{I_{sat}}} = \gamma_{dep} * \sqrt{1 + \frac{\Omega_R^2}{\gamma_{dep}^2}}$$

$$H_{SAS} = 2 * \frac{I}{I_{sat}} * \frac{\gamma_{dep}}{1 + \left(\frac{I}{I_{sat}}\right)^{\frac{3}{2}}}$$



PMC pour références de fréquence

Spectroscopie sub Doppler




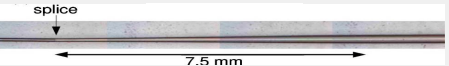
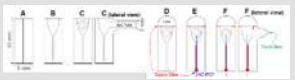
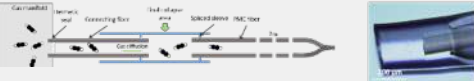


$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\Delta \nu \tau^{1/2}}{\nu S/N}$$

Compromis à trouver entre contraste et élargissement

PMC pour références de fréquence

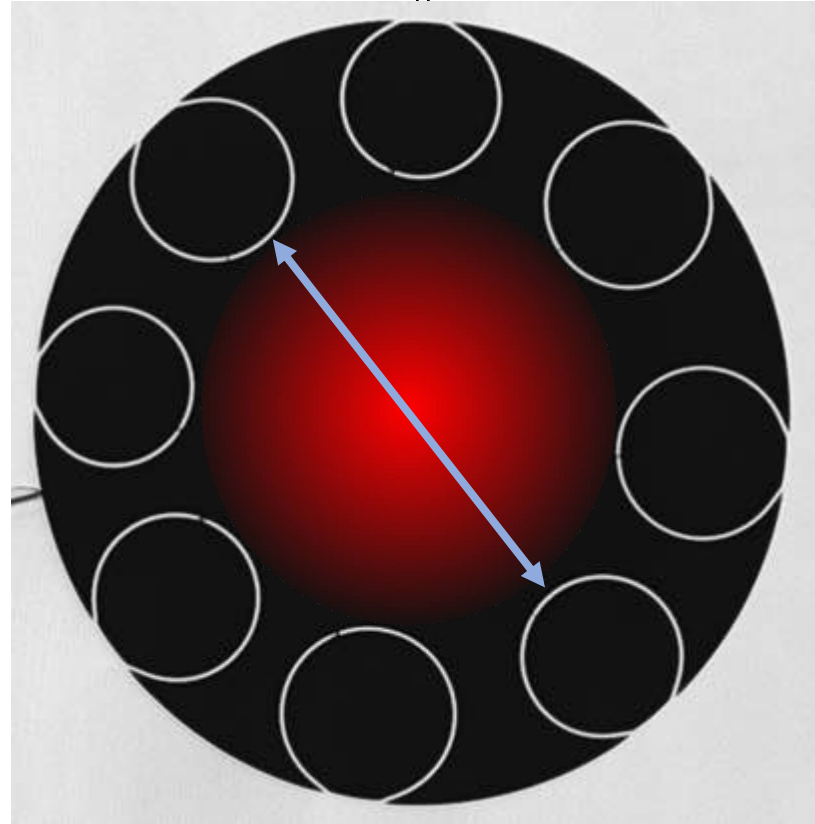
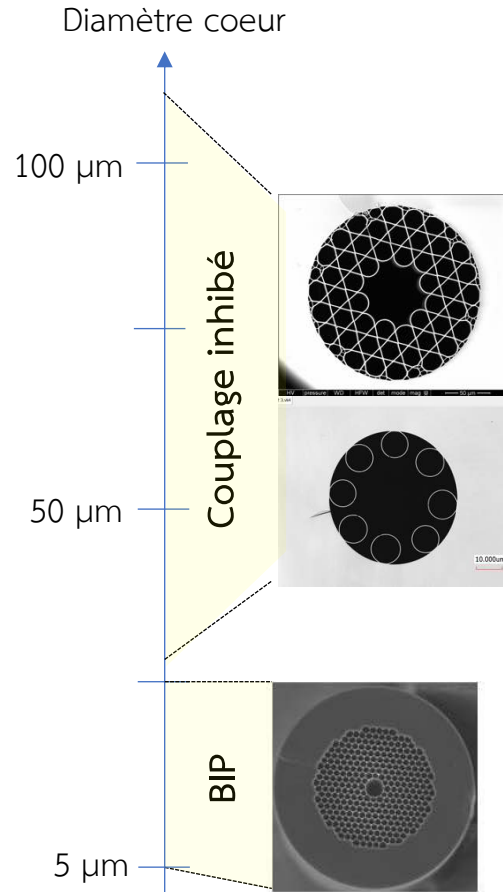
Critères de sélection des méthodes

Technique	Compacité et intégration		Performances		
	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoin HCPCF	Potentiel contaminant
 <p>GLOphotonics</p>	cm's x cm's	Non	1 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
 <p>Couny et al., <i>OptCom</i>, 261(1), 28 (2006)</p>	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
 <p>Light et al. <i>Opt Lett</i>, 31(17), 2538 (2006)</p>	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
 <p>Wheeler et al. <i>Opt Lett</i>, 35(11), 1875 (2010)</p>	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
 <p>Triches et al., <i>AppPhys</i>, 23(9), 11227 (2015)</p>	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
 <p>Billotte et al., <i>CLEO Europe</i>, pp. 1-1, doi: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871523, (2019)</p>	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

PMC pour références de fréquence

Choix de la fibre creuse

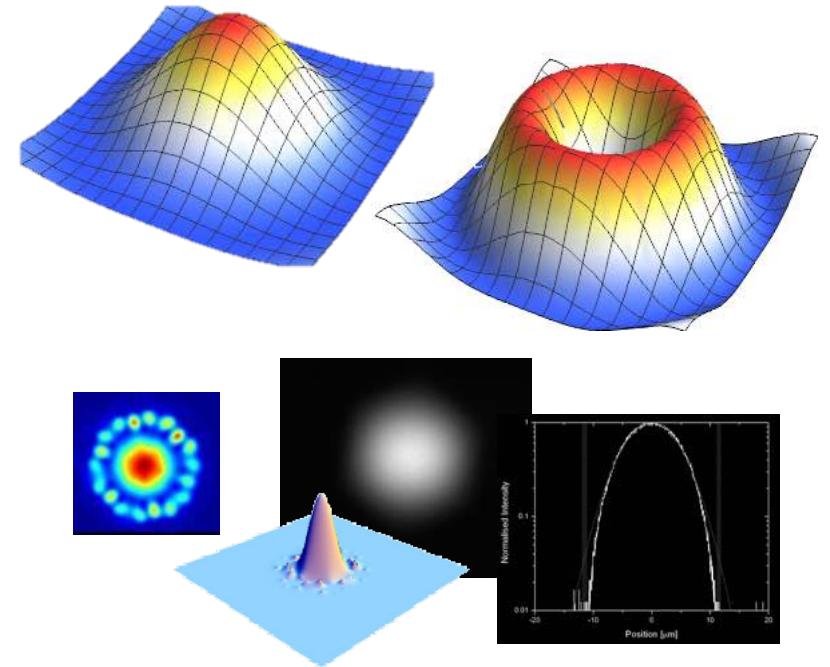
Taille de coeur



Contenu modal

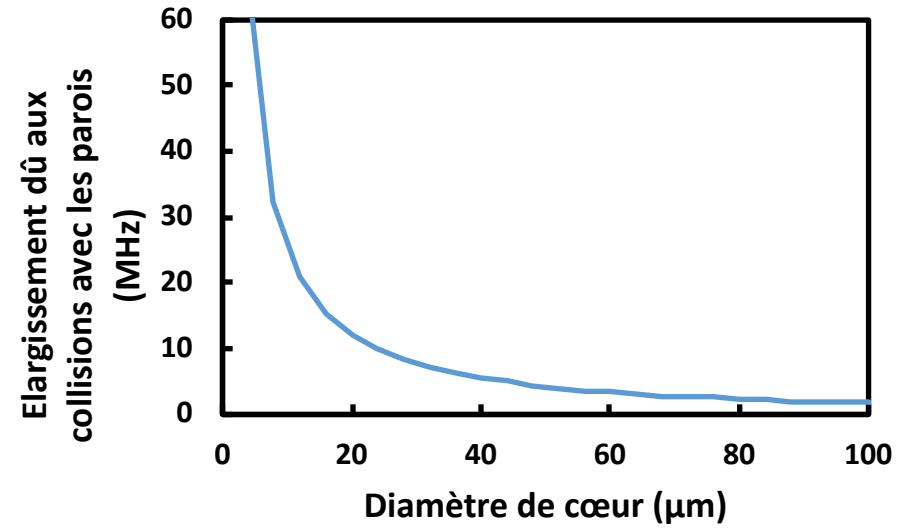
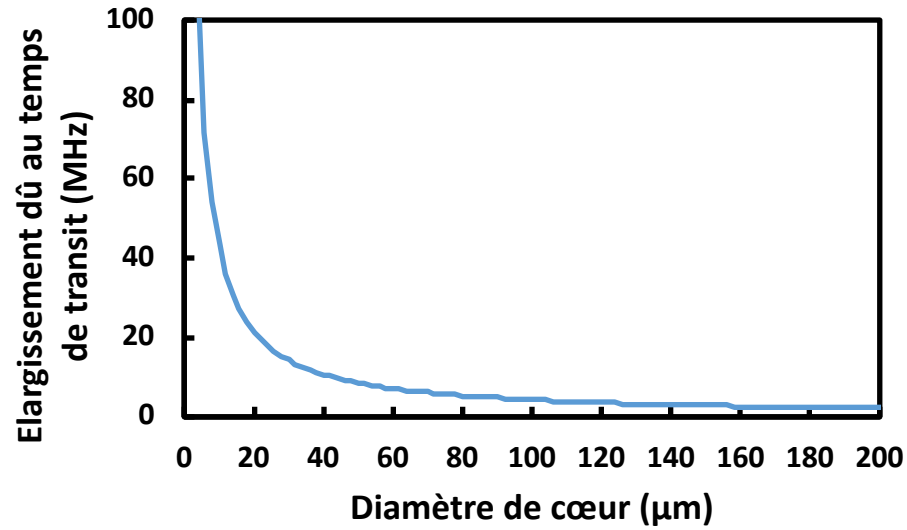
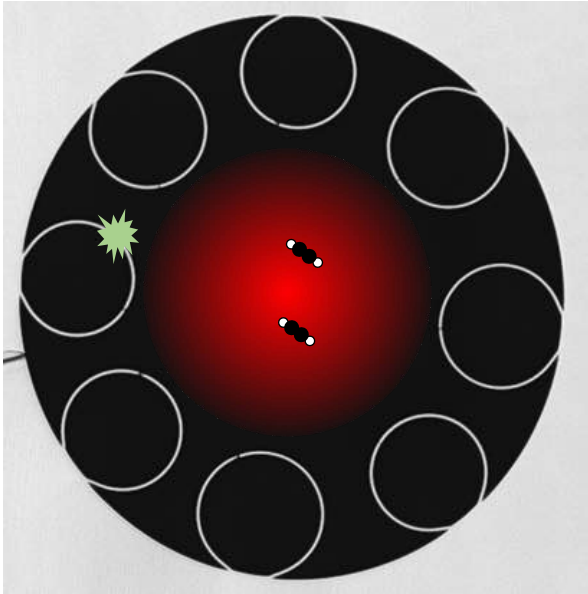
Dépendant de :

- La taille de coeur
- La structure de la fibre
- Son environnement



PMC pour références de fréquence

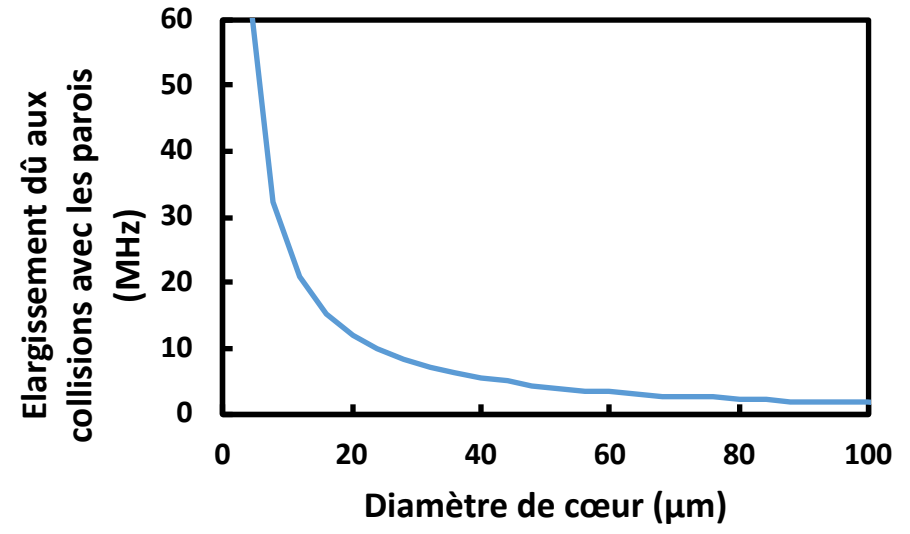
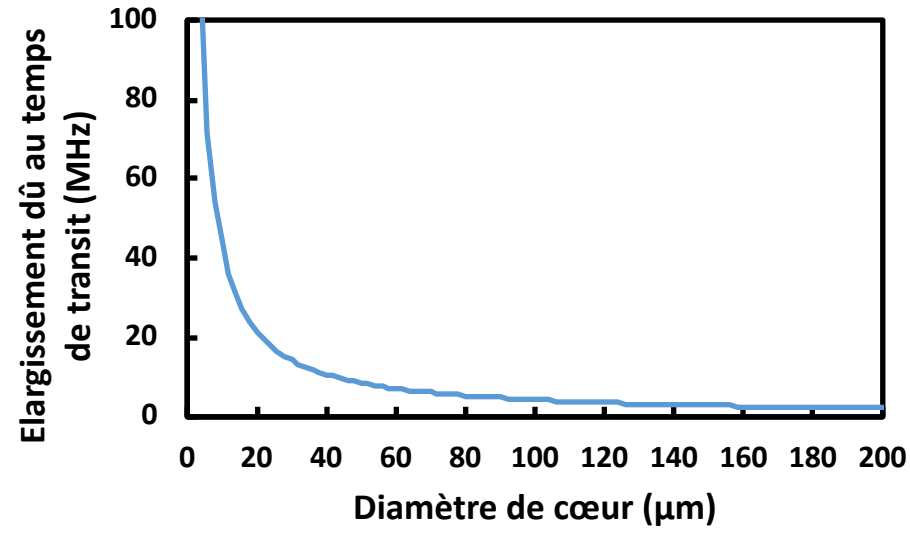
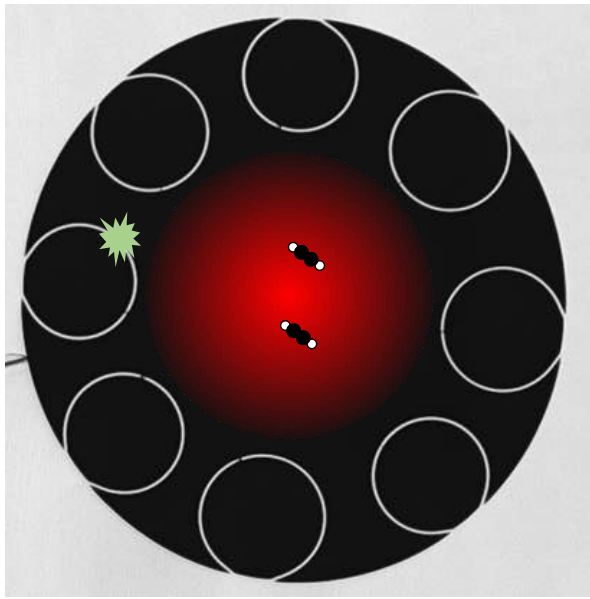
Choix de la fibre creuse – collision et temps de transit



Diminution de l'élargissement du au temps de transit et collisions avec des tailles de cœur plus importantes

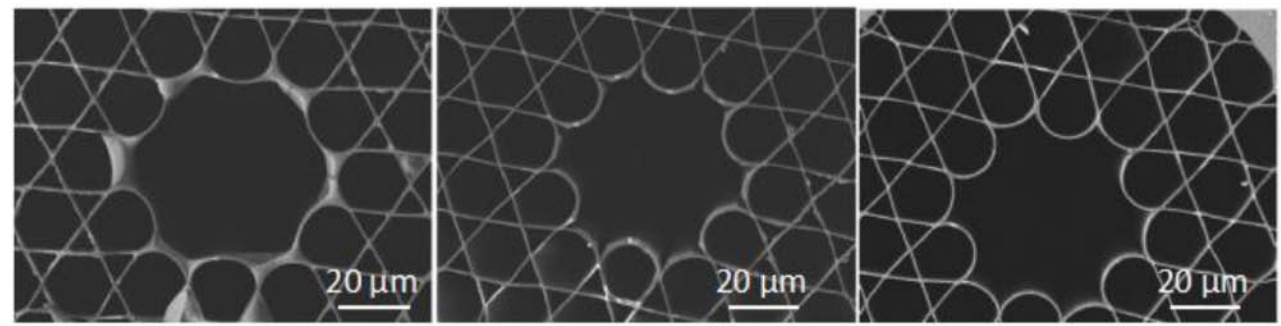
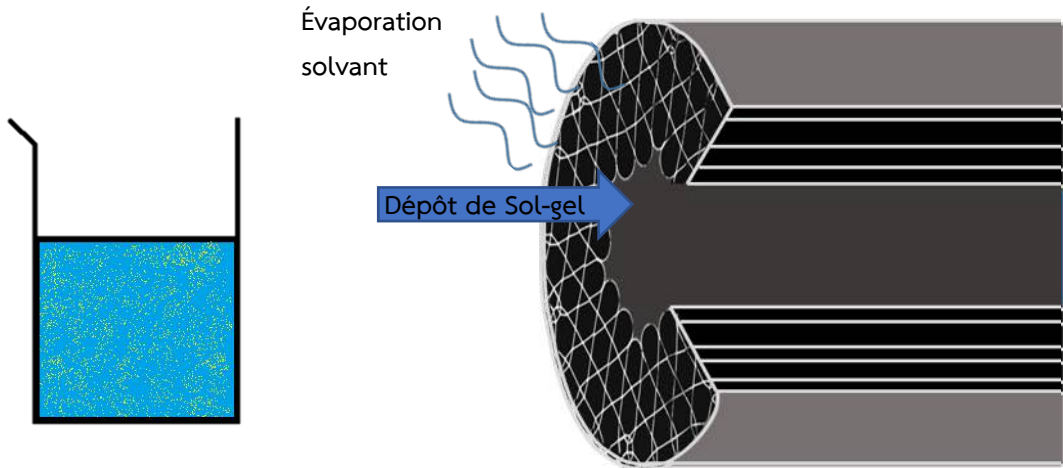
PMC pour références de fréquence

Choix de la fibre creuse – collision et temps de transit



Diminution de l'élargissement du au temps de transit et collisions avec des tailles de cœur plus importantes

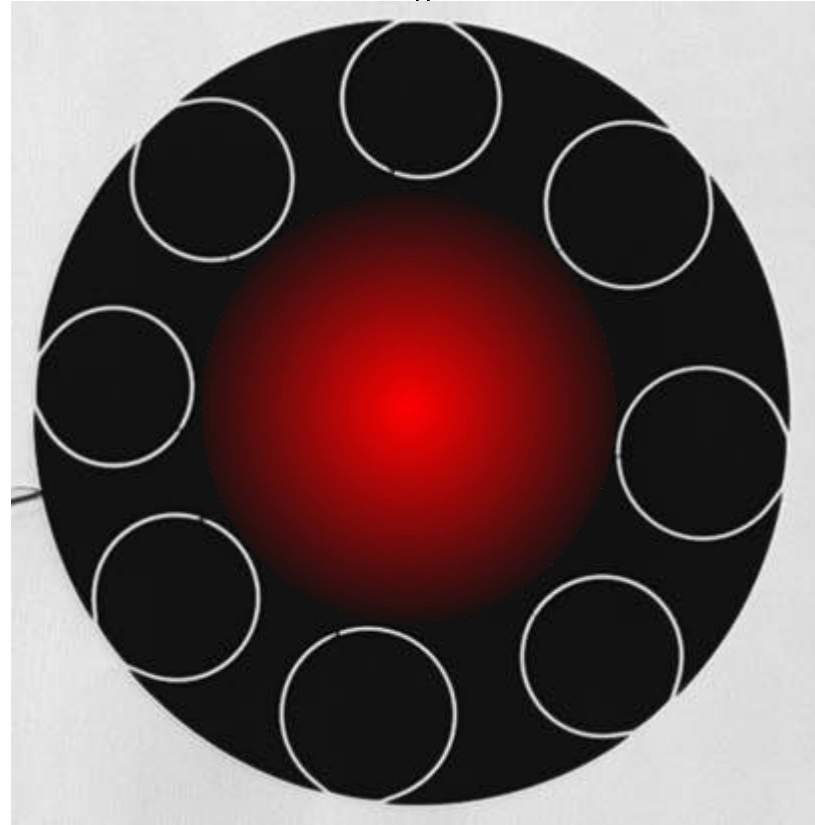
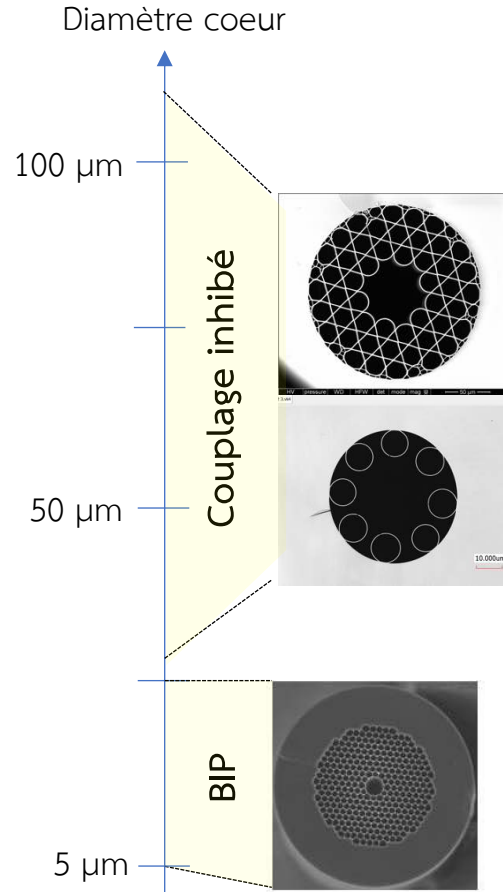
Autre solution pour les collisions : revêtement → Céramique, Anti-relaxant, Métalliques



PMC pour références de fréquence

Choix de la fibre creuse

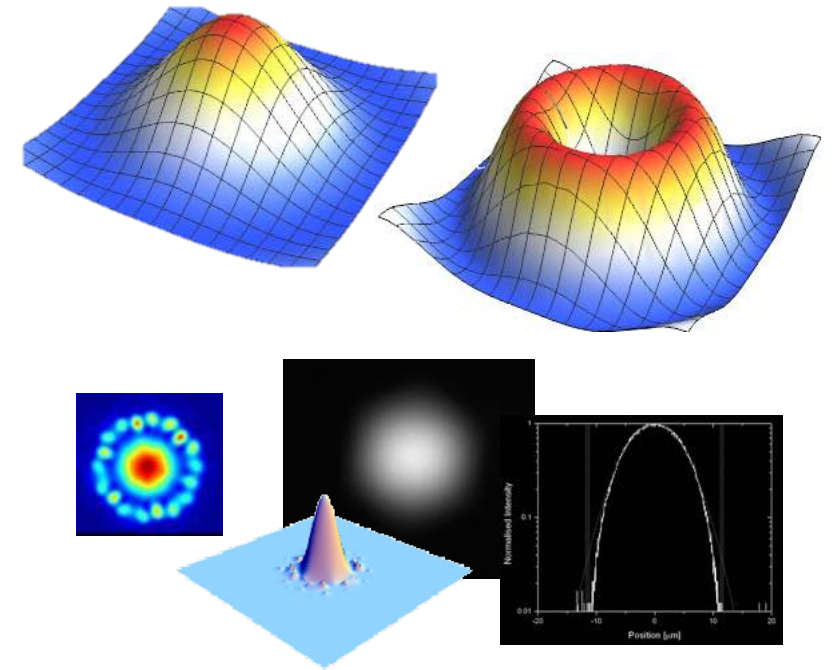
Taille de coeur



Contenu modal

Dépendant de :

- La taille de coeur
- La structure de la fibre
- Son environnement



Fibre idéale

Coeur large + Monomode

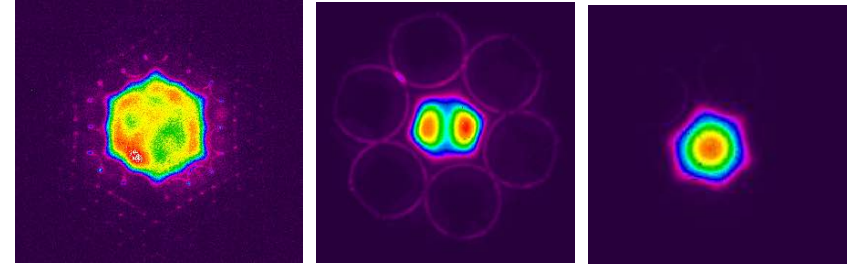
PMC pour références de fréquence

Choix de la fibre creuse – contenu modal

Couplage
et
battements
modaux

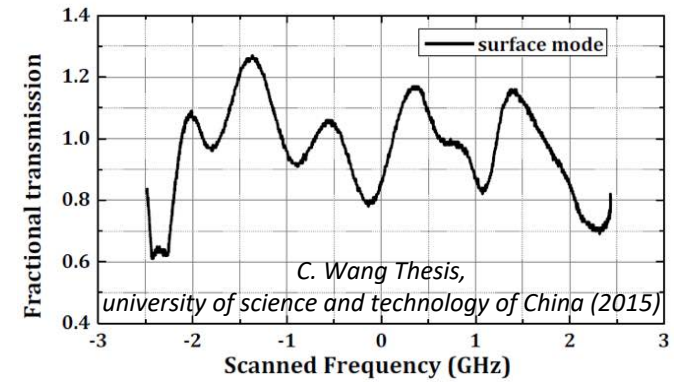
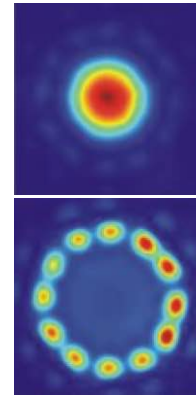
Fibre à très
large coeur

► Modes d'ordre
supérieur



Fibres BIP

► Mode de surface



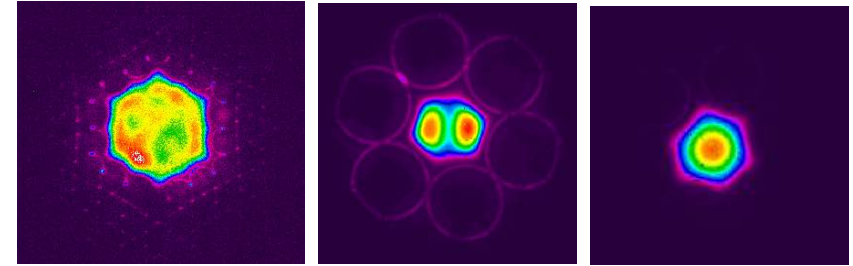
PMC pour références de fréquence

Choix de la fibre creuse – contenu modal

Couplage
et
battements
modaux

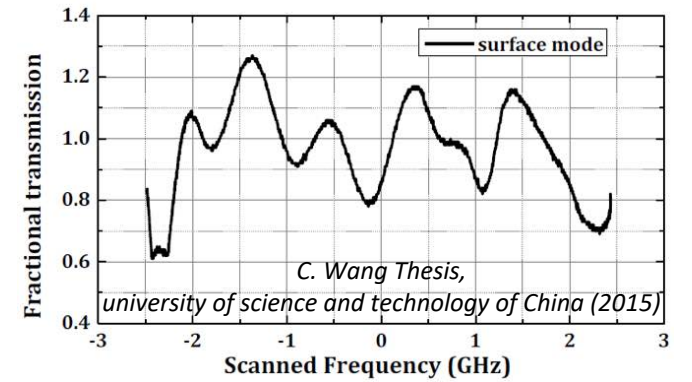
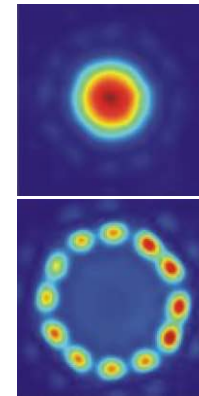
Fibre à très
large coeur

► Modes d'ordre
supérieur

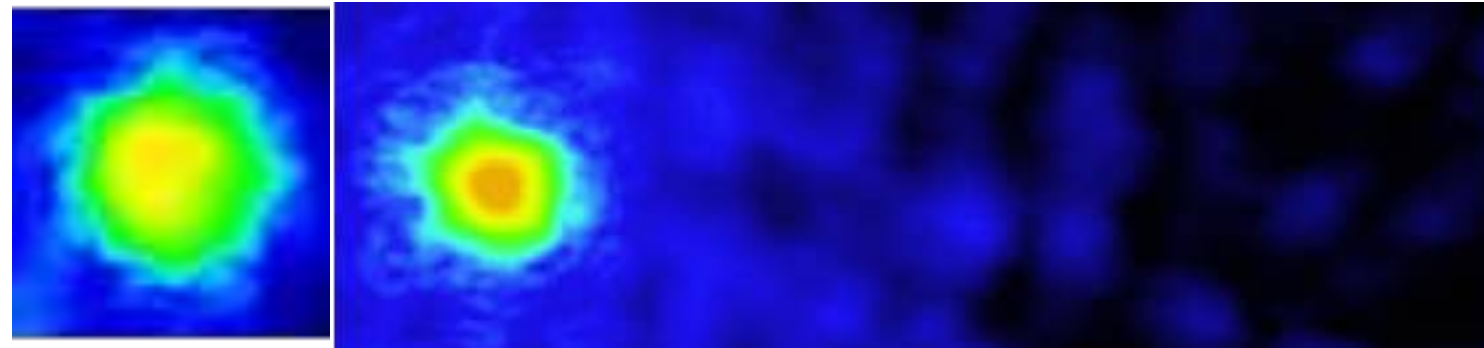


Fibres BIP

► Mode de surface





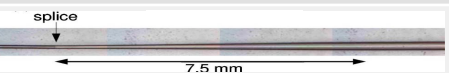
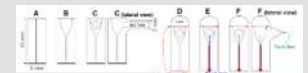
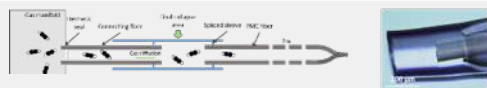


Robustesse du
contenu modal
sous sollicitation



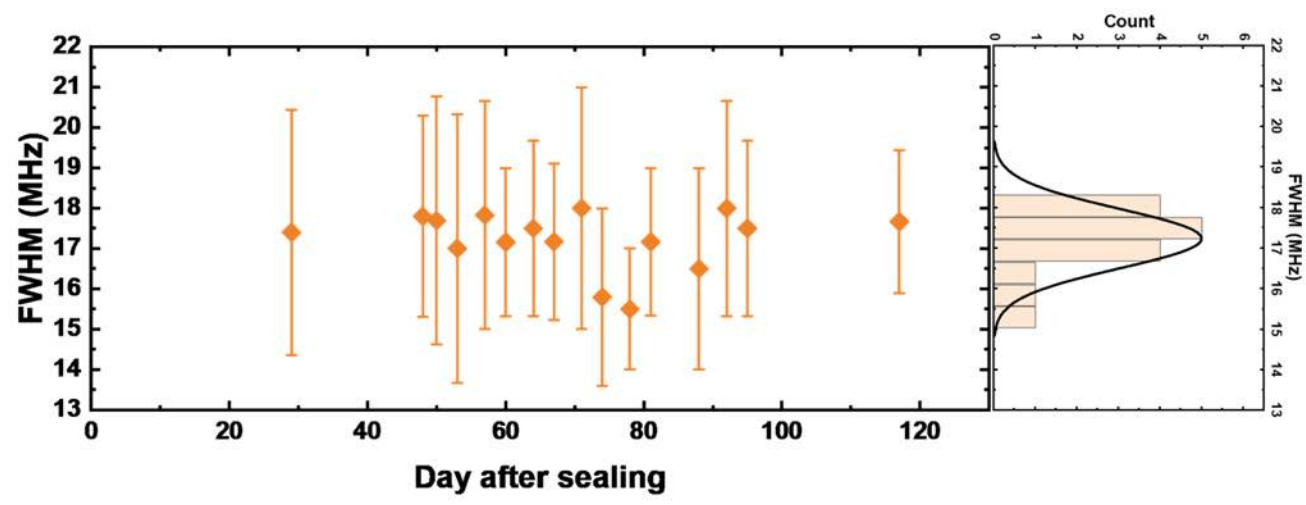
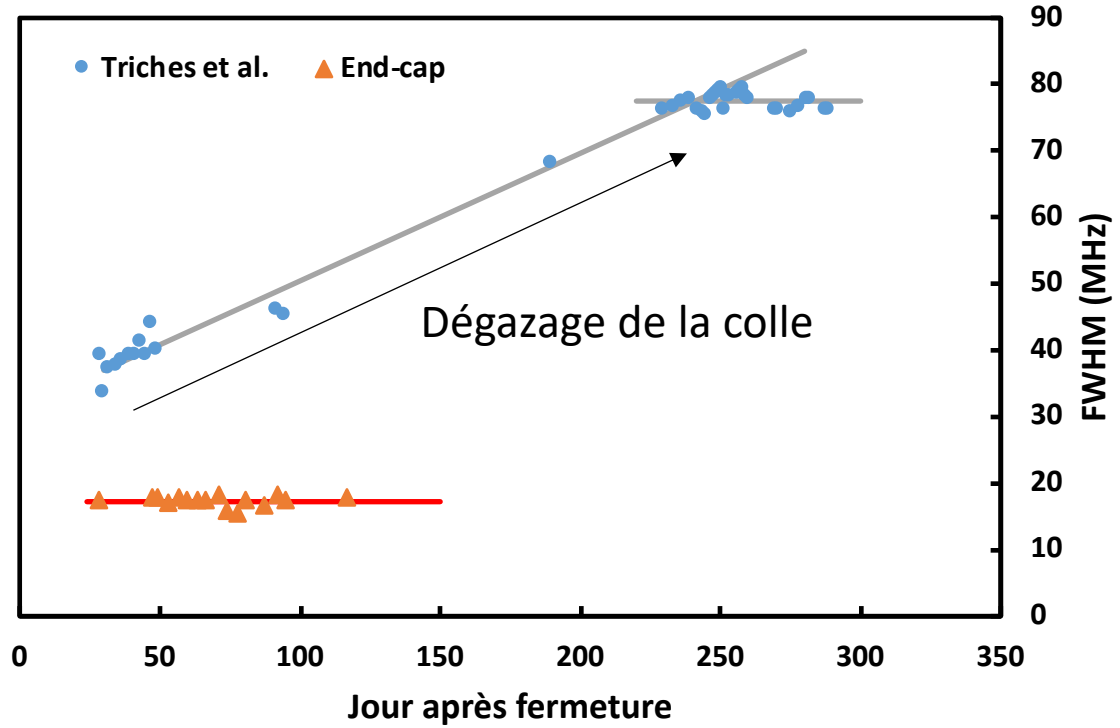
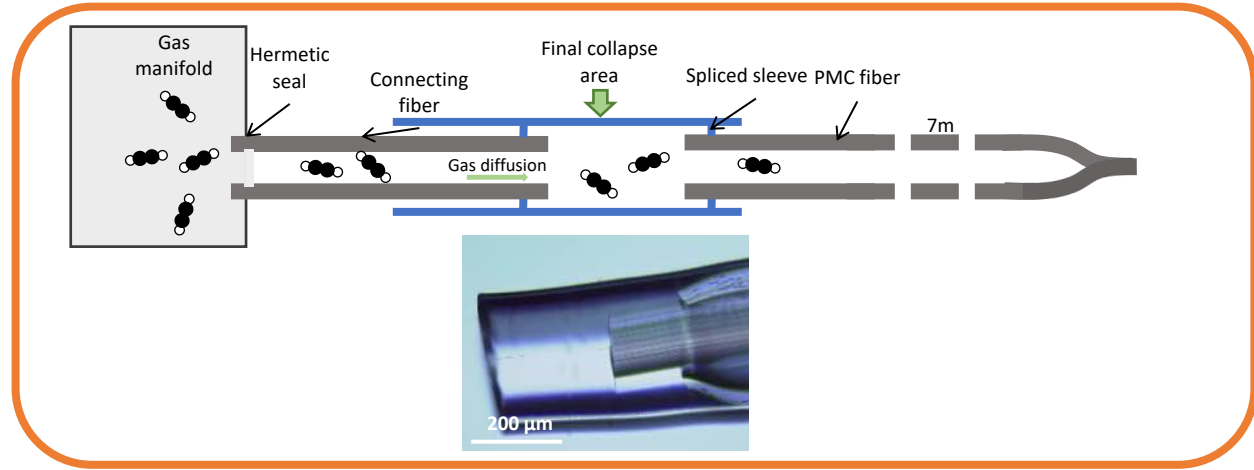
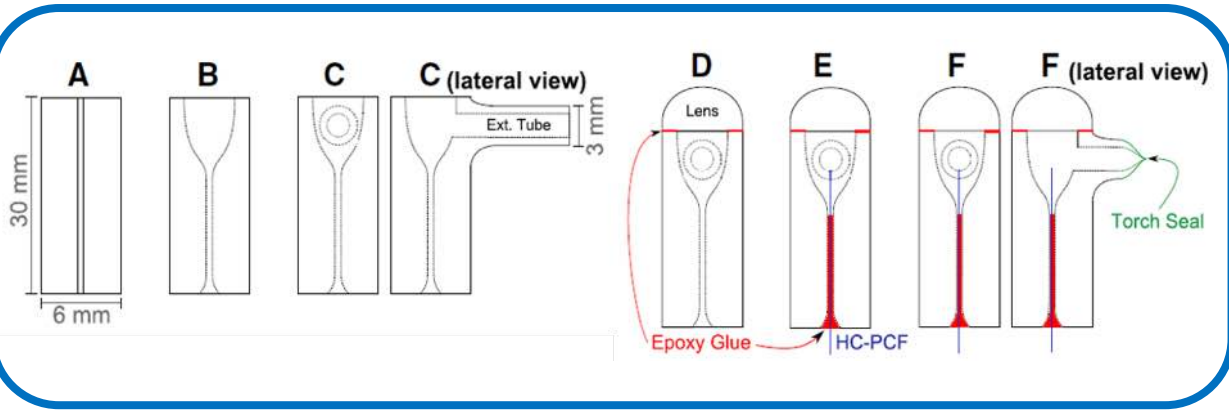
PMC pour références de fréquence

Critères de sélection des méthodes

Technique	Compacité et intégration		Performances		
	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoin HCPCF	Potentiel contaminant
 	cm's x cm's	Non	1 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
 <i>Couny et al., OptCom, 261(1), 28 (2006)</i>	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
 <i>Light et al. Opt Lett, 31(17), 2538 (2006)</i>	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
 <i>Wheeler et al. Opt Lett, 35(11), 1875 (2010)</i>	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
 <i>Triches et al., AppPhys, 23(9), 11227 (2015)</i>	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
 <i>Billotte et al., CLEO Europe, pp. 1-1, doi: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871523, (2019)</i>	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/




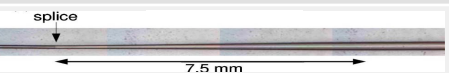
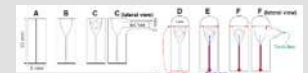
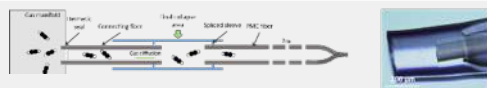
PMC pour références de fréquence

Influence d'un contaminant



PMC pour références de fréquence

Critères de sélection des méthodes

Technique	Compacité et intégration		Performances		
	Dimension	Intégration système fibré	Pertes	Besoin HCPCF	Potentiel contaminant
 <p>GLOphotonics</p>	cm's x cm's	Non	1 dB	Aucun	Fuites et contamination externe
 <p>Couny et al., <i>OptCom</i>, 261(1), 28 (2006)</p>	Fibre	Oui	10 dB	Petit cœur	/
 <p>Light et al. <i>Opt Lett</i>, 31(17), 2538 (2006)</p>	Fibre	Oui	2 dB	Petit cœur	Hélium
 <p>Wheeler et al. <i>Opt Lett</i>, 35(11), 1875 (2010)</p>	Fibre	Oui	6 dB	Aucun	Hélium
 <p>Triches et al., <i>AppPhys</i>, 23(9), 11227 (2015)</p>	cm's x mm's	Non	2.1 dB	Aucun	Colle époxy
 <p>Billotte et al., <i>CLEO Europe</i>, pp. 1-1, doi: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871523, (2019)</p>	Fibre	Non	1.5 dB	Aucun	/

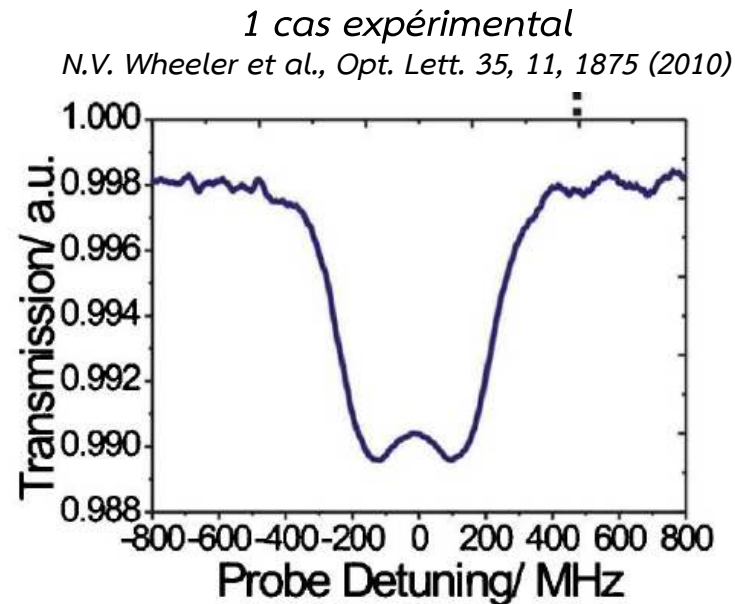
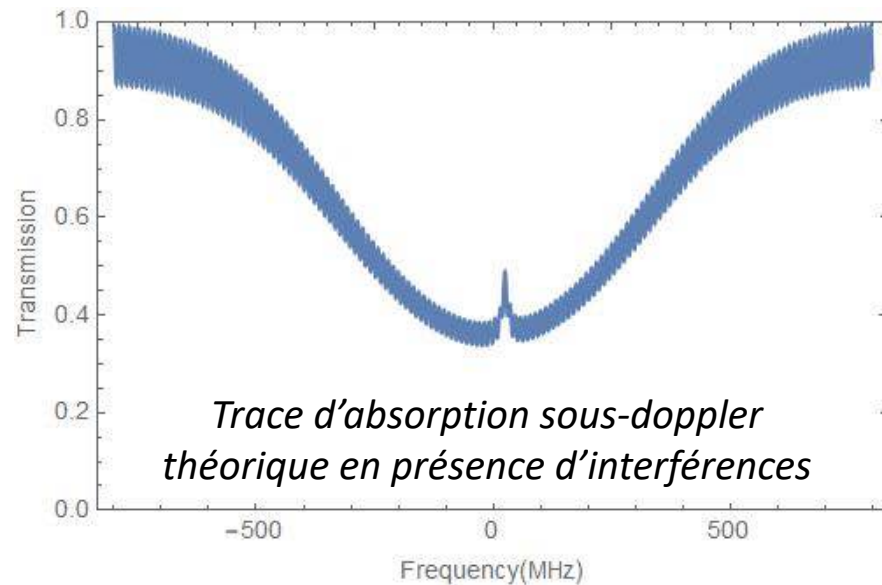
PMC pour références de fréquence

Autres paramètres à considérer

Gestion des interférences

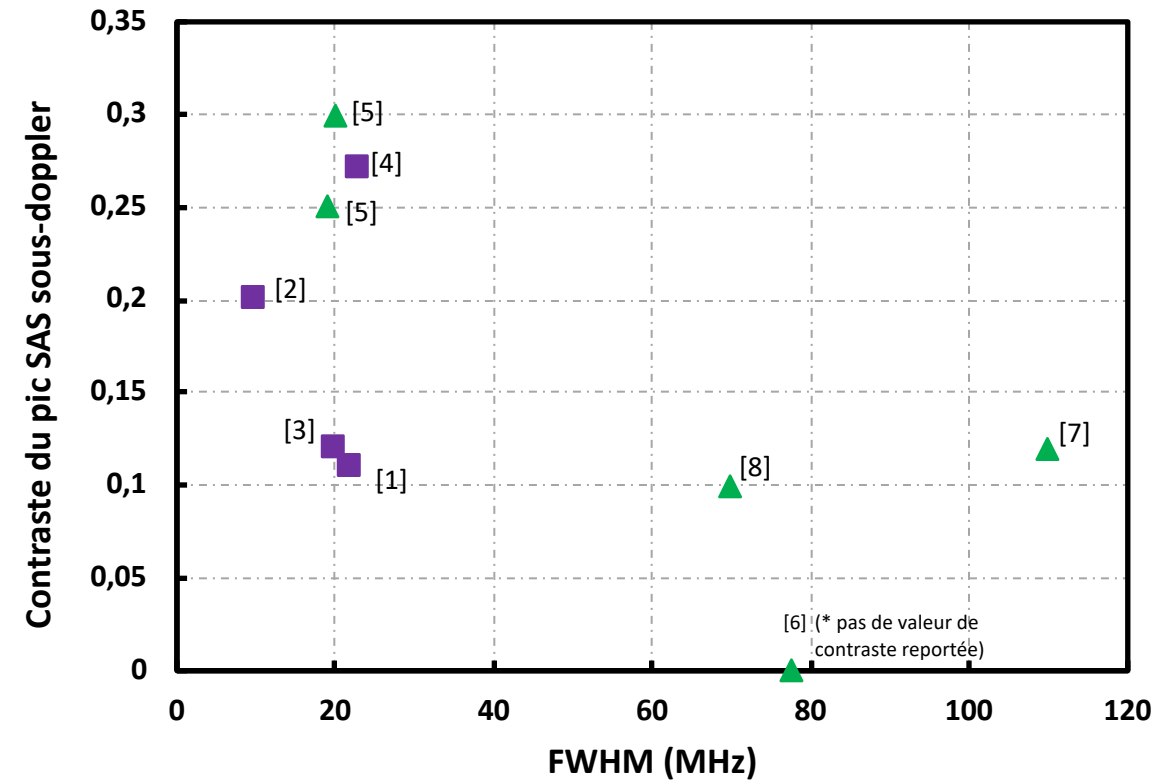


Surfaces planes
Réflexions de 4%



PMC pour références de fréquence

Comparatif des traces SAS obtenues



■ Signaux observés en chambre macroscopique sous vide



▲ Signaux observés avec PMC totalement scellée (avec une des techniques décrites précédemment)

► En chambre : Pic SAS moins élargi

► Technique du end-cap (moins de contaminant) dans les mêmes gammes que les signaux en chambre

[1] R. Thapa et al., *Opt.Lett.*, 31, 16, 2489-2491 (2006)

[5] Billotte et al., *CLEO Europe*, pp. 1-1, doi:

[2] K. Knabe et al., *Opt. Exp.* 17, 18, 16017-16026 (2009)

10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871523, (2019)

[3] P.T. Marty et al., *J. of Lightwave Tech.* 28, 8, 1236 (2010)

[6] M. Triches et al., *App. Phys. B* 121, 251-258 (2015)

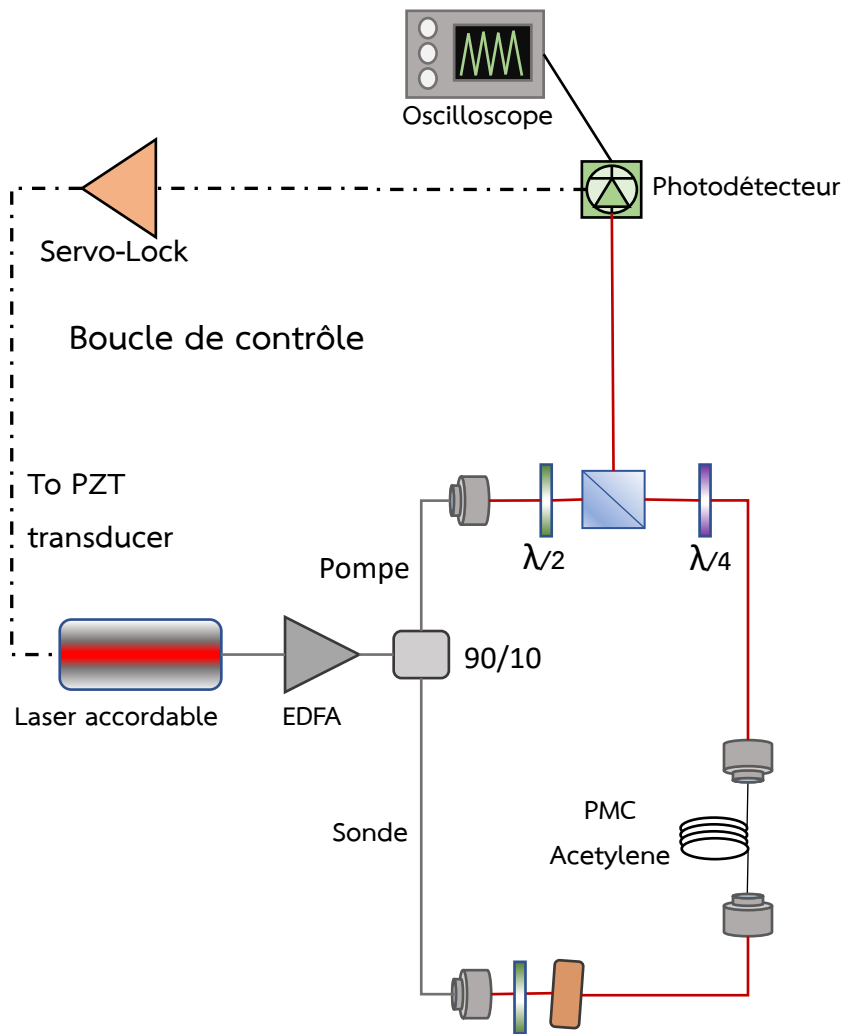
[4] C. Wang et al., *App. Opt.* 52, 22, 5430 (2013)

[7] N.V. Wheeler et al., *Opt. Lett.* 35, 11, 1875 (2010)

[8] F. Couny et al., *Opt. Com.* 263, 28-31 (2006)

PMC pour références de fréquence

Comparatif des instabilités



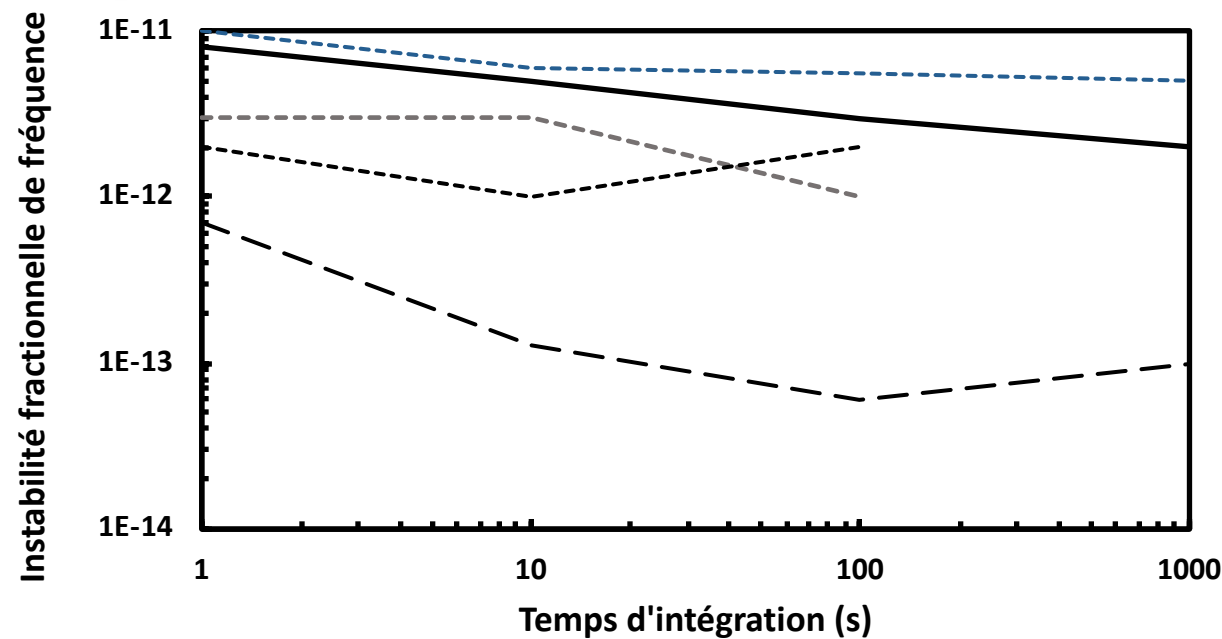
Fibre en chambre
 - - - - - *M. Triche et al. Opt. Exp. 23, 11227 (2015)*
 - - - - - *K. Knabe et al. Opt. Exp. 17, 16017 (2009)*



Fibre en PMC scellée
 ———— *M. Triche et al. App. Phys. 121, 251-258 (2015)*

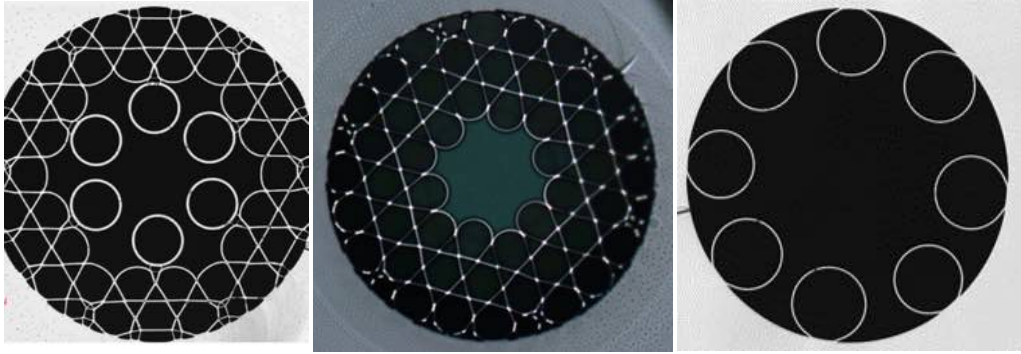


Cellule macroscopique
 - - - - - *J. Hald et al. Opt. Exp. 19, 3, 2052-2063 (2011)*



PMC pour références de fréquence

Comparatif des instabilités



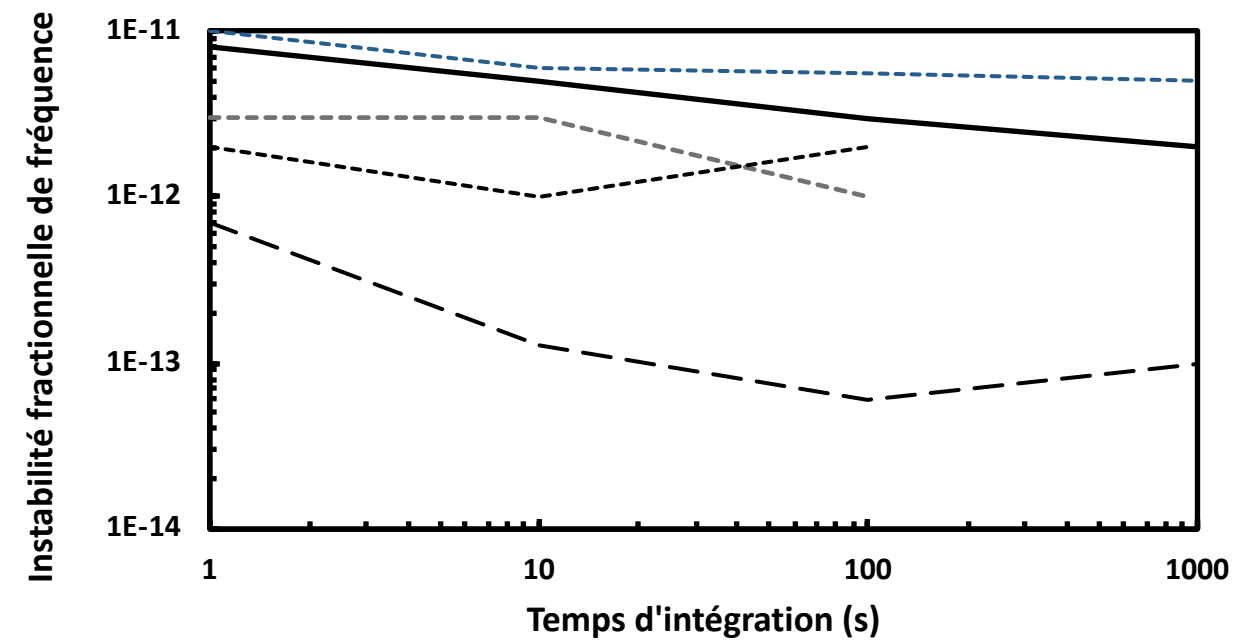
- Pistes de développement :
- Propriétés de la fibre
 - Techniques d'encapsulations



Fibre en chambre
 - - - - - M. Triche et al. Opt. Exp. 23, 11227 (2015)
 - - - - - K. Knabe et al. Opt. Exp. 17, 16017 (2009)

Fibre en PMC scellée
 ——— M. Triche et al. App. Phys. 121, 251-258 (2015)

Cellule macroscopique
 - - - - - J. Hald et al. Opt. Exp. 19, 3, 2052-2063 (2011)





Review

Hollow-Core Fiber Technology: The Rising of “Gas Photonics”

Benoît Debord ^{1,*}, Foued Amrani ¹, Luca Vincetti ², Frédéric Gérôme ¹ and Fetah Benabid ¹

¹ GPPMM Group, XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, University of Limoges, 87060 Limoges, France; foued.amrani@xlim.fr (F.A.); gerome@xlim.fr (F.G.); f.benabid@xlim.fr (F.B.)

² Department of Engineering “Enzo Ferrari”, University of Modena and Reggio Emilia, I-41125 Modena, Italy; luca.vincetti@unimore.it

* Correspondence: benoit.debord@xlim.fr; Tel.: +33-555-457-283

Merci de votre attention ...

