

# Méthodes non linéaires de remise en forme de faisceaux pour amplificateur de puissance à fibre multimode



**Laurent Lombard**

**A. Brignon,  
J.P. Huignard,  
E. Lallier**  
*Thales Research & Technology*

**P. Georges,  
G. Pauliat,  
G. Lucas-Leclin,  
G. Roosen**  
*Laboratoire Charles Fabry  
de l'Institut d'Optique*

**THALES**



**manolia**



- Introduction

- Concept « amplificateur multimode + correction de faisceau »
- Performances de l'amplificateur

- Correction de faisceau par « **beam cleanup** » (nettoyage de faisceau) dans un **cristal photoréfractif**

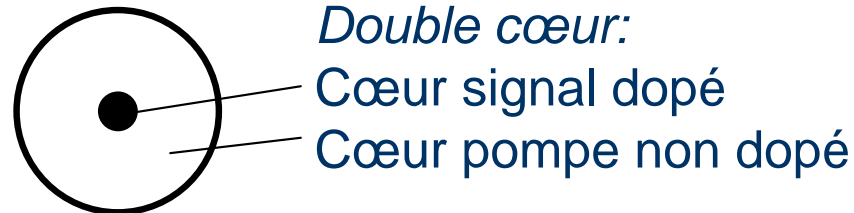
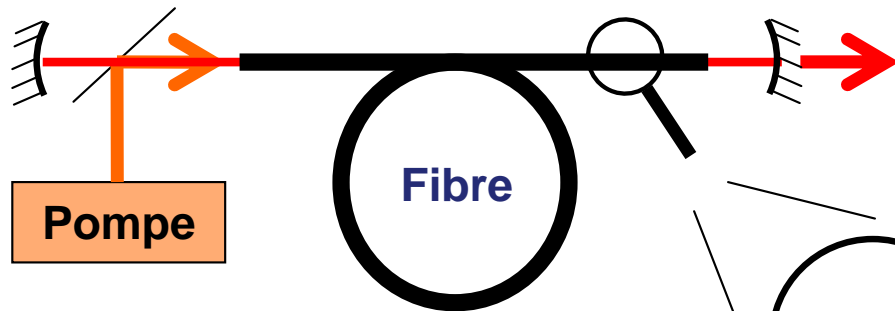
- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibre multimode**

- Conclusion et perspectives

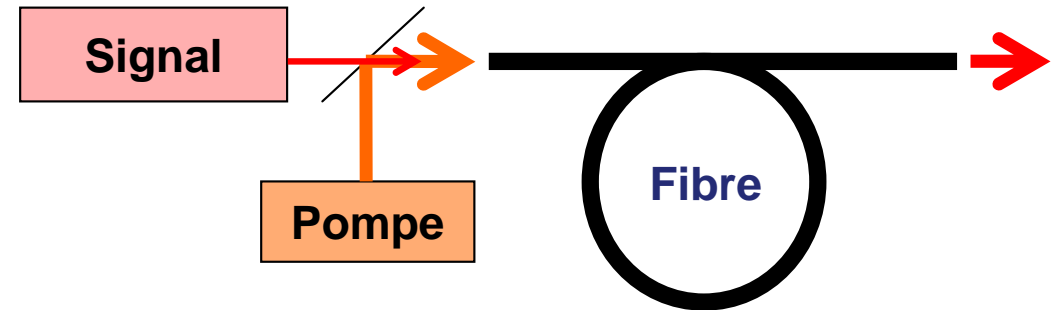


## Architectures de sources fibrées

### Laser à fibre



### Amplificateur à fibre



### Intérêts des fibres pour les lasers de puissance?

- ✓ **Bon rendement** Optique-Optique (recouvrement pompe - signal)
  - ✓ fibres double cœur
  - ✓ dopage ytterbium
- ✓ Réduction des problèmes **thermiques** (répartis sur la longueur)
- ✓ Disponibilité des diodes de pompe haute puissance
- ✓ **Hautes puissances / énergies** accessibles (fibres à grand cœur)

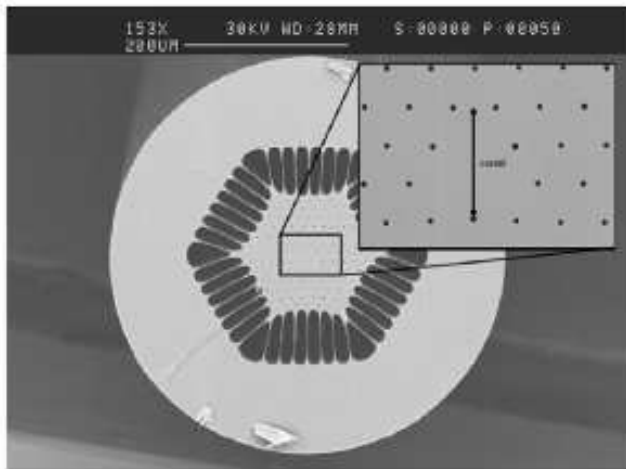
Plus de **puissance**  
ou **énergie**

- **dommage** optique
- effets **non linéaires** (surtout en régime impulsionnel)

=> nécessité **d'augmenter le diamètre du coeur**

## Solution classique:

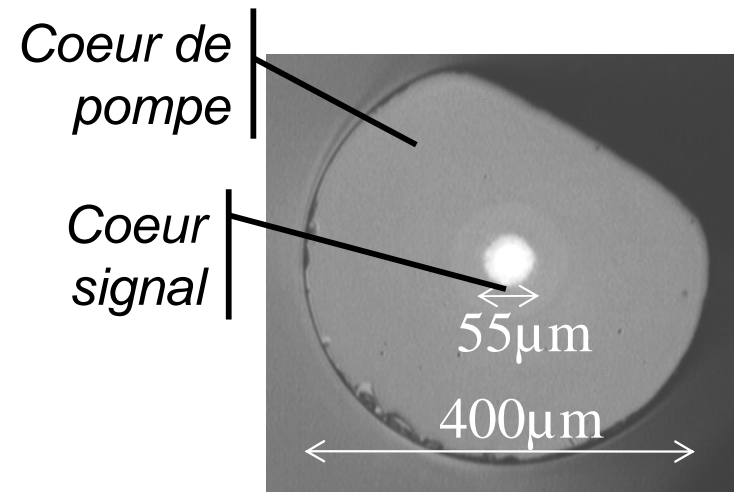
Fibres  
**grand cœur** (Large Mode Area,  $30\mu\text{m}$ )  
**quasi monomodes** (ON 0.06)



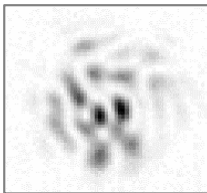
Air-clad LMA

## Solution originale:

Fibres  
**très grand cœur** (ON 0.2,  $>50\mu\text{m}$ )  
**très multimodes** ( $M^2 > 10$ )



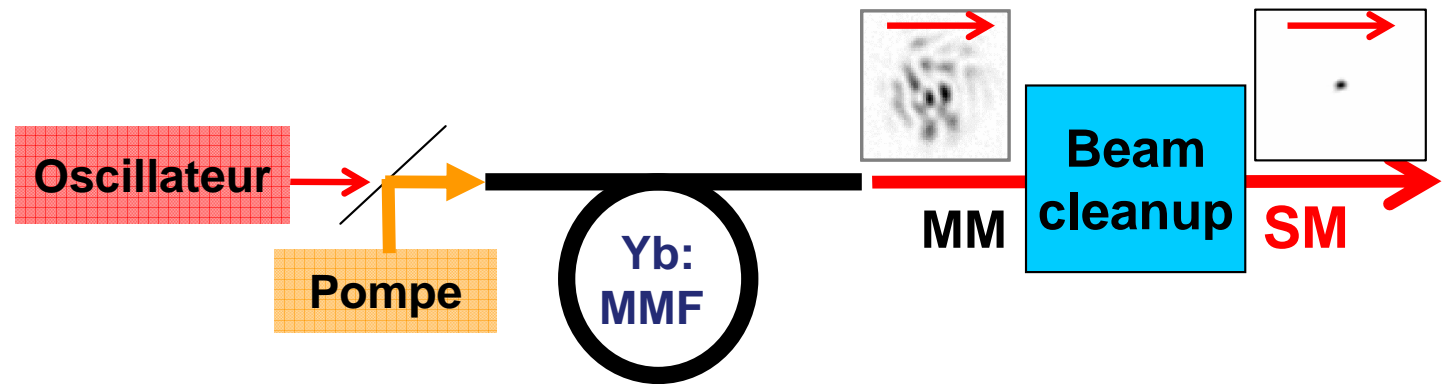
**Très hautes puissances/énergies**  
**Qualité de faisceau dégradée  $M^2 \gg 1$**   
=> **Ajout d'un système de remise en forme**



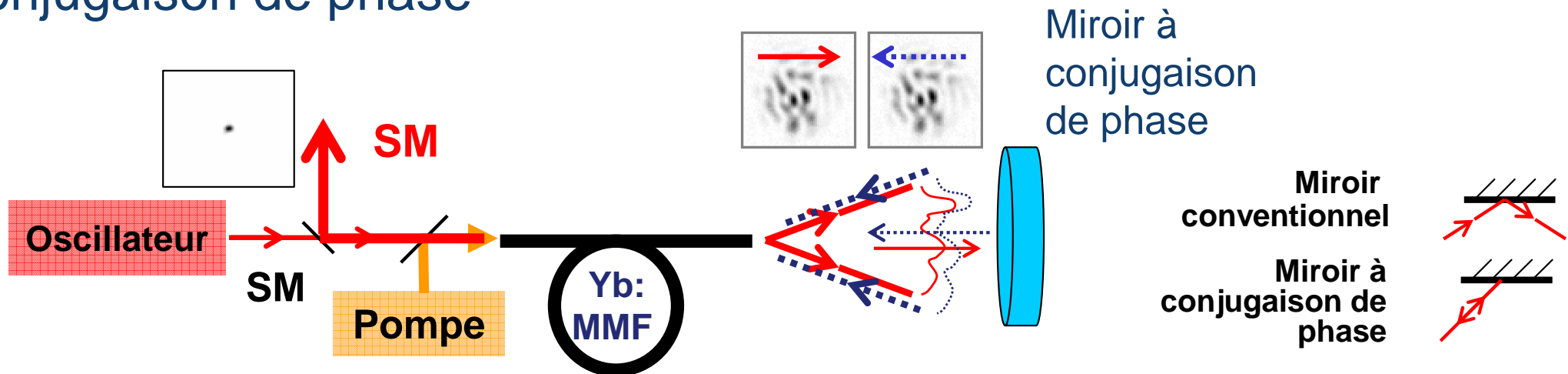
Remise en forme non linéaire après un amplificateur à fibre multimode de haute puissance

Comment retrouver la **qualité de faisceau** après l'amplificateur multimode avec une **bonne efficacité** ?

## Beam Cleanup



## Conjugaison de phase





Fibre multimode dopée Yb,  
55  $\mu\text{m}$  diam. coeur, ON 0.2  
pompée par diode (300W@940nm)

**entrée:**

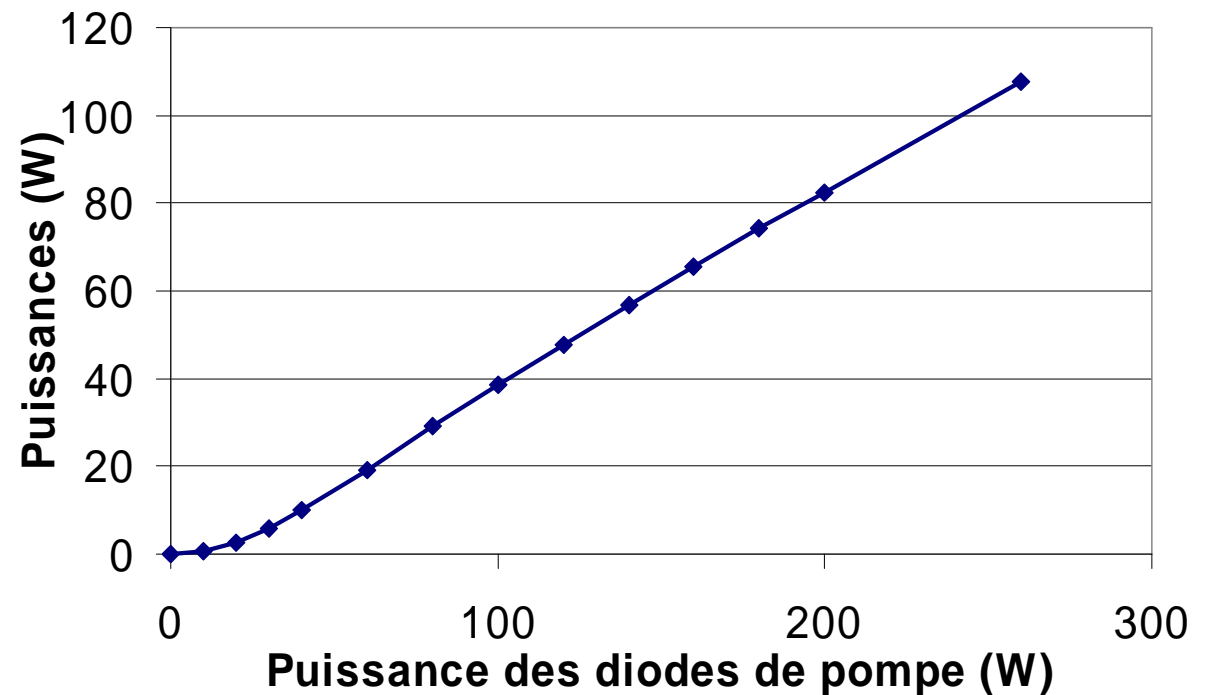
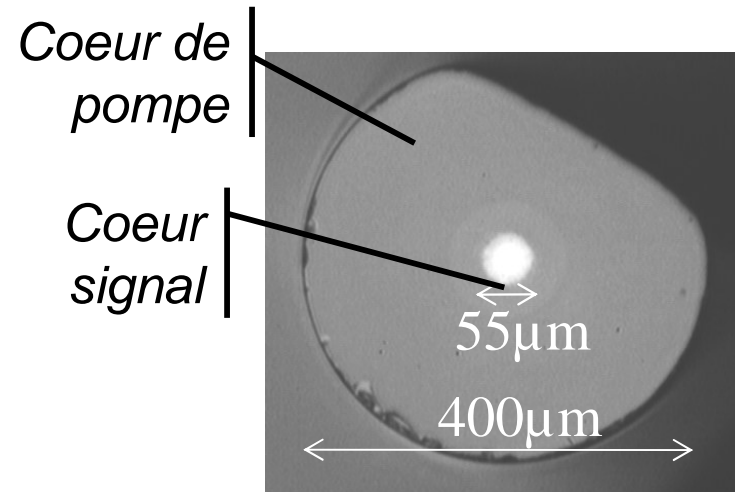
laser monomode, 0.1 W

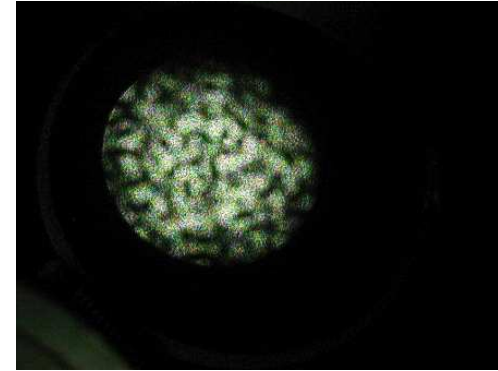
**sortie:**

~ 18 W @ 60 W (pompe)

~ 100 W @ 300 W (pompe)

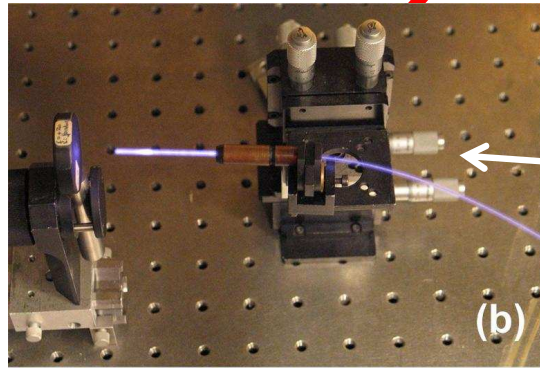
très multimode ( $M^2 \sim 10$ )



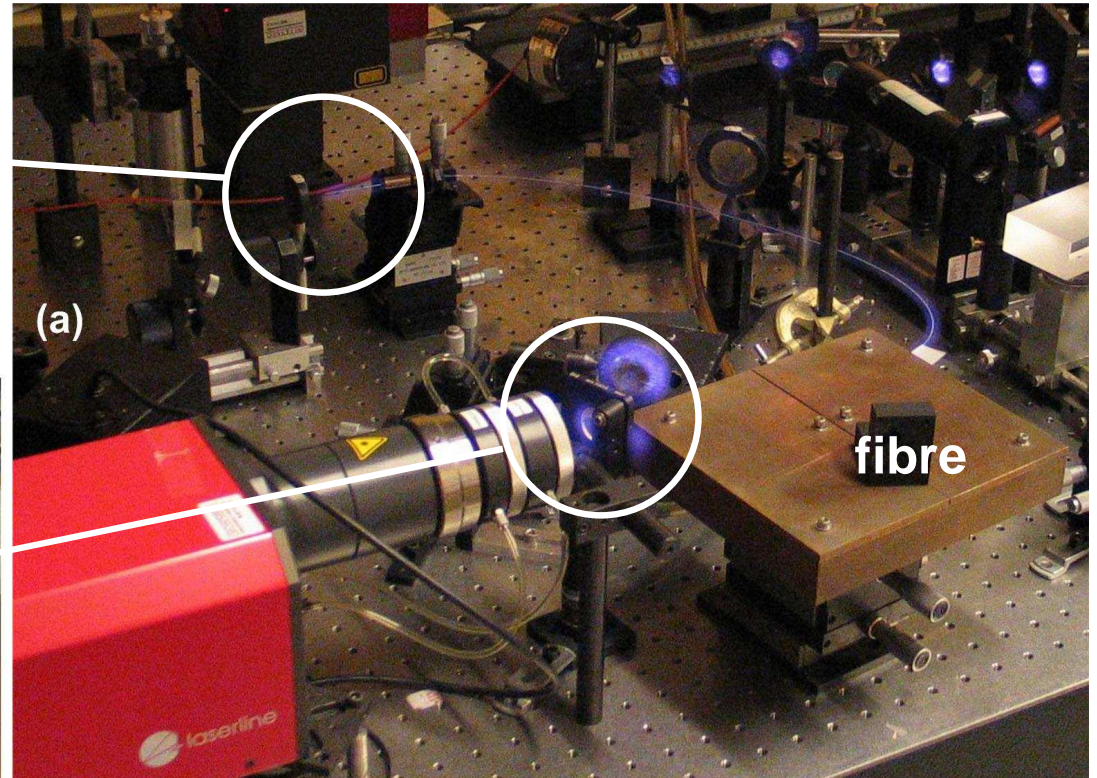


Faisceau  
amplifié

Oscillateur



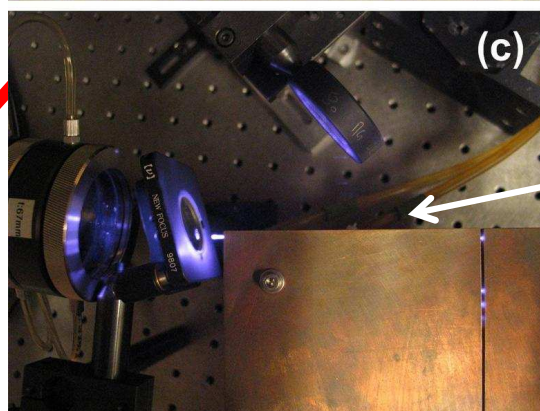
(b)



(a)

fibre

Pompe



(c)

- Introduction

- Correction de faisceau par **beam cleanup** dans un **cristal photoréfractif**

- Principes du beam cleanup par mélange à deux ondes
- Beam cleanup avec compensation des fluctuations de phase
- Beam cleanup auto-référencé
- Résultats expérimentaux

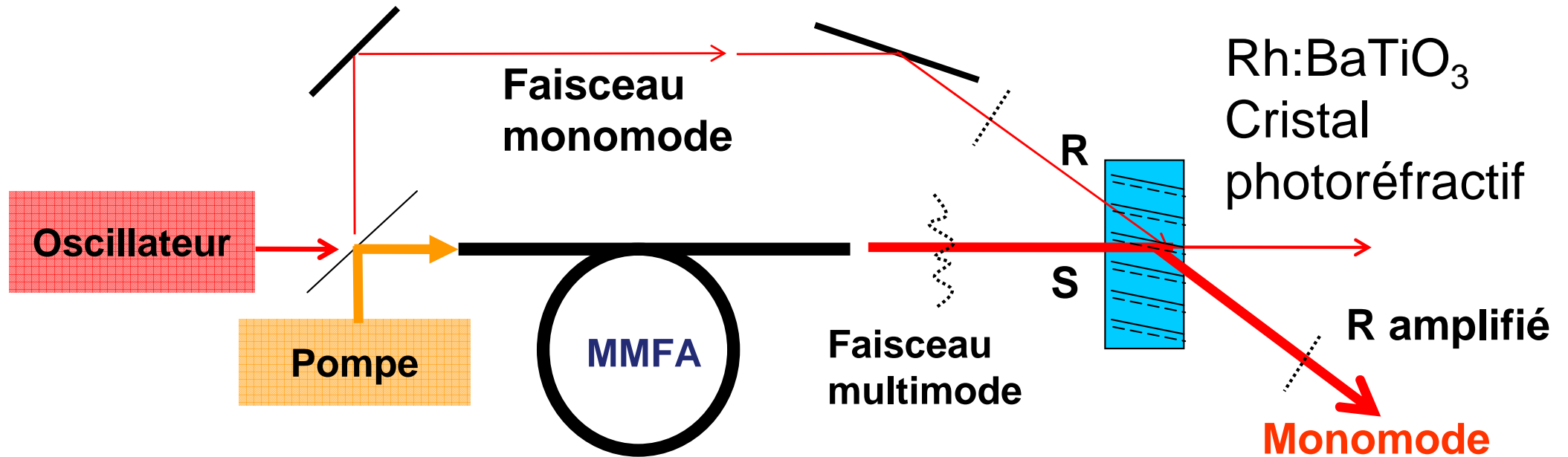
- Correction de faisceau par beam cleanup par diffusion Brillouin stimulée (SBS) dans une fibre multimode

- Conclusion

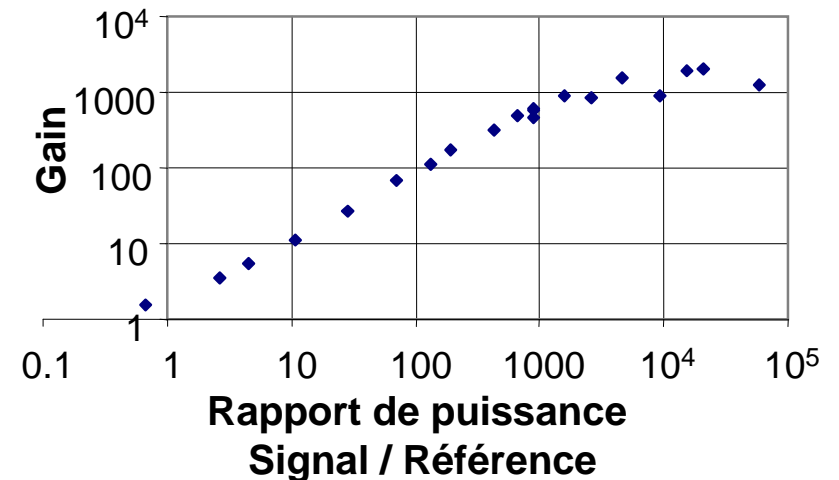


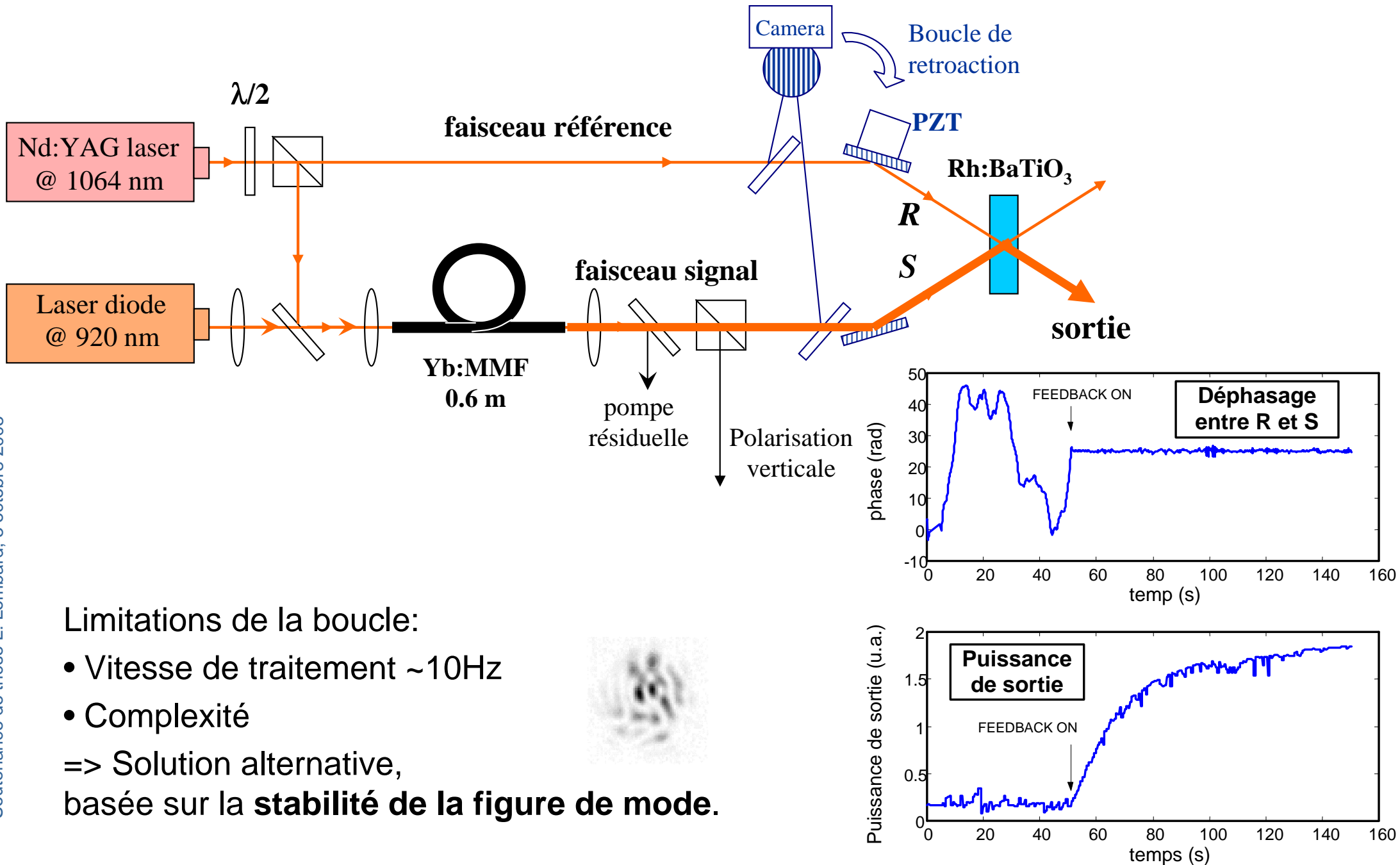


Beam cleanup par mélange à deux ondes dans un cristal photoréfractif



- R et S interfèrent dans le cristal et inscrivent un hologramme volumique décalé de  $\pi/2$
- L'énergie de S (et non sa phase) est transférée à R







- **Mélange à deux ondes auto-référencé**  
(indépendant des fluctuations de phase)
- **Recyclage de la polarisation:**  
indépendant de la dépolarisation dans la fibre multimode

## Recyclage de la polarisation



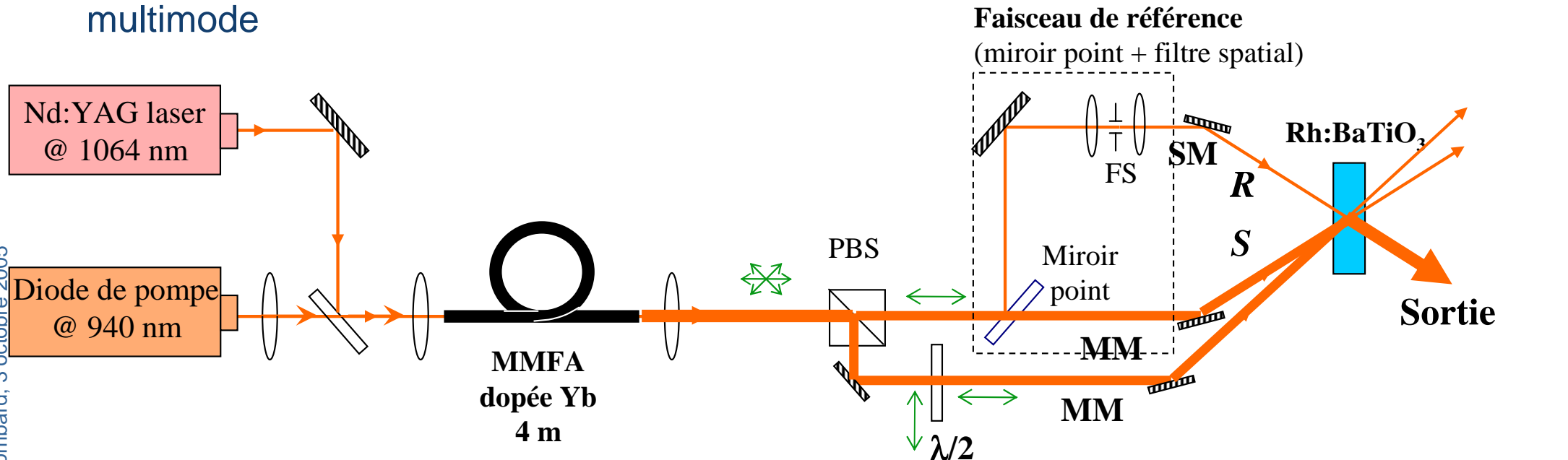
dépolarisé



Polarisation horizontale

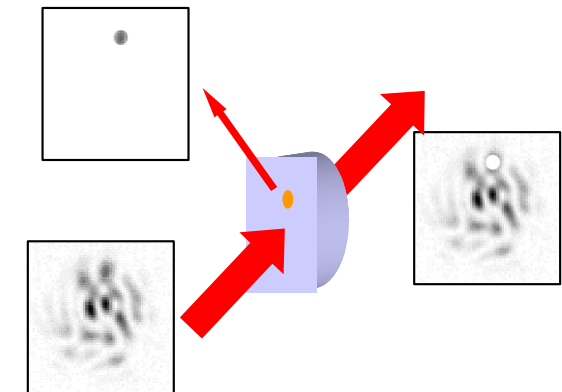


Polarisation verticale



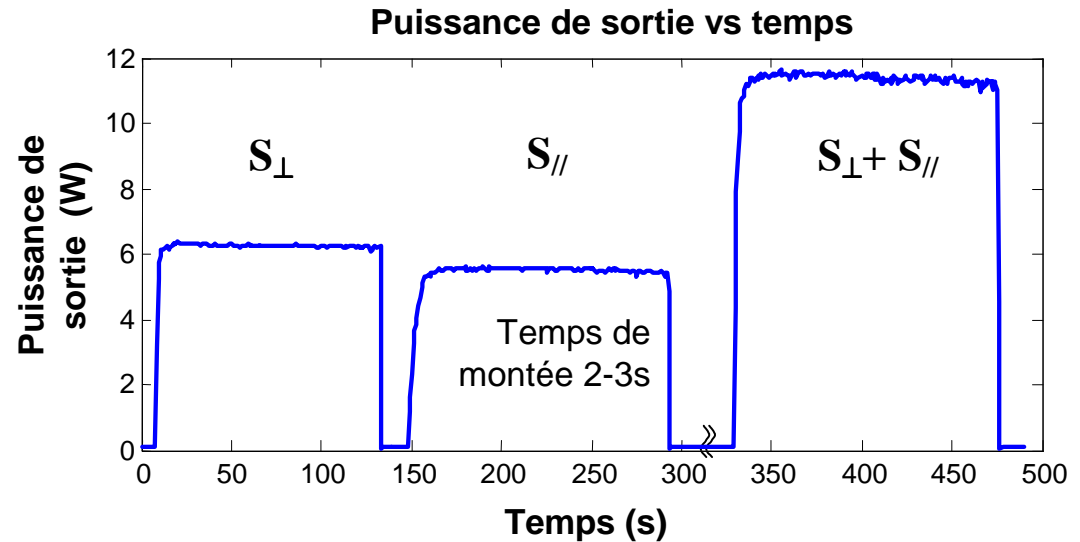
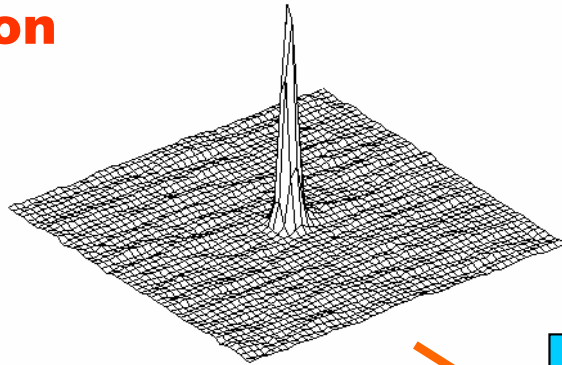
L'efficacité totale est limitée ( $M^2=10$ ) à :

- 50% avec un miroir uniforme
- 100% avec un **miroir point**



Référence, puiss. 0.1W

**$M^2 = 1.0$**   
**Polarisation**  
**linéaire**



2.7 W

Référence amplifiée,  
 puiss. **11.6 W**

**$M^2 = 1.2$**   
**Polarisation**  
**linéaire**

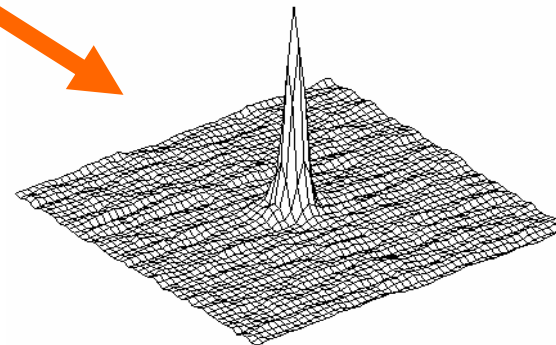
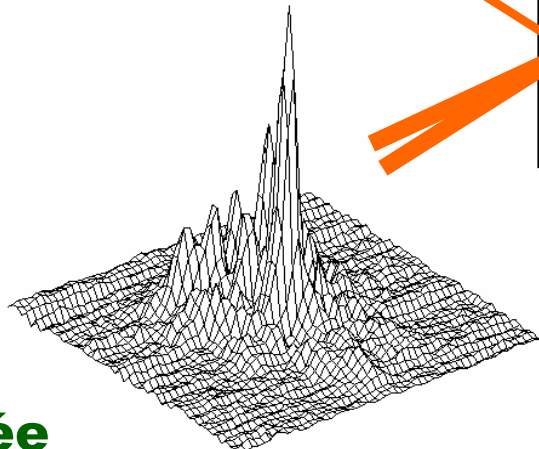
Signal

**$S_{\perp}$  (8.3 W)**

**$S_{\parallel}$  (6.6 W)**

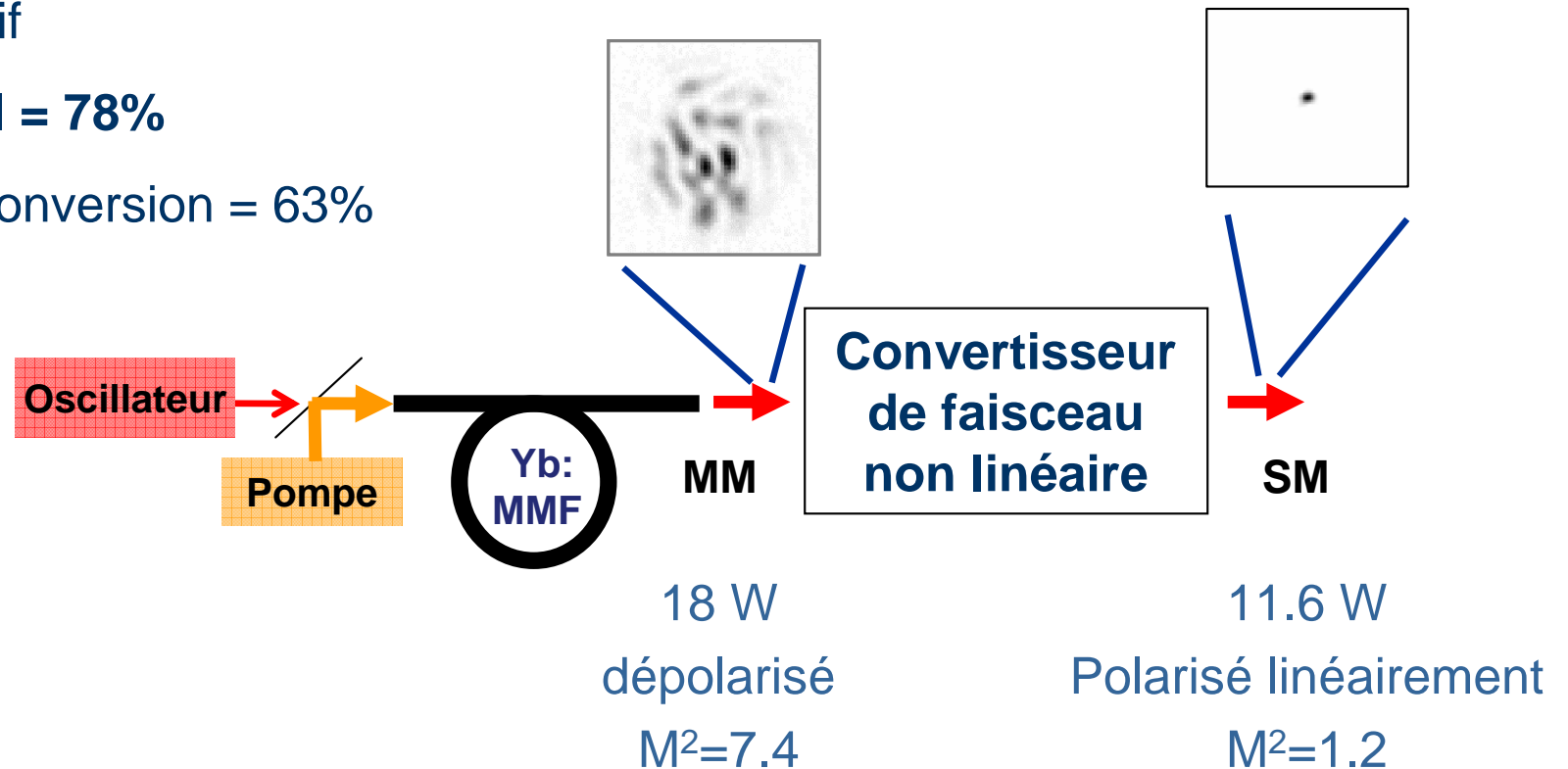
**$M^2 = 7.4$**

**Dépolarisée**



beam cleanup par mélange à deux ondes auto-référencé dans un cristal photoréfractif

- **Efficacité du cristal = 78%**
- Efficacité totale de conversion = 63%



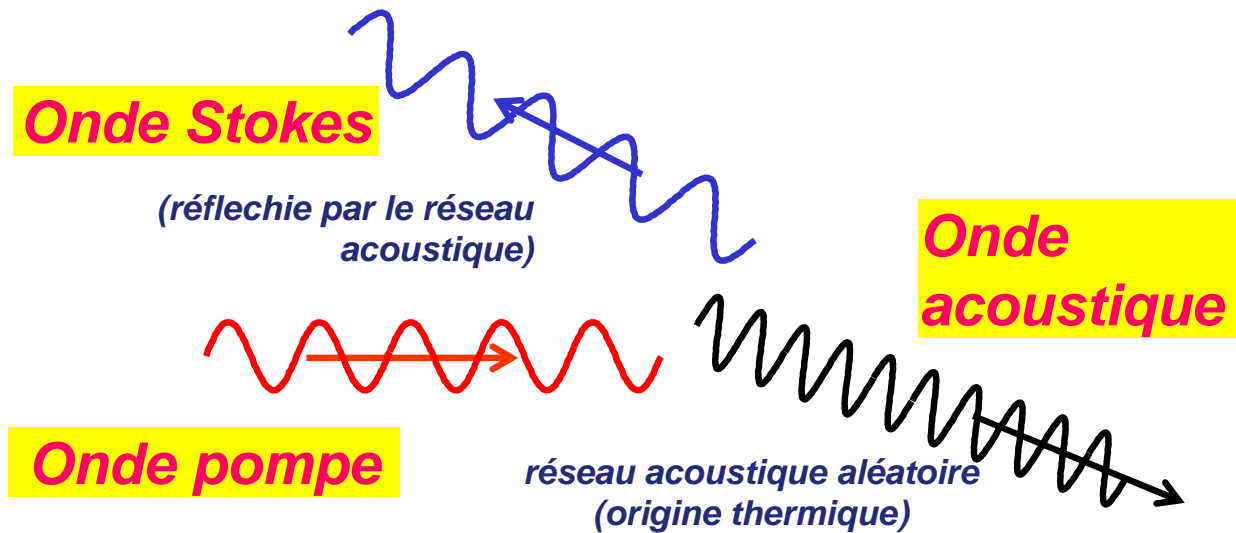
- **Limitation** : inversion de domaines ferro-électriques à **forte puissance**
- Perspectives pour une montée en puissance
  - Diamètre de faisceau plus importante (ici 2 mm soit 350 W/cm<sup>2</sup>)
  - Autres matériaux photoréfractifs (Co:BaTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>)

- Introduction
- Correction de faisceau par **beam cleanup** dans un **crystal photoréfractif**
- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibres multimode**
  - Présentation de la diffusion Brillouin stimulée (SBS)
  - 2 effets intéressants : **conjugaison de phase** et **beam cleanup**
  - Etude **théorique** de l'effet dans une fibre multimode
  - Etude **expérimentale**
  - Boucle auto-alignée
- Conclusion

- Diffusion Brillouin spontanée

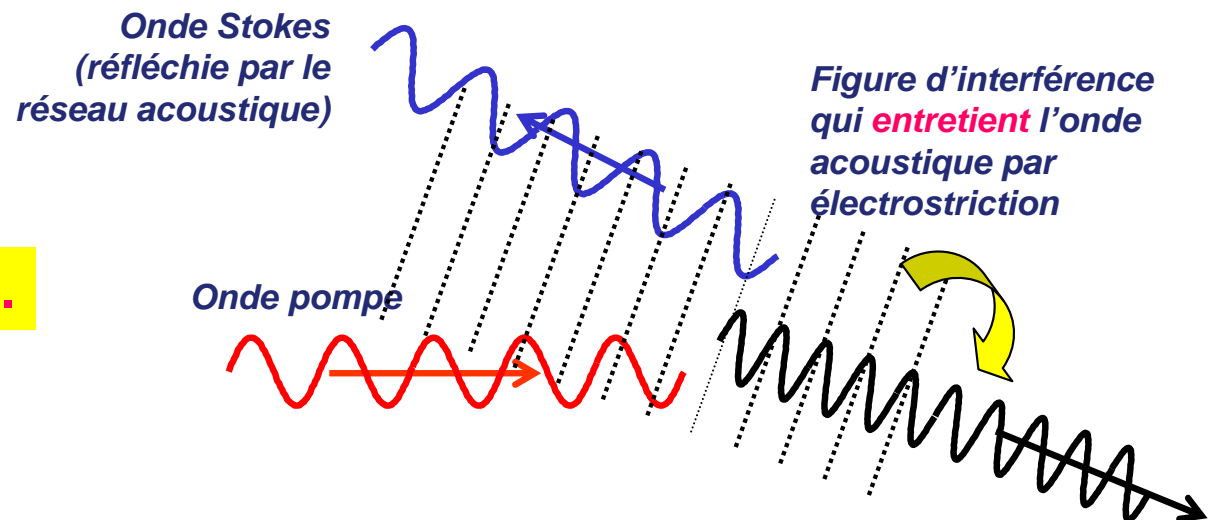
### Décalage brillouin:

Par effet Doppler, l'onde Stokes est décalée en fréquence de 17GHz



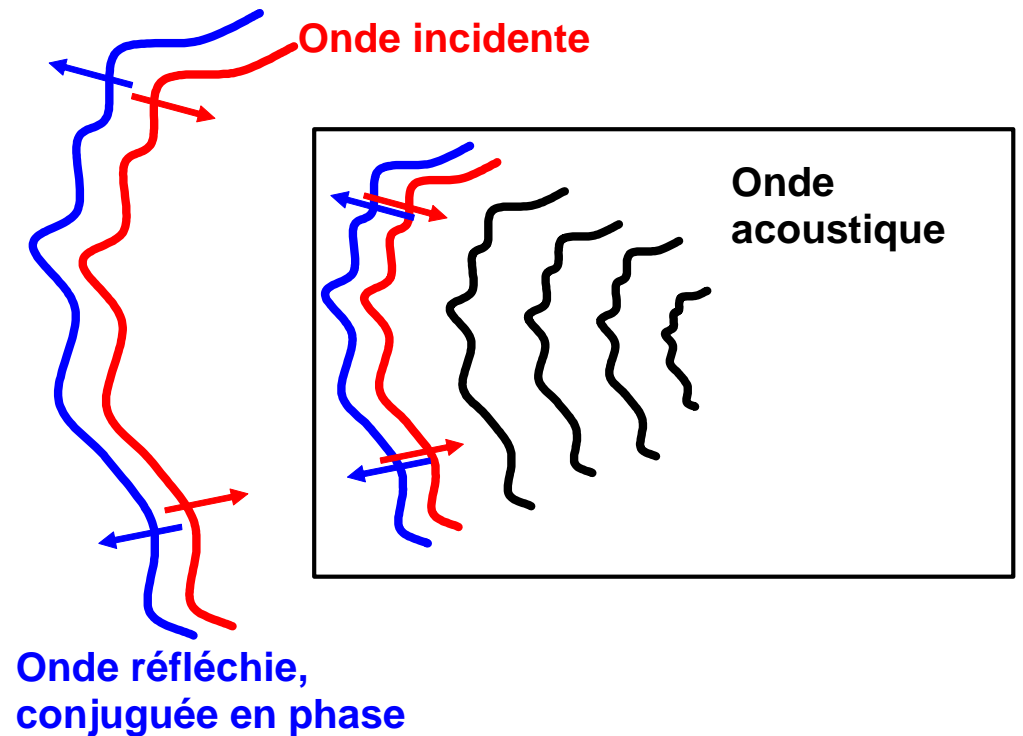
- Diffusion Brillouin stimulée  
**SBS, Stimulated Brillouin Scattering**

**l'effet est auto-alimenté.**



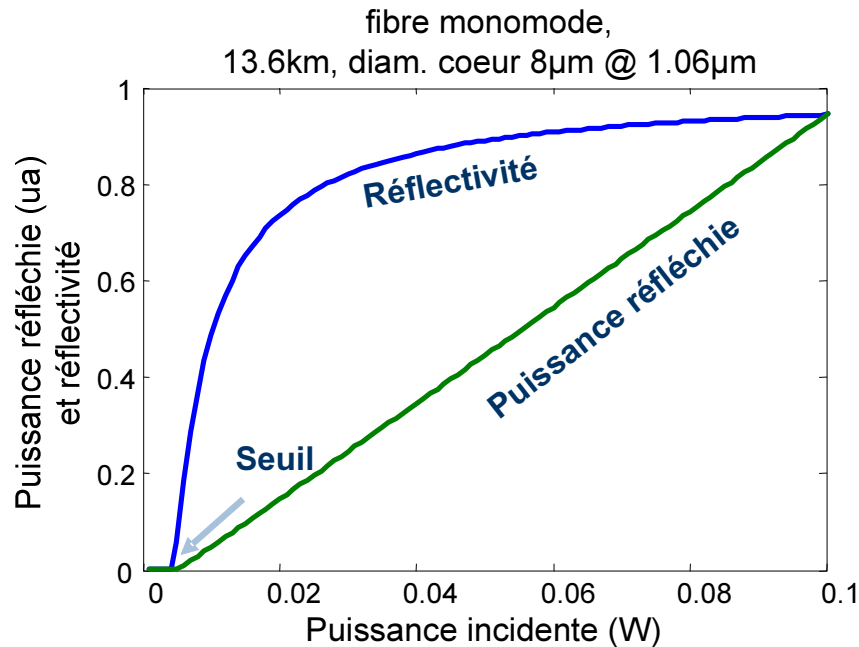
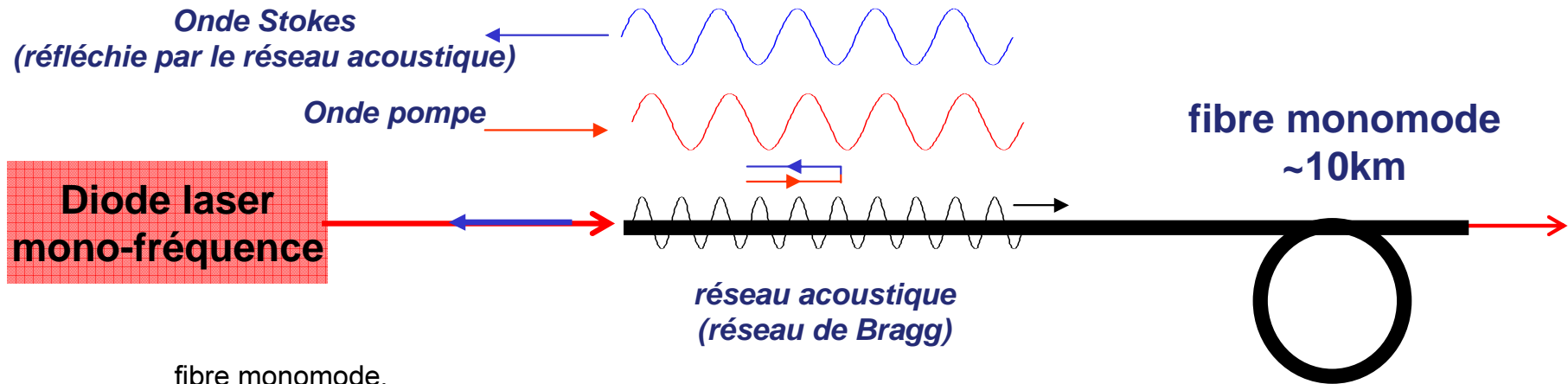


Dans les matériaux massifs,  
la **diffusion Brillouin**  
se traduit par un effet  
de **conjugaison de phase**



-> Qu'en est il de **l'effet Brillouin** dans les **fibres**?





- **L'onde pompe se réfléchit sur le réseau acoustique vers l'onde Stokes**
- **La transmission de la fibre est limitée à 5mW !**

Equations générales

$$\frac{dI_s}{dz} = -gI_p(z)I_s(z)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -gI_p(z)I_s(z)$$

Au seuil de l'effet:

- pas de déplétion de l'onde pompe
- gain exponentiel

$$\frac{dI_s}{I_s} = -gI_p dz$$

$$I_s(z) \propto e^{-gI_p z}$$

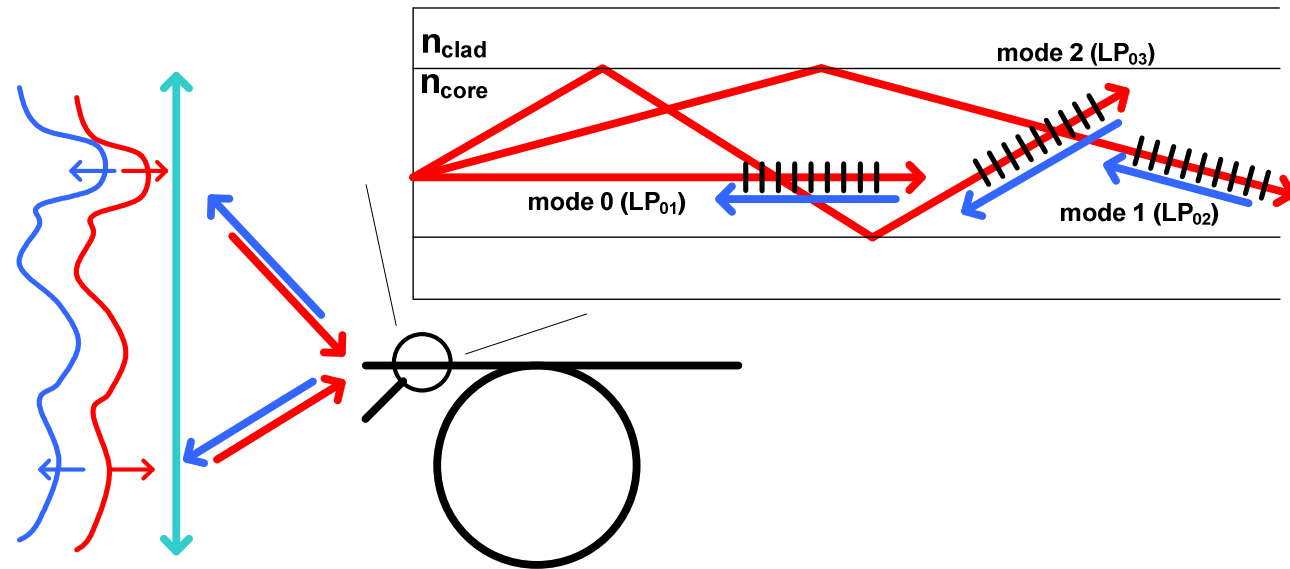
Gain linéaire Brillouin

Seuil Brillouin (empirique):  $e^{gI_p L} = e^{21}$

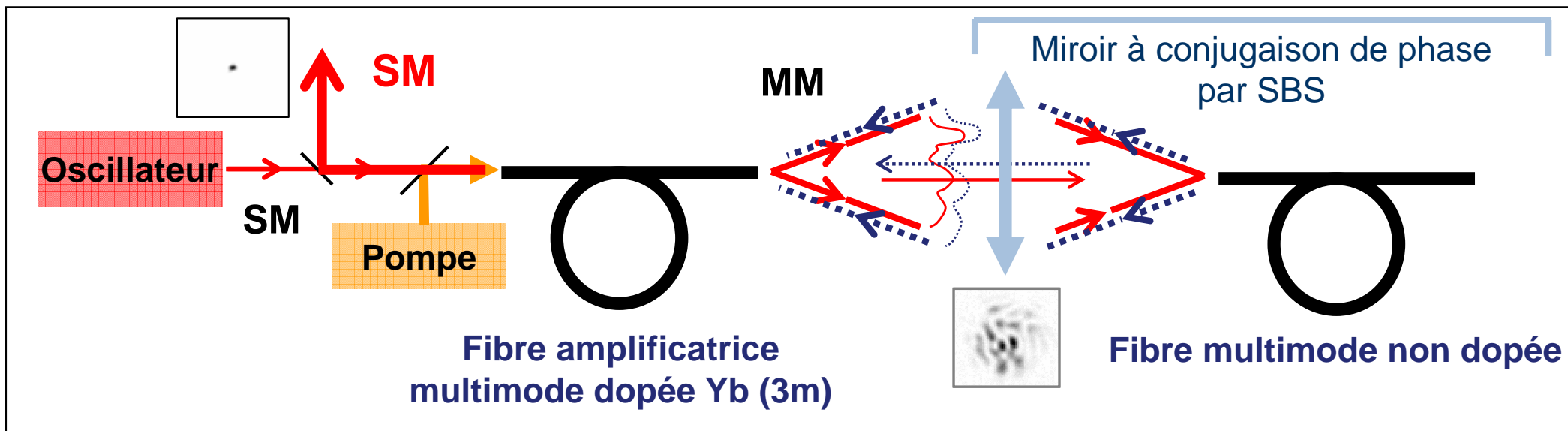


Les réseaux Brillouin sont alignés avec tous les modes de la fibre.

=> Conjugaison de phase  
observé par le groupe de Eichler, 1991



La qualité de faisceau est restituée après double passage dans l'amplificateur aberrant.

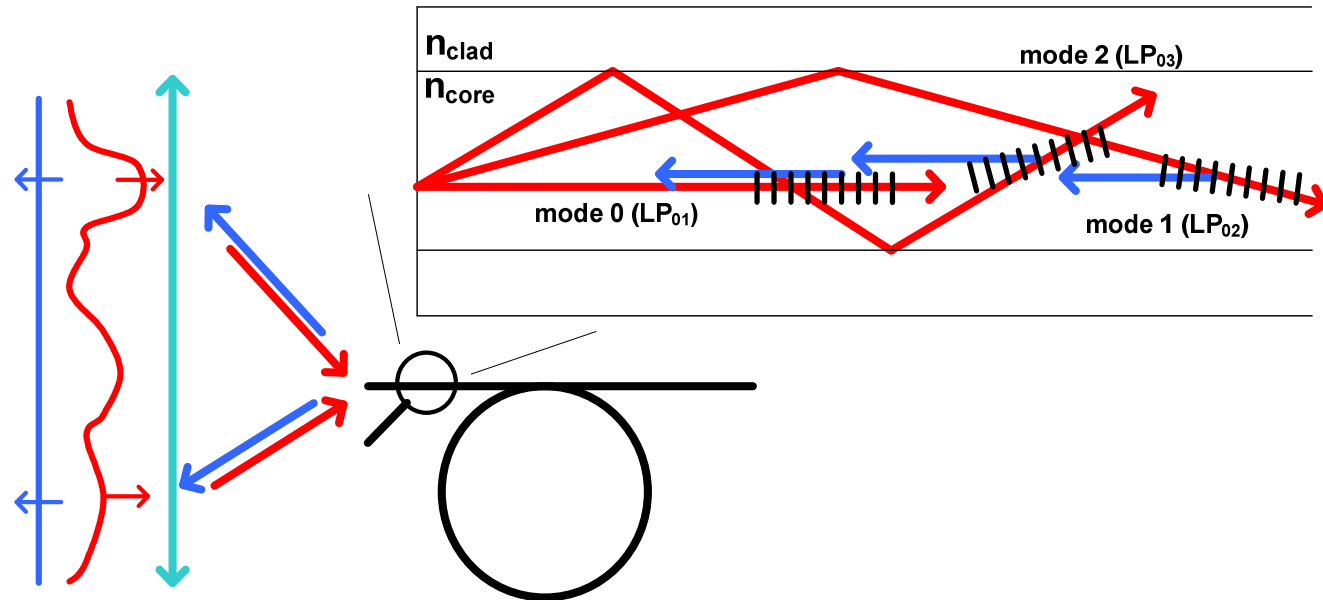




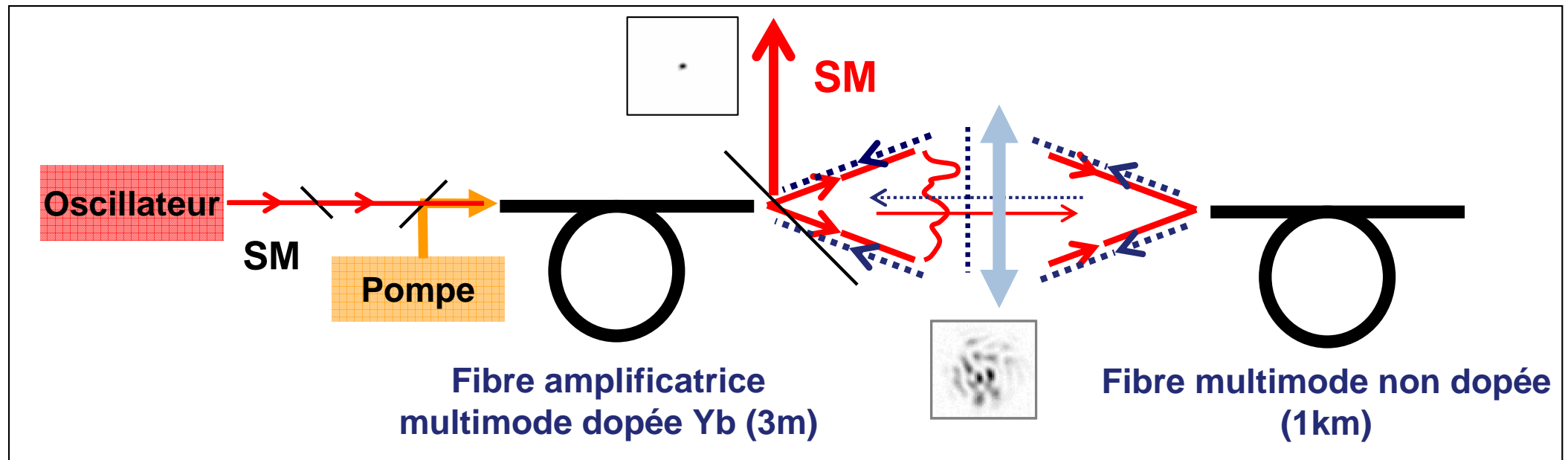
Les réseaux Brillouin réfléchissent tous les modes de fibre vers le mode fondamental de la fibre

=> Beam cleanup

observations expérimentales:  
Bruesselbach, CLEO 93  
Mocofanescu, LEOS 2004



L'onde Stokes est le mode fondamental : la qualité est excellente.





Rien!

observations expérimentales:  
Lombard, 2003-2005

- => Modélisation de l'effet pour isoler les cas :
- de conjugaison de phase,
  - de beam cleanup.

- Introduction
- Correction de faisceau par **beam cleanup** dans un **crystal photoréfractif**

- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibres multimode**

- Présentation de la diffusion Brillouin stimulée (SBS)
- 2 effets intéressants : **conjugaison de phase** et **beam cleanup**
- Etude **théorique** de l'effet dans une fibre multimode
  - Équations de base (Hellwarth, 1978)
  - Prévisions du modèle
- Etude **expérimentale**
- Boucle auto-alignée

- Conclusion



## Cas général

Hyp. : le spectre de gain Brillouin est plat. (l'onde acoustique réagit immédiatement à l'excitation de la figure d'interférence)

Décomposition  
sur les modes  
de la fibre

Champ électrique  
Stokes

$$E_s(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N c_i^s(z, t) \psi_i(x, y) e^{i(-\beta_i^s z - \omega_s t)}$$

Constante  
de propagation  
du mode i

Champ électrique  
Pompe

$$E_p(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N c_i^p(z, t) \psi_i(x, y) e^{i(\beta_i^p z - \omega_p t)}$$

Amplitude complexe  
des ondes sur le mode i

Champ électrique  
du mode i

Polarisation non linéaire d'ordre 3

$$\mathcal{P}_{NL} = \frac{3}{2} \epsilon_0 \chi^{(3)} E_p E_p^* E_s(x, y, z, t)$$

Équation de Maxwell

$$\nabla^2 E(\vec{r}, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(\vec{r}, t) = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathcal{P}_{NL}(\vec{r}, t)$$

Équation générale stationnaire de l'effet Brillouin dans la fibre multimode pour le mode n

$$\frac{dc_n^s(z)}{dz} = \alpha g_B \sum_{i,j,m} \left[ \left( \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i \psi_j^* \psi_m \psi_n^*(x, y) dx dy \right) c_i^p c_j^{*p} c_m^s(z) e^{i(\beta_i^p - \beta_j^p - \beta_m^s + \beta_n^s)z} \right]$$



## Simplification: cas du seuil de l'effet

**Pas de déplétion  
de la pompe**

$$P_p(z) = P_p(0)$$

$$c_i^p(z) = c_i^p(0)$$

**Puissance Stokes  
exponentielle**

$$P_s(z) = P_s(0) \cdot e^{-\gamma z}$$

$$c_i^s(z) = c_i^s(0) \cdot e^{-\frac{\gamma}{2}z}$$

Gain linéaire Brillouin  
dans la fibre

**Équation linéarisée** de l'effet Brillouin dans la fibre multimode

$$\gamma c_n^s = -2\alpha g_B \sum_m \left( \sum_{i,j} [c_i^p c_j^{*p} R_{ijmn} K_{ijmn}] \right) c_m^s$$

Configuration  
de l'onde Pompe

Géométrie  
de la fibre



## Résolution de l'équation linéarisée: écriture vectorielle

Écriture matricielle

$$C^s = \begin{bmatrix} c_1^s \\ c_2^s \\ \vdots \\ c_i^s \\ \vdots \\ c_N^s \end{bmatrix}; C^p = \begin{bmatrix} c_1^p \\ c_2^p \\ \vdots \\ c_i^p \\ \vdots \\ c_N^p \end{bmatrix}$$

$$M(n, m) = \sum_{i,j} \left[ c_i^p c_j^{*p} R_{ijmn} K_{ijmn} \right]$$

- Configuration pompe
- Géométrie de la fibre

Équation linéarisée de l'effet Brillouin:  
une **équation aux vecteurs propres!**

$$\frac{\gamma}{-2\alpha g_B} C^s = M \cdot C^s$$

Solutions de cette équation

Vecteurs propres	$V^{(i)}$	Configurations Stokes :	$C^{s(i)} = V^{(i)}$
Valeurs propres	$\Lambda^{(i)}$	associée au gain Brillouin :	$\gamma^{(i)} = -2\alpha g_B \cdot \Lambda^{(i)}$
		Tri des solutions :	$\gamma^{(0)} > \gamma^{(1)} > \dots > \gamma^{(N)}$

**Nouvelle base des modes de fibre:  
chaque combinaison de mode présente un gain Brillouin**





## Solution physique

Solutions de l'équation  $\{C^{s(i)}, \gamma^{(i)}\}, \quad \gamma^{(0)} > \gamma^{(1)} > \dots > \gamma^{(N)}$

Au seuil, on a (empiriquement):  $\gamma^{(0)} L = 21$

L'onde Stokes est une **somme incohérente** de toutes les solutions:

Champ électrique Stokes:

$$E_s(x, y) = e^{\frac{1}{2}\gamma^{(0)}L} e^{i\phi^{(0)}} \sum_n c_n^{s(0)} \psi_n(x, y) + e^{\frac{1}{2}\gamma^{(1)}L} e^{i\phi^{(1)}} \sum_n c_n^{s(1)} \psi_n(x, y) + \dots + e^{\frac{1}{2}\gamma^{(N)}L} e^{i\phi^{(N)}} \sum_n c_n^{s(N)} \psi_n(x, y)$$

Gain total du mode propre

Phase aléatoire (somme incohérente)

mode propre

Intensité Stokes:

$$I_s(x, y) \propto e^{21} \left| \sum_n c_n^{s(0)} \psi_n(x, y) \right|^2 + e^{21 \frac{\gamma^{(1)} - \gamma^{(0)}}{\gamma^{(0)}}} \left| \sum_n c_n^{s(1)} \psi_n(x, y) \right|^2 + \dots + e^{21 \frac{\gamma^{(N)} - \gamma^{(0)}}{\gamma^{(0)}}} \left| \sum_n c_n^{s(N)} \psi_n(x, y) \right|^2$$

Gain de la valeur propre la plus importante au seuil



## Solution physique

Solutions de l'équation  $\{C^{s(i)}, \gamma^{(i)}\}$ ,  $\gamma^{(0)} > \gamma^{(1)} > \dots > \gamma^{(N)}$

Au seuil, on a (empiriquement):  $\gamma^{(0)} L = 21$

**Cas de conjugaison de phase :**  $V^{(0)} = C^{p*}$   
 la plus importante valeur propre est prépondérante.  $\gamma^{(0)} \approx 2\gamma^{(i)}$

Champ électrique Stokes:

$$E_s(x, y) = e^{\frac{1}{2}\gamma^{(0)}L} e^{i\phi^{(0)}} \sum_n c_n^{s(0)} \psi_n(x, y)$$

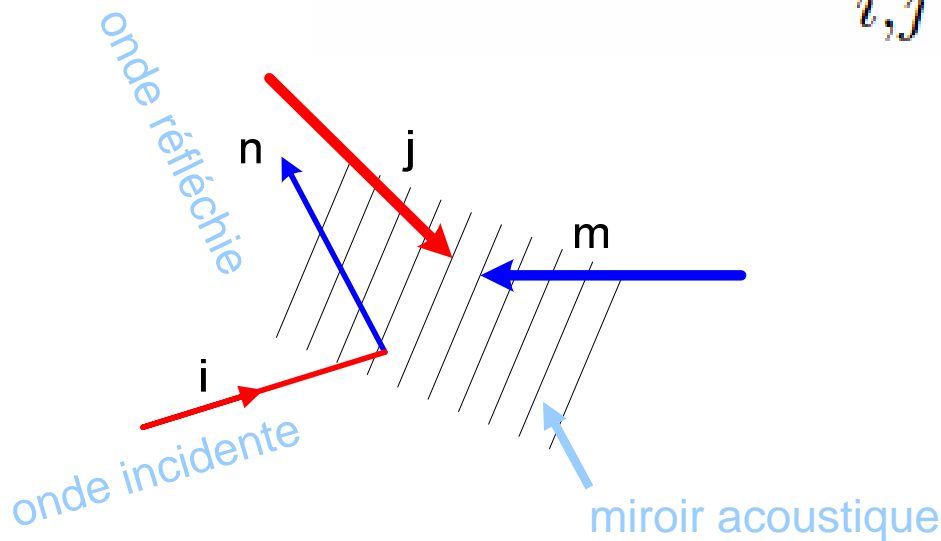
Intensité Stokes:

$$I_s(x, y) \propto e^{21} \left| \sum_n c_n^{s(0)} \psi_n(x, y) \right|^2$$

$$= E^{p*}(x, y)$$



$$M(n, m) = \sum_{i, j} \left[ \underbrace{c_i^p c_j^{*p} R_{ijmn} K_{ijmn}}_{\text{Réseau simple}} \right]$$



Réseau simple

Le terme en  $\{i, j, m, n\}$  représente la **diffraction** du mode Pompe **i** sur le **réseau d'interférence** créé par les modes Pompe et Stokes **j et m**, vers le mode Stokes **n**.

Facteur  
d'accord de phase

$$K_{ijmn} = \frac{1}{L} \int_0^L e^{i\Delta\beta_{ijmn}z - \mu z} dz$$

Le miroir acoustique  
a-t-il le **bon angle**?

$$\Delta\beta_{ijmn} = \beta_i^p - \beta_j^p - \beta_m^s + \beta_n^s$$

Facteur  
de recouvrement

$$R_{ijmn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i \psi_j^* \psi_m \psi_n^*(x, y) dx dy$$

Les modes sont-ils  
**bien superposés**?



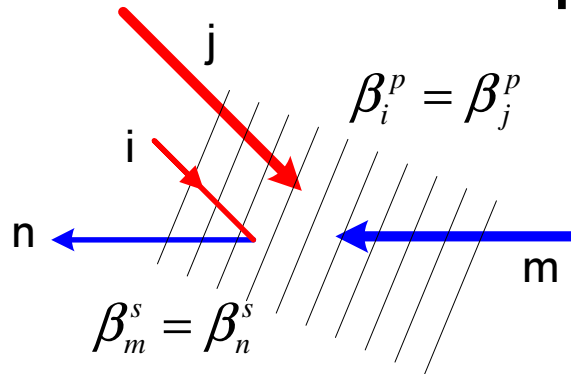
Facteur  
d'accord de phase

$$K_{ijmn} = \frac{1}{L} \int_0^L e^{i\Delta\beta_{ijmn}z - \mu z} dz$$

Le miroir acoustique  
a-t-il le **bon angle**?

$$\Delta\beta_{ijmn} = \beta_i^p - \beta_j^p - \beta_m^s + \beta_n^s$$

Trois catégories de termes dans M



$$\Delta\beta_{ijmn} = 0$$

$$i = j, m = n$$

**Termes Cohérents,**  
angle « parfait »

**M = TC**

$$0 < L < \infty$$



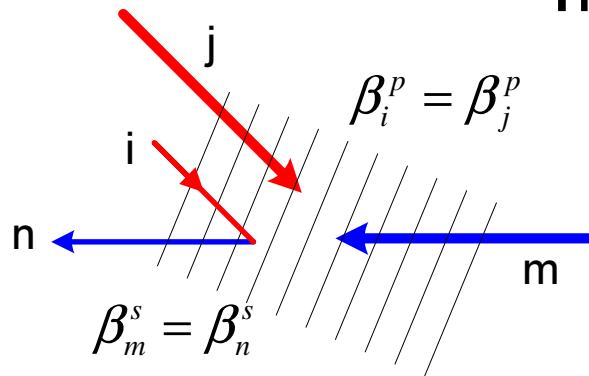
Facteur  
d'accord de phase

$$K_{ijmn} = \frac{1}{L} \int_0^L e^{i\Delta\beta_{ijmn}z - \mu z} dz$$

Le miroir acoustique  
a-t-il le **bon angle**?

$$\Delta\beta_{ijmn} = \beta_i^p - \beta_j^p - \beta_m^s + \beta_n^s$$

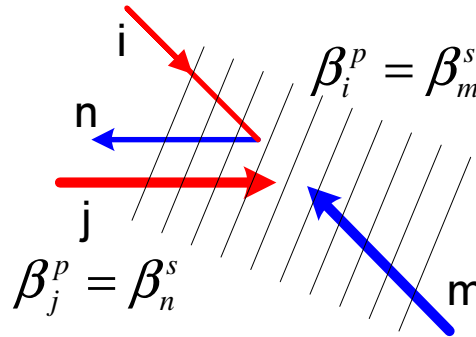
Trois catégories de termes dans M



$$\Delta\beta_{ijmn} = 0$$

$$i = j, m = n$$

**Termes Cohérents,**  
angle « parfait »



$$\Delta\beta_{ijmn} \approx 0$$

$$i = m, j = n$$

**Termes Presque Cohérents,**  
angle « presque parfait »  
(décalage Brillouin 17GHz)

$$M = TC$$

$$0 < L < \infty$$

$$+ TPC$$

$$0 < L < 10m$$

Deux régimes de longueur



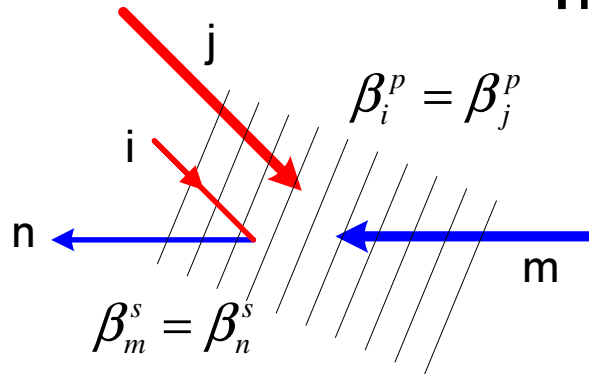
Facteur  
d'accord de phase

$$K_{ijmn} = \frac{1}{L} \int_0^L e^{i\Delta\beta_{ijmn}z - \mu z} dz$$

Le miroir acoustique  
a-t-il le **bon angle**?

$$\Delta\beta_{ijmn} = \beta_i^p - \beta_j^p - \beta_m^s + \beta_n^s$$

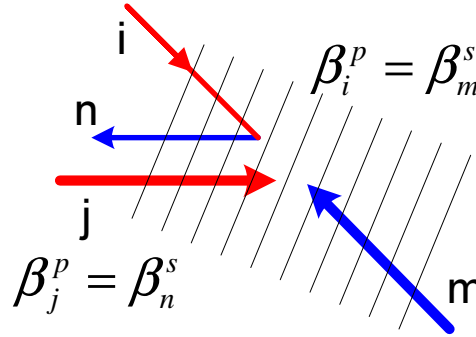
Trois catégories de termes dans M



$$\Delta\beta_{ijmn} = 0$$

$$i = j, m = n$$

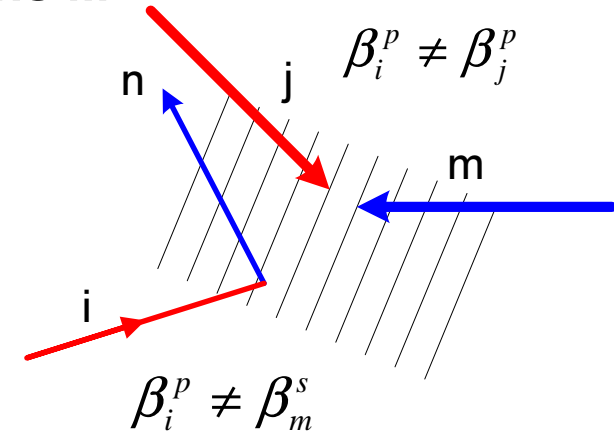
**Termes Cohérents,**  
angle « parfait »



$$\Delta\beta_{ijmn} \approx 0$$

$$i = m, j = n$$

**Termes Presque Cohérents,**  
angle « presque parfait »  
(décalage Brillouin 17GHz)



$$\Delta\beta_{ijmn} \neq 0$$

$$i \neq m, i \neq n$$

**Termes Non Cohérents,**  
angle « mauvais »  
(grand majorité des termes)

$$M = TC$$

$$0 < L < \infty$$

$$+ TPC$$

$$0 < L < 10m$$

$$+ TNC$$

$$0 < L < 1mm$$

Deux régimes de longueur



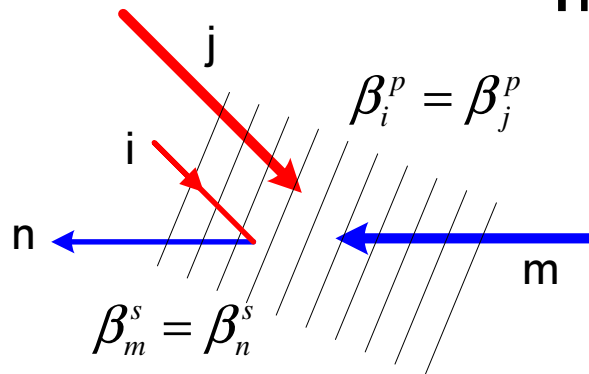
Facteur  
d'accord de phase

$$K_{ijmn} = \frac{1}{L} \int_0^L e^{i\Delta\beta_{ijmn}z - \mu z} dz$$

Le miroir acoustique  
a-t-il le **bon angle**?

$$\Delta\beta_{ijmn} = \beta_i^p - \beta_j^p - \beta_m^s + \beta_n^s$$

Trois catégories de termes dans M



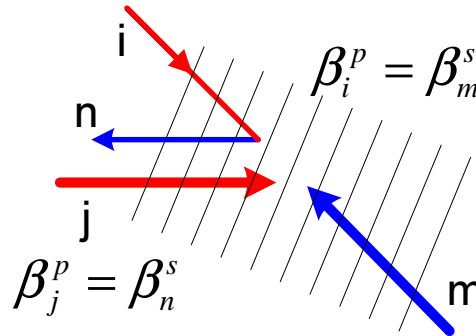
$$\Delta\beta_{ijmn} = 0$$

$$i = j, m = n$$

**Termes Cohérents,**  
angle « parfait »

$$M = TC$$

$$0 < L < \infty$$



$$\Delta\beta_{ijmn} \approx 0$$

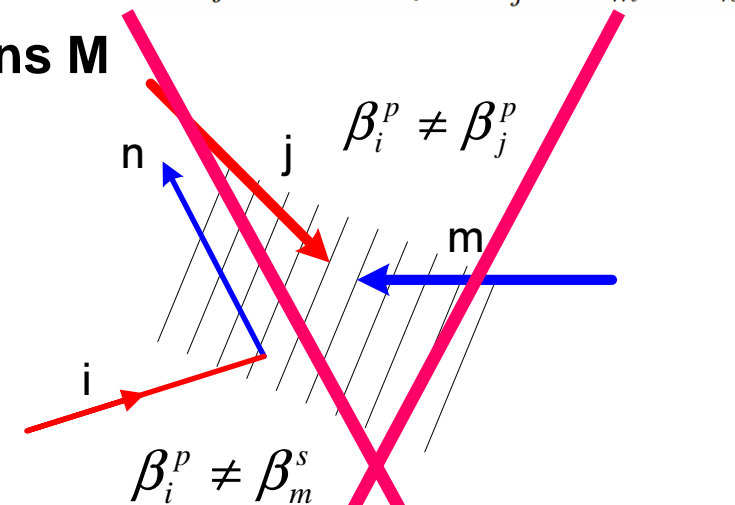
$$i = m, j = n$$

**Termes Presque Cohérents,**  
angle « presque parfait »  
(décalage Brillouin 17GHz)

$$+ TPC$$

$$0 < L < 10m$$

Deux régimes de longueur



$$\Delta\beta_{ijmn} \neq 0$$

$$i \neq m, i \neq n$$

**Termes Non Cohérents,**  
angle « mauvais »  
(grand majorité des termes)

$$+ TNC$$

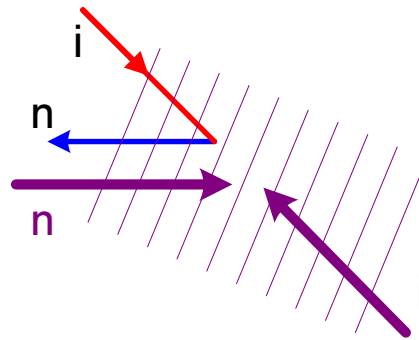
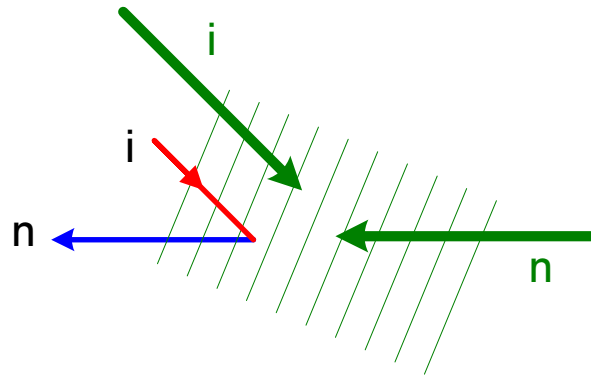
$$0 < L < 1mm$$



Régime de conjugaison de phase: il y a **doublement du gain** (réseaux **superposés**) pour le **conjugué en phase**

$$\frac{\gamma}{-2\alpha g_B} C^s = M \cdot C^s$$

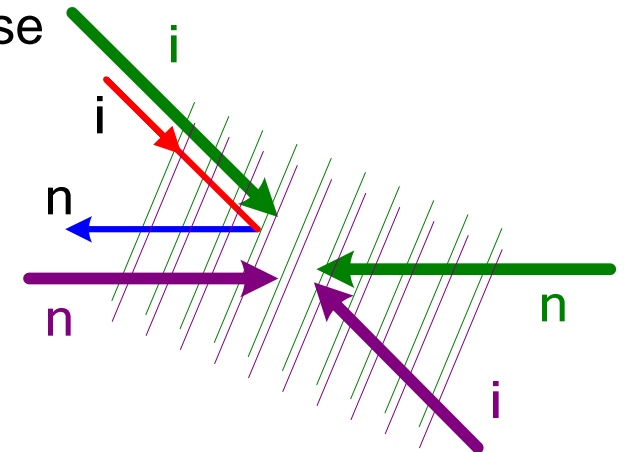
$$M = \text{TC} + \text{TPC}$$



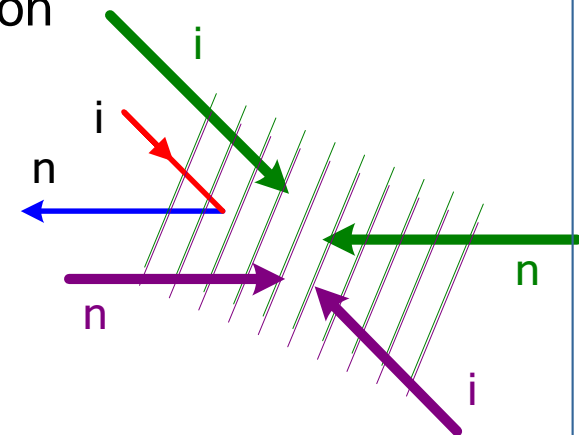
Matrice TC  
pratiquement diagonale,  
n'impose pas  
de vecteur propre.

Matrice TPC  
projection sur le  
conjugué en phase.  
Seul vecteur propre:  
 $C^{s(0)} = C^{p*}$

Pas de relation  
de phase



Relation de  
conjugaison





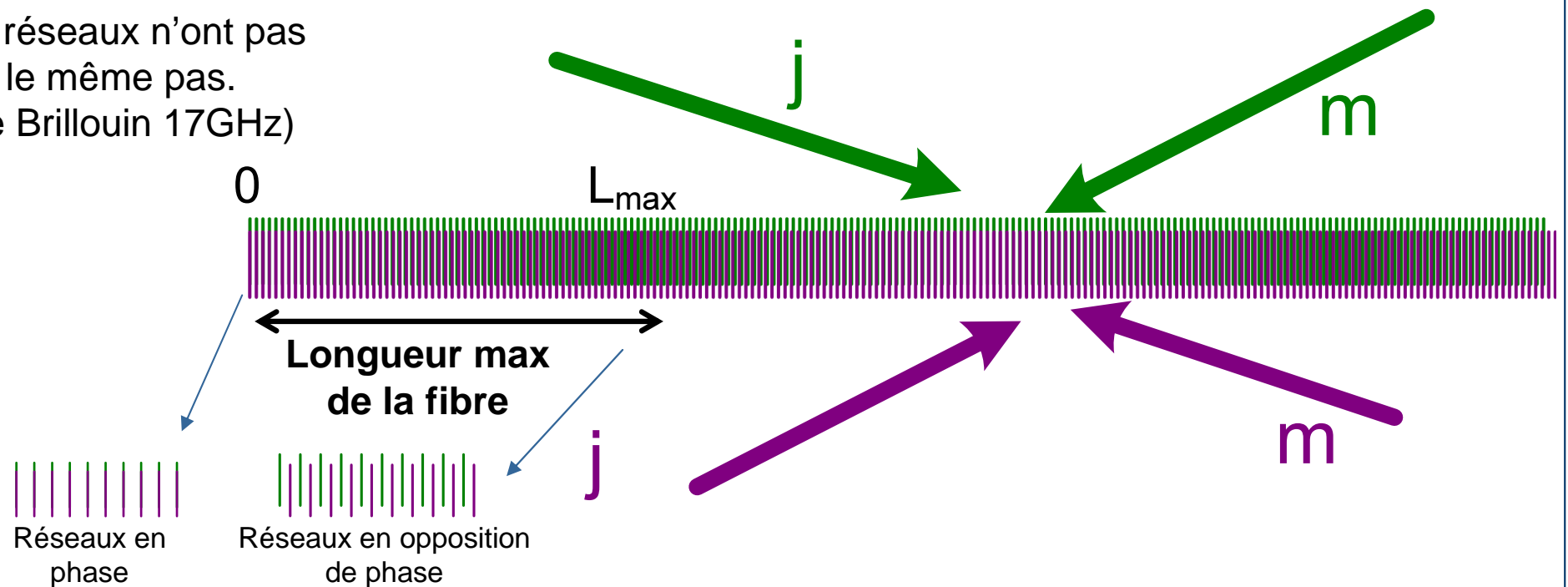


Dans une fibre longue, les termes presque cohérents TPC disparaissent

$$M = TC + \cancel{TPC}$$

### Explication:

Les deux réseaux n'ont pas tout à fait le même pas.  
(décalage Brillouin 17GHz)



Il y a une **longueur maximale**  $L_{max}$  au delà de laquelle il n'y a **plus de superposition** des réseaux (le conjugué n'est plus favorisé)



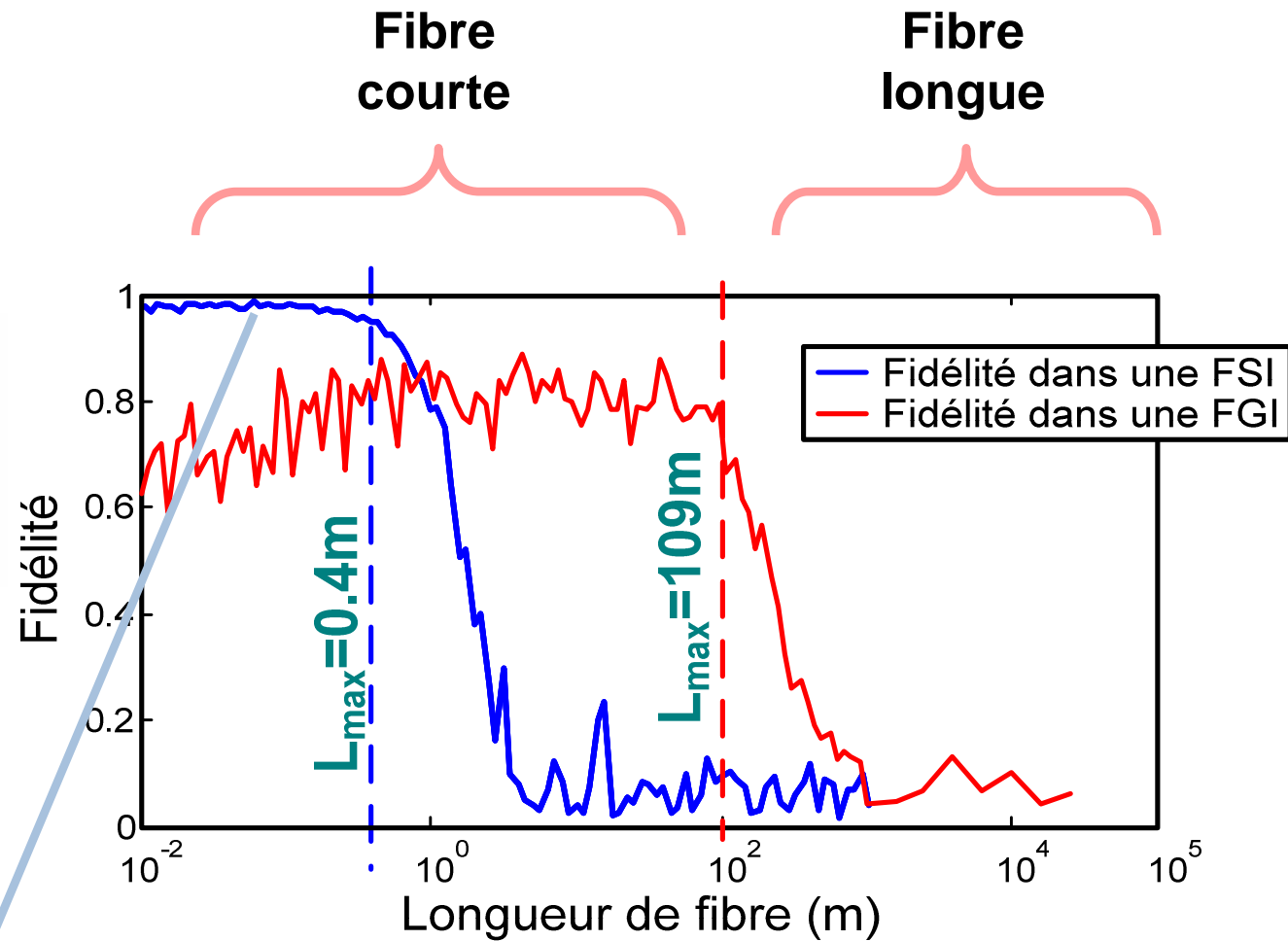
Profil d'indice  
 $n_{\text{coeur}}$   
 $n_{\text{gaine}}$   
 $\sim 50\mu\text{m}$  to  $1\text{mm}$   
 Fibre à Gradient  
 d'Indice (GI)

Profil d'indice  
 $n_{\text{coeur}}$   
 $n_{\text{gaine}}$   
 $\sim 50\mu\text{m}$  à  $1\text{mm}$   
 Fibre à Saut  
 d'Indice (SI)

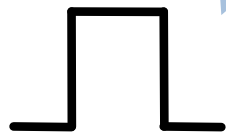
$$L < L_{ML} \approx \frac{3.6n}{ON^2\Delta k_0} \quad \text{pour la FSI}$$

$$L < L_{ML} \approx \frac{19n^3}{ON^4\Delta k_0} \quad \text{pour la FGI}$$

**Fidélité:** « écart »  
 entre l'onde **Stokes** et  
 l'onde **conjuguée**



**fibre SI courte**  
 longueur  $< 1$  à  $10\text{m}$



**bonne qualité de conjugaison de phase**

**Fibre  
 courte**

**Fibre  
 longue**



Facteur  
de recouvrement

$$R_{ijmn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i \psi_j^* \psi_m \psi_n^*(x, y) dx dy$$

Les modes sont-ils  
**bien superposés?**

Dans les matrices TC et TPC,  
 $R_{in} = R_{iinn} = R_{inin}$

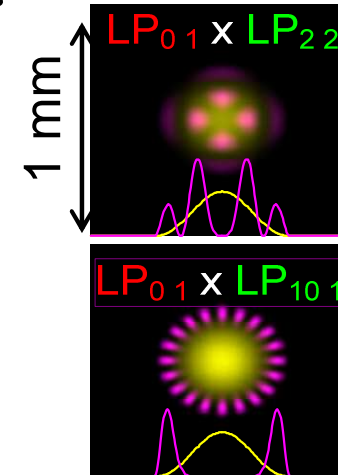
C'est le **produit**  
des **figures d'intensité**  
des modes de fibre **i et n**

$$R_{in} = R_{iinn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi_i|^2 |\psi_n|^2 (x, y) dx dy$$

Si les modes se recouvrent bien,  
le réseau acoustique est efficace.

Sinon, le réseau est inefficace.

 FSI, 50 $\mu$ m, ON 0.22

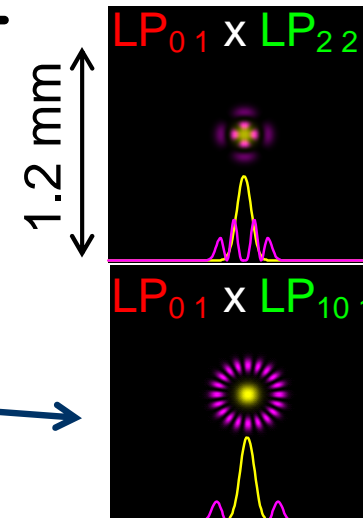


Facteurs de  
recouvrement  $R_{iinn}$

$$R_{01,22} = 5 \cdot 10^{21} \text{m}^{-1}$$

$$R_{01,101} = 1 \cdot 10^{21} \text{m}^{-1}$$

 FGI 62.5 $\mu$ m, ON 0.27

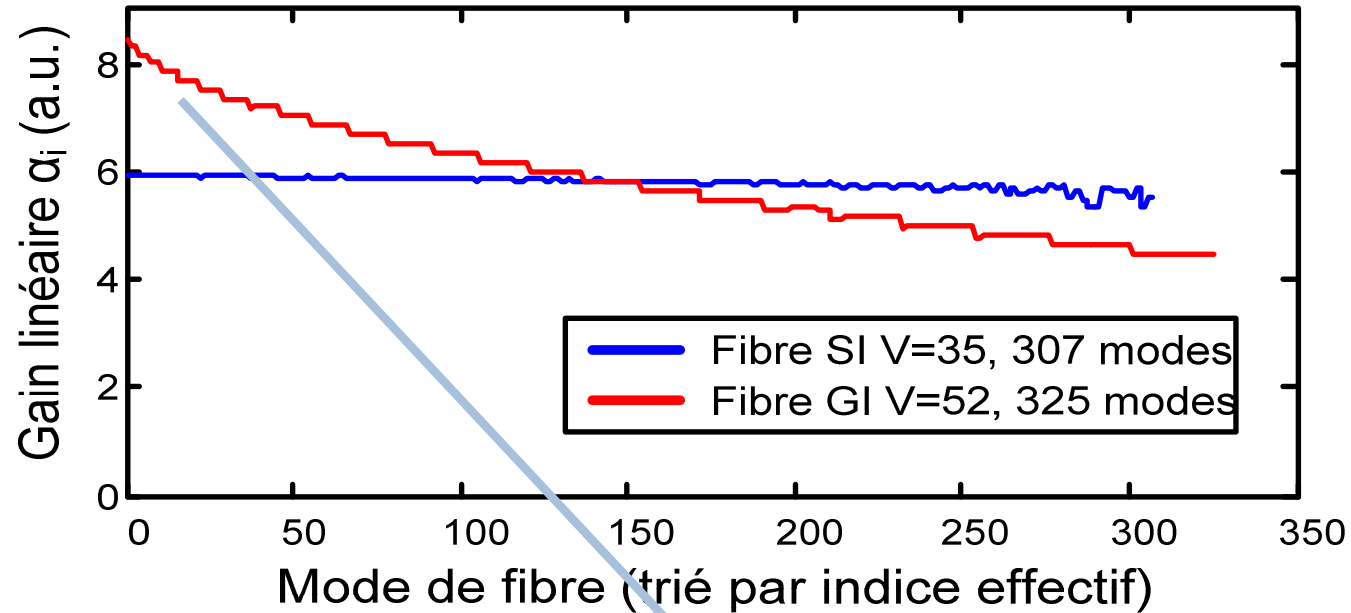


$$R_{01,22} = 9 \cdot 10^{21} \text{m}^{-1}$$

$$R_{01,101} = 3 \cdot 10^{19} \text{m}^{-1}$$



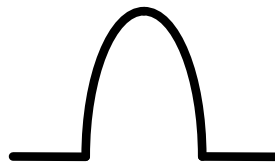
Gain Brillouin de chaque mode de fibre pour  
une excitation homogène de la fibre.



**fibre GI**

**pas conjugaison mais:**

**Effet de beam cleanup car les modes  
d'ordre faible sont favorisés**



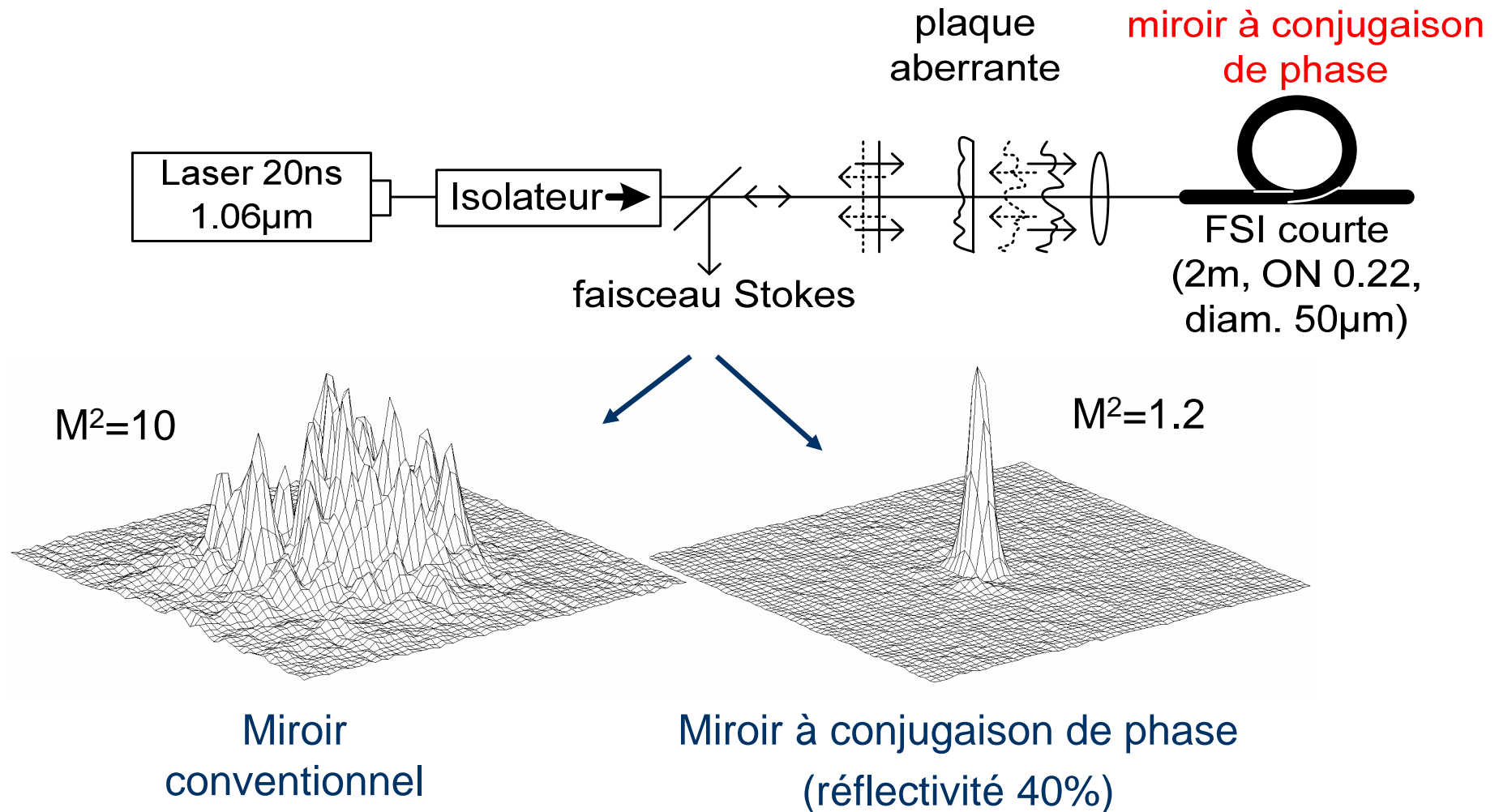


	Courte ( $L < 10\text{m}$ )	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase	rien
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup

- Introduction
- Correction de faisceau par **beam cleanup** dans un **crystal photoréfractif**
- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibres multimode**
  - Présentation de la diffusion Brillouin stimulée (SBS)
  - 2 effets intéressants : **conjugaison de phase** et **beam cleanup**
  - Etude **théorique** de l'effet dans une fibre multimode
  - Etude **expérimentale**
  - Boucle auto-alignée
- Conclusion



	Courte ( $L < 10\text{m}$ )	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase	rien
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup

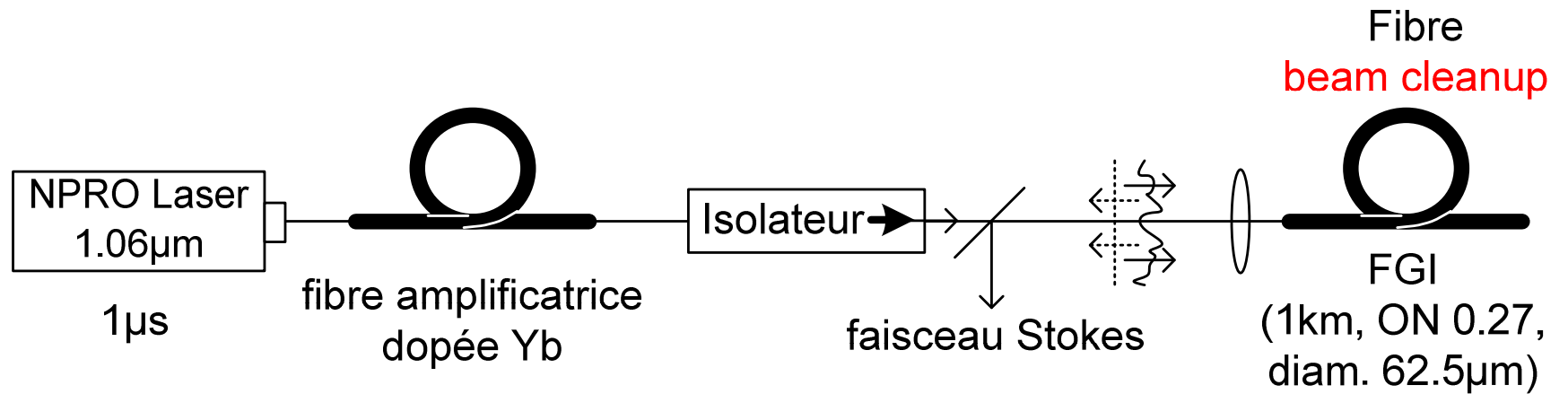


**=> Conjugaison de phase de bonne qualité dans une FSI courte.**

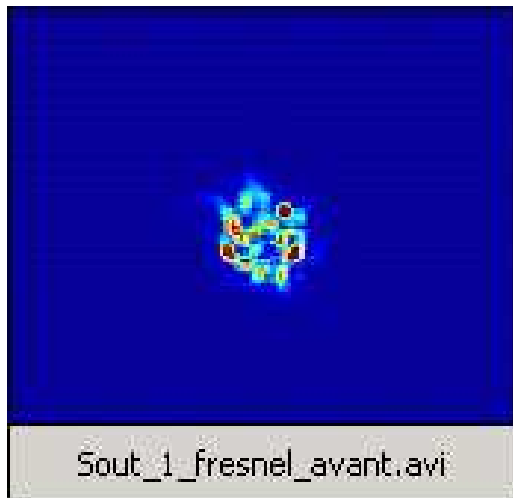




	Courte ( $L < 10\text{m}$ )	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase <b>OK</b>	rien
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	<b>? Beam cleanup ?</b>

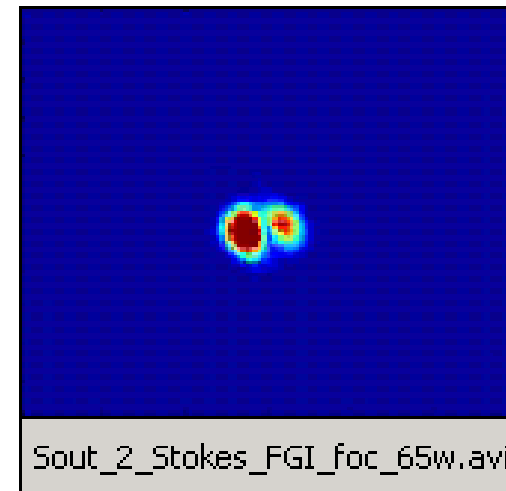


Entrée  
faisceau pompe



Sout\_1\_fresnel\_avant.avi

Retour faisceau Stokes  
(Réflectivité 15%)

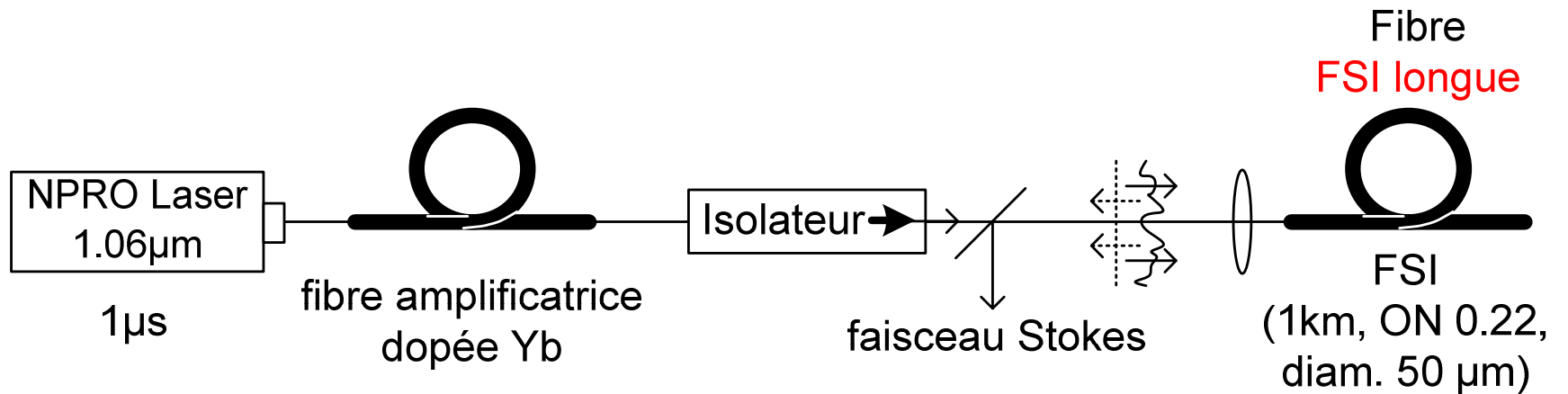


Sout\_2\_Stokes\_FGI\_foc\_65w.avi

=> Beam cleanup dans une FGI longue... mais vers **LP<sub>11</sub>**!



	Courte ( $L < 10\text{m}$ )	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase <b>OK</b>	? rien ?
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup <b>OK mais LP<sub>11</sub></b>



Rappel: Solution de l'équation  
aux valeurs propres

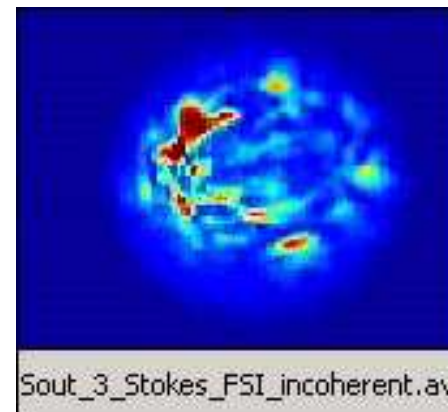
gains  
égaux

$$E_s(x, y) = e^{\frac{1}{2}\gamma^{(0)}L} e^{i\phi^{(0)}} \sum_n c_n^{s(0)} \psi_n(x, y) + e^{\frac{1}{2}\gamma^{(1)}L} e^{i\phi^{(1)}} \sum_n c_n^{s(1)} \psi_n(x, y) + \dots + e^{\frac{1}{2}\gamma^{(N)}L} e^{i\phi^{(N)}} \sum_n c_n^{s(N)} \psi_n(x, y)$$

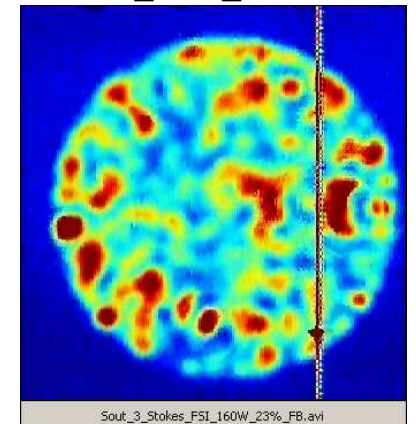
Retour faisceau Stokes  
Sans  
réflectivité parasite  
(clivage angle)

Avec  
réflectivité parasite  
(clivage droit)

Sout\_3\_Stokes\_FSI\_incoherent.avi



Sout\_3\_Stokes\_FSI\_160  
W\_23%\_FB.avi



**=> Retour incohérent dans une FSI longue sans réflexion!**



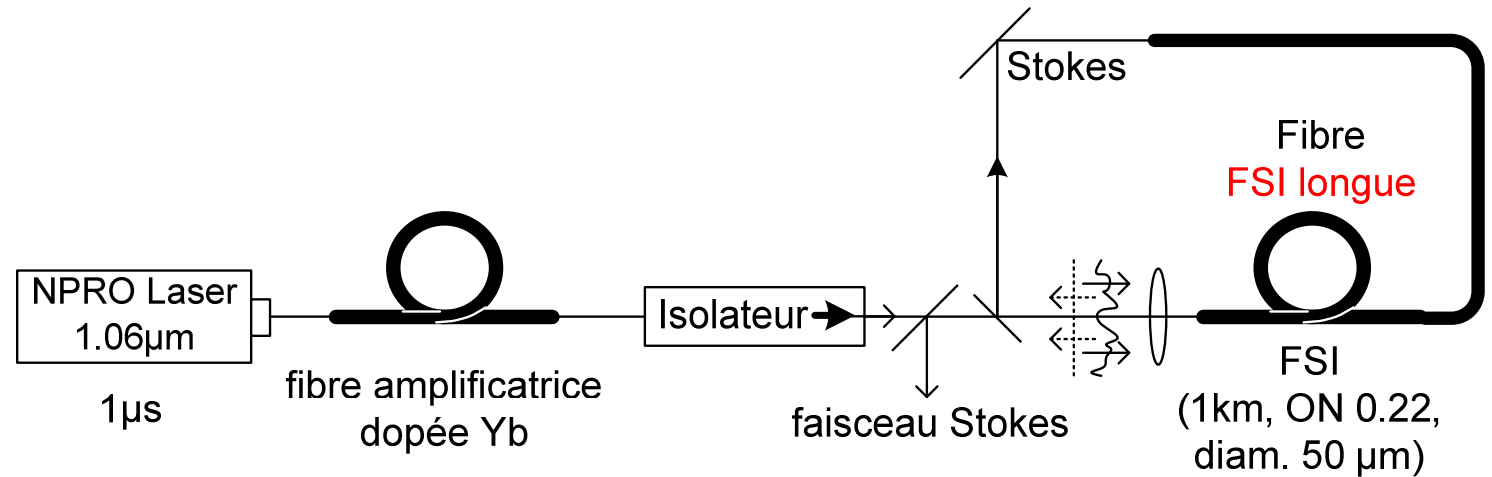
	Courte ( $L < 10\text{m}$ )	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase <b>OK</b>	rien <b>Retour incohérent</b> (sans réflexion parasite)
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	<b>Beam cleanup</b> <b>OK mais LP<sub>11</sub></b>

- Introduction
- Correction de faisceau par **beam cleanup** dans un **crystal photoréfractif**
- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibres multimode**
  - Présentation de la diffusion Brillouin stimulée (SBS)
  - 2 effets intéressants : **conjugaison de phase** et **beam cleanup**
  - Etude **théorique** de l'effet dans une fibre multimode
  - Etude **expérimentale**
    - Boucle auto-alignée
- Conclusion



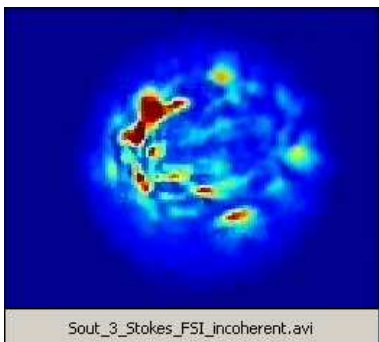
Effet de la cavité :

- Baisse du seuil
- Stabilisation du mode

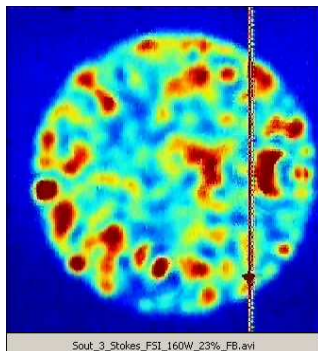


## Retour faisceau Stokes

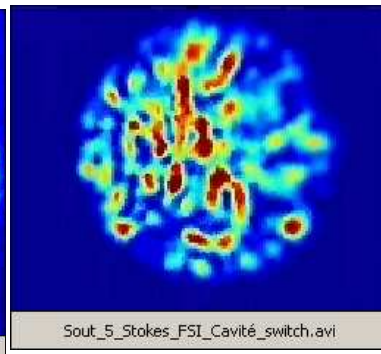
Sans  
réflectivité  
parasite



Avec  
réflectivité  
parasite



Avec  
réflectivité  
imposée

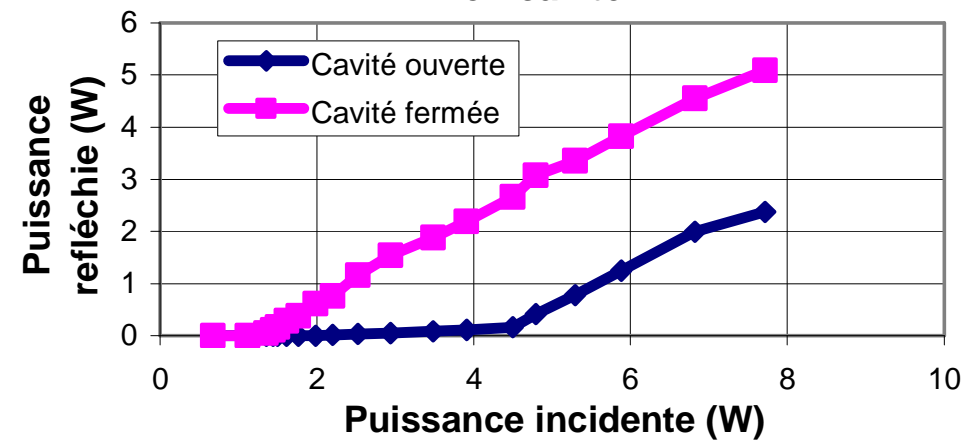


Sout\_3\_Stokes\_FSI\_incoherent.avi

Sout\_3\_Stokes\_FSI\_160W\_23%\_FB.avi

Sout\_5\_Stokes\_FSI\_Cavité\_switch.avi

## Reflectivité Brillouin d'une fibre de 1km en cavité



**=> Importance de la cavité!**



## On a vu :

- Importance de la **cavité**, baisse du seuil et stabilisation
- La fibre GI renvoie naturellement le mode  $LP_{11}$ .

## de plus :

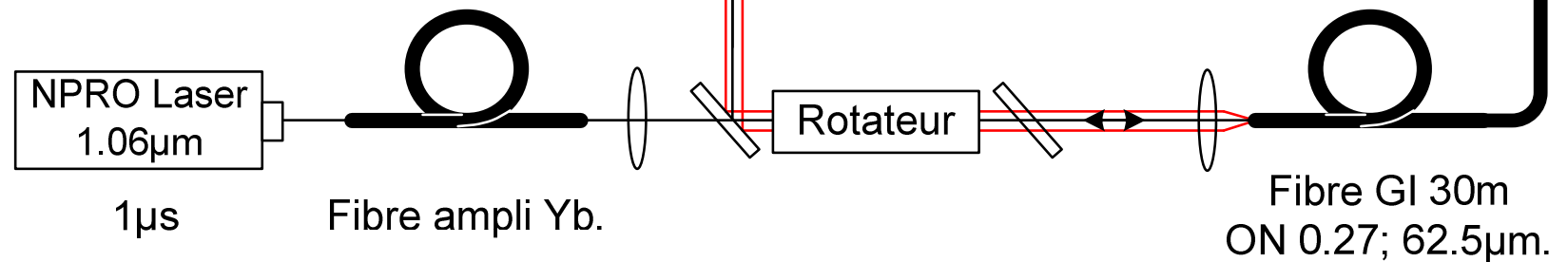
- Nous avons remarqué qu'une fibre GI de 30m peut propager le mode fondamental **sans couplage** vers les autres modes **ni dépolarisation**

## d'où l'idée suivante :

Utiliser une **FGI** de **30m** bouclée sur le mode  $LP_{01}$ .

La **baisse de seuil** du mode  $LP_{01}$  **force** le retour sur le mode  $LP_{01}$

=> **beam cleanup**

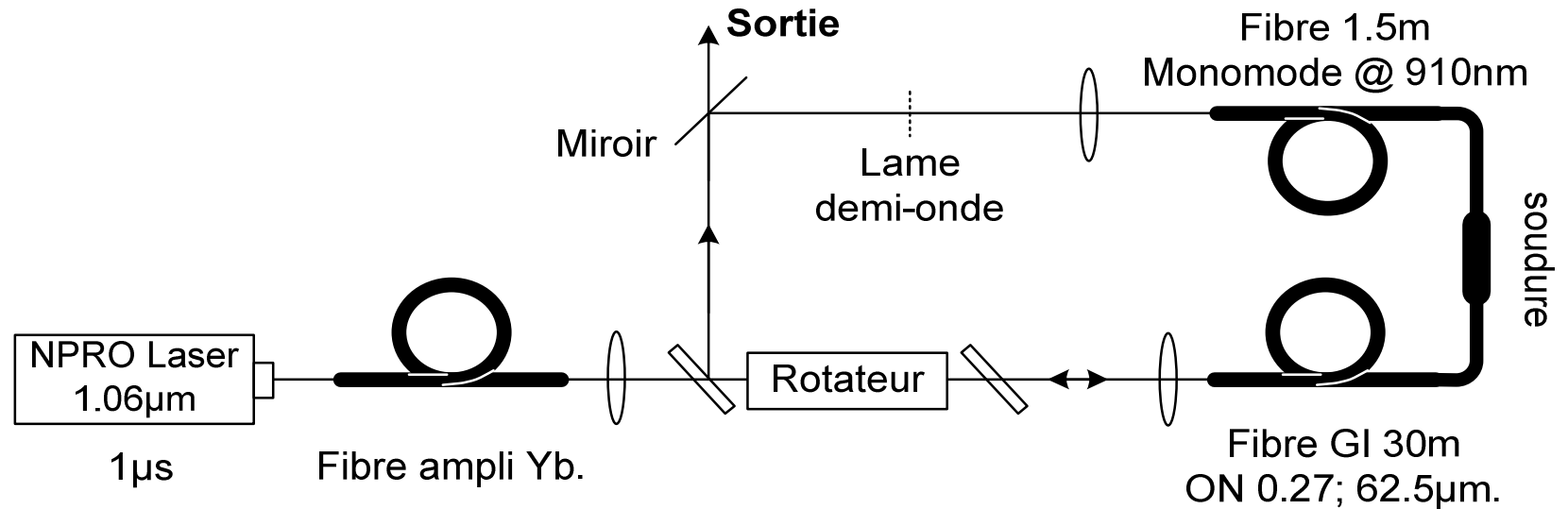


**Difficulté: alignement très sensible.**

**Comment injecter le mode fondamental sans injecter les autres modes?**



Solution: Une **fibre monomode** est **soudée** à l'extrémité de la **fibre multimode** => **alignement parfait des coeurs**

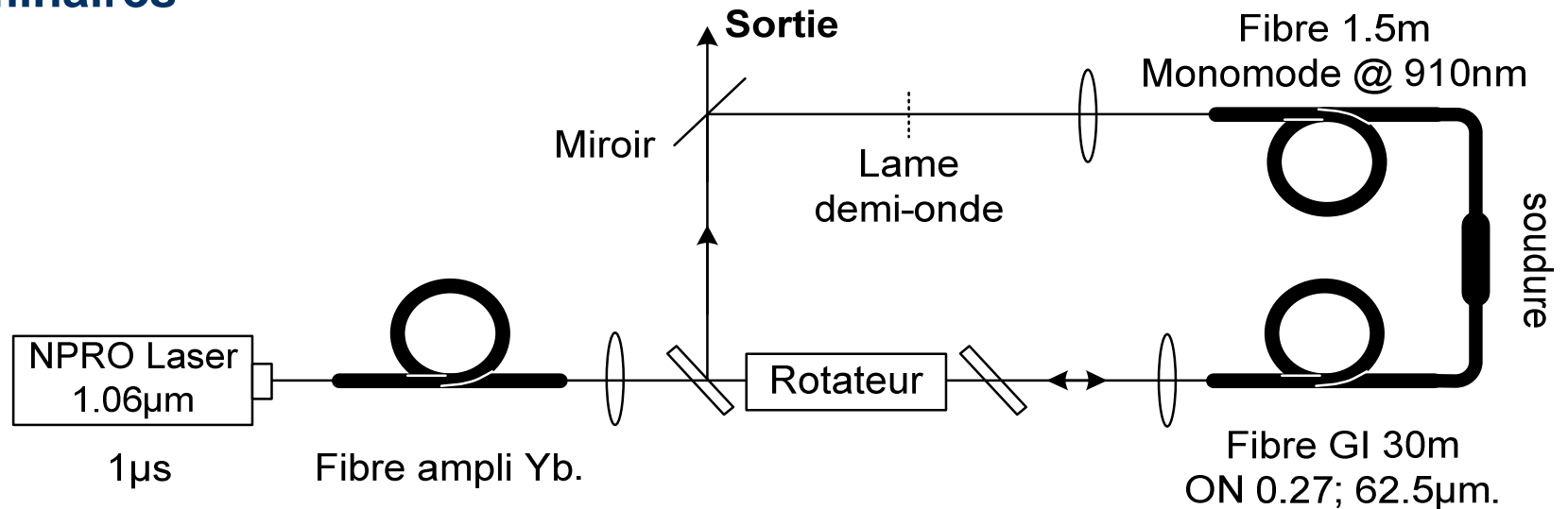


filtre = fibre monomode:

- Le mode **LP<sub>01</sub>** se propage dans la fibre monomode puis est couplée dans le **mode fondamental** (et les modes symétriques supérieurs) de la FGI
- Les **autres modes** (dont LP<sub>11</sub>) ne se **propagent pas** dans la fibre monomode.



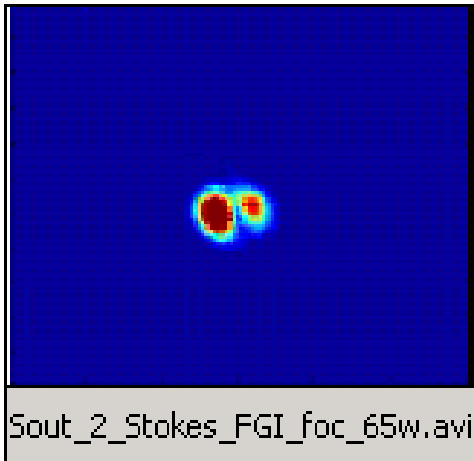
## Résultats préliminaires



### Stabilité

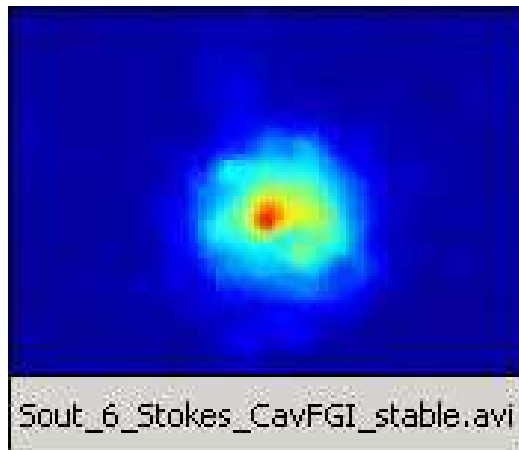
Sans cavité

Sout\_2\_Stokes\_FGI\_foc\_65w.avi

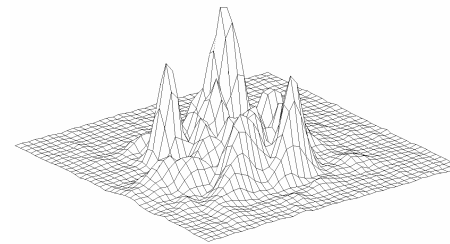


Avec la cavité

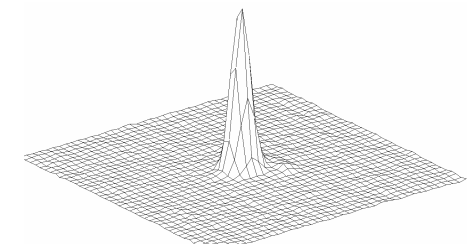
Sout\_6\_Stokes\_CavFGI\_stable.avi



### Qualité de faisceau



Entrée:  
 $M^2=6.5$   
 puissance crête  
 150W



Sortie Stokes:  
 $M^2=1.3$   
 puissance crête 45W  
 (réflectivité intracavité  
 31%)

- Introduction
- Correction de faisceau par **beam cleanup** dans un **cristal photoréfractif**
- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibre multimode**
- Conclusion



## Amplificateur multimode

- Réalisation de l'**amplificateur à fibre multimode**, obtention de puissances maximales de **100W CW**, gestion des **problèmes thermiques**

## Réalisation du **beam cleanup** par mélange à deux ondes dans un **crystal photoréfractif**:

- **Boucle de rétroaction** pour compensation active du piston de phase
- Schéma de **mélange à deux ondes auto-référencé** (**78%** efficacité photoréfractif à une puissance de 15W)

## Réalisation du **beam cleanup** par **SBS** dans une fibre multimode

- **Etude théorique détaillée** de la diffusion Brillouin dans une fibre. Identification des conditions de conjugaison de phase et de beam cleanup.
- **Etude expérimentale détaillée**, confirmation des résultats théoriques
- Schéma de la **boucle de cleanup auto-alignée** dans la FGI

## Beam cleanup dans un cristal photoréfractif, perspectives pour une montée en puissance:

- Diamètre de faisceau plus importante (ici 2 mm soit 350 W/cm<sup>2</sup>)
- Autres matériaux photoréfractifs (Co:BaTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>)

## Beam cleanup par effet Brillouin:

- Extraction de la puissance Stokes
- Recyclage de la polarisation
- Vers une boucle « tout fibré » en continu

## Extension à des puissances / énergies plus importantes:

- Fibres à très gros cœurs (diamètres >100μm)
- Amplification distribuée (mise en phase cohérente)

**Merci à tous** 