

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**

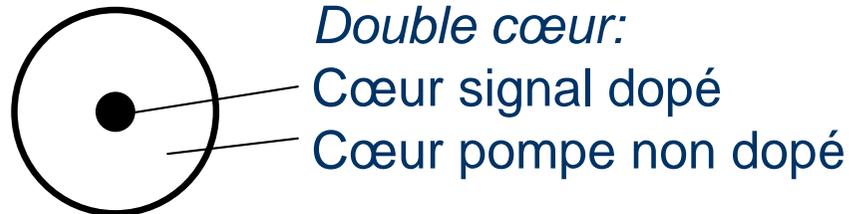
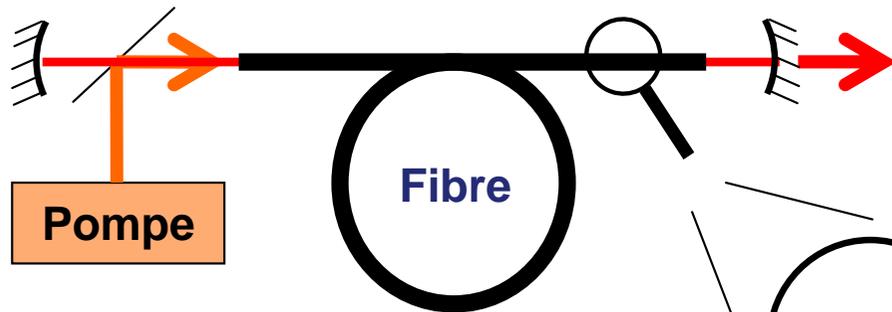
- Correction de faisceau par **beam cleanup** par **diffusion Brillouin stimulée (SBS)** dans une **fibre multimode**

- Conclusion et perspectives

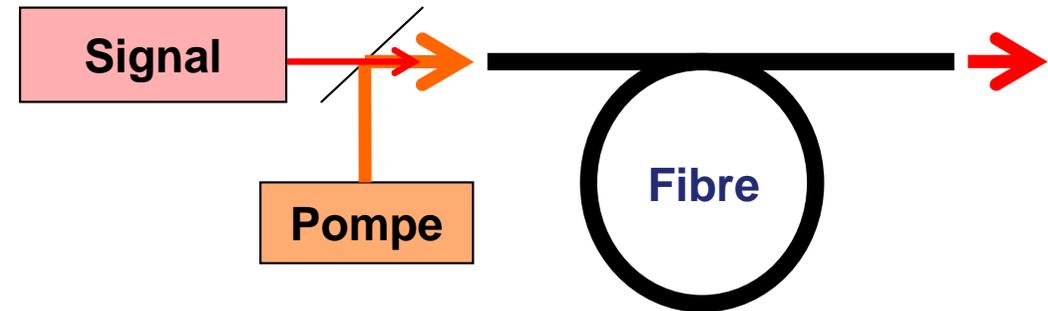


Architectures de sources fibrées

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)

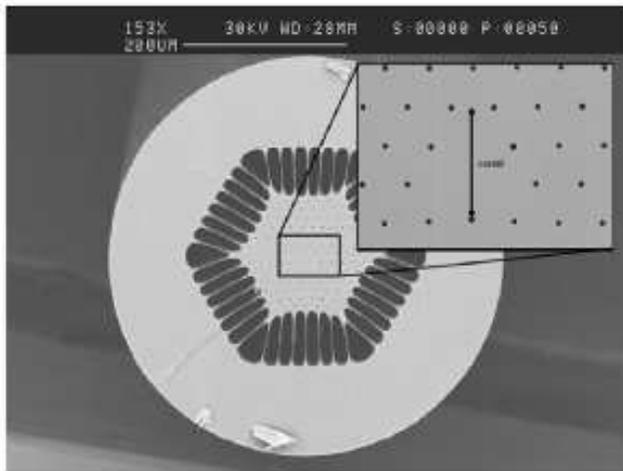
Plus de **puissance**
ou **énergie**

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

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

Solution classique:

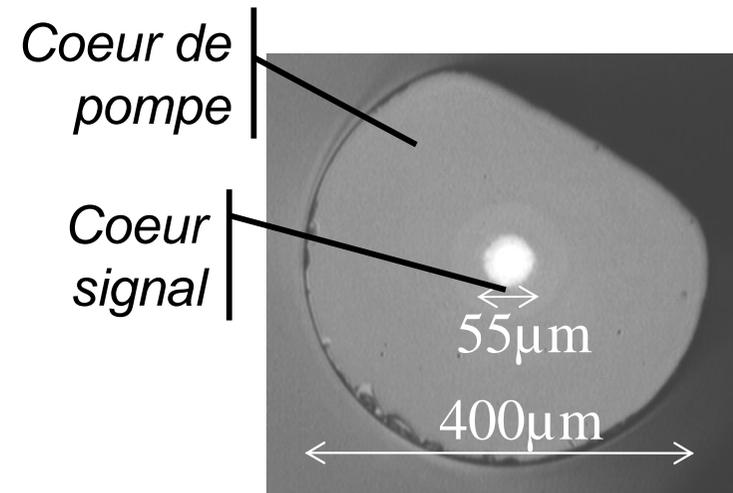
Fibres
grand cœur (Large Mode Area, 30 μm)
quasi monomodes (ON 0.06)



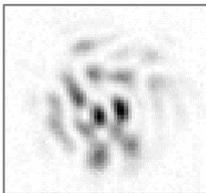
Air-clad LMA

Solution originale:

Fibres
très grand cœur (ON 0.2, >50 μm)
très multimodes ($M^2 > 10$)



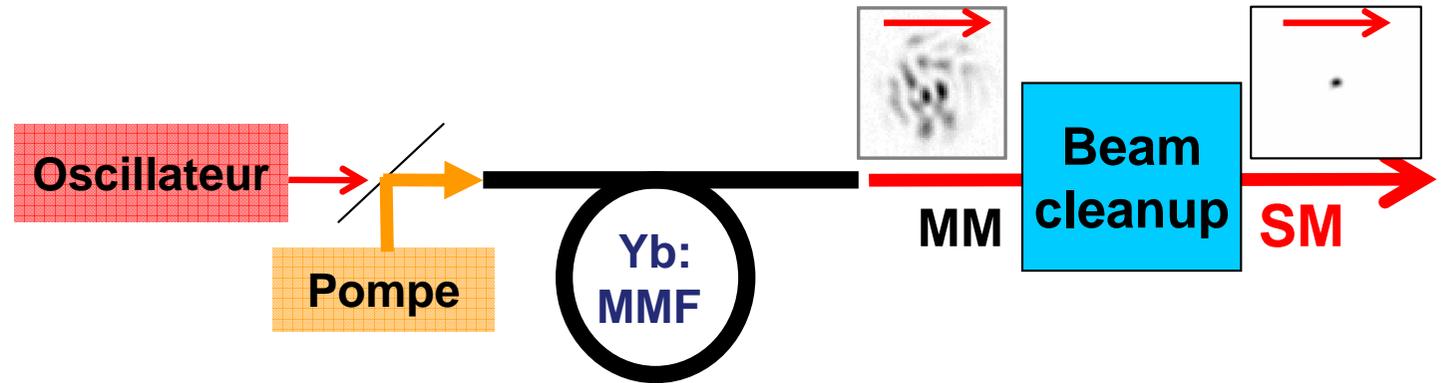
Très hautes puissances/énergies
Qualité de faisceau dégradée $M^2 \gg 1$
=> **Ajout d'un système de remise en forme**



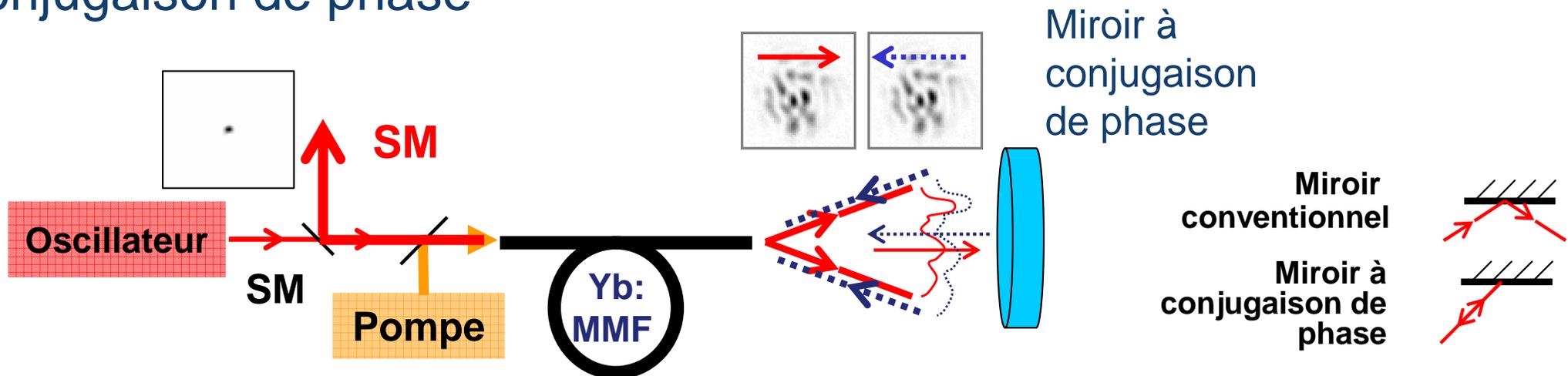
Remise en forme non linéaire après un amplificateur à fibre multimode de haute puissance

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

Beam Cleanup



Conjugaison de phase





Fibre multimode dopée Yb,
55 μm diam. coeur, ON 0.2
pompée par diode (300W@940nm)

entrée:

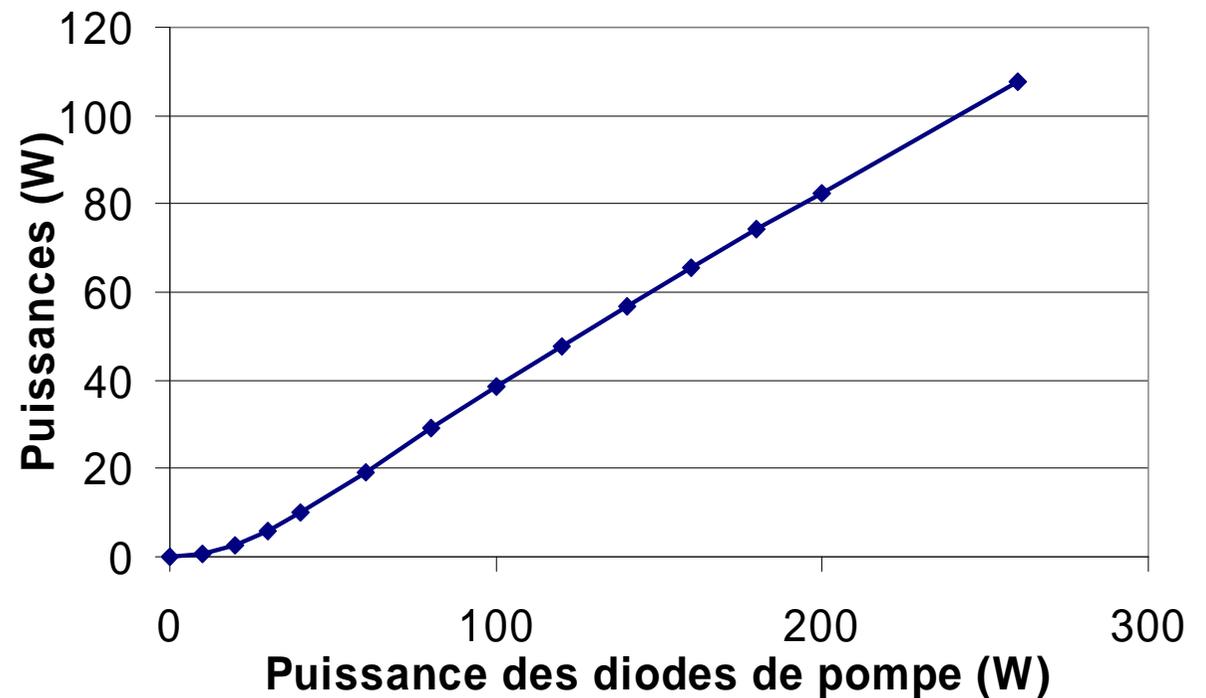
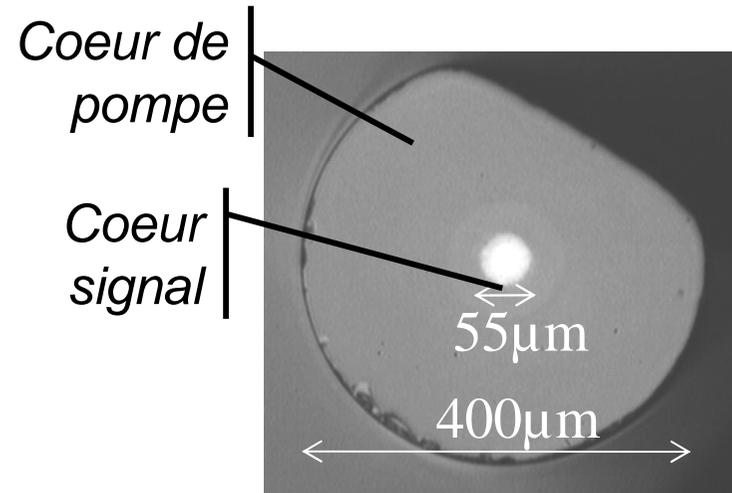
laser monomode, 0.1 W

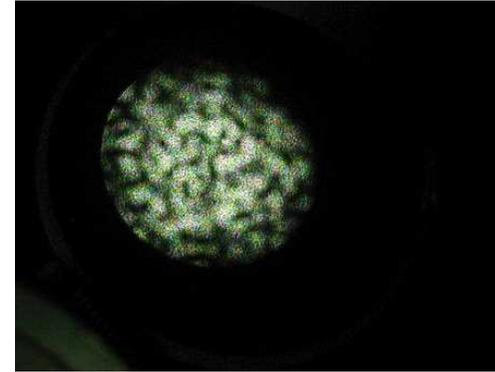
sortie:

~ 18 W @ 60 W (pompe)

~ 100 W @ 300 W (pompe)

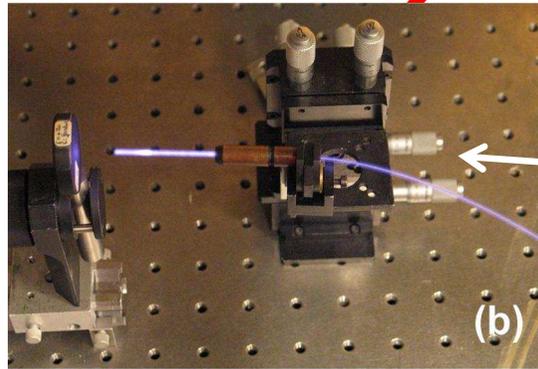
très multimode ($M^2 \sim 10$)



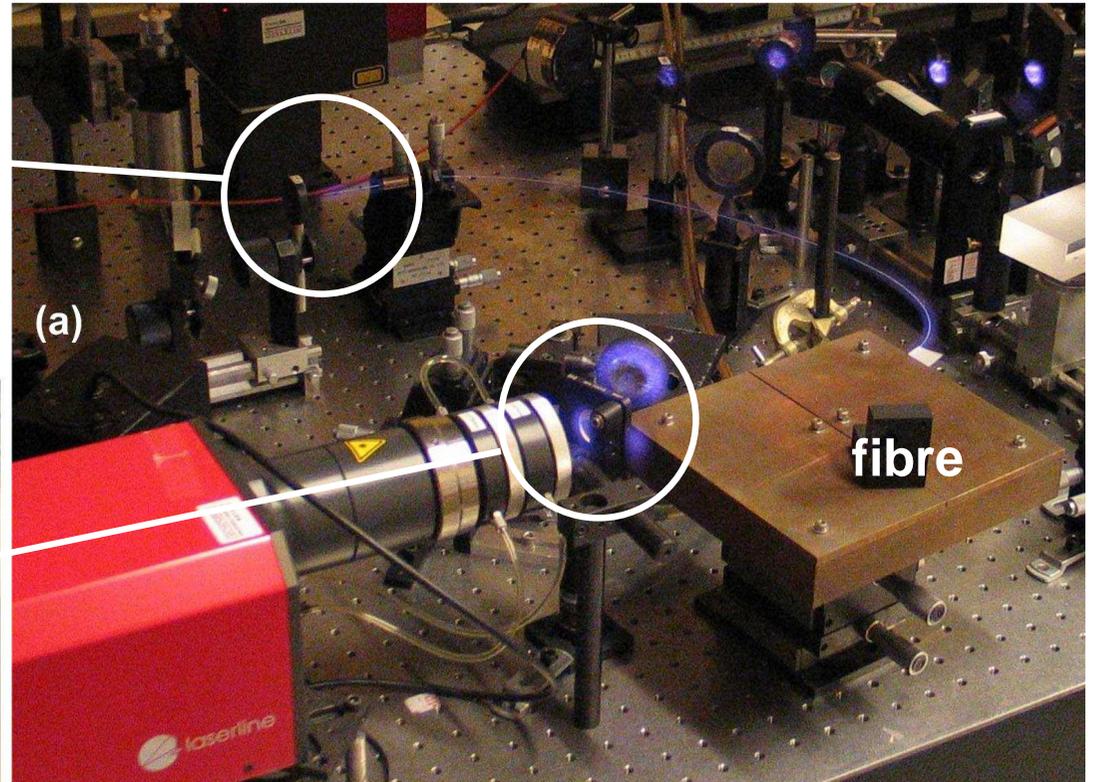


Faisceau
amplifié

Oscillateur



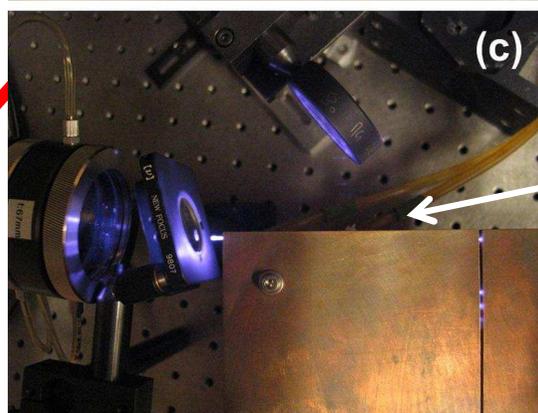
(b)



(a)

fibre

Pompe



(c)

- Introduction

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

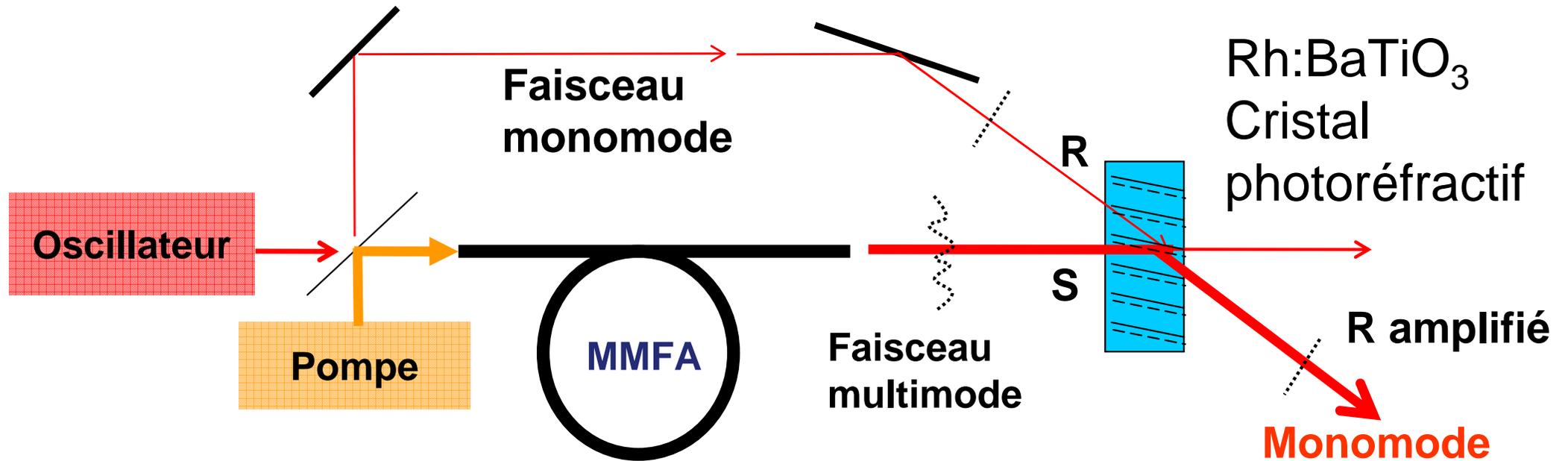
- Principes du beam cleanup par mélange à deux ondes
- Beam cleanup avec compensation des fluctuations de phase
- Beam cleanup auto-référencé
- Résultats expérimentaux

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

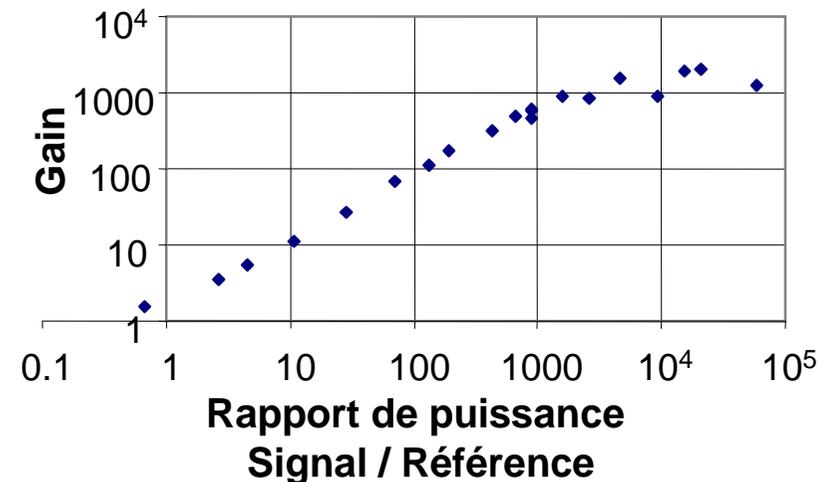
- Conclusion

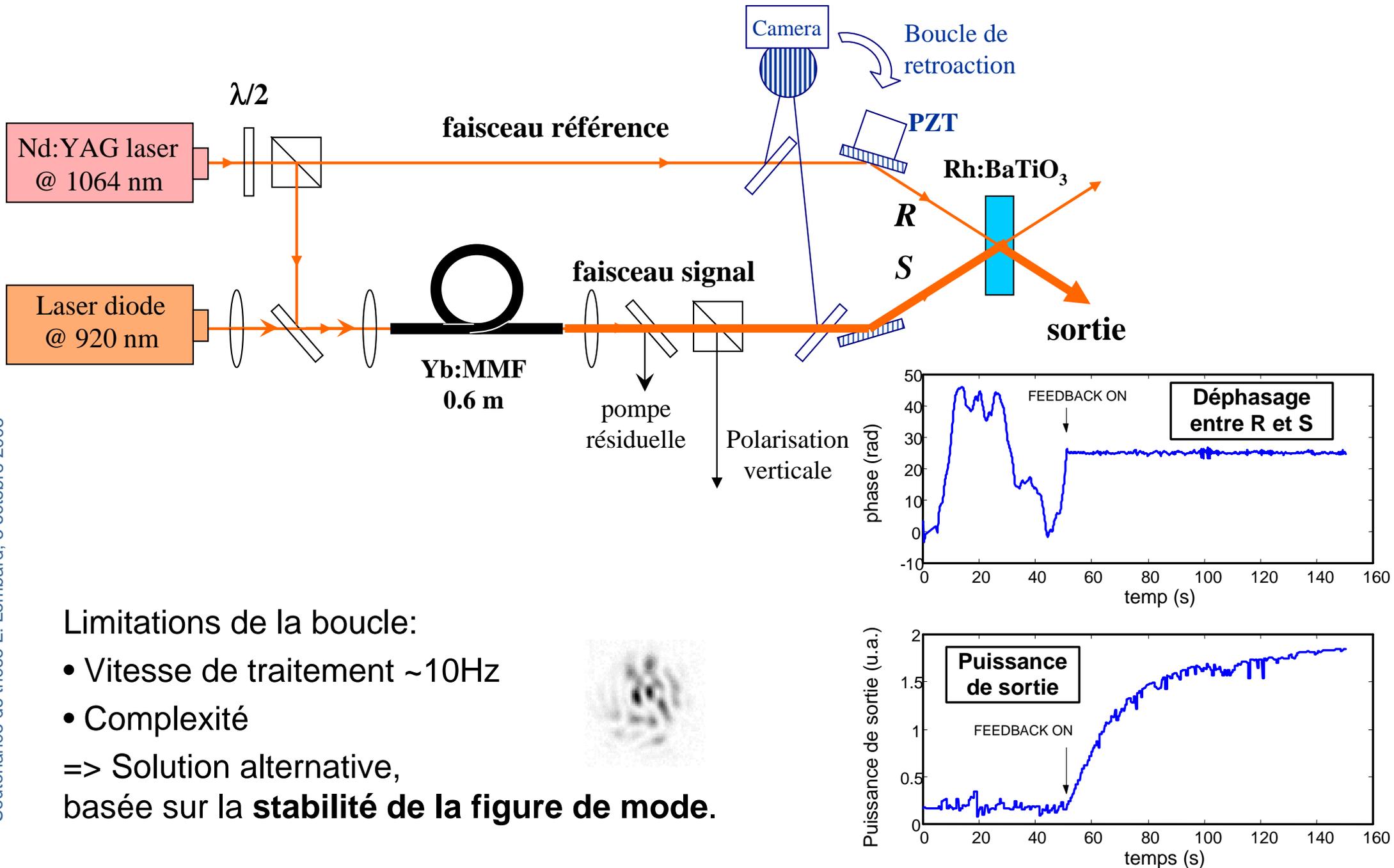


Beam cleanup par mélange à deux ondes dans un cristal photoréfractif



- 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



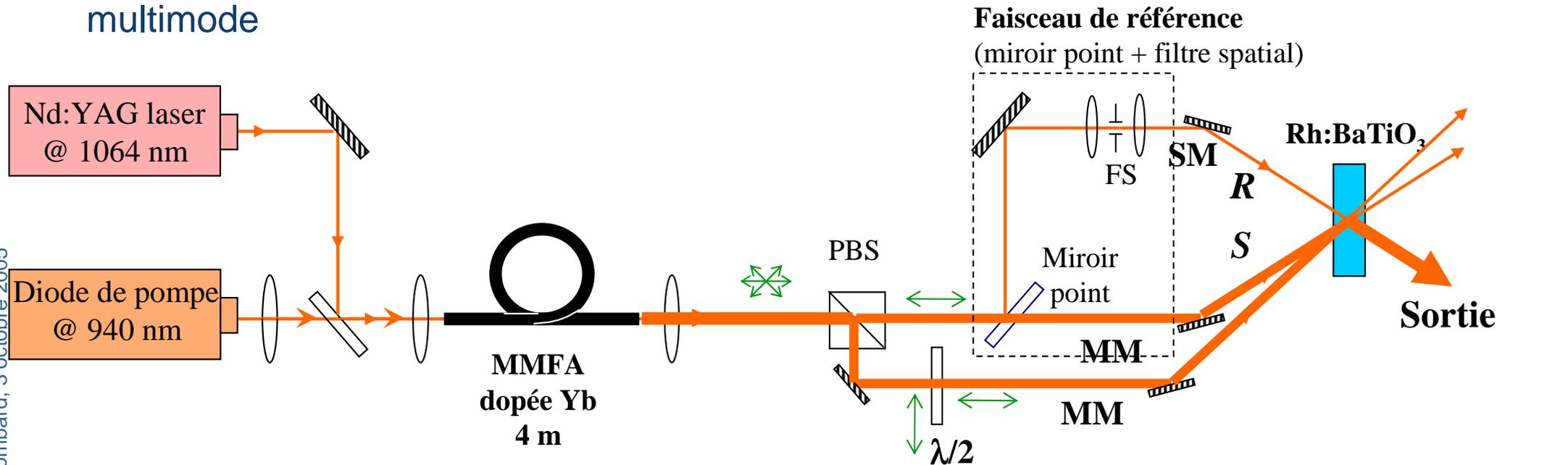




- **Mélange à deux ondes auto-référencé**
(indépendant des fluctuations de phase)
- **Recyclage de la polarisation:**
indépendant de la dépolarisation dans la fibre multimode

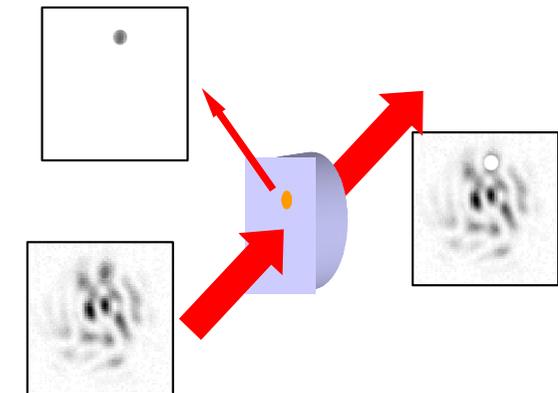
Recyclage de la polarisation

- dépolarisé
- Polarisation horizontale
- Polarisation verticale



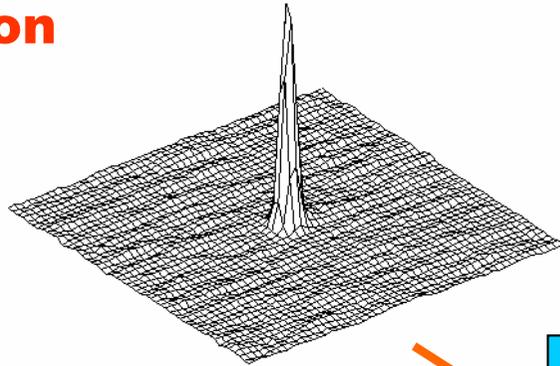
L'efficacité totale est limitée ($M^2=10$) à :

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

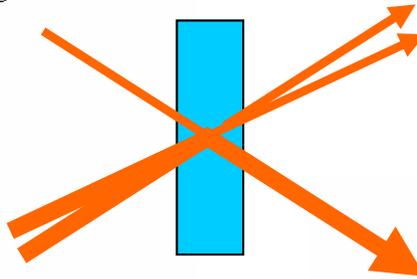
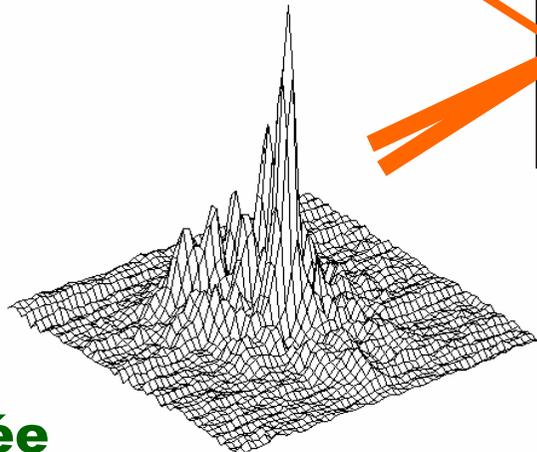


Référence, puiss. 0.1W

$M^2 = 1.0$
Polarisation
linéaire

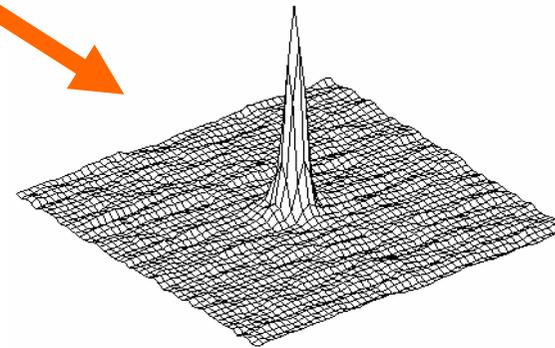


Signal
 S_{\perp} (8.3 W)
 S_{\parallel} (6.6 W)
 $M^2 = 7.4$
Dépolarisée

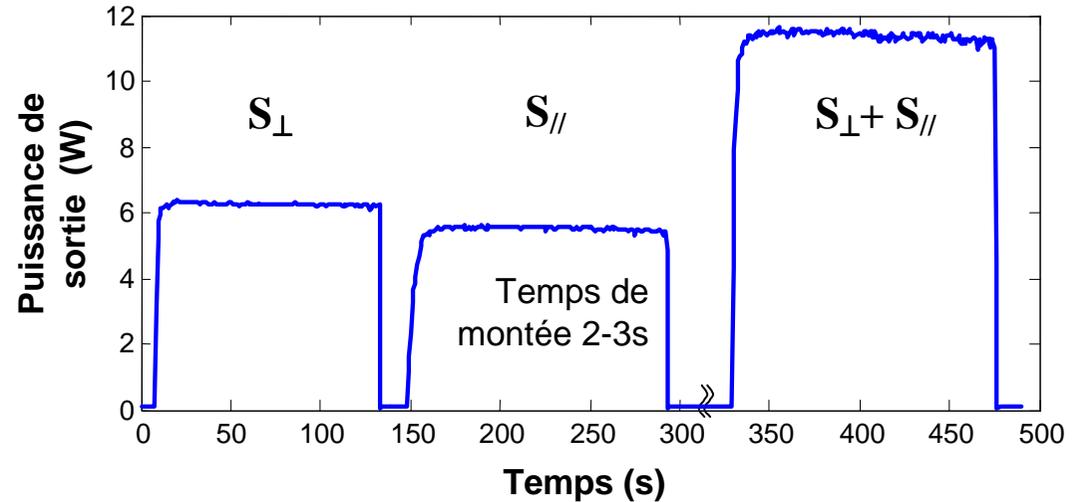


2.7 W

Référence amplifiée,
 puiss. **11.6 W**
 $M^2 = 1.2$
Polarisation
linéaire

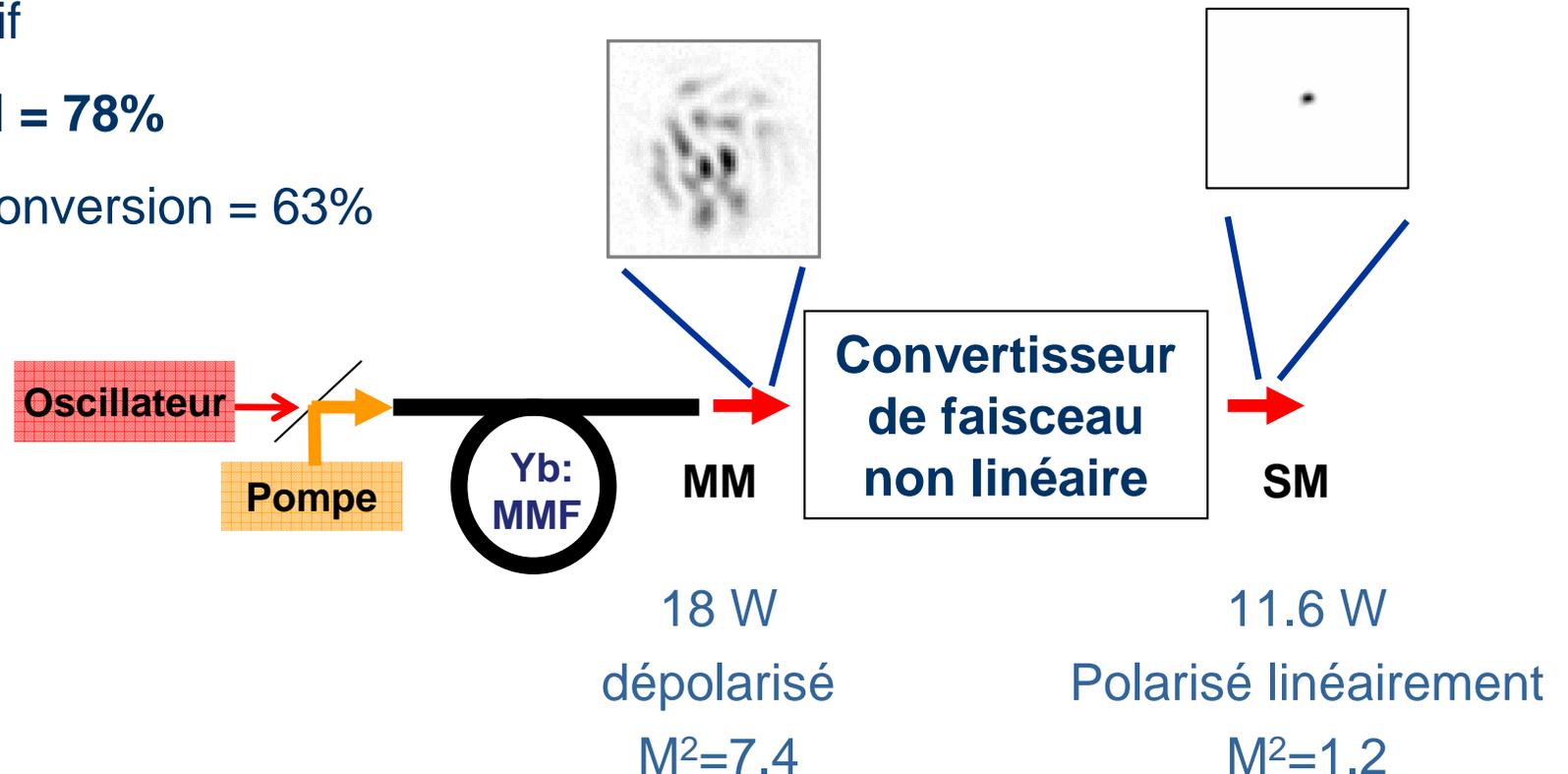


Puissance de sortie vs temps



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

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



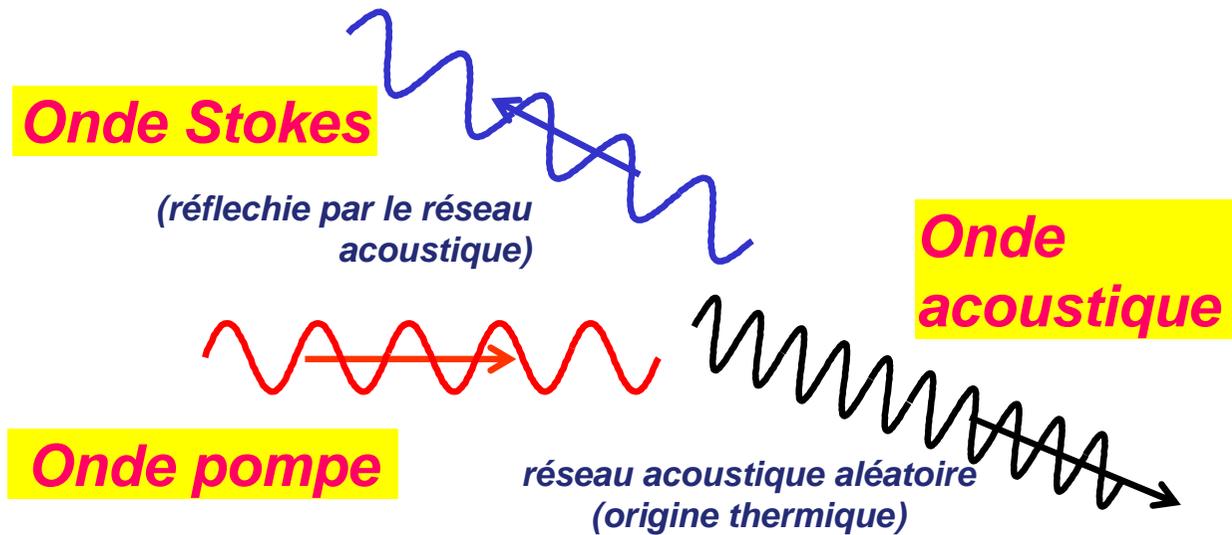
- **Limitation** : inversion de domaines ferro-électriques à **forte puissance**
- Perspectives pour une montée en puissance
 - Diamètre de faisceau plus importante (ici 2 mm soit 350 W/cm^2)
 - Autres matériaux photoréfractifs (Co:BaTiO_3 , LiNbO_3)

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

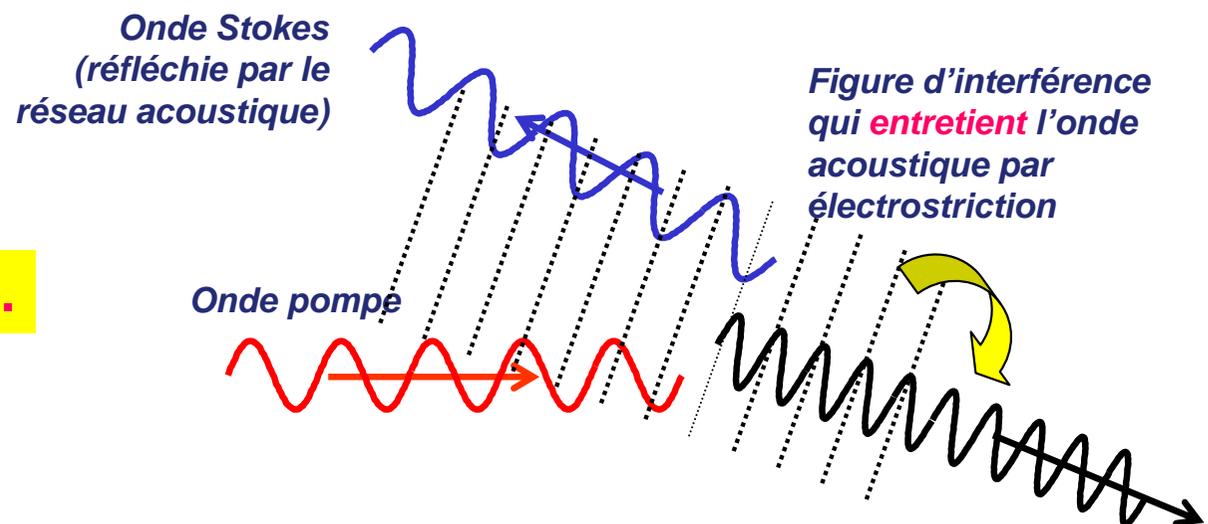
Décalage brillouin:

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



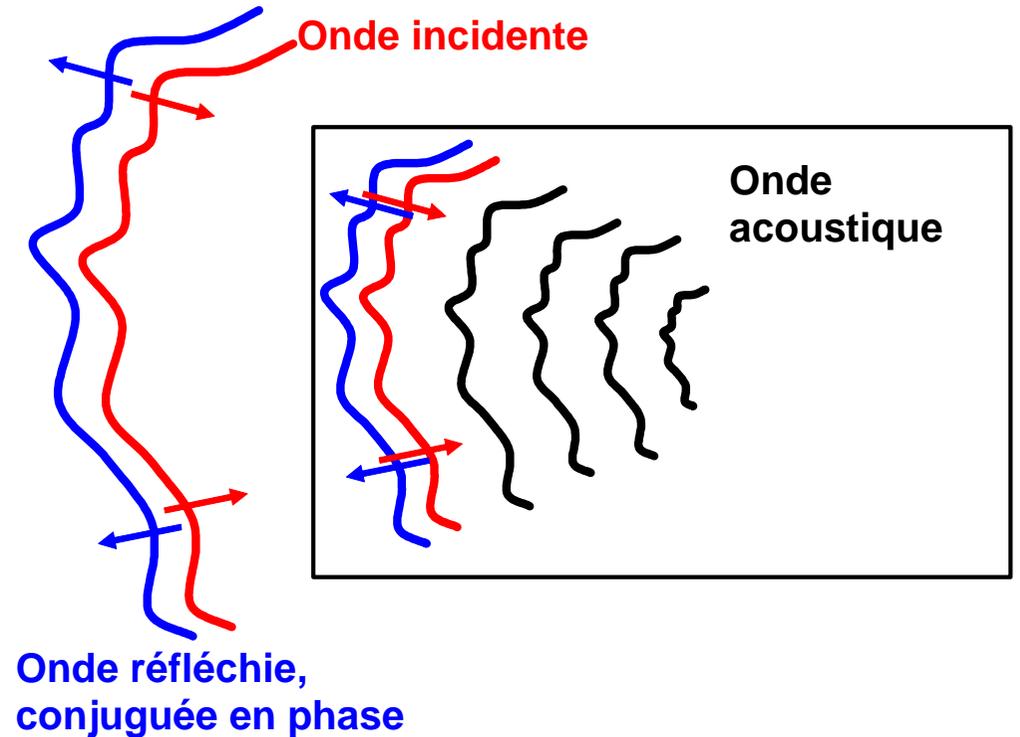
- Diffusion Brillouin stimulée
SBS, Stimulated Brillouin Scattering

l'effet est auto-alimenté.

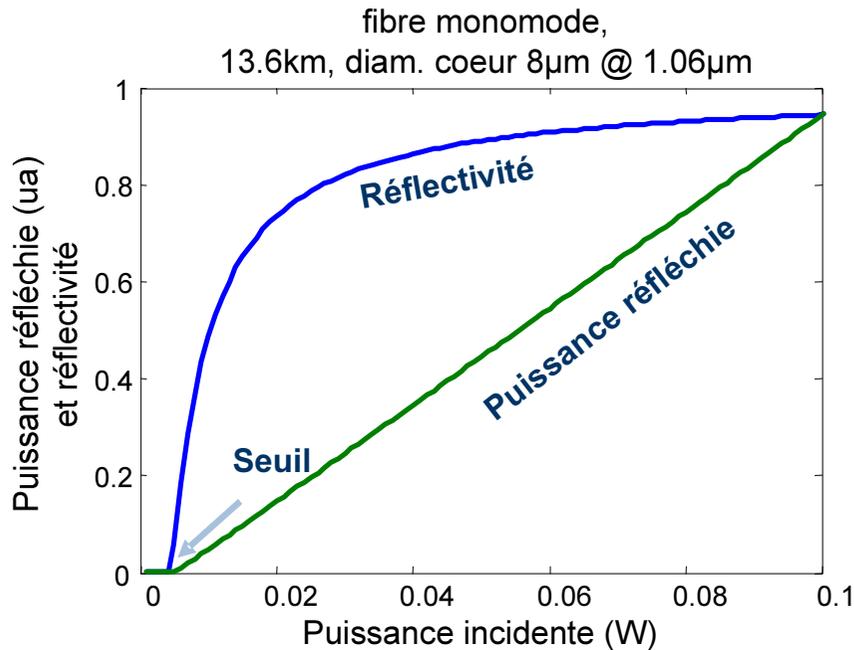
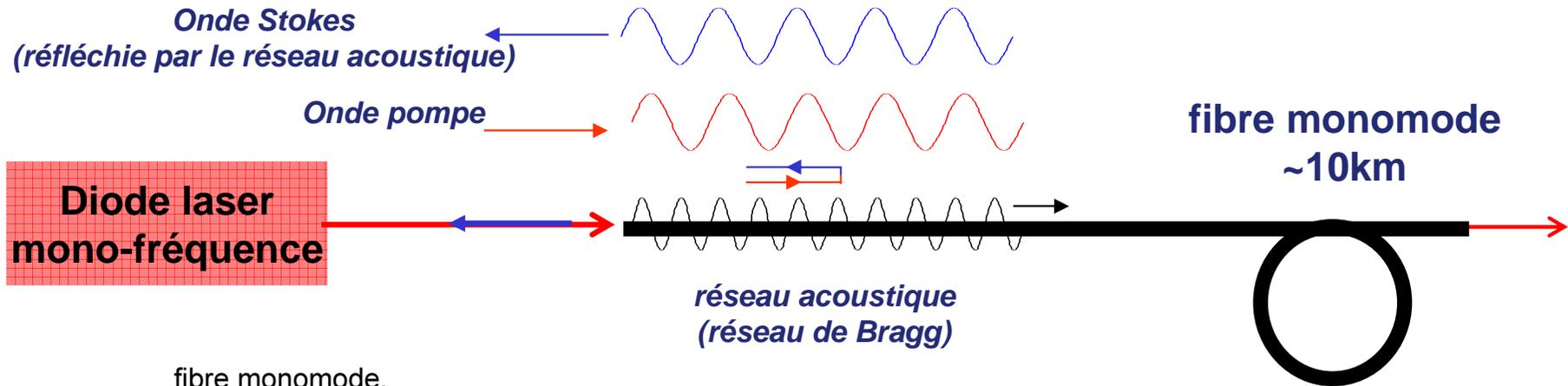




Dans les matériaux massifs,
la **diffusion Brillouin**
se traduit par un effet
de **conjugaison de phase**



-> 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

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

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

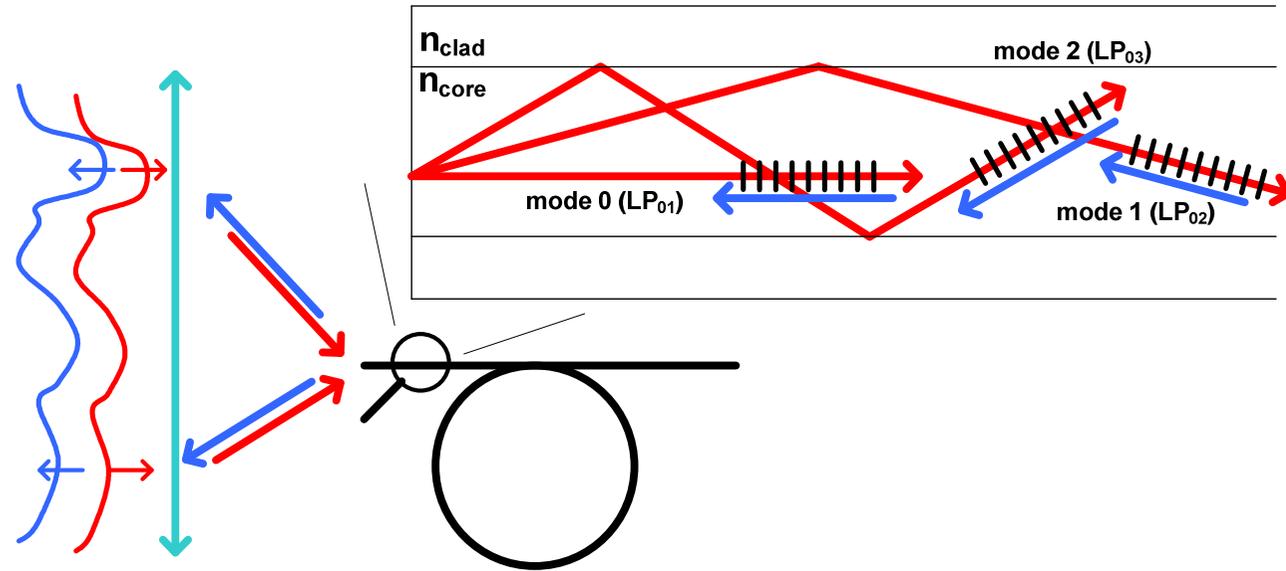
Gain linéaire Brillouin

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

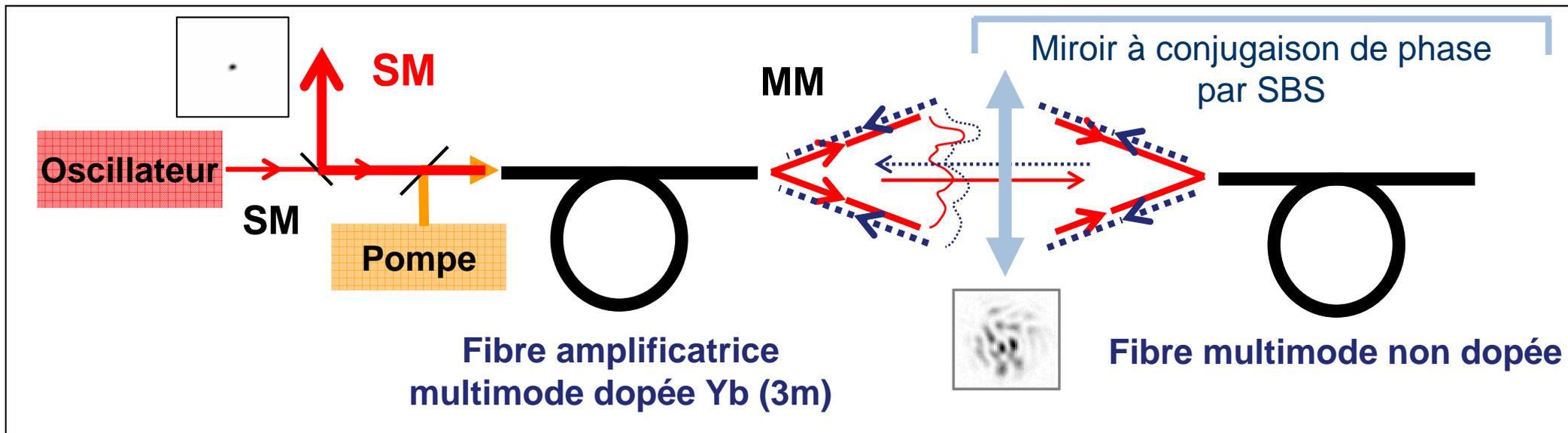


Les réseaux Brillouin sont alignés avec tous les modes de la fibre.

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



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

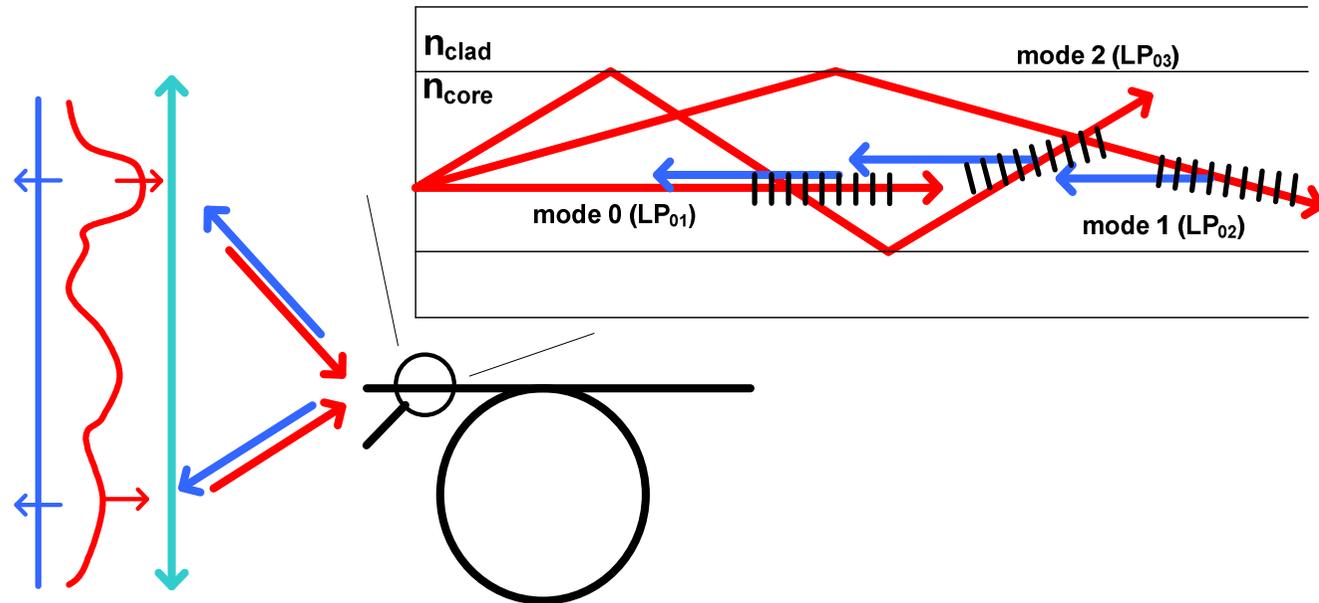




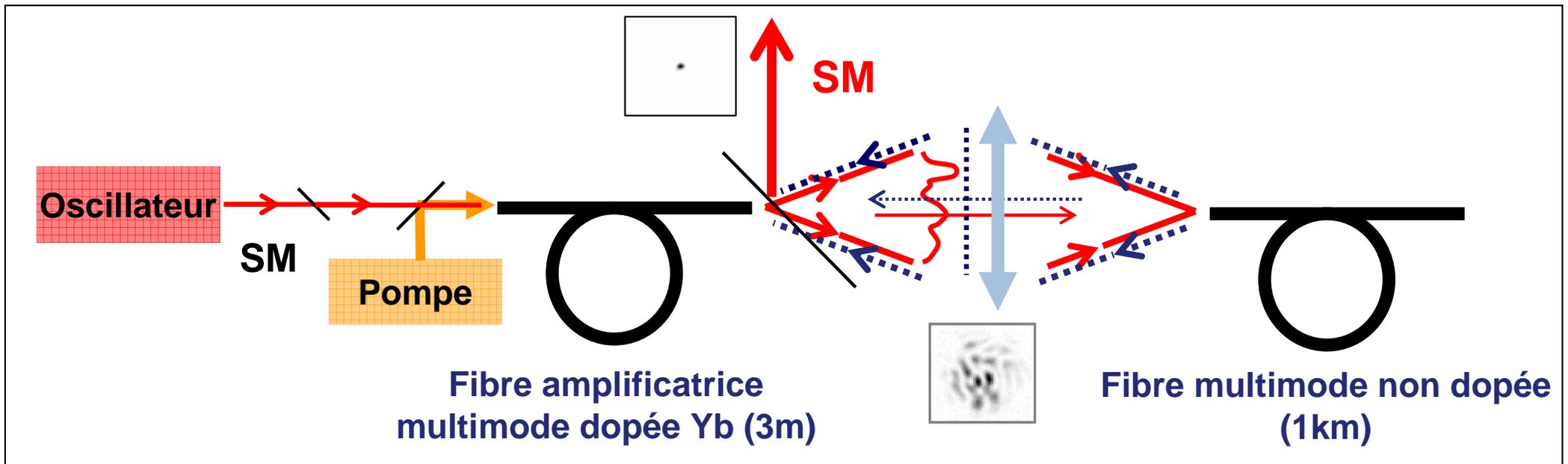
Les réseaux Brillouin réfléchissent tous les modes de fibre vers le mode fondamental de la fibre

=> 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 **fibre 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:

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

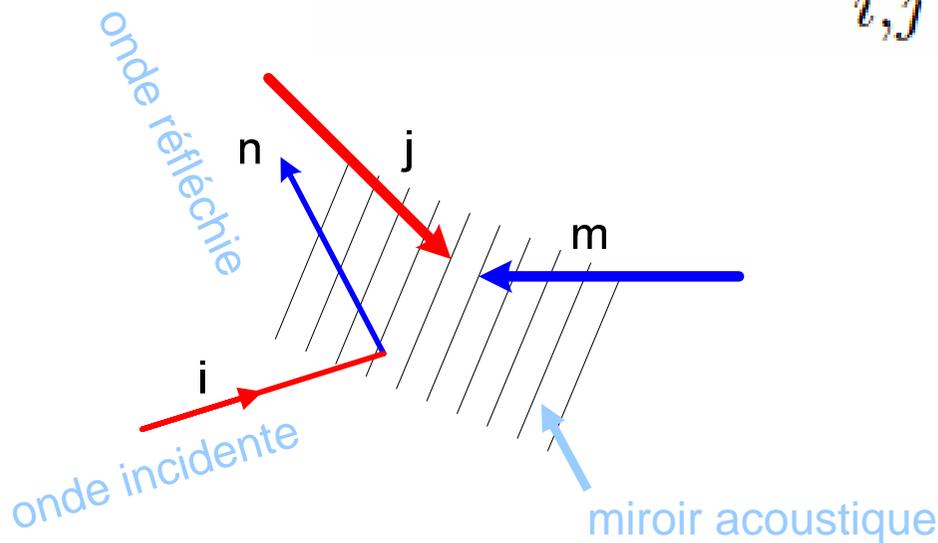
Intensité Stokes:

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

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



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



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**?



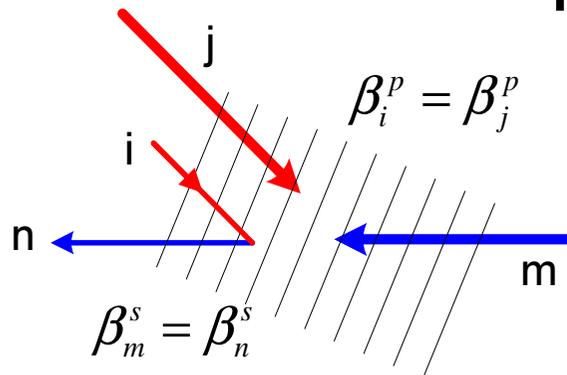
Facteur
d'accord de phase

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

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

$$0 < L < \infty$$



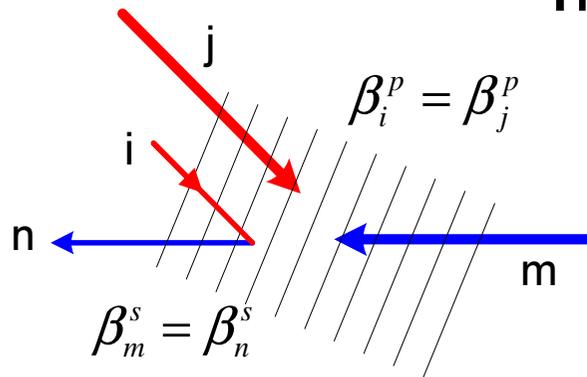
Facteur
d'accord de phase

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

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

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

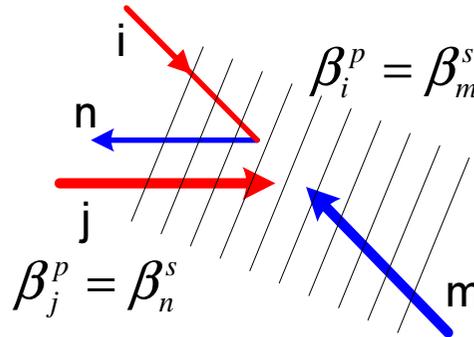
Trois catégories de termes dans M



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

$$i = j, m = n$$

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



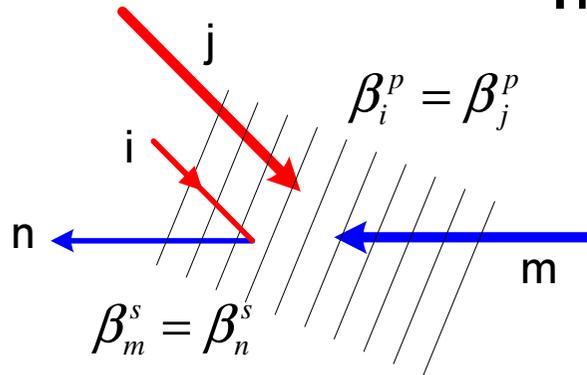
Facteur
d'accord de phase

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

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

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

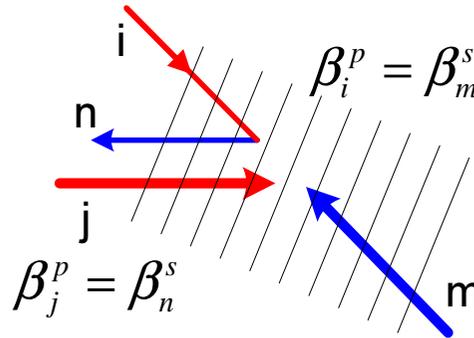
Trois catégories de termes dans M



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

$$i = j, m = n$$

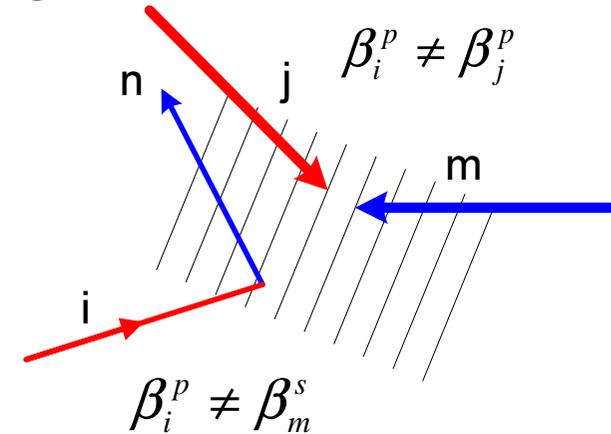
Termes Cohérents,
angle « parfait »



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

$$i = m, j = n$$

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



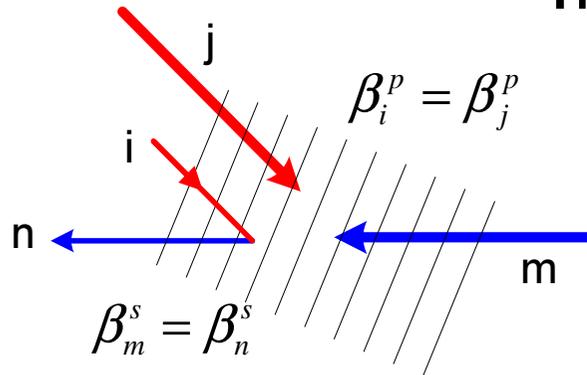
Facteur
d'accord de phase

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

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

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

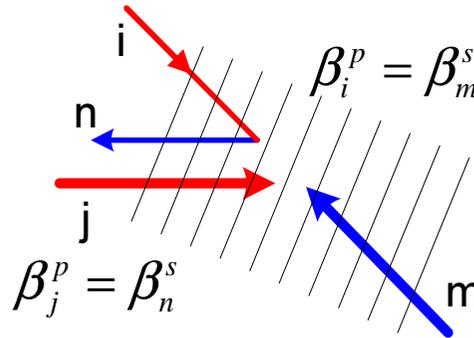
Trois catégories de termes dans M



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

$$i = j, m = n$$

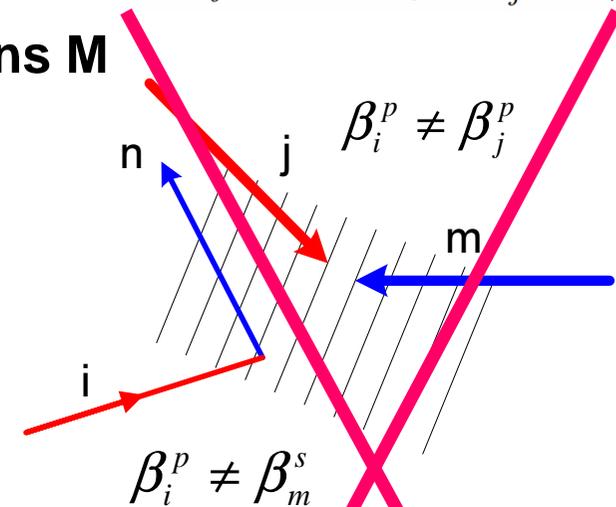
Termes Cohérents,
angle « parfait »



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

$$i = m, j = n$$

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)

$$M = TC$$

$$0 < L < \infty$$

$$+ TPC$$

$$0 < L < 10m$$

$$+ TNC$$

$$0 < L < 1mm$$

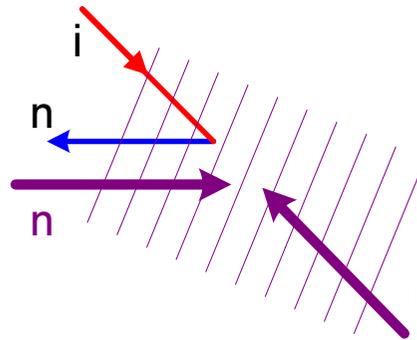
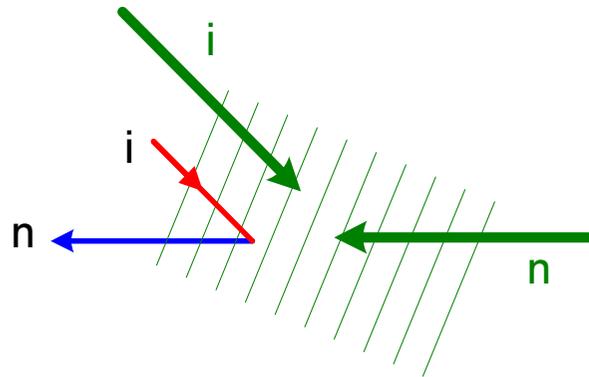
Deux régimes de longueur



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

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

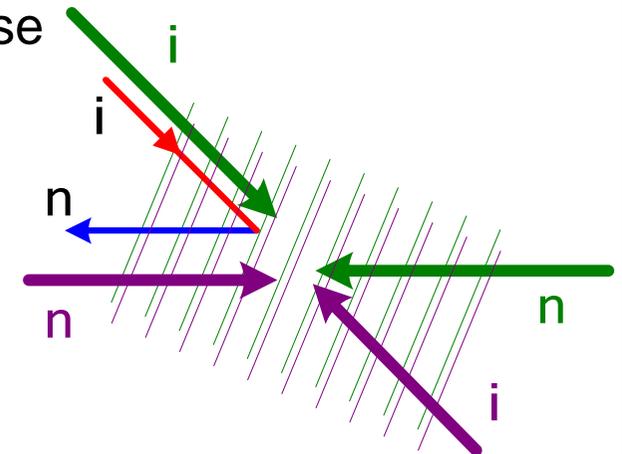
M = TC + TPC



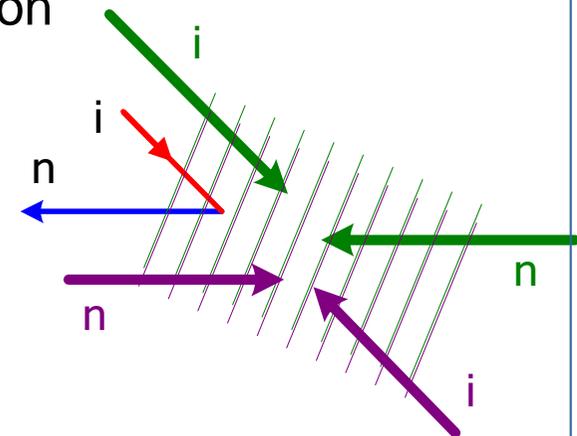
Matrice TC
pratiquement diagonale,
n'impose pas
de vecteur propre.

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

Pas de relation
de phase



Relation de
conjugaison



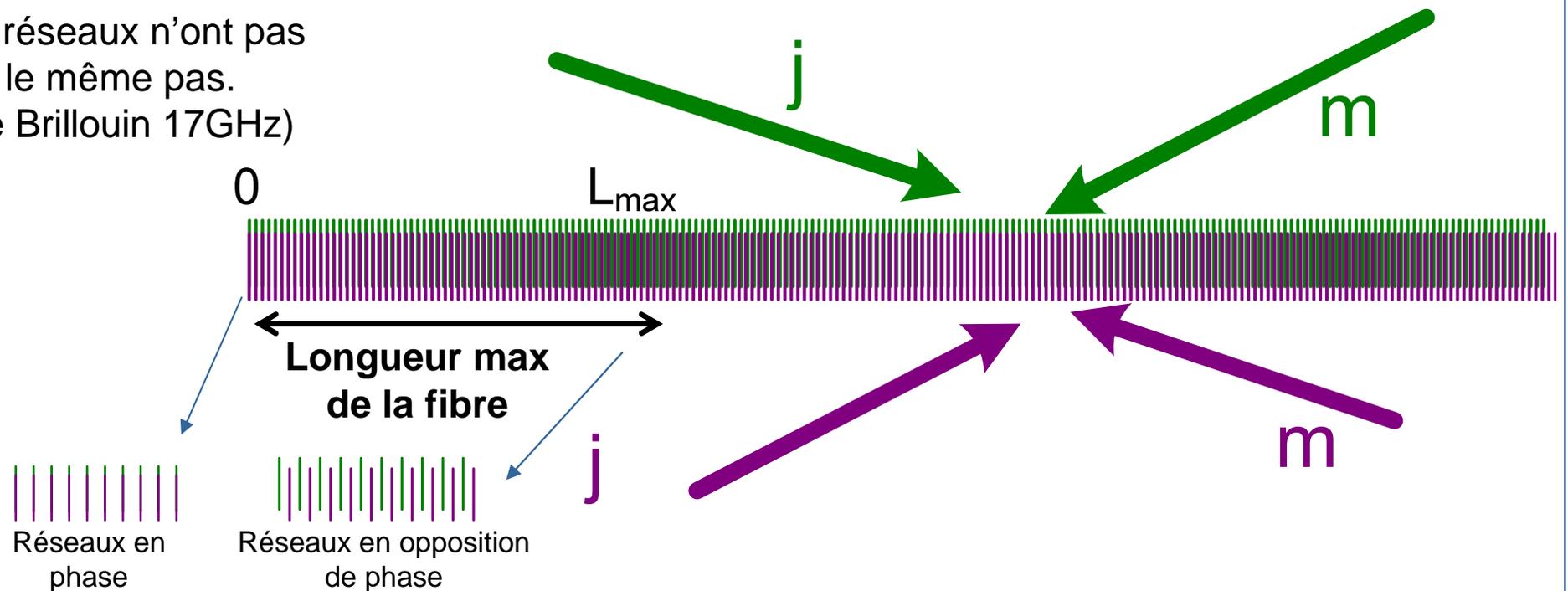


Dans une fibre longue, les termes presque cohérents TPC disparaissent

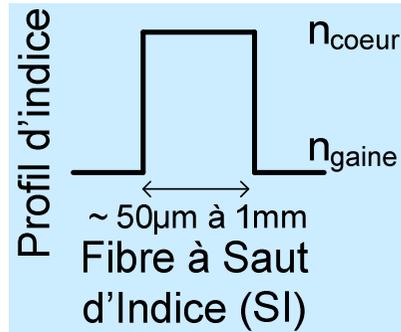
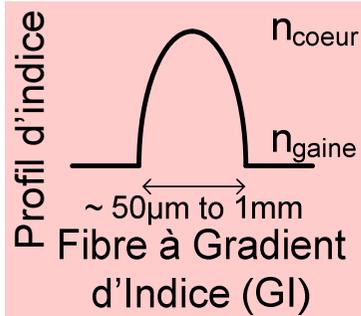
$$M = TC + \cancel{TPC}$$

Explication:

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



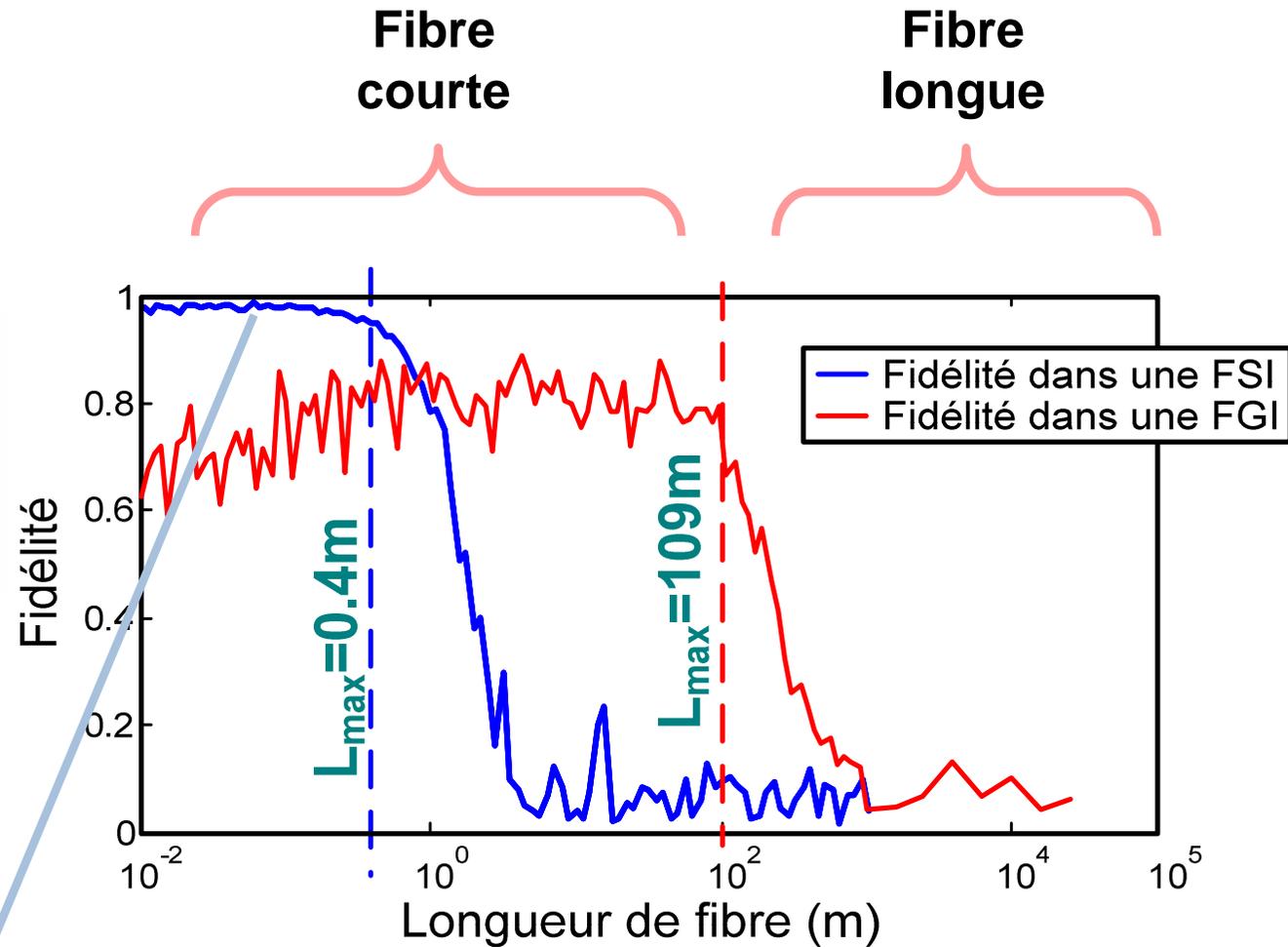
Il y a une **longueur maximale** L_{max} au delà de laquelle il n'y a **plus de superposition** des réseaux (le conjugué n'est plus favorisé)



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

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

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



fibre SI courte
longueur < 1 à 10m



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,
 $R_{in} = R_{iinn} = R_{inin}$

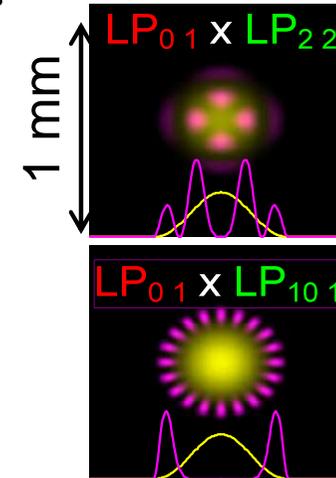
C'est le **produit**
des **figures d'intensité**
des modes de fibre **i** et **n**

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

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

Sinon, le réseau est inefficace.

FSI, 50 μ m, ON 0.22

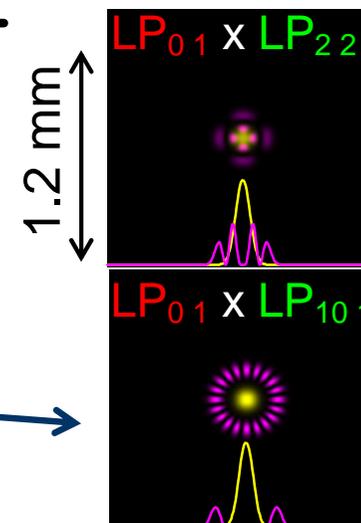


Facteurs de
recouvrement R_{iinn}

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

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

FGI 62.5 μ m, ON 0.27

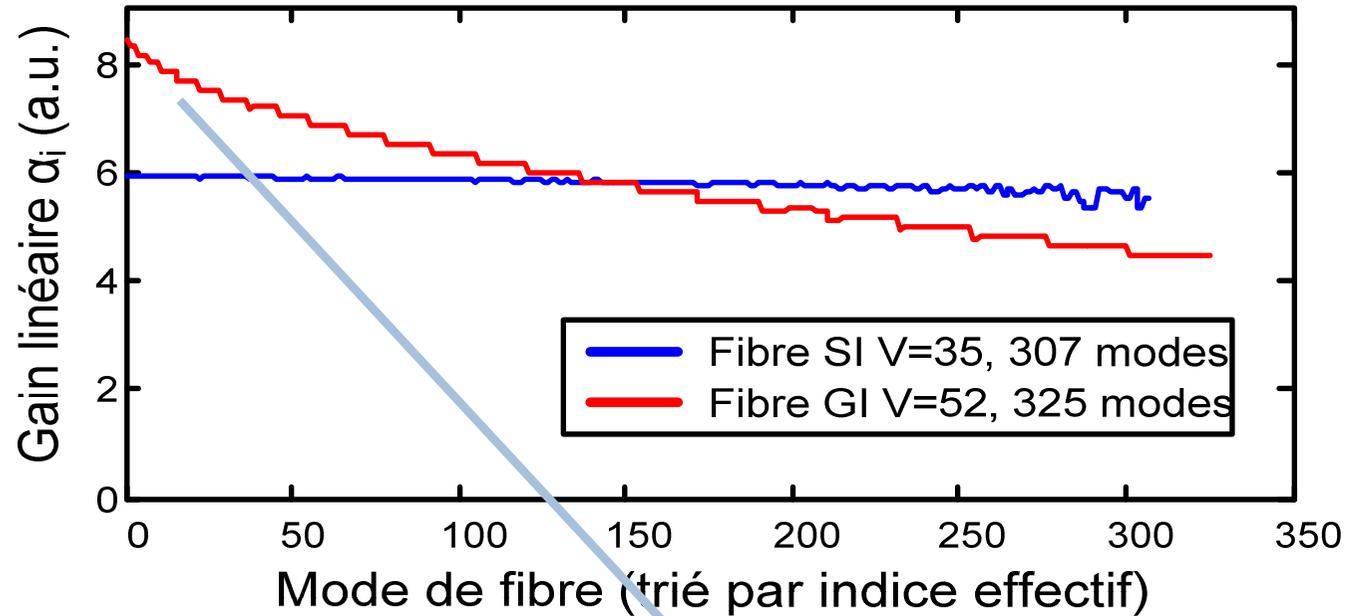


$$R_{01,22} = 9 \cdot 10^{21} \text{m}^{-1}$$

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



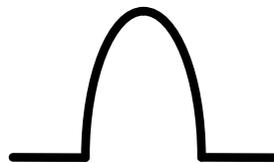
Gain Brillouin de chaque mode de fibre pour
une excitation homogène de la fibre.



fibre GI

pas conjugaison mais:

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



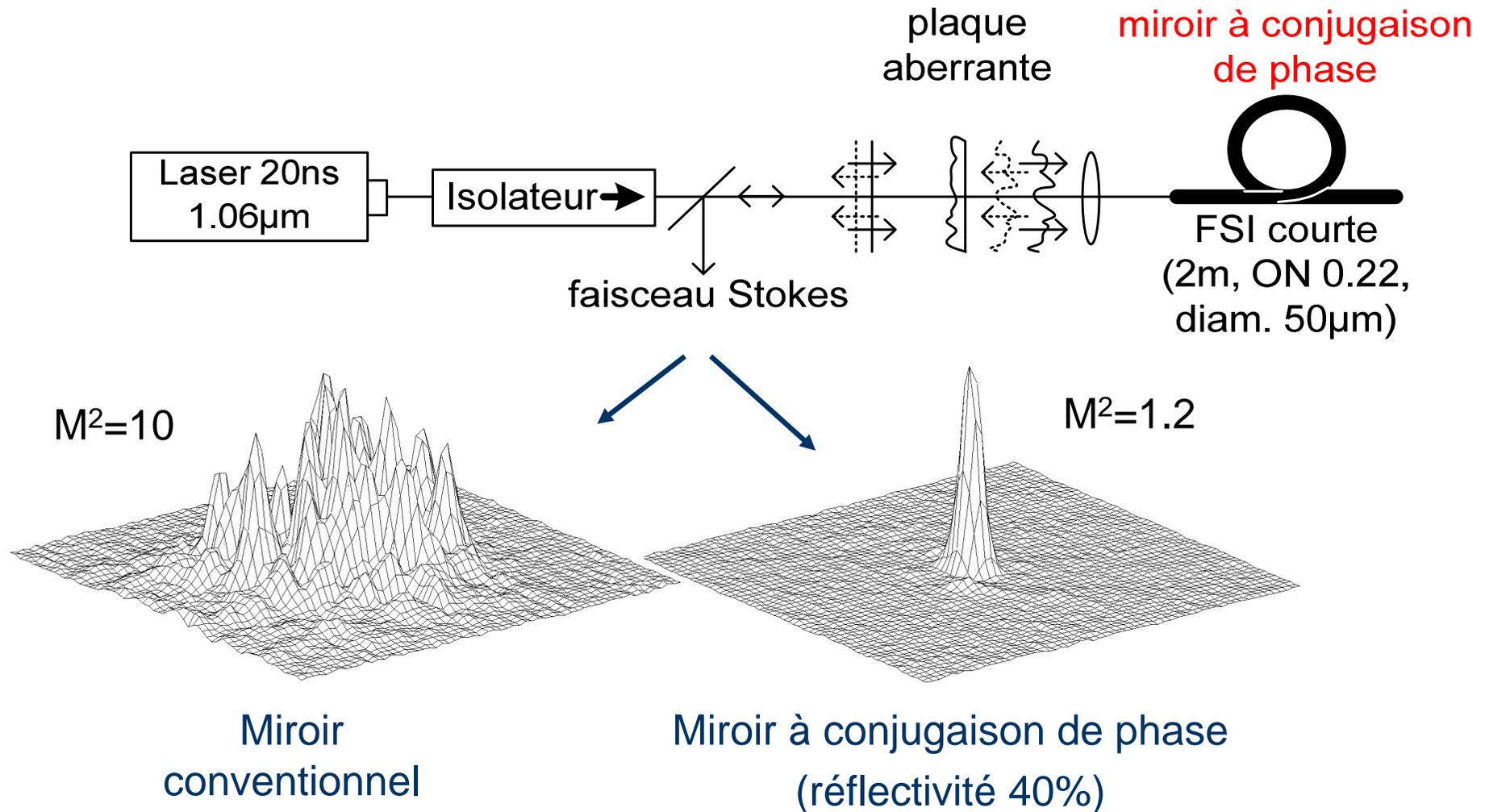


	Courte ($L < 10\text{m}$)	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase	rien
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup

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



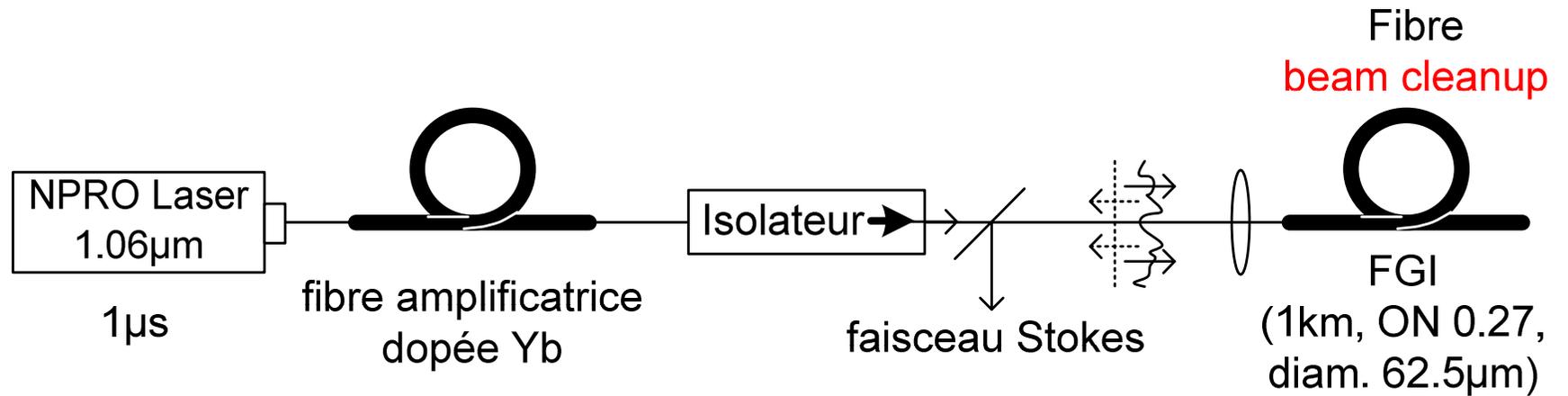
	Courte ($L < 10\text{m}$)	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase	rien
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup



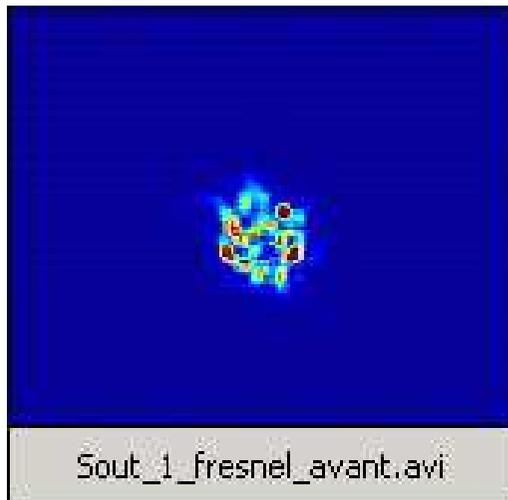
=> Conjugaison de phase de bonne qualité dans une FSI courte.



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

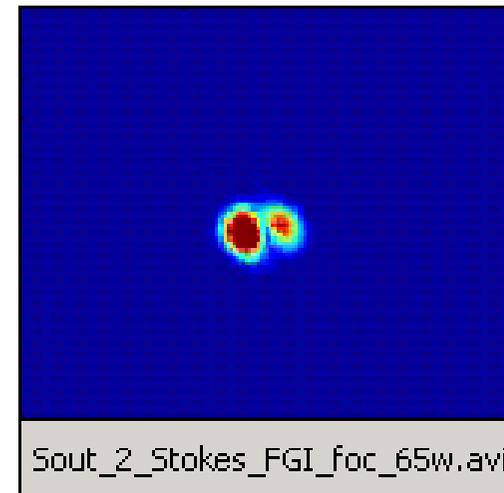


Entrée
faisceau pompe



Sout_1_fresnel_avant.avi

Retour faisceau Stokes
(Réflectivité 15%)

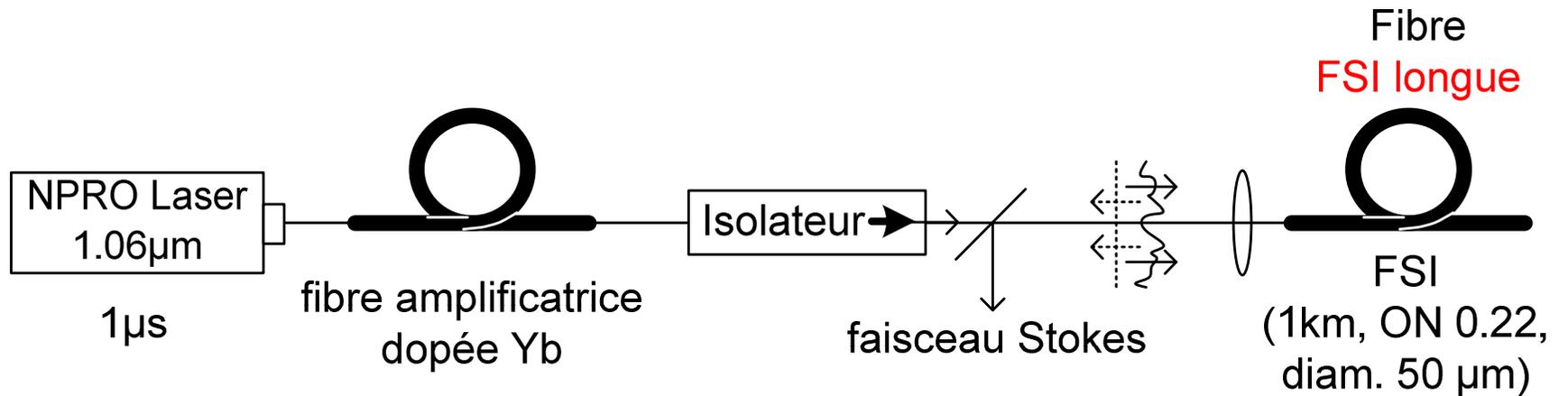


Sout_2_Stokes_FGI_foc_65w.avi

=> Beam cleanup dans une FGI longue... mais vers LP_{11} !



	Courte ($L < 10\text{m}$)	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase OK	? rien ?
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup OK mais LP₁₁



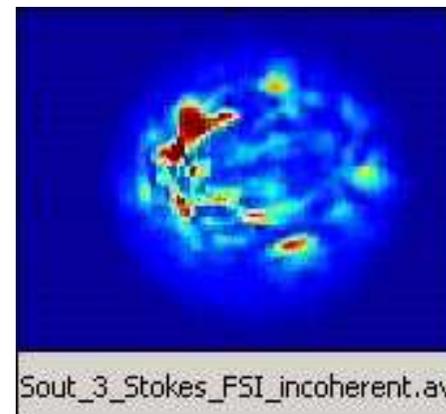
Rappel: Solution de l'équation
aux valeurs propres

gains
égaux

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

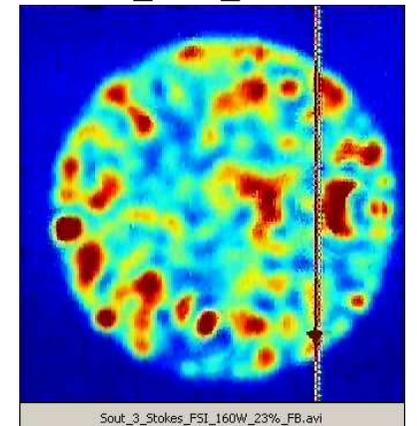
Retour faisceau Stokes
Sans
réflectivité parasite
(clivage angle)

Sout_3_Stokes_FSI_incoherent.avi



Avec
réflectivité parasite
(clivage droit)

Sout_3_Stokes_FSI_160
W_23%_FB.avi



=> Retour incohérent dans une FSI longue sans réflexion!



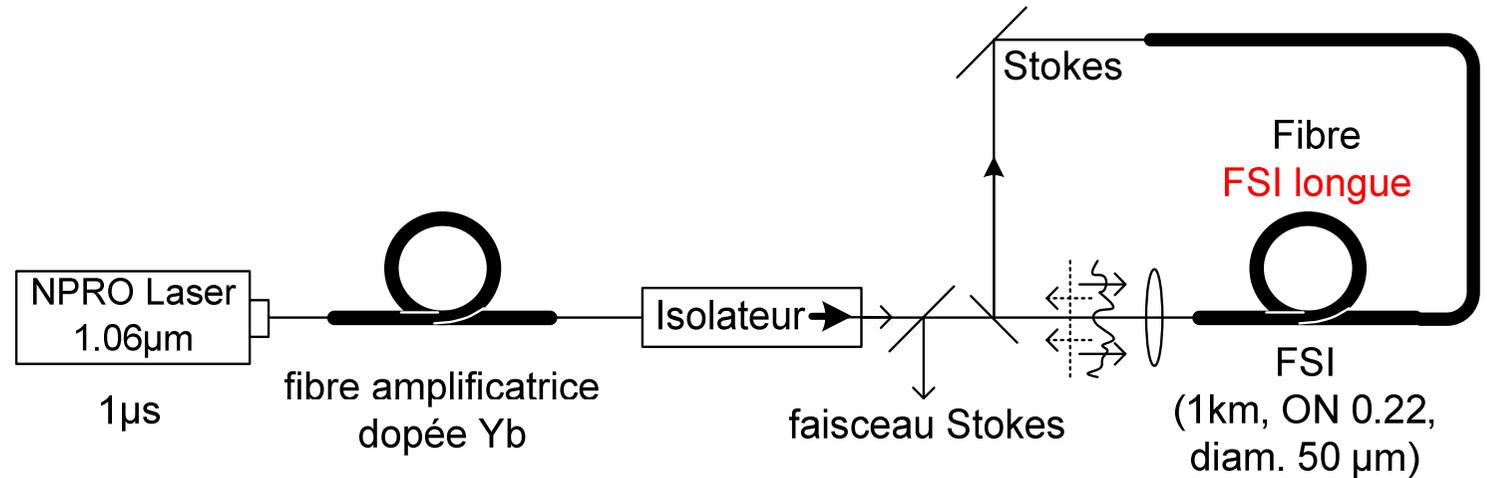
	Courte ($L < 10\text{m}$)	Longue
Fibre à Saut d'Indice	Bonne conjugaison de phase OK	rien Retour incohérent (sans réflexion parasite)
Fibre à Gradient d'Indice	Conjugaison de phase ou beam cleanup suivant les conditions d'injection	Beam cleanup OK mais LP₁₁

- 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



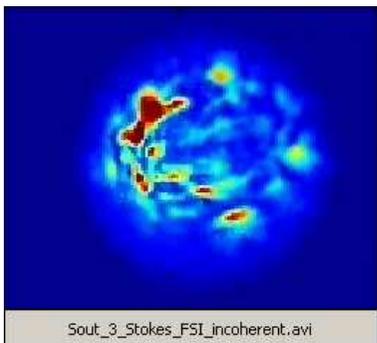
Effet de la cavité :

- Baisse du seuil
- Stabilisation du mode

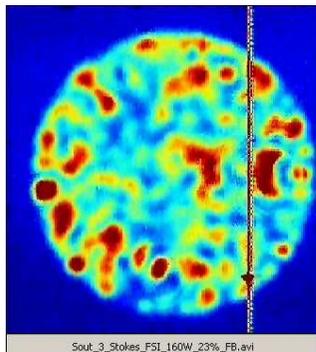


Retour faisceau Stokes

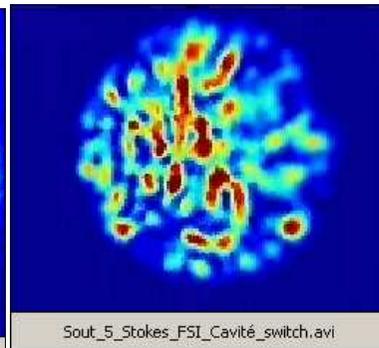
Sans
réflectivité
parasite



Avec
réflectivité
parasite



Avec
réflectivité
imposée

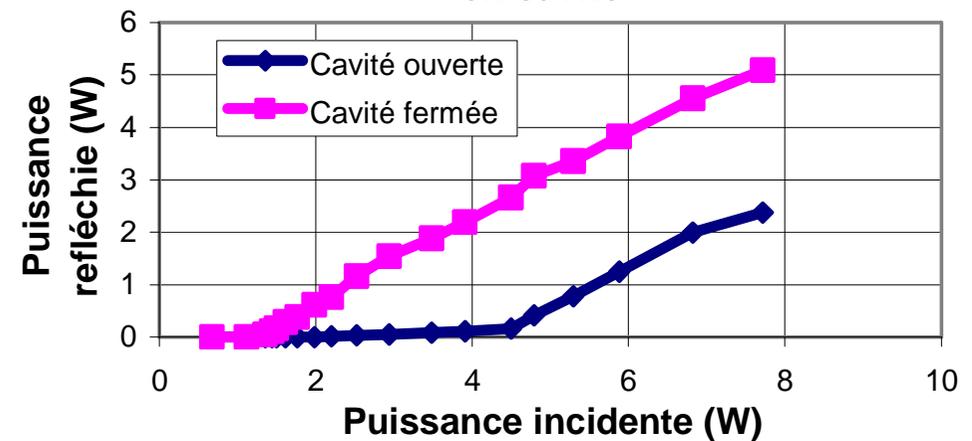


Sout_3_Stokes_FSI_incoherent.avi

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 :

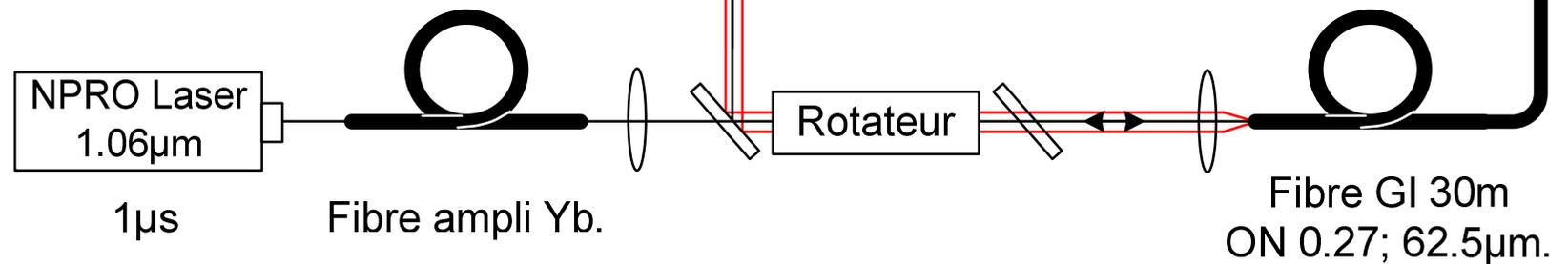
- Nous avons remarqué qu'une fibre GI de 30m peut propager le mode fondamental **sans couplage** vers les autres modes **ni dépolarisation**

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}

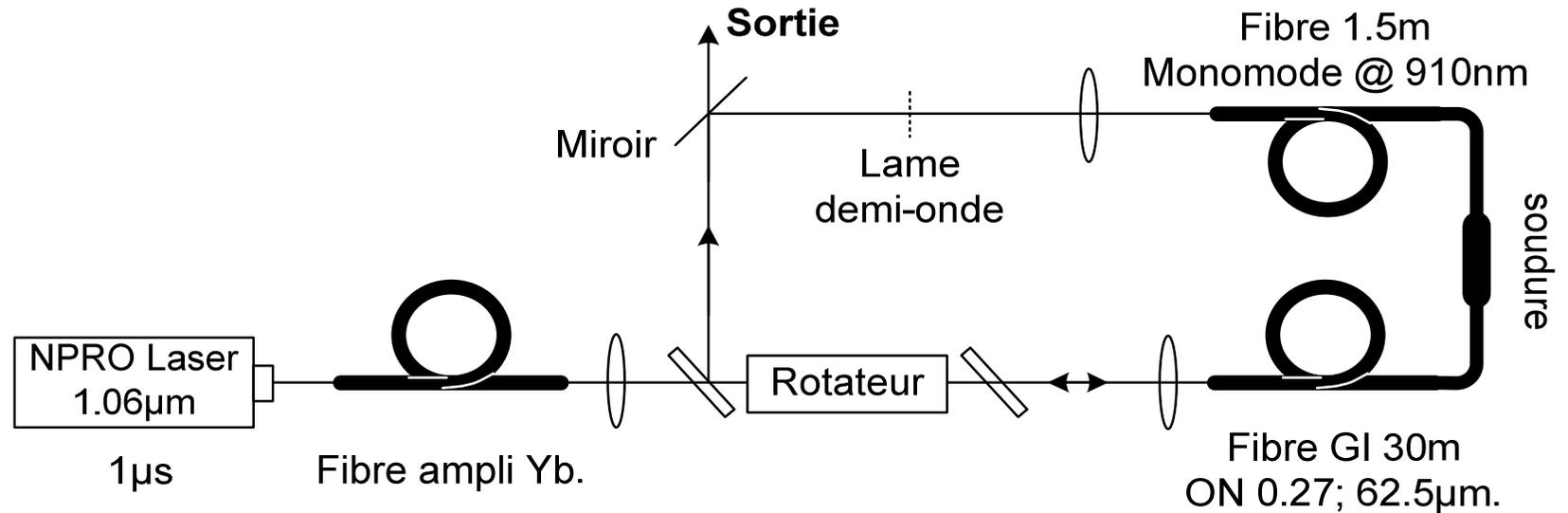
=> **beam cleanup**



Difficulté: alignement très sensible.

Comment injecter le mode fondamental sans injecter les autres modes?

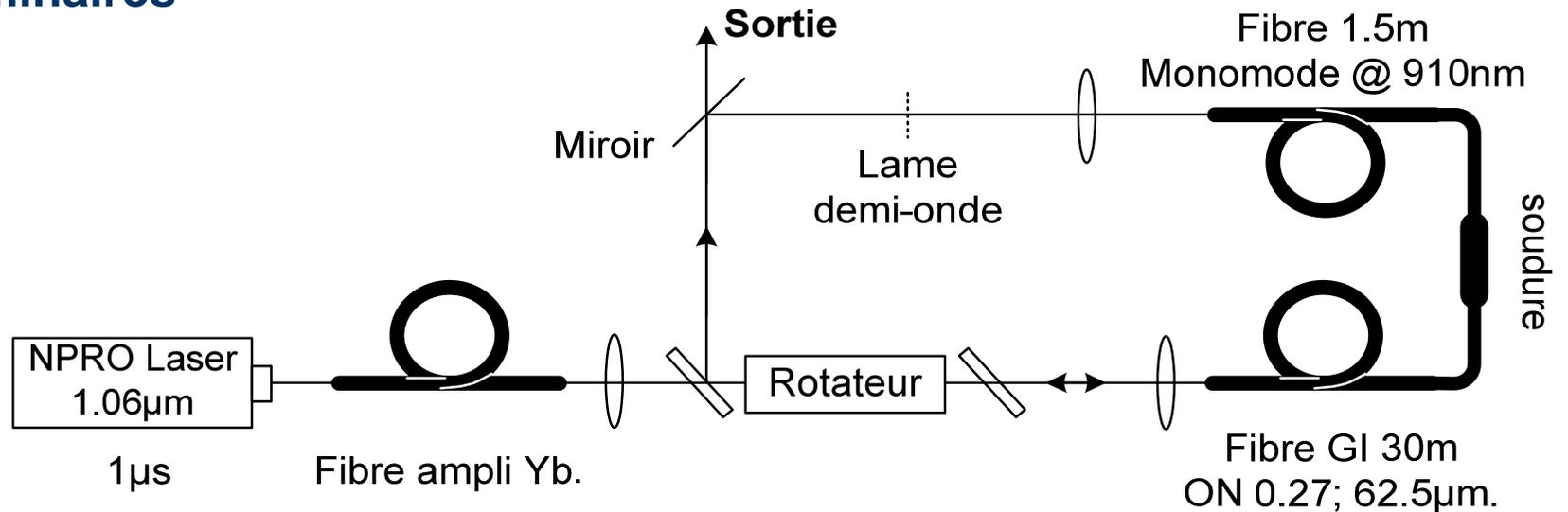
Solution: Une **fibre monomode** est **soudée** à l'extrémité de la **fibre multimode** => **alignement parfait des coeurs**



filtre = fibre monomode:

- Le mode **LP₀₁** 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 LP₁₁) ne se **propagent pas** dans la fibre monomode.

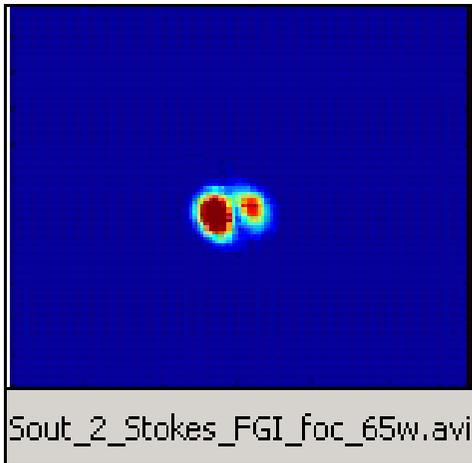
Résultats préliminaires



Stabilité

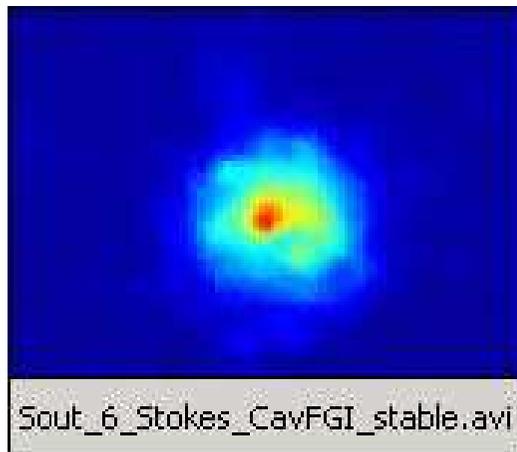
Sans cavité

Sout_2_Stokes_FGI_foc_65w.avi

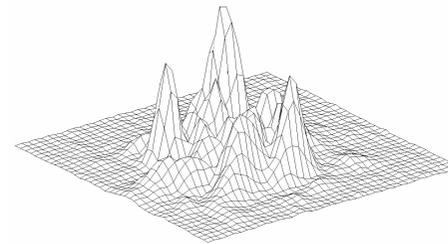


Avec la cavité

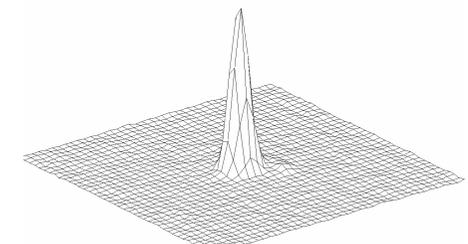
Sout_6_Stokes_CavFGI_stable.avi



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 **fibres 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/cm²)
- Autres matériaux photoréfractifs (Co:BaTiO₃, LiNbO₃)

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 