



www.thalesgroup.com

# Hybridation d'un module de pompe sur un substrat de verre pour application à un LiDAR embarqué

**Thomas Nappéz**

**Directeurs de thèse :**

**E. Ghibaudo, J-E Broquin**

IMEP-LaHC, Minatec, Grenoble

**Responsables industriels :**

**P. Rondeau, J-P Schlotterbeck**

THALES Avionics S.A., Valence



*Soutenance de thèse, 27 septembre 2012,  
Minatec, Grenoble*

**THALES**

## ◆ Introduction

- LiDAR pour l'avionique
- Pompage optique
- Objectifs de l'étude

## ◆ Dimensionnement

- Fonctionnement d'une diode laser de pompe
- Dimensionnement du convertisseur modal

## ◆ Réalisation

- Convertisseur modal
- Verrouillage de la diode laser à ruban large

## ◆ Perspectives & conclusion

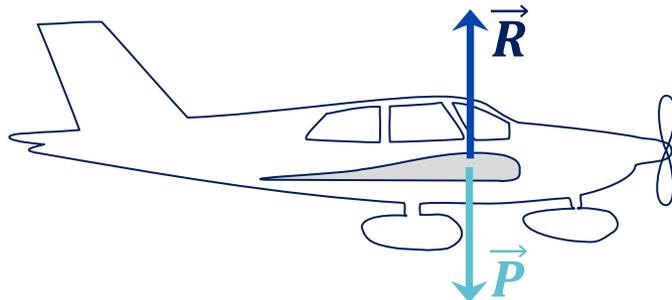
## ◆ Avionique

- Equipements électroniques

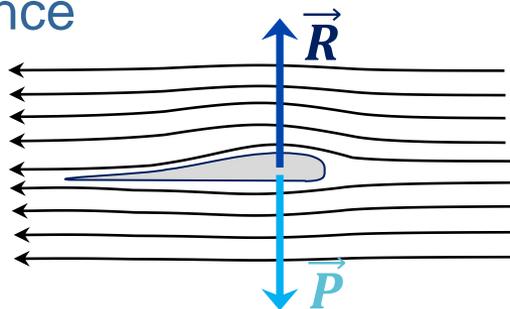
→ **Garantir la sécurité du vol**

## ◆ Principe du vol

- Compenser le poids



- Portance



→ **Mesure continue de  $V_{air}$**

## ◆ Système anémo-barométrique



Sonde de Pitot



THALES

Sonde de pression statique



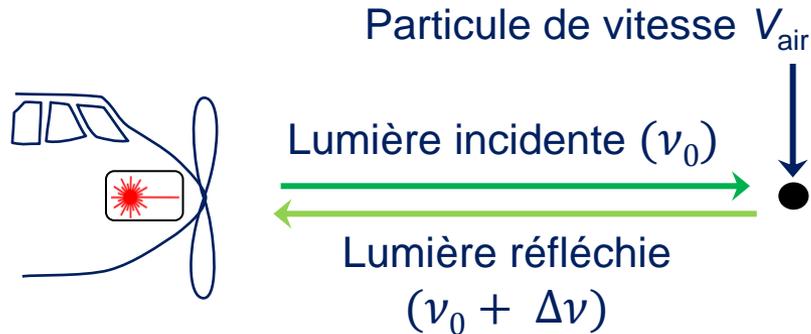
- Recommandation

2<sup>nd</sup> système avec modes de défaillances différents

→ **Mesure optique**

## ◆ Anémométrie-laser

### ● Principe



Effet Doppler 
$$\Delta\nu = -\frac{2V_{\text{air}}}{\lambda}$$

### ● Principe physique différent

Modes de défaillances différents

### ● Sonde placée à l'intérieur

Contraintes environnementales moins fortes

## ◆ Premiers développements

### ● ALEV 3 (1988, Sextant Avionique)



$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  ;  $h = 75 \text{ cm}$  ;  $70 \text{ kg}$

Intérêt démontré ☺

Mesure de référence ☺

Encombrant ☹

➔ **Intégration**

## ◆ Technologie fibrée (DALHEC 2001)

### ● Laser à fibres Er<sup>3+</sup>



$\lambda = 1,53 \mu\text{m}$  ;  $L = 15 \text{ cm}$  ; 2 kg

Encombrement réduit  
Composants bas coût  
Sécurité oculaire  
Vibration mécanique



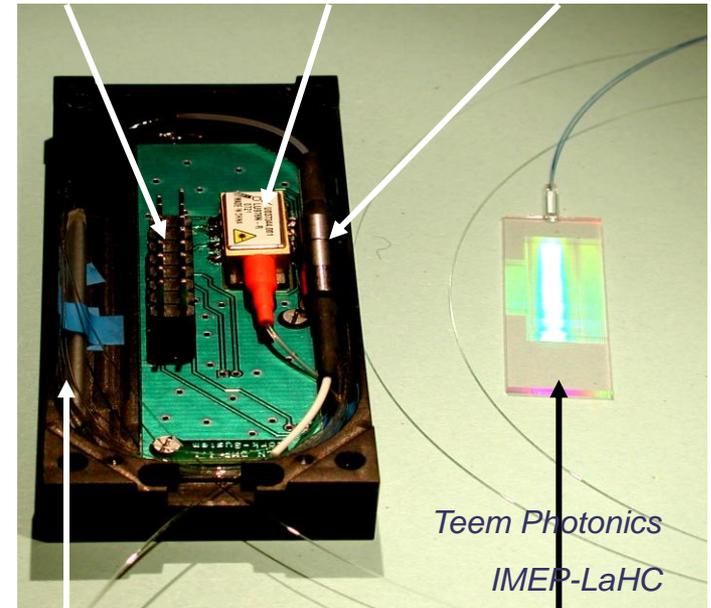
➔ **Technologie planaire**

## ◆ Optique intégrée sur verre (NESLIE 2006)

### ● Laser DFB sur verre Yb<sup>3+</sup>/Er<sup>3+</sup>

Commande  
électrique

Diode laser de  
pompe 0,98  $\mu\text{m}$     Isolateur



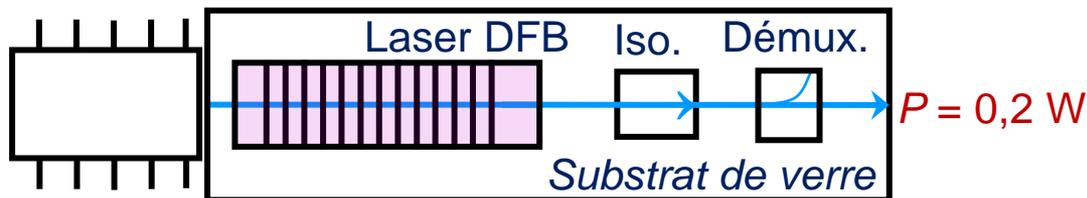
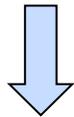
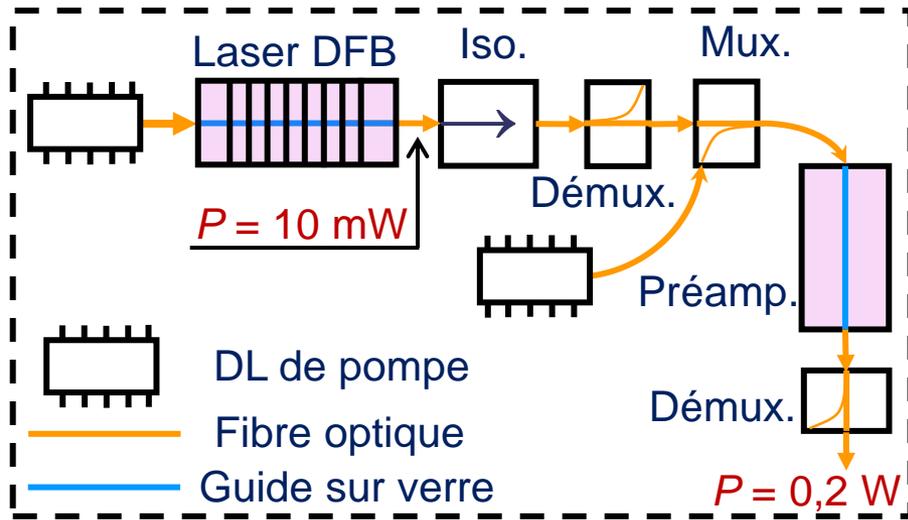
Multiplexeur

*Teem Photonics*  
*IMEP-LaHC*

Puce optique  
laser 1,55  $\mu\text{m}$

➔ **Fiabilité ?**

## ◆ Système actuel



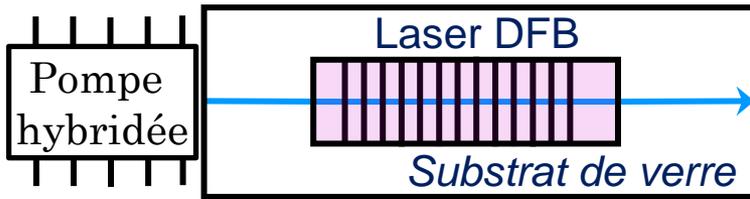
→ **Suppression des fibres optiques**  
**Suppression du préamplificateur**

## ◆ Intégration sur verre

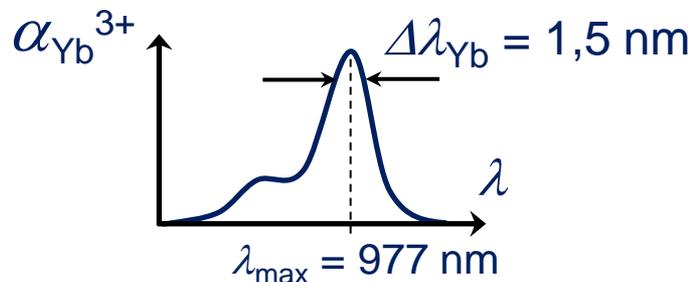
- Multiplexeur (Onestas, 2011)
- Isolateur (Collaboration LT2C, St Etienne)
- Diode laser  
Hybridation d'une diode laser sur verre  
Suppression d'un étage d'amplification

→ **Sujet de l'étude :**  
**hybridation de la diode laser de pompe**

## ◆ Contraintes



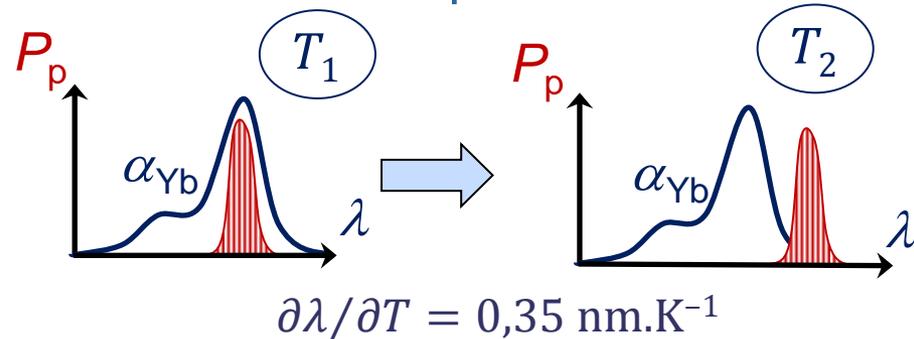
- Puissance en sortie DFB > 200 mW  
Efficacité 5 %  $\rightarrow P_{\text{pompe}} > 4 \text{ W}$
- Recouvrement pompe/signal  
 $\rightarrow$  Monomode
- Pompage  $\text{Yb}^{3+}$  sur verre



$$\partial\lambda_{\text{max}}/\partial T = 0,01 \text{ nm.K}^{-1}$$

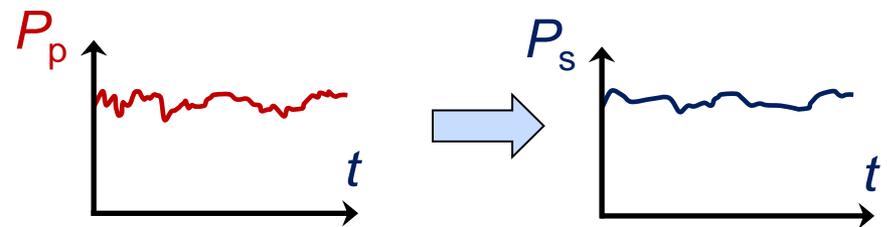
## ◆ Instabilités d'une DL

### ● Instabilité spectrale



$\rightarrow$  **Perte de puissance**

### ● Instabilité temporelle

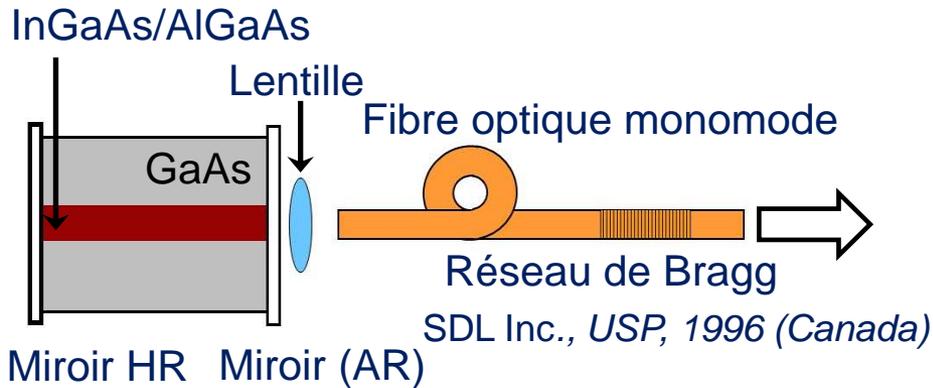


$\rightarrow$  **Bruit sur le laser DFB**

**Stabilisation :**  
**rétroaction optique**

## ◆ Diode laser à ruban étroit

- Emission monomode



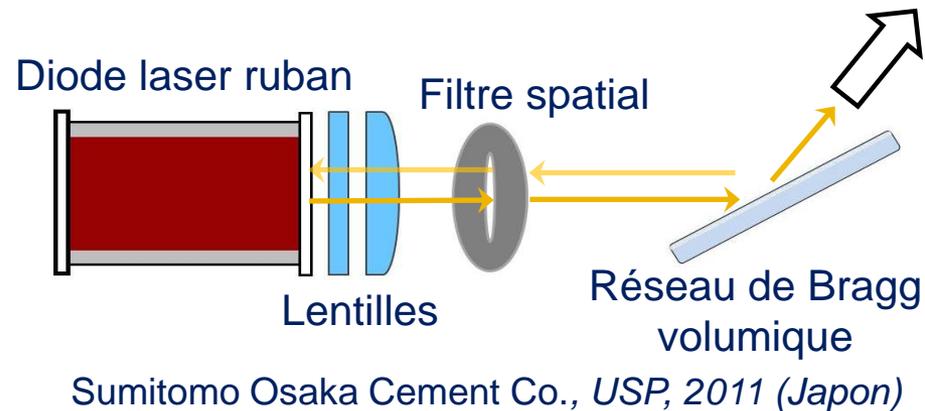
- $R_B = (1..10) \%$
- $L_{\text{ext}} = (5..200) \text{ cm}$
- $\partial\lambda/\partial T = 0,01 \text{ nm.K}^{-1}$
- $P_s^{\text{max}} = 1 \text{ W}$  (densité de puissance)

➔ **Puissance limitée**

## ◆ Diode laser à ruban large

- Emission multimode

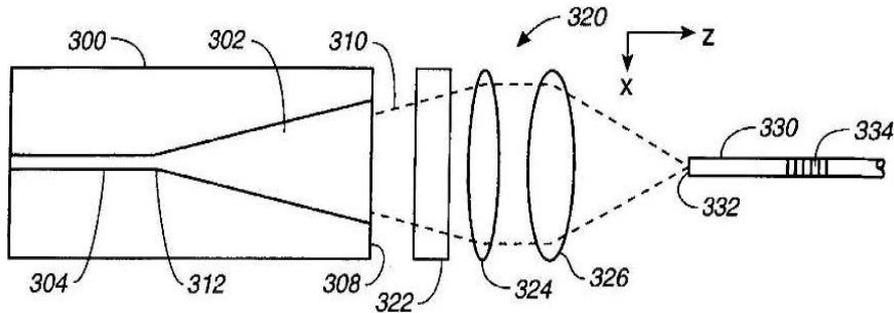
➔ **Verrouillage du mode fondamental**



- $P_s = 1,4 \text{ W}$
- Solution en optique de volume

➔ **Instabilité mécanique**

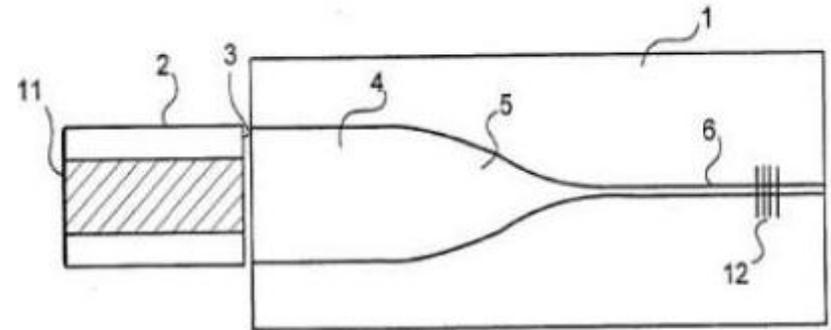
## ◆ Intégration du filtre spatial



JDS Uniphase, USP, 2003 (USA)

- Puissance disponible ☺
- Compacité ☺
- Coût ☹
- Fiabilité ☹
- Stabilité mécanique ☹

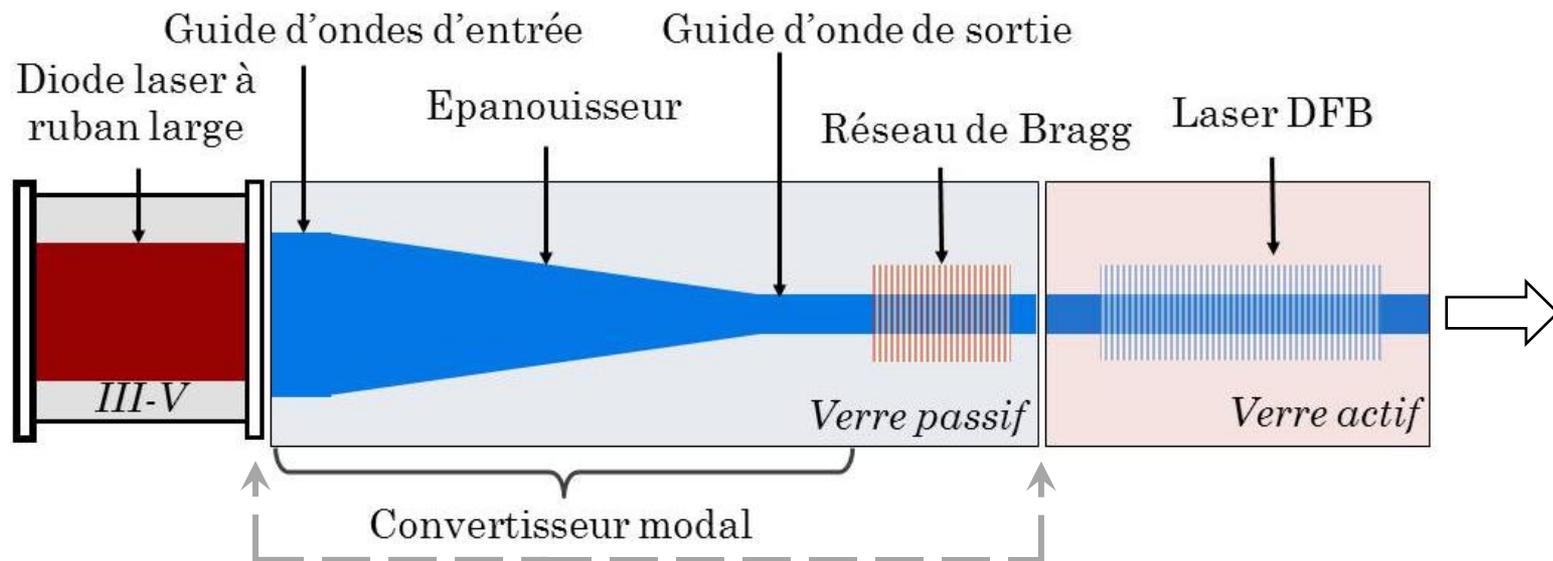
## ◆ Intégration monolithique



Teem Photonics, USP, 2001 (France)

- Puissance disponible ☺
- Compacité ☺
- Coût ☺
- Fiabilité ☺
- Stabilité mécanique ☺

**Objectif : développer la technologie pour réaliser un démonstrateur**



## ◆ Points-clés

- Couplages en bout
- Convertisseur modal
- Réseau de Bragg  $\lambda_B = 980 \text{ nm}$

## ◆ Organisation de l'étude

- Dimensionnement
  - Rétroaction
  - Convertisseur modal
- Réalisation et caractérisation
  - Convertisseur
  - Puce complète

## ◆ Organisation de l'étude

### ● Dimensionnement

#### Rétroaction

Convertisseur modal

### ● Réalisation et caractérisation

Convertisseur

Puce complète

Stabilité temporelle

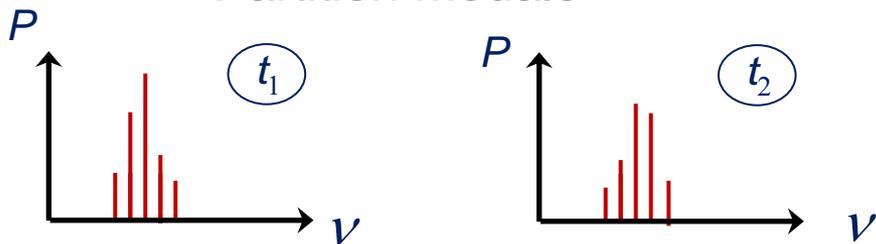
Stabilité spectrale

Verrouillage modal

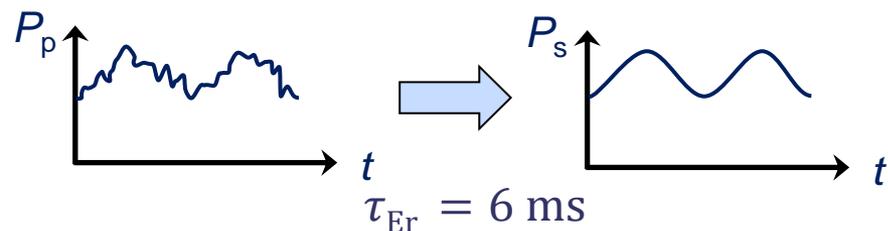
## ◆ Variations de puissance

### ● Origine des variations

Partition modale



### ● Influence des variations

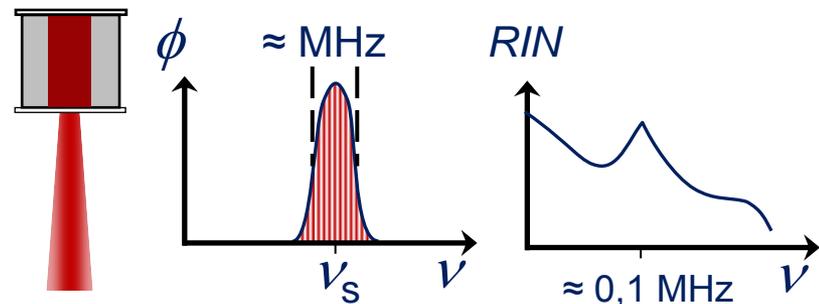


➔ **Problème des variations lentes**

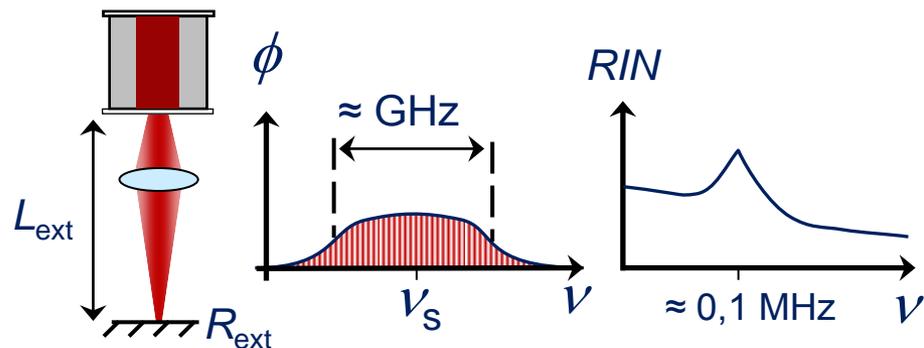
➔ **Solution : émission fortement multifréquence**

## ◆ Effondrement de cohérence

### ● Diode laser seule



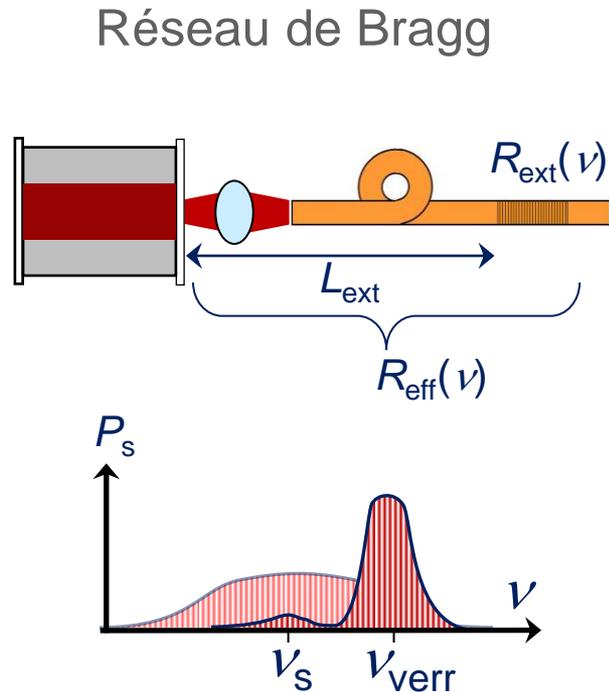
### ● Diode laser avec rétroaction



➔ **Bruit filtré mais spectre large**

## ◆ Principe

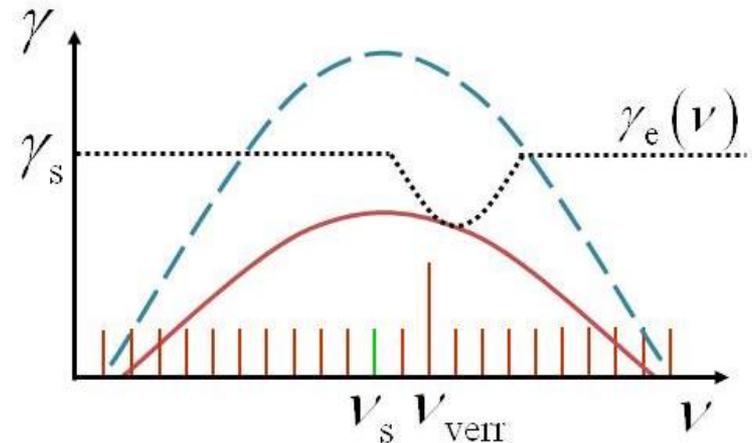
- Réflexion sélective en fréquence



➔ **Contrôle de l'émission**

## ◆ Mécanisme

- Diode laser avec rétroaction



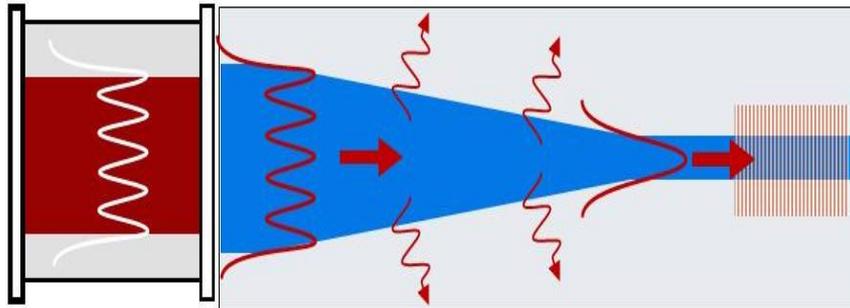
- Condition de stabilisation

$$\gamma(\nu) - \gamma_s \geq \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_{\text{arr}} R_{\text{eff}}(\nu)} \right)$$

$R_{\text{ext}}(\nu)$  ➔ **Stabilisation spectrale et temporelle**

## ◆ Filtrage des modes d'ordre supérieur

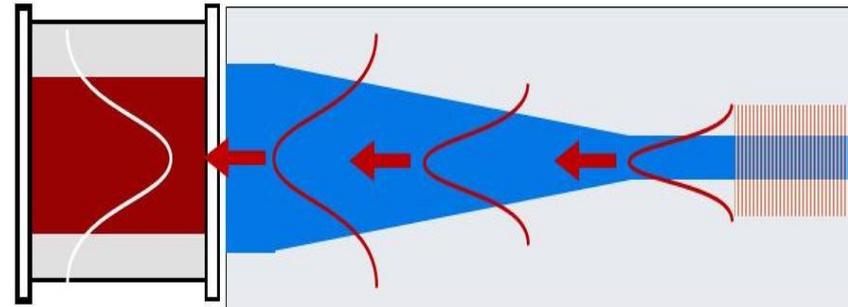
- Epanouisseur dans la cavité externe



➔ **Augmentation des pertes pour  $m \neq 0$**

## ◆ Réflexion du mode fondamental

- Rétroaction sur la partie monomode



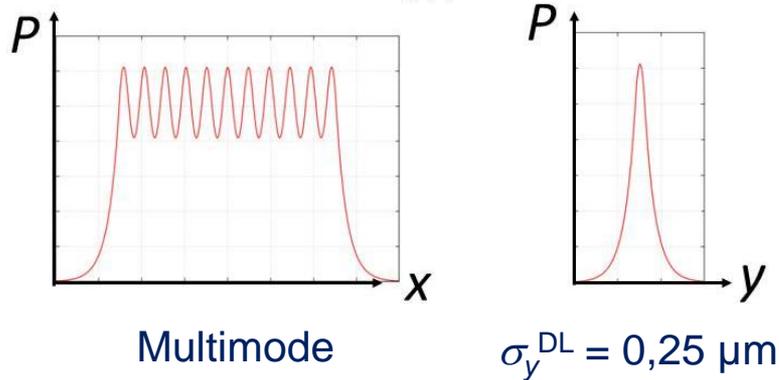
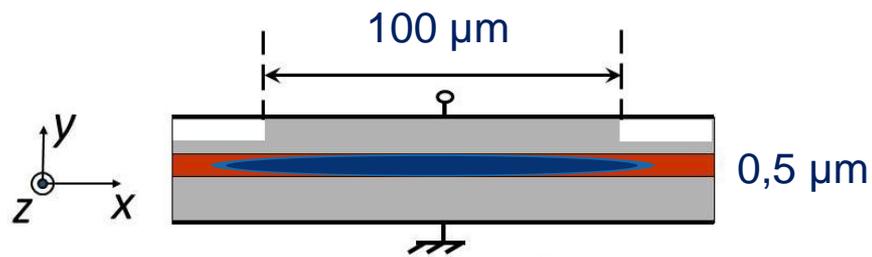
➔ **Diminution des pertes pour  $m = 0$**

- Transition adiabatique

➔ **Dimensionnement de l'épanouisseur**

## ◆ Guide d'onde d'entrée

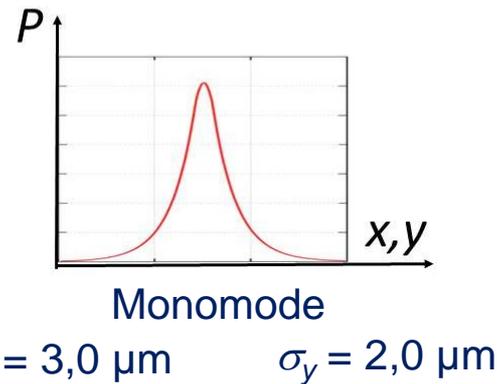
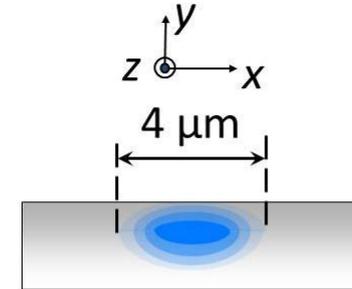
### ● Modes d'une diode laser



### ● Asymétrie & fort confinement

## ◆ Guide d'onde de sortie

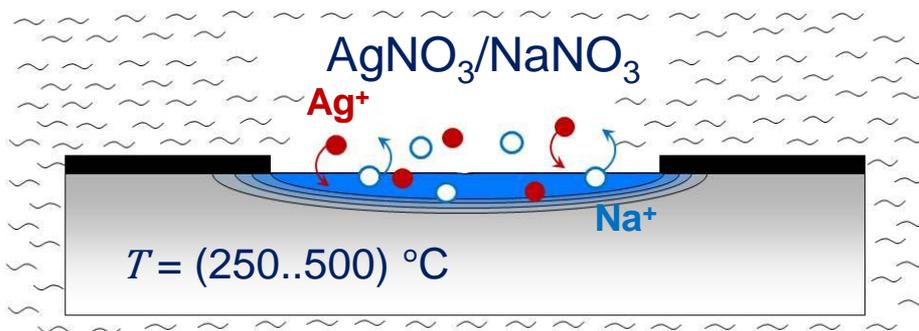
### ● Mode du guide actif



### ● Symétrie quasi-circulaire & faible confinement

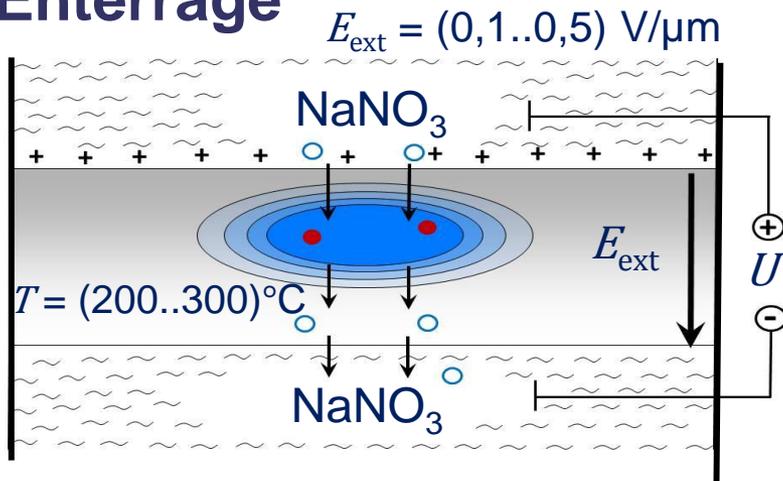
➔ **Contraintes différentes : échange d'ions sur verre**

## ◆ Echange d'ions thermique



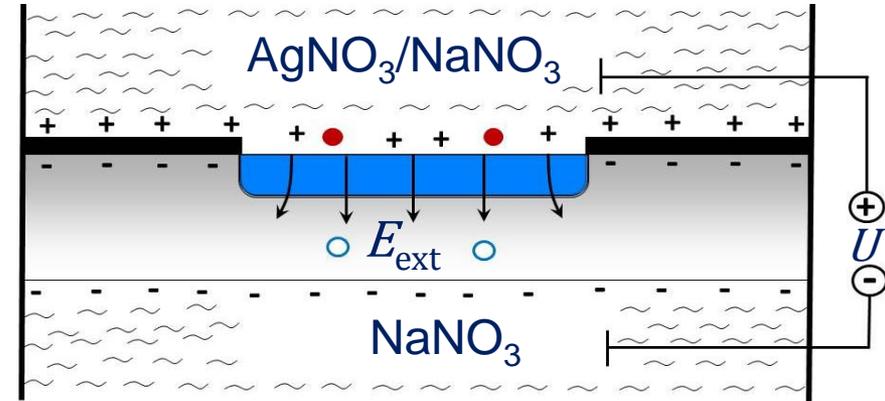
- Profil diffusé  $\sigma \approx (2..5) \text{ }\mu\text{m}$

## ◆ Enterrage



- Profil symétrisé  $\sigma_x \approx \sigma_y \approx (5..10) \text{ }\mu\text{m}$

## ◆ Echange sous champ



- Profil à quasi-saut  $\sigma \approx (1..3) \text{ }\mu\text{m}$

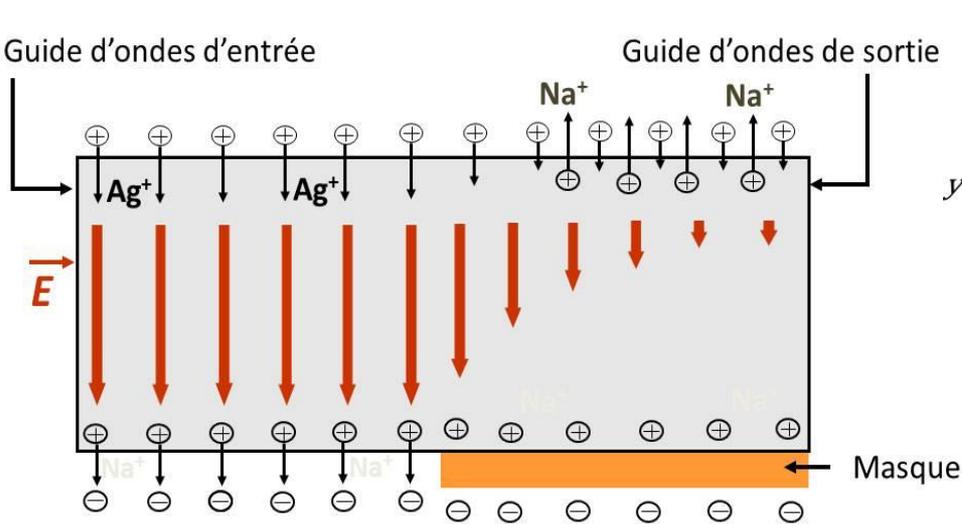
## ◆ Efficacité de couplage

Recouvrement vertical	Entrée	Sortie
Ech. therm.	$62 \pm 3$	<b><math>88 \pm 1</math></b>
Enterrage	$39 \pm 2$	<b><math>95 \pm 1</math></b>
ESC	<b><math>76 \pm 2</math></b>	$70 \pm 3$

→ {  
 Côté DL : ESC  
 Côté DFB : Ech. therm.

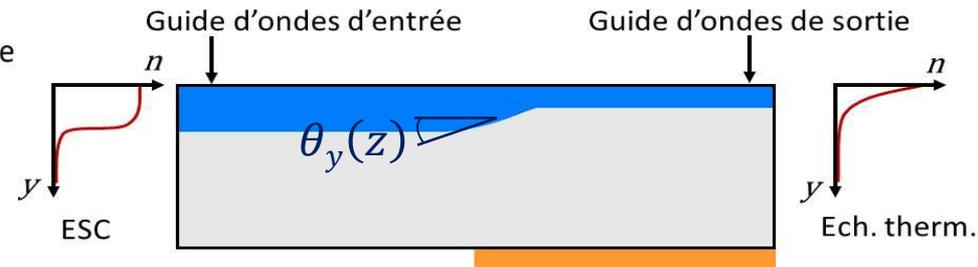
## ◆ Echange sous champ sélectif

## ◆ Adiabaticité



- $E_{\text{ext}}(z = 1\text{cm}) = E_0 / 100$

➔ **Echange thermique local**



- 90 % de variation en 5 mm

- Critère

$$\tan\theta_y(z) \ll \frac{d(z)}{\lambda_0} (n_{\text{eff}}(z) - n_{\text{eff}}^{\text{ray}})$$

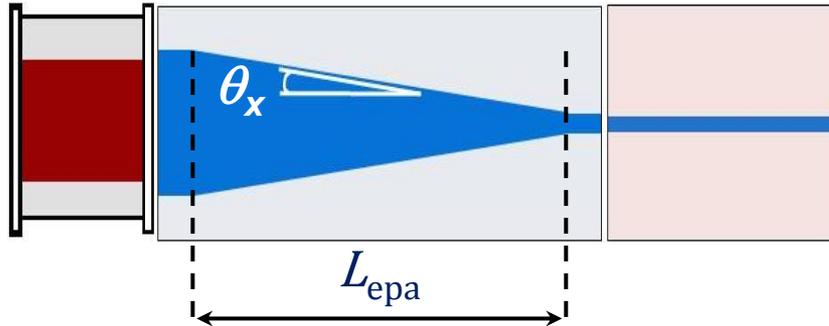
Love et al., *IEEE Proc. Of Opt.*, 1991

Marge de 10 %



**Paramètres  $T, E, t$   
optimisés pour  
couplage**

## ◆ Transition horizontale



### ● Adiabaticité

$$\theta_x(z) < \frac{\lambda_0}{n_0 w(z)}$$

Milton et al., *JQE*, 1977

### ● Epanouisseur linéaire

$$L_{\text{epa}} > 16 \text{ mm}$$

### ● Epanouisseur exponentiel & parabolique

$$L_{\text{epa}} > 5 \text{ mm}$$

## ◆ Synthèse

<b>Paramètres de fabrication</b>	$T = 270 \text{ °C}$
	$E = 0,1 \text{ V} / \mu\text{m}$
	$t = 4 \text{ min}$
	$W = 100 \mu\text{m}$
	$w = 2 \mu\text{m}$
	Linéaire, exponentielle, parabolique
<b>Coefficients de couplage</b>	$L_{\text{epa}} = \{5, 10, 15, 20, 25\} \text{ mm}$
	$\alpha_c^{\text{max}} = 0,70 \pm 0,02$
	$\alpha_c^{\text{HI}} = 0,68 \pm 0,08$



**Paramètres technologiques fixés**



**THALES**

## ◆ Organisation de l'étude

### ○ Dimensionnement

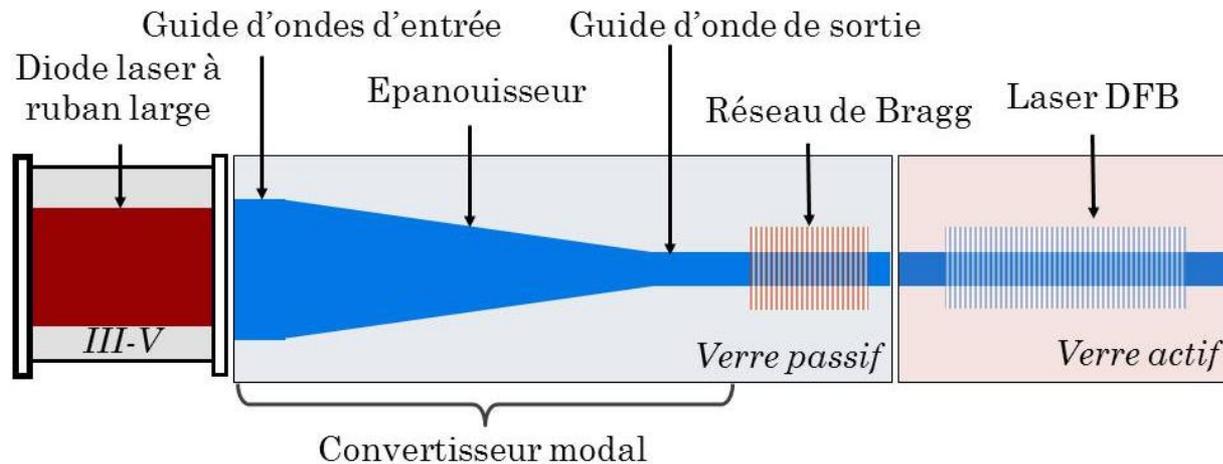
Rétroaction

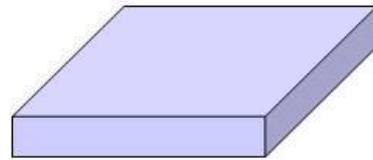
Convertisseur modal

### ● Réalisation et caractérisation

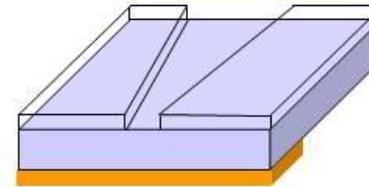
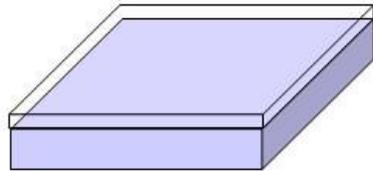
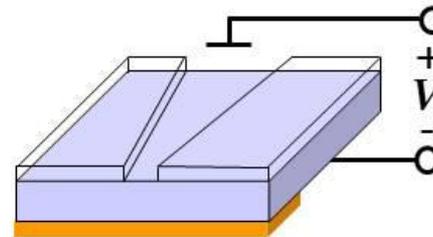
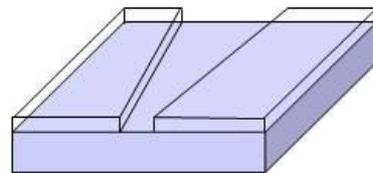
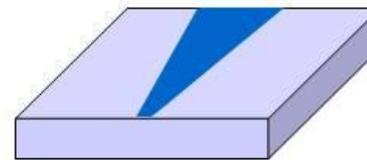
#### Convertisseur

Puce complète



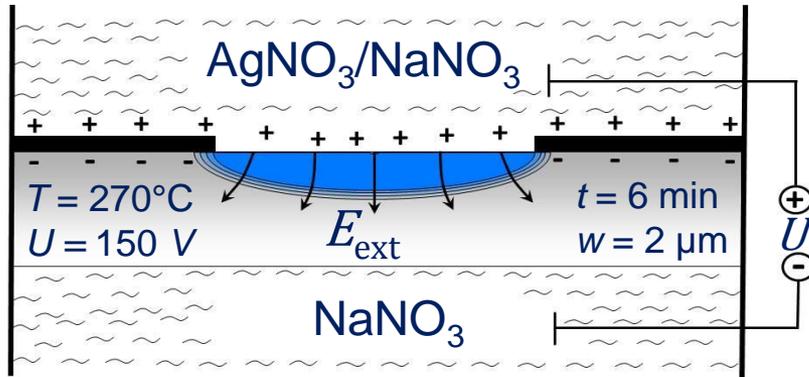


Nettoyage

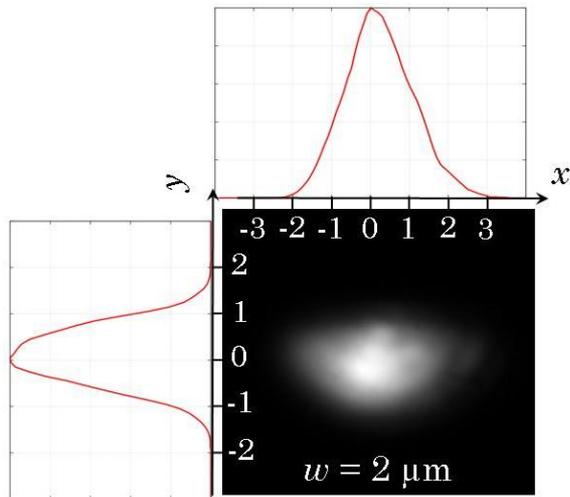
Dépôt du masque en  
face arrièreDépôt d'une  
couche masquanteEchange sous  
champ sélectifOuverture de la fenêtre  
par photo-lithographieNettoyage, découpe et  
polissage

**Développement de l'ESC**

## ◆ Fabrication



## ◆ Profil de mode

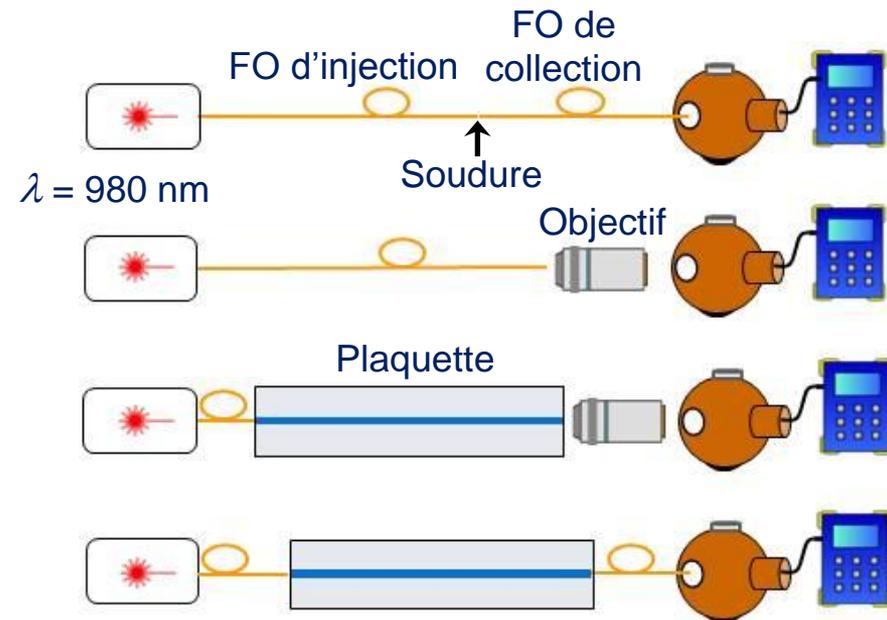


→ **Monomode**

## ◆ Pertes par propagation

### ● Bancs de caractérisation

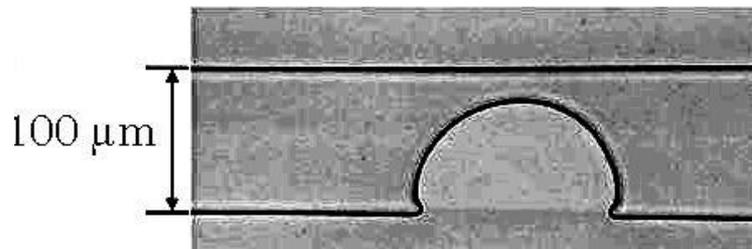
Quatre inconnues  
→ quatre mesures



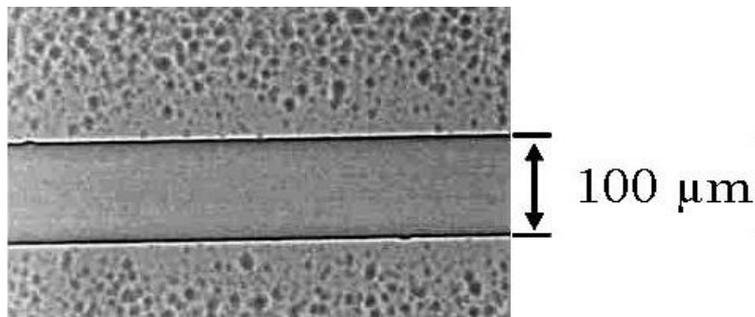
→  $P_{\text{prop}} > 4\text{ dB / cm}$

## ◆ Origine des pertes

- Présence de bulles dans les bains

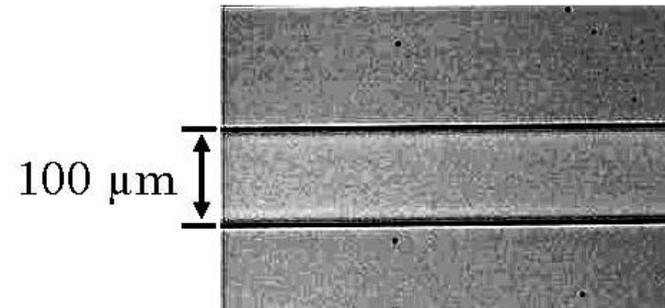


- Mauvaise tenue du masque ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



## ◆ Optimisation

- Epaisseur  $\text{Al}_2\text{O}_3$  doublée



- Plaquette retournée

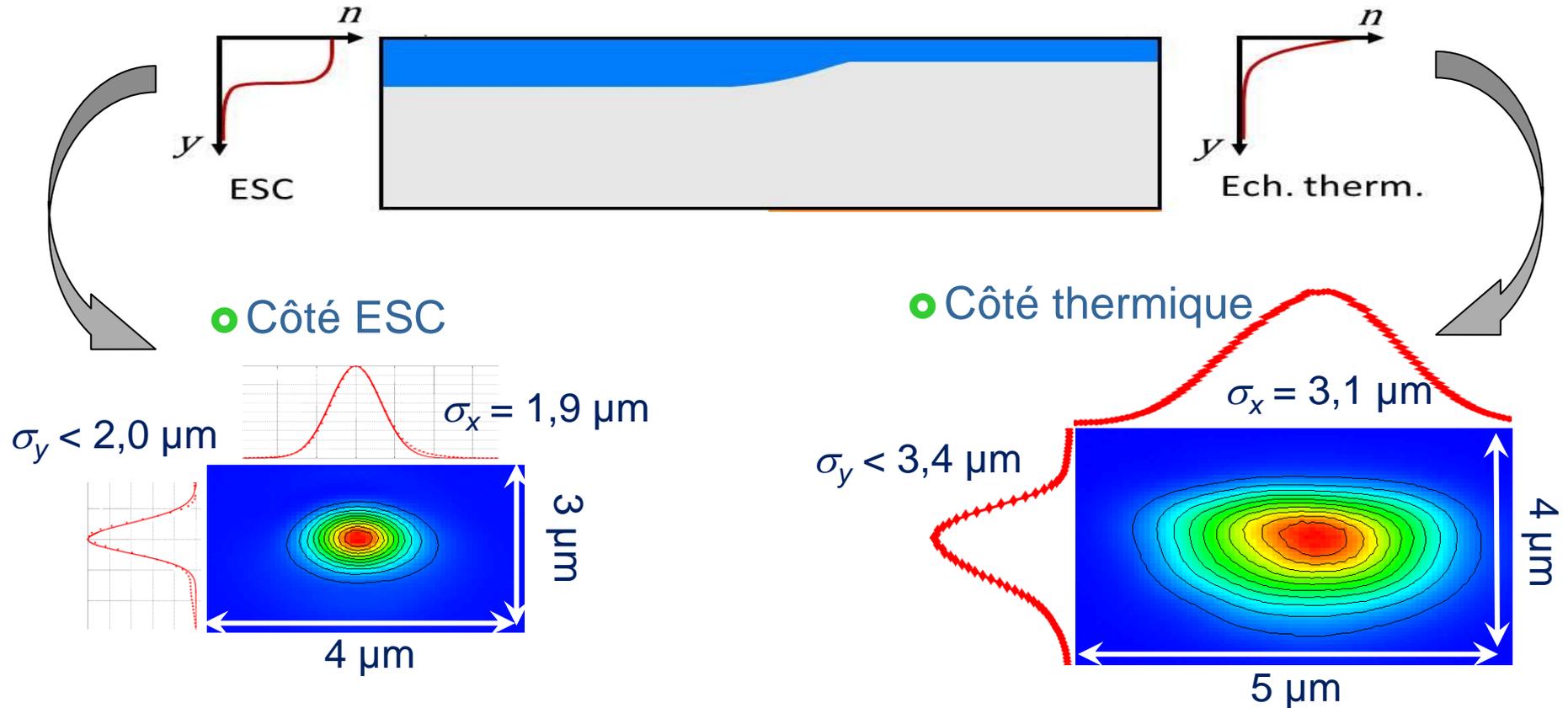
- Agitation automatique

→ Décollement des bulles

→  $P_{\text{prop}} = (0,3 \pm 0,2) \text{ dB / cm}$

→ **Procédé d'ESC validé**

## ◆ Différence de confinement

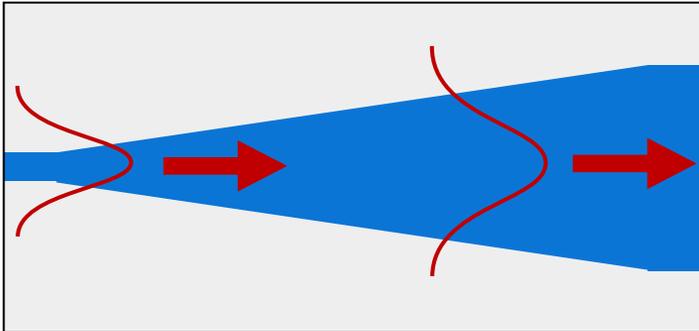


● Pertes à la transition

$$P_{\text{trans}} = (0,5 \pm 0,4) \text{ dB}$$

➔ **Transition verticale validée**

## ◆ Objectif

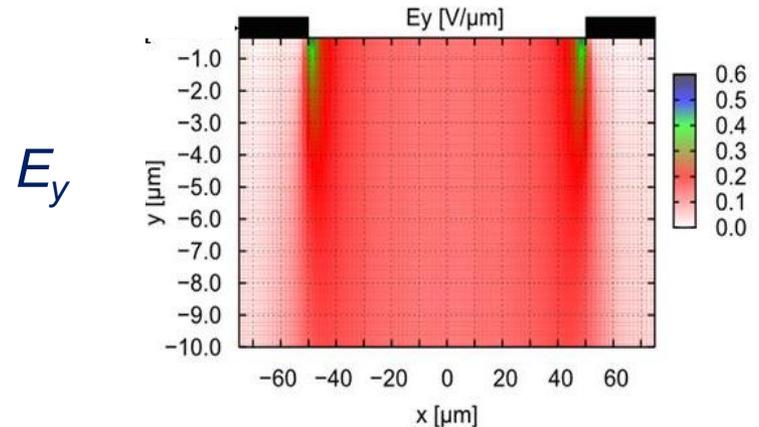


## ◆ Intensité en sortie

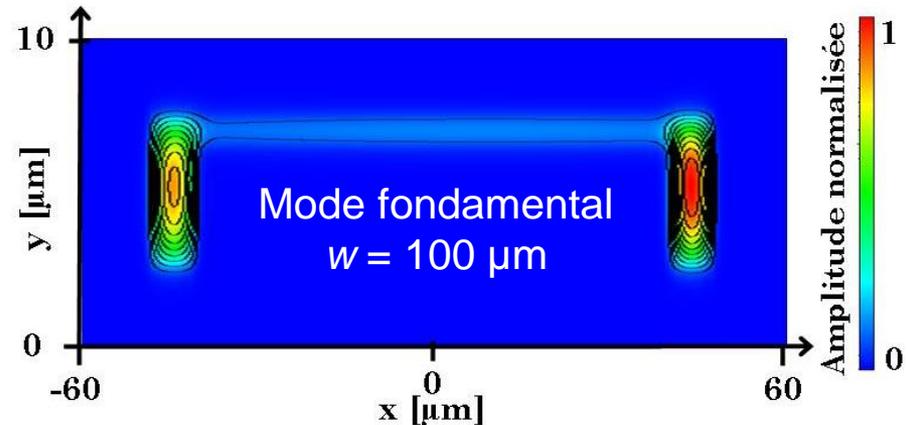
112  $\mu\text{m}$



## ◆ Effet de pointe lors de l'ESC



## ◆ Calcul du mode fondamental

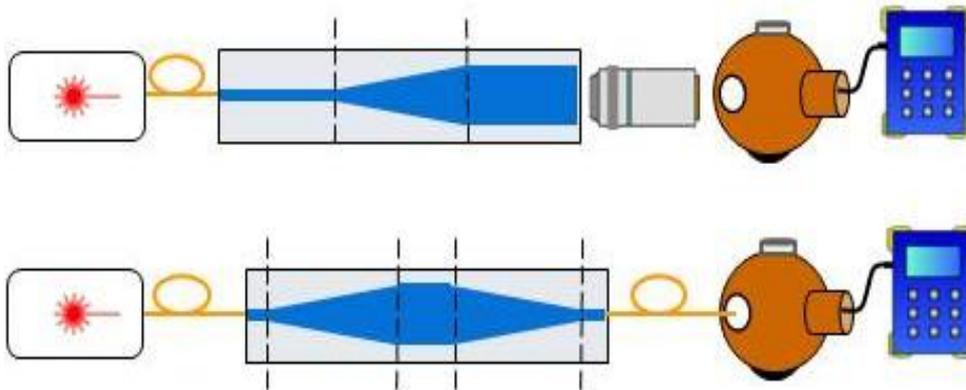


➔ **Mode fondamental excité**

## ◆ Mesure des pertes à la transition

### ● Bancs de caractérisation

Méthode des 4 mesures  
+ 2 mesures supplémentaires



## ◆ Pertes en excès

	$L_{\text{epa}}$ [mm]	$P_{\text{epa}}$ [dB]
LIN	15	$1,1 \pm 0,7$
	10	X
	5	$1,6 \pm 0,7$
EXP	15	$1,1 \pm 0,7$
	10	$1,0 \pm 0,7$
	5	$0,8 \pm 0,7$
PAR	15	$2,3 \pm 0,7$
	10	$2,1 \pm 0,7$
	5	x



**Epanouisseurs  
exponentiels retenus**

## ◆ Couplage en bout

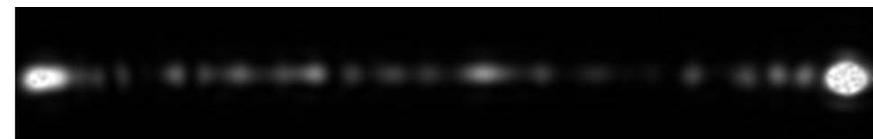
- Diode laser

105  $\mu\text{m}$



- Guide d'onde d'entrée

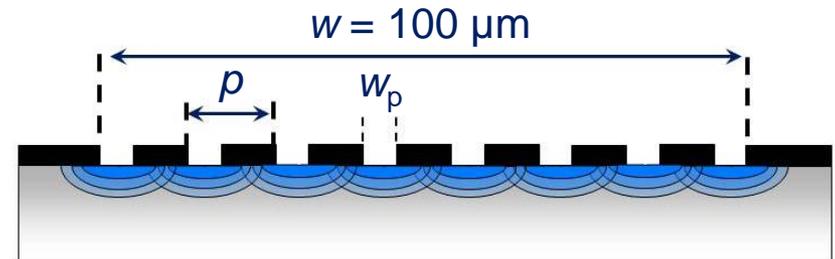
105  $\mu\text{m}$



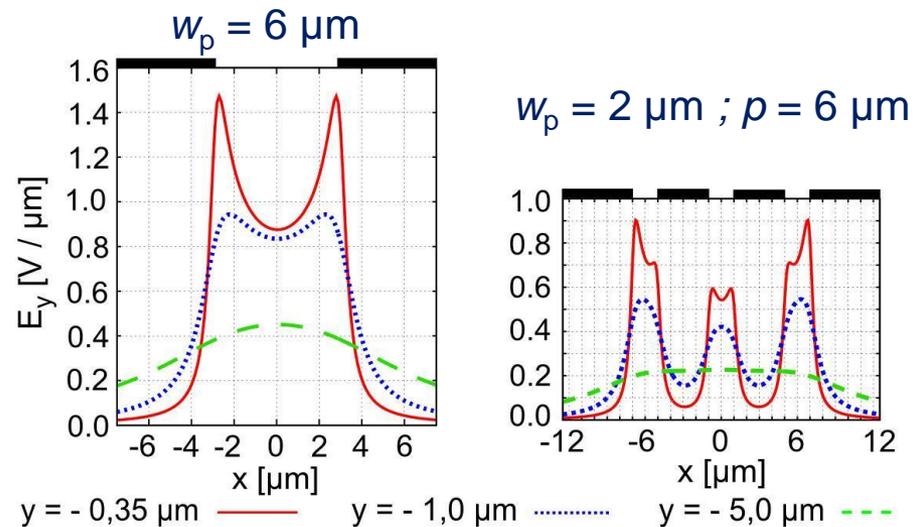
- Efficacité de couplage mesurée :  
 $\eta_{DL} = (21 \pm 1) \%$

➔ **Faible recouvrement**

## ◆ Solution : réseau de fenêtres



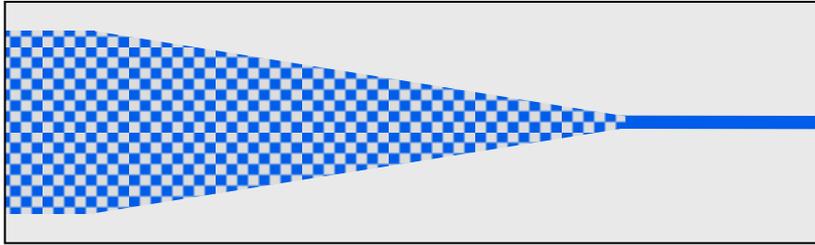
- Simulation ( $\Delta V = 0$ )



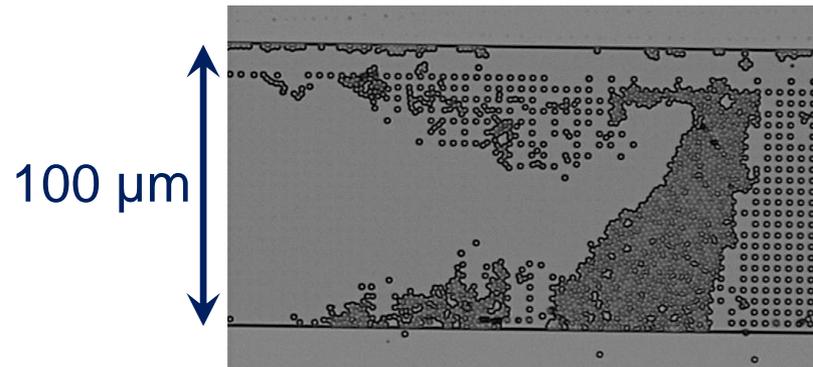
➔ **Réduction de l'effet de pointe**

## ◆ Convertisseur à plots

### ● Structure



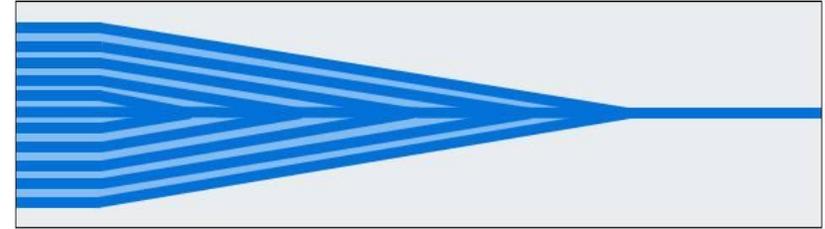
### ● Fabrication (plots 2 $\mu\text{m}$ x 2 $\mu\text{m}$ )



→ **Décollement des plots de résine**

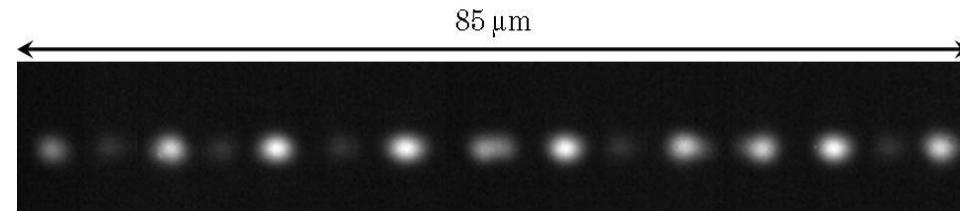
## ◆ Convertisseur à réseau

### ● Structure



Taille minimale inscriptible :  
 $p = 6 \mu\text{m}$  ;  $w_p = 2 \mu\text{m}$

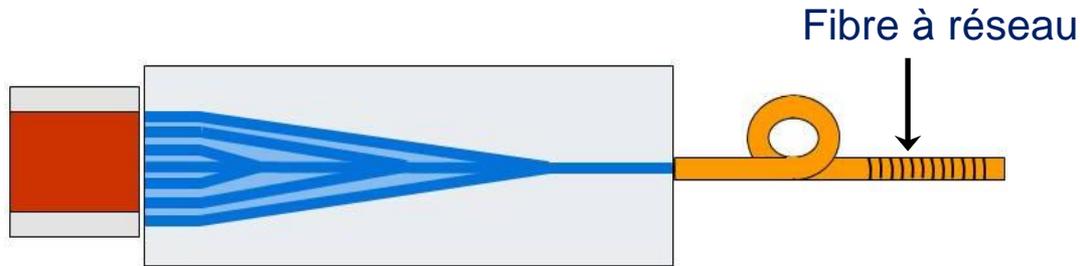
### ● Intensité en sortie du GO large



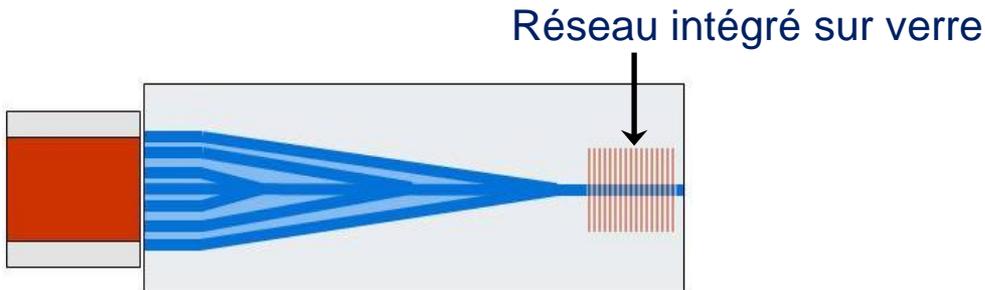
→ **Inhomogène mais**  
 $\eta_{DL} = (47 \pm 2) \%$

## ◆ Deux étapes de validation

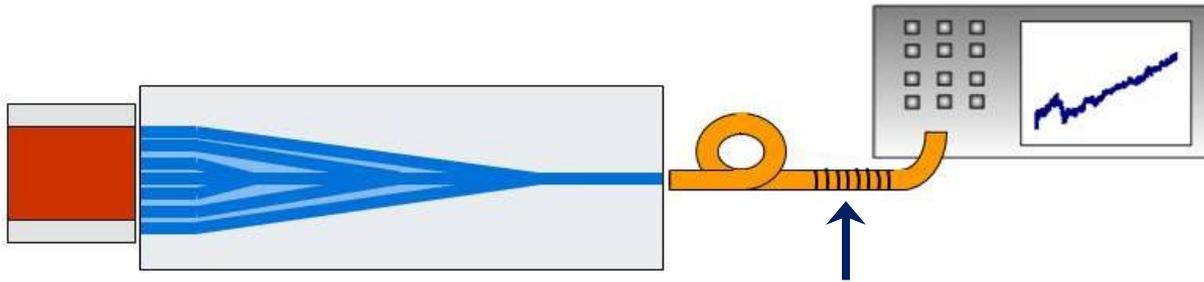
### ● Démonstration du verrouillage



### ● Intégration du réseau de Bragg

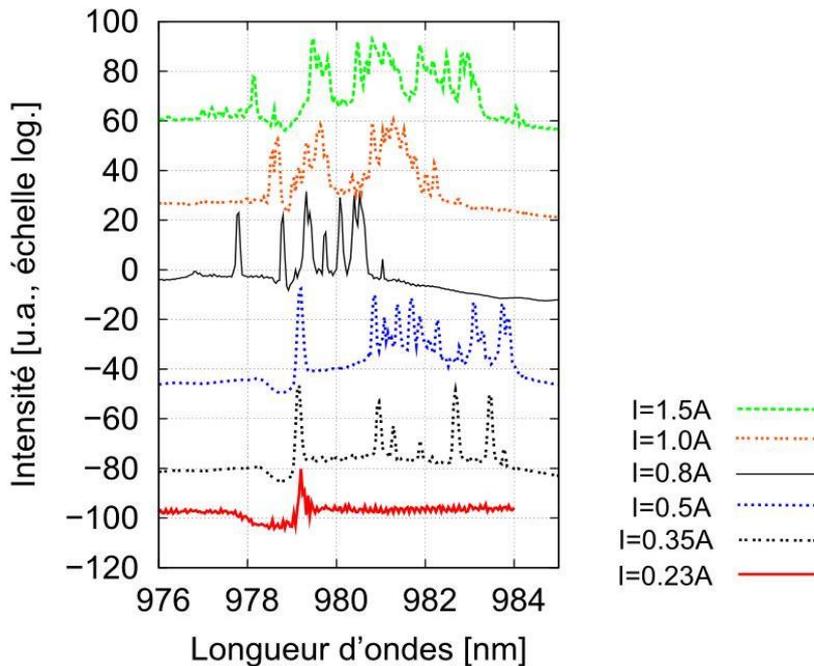


## ◆ Convertisseur à réseau



$$R_B (979 \text{ nm}) = 80 \% ; \Delta\lambda_B = 0,3 \text{ nm} ; L_{\text{ext}} = 1 \text{ m}$$

## ◆ Spectre en sortie



### ● Réduction du seuil

$$I_{\text{th}} = 245 \text{ mA} \rightarrow I_{\text{th}} = 225 \text{ mA}$$

### ● Pic autour de $\lambda_B$

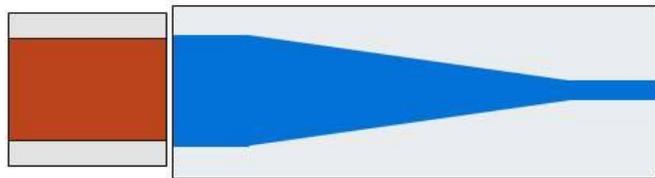
### ● Plusieurs pics lasers

Répartition  $m=0$  inhomogène



**Influence de la rétroaction**  
**Absence de verrouillage**

## ◆ Convertisseur classique



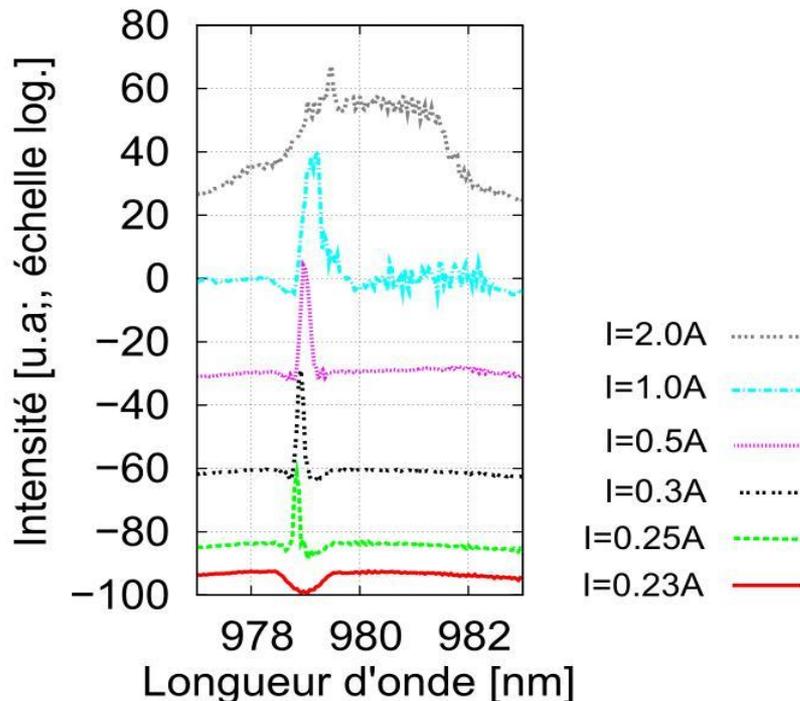
Analyseur de spectre optique



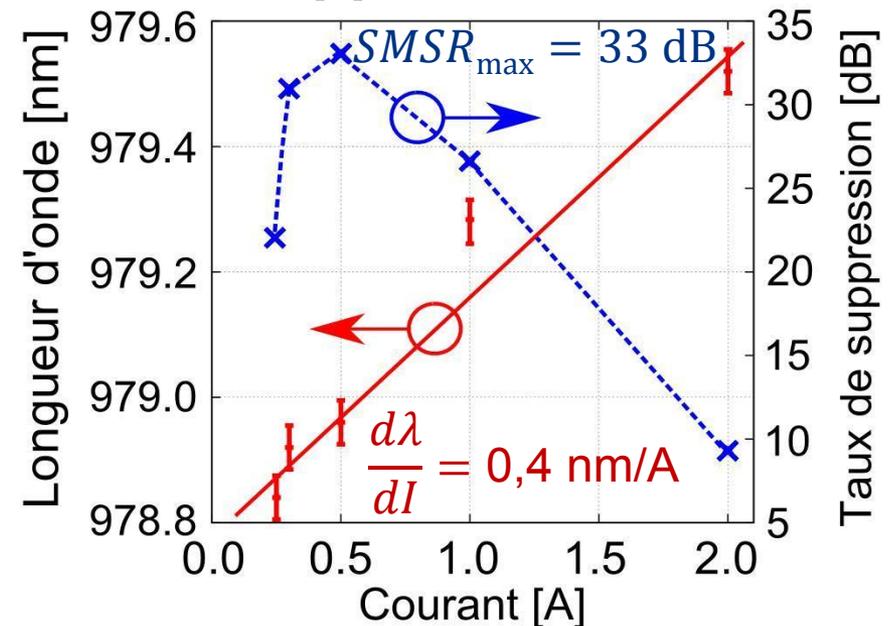
$$R_B(979\text{nm}) = 80\% ;$$

$$\Delta\lambda_B = 0,3\text{ nm} ; L_{\text{ext}} = 1\text{ m}$$

## ◆ Spectre en sortie

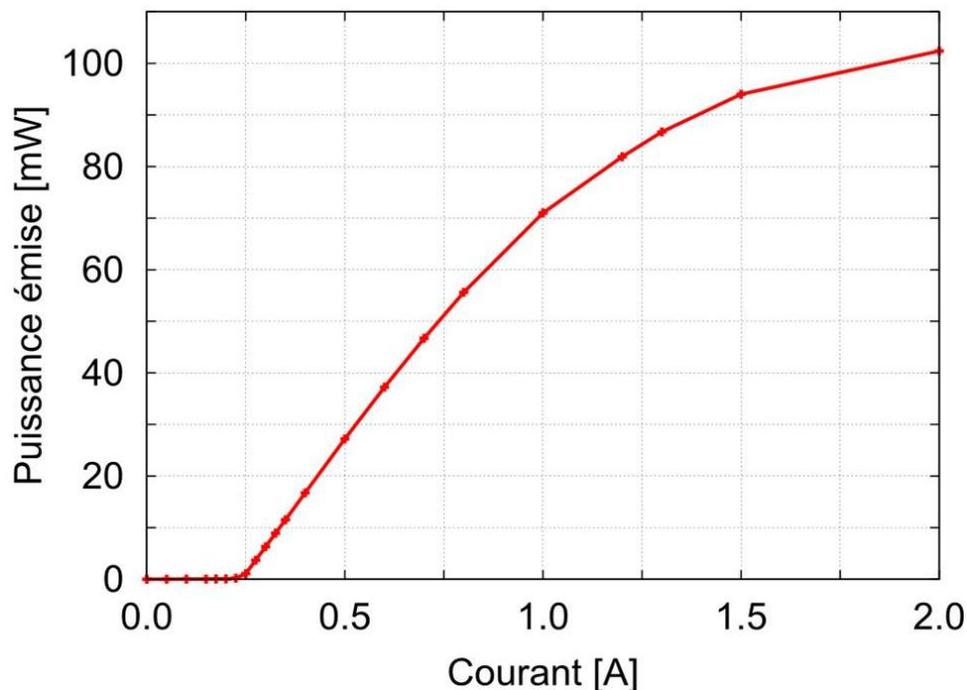


## ◆ Taux de suppression



**Verrouillage spectral**

## ◆ Loi de puissance / courant



- $I_{\text{seuil}} = 245 \text{ mA}$

Pas de réduction :

$$\eta_{\text{DL}} = (21 \pm 1)\%$$

$$\eta_{\text{FO}} = (69 \pm 7)\%$$

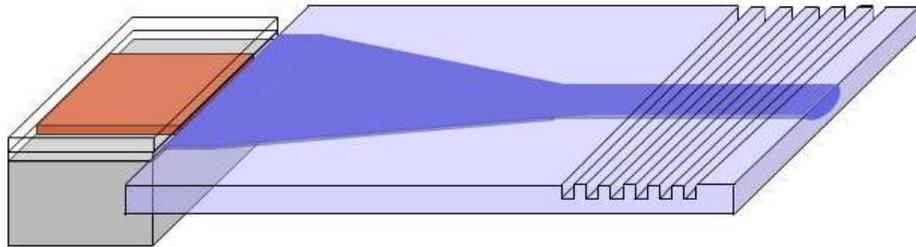
- Loi de puissance non linéaire pour  $I > 0,8 \text{ A}$

Rétroaction  
insuffisante

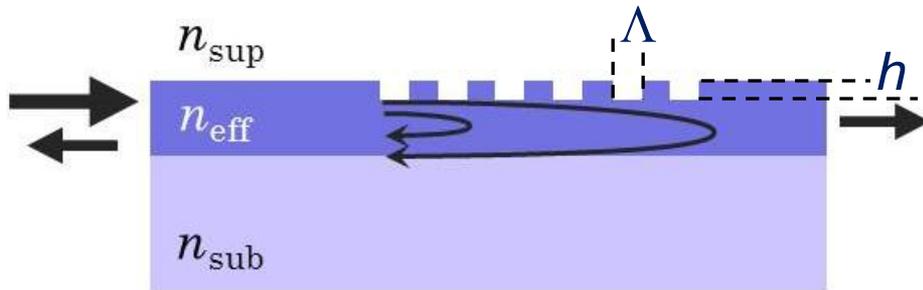
- $P(I = 1,5 \text{ A}) = 94 \text{ mW}$   
Sans réseau :  
 $P = 7,5 \text{ mW}$

**→ Verrouillage modal**

## ◆ Intégration du réseau



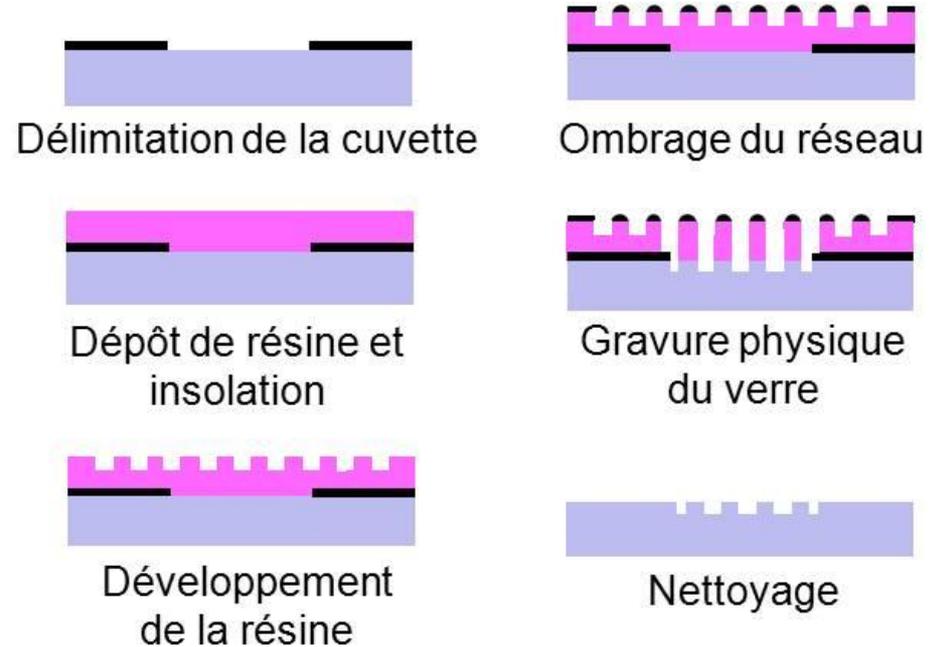
### ● Guide de Bragg



$$\Lambda = \frac{\lambda_B}{2n_{\text{eff}}} = \frac{977}{2 \times 1,521} \text{ nm}$$

$$\rightarrow \Lambda = (321 \pm 1) \text{ nm}$$

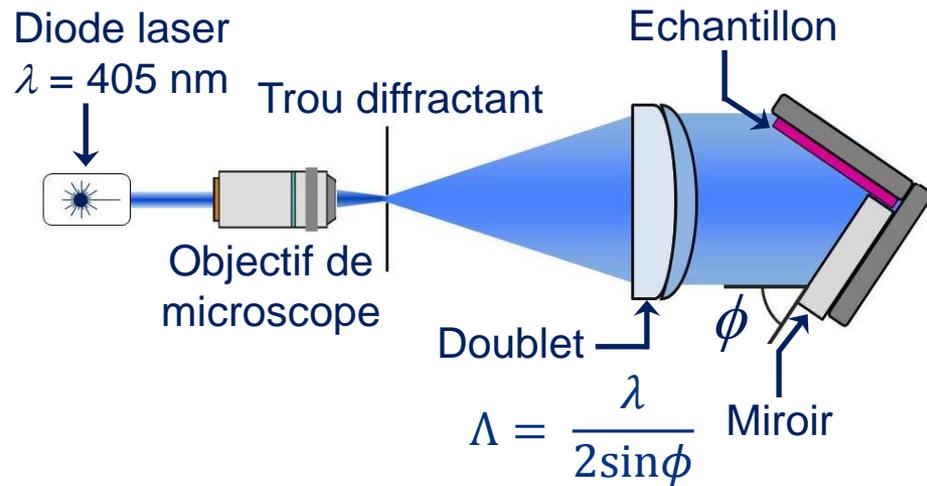
## ◆ Procédé de fabrication



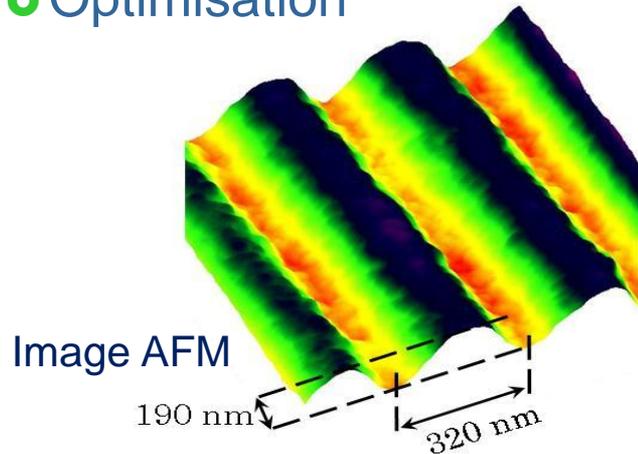
● Qualifié pour  $\Lambda = 500 \text{ nm}$

$\rightarrow$  **A développer pour  $\Lambda = 320 \text{ nm}$**

## ◆ Inscription dans la résine



### ● Optimisation

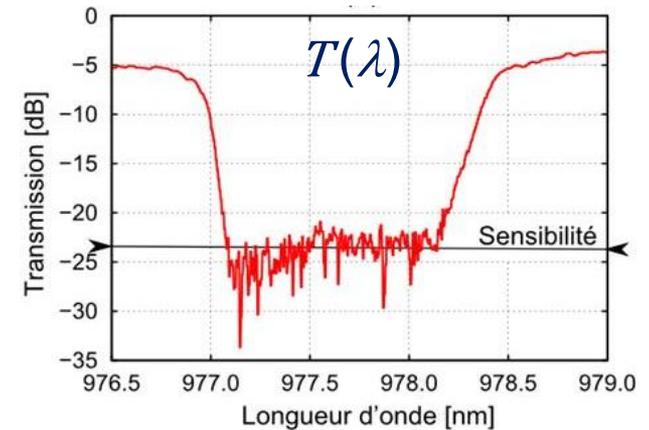
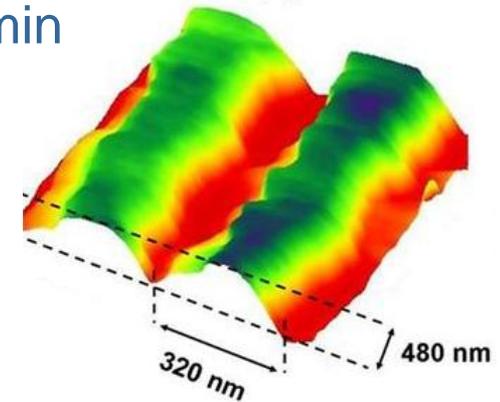


➔ **Holographie qualifiée**

## ◆ Gravure du verre

- Gravure physique ( $\text{SF}_6 + \text{CHF}_3$ )
- $t_{\text{RIE}} = 40 \text{ min}$

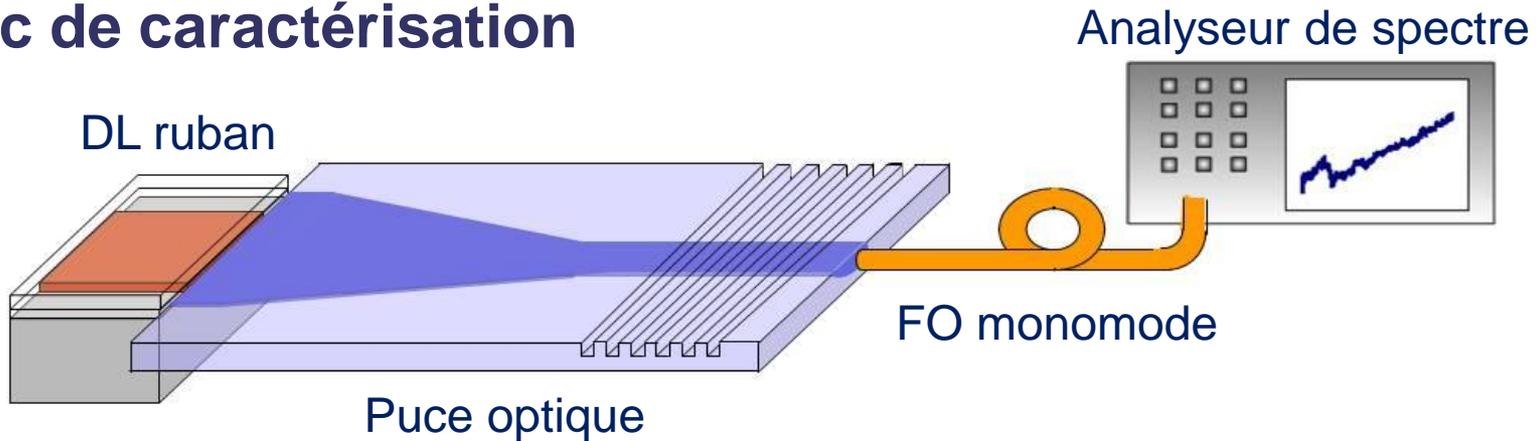
Image AFM



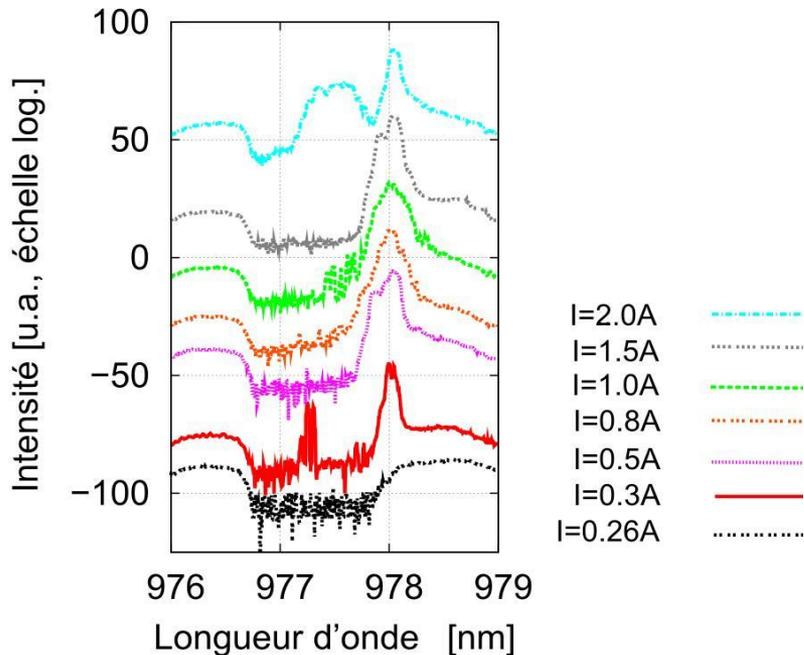
$$\lambda_B = (977,6 \pm 0,5) \text{ nm}$$

➔ **Procédé validé**

## ◆ Banc de caractérisation



## ◆ Spectres



- Pic stable autour de  $\lambda_B$   
 $0,10 \text{ nm} < \Delta\lambda_B < 0,50 \text{ nm}$   
 $d\lambda/dT < 0,07 \text{ nm}\cdot\text{A}^{-1}$   
 $SMSR > 20 \text{ dB}$  pour  $I < 1,8 \text{ A}$

→ **Verrouillage intégré démontré**

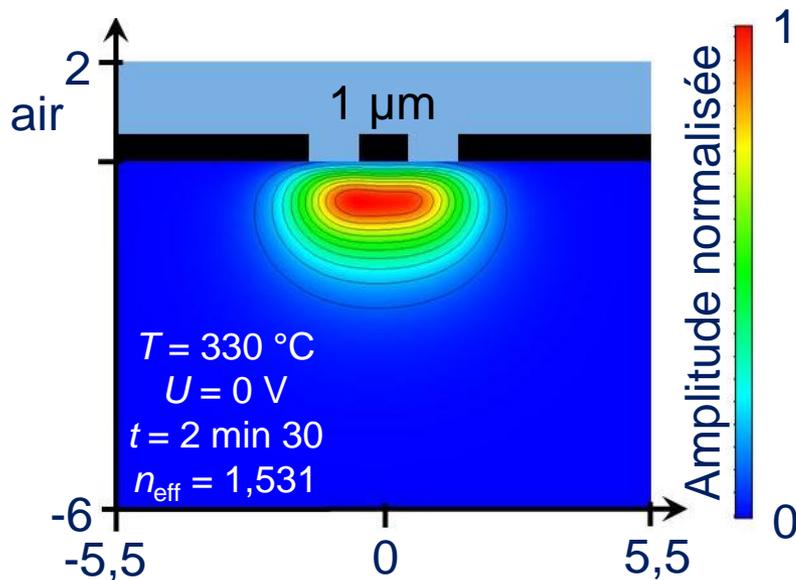
- Puissance en sortie  
 $R_B$  élevée & faible couplage  
 $P_s (I = 1,5 \text{ A}) = 700 \mu\text{W}$

## ◆ Améliorer le couplage avec la diode laser

- Démonstrateur :  $\eta_{DL} = (21 \pm 1)\%$
- Convertisseur à réseau :  $\eta_{DL} = (47 \pm 2)\%$

➔ **Resserrer le réseau de fenêtre**

### ● Simulation



➔ **Mode fondamental adapté**

## ◆ Diminuer la force du réseau

- Supprimer la résine résiduelle après développement

Modification de la résine

Nettoyage  $\text{O}_2$  avant gravure

➔ **Contrôle fin de la durée de gravure dans le verre**

## ◆ $P_{\text{pompe}}$ maximale

- $\alpha_c^{DL} = 70 \%$  :  $R_B = 7 \%$

$$\rightarrow P_p^{\text{fibre}} = 0,41 \times P_{DL}$$

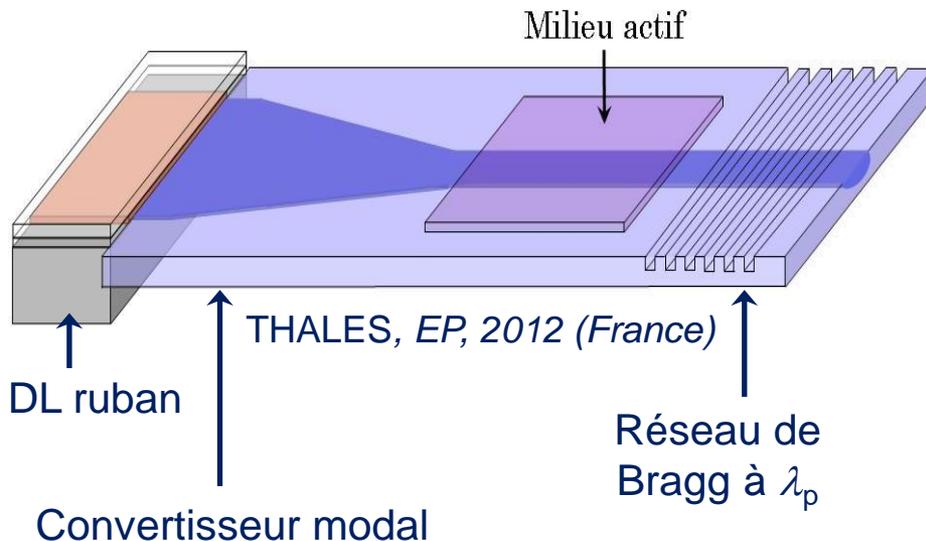
➔  **$P_p^{\text{fibre}} = 800 \text{ mW}$**

## ◆ Pompage monolithique

- $R_B$  élevée

→ **Puissance intra-cavité élevée**

- Pompage intra-cavité



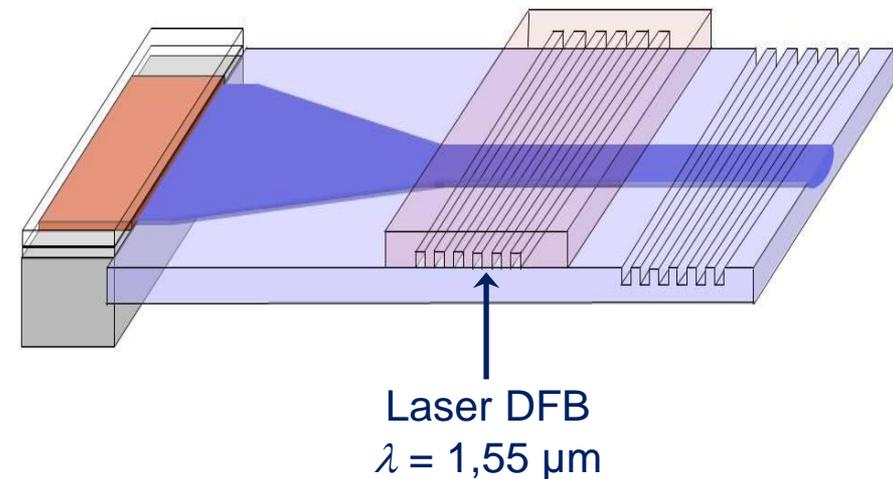
## ◆ Pompage laser DFB

- Milieu non linéaire

Génération de seconde harmonique

- Laser DFB encapsulé

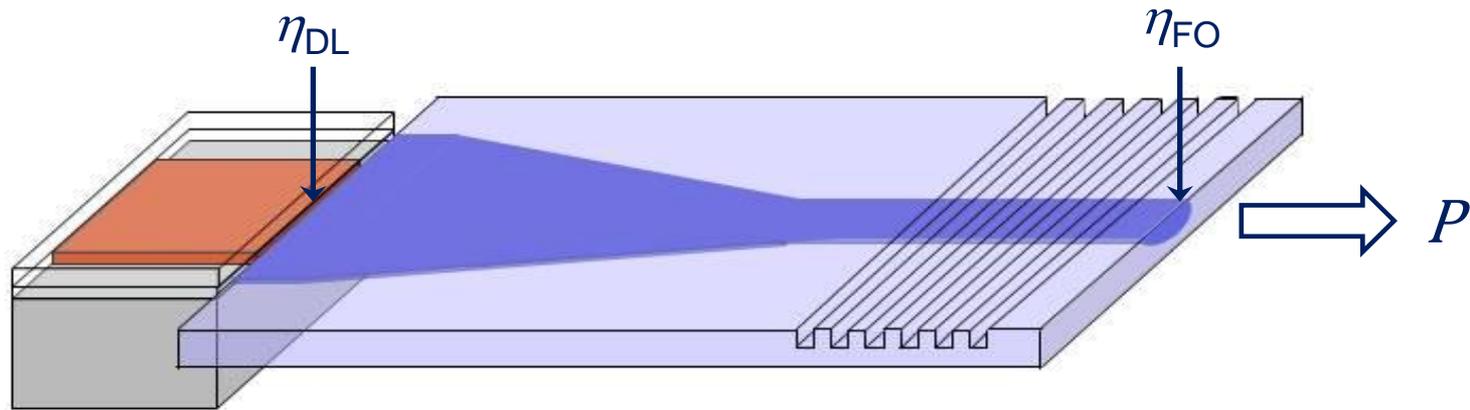
Casale et al., *Proc. of SPIE* (8264), 2012



→ **Laser DFB monolithique**

◆ **Objectif : réalisation d'une source de pompe optique pour l'avionique**

- BALD & convertisseur modal sur verre
- Rétroaction optique avec réseau de Bragg



◆ **Réalisation d'un convertisseur modal**

- Couplage en entrée :  $\eta_{DL} = 50 \%$
- Couplage en sortie :  $\eta_{FO} = 70 \%$
- Transition adiabatique

◆ **Verrouillage de la BALD**

- Démonstration de la faisabilité
- $P = 700 \mu\text{W}$

◆ **Perspectives**

- $P = 800 \text{ mW}$
- Pompage intra-cavité