



www.thalesgroup.com

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

Thomas Nappez

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

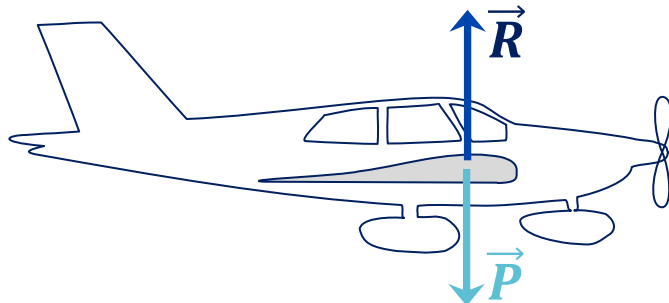
◆ Avionique

- Equipements électroniques

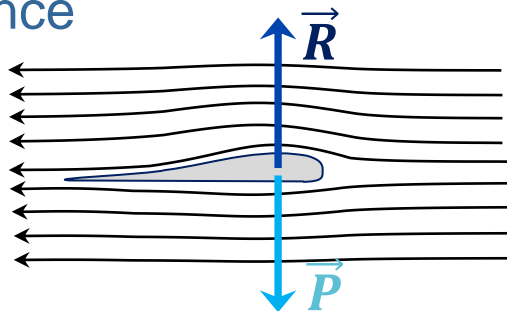
→ **Garantir la sécurité du vol**

◆ Principe du vol

- Compenser le poids



- Portance



→ **Mesure continue de V_{air}**

◆ Système anémo-barométrique



Sonde de Pitot



Sonde de pression statique



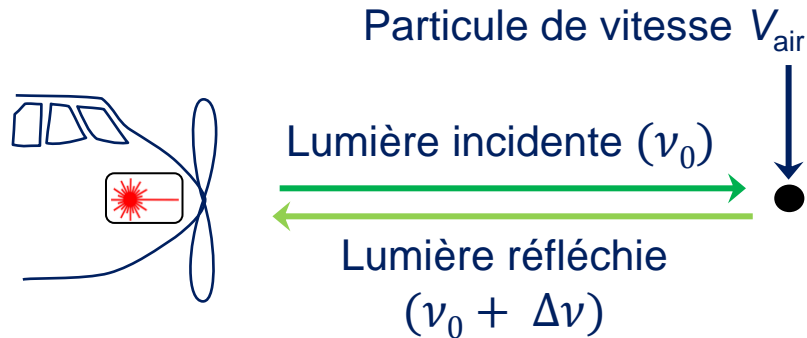
- Recommandation

2nd 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 kg

Intérêt démontré ☺

Mesure de référence ☺

Encombrant ☹

➔ **Intégration**

◆ Technologie fibrée (DALHEC 2001)

● Laser à fibres Er³⁺



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

Encombrement réduit
Composants bas coût
Sécurité oculaire
Vibration mécanique



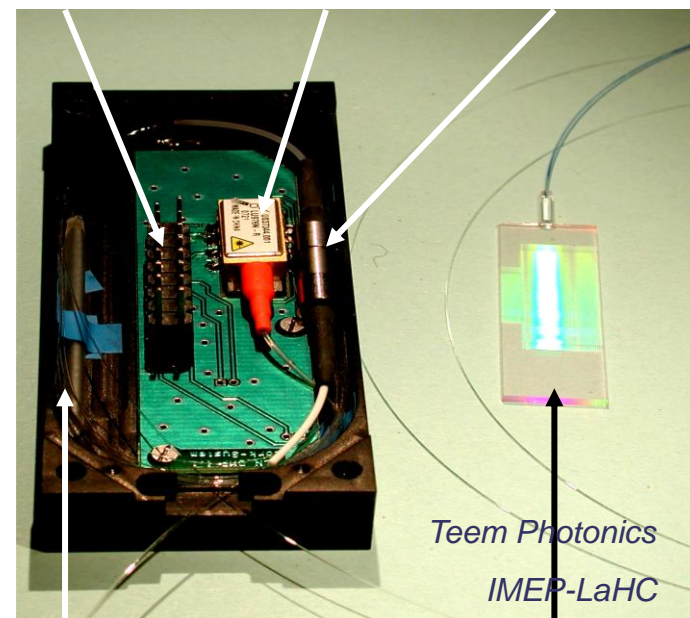
➔ **Technologie planaire**

◆ Optique intégrée sur verre (NESLIE 2006)

● Laser DFB sur verre Yb³⁺/Er³⁺

Commande électrique

Diode laser de pompe 0,98 μm Isolateur



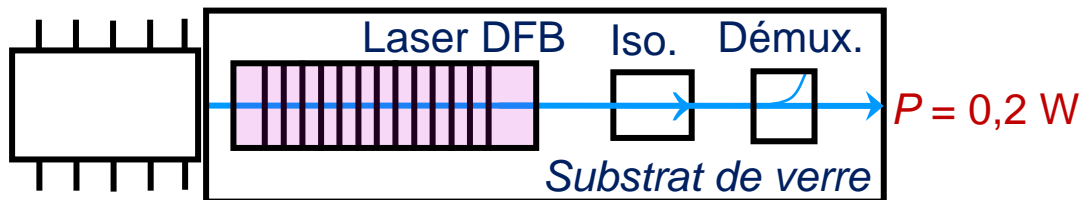
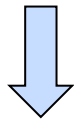
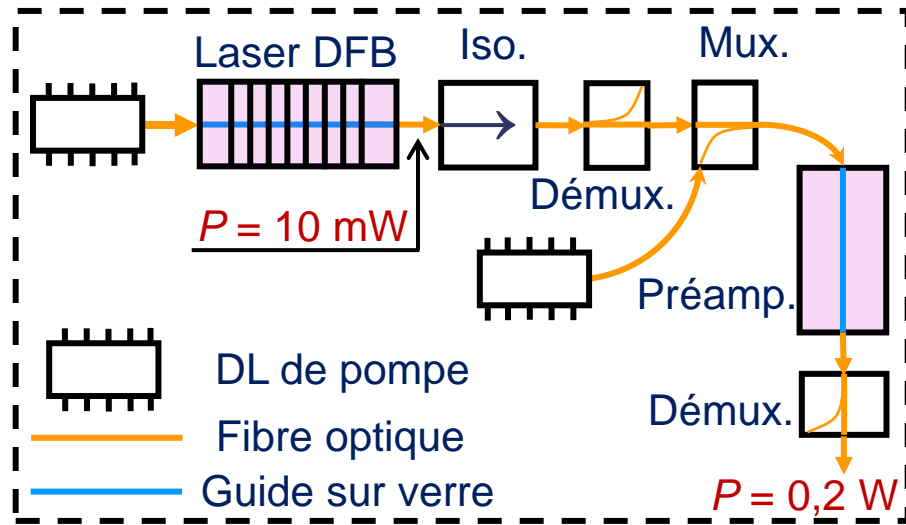
Multiplexeur

Puce optique laser 1,55 μm



Fiabilité ?

◆ Système actuel



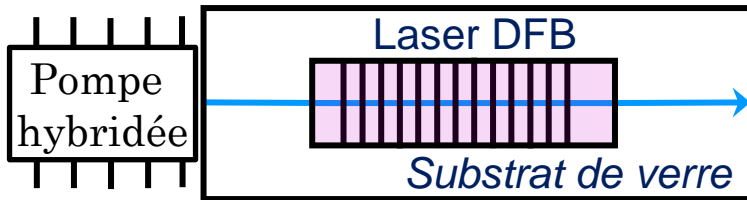
→ **Suppression des fibres optiques**
Suppression du préamplificateur

◆ Intégration sur verre

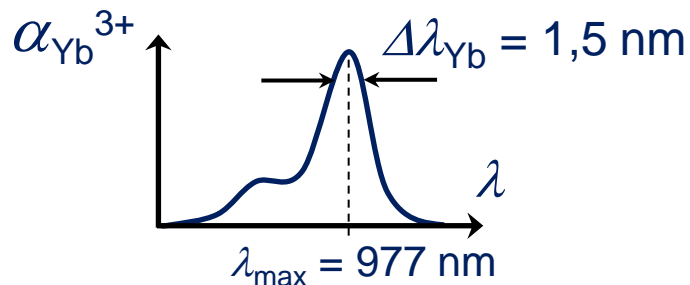
- Multiplexeur (Onestas, 2011)
- Isolateur (Collaboration LT2C, St Etienne)
- Diode laser
 - Hybridation d'une diode laser sur verre
 - Suppression d'un étage d'amplification

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

◆ Contraintes



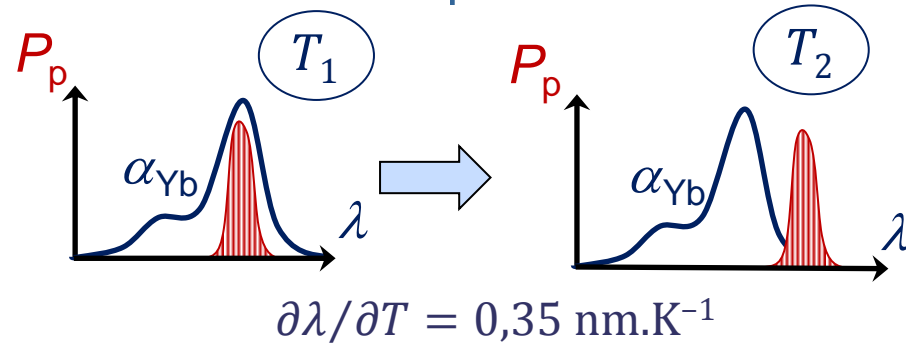
- Puissance en sortie DFB > 200 mW
Efficacité 5 % $\rightarrow P_{\text{pompe}} > 4 \text{ W}$
- Recouvrement pompe/signal
 \rightarrow Monomode
- Pompage Yb^{3+} sur verre



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

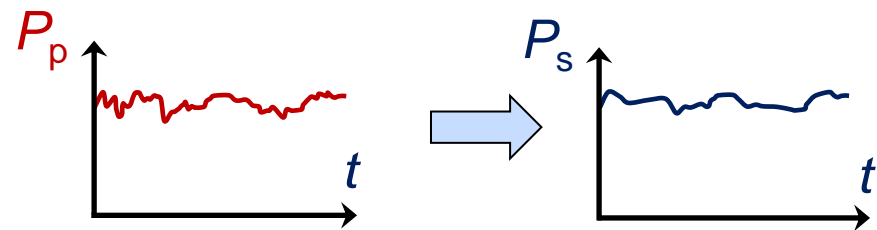
◆ Instabilités d'une DL

● Instabilité spectrale



\rightarrow **Perte de puissance**

● Instabilité temporelle

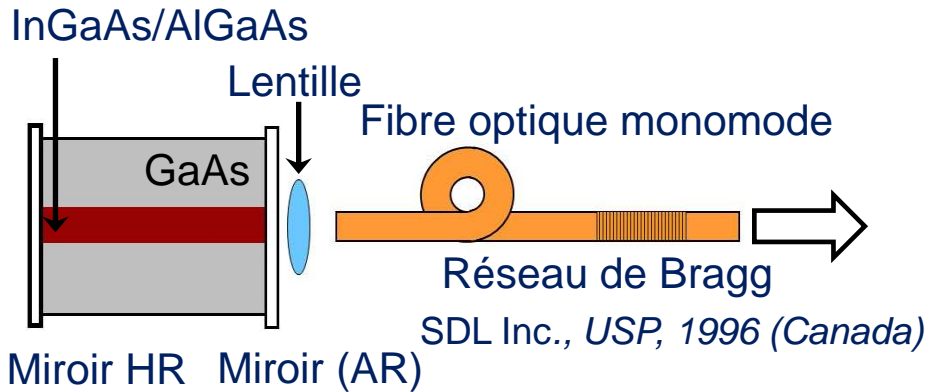


\rightarrow **Bruit sur le laser DFB**

\rightarrow **Stabilisation :
rétroaction optique**

◆ Diode laser à ruban étroit

- Emission monomode

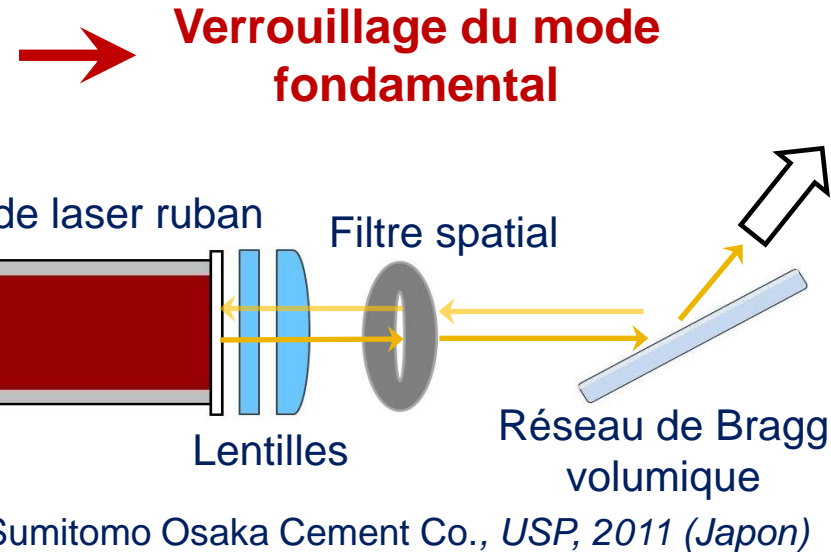


- $R_B = (1..10) \%$
- $L_{\text{ext}} = (5..200) \text{ cm}$
- $\partial\lambda/\partial T = 0,01 \text{ nm.K}^{-1}$
- $P_s^{\text{max}} = 1 \text{ W}$ (densité de puissance)

➔ **Puissance limitée**

◆ Diode laser à ruban large

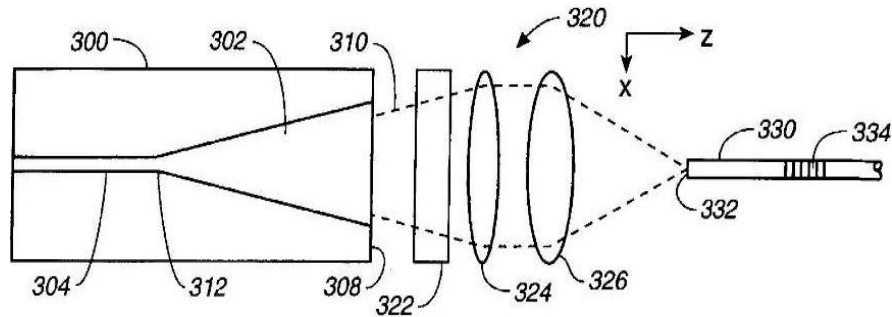
- Emission multimode



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

➔ **Instabilité mécanique**

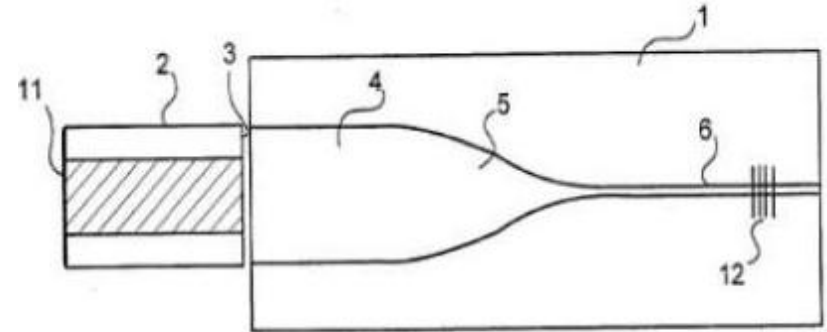
◆ Intégration du filtre spatial



JDS Uniphase, USP, 2003 (USA)

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

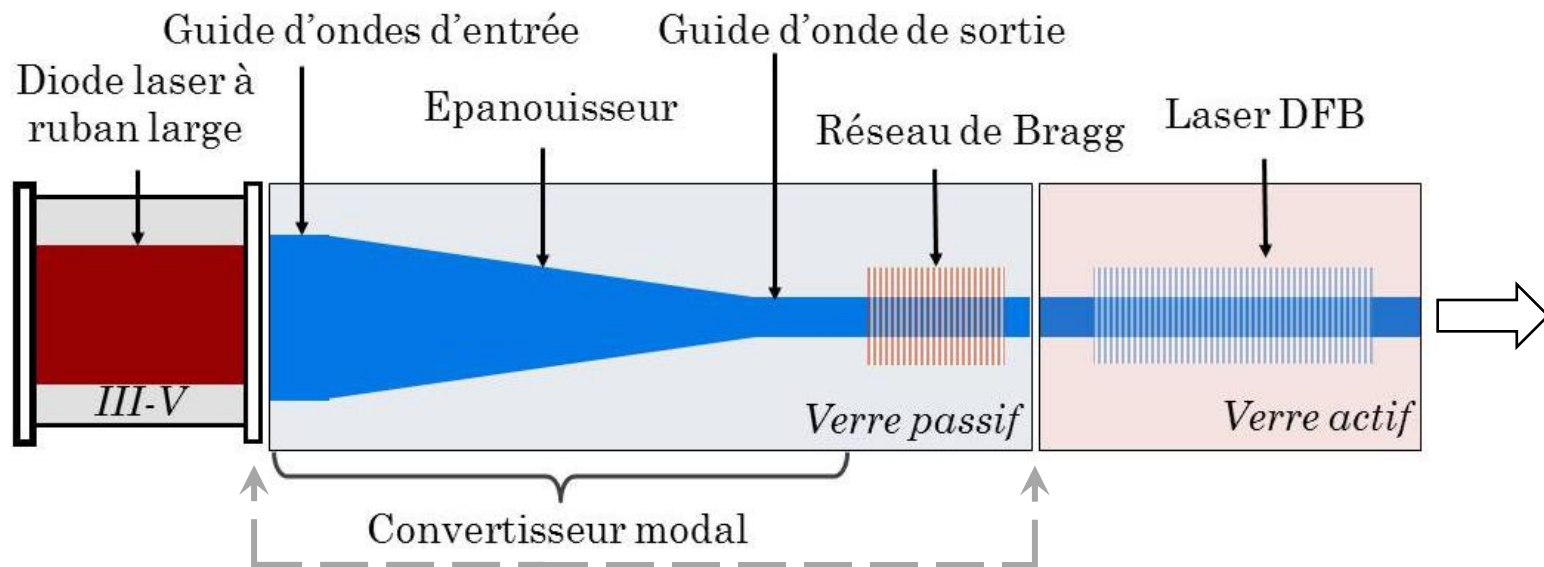
◆ Intégration monolithique



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

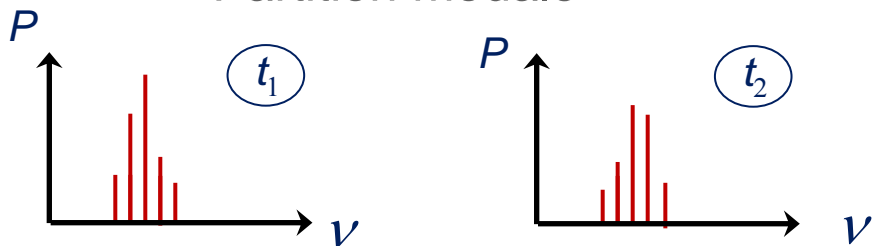
Stabilité spectrale

Verrouillage modal

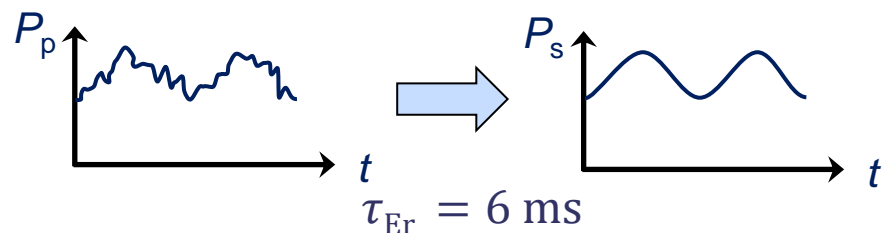
◆ Variations de puissance

● Origine des variations

Partition modale



● Influence des variations

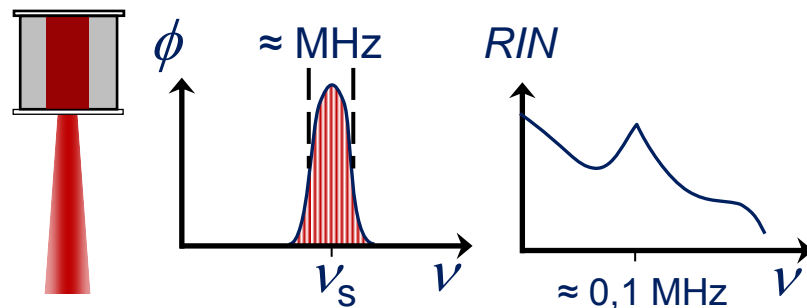


➔ **Problème des variations lentes**

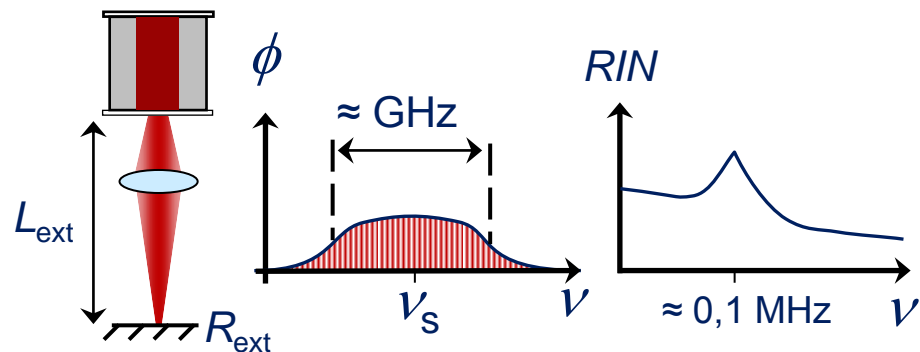
➔ **Solution : émission fortement multifréquence**

◆ Effondrement de cohérence

● Diode laser seule



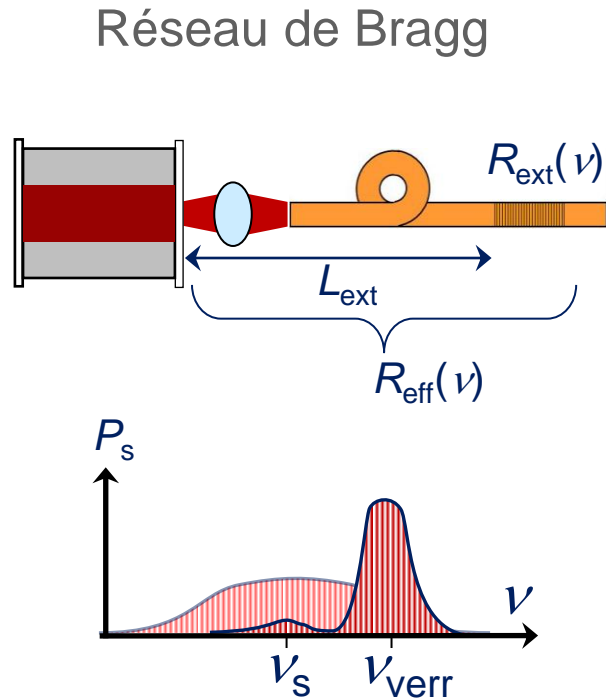
● Diode laser avec rétroaction



➔ **Bruit filtré mais spectre large**

◆ Principe

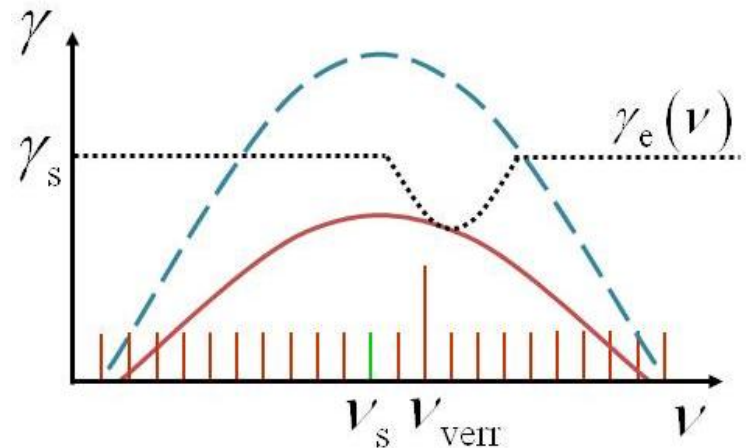
- Réflexion sélective en fréquence



➔ **Contrôle de l'émission**

◆ Mécanisme

- Diode laser avec rétroaction



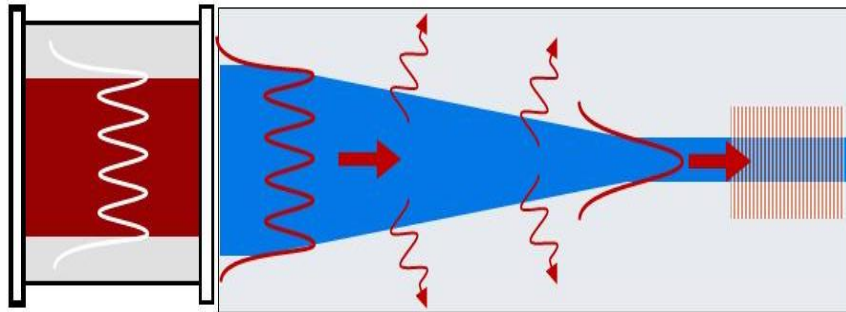
- Condition de stabilisation

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

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

◆ Filtrage des modes d'ordre supérieur

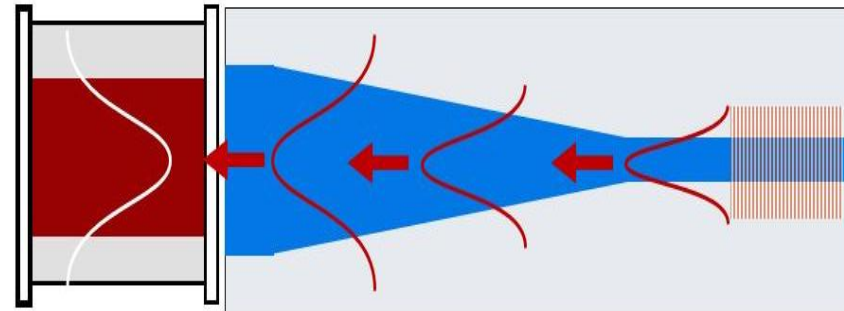
- Epanouisseur dans la cavité externe



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

◆ Réflexion du mode fondamental

- Rétroaction sur la partie monomode



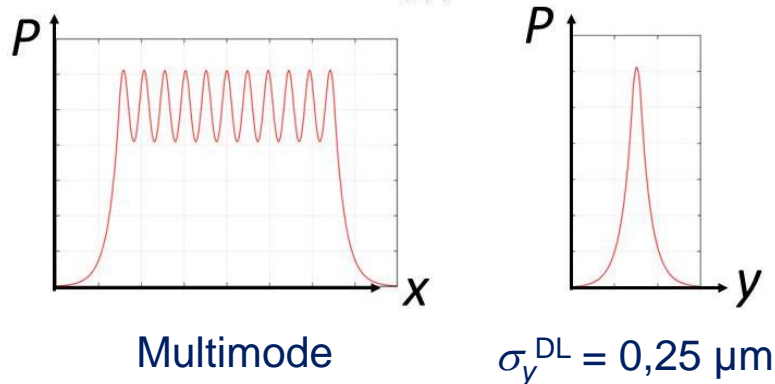
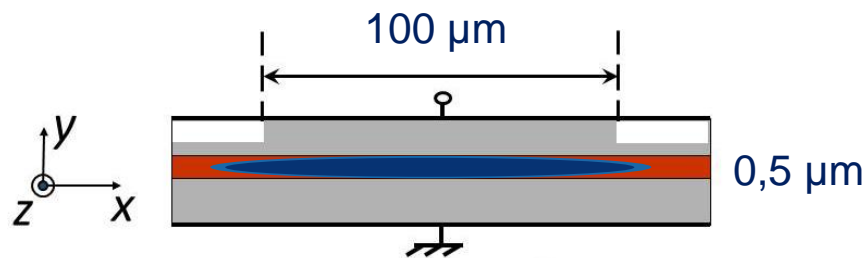
➔ **Diminution des pertes pour $m = 0$**

- Transition adiabatique

➔ **Dimensionnement de l'épanouisseur**

◆ Guide d'onde d'entrée

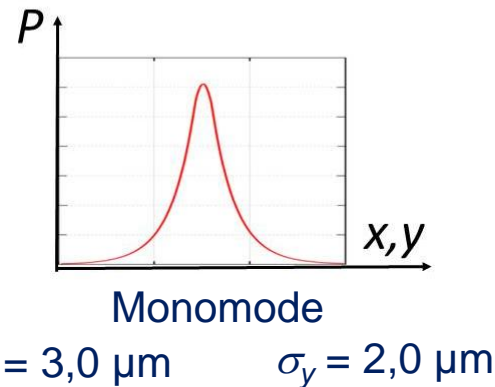
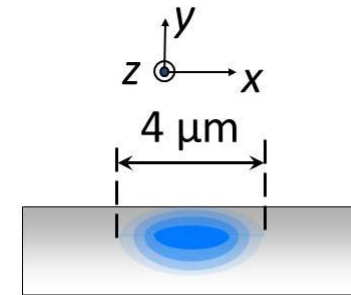
● Modes d'une diode laser



● Asymétrie & fort confinement

◆ Guide d'onde de sortie

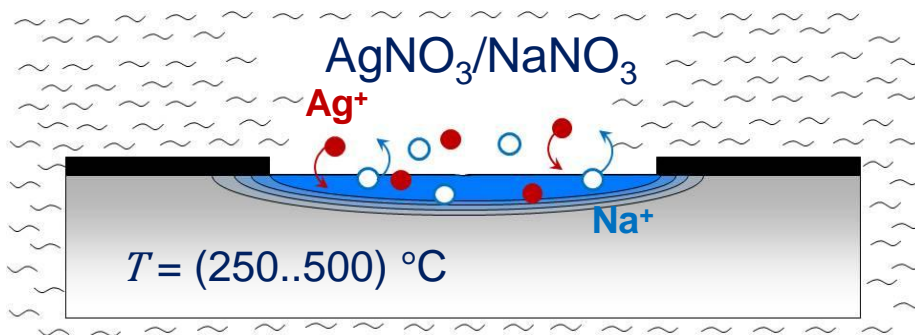
● Mode du guide actif



● Symétrie quasi-circulaire & faible confinement

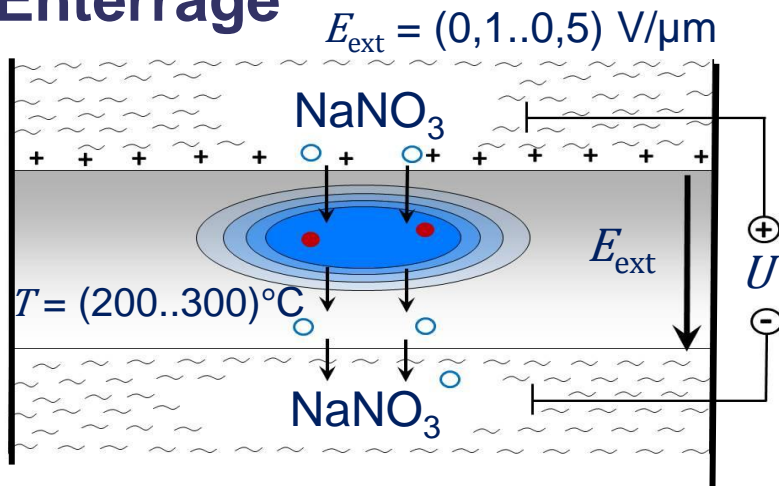
➔ **Contraintes différentes : échange d'ions sur verre**

◆ Echange d'ions thermique



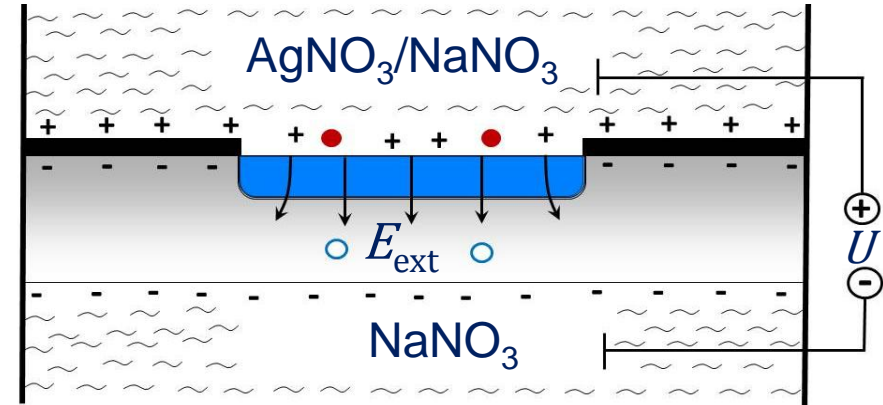
- Profil diffusé $\sigma \approx (2..5) \text{ }\mu\text{m}$

◆ Enterrage



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

◆ Echange sous champ



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

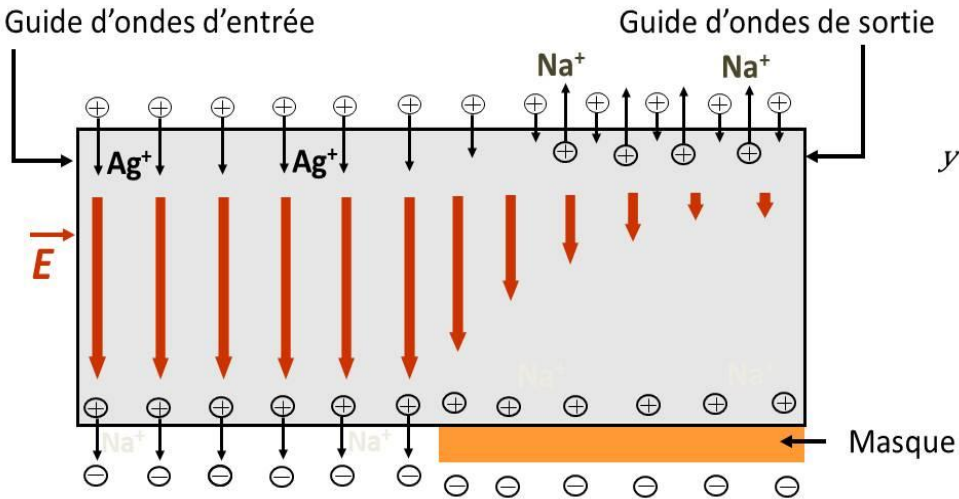
◆ Efficacité de couplage

Recouvrement vertical	Entrée	Sortie
Ech. therm.	62 ± 3	88 ± 1
Enterrage	39 ± 2	95 ± 1
ESC	76 ± 2	70 ± 3

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

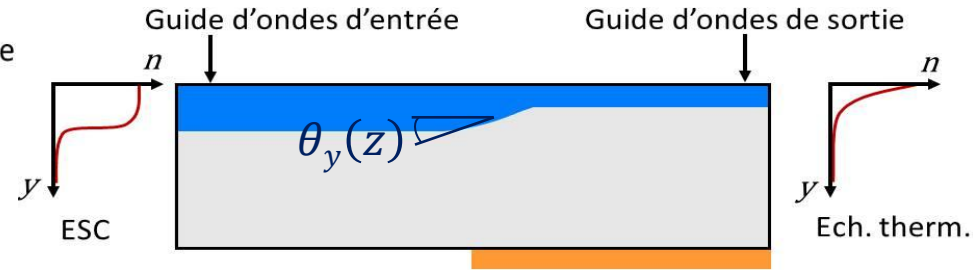
◆ Echange sous champ sélectif

◆ Adiabaticité



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

➔ **Echange thermique local**



- 90 % de variation en 5 mm

- Critère

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

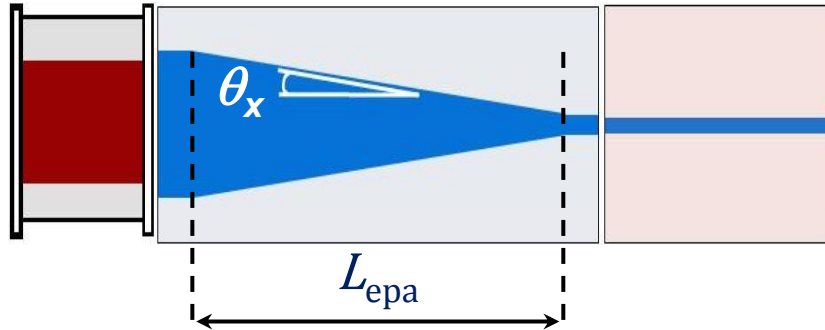
Love et al., *IEEE Proc. Of Opt.*, 1991

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

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



Paramètres technologiques fixés



THALES

◆ Organisation de l'étude

○ Dimensionnement

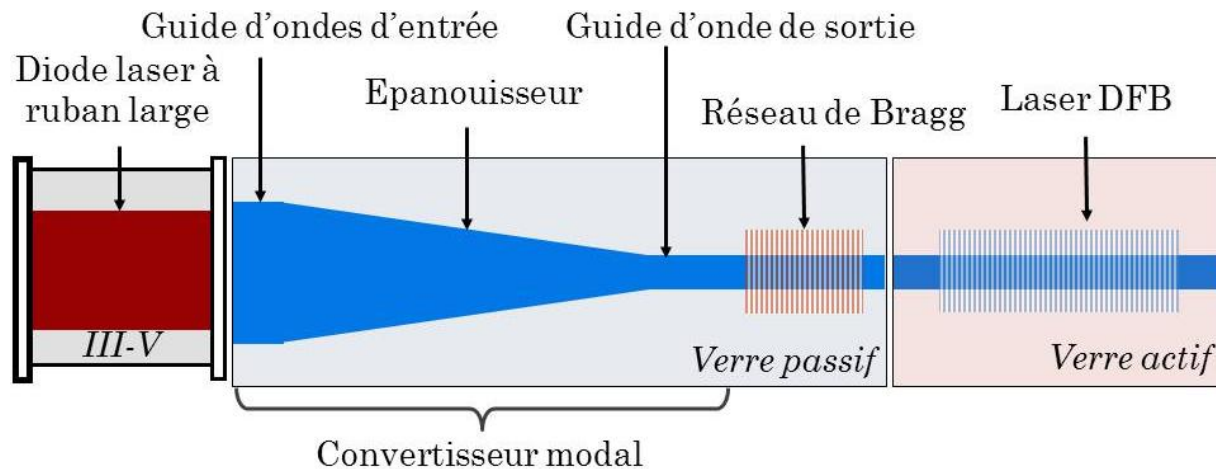
Rétroaction

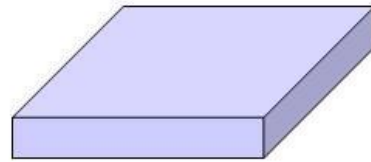
Convertisseur modal

● Réalisation et caractérisation

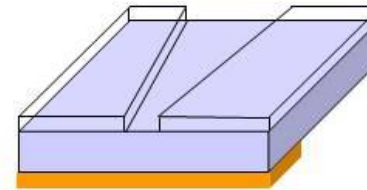
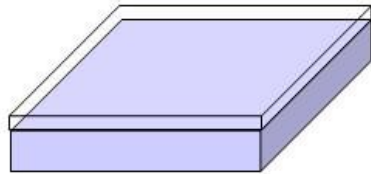
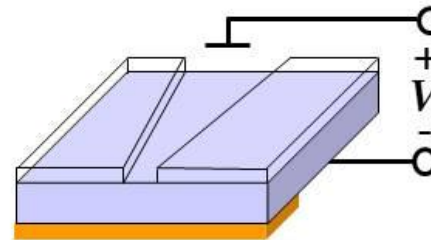
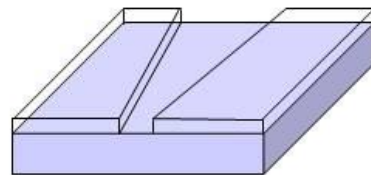
Convertisseur

Puce complète



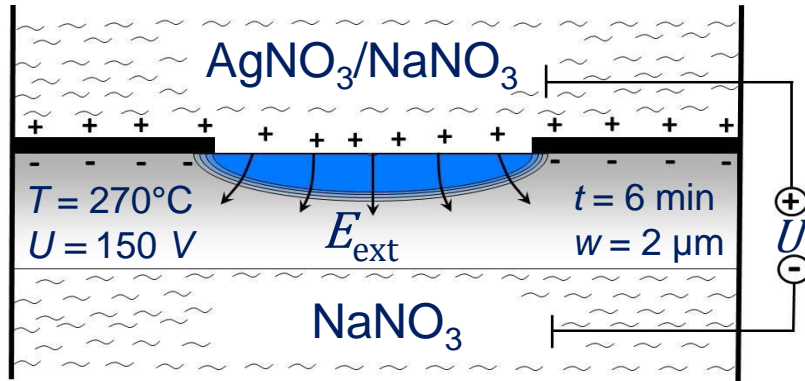


Nettoyage

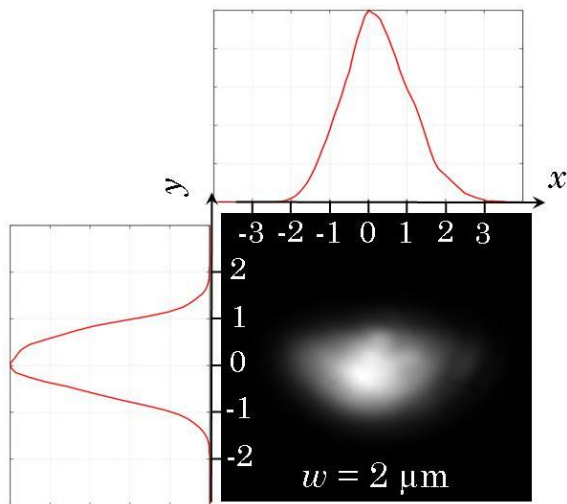
Dépôt du masque en
face arrièreDépôt d'une
couche masquanteEchange sous
champ sélectifOuverture de la fenêtre
par photo-lithographieNettoyage, découpe et
polissage

Développement de l'ESC

◆ Fabrication



◆ Profil de mode

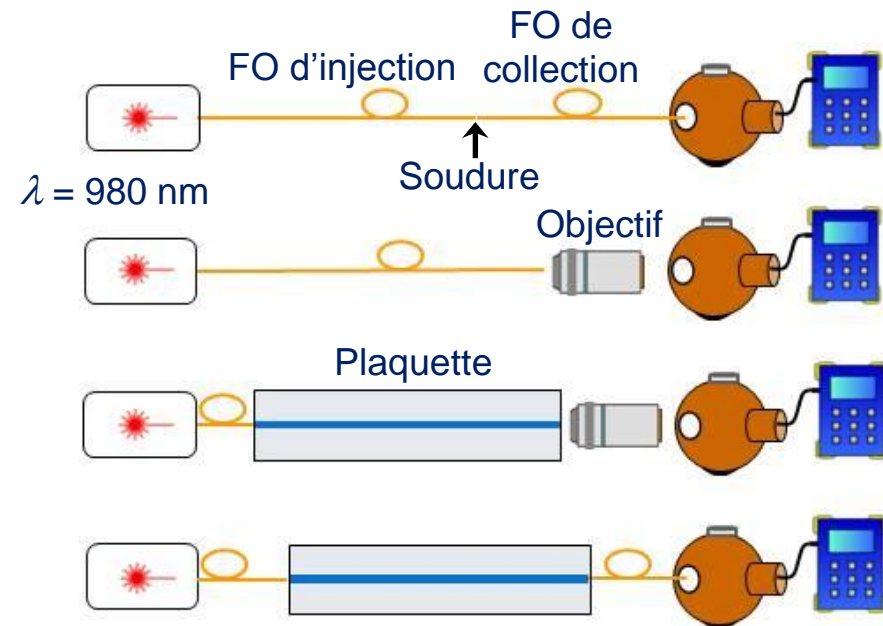


→ **Monomode**

◆ Pertes par propagation

● Bancs de caractérisation

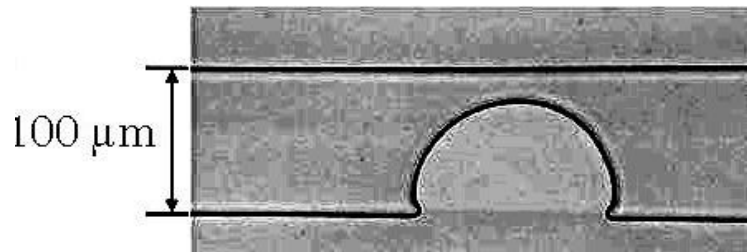
Quatre inconnues
→ quatre mesures



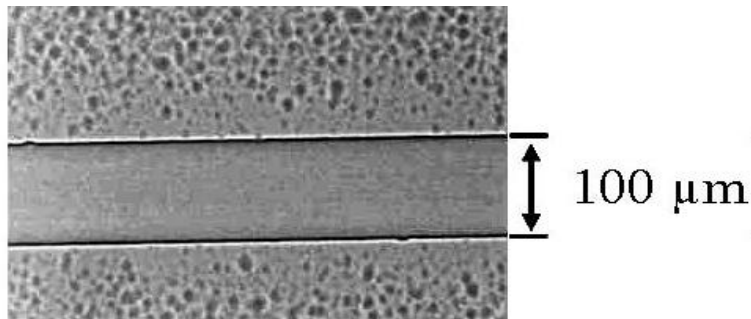
→ $P_{\text{prop}} > 4\text{ dB / cm}$

◆ Origine des pertes

- Présence de bulles dans les bains

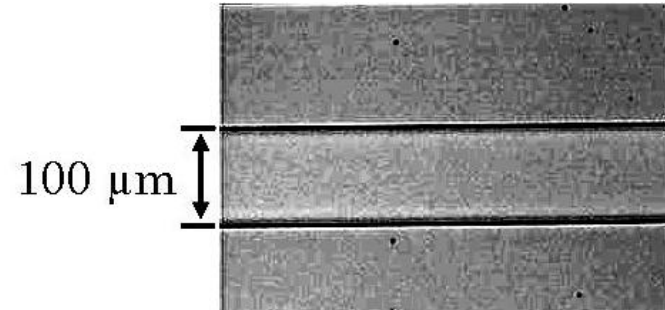


- Mauvaise tenue du masque (Al_2O_3)



◆ Optimisation

- Epaisseur Al_2O_3 doublée



- Plaquette retournée

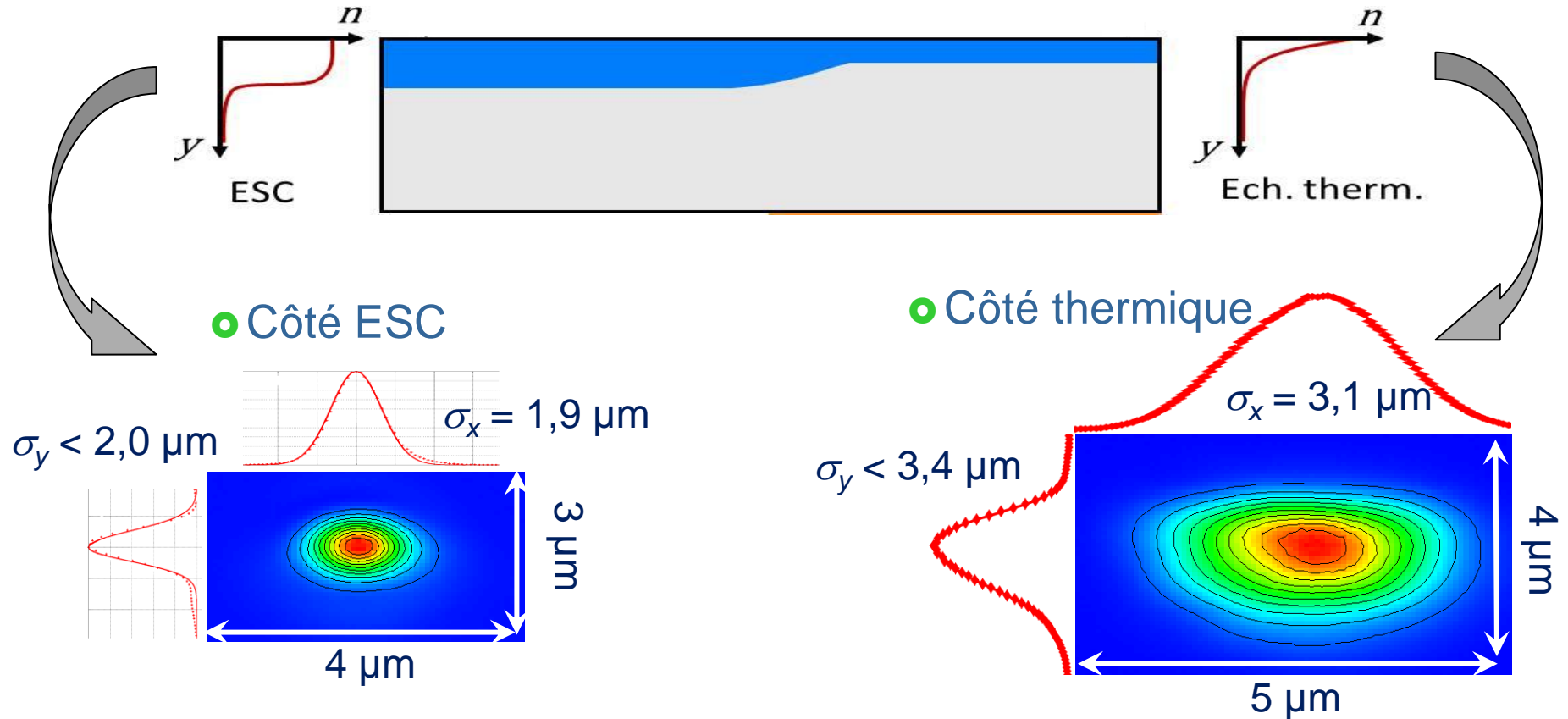
- Agitation automatique

→ Décollement des bulles

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

→ **Procédé d'ESC validé**

◆ Différence de confinement

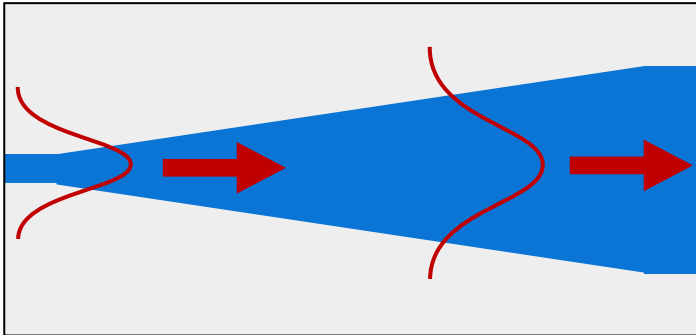


● Pertes à la transition

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

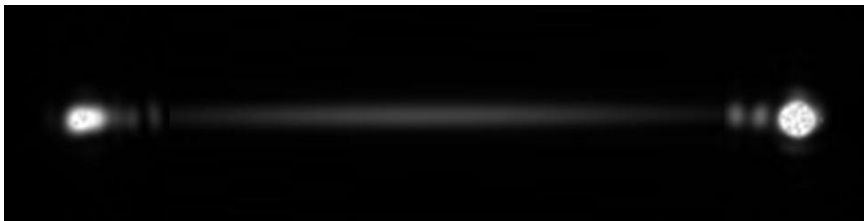
➔ **Transition verticale validée**

◆ Objectif

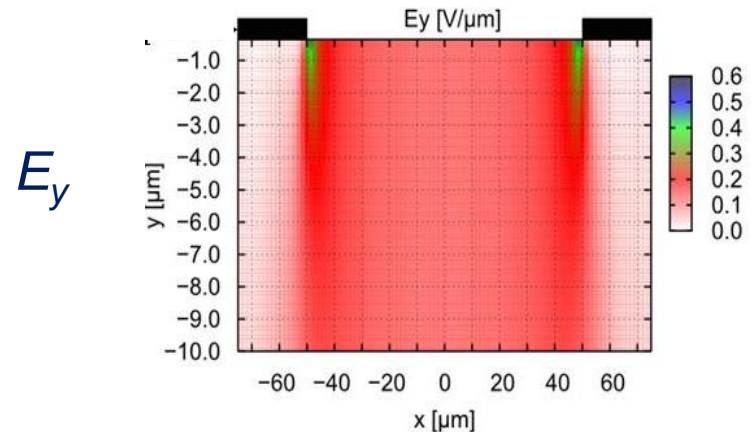


◆ Intensité en sortie

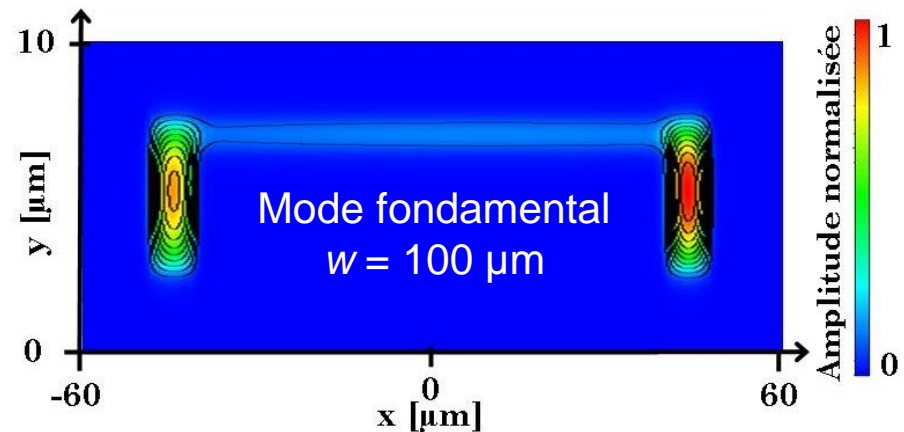
112 μm



◆ Effet de pointe lors de l'ESC



◆ Calcul du mode fondamental

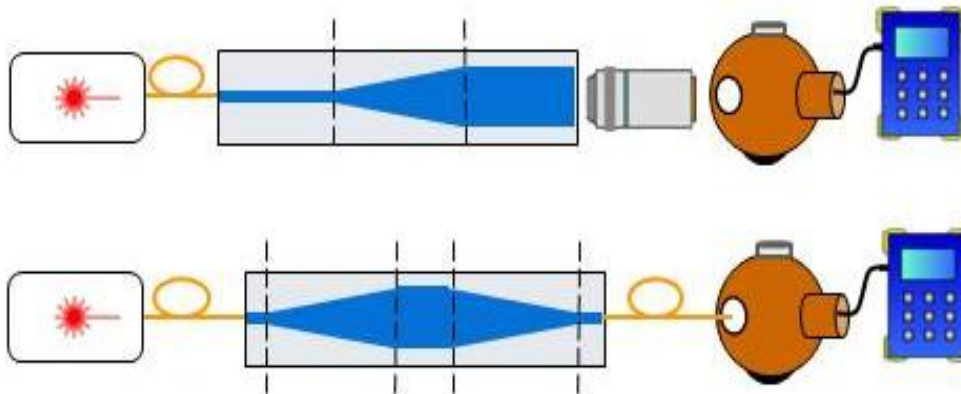


➔ **Mode fondamental excité**

◆ Mesure des pertes à la transition

● Bancs de caractérisation

Méthode des 4 mesures
+ 2 mesures supplémentaires



◆ Pertes en excès

	L_{epa} [mm]	P_{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

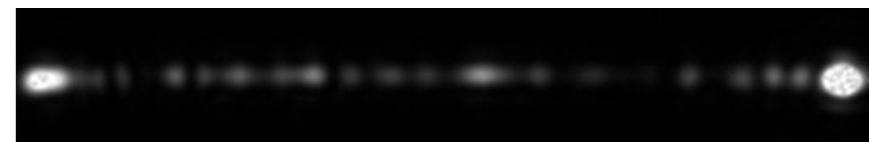
- Diode laser

105 μm



- Guide d'onde d'entrée

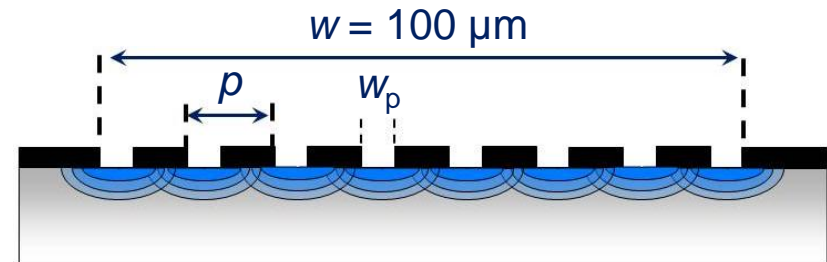
105 μm



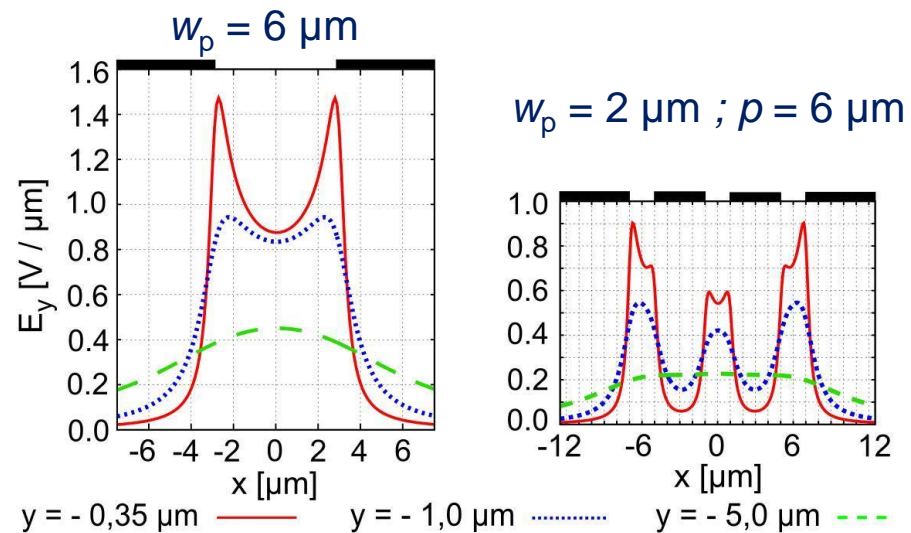
- Efficacité de couplage mesurée :
 $\eta_{DL} = (21 \pm 1) \%$

➔ **Faible recouvrement**

◆ Solution : réseau de fenêtres



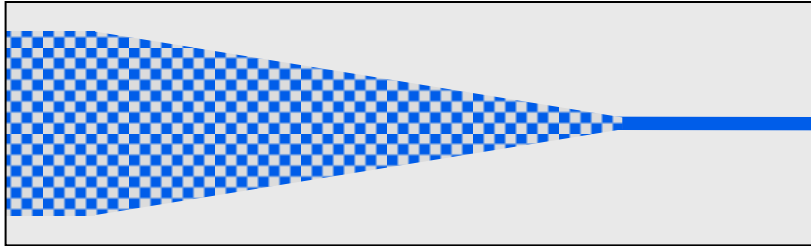
- Simulation ($\Delta V = 0$)



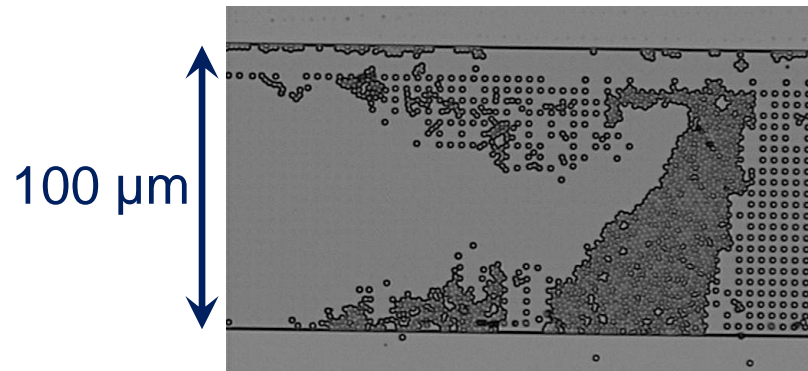
➔ **Réduction de l'effet de pointe**

◆ Convertisseur à plots

● Structure



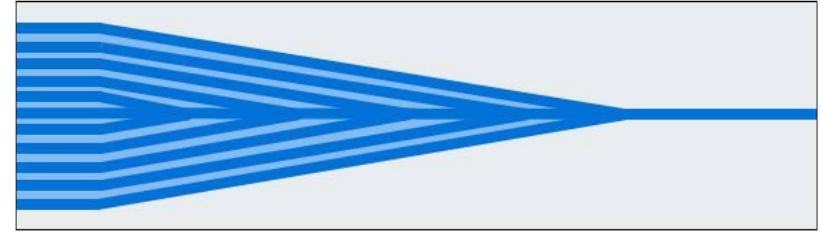
● Fabrication (plots $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$)



→ **Décollement des plots de résine**

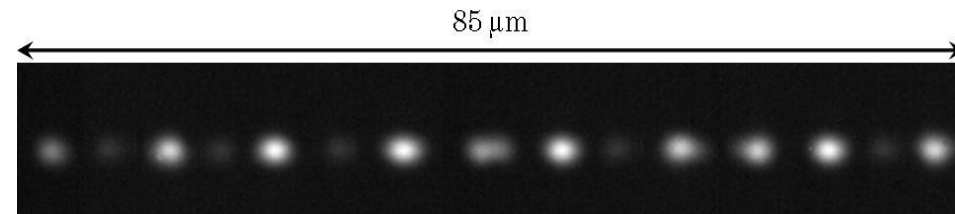
◆ Convertisseur à réseau

● Structure



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

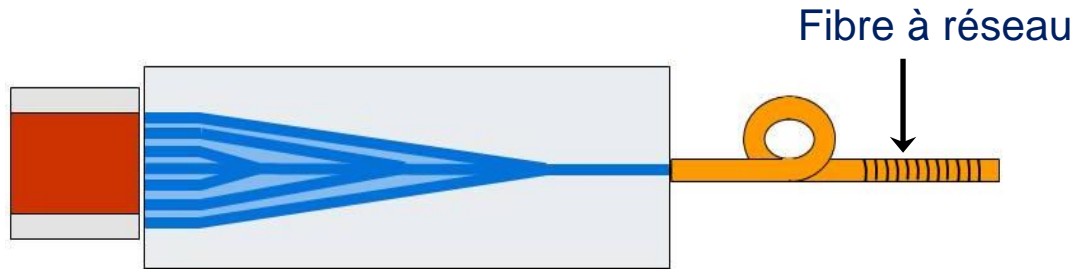
● Intensité en sortie du GO large



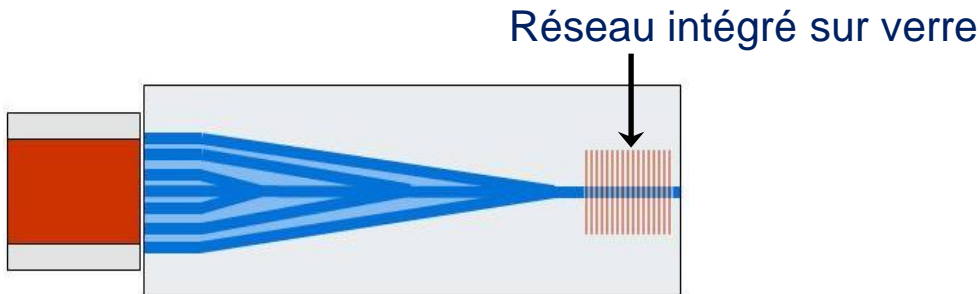
→ **Inhomogène mais**
 $\eta_{DL} = (47 \pm 2)\%$

◆ Deux étapes de validation

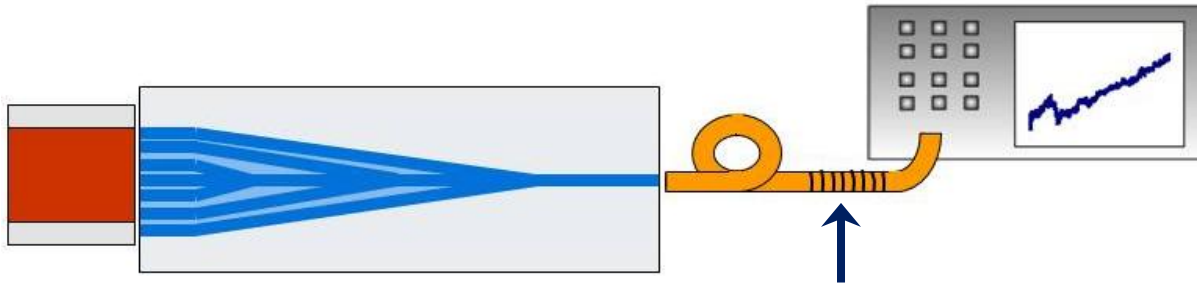
● Démonstration du verrouillage



● Intégration du réseau de Bragg

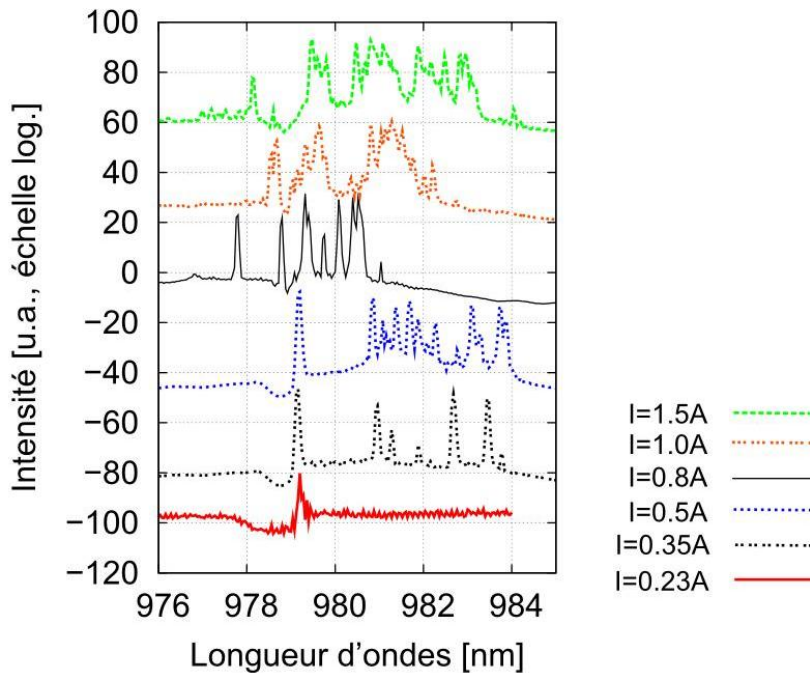


◆ Convertisseur à réseau



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

◆ Spectre en sortie



● Réduction du seuil

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

● Pic autour de λ_B

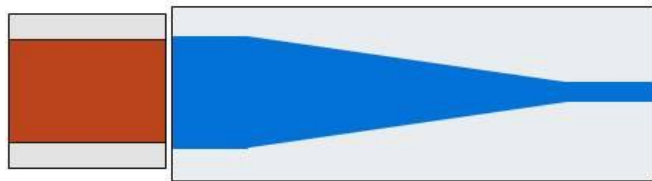
● Plusieurs pics lasers

Répartition $m=0$ inhomogène



Influence de la rétroaction
Absence de verrouillage

◆ Convertisseur classique



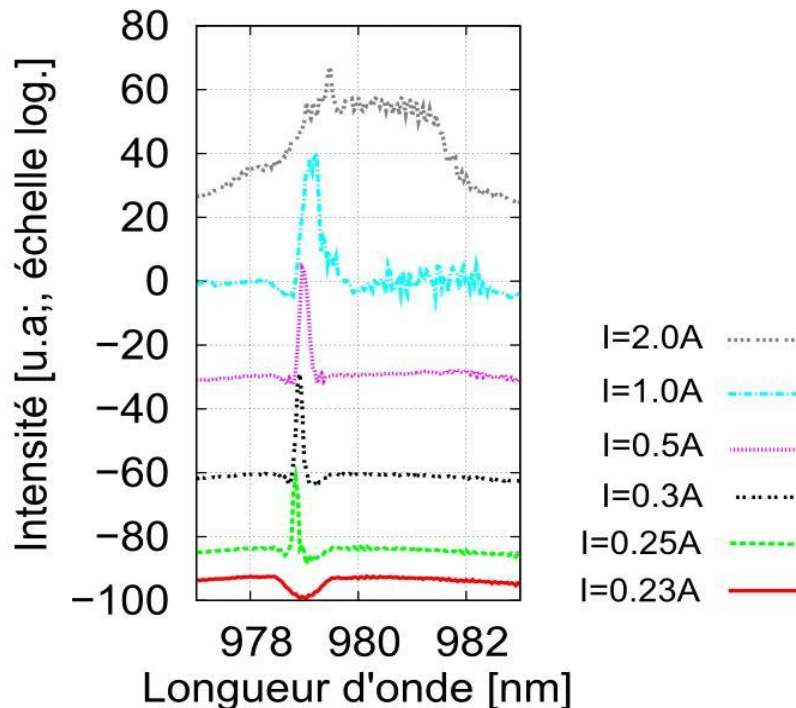
Analyseur de spectre optique



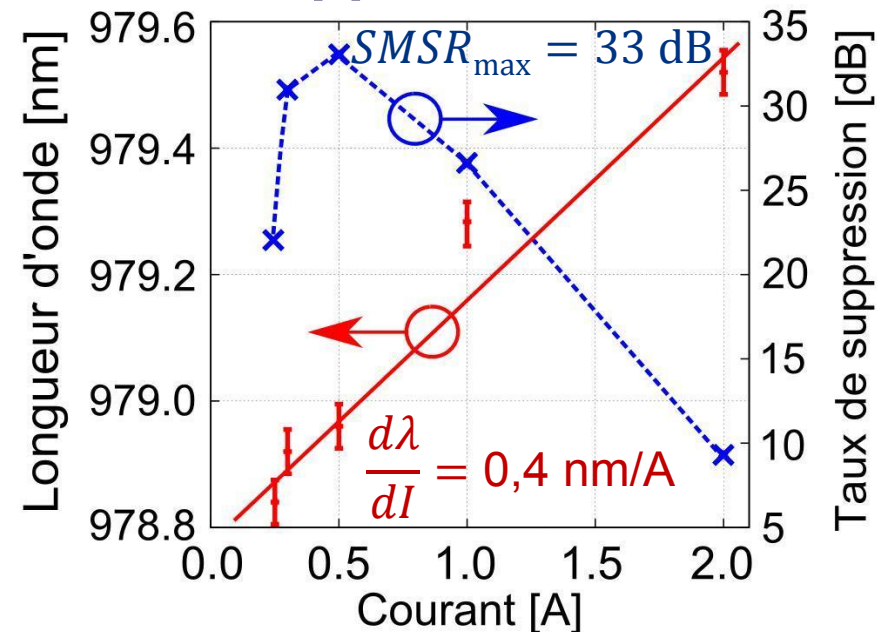
$$R_B(979\text{nm}) = 80\% ;$$

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

◆ Spectre en sortie

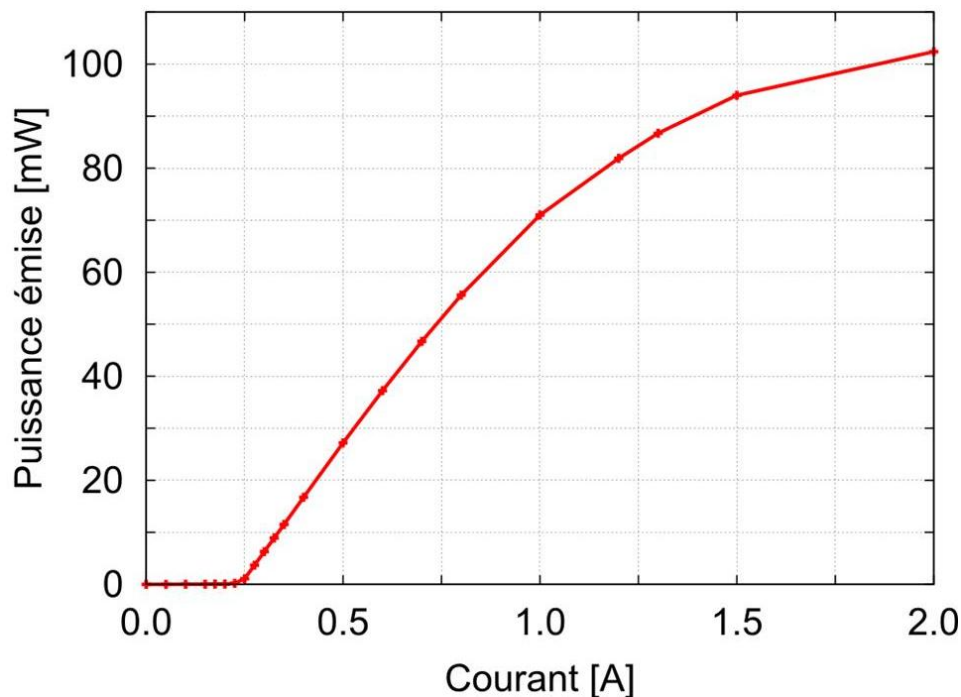


◆ Taux de suppression



Verrouillage spectral

◆ Loi de puissance / courant



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

Pas de réduction :

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

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

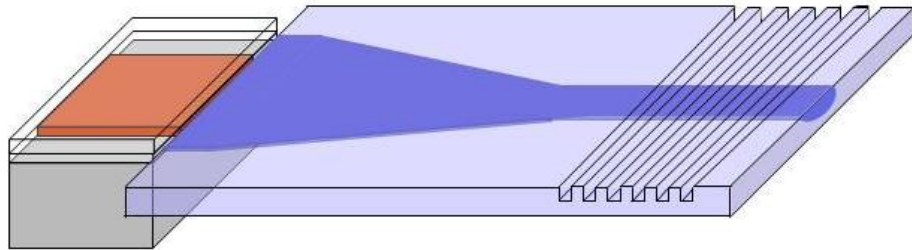
- Loi de puissance non linéaire pour $I > 0,8 \text{ A}$

Rétroaction
insuffisante

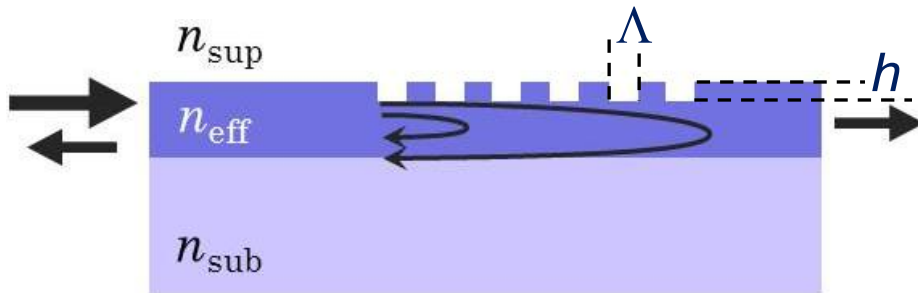
- $P(I = 1,5 \text{ A}) = 94 \text{ mW}$
Sans réseau :
 $P = 7,5 \text{ mW}$

→ Verrouillage modal

◆ Intégration du réseau



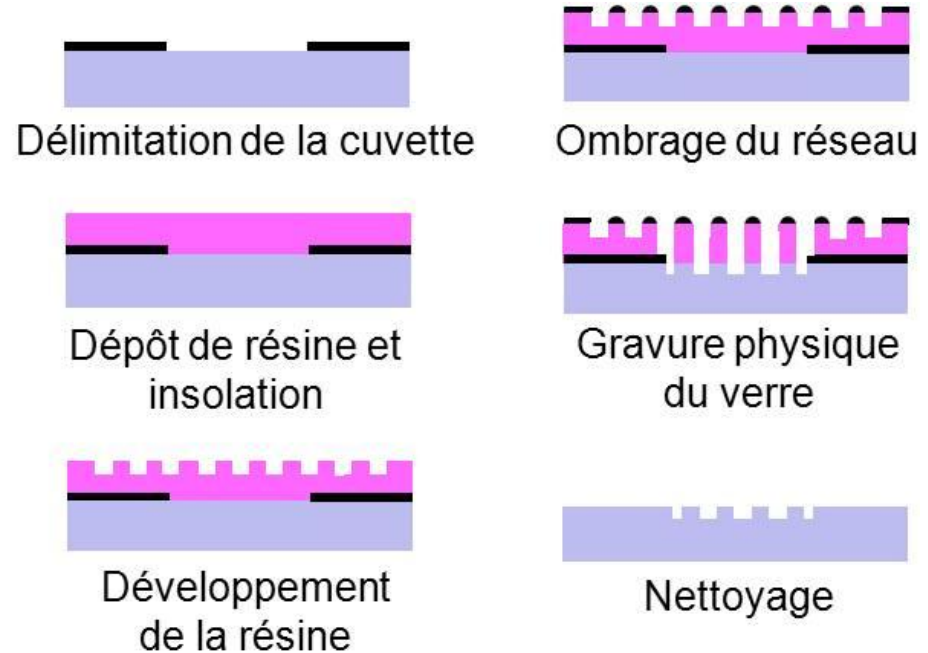
● Guide de Bragg



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

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

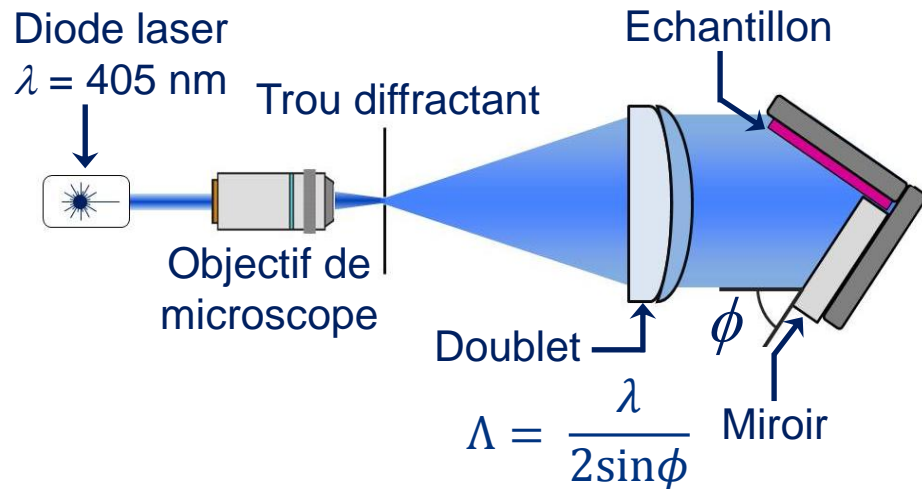
◆ Procédé de fabrication



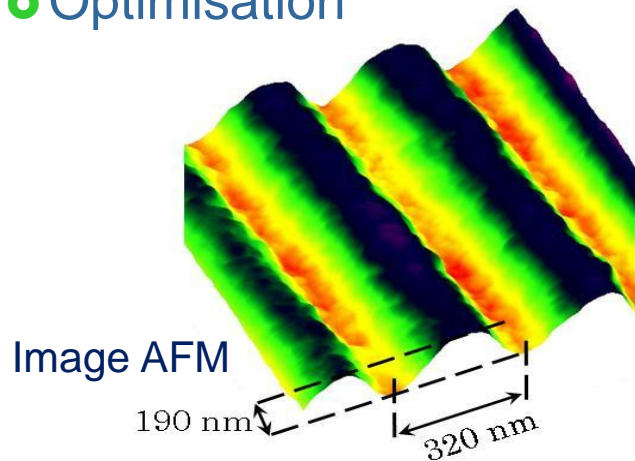
● Qualifié pour $\Lambda = 500 \text{ nm}$

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

◆ Inscription dans la résine



● Optimisation

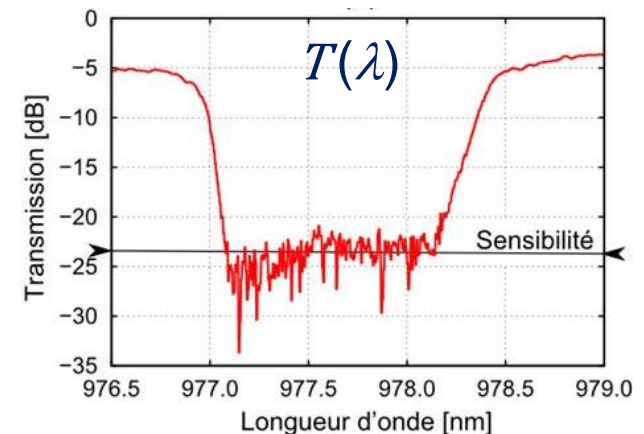
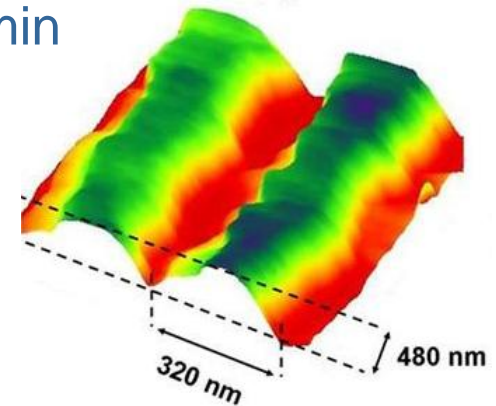


➔ **Holographie qualifiée**

◆ Gravure du verre

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

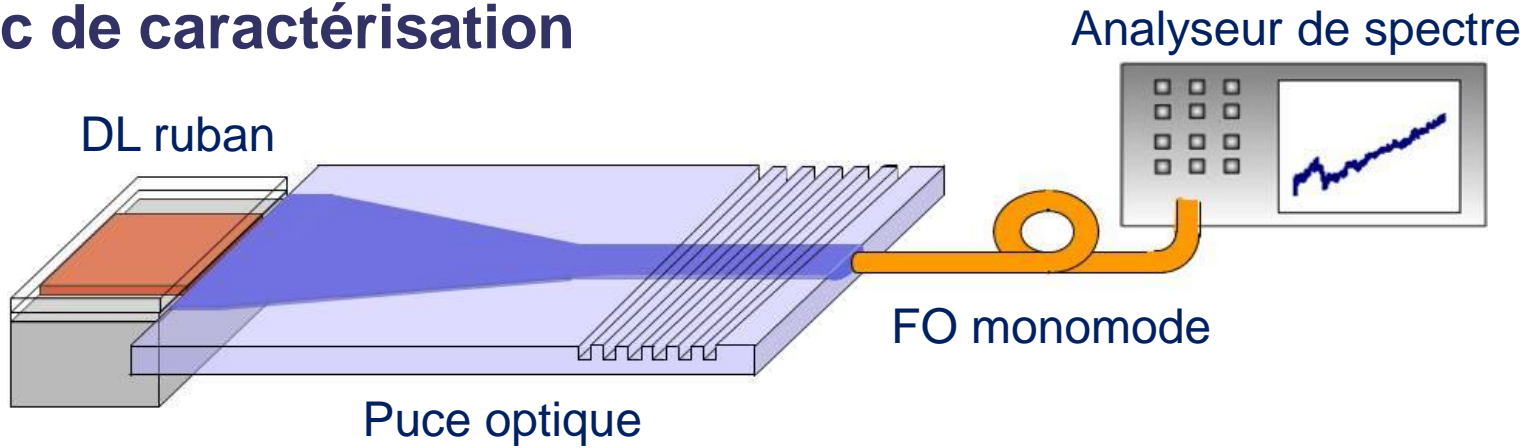
Image AFM



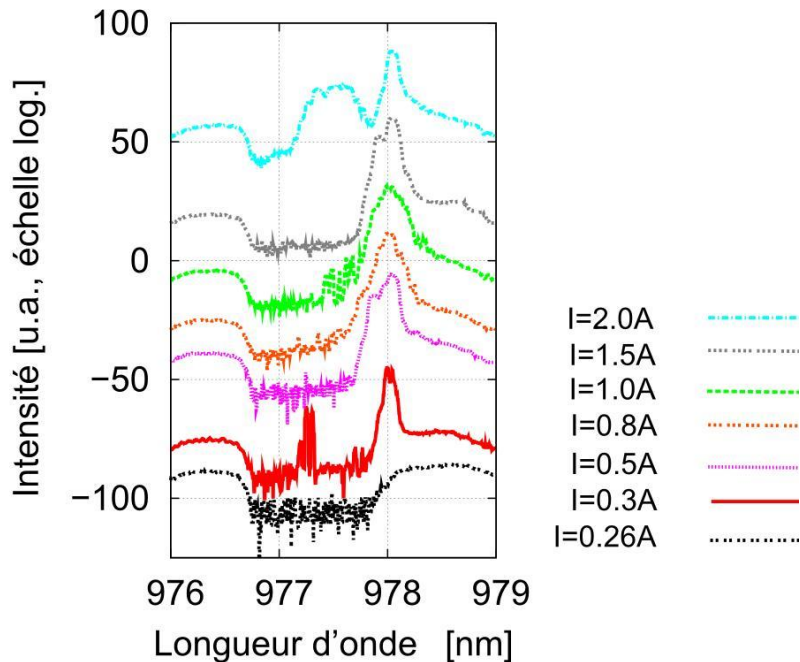
$$\lambda_B = (977,6 \pm 0,5) \text{ nm}$$

➔ **Procédé validé**

◆ Banc de caractérisation



◆ Spectres



- Pic stable autour de λ_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**

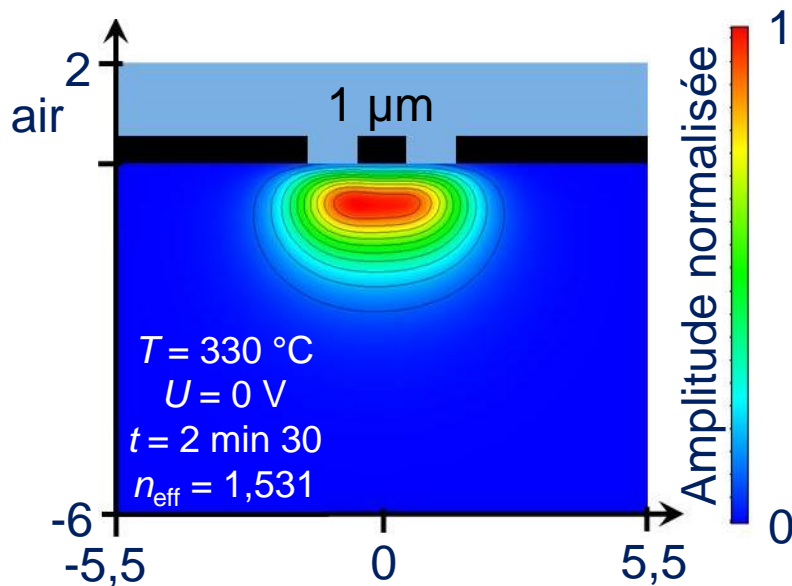
- Puissance en sortie
 R_B élevée & faible couplage
 $P_s (I = 1,5 \text{ A}) = 700 \mu\text{W}$

◆ 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 O_2 avant gravure

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

◆ P_{pompe} maximale

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

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

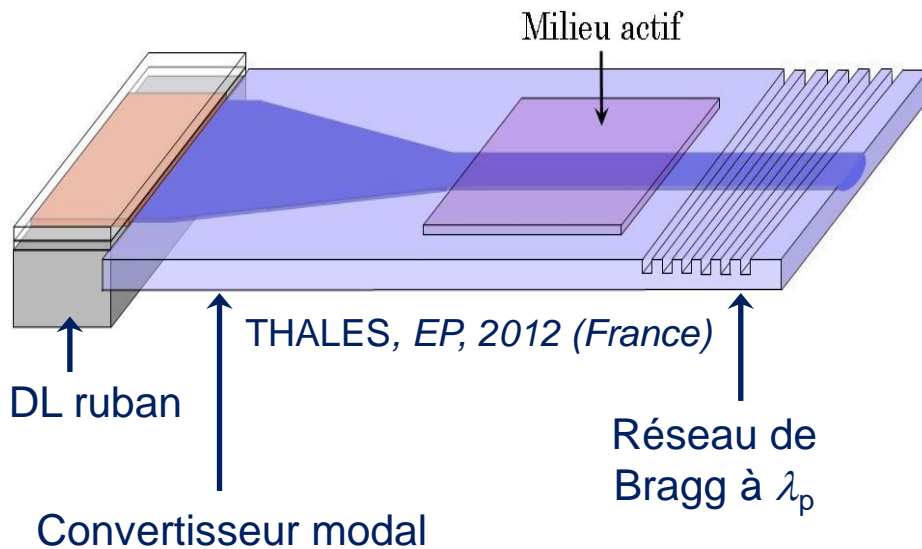
➔ **$P_p^{\text{fibre}} = 800 \text{ mW}$**

◆ Pompage monolithique

- R_B élevée

→ **Puissance intra-cavité élevée**

- Pompage intra-cavité



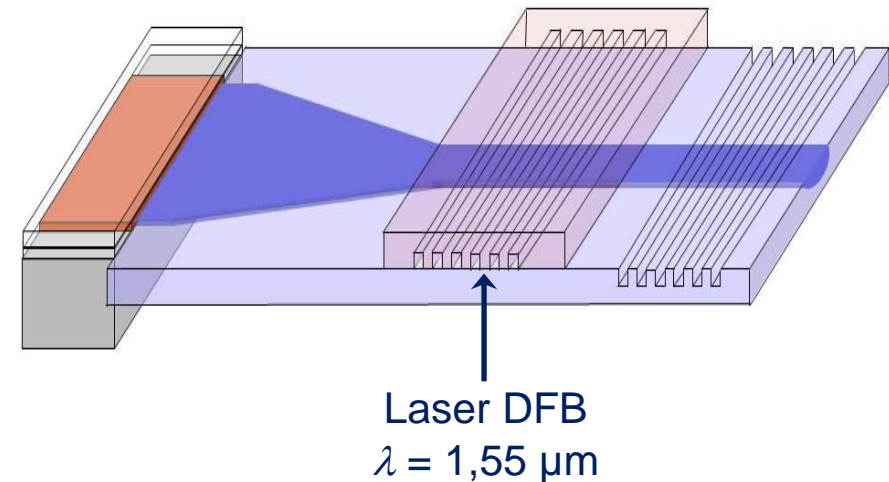
◆ Pompage laser DFB

- Milieu non linéaire

Génération de seconde harmonique

- Laser DFB encapsulé

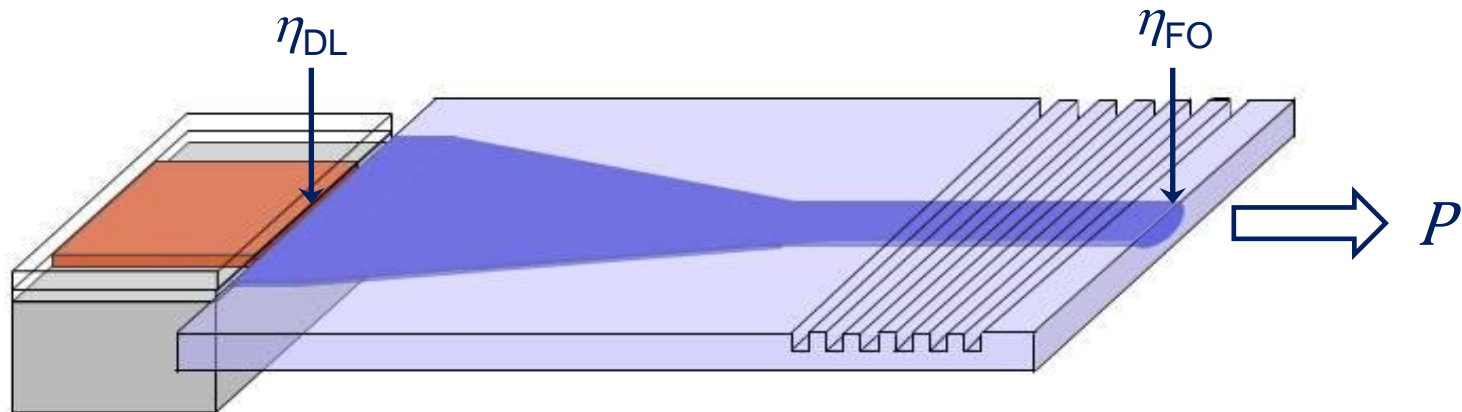
Casale et al., *Proc. of SPIE* (8264), 2012



→ **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