

Combinaison cohérente de diodes laser de luminance élevée en cavité externe

David Pabœuf

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

Groupe Lasers et Biophotonique - *Equipe Lasers Solides et Applications*

Encadrants : **Gaëlle Lucas-Leclin**
Patrick Georges (directeur de thèse)

• **Projet Européen : WWW.BRIGHTER.EU**

(World Wide Welfare: high BRIGHTness semiconductor laser for generic Use)



www.ist.brighter.eu

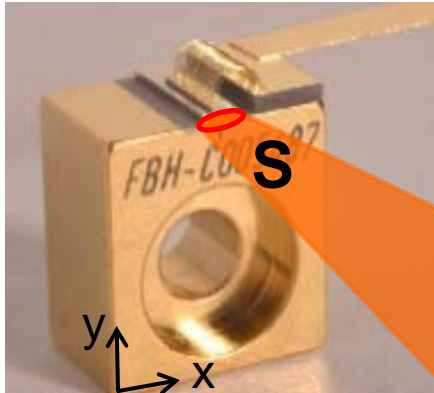
Objectif : Développement de diodes laser de **forte luminance** pour des applications en santé, télécom, affichage RVB...

23 partenaires :

- fabrication des diodes laser (Alcatel-Thales III-V Lab, FBH, Fraunhofer IAF)
- modélisation (Université de Nottingham, Université Polytechnique de Madrid,...)
- intégration (Fisba Optik, Fraunhofer ILT,...)
- utilisateurs (Alcatel, Osram, Biolitec...)

LCFIO : Mise au point de **cavités externes** pour le contrôle du **spectre** et de la **qualité spatiale** de diodes laser.

Luminance d'une diode laser



P : Puissance optique (W)


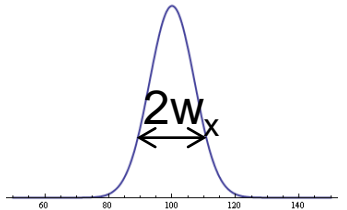
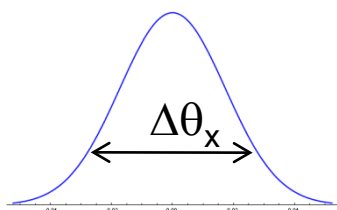
S : Surface émettrice (m^2)

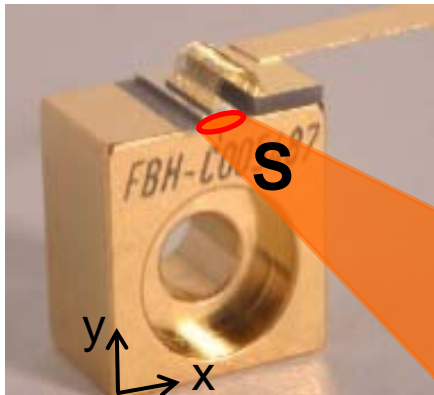
$\Delta\Omega$: Angle solide de divergence (sr)

$$L = \frac{P}{S \Delta\Omega} = \frac{P}{M_x^2 M_y^2 \lambda^2}$$

$M_{x,y}^2$: facteur de qualité

Pour une diode laser : $M_y^2 = 1$

	Surface émettrice	Divergence	Luminance
1 diode laser 			$L \propto \frac{P}{2w_x \Delta\theta_x} \propto \frac{P}{M_x^2 \lambda^2}$



P : Puissance optique (W)

S : Surface émettrice (m^2)

$\Delta\Omega$: Angle solide de divergence (sr)

$$L = \frac{P}{S \Delta\Omega} = \frac{P}{M_x^2 M_y^2 \lambda^2}$$

$$M_y^2 = 1$$

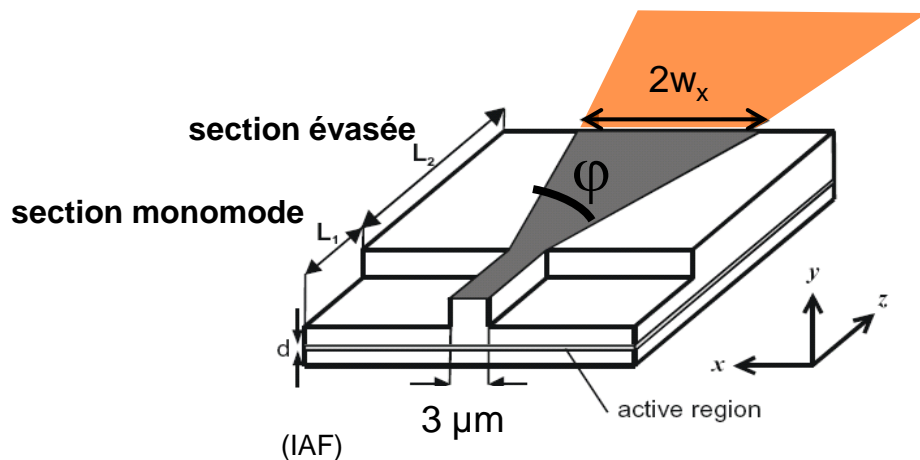
Emission	$2w_x$	Puissance	Qualité spatiale	Luminance
monomode	$3 \mu m$	$P_{max} = 500 \text{ mW}$	$M_x^2 \sim 1$ 😊	$L \sim 50 \text{ MW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$
multimode	$100 \mu m$	$P = 5 - 10 \text{ W}$ 😊	$M_x^2 \sim 16$	$L \sim 50 \text{ MW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

Limites d'une diode laser à ruban :

- Intensité de seuil de dommage aux facettes
- Dégradation spatiale de l'émission avec $2w_x$ large

Diode laser évasée :

$$L = \frac{P}{M_x^2 M_y^2 \lambda^2}$$



filtrage spatial dans la section monomode
+ amplification dans la section évasée

guidage par le gain : $2w_x \approx 300 \mu\text{m}$

Etat de l'art :

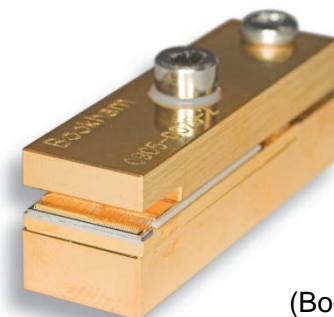
Puissance	M_x^2	Luminance	
4,4 W @ 808 nm	< 1,9	350 MW.cm ⁻² .sr ⁻¹	Dittmar <i>et al.</i> IEEE PTL, 18, p601 (2006)
12 W @ 979 nm	< 1,2	1 GW.cm ⁻² .sr ⁻¹	Fiebig <i>et al.</i> Elec. Lett, 44, p1253 (2008)

→ diode laser de luminance très élevée


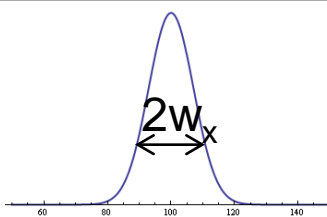
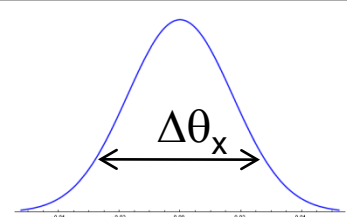
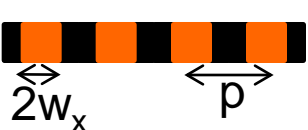
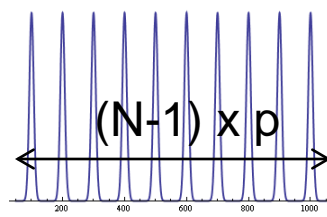
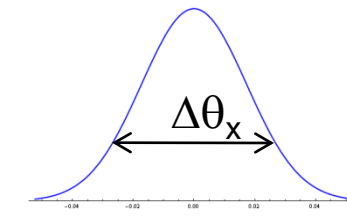


Augmentation de la puissance optique:

$$P \rightarrow N \times P$$



(Bookham)

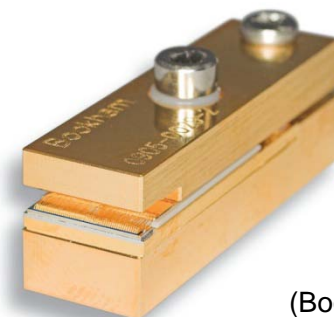
	Surface émettrice	Divergence	Luminance
1 diode laser 			$L_1 \propto \frac{P}{2w_x \Delta\theta_x}$
N diodes laser 			$L_N \propto \frac{NP}{(N-1)p\Delta\theta_x} \approx \frac{2w_x}{p} L_1 \leq L_1$

mais dégradation de la luminance



$$L_N < L_1$$

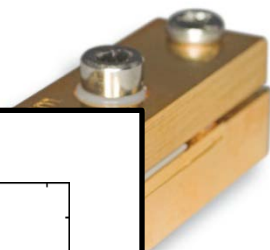
Emission cohérente → Addition des luminances



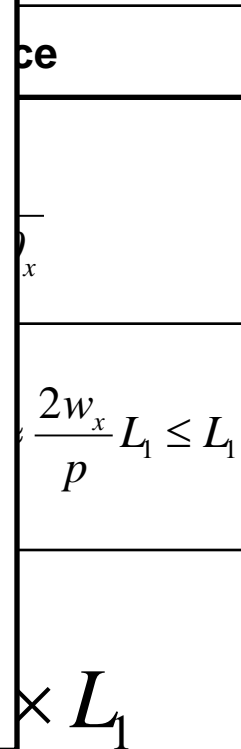
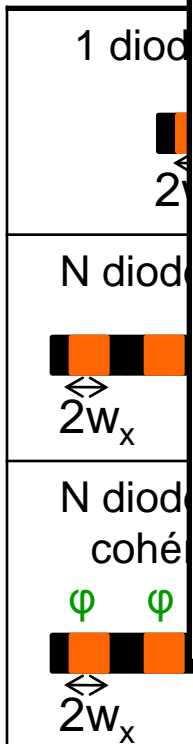
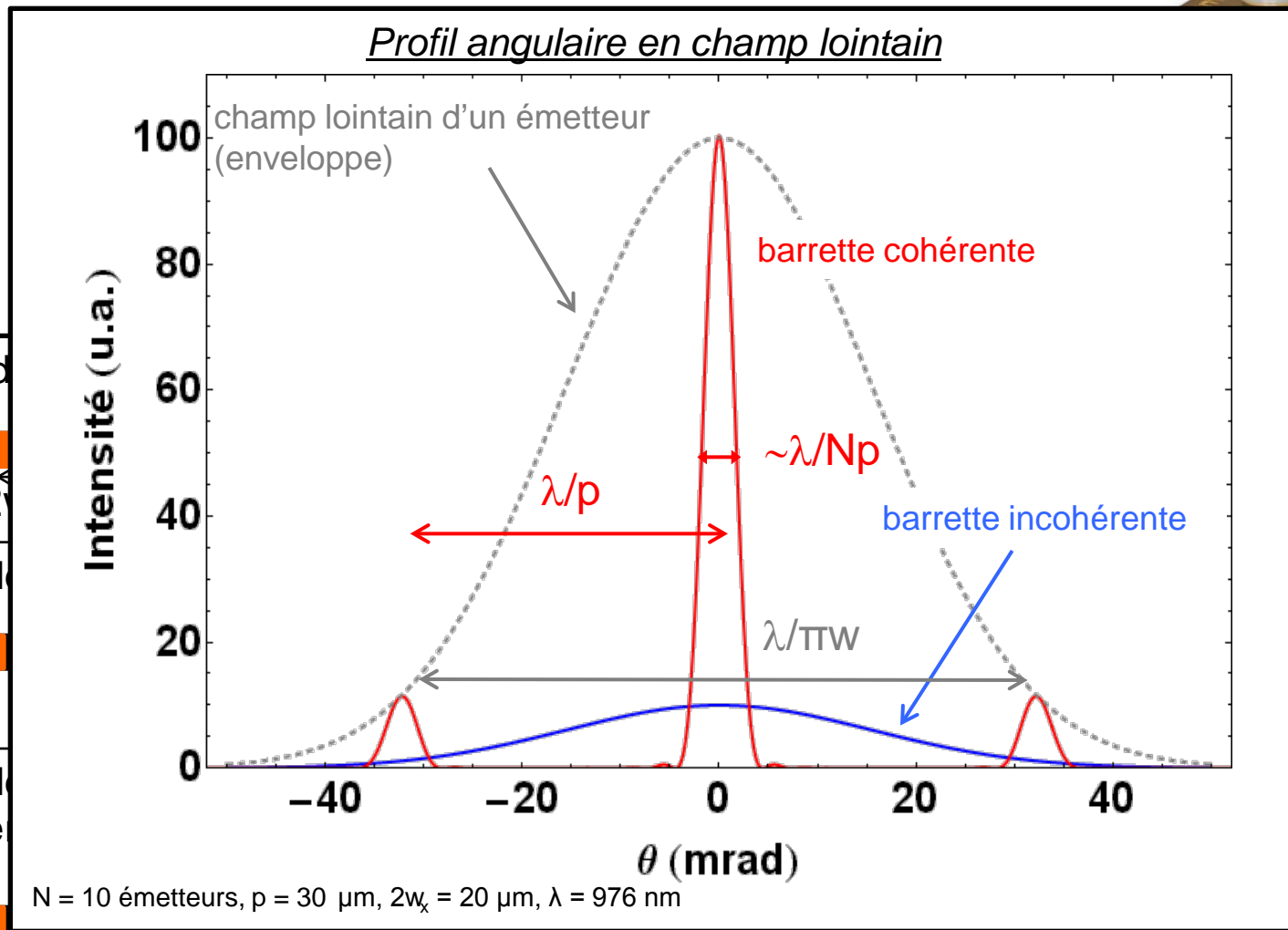
(Bookham)

	Surface émettrice	Divergence	Luminance
<p>1 diode laser</p>			$L_1 \propto \frac{P}{2w_x \Delta\theta_x}$
<p>N diodes laser</p>			$L_N \propto \frac{NP}{(N-1)p\Delta\theta_x} \approx \frac{2w_x}{p} L_1 \leq L_1$
<p>N diodes laser cohérentes</p>			$L_N \sim N \times L_1$

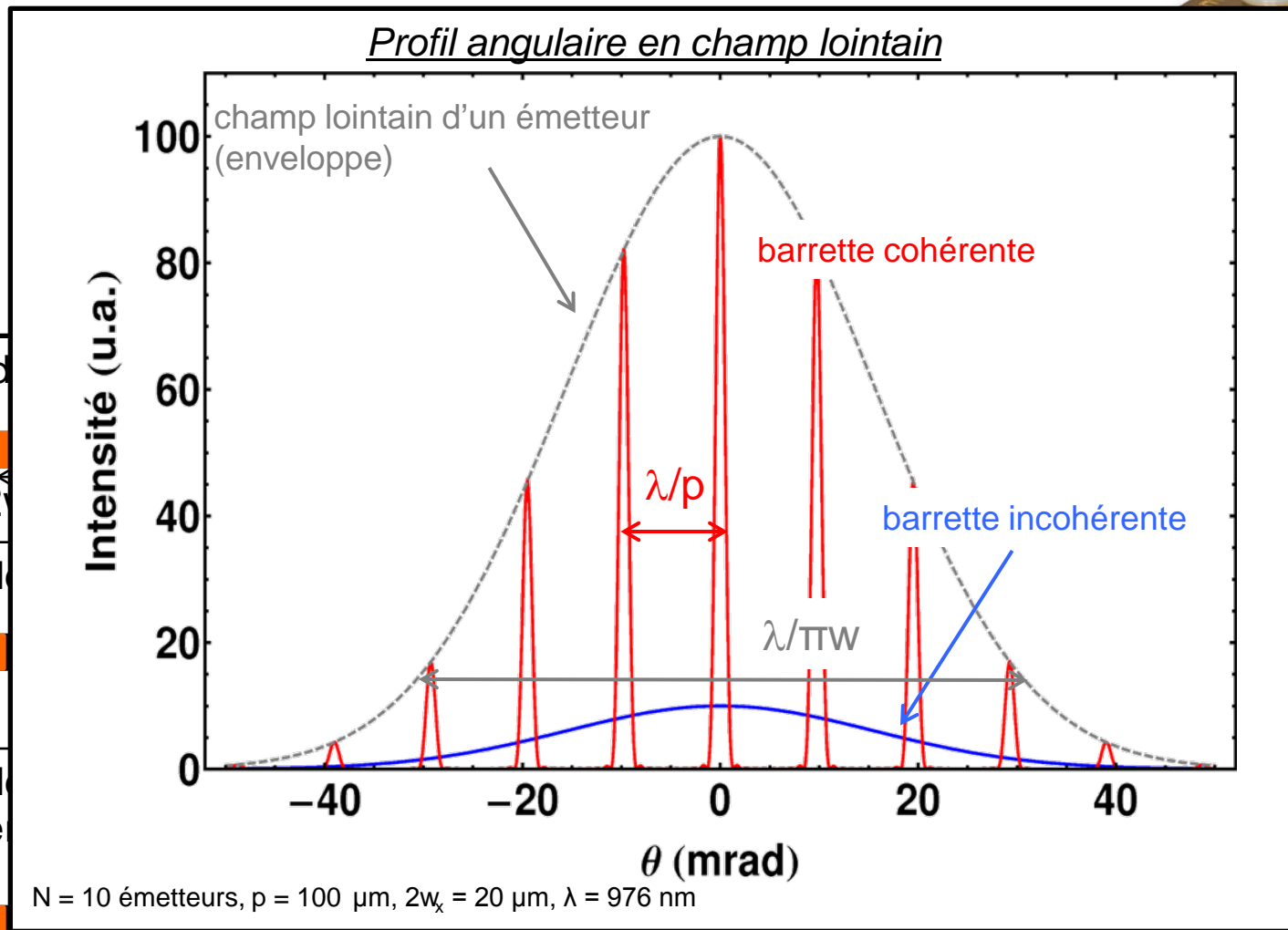
Emission cohérente → Addition des luminances



(Bookham)



Emission cohérente → Addition des luminances



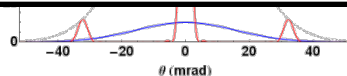
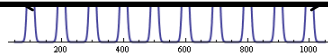
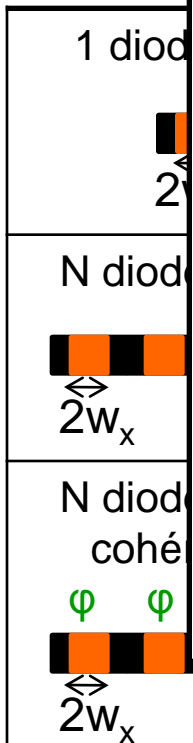
(Bookham)

ce

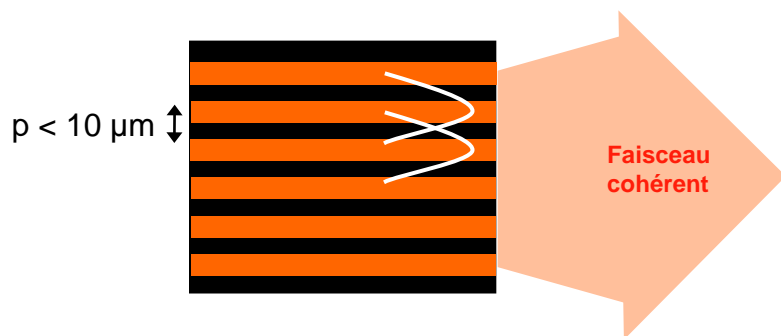
y
 x

$$\frac{2w_x}{p} L_1 \leq L_1$$

$\times L_1$



→ couplage évanescent :

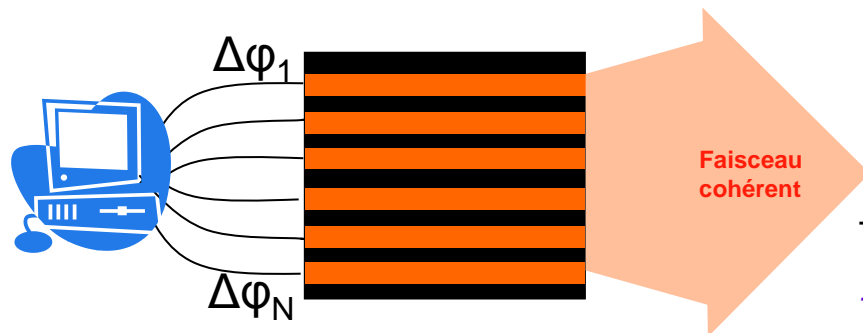


couplage induit par recouvrement spatial entre les modes guidés

- $P = 300 \text{ mW}$, $N = 20$ émetteurs

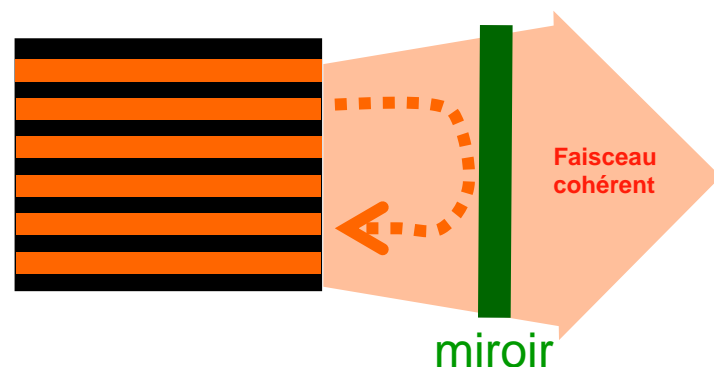
[Botez et al. APL, 58, p2070 (1991)]

→ contrôle actif :



asservissement de la phase de chaque diode

→ cavité externe :



couplage par diffraction en espace libre

- $P = 700 \text{ mW}$, $N = 6$ émetteurs

[Chang-Hasnain et al. APL, 50, p1465 (1987)]

- $P = 7 \text{ W}$, $N = 10$ émetteurs

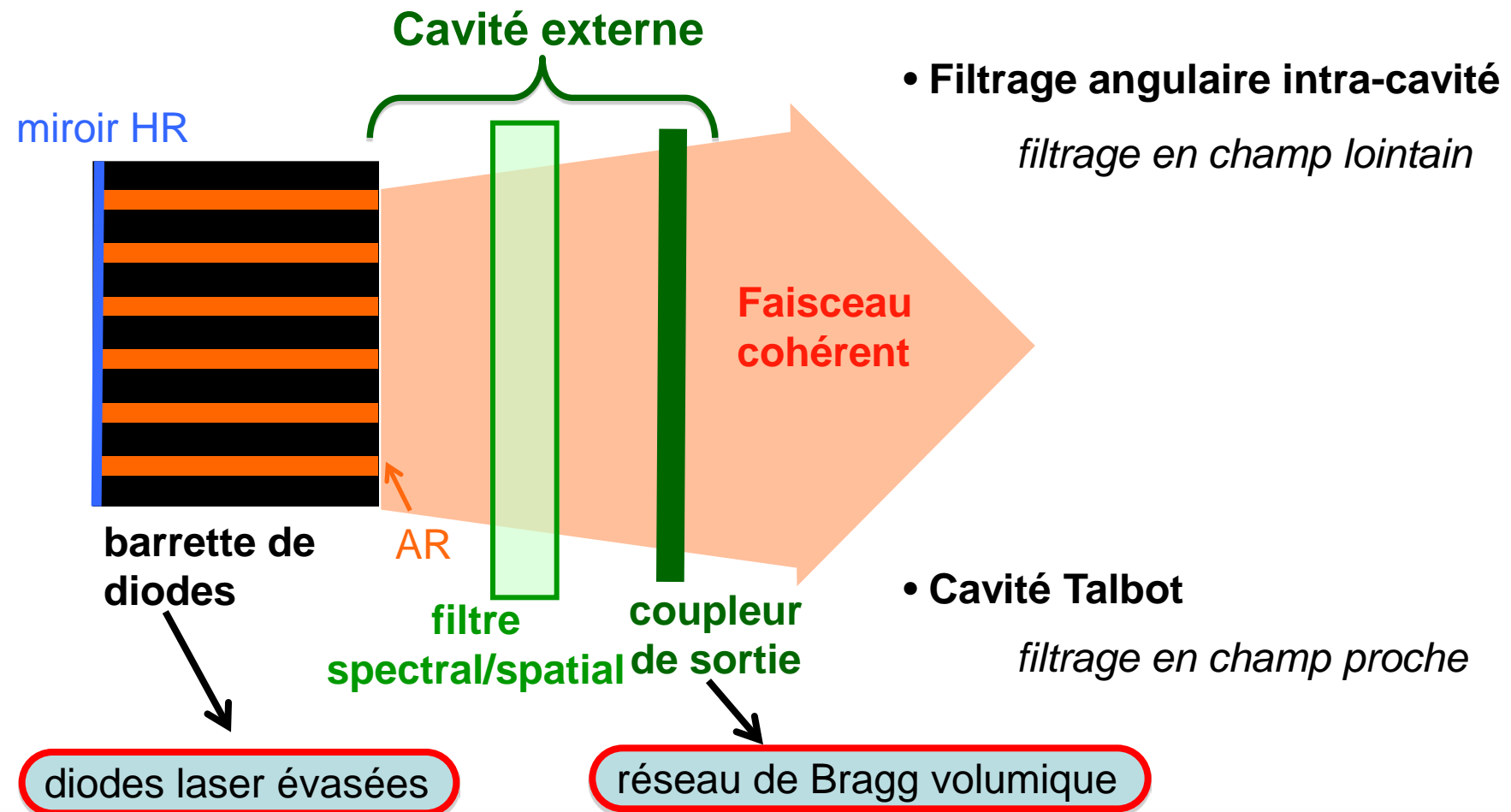
[Huang et al. CLEO 2008, CMN1]

- $P = 1,4 \text{ W}$ (q-CW), $N = 12 \times 12$ émetteurs

[Cassarly et al. OL, 17, p607 (1992)]

- Projet Cochise (DARPA), Objectif : 100 W , $N = 10 \times 10$ émetteurs

Cavités externes pour la mise en phase passive des diodes laser
par couplage diffractif



1 - Description générale des cavités étudiées

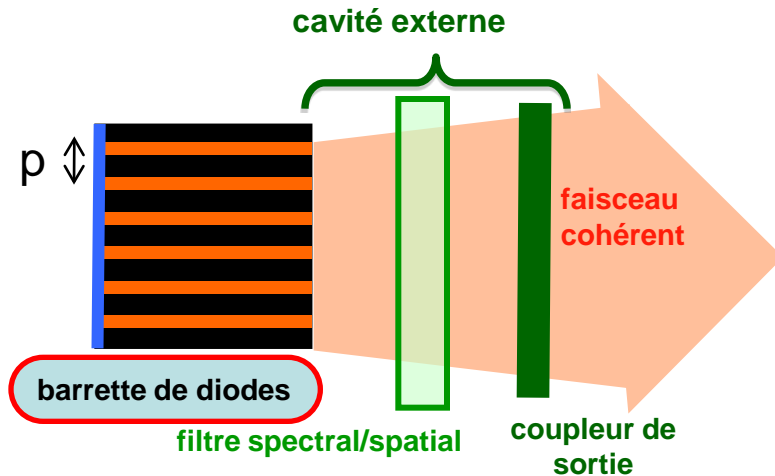
- Barrette de diodes laser
- Réseau de Bragg
- Modélisation d'une cavité externe

2 - Filtrage angulaire intra-cavité

3 - Cavité Talbot

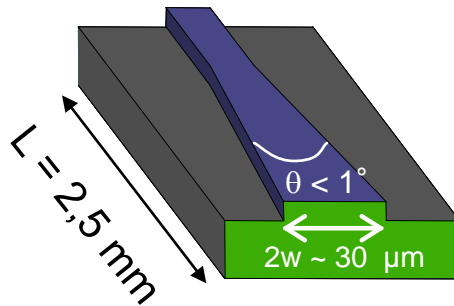
4 - Conversion modale

Conclusion - Perspectives



Barrettes de diodes laser évasées à guidage par l'indice (III-V Lab):

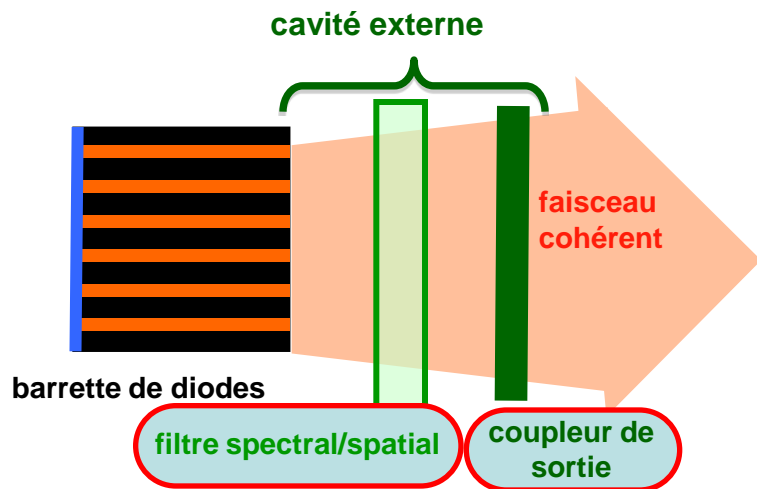
→ Emetteurs monomodes de largeur totale à $1/e^2$: $2w = 30 \mu\text{m}$



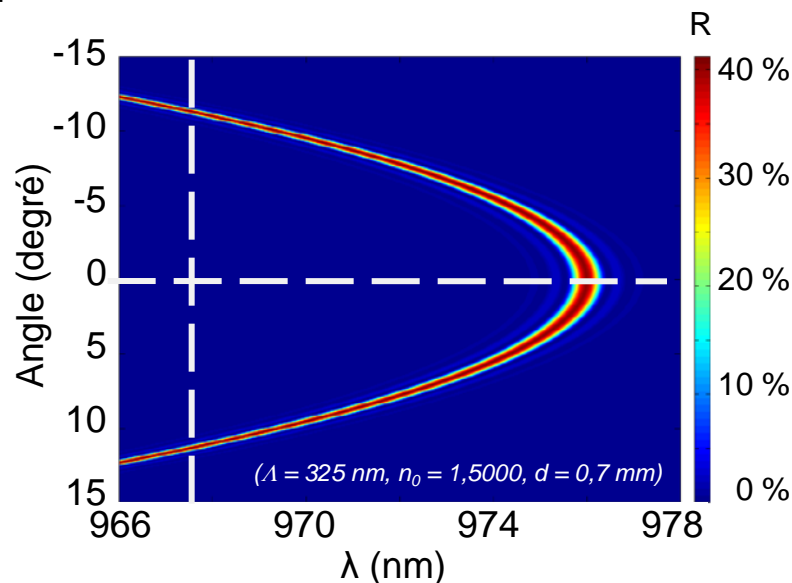
- N = 6 émetteurs, $p = 30 \mu\text{m}$,
 - N = 10 émetteurs, $p = 100 \mu\text{m}$
- $\lambda \sim 975 \text{ nm}$

Puissance $\sim 400 \text{ mW}$ par émetteur : $L_1 \sim 10 \text{ MW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

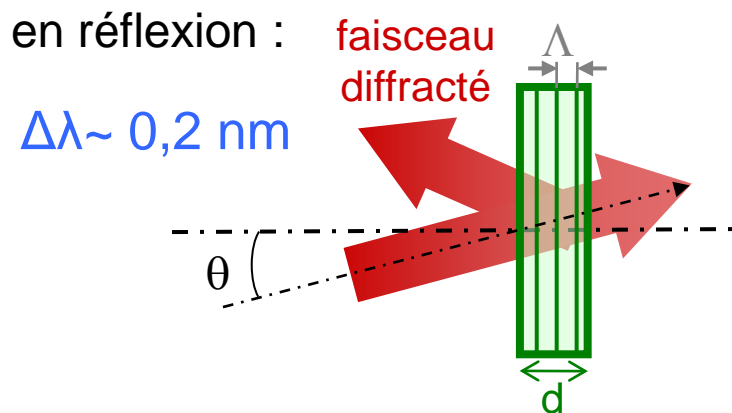
Réseau de Bragg volumique



- Matériau Photo-Thermo-Réfractif
- Modulation d'indice
- Disponible commercialement

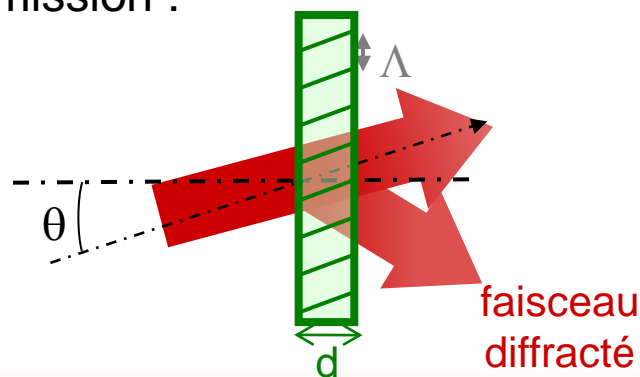


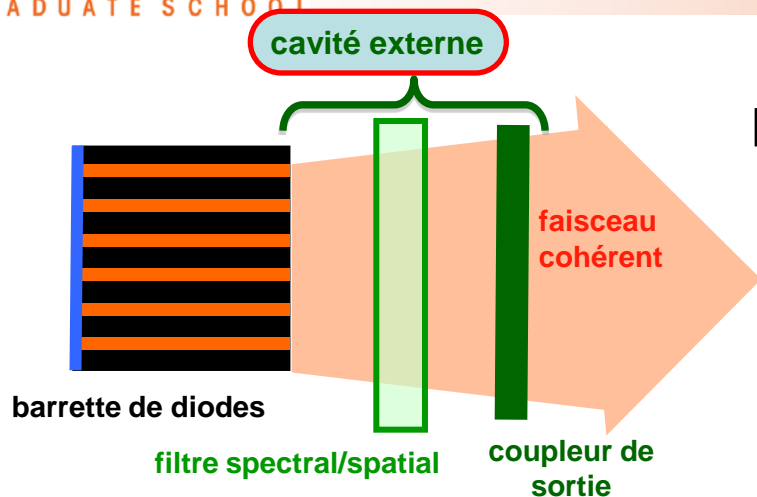
Formule de Bragg : $\cos(\theta_B) = \frac{\lambda_B}{2n_0\Lambda}$



en transmission :

$\Delta\theta \sim 0,3^\circ$

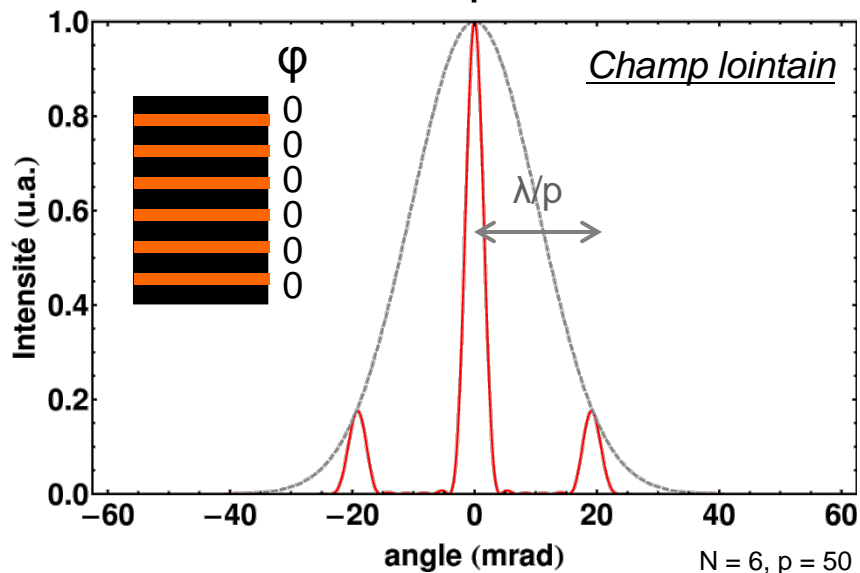




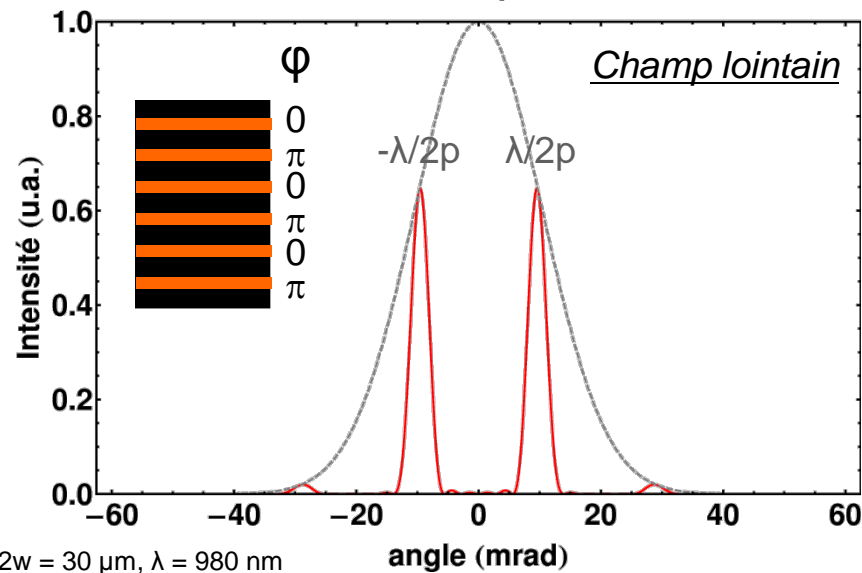
N émetteurs monomodes $\rightarrow N$ modes propres

Objectif : sélection d'un seul mode

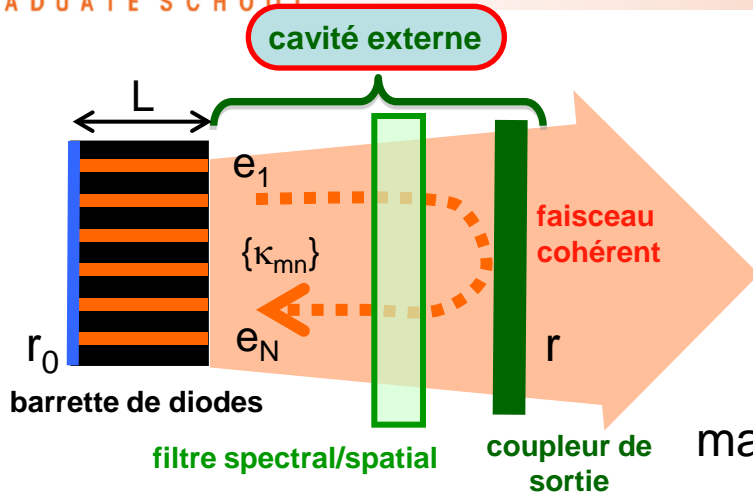
mode en phase



mode hors phase



Cavité externe : modélisation



Equation d'état stationnaire :

$$r_0 r e^{2i\varphi} e^{2gL} \{ \mathbf{K}_{mn} \} \times \vec{E} = \vec{E}$$

matrice de couplage \equiv recouvrement

$$\mathbf{K}_{mn} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} e_m^*(x) \times C[e_n](x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} e_m^*(x) \times e_m(x) dx}$$

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{pmatrix}$$

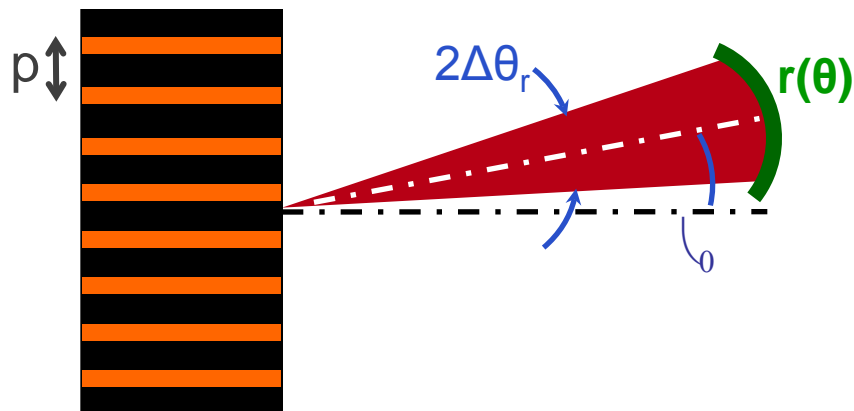
$C[e_n]$: opérateur cavité externe (propagation, filtrage,...)

Modes de la cavité (E_k) \rightarrow vecteurs propres de la matrice de couplage

Coefficients de couplage effectifs : $|Y_k| \rightarrow$ valeurs propres

- 1 - Description générale des cavités étudiées
- 2 - Filtrage angulaire intra-cavité
 - Principe / Modélisation
 - Etude expérimentale
- 3 - Cavité Talbot
- 4 - Conversion modale
- Conclusion - Perspectives

Cavité angulairement sélective



Sélection du mode transverse :

profil angulaire de **meilleur recouvrement** avec le filtre.

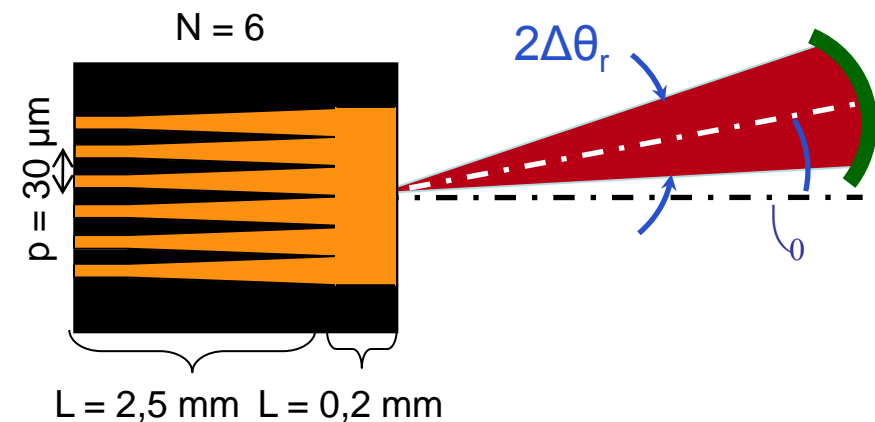
matrice de couplage:

$$\mathbf{K}_{mn} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{e}_m^*(x) \times \mathbf{C}[\mathbf{e}_n](x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{e}_m^*(x) \times \mathbf{e}_m(x) dx}$$

Opérateur cavité:

$\mathbf{C}[\mathbf{e}_n]$: filtrage des composantes angulaires du champ optique

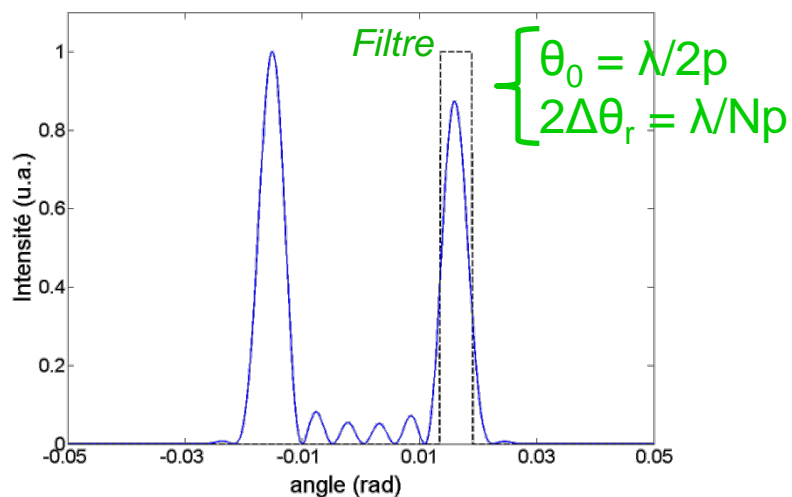
$$\mathbf{C}[\mathbf{e}_n](x) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\arcsin(\lambda\sigma)) \times \tilde{\mathbf{e}}_n(\sigma) e^{2i\pi x\sigma} d\sigma$$



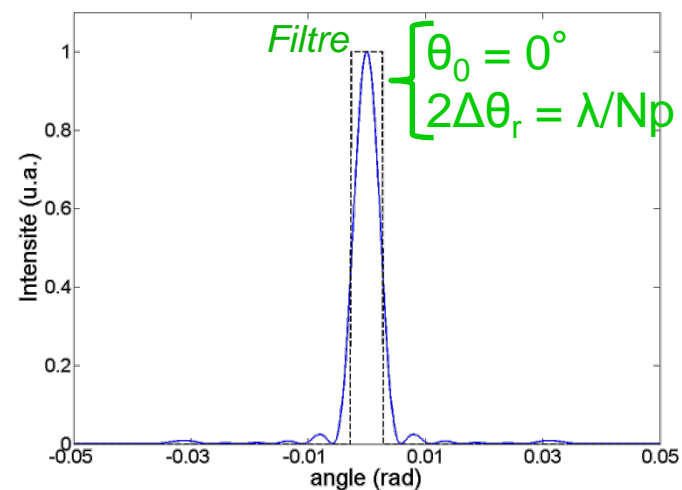
6 diodes laser évasées à guidage par l'indice
 Aucun couplage entre les émetteurs
 Facteur de remplissage $\cong 100\%$

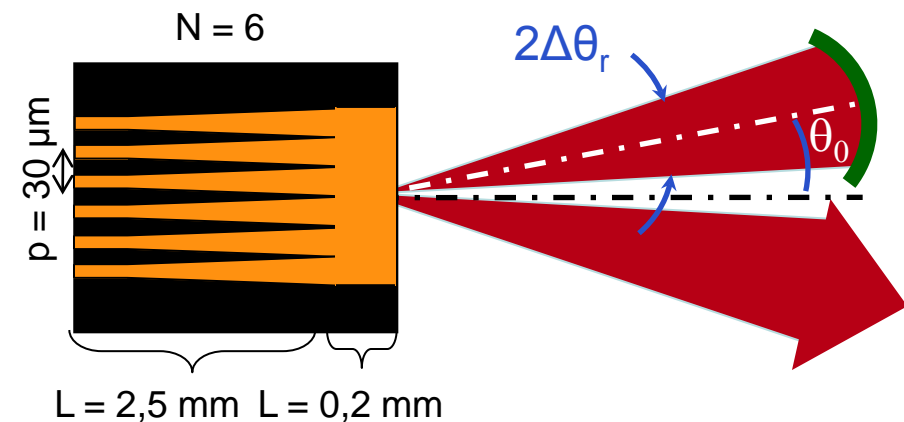
\Rightarrow peu de lobes pour les modes cohérents de la barrette

mode hors phase



mode en phase

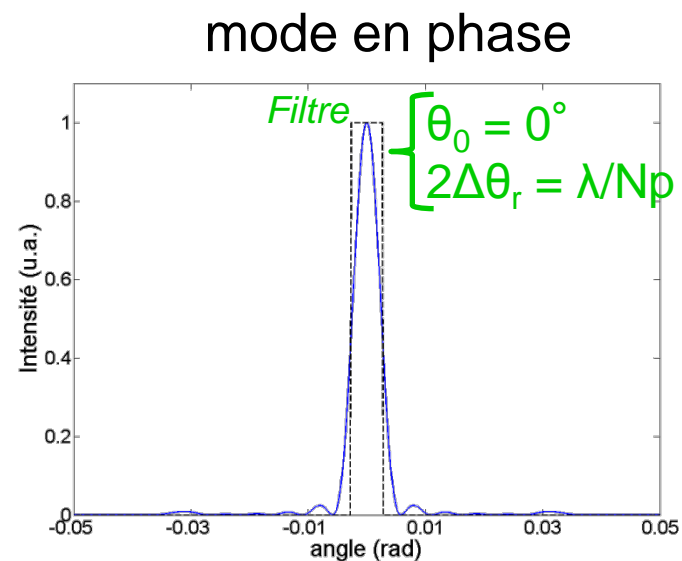
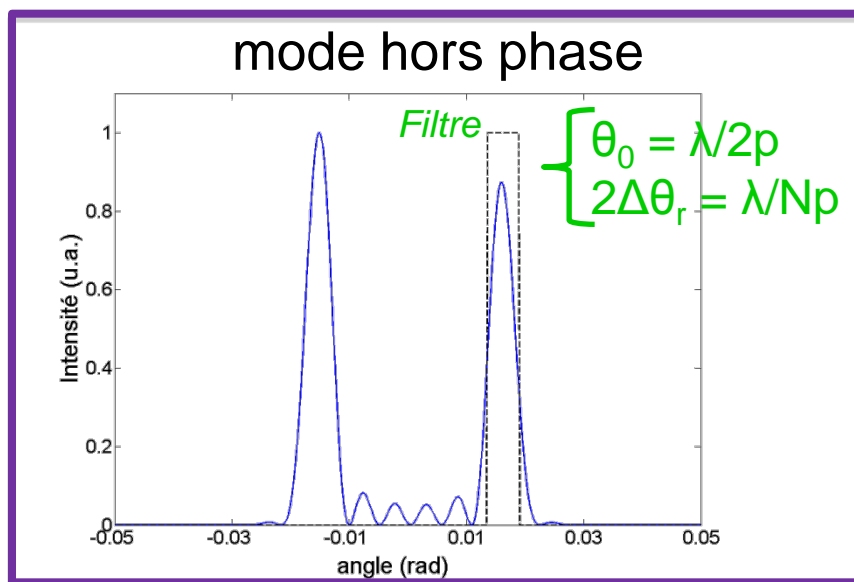


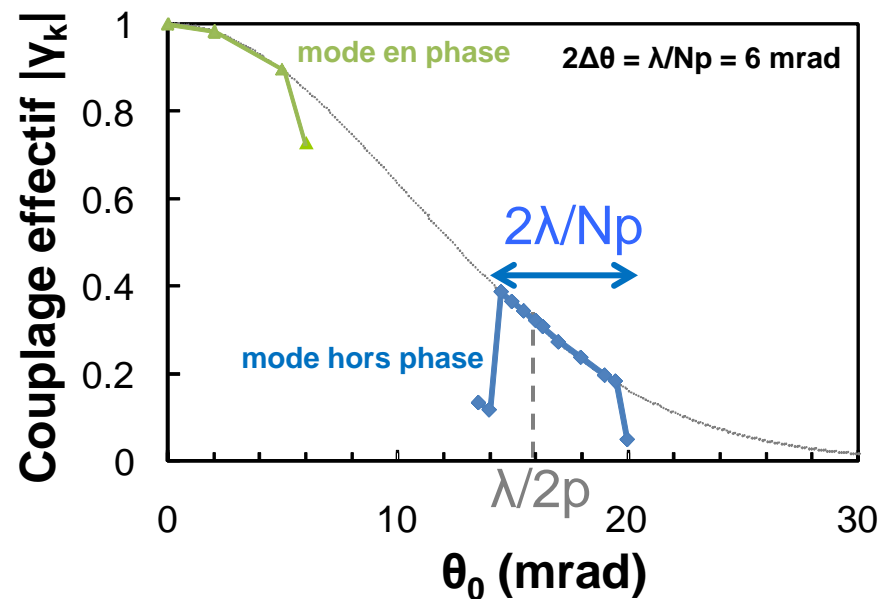
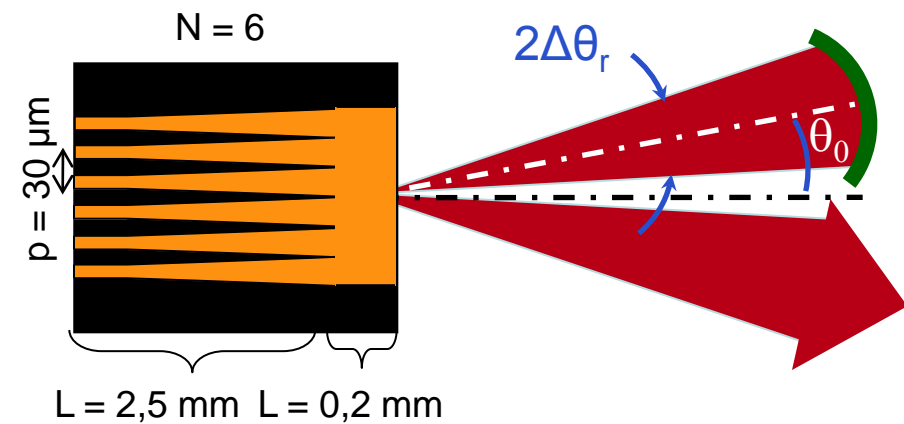


Configuration choisie :

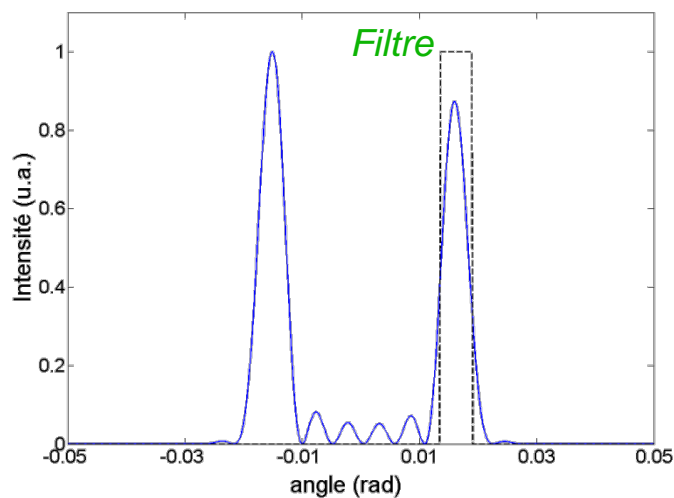
direction de filtrage $\cong \lambda/2p$ ($= 16 \text{ mrad}$)
 selon l'un des lobes du mode hors phase

Sortie laser selon le lobe symétrique





mode hors phase



mode hors phase:

- couplage effectif $\sim 30 \%$
- plage angulaire $\sim 2\lambda/Np$

1 - Description générale des cavités étudiées

2 - Filtrage angulaire intra-cavité

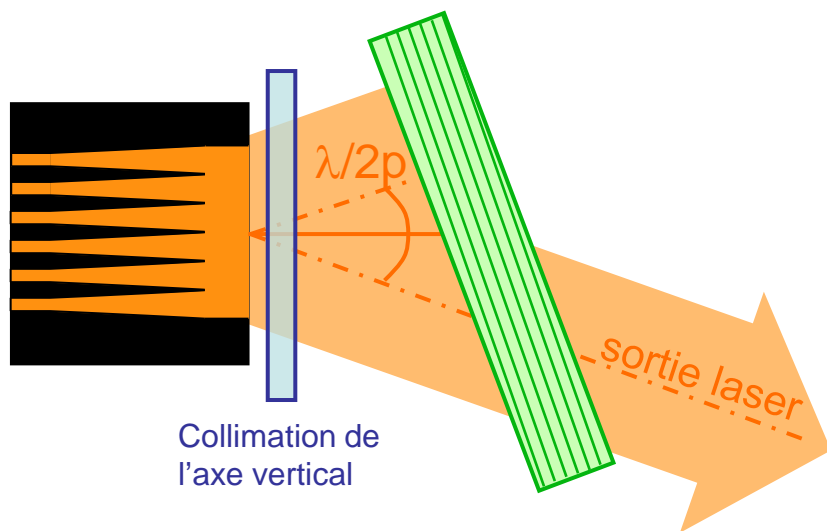
- Principe / Modélisation

- Etude expérimentale

3 - Cavité Talbot

4 - Conversion modale

Conclusion - Perspectives

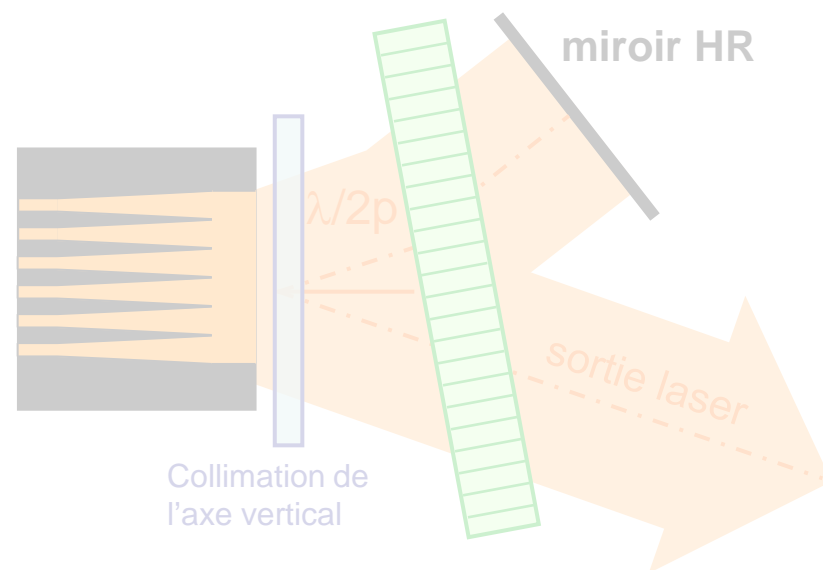


Réseau de Bragg en réflexion :

$$R \geq 99\% \text{ à } 979 \text{ nm}$$

$$\delta\lambda \cong 0,3 \text{ nm}$$

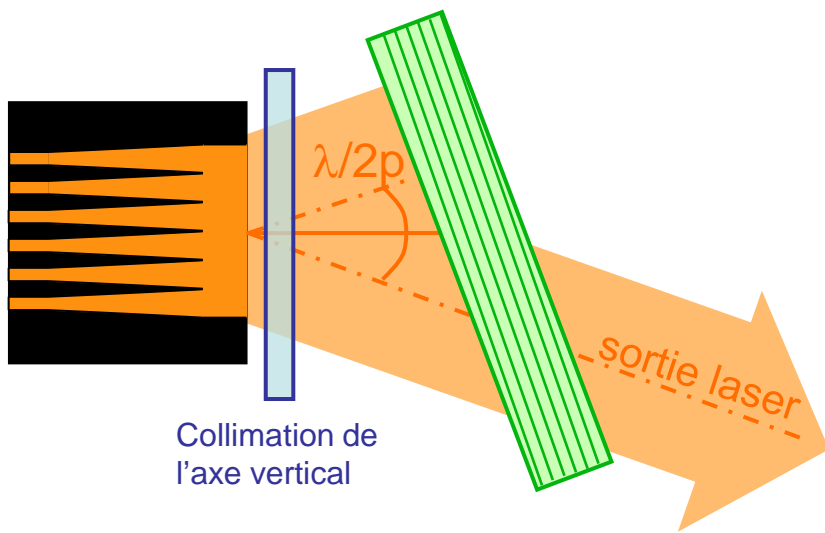
$$\Delta\theta_{1/2} = 35 \text{ mrad} = 2^\circ$$



Réseau de Bragg en transmission:

efficacité de diffraction = 90%

$$\Delta\theta_{1/2} = 9 \text{ mrad}$$



Réseau de Bragg en réflexion :

$R \geq 99\%$ à 979 nm

$\delta\lambda \cong 0,3$ nm

$\Delta\theta_{1/2} = 35$ mrad = 2°

$P_{\max} \sim 500$ mW

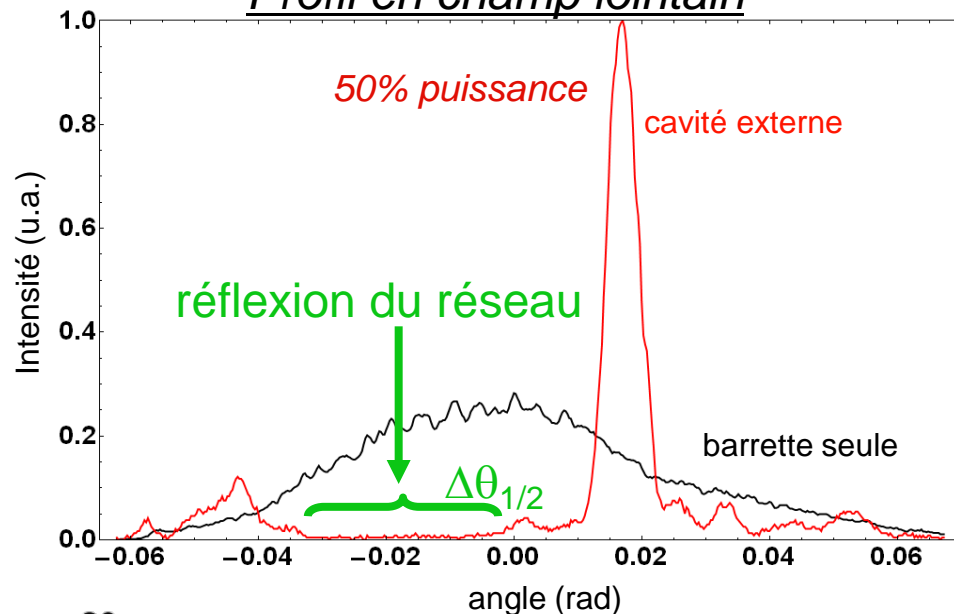
50 % de puissance utile ~ 260 mW

qualité spatiale : $M^2 = 1,8$

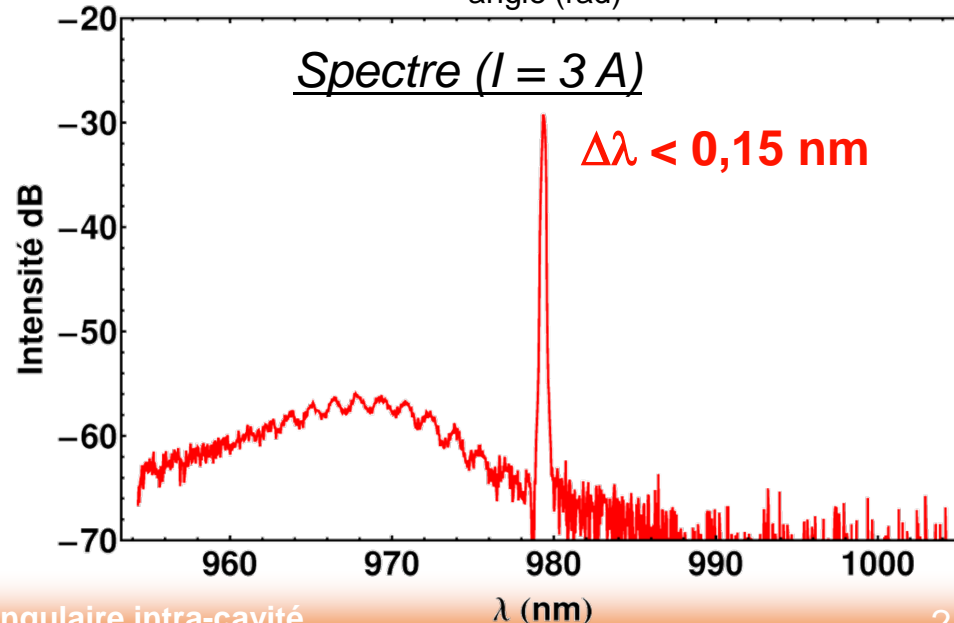
λ stabilisée à 979 nm ($\Delta\lambda < 0,15$ nm)

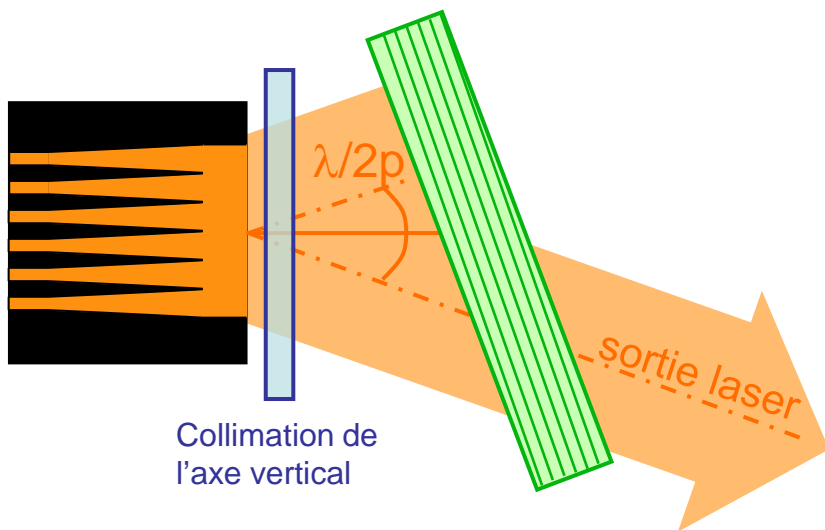
Pabœuf et al., CLEO Europe (2009)

Profil en champ lointain



Spectre ($I = 3$ A)





Réseau de Bragg en réflexion :

$R \geq 99\%$ à 979 nm

$\delta\lambda \cong 0,3$ nm

$\Delta\theta_{1/2} = 35$ mrad = 2°

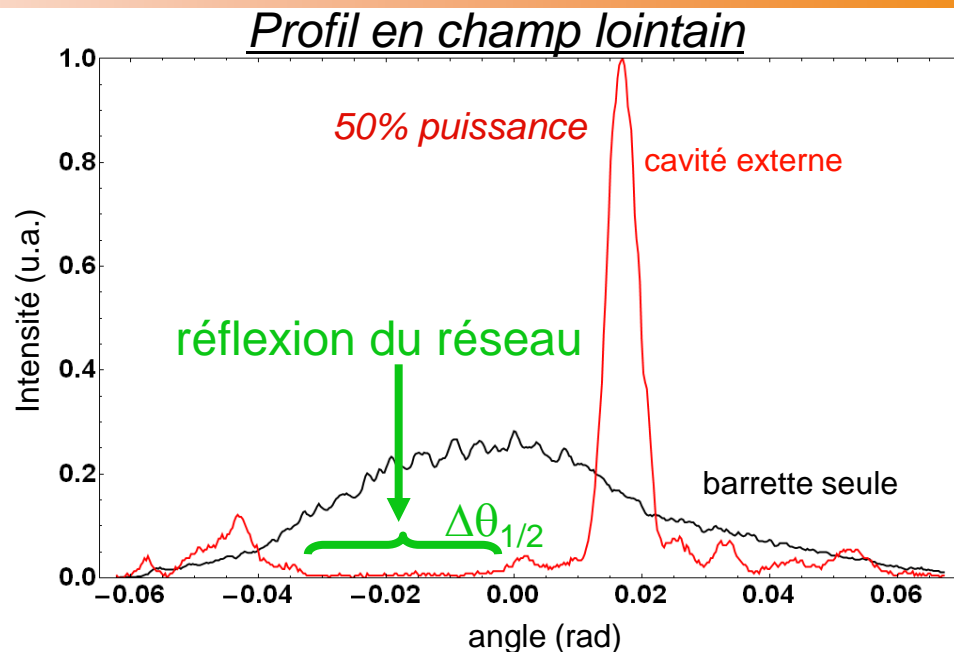
$P_{\max} \sim 500$ mW

50 % de puissance utile ~ 260 mW

qualité spatiale : $M^2 = 1,8$

λ stabilisée à 979 nm ($\Delta\lambda < 0,15$ nm)

Pabœuf et al., CLEO Europe (2009)



Luminance $L = 16$ MW.cm⁻².sr⁻¹
 → gain d'un facteur 2

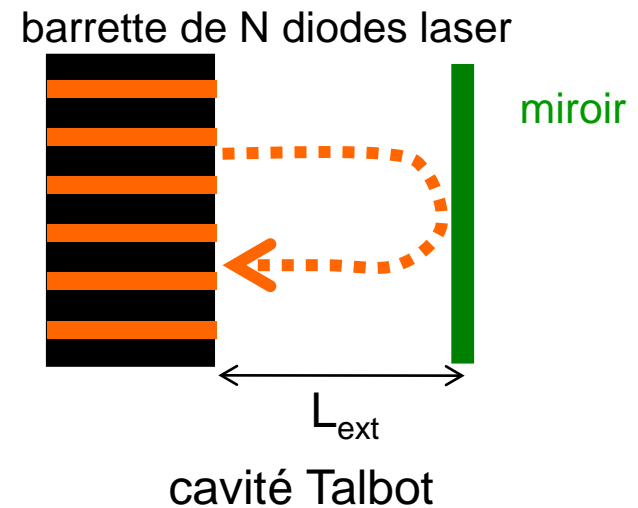
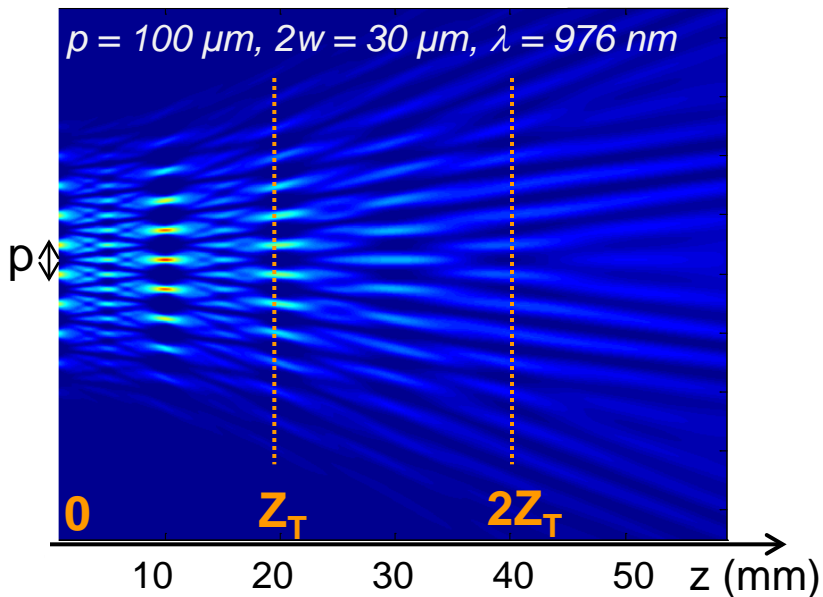
Puissance limitée par la thermique
 → élargir le pas entre les émetteurs

- 1 - Description générale des cavités étudiées
- 2 - Filtrage angulaire intra-cavité
- 3 - Cavité Talbot**
 - Principe/Modélisation
 - Etude expérimentale
- 4 - Conversion modale
- Conclusion - Perspectives

Effet d'auto-imagerie en champ proche d'un objet périodique infini:

W. H. F. Talbot, Philos. Mag. **9**, pp401-407 (1836)

- propagation de 10 émetteurs gaussiens en phase (largeur $2w$):

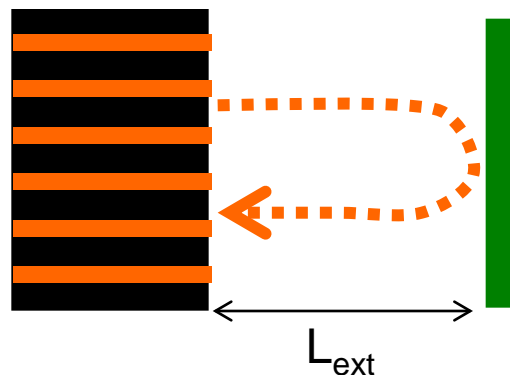


Auto-images (**amplitude et phase**) à :

- chaque multiple de la distance Talbot $Z_T = 2p^2/\lambda$
- fractions de Z_T

Pertes sur les bords dues au caractère fini de l'objet

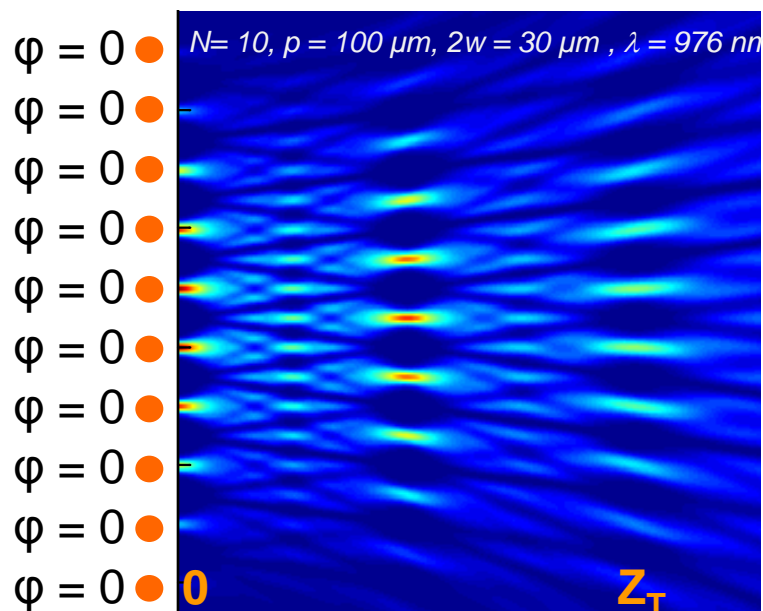
Compétition modale



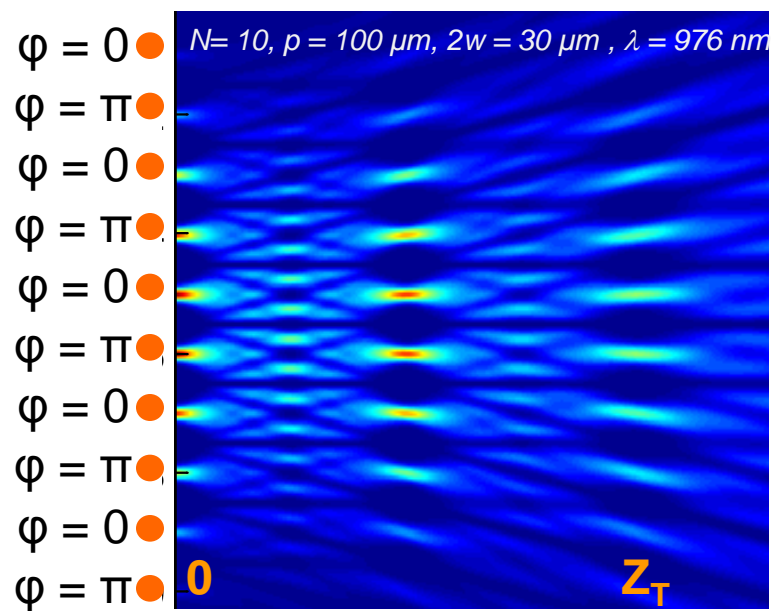
N émetteurs \rightarrow N modes propres

Objectif : sélection d'un seul mode

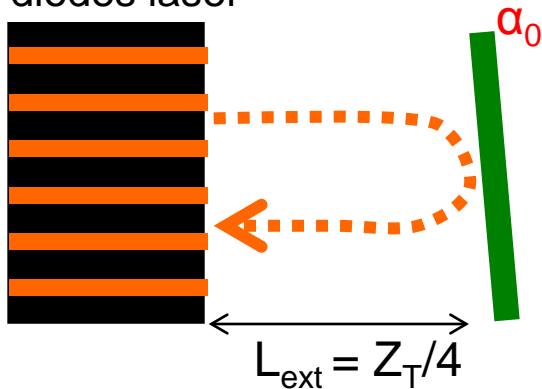
mode en phase



mode hors phase



Compétition modale

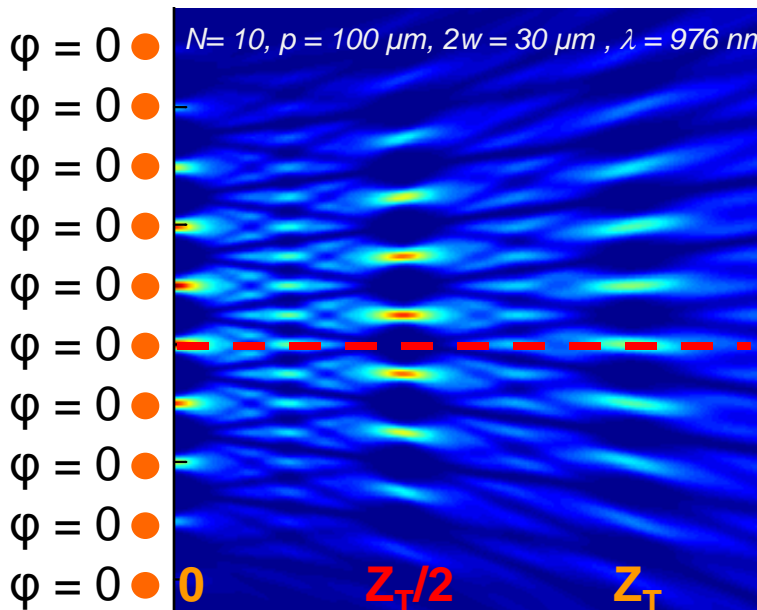


discrimination maximale en $2L_{\text{ext}} = Z_T/2$.

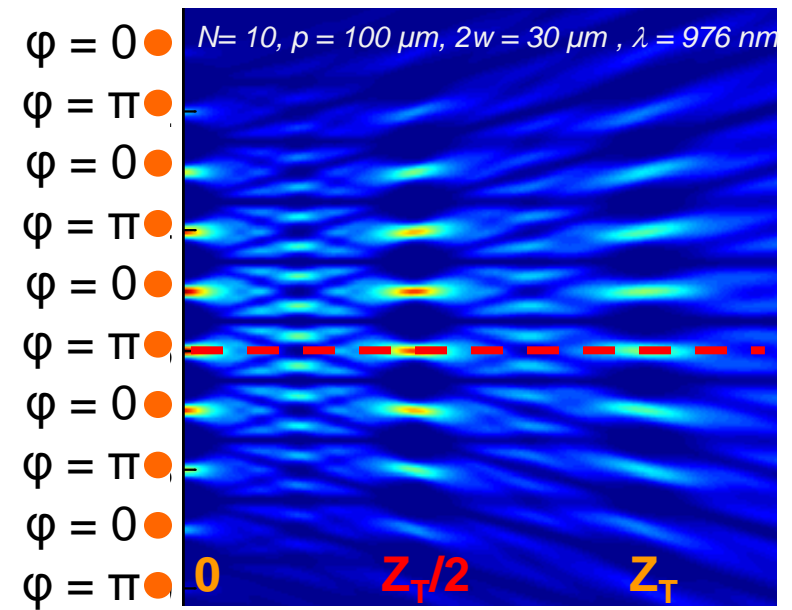
$\alpha_0 = 0 \rightarrow$ mode hors phase

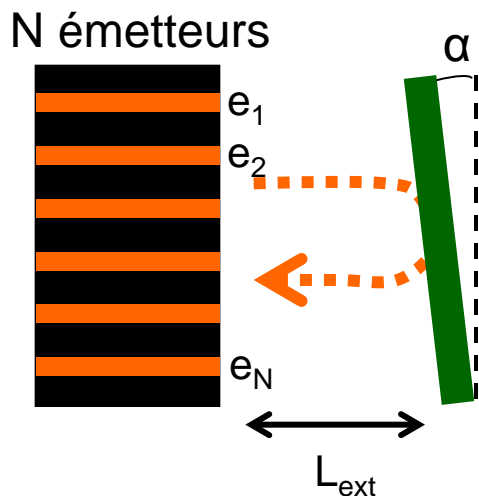
$\alpha_0 = \lambda/2p \rightarrow$ mode en phase

mode en phase



mode hors phase





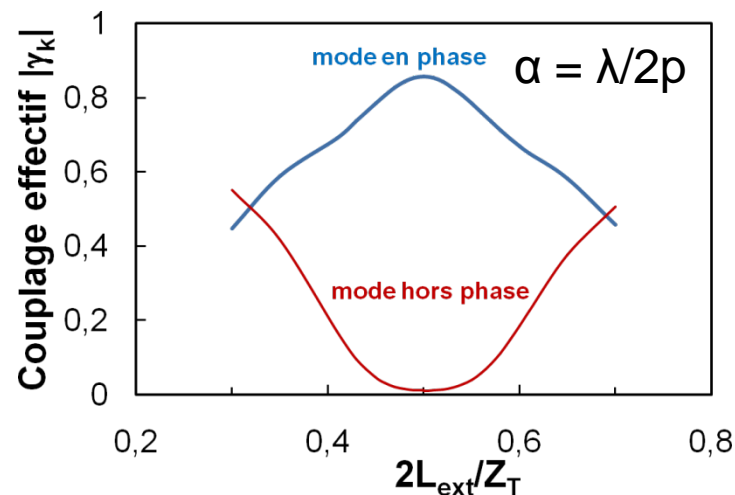
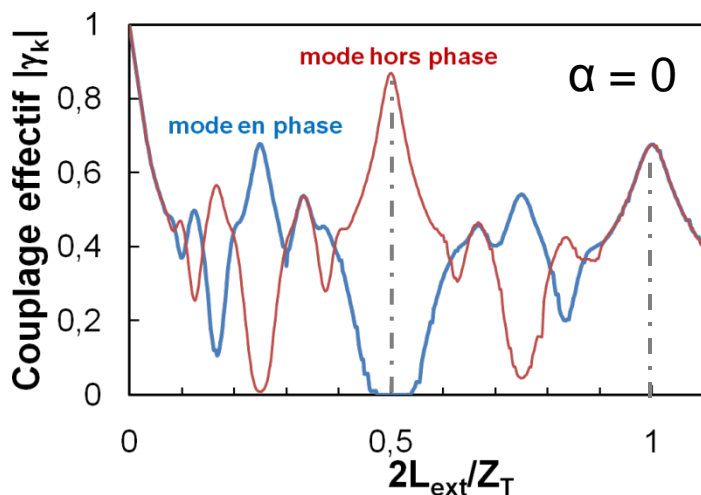
Opérateur cavité :

$C [e_n]$: propagation en espace libre sur $2L_{\text{ext}}$
+ déphasage linéaire (miroir)

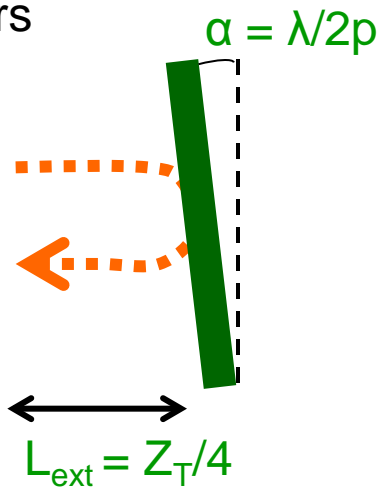
Barrette considérée :

$N = 10$ émetteurs, $p = 100 \mu\text{m}$, $2w/p = 30 \%$

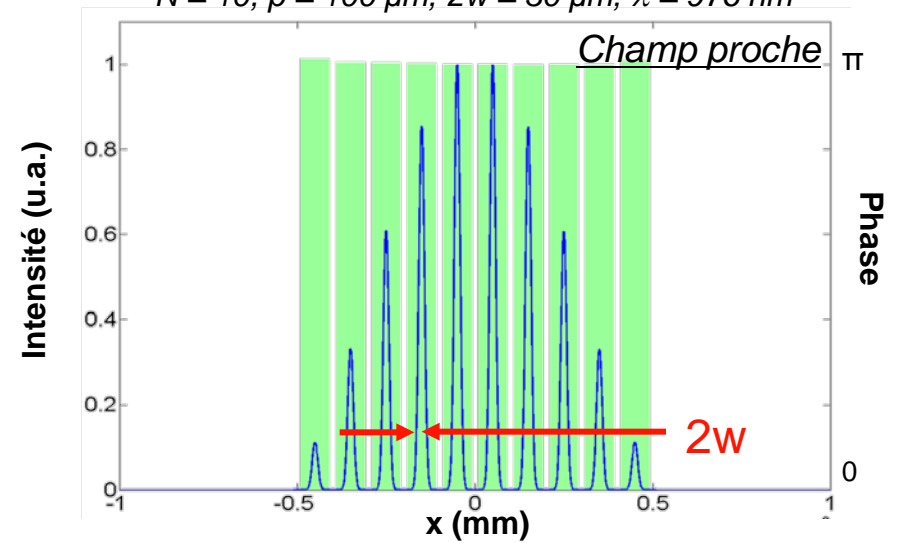
Calcul du couplage effectif en fonction de la longueur de cavité externe :



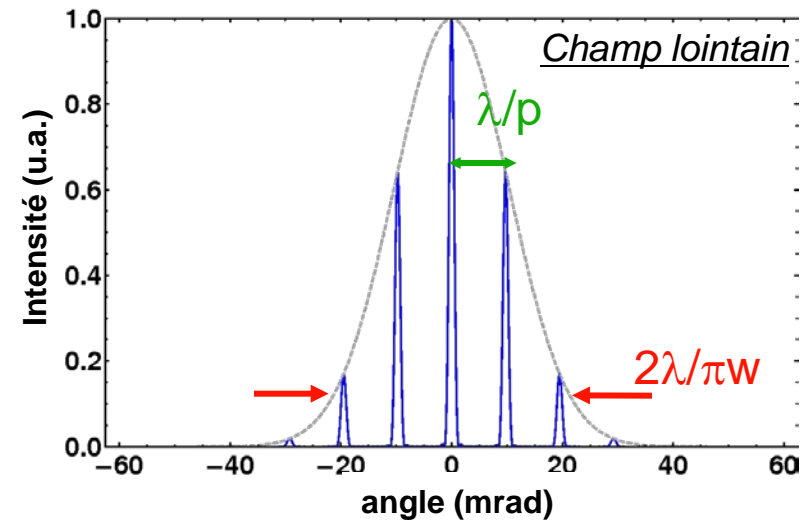
N émetteurs



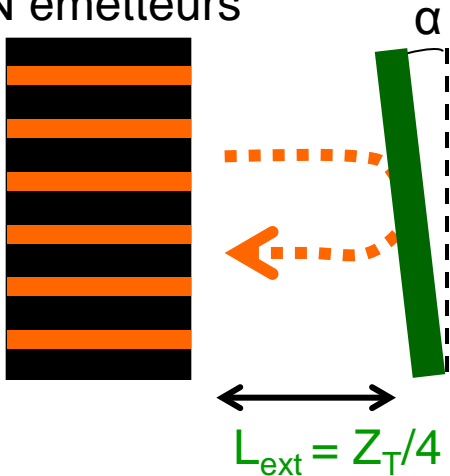
$N = 10, p = 100 \mu\text{m}, 2w = 30 \mu\text{m}, \lambda = 976 \text{ nm}$



- champ proche quasi-sinusoidal
- champ lointain multilobe car $2w/p = 30\%$

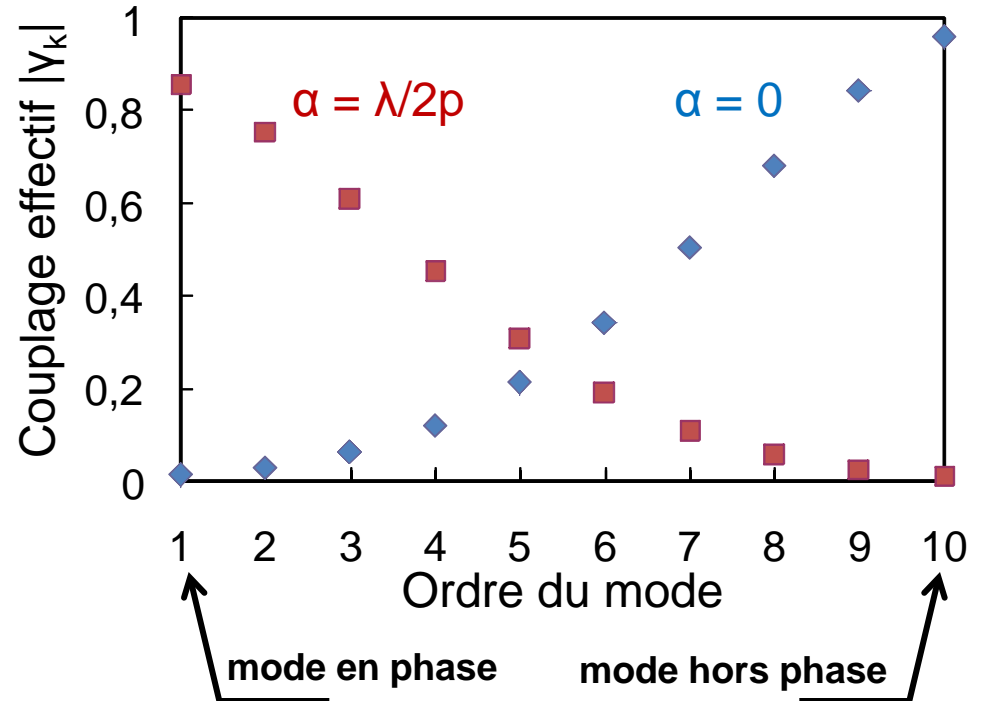


N émetteurs



Calcul du couplage effectif de chaque mode transverse de la cavité :

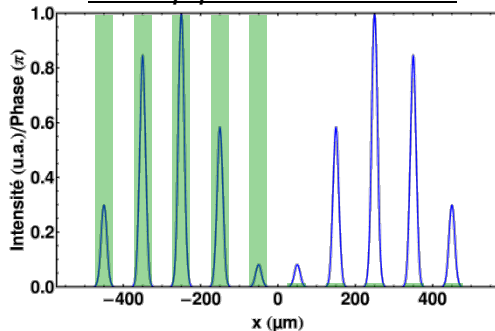
$N = 10, p = 100 \mu\text{m}, 2w = 30 \mu\text{m}, \lambda = 976 \text{ nm}$



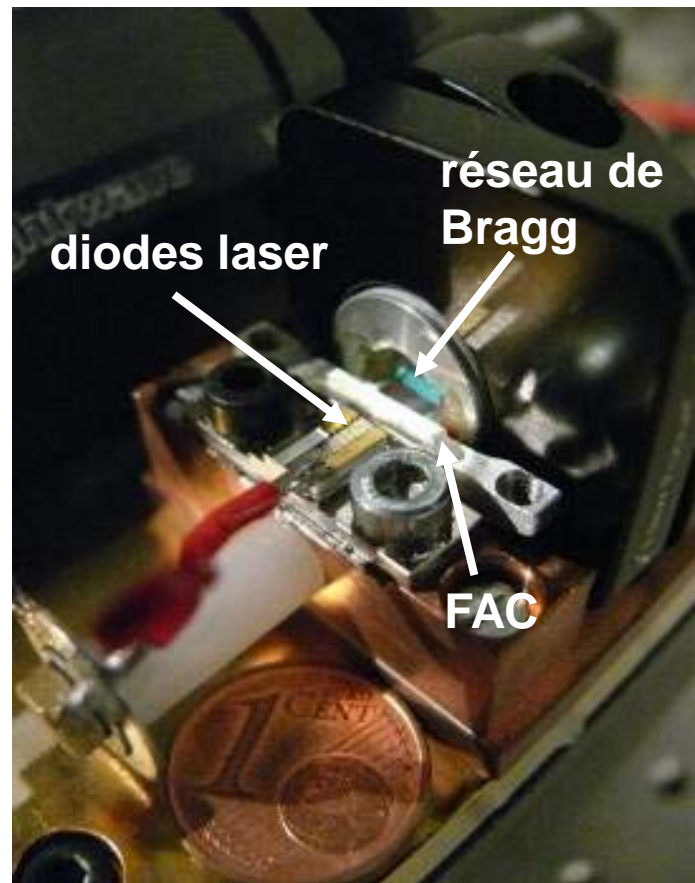
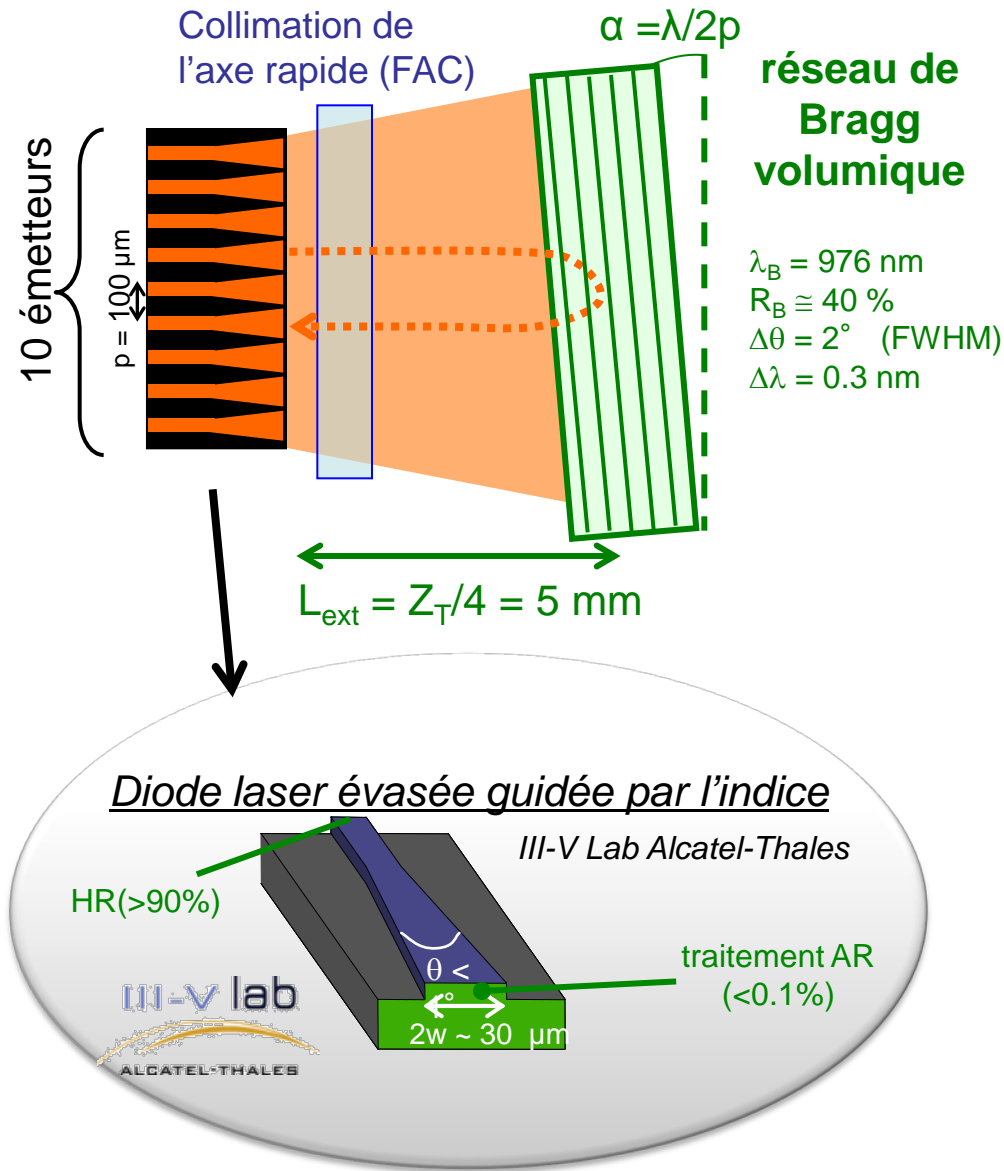
mode en phase :

- couplage ~ 86 %
- discrimination de 15 % avec le mode 2

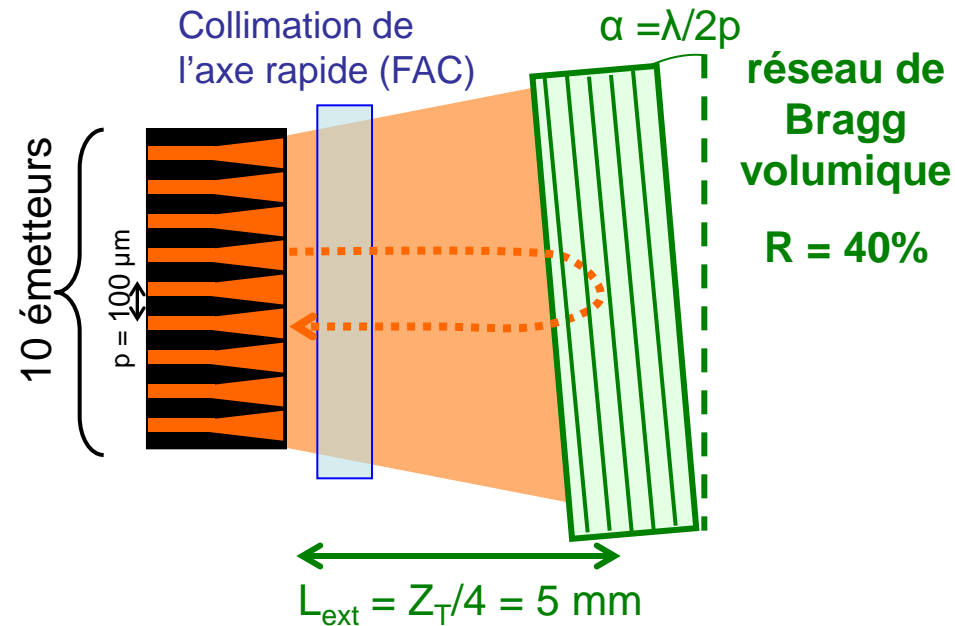
Champ proche du mode 2



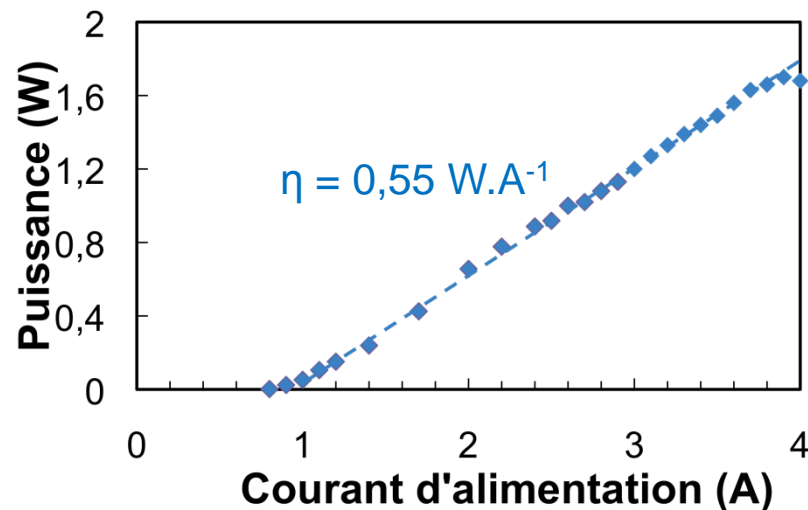
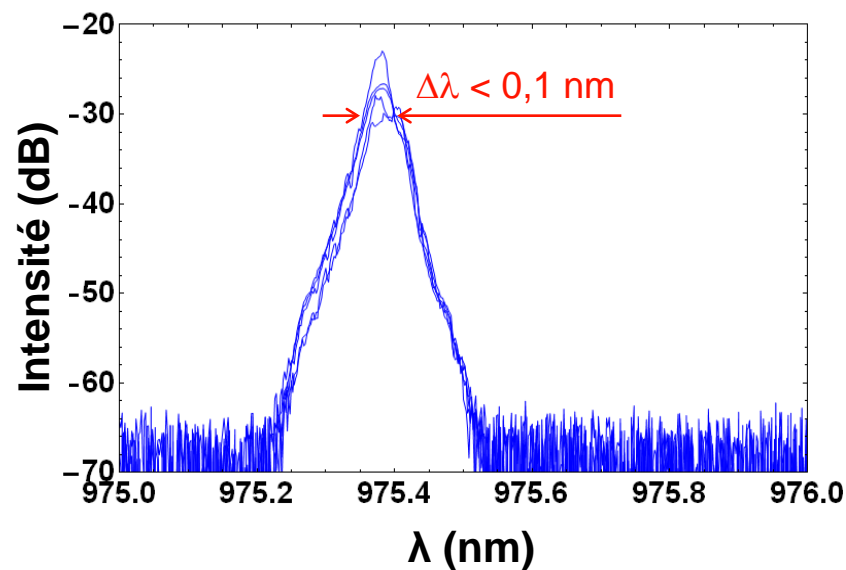
- 1 - Description générale des cavités étudiées
- 2 - Filtrage angulaire intra-cavité
- 3 - Cavité Talbot**
 - Principe/Modélisation
 - **Etude expérimentale**
- 4 - Conversion modale
- Conclusion - Perspectives

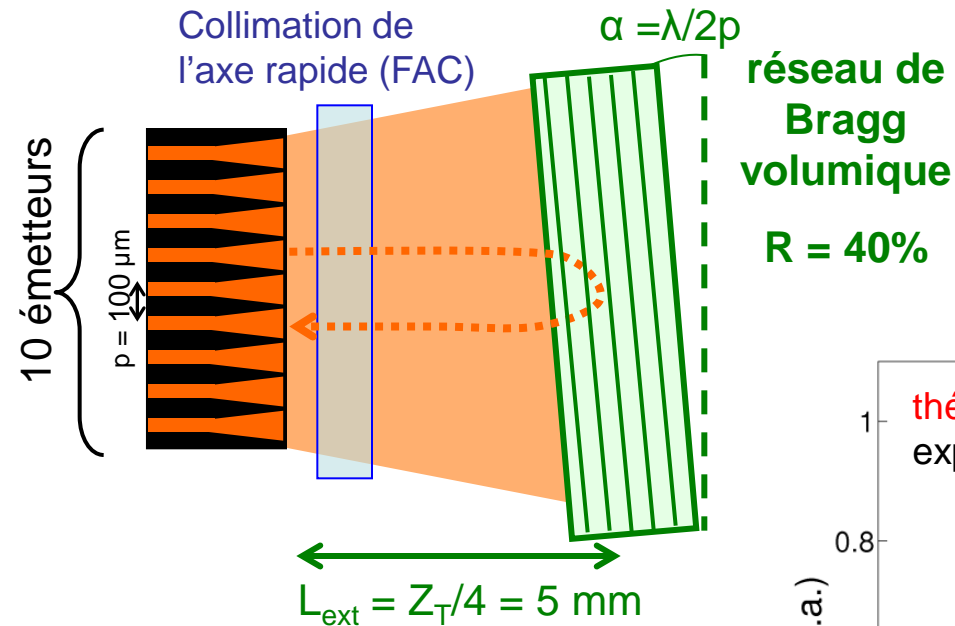


prototype monolithique compact



- Stabilisation spectrale de chaque laser
- Faible largeur spectrale ($\Delta\lambda < 0,1 \text{ nm}$)
- Seuil $I_{\text{th}} = 0,9 \text{ A}$
- $P_{\text{max}} = 1,7 \text{ W @ } 4 \text{ A}$ ($4,4 \times I_{\text{th}}$)

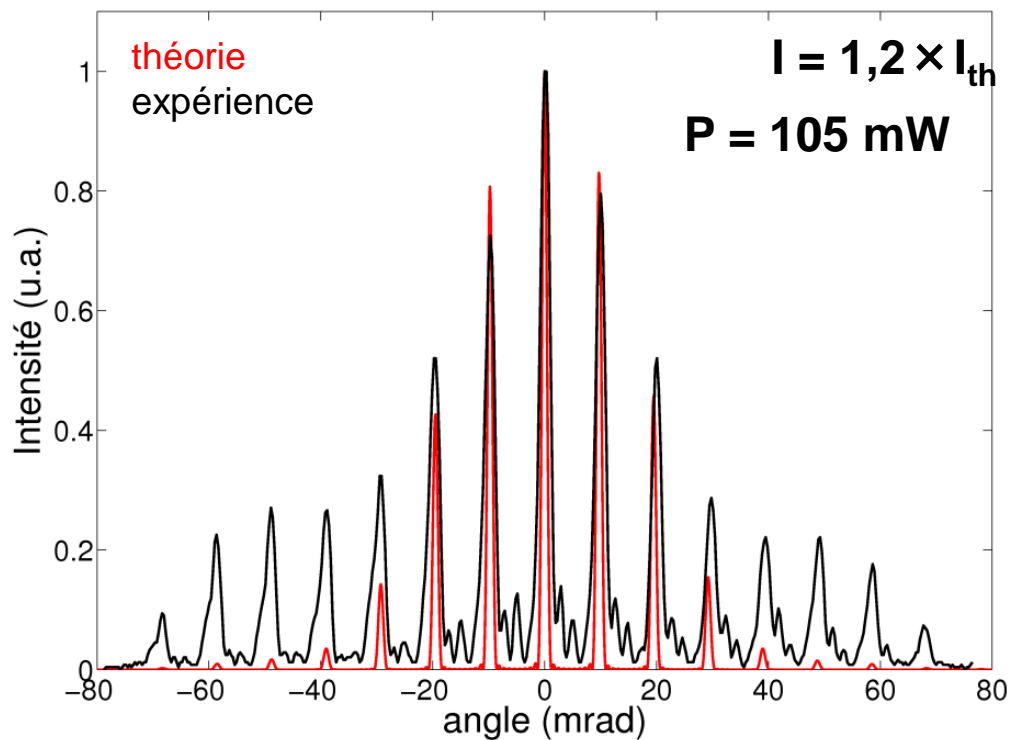




Perturbations à évaluer :

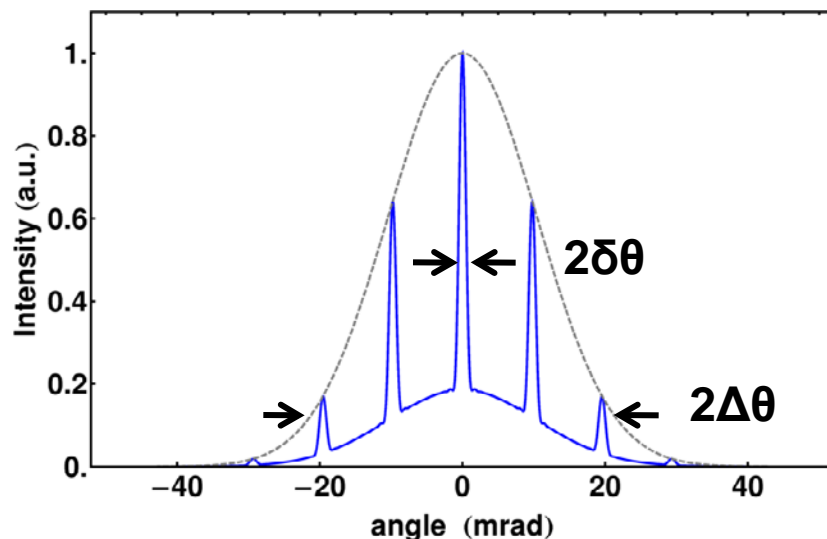
- fond continu incohérent
- élargissement :
de l'enveloppe
des pics d'interférence

Champ lointain



3 critères de caractérisation

Simulation d'un champ lointain dégradé



$N = 10, p = 100 \mu\text{m},$
 $2w = 30 \mu\text{m}, \lambda = 976 \text{ nm}$

M^2 équivalent des émetteurs :
$$M_{em}^2 = \frac{\Delta\theta}{\lambda/\pi w}$$

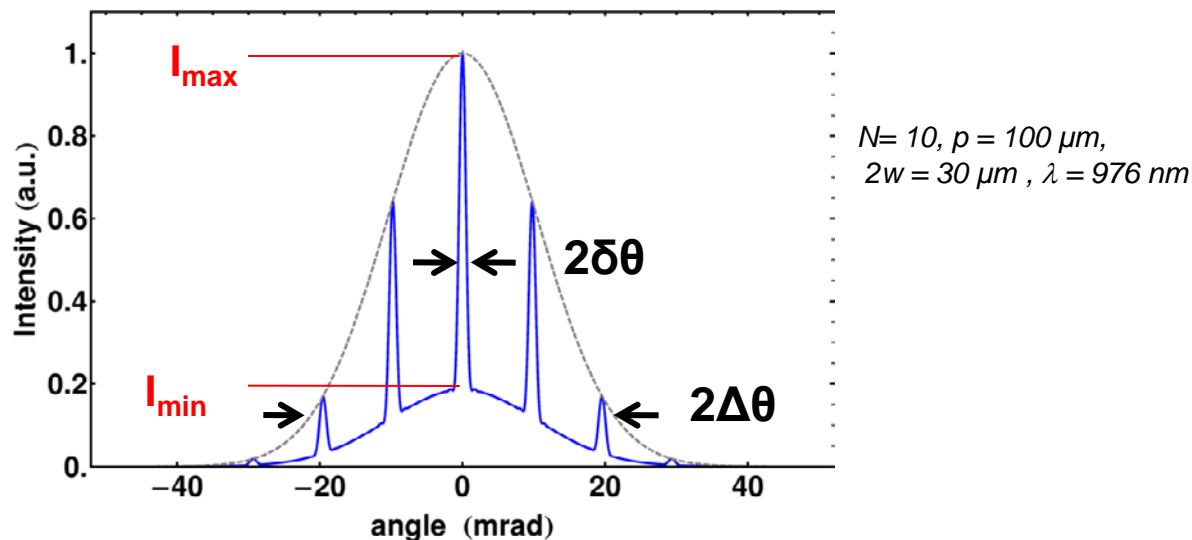
→ mesure de la qualité spatiale des émetteurs

M^2 équivalent de la barrette:
$$M_{bar}^2 = \frac{2\delta\theta}{\lambda/Np}$$

→ mesure de la qualité de la mise en phase

3 critères de caractérisation

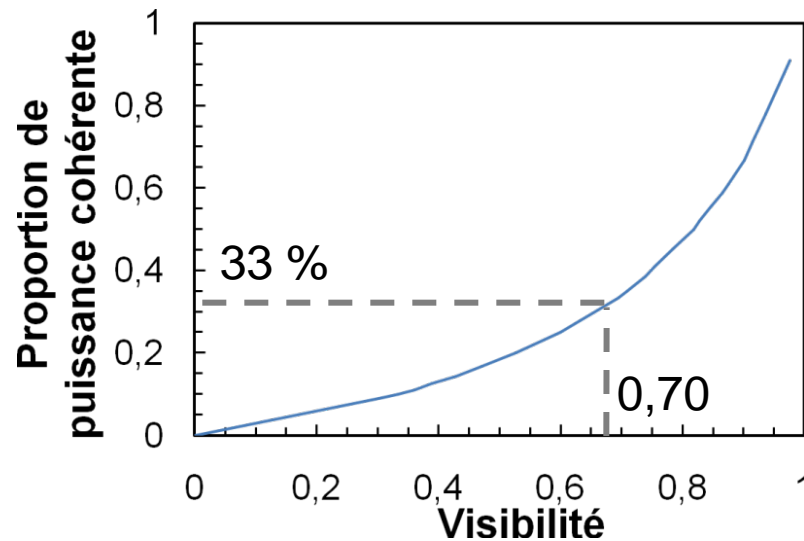
Simulation d'un champ lointain dégradé

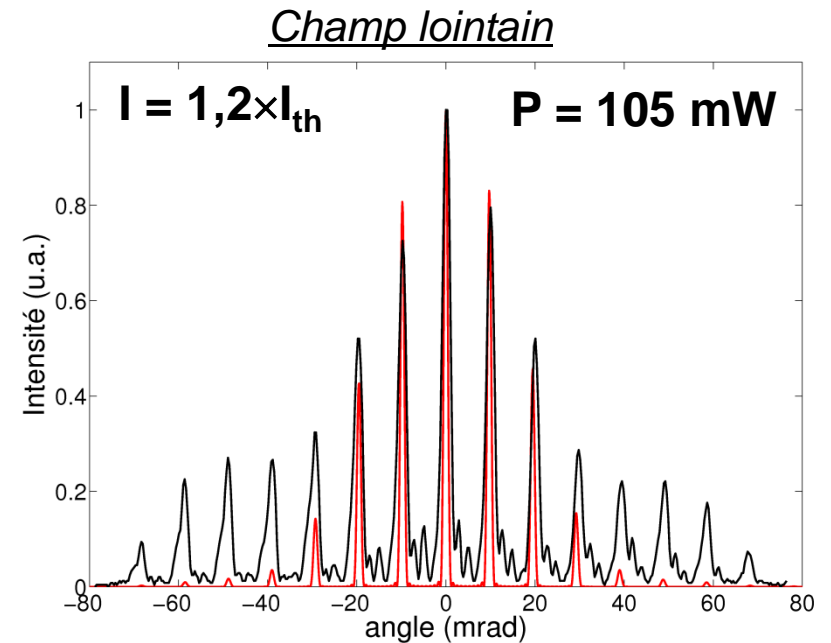
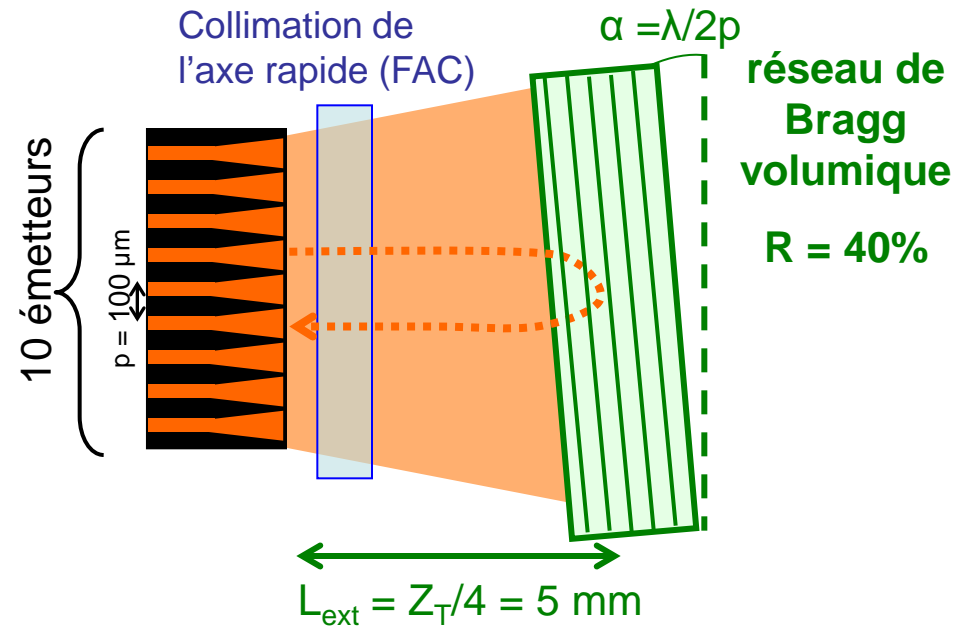


Visibilité des franges:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

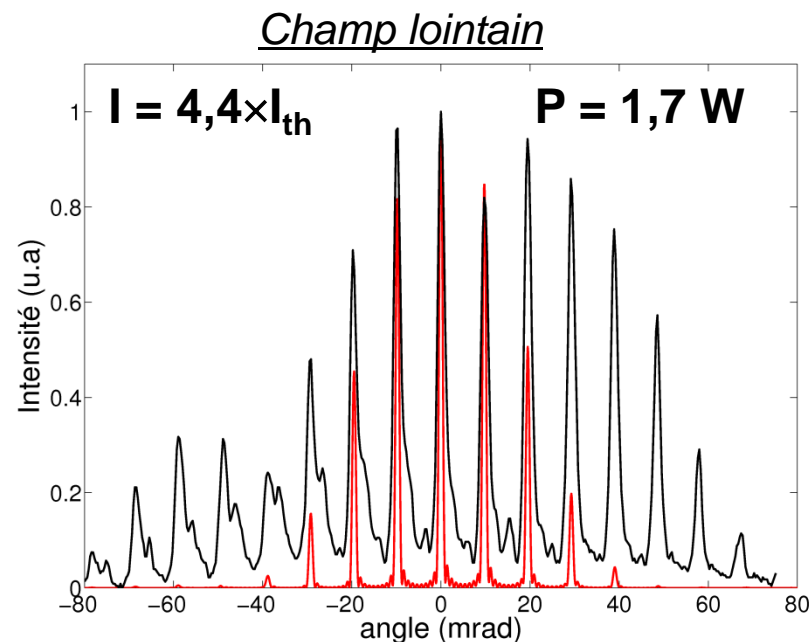
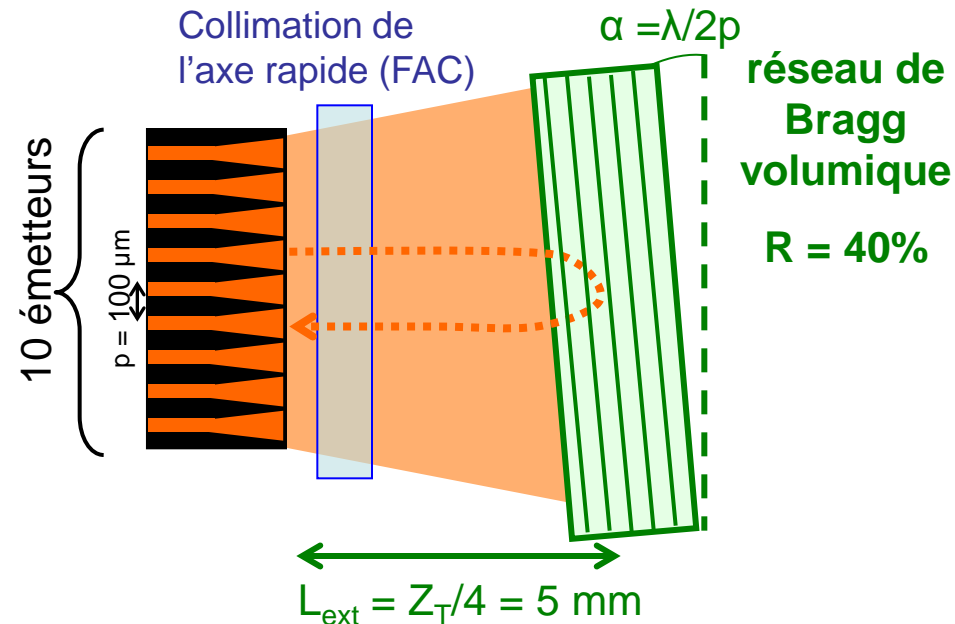
→ évaluation de la proportion de puissance cohérente (C) dans le mode considéré





	$I = 1,2 \times I_{\text{th}}$
M^2_{em}	2,8
M^2_{bar}	2,1
V	0,90
% cohérence	70 %

facteur de qualité équivalent des émetteurs
facteur de qualité équivalent de la barrette
visibilité

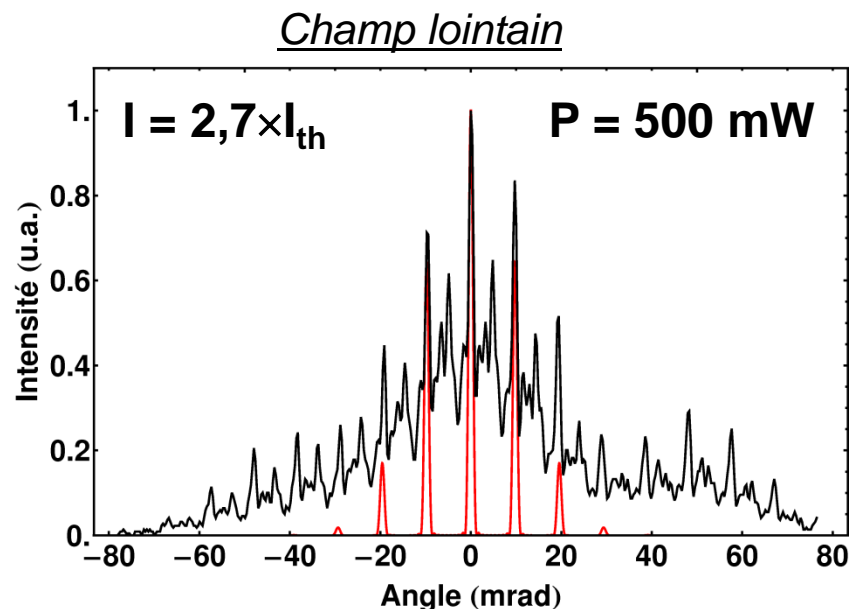
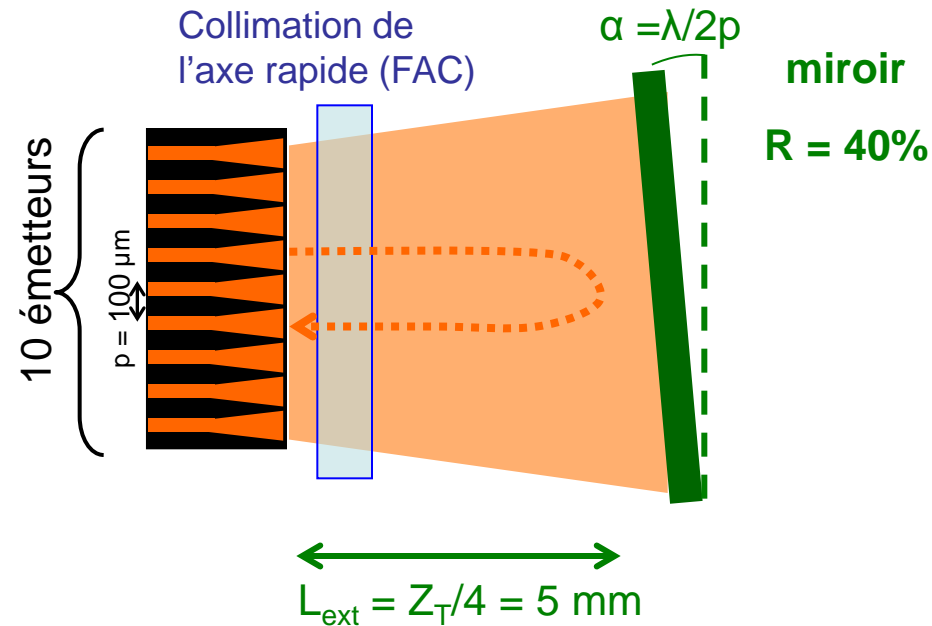


Evolution avec le courant :

	$I = 1,2 \times I_{\text{th}}$	$I = 3,3 \times I_{\text{th}}$	$I = 4,4 \times I_{\text{th}}$
M^2_{em}	2,8	3,1	3,1
M^2_{bar}	2,1	1,4	2,0
V	0,90	0,90	0,82
% cohérence	70 %	70 %	50 %

dégradation de la visibilité
due à l'augmentation du
fond incohérent.

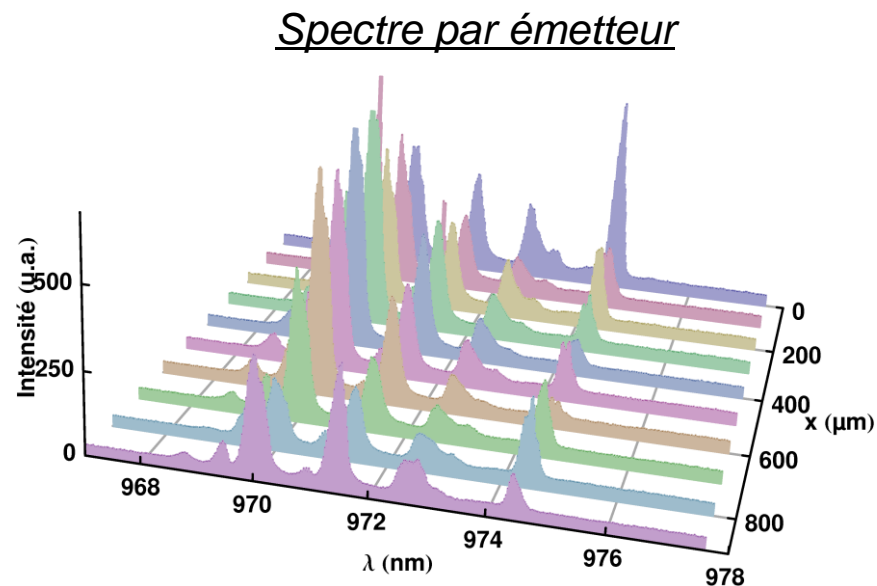
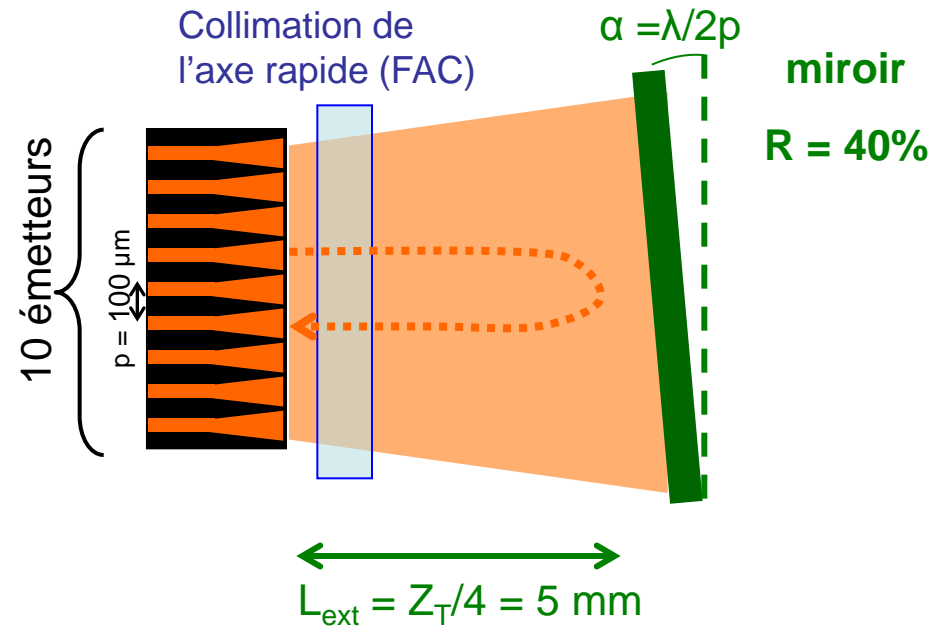
Intérêt du réseau de Bragg



miroir $R = 40\%$

	$I = 1,2 \times I_{\text{th}}$	$I = 3,3 \times I_{\text{th}}$	$I = 4,4 \times I_{\text{th}}$	$I = 2,7 \times I_{\text{th}}$
M^2_{em}	2,8	3,1	3,1	2,7
M^2_{bar}	2,1	1,4	2,0	1,4
V	0,90	0,90	0,82	0,42
% cohérence	70 %	70 %	50 %	15 %

Intérêt du réseau de Bragg



→ La stabilisation spectrale par le réseau de Bragg aide à la mise en phase

miroir $R = 40\%$

	$I = 1,2 \times I_{\text{th}}$	$I = 3,3 \times I_{\text{th}}$	$I = 4,4 \times I_{\text{th}}$	$I = 2,7 \times I_{\text{th}}$
M^2_{em}	2,8	3,1	3,1	2,7
M^2_{bar}	2,1	1,4	2,0	1,4
V	0,90	0,90	0,82	0,42
% cohérence	70 %	70 %	50 %	15 %

$\Delta\lambda_{\text{miroir}} \approx 6 \text{ nm}$
 $\Delta\lambda_{\text{réseau}} < 0,1 \text{ nm}$

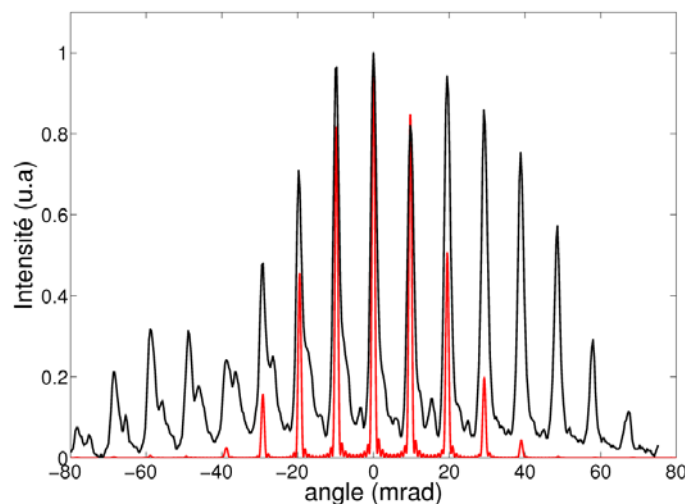
→ Exploitation de l'effet Talbot dans une cavité externe pour la mise en phase d'une barrette de diodes laser de faible taux de remplissage (30%)

spectre stabilisé → $\Delta\lambda < 0,1 \text{ nm}$

$P = 1,7 \text{ W}$

→ 50 % de l'émission selon le mode en phase :

	$I = 4,4 \times I_{th}$
M^2_{em}	3,1
M^2_{bar}	2,0
V	0,82
% cohérence	50 %

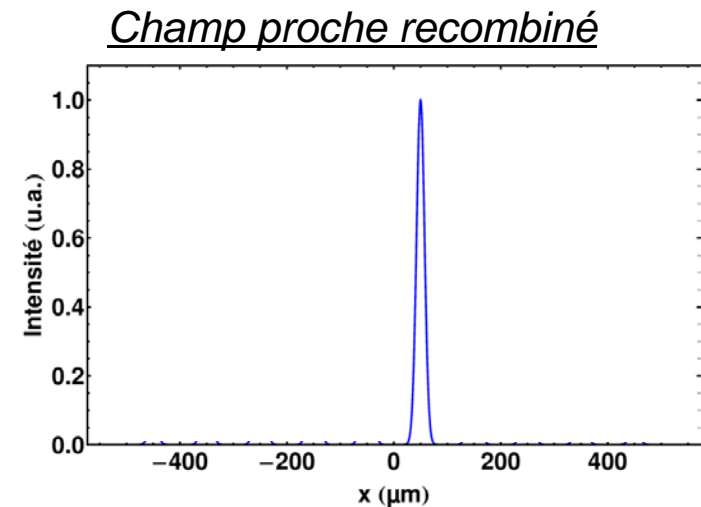
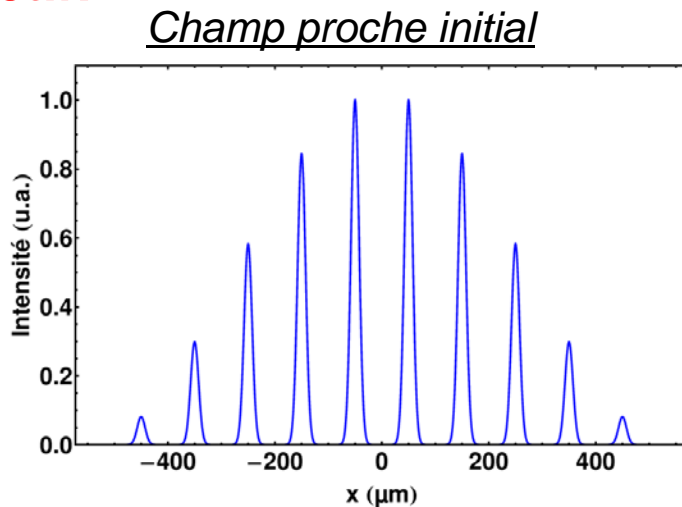


→ **Conversion extra-cavité en un mode de profil gaussien**

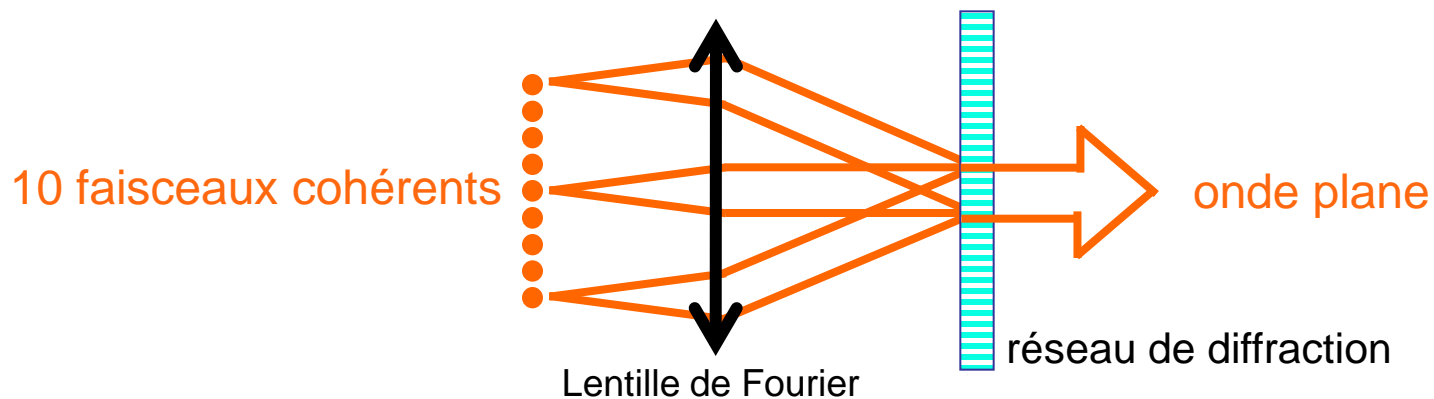
conversion possible car fonctionnement monomode

- 1 - Description générale des cavités étudiées
 - 2 - Filtrage angulaire intra-cavité
 - 3 - Cavité Talbot
 - 4 - Conversion modale
 - Principe
 - Résultats expérimentaux
- Conclusion - Perspectives

Objectif:

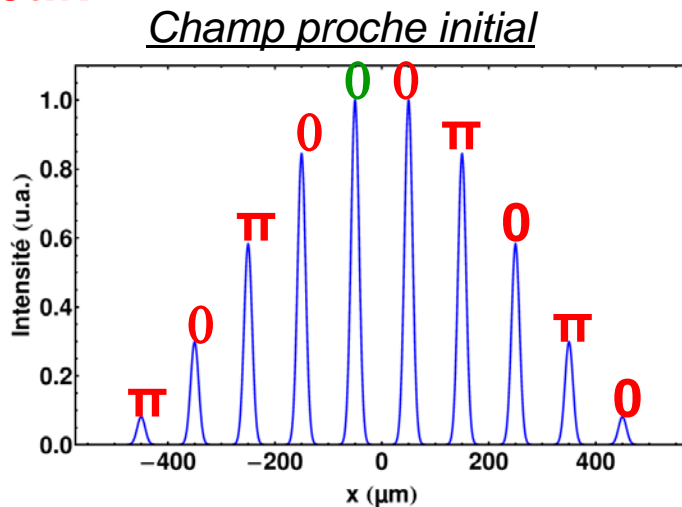


- superposition des faisceaux cohérents avec un **réseau de diffraction**.



→ **Figure de diffraction identique au champ proche des lasers (intensité + phase)**

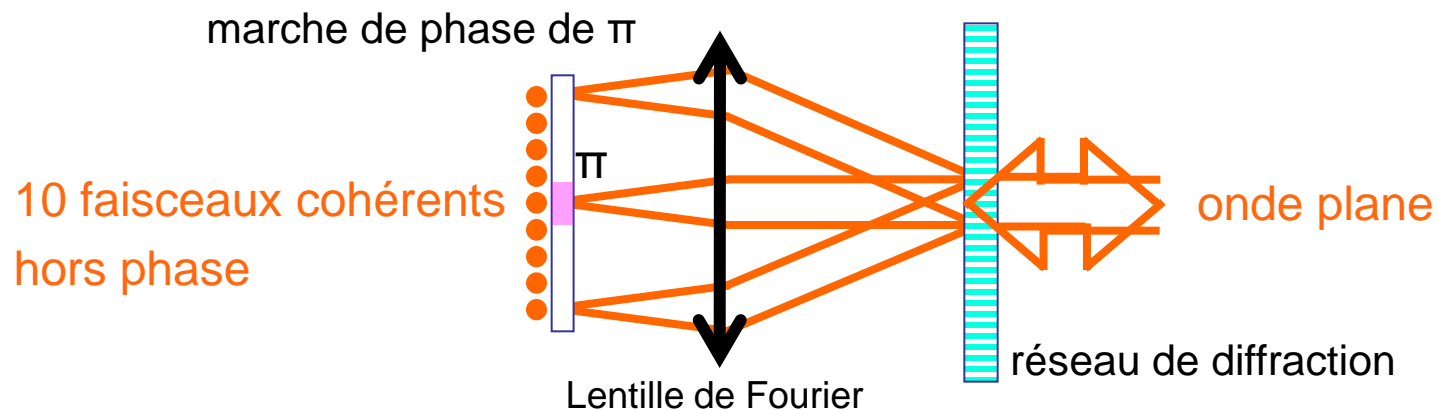
Objectif:



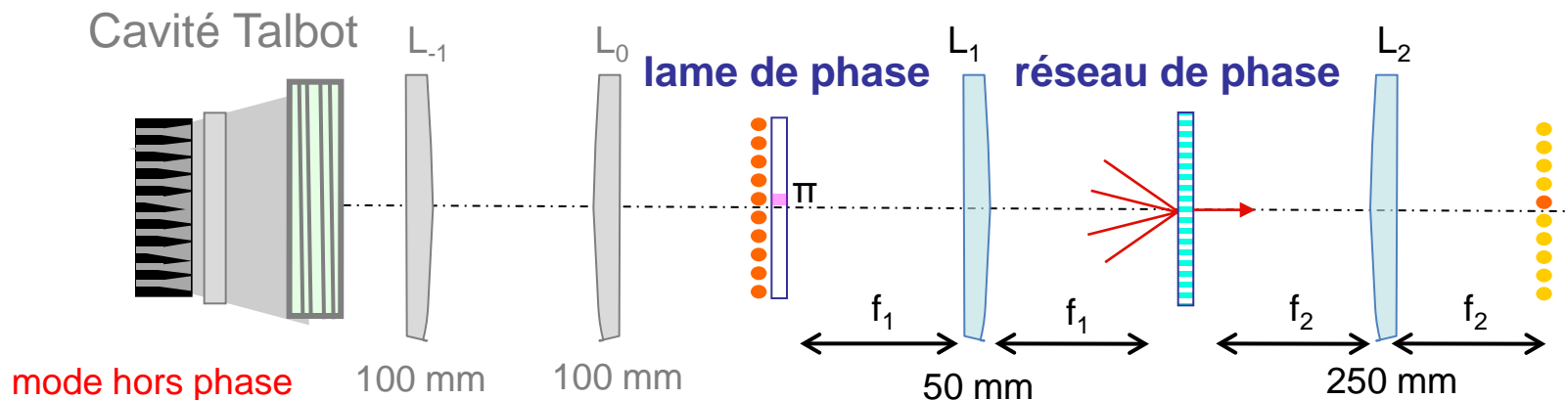
Configuration choisie :

→ réseau de phase binaire (0 – π)

→ efficacité de diffraction maximale pour :
mode hors phase + marche de π



→ Figure de diffraction identique au champ proche des lasers (intensité + phase)



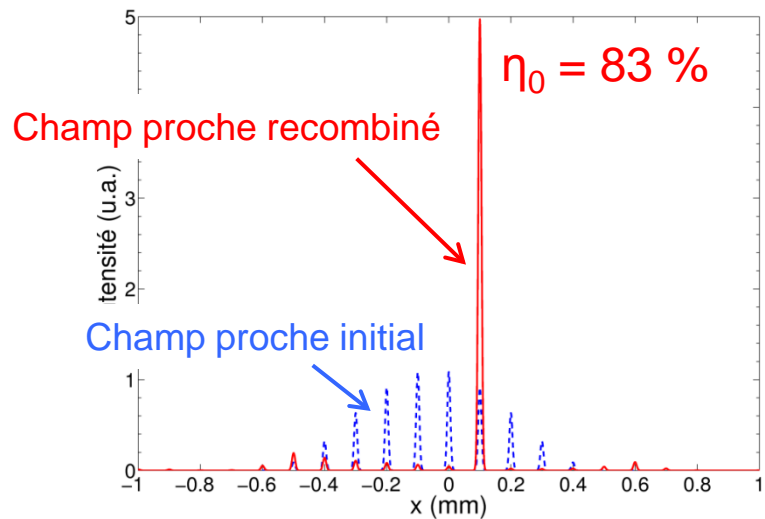
Efficacité de recombinaison :

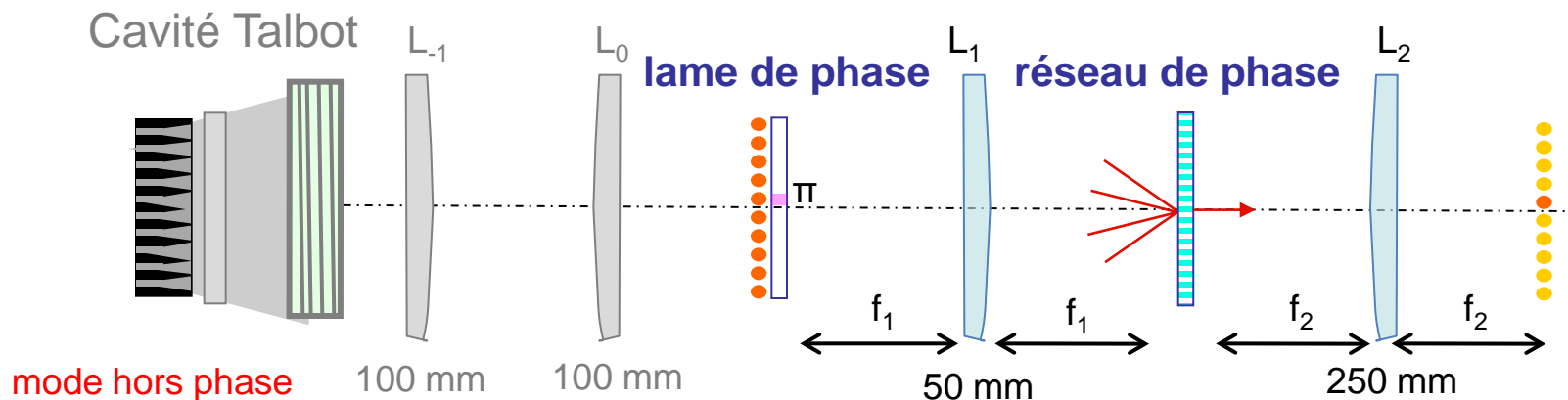
$$\eta = \frac{P_{\text{combinée}}}{P_{\text{totale}}} = C \times \eta_0$$

proportion de
puissance cohérente

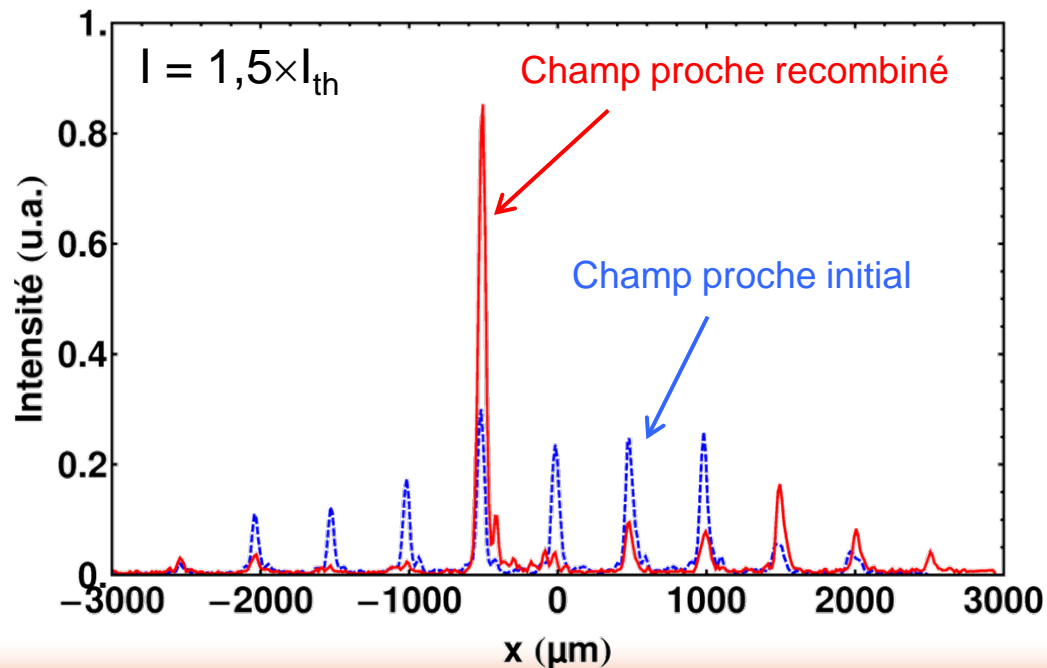
efficacité théorique
maximale

Profils en champ proche théoriques :

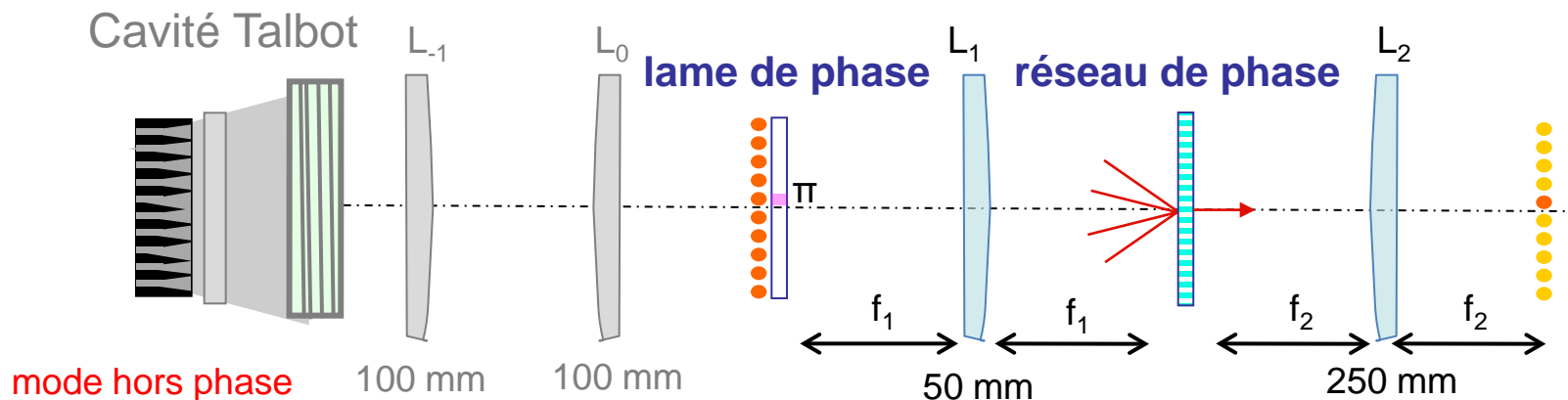




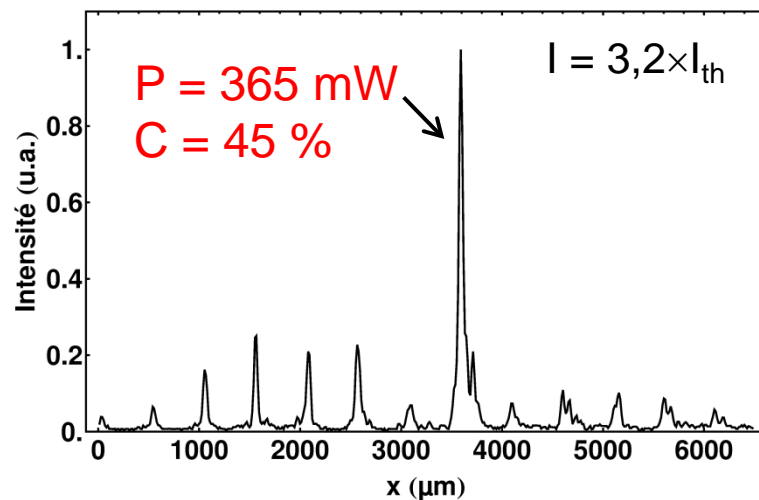
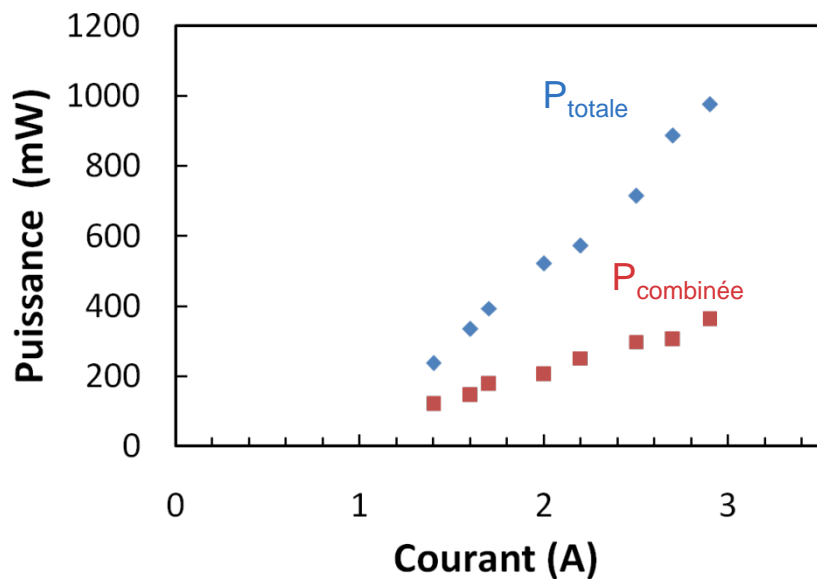
Profils en champ proche :



$P = 120 \text{ mW}$
 $C = 60 \%$



Evolution avec le courant :



$L = 22 \text{ MW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

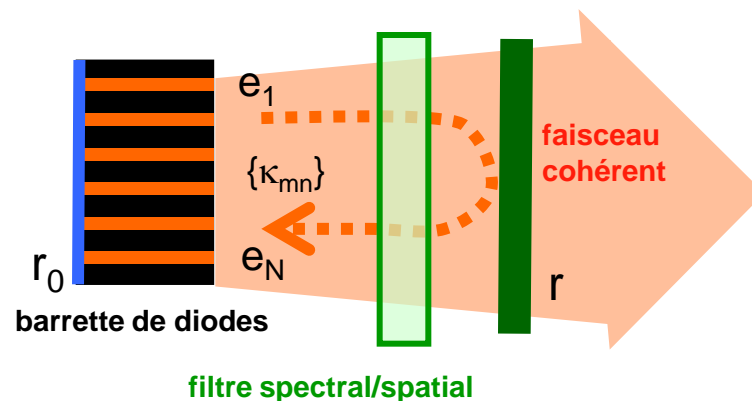
- 1 - Description générale des cavités étudiées
 - 2 - Filtrage angulaire intra-cavité
 - 3 - Cavité Talbot
 - 4 - Conversion modale
- Conclusion - Perspectives**

Recherche de solutions de mise en phase passive de diodes laser

Objectifs : en **cavités externes** exploitant les propriétés de filtrage spatial et spectral des **réseaux de Bragg volumiques**.

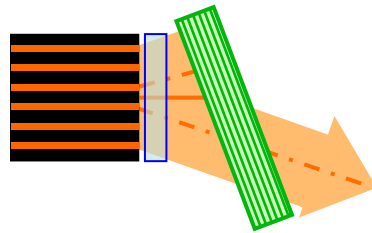
- Modélisation et conception des cavités externes:

- propagation en espace libre dans la cavité externe
- réseaux de Bragg (propriétés, effet sur le couplage)
- modèle "actif" de la cavité avec l'Université de Nottingham



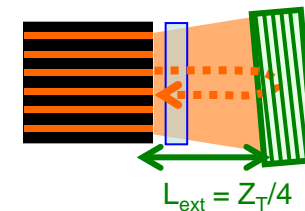
- Modélisation et conception des cavités externes
- Etude théorique et expérimentale de deux solutions originales

Filtrage angulaire



- *filtrage en champ lointain*

Cavité Talbot



- *filtrage en champ proche*

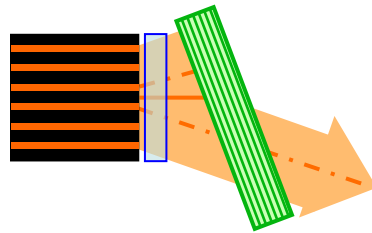
- Evaluation numérique du comportement modal
- Bénéfice de la stabilisation du spectre sur la qualité spatiale

Barrette de fort taux de remplissage
faisceau directement monolobe

Barrette de faible taux de remplissage
faisceau multilobe

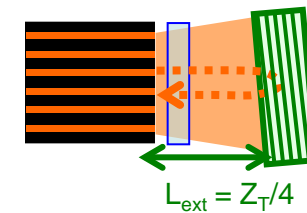
- Modélisation et conception des cavités externes
- Etude théorique et expérimentale de deux solutions originales
- **Etude d'une technique de conversion modale extra-cavité**

Filtrage angulaire



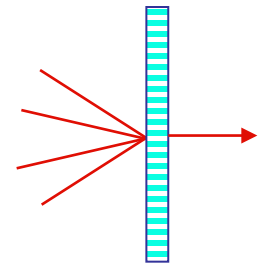
- *filtrage en champ lointain*

Cavité Talbot



- *filtrage en champ proche*

réseau de phase



- **Evaluation numérique du comportement modal**

- Bénéfice de la stabilisation du spectre sur la qualité spatiale

Barrette de fort taux de remplissage
faisceau directement monolobe

Barrette de faible taux de remplissage
faisceau multilobe

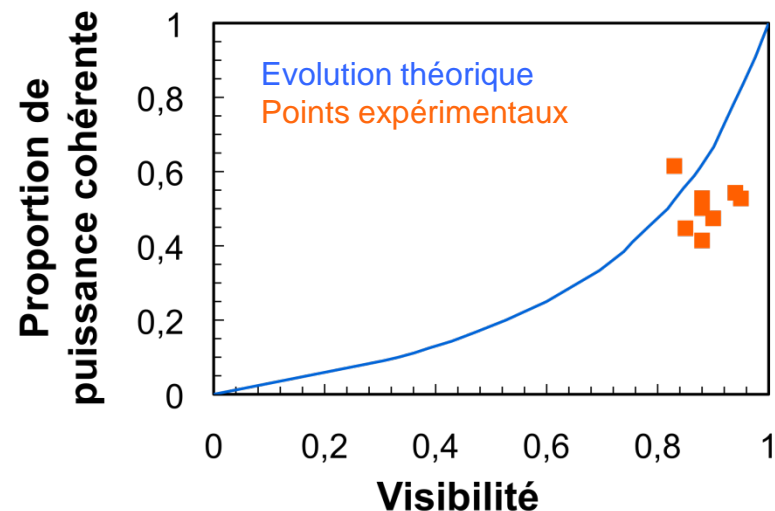
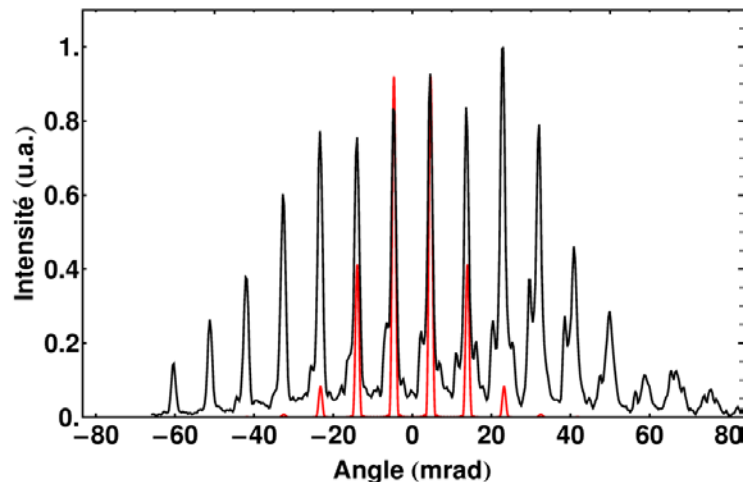


Conversion en un faisceau gaussien

- Modélisation et conception des cavités externes
- Etude théorique et expérimentale de deux solutions originales
- Etude d'une technique de conversion modale extra-cavité
- **Caractérisation fine du faisceau mis en phase adaptée aux diodes laser**

M^2_{bar} , M^2_{em} , **Visibilité du champ lointain**

profil en champ lointain



Conversion modale = **Mesure de la proportion de puissance cohérente (C)**

Ce travail → démonstration de principe de cavités simples et compactes

Objectif : augmenter la puissance → $P > 30 \text{ W}$

Utilisation d'émetteurs monomodes plus puissants:

diodes laser évasées à guidage par le gain (~5 W par émetteur)

→ s'adapter à une autre géométrie :

largeur totale > 5 mm
faisceau astigmatique } → optiques

facteurs de remplissage très faibles (qq %) → conversion modale

→ meilleure compréhension des sources de perturbations de la mise en phase

modéliser la compétition émission incohérente – émission cohérente
modéliser les effets thermiques

→ pour de nouvelles applications :

conversion non linéaire: $P > 3 \text{ W}$ dans le visible
utilisation directe (usinage, illuminateurs laser,...)



Nicolas Michel, Michel Krakowski

Alcatel Thales III-V Lab



Jun Jun Lim, Slawomir Sujecki, Eric Larkins

School of Electrical and Electronic Engineering, Université de Nottingham

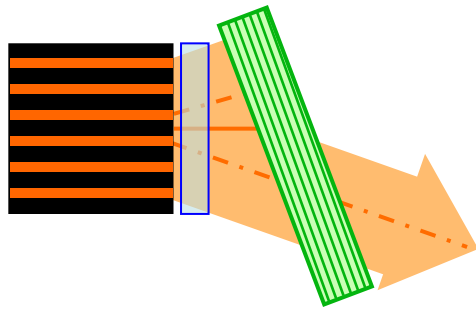


Raymond Mercier, Sébastien de Rossi

Groupe SCOP, Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

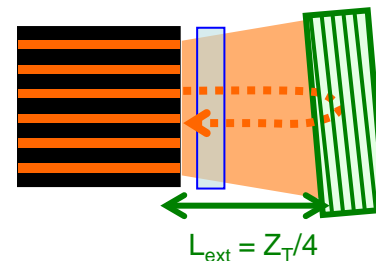
- Modélisation et conception des cavités externes
- Etude théorique et expérimentale de deux solutions originales
- Etude d'une technique de conversion modale extra-cavité
- **Caractérisation fine du faisceau mis en phase adaptée aux diodes laser**

Filtrage angulaire

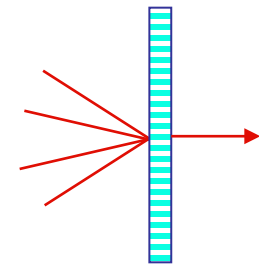


- *filtrage en champ lointain*

Cavité Talbot



- *filtrage en champ proche*



réseau de phase