



Lasers monomodes à faible sensibilité à la rétroaction optique pour les transmissions à 2,5 GBit/s sans isolateur

Thèse de Doctorat soutenue par Frédéric Grillot,
le mardi 22 avril 2003

OPTO+
Alcatel Research & Innovation
Route de Nozay, 91460, Marcoussis
France

Responsable Universitaire : Pr. Michel de Labachellerie (LPMO-CNRS)
Responsable Alcatel : Dr. Bruno Thedrez



- ◆ Contexte de la thèse
- ◆ Transmission et rétroaction optique externe
- ◆ Les lasers DFB à réseau uniforme
- ◆ Les lasers DFB à réseau asymétrique
- ◆ Conclusions et perspectives

◆ Contexte de la thèse

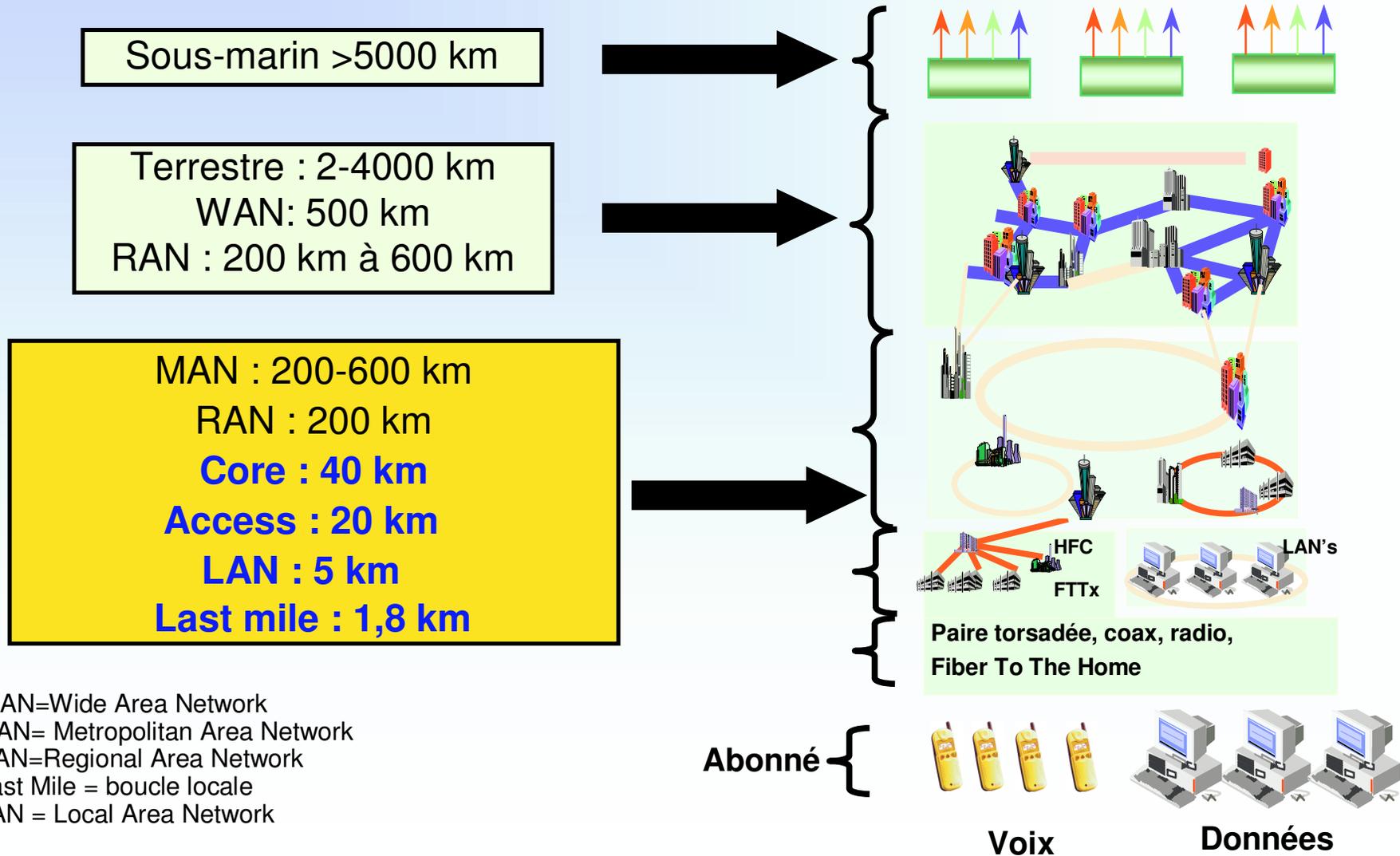
- Les réseaux de transmission
- Adaptation des composants au marché métropolitain
- Spécifications en transmission
- Lasers monomodes en transmission sans isolateur optique : état de l'art

◆ Transmission et rétroaction optique externe

◆ Les lasers DFB à réseau uniforme

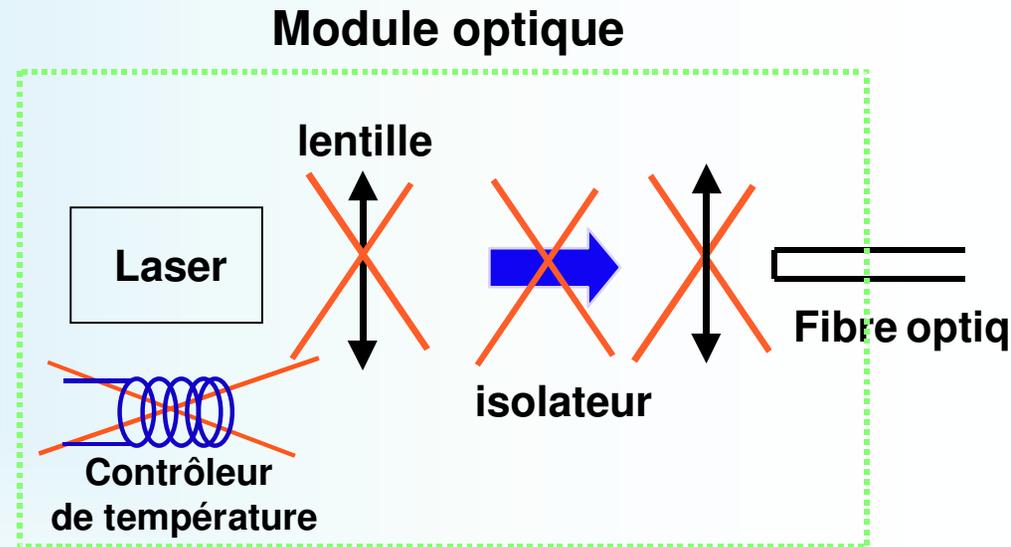
◆ Les lasers DFB à réseau asymétrique

◆ Conclusions et perspectives



WAN=Wide Area Network
 MAN= Metropolitan Area Network
 RAN=Regional Area Network
 Last Mile = boucle locale
 LAN = Local Area Network

- ◆ Laser directement modulé à 1,3 μm
 - Température : -40 °C +85 °C
 - 2 km < distance < 40 km
 - Taux de transmission : 2,5 GBit/s

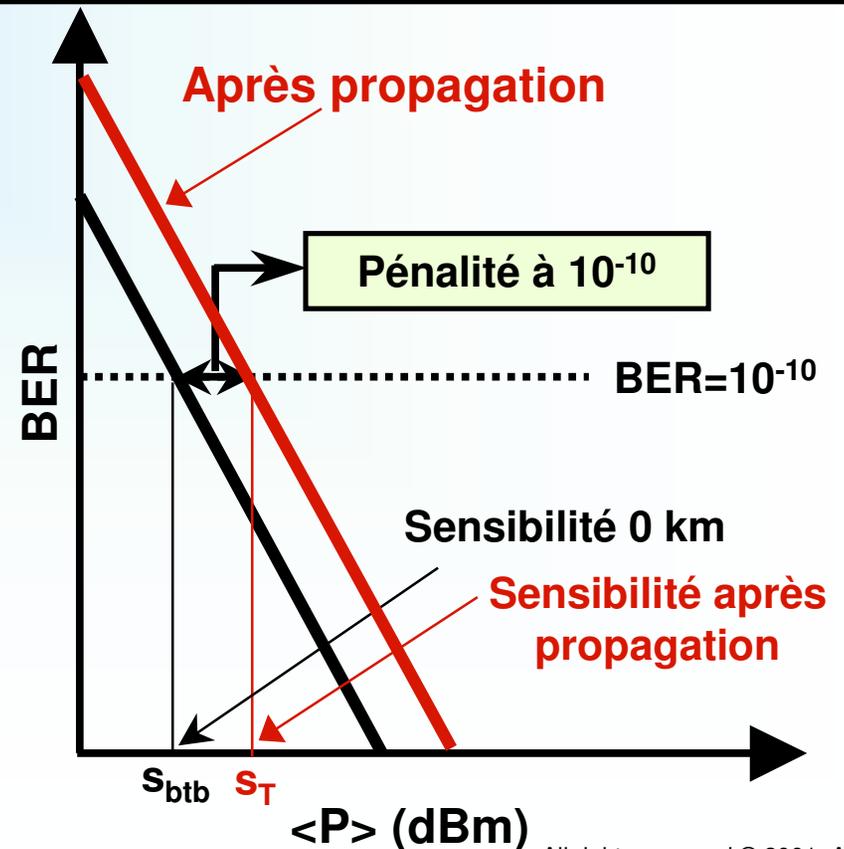


- ◆ Réalisation de transmissions à 2,5 GBit/s sur des diodes lasers directement modulées **sans isolateur optique**
- ◆ Objectif : vers un module sans optique et sans contrôleur de température

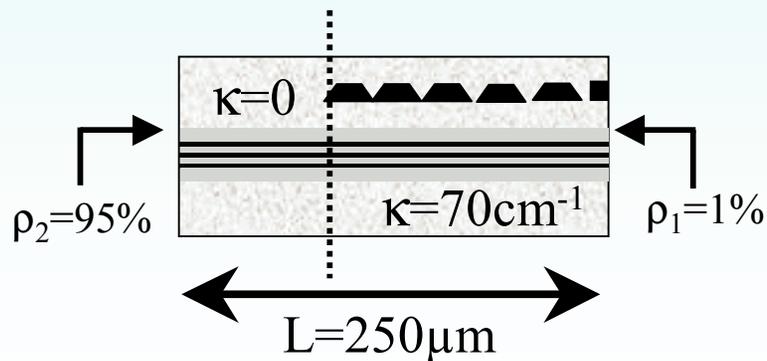
⇒ Réduction du coût du module optique (opération de mise en boîtier)

- ◆ Transmissions à 2,5 GBit/s et à 85 °C ($\lambda=1,3 \mu\text{m}$) :
 - Dispersion chromatique : 300 ps/nm ($\approx 30\text{-}40 \text{ km}$)
 - Sous conditions ITU (ref. G.957) : pénalité < 1dB pour un taux de retour optique minimum de -24 dB

- ◆ **Back-to-back** : sans propagation
- ◆ **Sensibilité** : puissance correspondant à $\text{BER}=10^{-10}$
- ◆ **Pénalité** : les caractéristiques du récepteur ne sont pas prises en compte.
- ◆ **Plancher** : taux d'erreur constant quelle que soit la puissance arrivant sur le récepteur.
 - Aucune transmission ne peut être effectuée



- ◆ Lasers conventionnels : pas de transmission à 2,5 GBit/s et à 85 °C sans isolateur optique
- ◆ Lasers à couplage par le gain : résultats partiels publiés (Ring *et al.*, 1998)
 - Résultats CW : non communiqués
 - Transmissions sans plancher à 2,5 GBit/s (-20 °C +85 °C) sur une distance de propagation : non communiquée
 - Pénalité max. <1dB (rétroaction optique max. : -14 dB)
- ◆ Yuang *et al.* (1999): lasers DFB à couplage par l'indice



◆ Résultats CW à 85 °C :

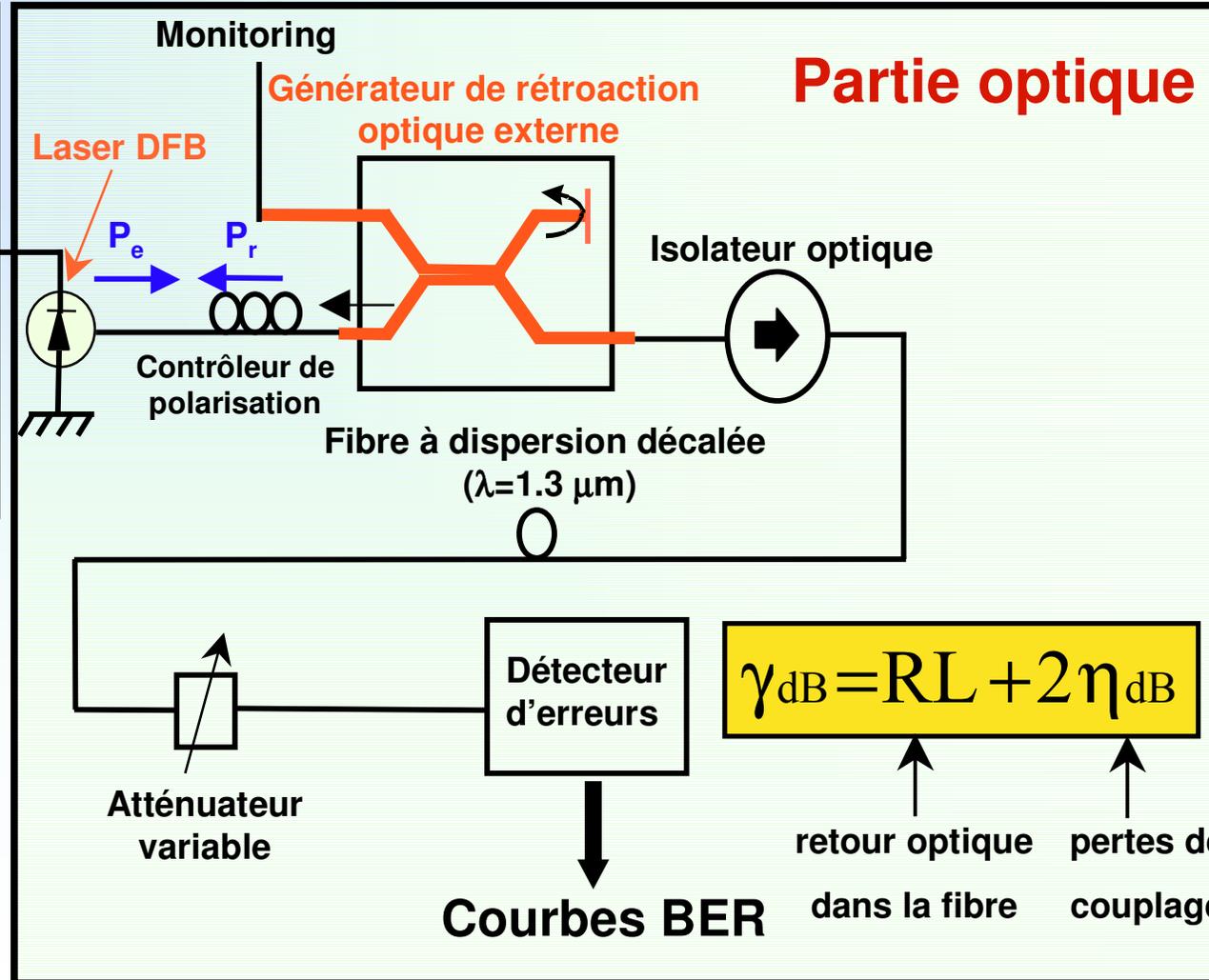
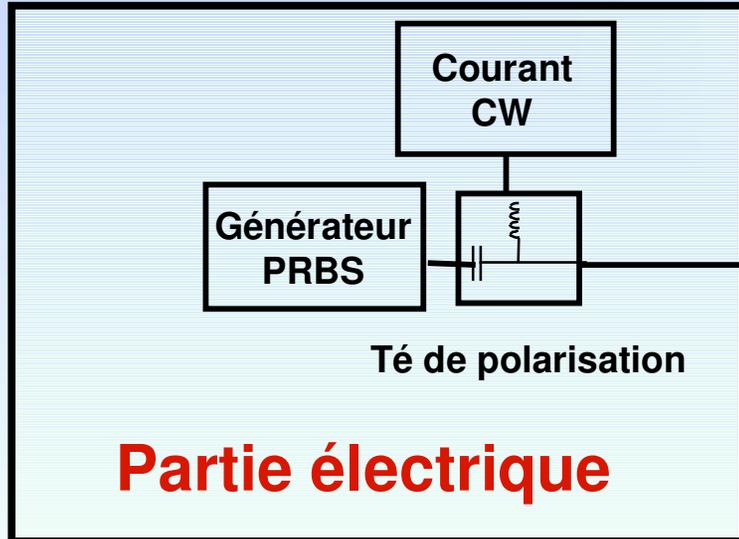
- Courant de seuil : $I_{\text{th}}=16\text{ mA}$
- Rendement : $\eta=0,26\text{ W/A}$

◆ Résultats dynamiques :

- Transmissions à 2,5 GBit/s sans plancher (-40 °C +85 °C) sur 45 km
- Pénalité max. +1.5 dB (rétroaction optique max. : -14 dB)

- ◆ Contexte de la thèse
- ◆ Transmission et rétroaction optique externe
 - Etude expérimentale de la pénalité en transmission
 - Le seuil d'effondrement de la cohérence
 - Calcul du coefficient C
- ◆ Les lasers DFB à réseau uniforme
- ◆ Les lasers DFB à réseau asymétrique
- ◆ Conclusions et perspectives

Etude expérimentale de la pénalité en transmission

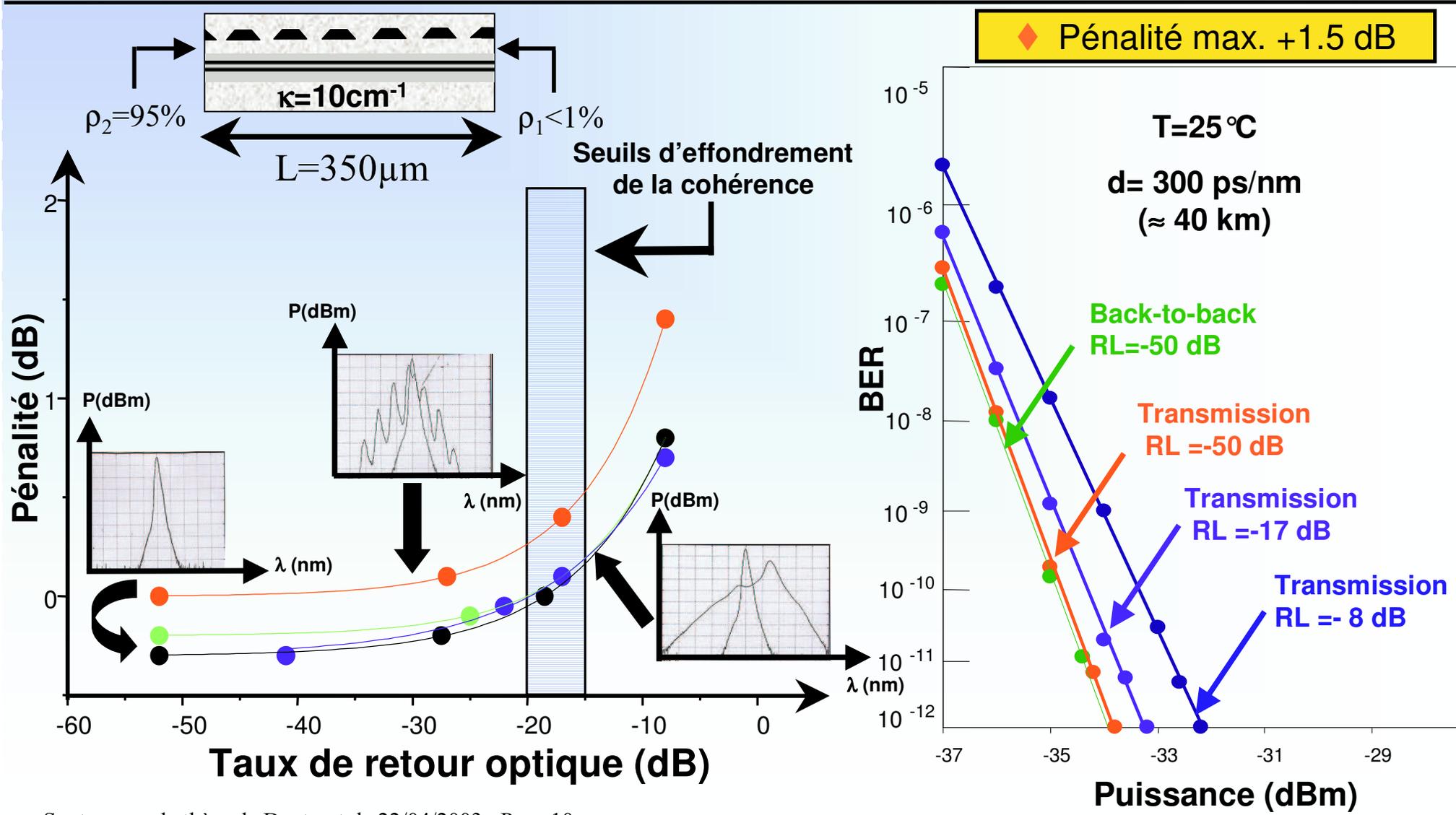


♦ Longueur de cavité externe utilisée : 1,5 m, 13 m, 350 m

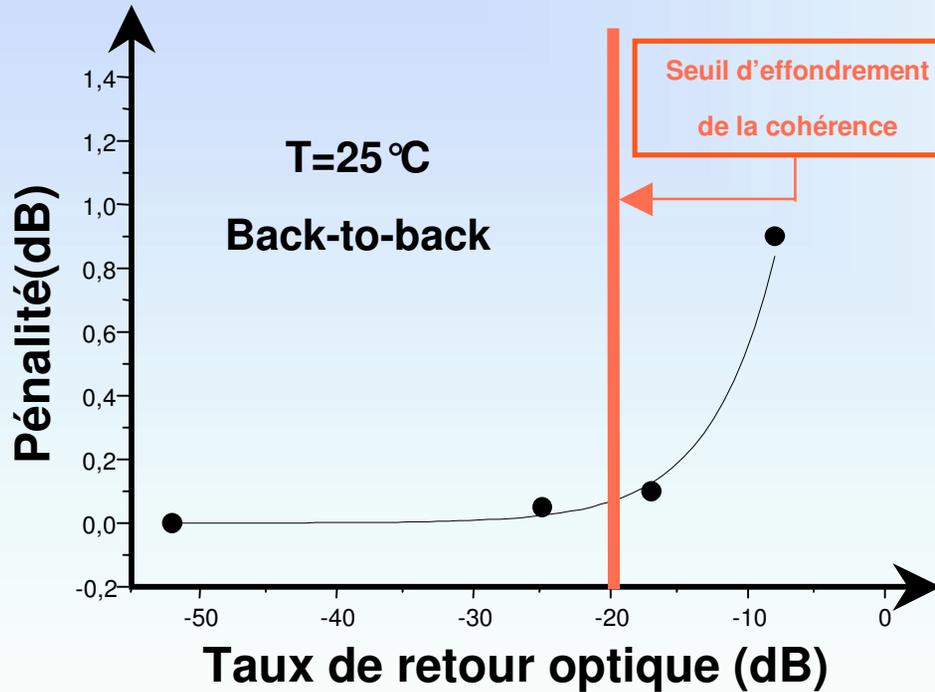
$$\gamma_{\text{dB}} = \text{RL} + 2\eta_{\text{dB}}$$

↑ retour optique dans la fibre ↑ pertes de couplage

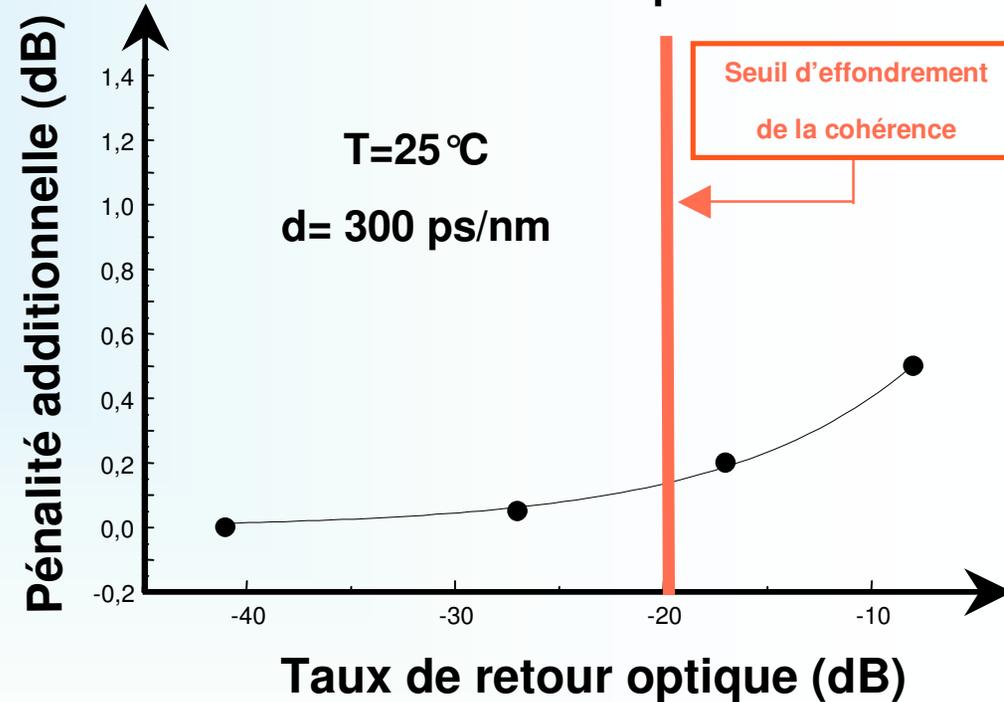
Courbes BER



Effet du bruit d'intensité



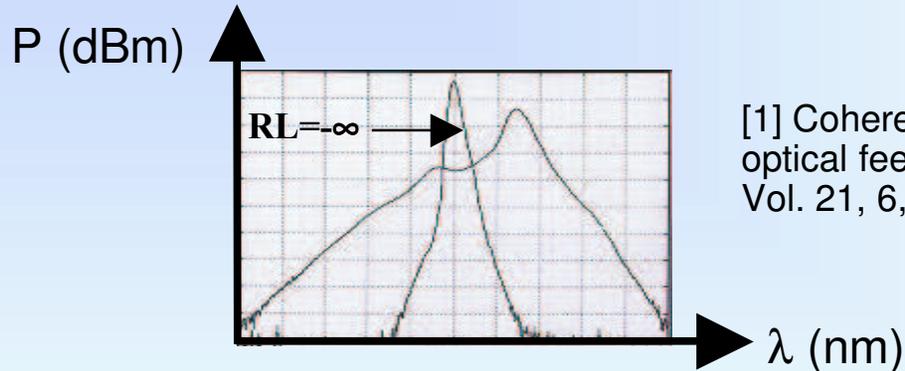
Effet du bruit de phase



◆ Bruit de phase + dispersion chromatique \Rightarrow bruit d'intensité en transmission

◆ Pour une dispersion de 300 ps/nm : l'effet du bruit d'intensité est prédominant

- ◆ Régime d'effondrement de la cohérence ¹.



[1] Coherence collapse in single mode semiconductor lasers due to optical feedback, D. Lenstra *et al.*, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 21, 6, pp. 674-679, 1985.

- ◆ Le seuil d'effondrement de la cohérence est une fonction du coefficient à la facette² C

$$\gamma_c = \frac{\tau_i^2 \omega_R^4}{16 |C|^2 \omega_D^2 (1 + \alpha_H^2)}$$

- ◆ Fréquence de relaxation ω_R liée au courant d'injection
- ◆ Fréquence d'amortissement ω_D et facteur de Henry α_H liés au matériau
- ◆ τ_i est le temps aller-retour dans la cavité laser
- ◆ **Le coefficient C est lié à des paramètres intrinsèques du laser (longueur, réflectivité, ...).**

[2] A simple analytic expression for the stable operation range of laser diodes with optical feedback, J. Helms *et al.*, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 26, 5, pp. 833-836, 1990.

- ◆ Le coefficient C traduit le couplage de chaque facette vers l'extérieur
 - permet de déterminer analytiquement le seuil d'effondrement de la cohérence

- ◆ Laser Fabry-Perot



$$C_k = \frac{1 - \rho_k}{2\sqrt{\rho_k}}$$

- ◆ Laser Clivé/Clivé : $C_1=C_2=0,60$

- ◆ Laser DFB conventionnel³ :



$$f(\rho_1, \rho_2, \alpha L, \kappa L, \dots) = 0$$

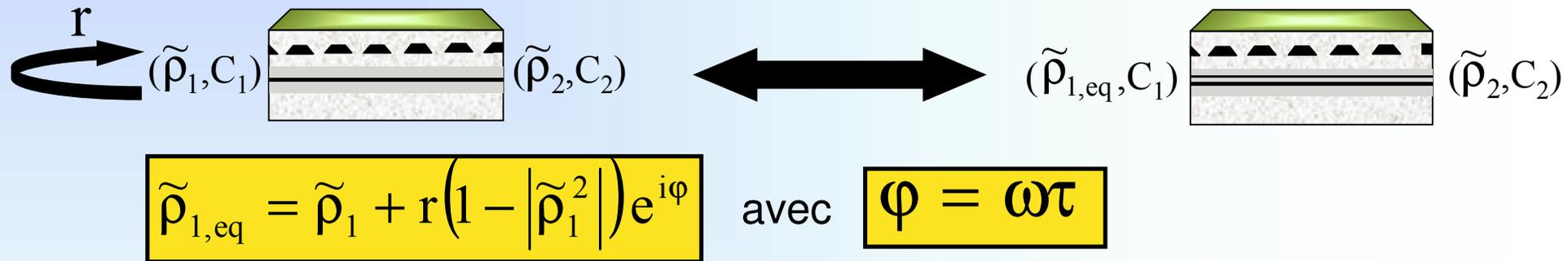


$$C_1, C_2$$

[3] Theoretical analysis of external optical feedback on DFB semiconductor lasers, F. Favre, *Journal of Quantum Electronics*, Vol. 23,1, pp.81-88, 1987

- ◆ Cas des structures plus complexes à réseau asymétrique, à réseau à pas variable ...
 - ⇒ pas de méthode analytique simple

- Utilisation de la réflectivité équivalente⁴ en amplitude :



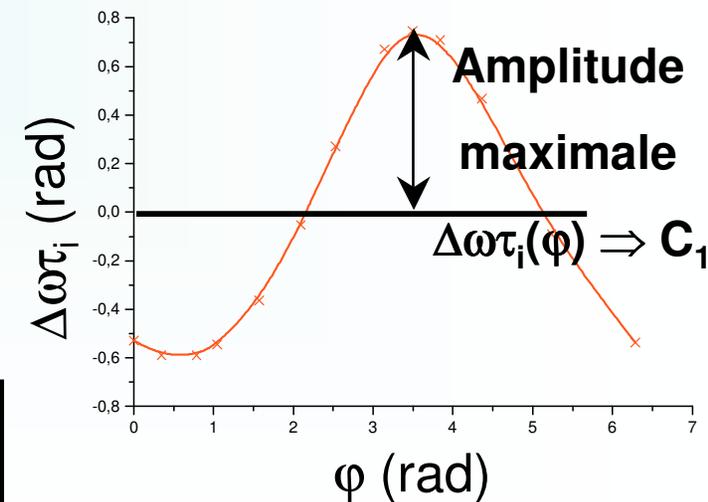
[4] External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties, R. Lang and K. Kobayashi, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 16, 3, pp.347-355, 1980.

- Equation de phase statique :

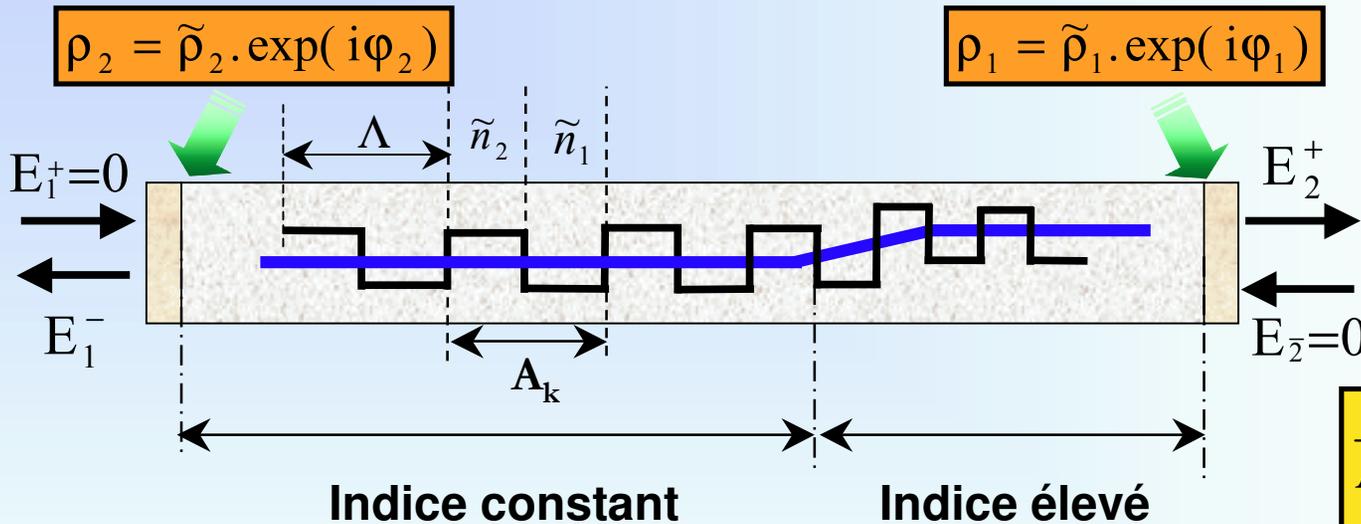
$$\Delta\omega\tau_i = -2C_1 \frac{\Delta\tilde{\rho}_1}{1 - \tilde{\rho}_1^2} \sqrt{1 + \alpha_H^2} e^{i\varphi} \sin(\varphi + \arctan(\alpha_H))$$

- Calcul du coefficient à la facette C_1 :

$$C_1 = \frac{(\Delta\omega\tau_i)_{\max}}{2\sqrt{1 + \alpha_H^2}} \frac{1 - \tilde{\rho}_1^2}{\Delta\tilde{\rho}_1}$$

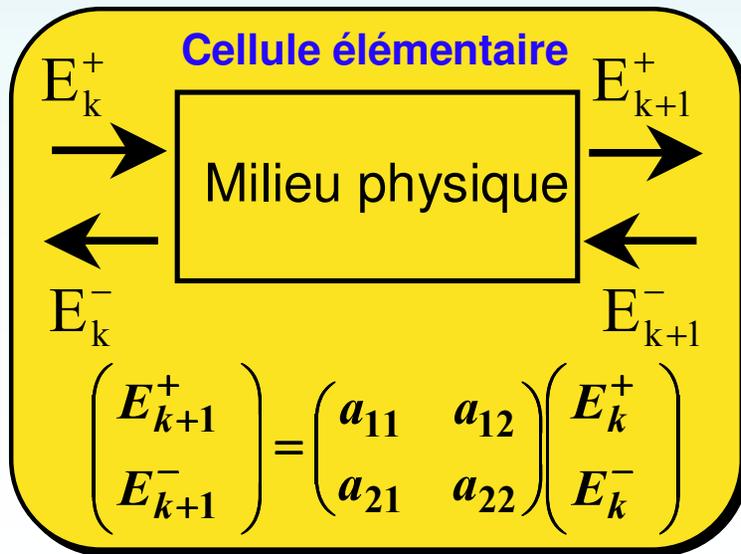


Calcul de $\Delta\omega$ par la méthode des matrices de transfert



$$\begin{pmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} E_2^+ \\ E_2^- \end{pmatrix}$$

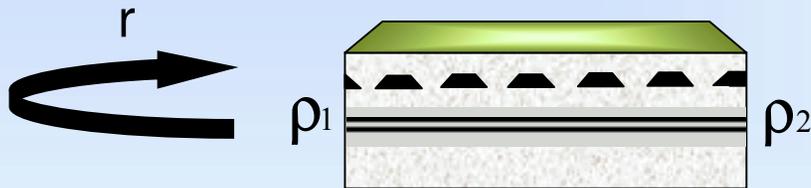
$$\bar{A} = \bar{R}_1 \bar{\Phi}_1 \left(\prod_{k=1}^N \bar{A}_k \right) \bar{\Phi}_2 \bar{R}_2$$



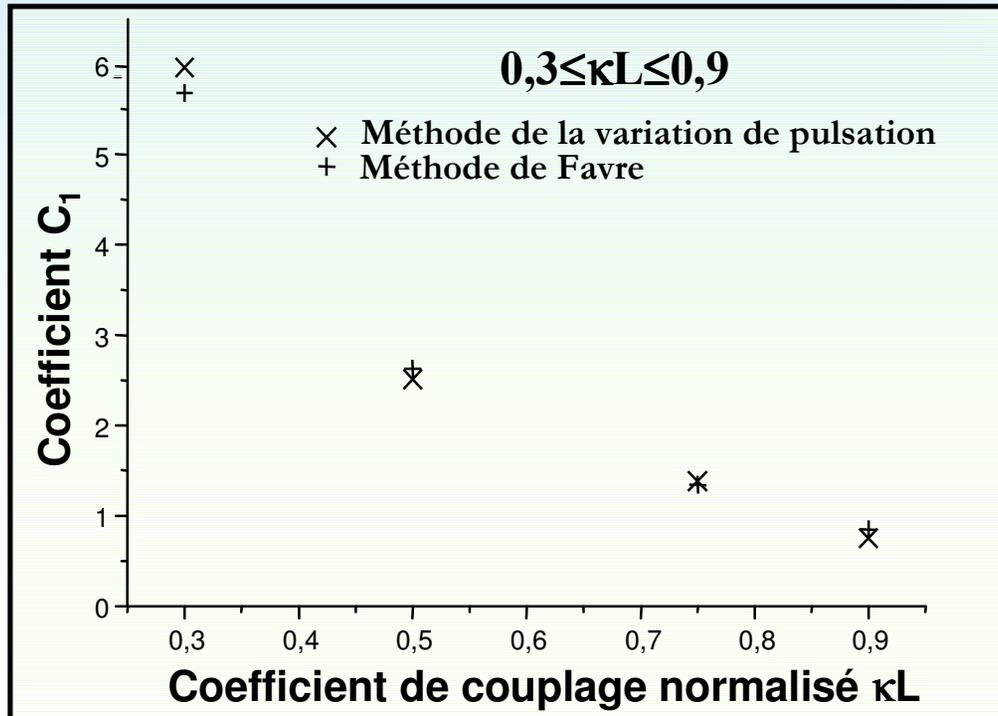
- ◆ Le calcul prend en considération :
 - les non-linéarités spatiales de l'indice
 - la force du réseau
 - l'émission spontanée
 - le confinement optique
 - la variation de l'indice effectif

◆ Relation analytique⁵ du coefficient C_1 :

○ Cas d'un laser tel que $|\rho_1|^2=0$ et $|\rho_2|^2=0,90$



$$C_1 = \frac{[(qL)^2 + (\kappa L)^2] [2\rho_2(qL)/\kappa L - i(1 + \rho_2^2)]}{qL [\kappa L(1 + \rho_2^2) - i\rho_2] + 2i\rho_2(qL)^2 - \kappa L}$$



avec :

$$\delta = \omega - \omega_{Bragg}$$

Ecart au mode de Bragg

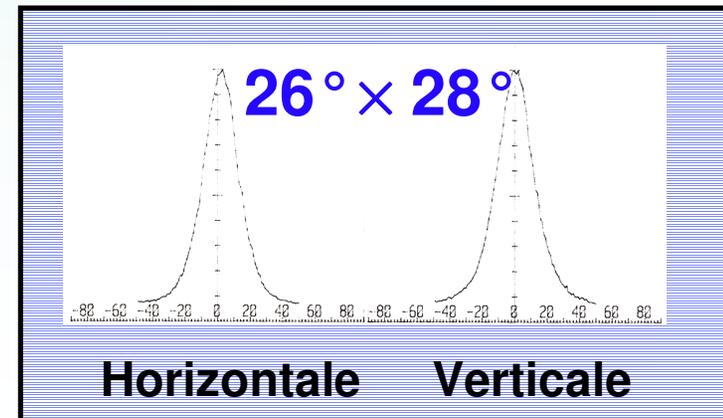
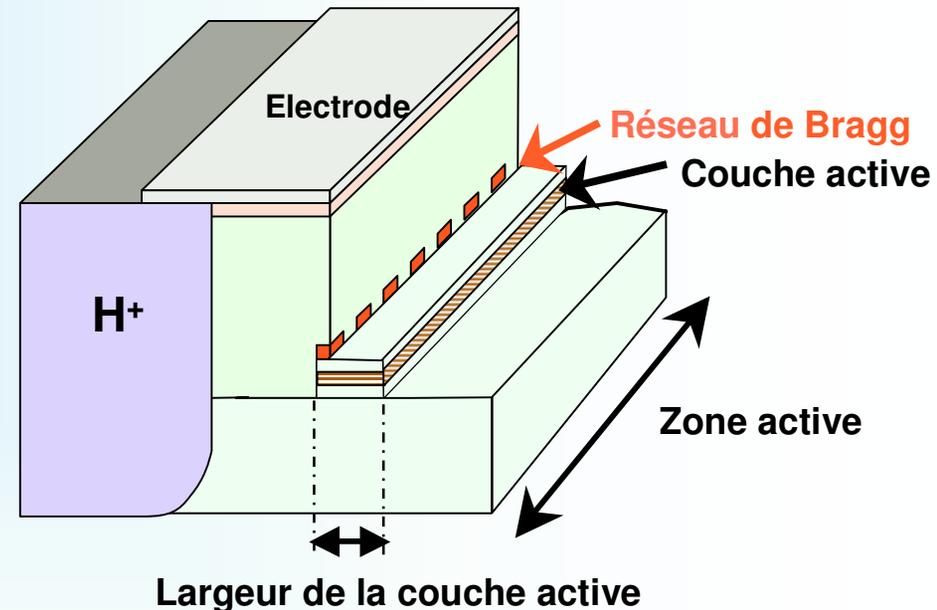
$$qL = \alpha L - i\delta L$$

Fonction des pertes au seuil

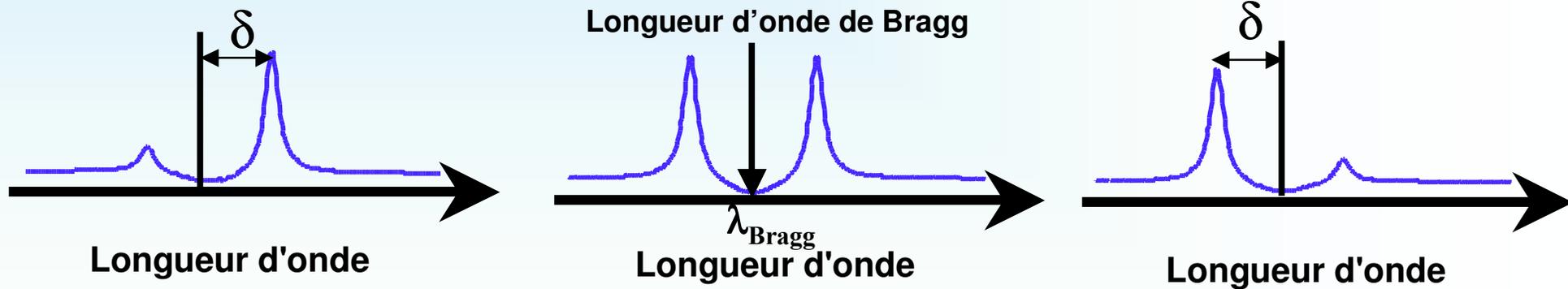
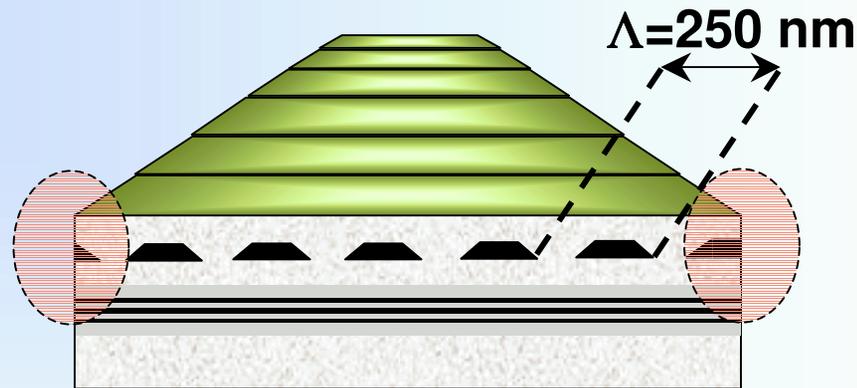
[5] Theoretical analysis of external optical feedback on DFB semiconductor lasers, F. Favre, *Journal Quantum Electronics*, Vol. 23,1, pp.81-88, 1987

- ◆ Contexte de la thèse
- ◆ Transmission et rétroaction optique externe
- ◆ Les lasers DFB à réseau uniforme
 - Structure élémentaire
 - Introduction aux effets de phases aux facettes
 - Dépendance du seuil d'effondrement de la cohérence avec les phases aux facettes
 - Présentation des résultats au-delà de l'état de l'art
- ◆ Les lasers DFB à réseau asymétrique
- ◆ Conclusions et perspectives

- ◆ Structure BRS + réseau uniforme 2''
- ◆ Ruban droit DFB de 350 μm
- ◆ Caractéristiques typiques à 85°C pour les applications à 2,5 GBit/s :
 - Courant de seuil moyen : 35 mA
 - Rendement moyen : 0,16 W/A
- ◆ Facettes du laser :
 - Traitement anti-réflexion (AR) sur la facette d'émission (AR<1%)
 - Traitement hautement réfléchissant (HR) sur la facette arrière (HR=95%)



◆ Barette laser :

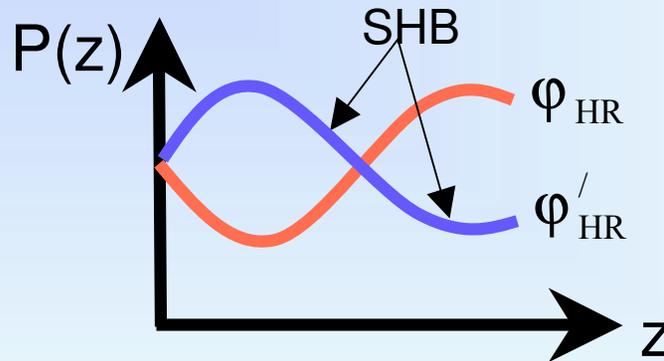


◆ Effets des phases aux facettes \Rightarrow écart au mode de Bragg :

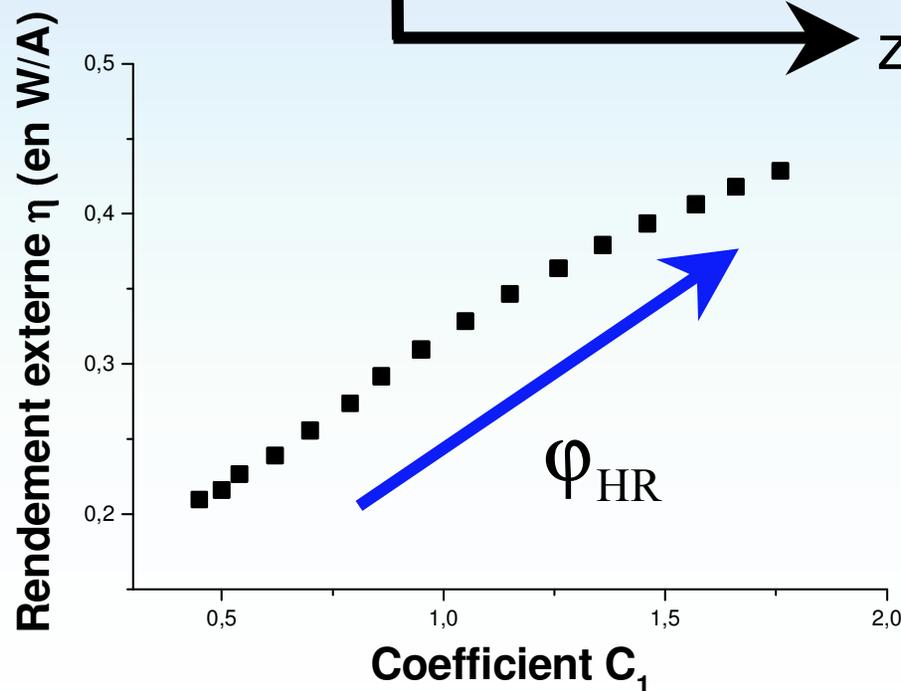
$$\delta = \omega - \omega_{\text{Bragg}}$$

Influence des phases aux facettes sur le coefficient C

- ◆ Phases aux facettes : modification de l'accord de phase entre le réseau et la facette



$$\rho_{HR} = \tilde{\rho}_{HR} \exp(i\varphi_{HR})$$

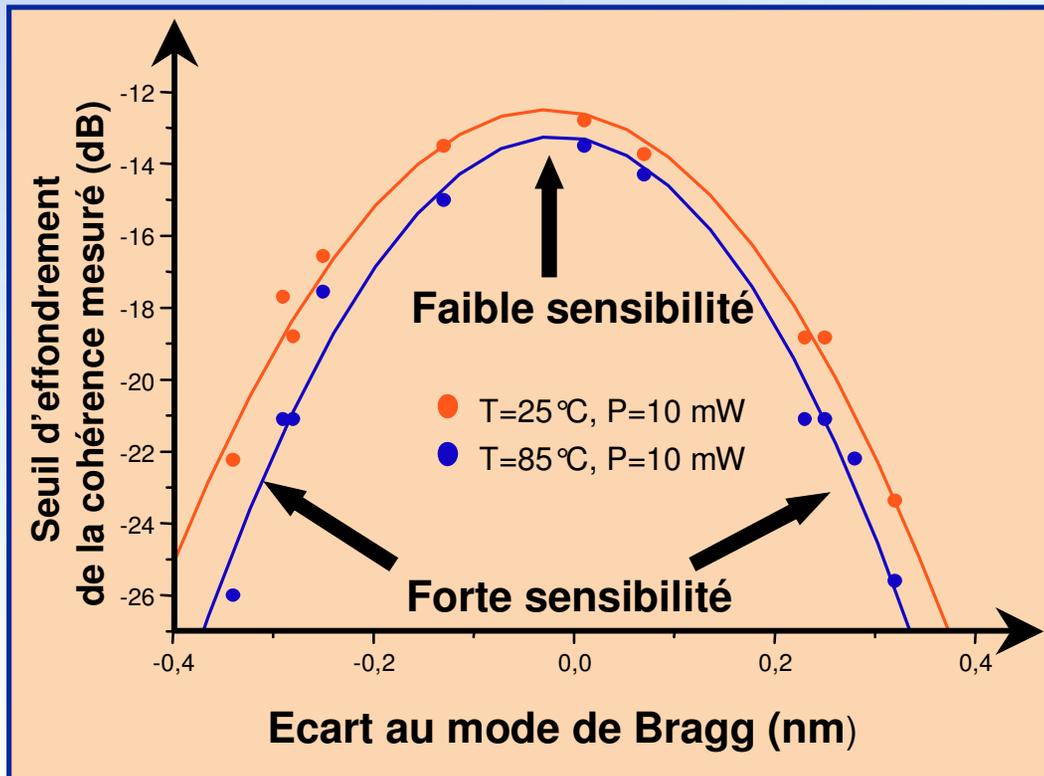


- ◆ Suivant la valeur du cas de phase φ_{HR} :

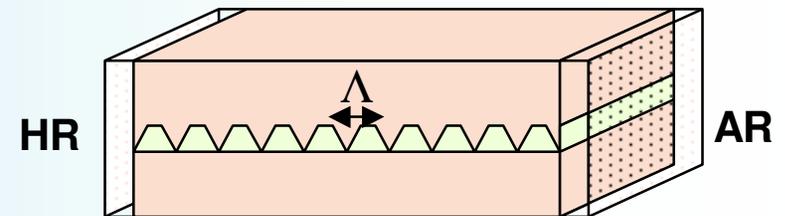
- Modification de la répartition spatiale du champ (Spatial Hole Burning)
- Modification de la puissance d'émission

⇒ **Modification du coefficient de couplage vers l'extérieur**

Effets des phases aux facettes sur le seuil d'effondrement de la cohérence



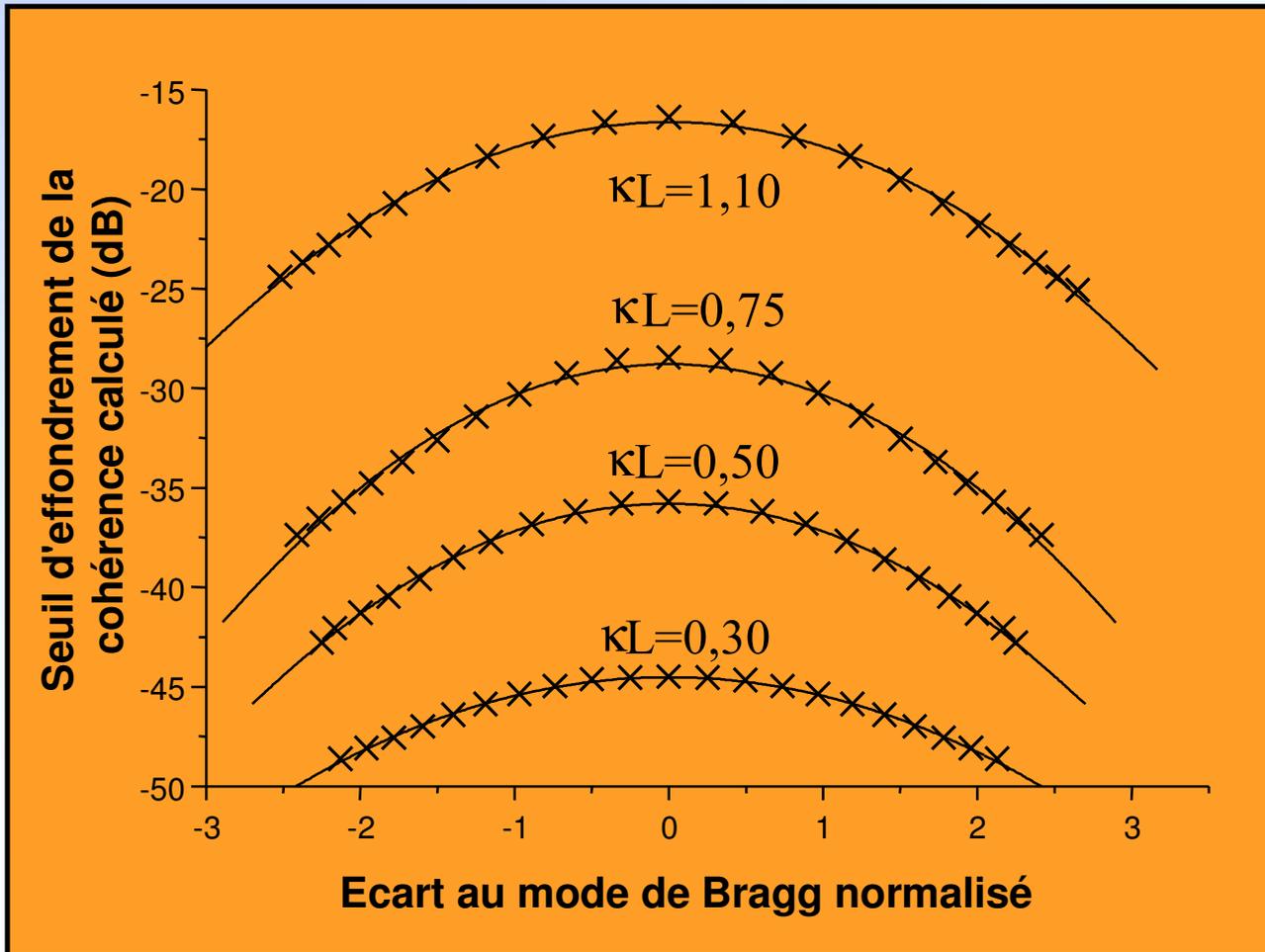
◆ Laser droit DFB AR/HR :



◆ Mesure du seuil d'effondrement de la cohérence à ± 1 dB

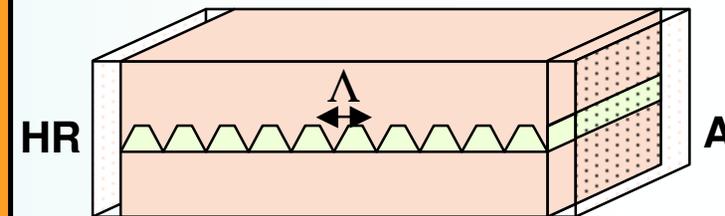
- ◆ Tri des composants nécessaires
- ◆ Si le laser émet à la longueur d'onde de Bragg :
 - Seuil d'effondrement de la cohérence plus élevé
 - Plus faible sensibilité aux phases aux facettes

Simulation du seuil d'effondrement de la cohérence par la méthode de Favre



◆ Laser DFB AR/HR

$$0,30 \leq \kappa L \leq 1,10$$

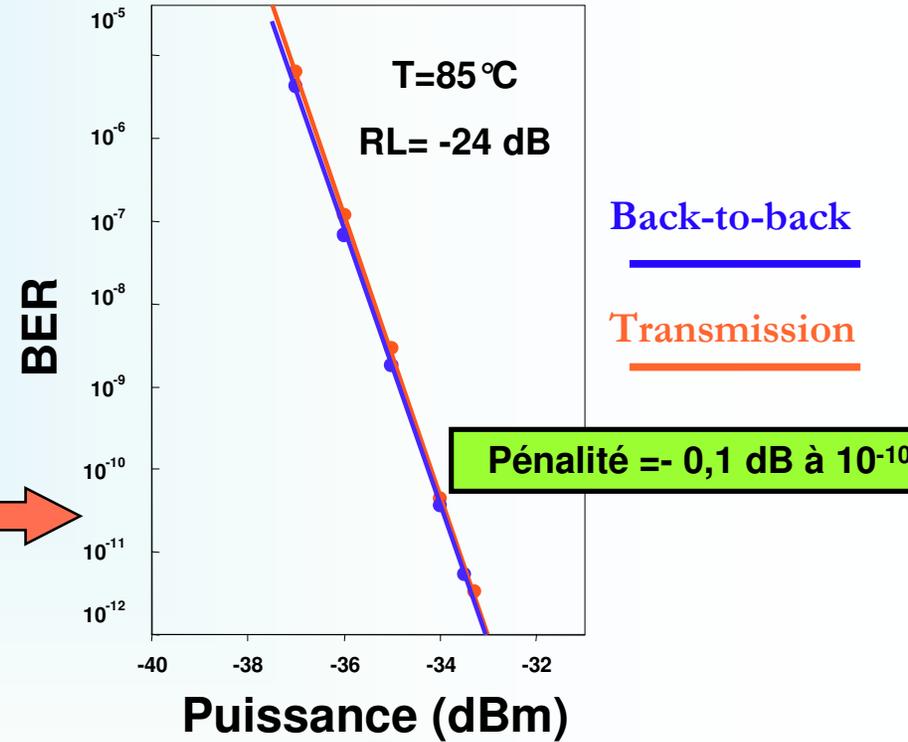
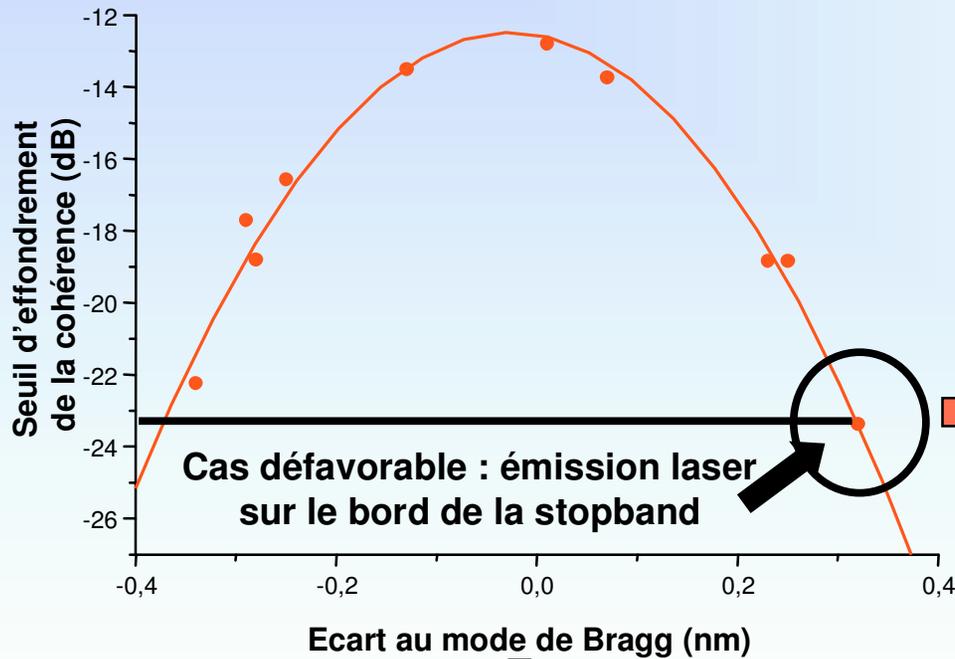


◆ Comparaison avec l'expérience pour $\kappa L = 1,1$:

○ $-25 \text{ dB} \leq \gamma_{c, \text{exp}} \leq -13 \text{ dB}$

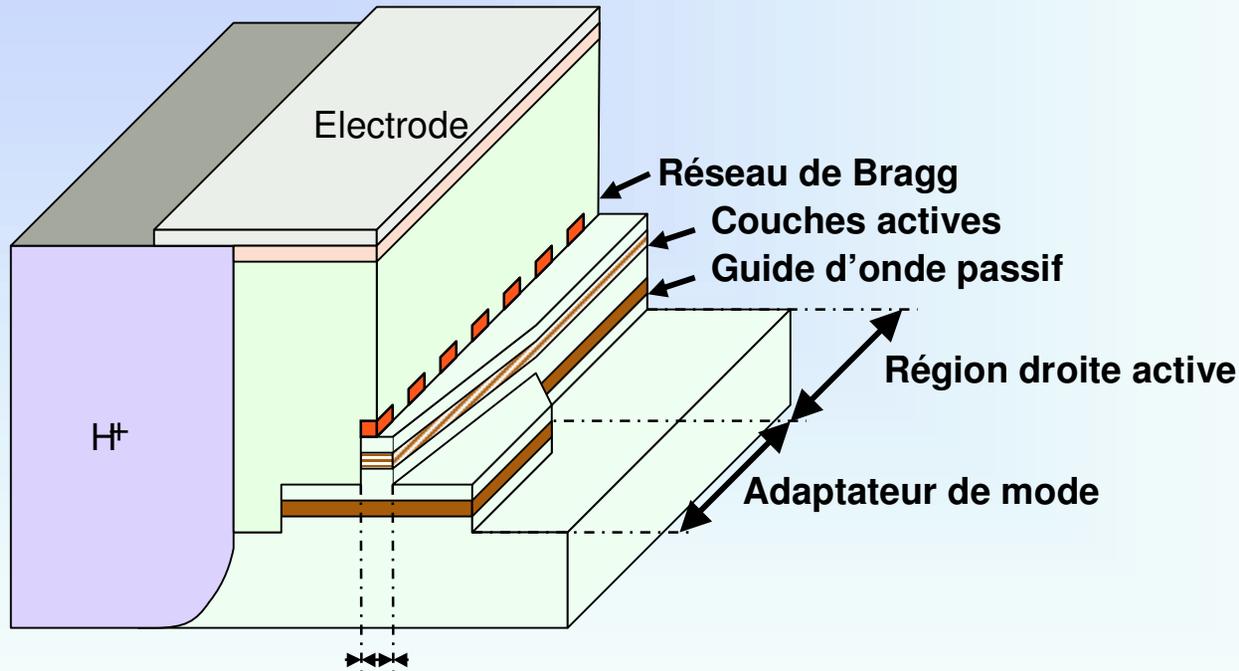
○ $-24 \text{ dB} \leq \gamma_{c, \text{th}} \leq -17 \text{ dB}$

◆ Laser droit DFB AR/HR :



◆ Dispersion des seuils d'effondrement de la cohérence donc des performances en transmission

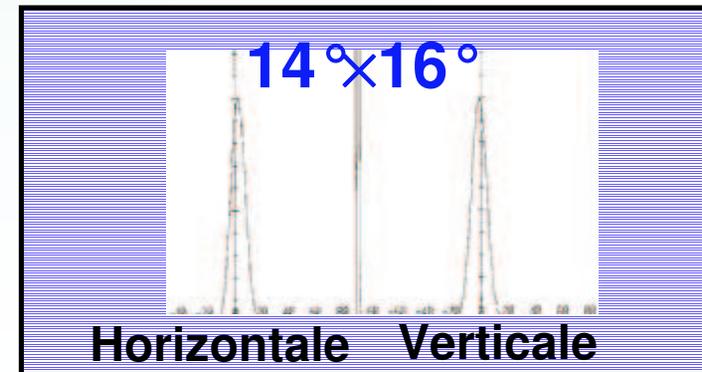
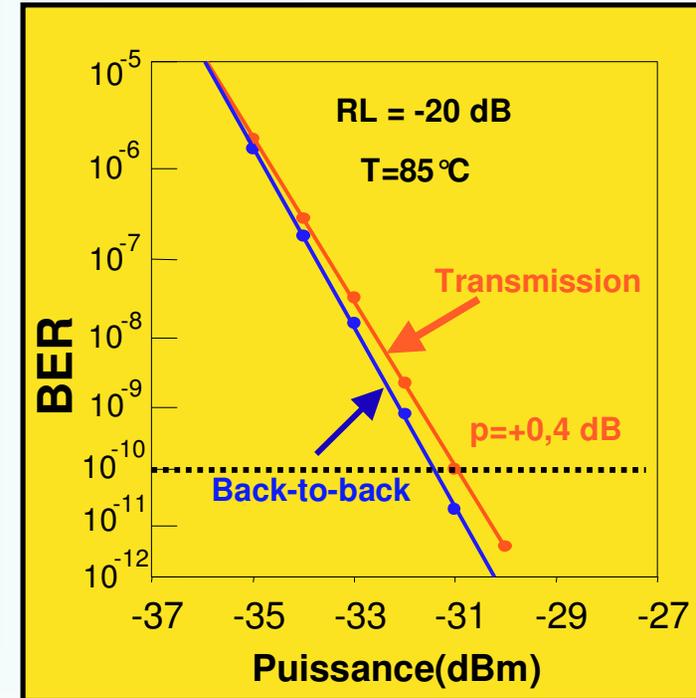
◆ Lasers tous fonctionels sous conditions ITU
 ◆ Module sans isolateur optique



Largeur de la pointe de taper $0,3 \mu\text{m}$

- ◆ Pertes de couplage optique : $C=1,5 \text{ dB}$
- ◆ Courant de seuil à 85°C : $I_{\text{th}}=50 \text{ mA}$
- ◆ Rendement externe à 85°C : $\eta=0,18 \text{ W/A}$

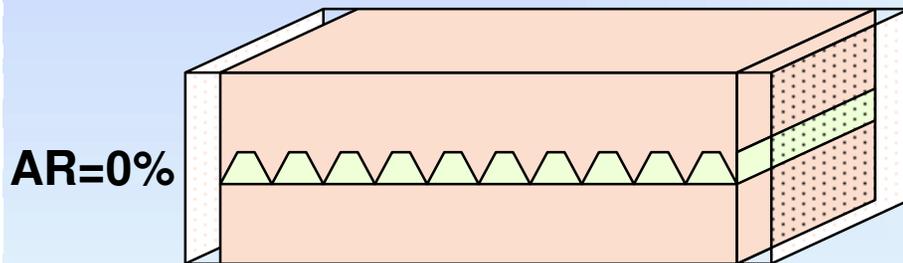
⇒ Pas d'isolateur optique ni de lentille de couplage



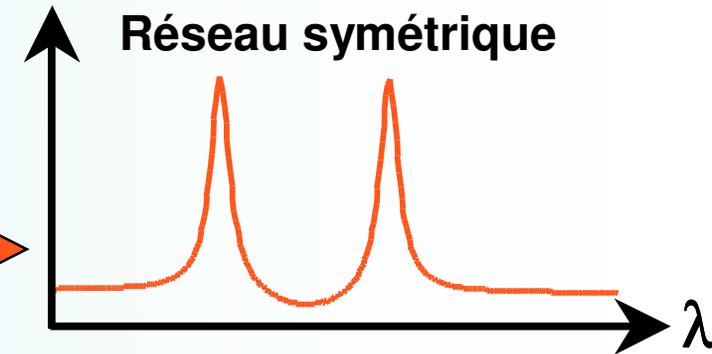
- ◆ Contexte de la thèse
- ◆ Transmission et rétroaction optique externe
- ◆ Les lasers DFB à réseau uniforme
- ◆ **Les lasers DFB à réseau asymétrique**
 - Suppression des effets de phases aux facettes
 - Principe du laser DFB à réseau asymétrique
 - Structure élémentaire
 - Présentation des résultats expérimentaux
 - Sensibilité à la rétroaction optique externe
- ◆ Conclusions et perspectives

Lasers DFB sans phase aux facettes

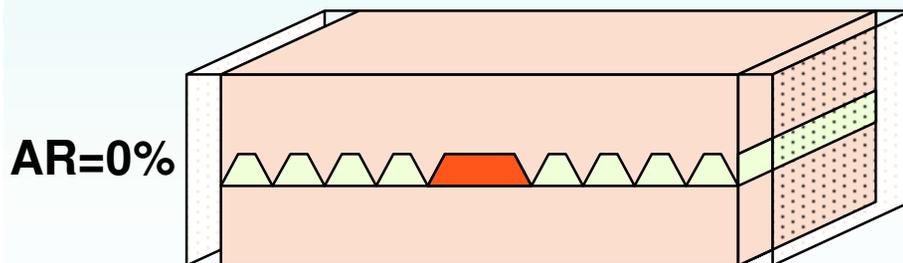
Laser DFB standard



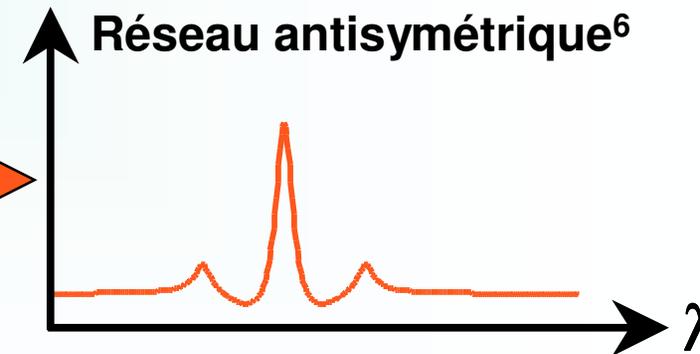
AR=0%



◆ Deux modes symétriques

Laser DFB $\lambda/4$ 

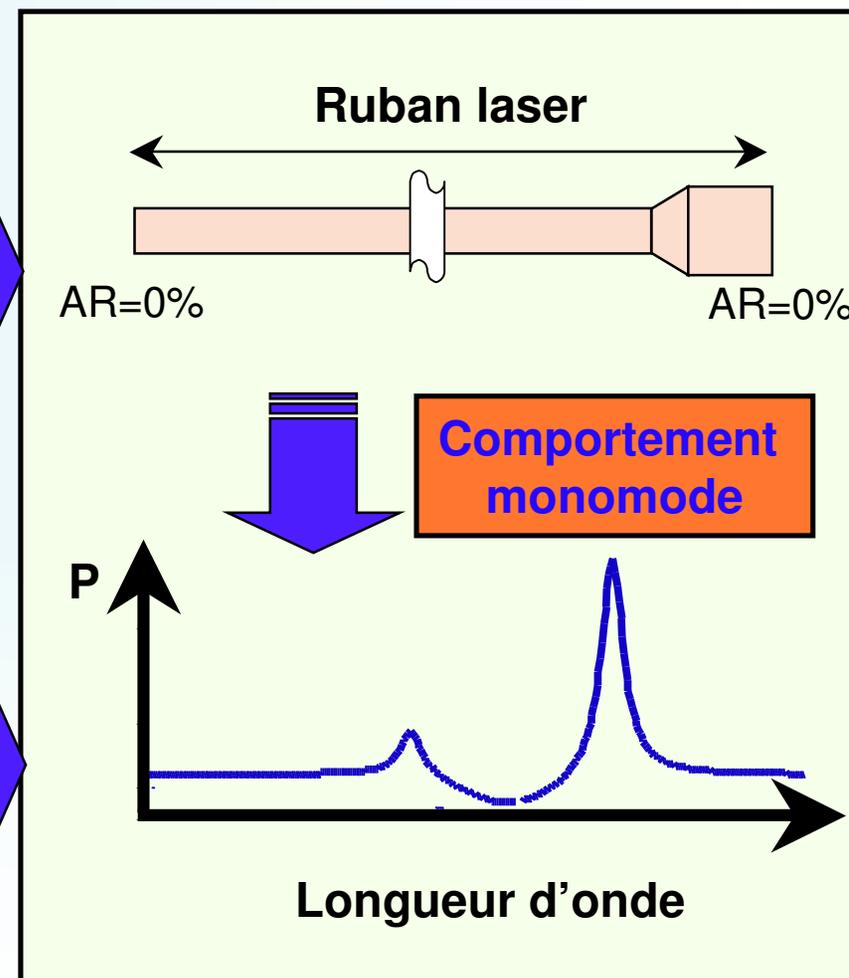
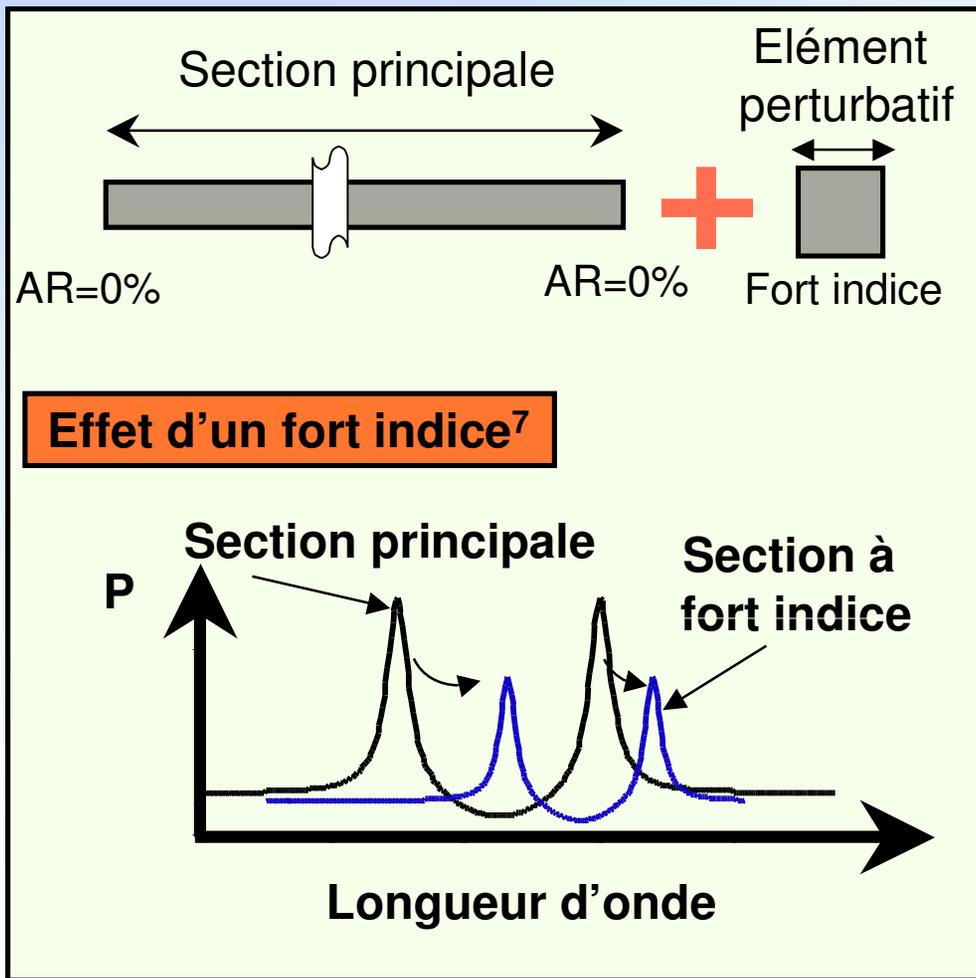
AR=0%



◆ Emission laser au centre de la stopband

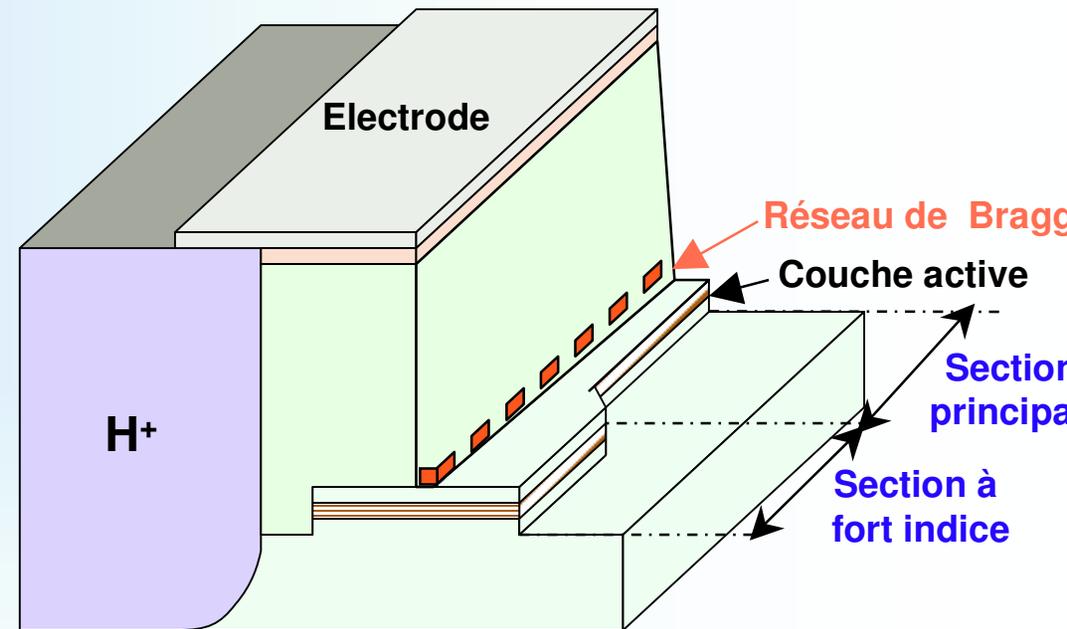
[6] Antisymmetric taper of distributed feedback lasers, IEEE Journal of Quantum Electronics, H. Haus *et al.*, IEEE *Journal of Quantum Electronics*, Vol. 12, 9, pp.532-559, 1976

Principe du laser DFB à réseau asymétrique



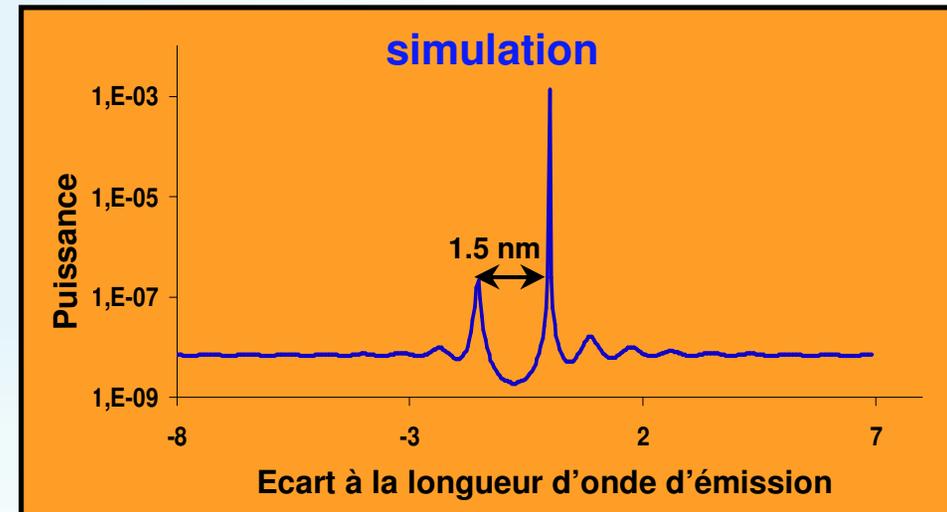
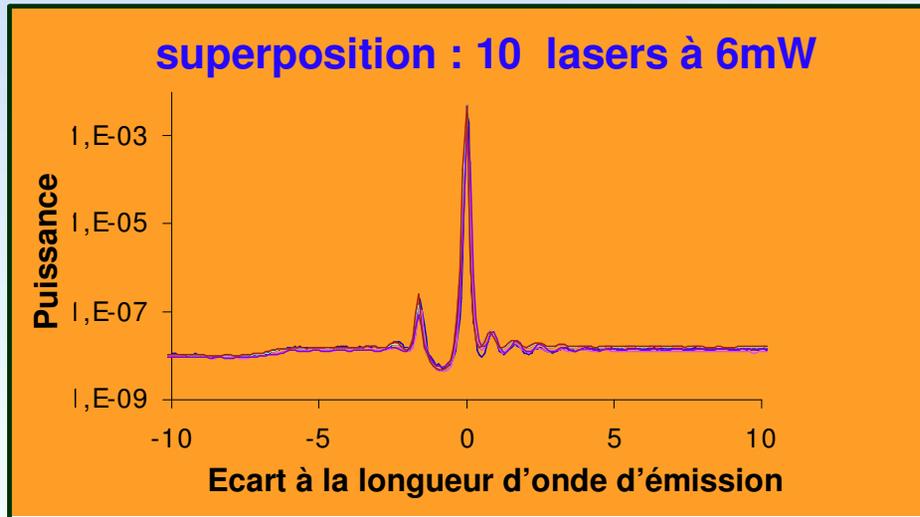
[7] Static and dynamic characteristics of MQW DFB lasers with varying ridge width, J. Hong *et al.*, *IEE Proc. Optoelectron.* Vol. 141, 5, pp. 303-310, 1994.

- ◆ Structure BRS + réseau uniforme 2''
- ◆ Implantation protonique H⁺
- ◆ Caractéristiques statiques à 25 °C :
 - Courant de seuil moyen : 12 mA
 - Rendement moyen : 0,19 W/A



- ◆ Traitement laser :
 - Traitement anti-réflexion (AR) sur les deux faces
- ◆ Longueur d'onde d'émission : $\lambda=1,55 \mu\text{m}$

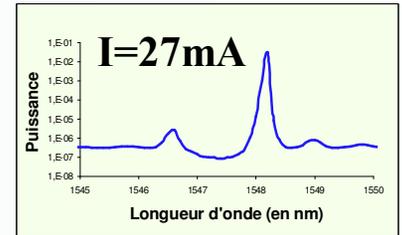
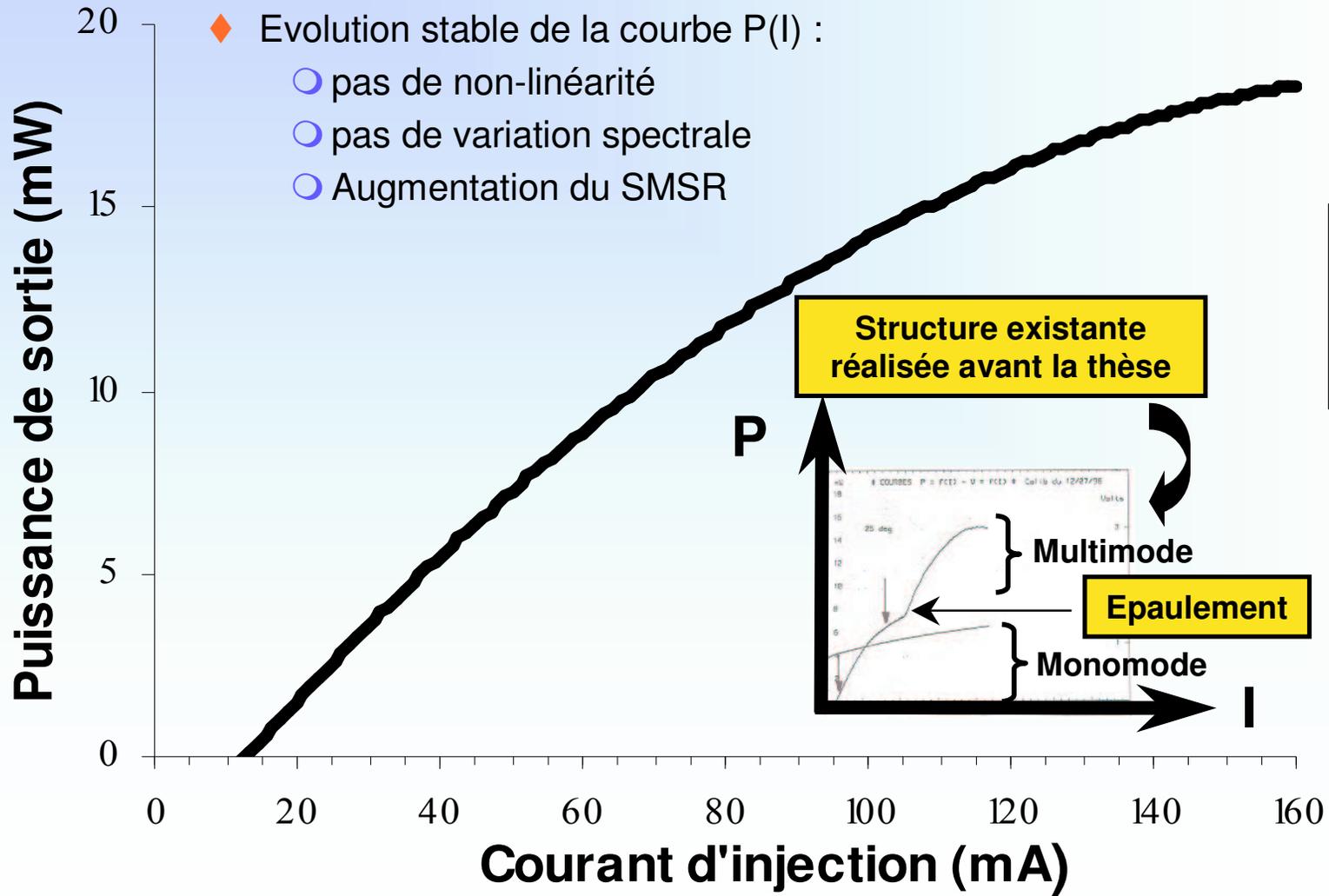
◆ Uniformité spectrale



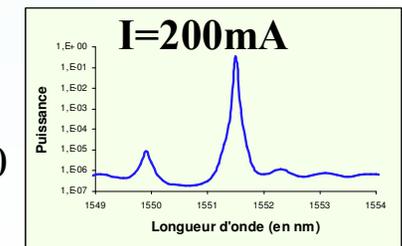
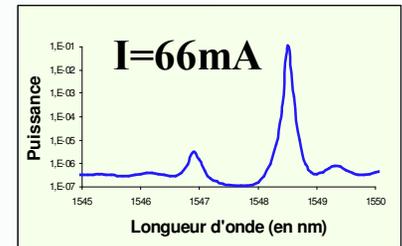
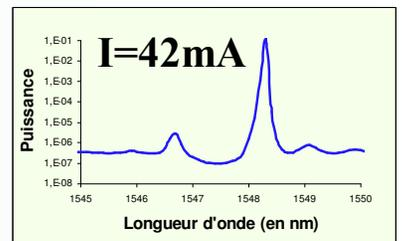
◆ Quelques caractéristiques typiques mesurées :

- Stopband : 1,6 nm (1,5 nm calculé)
- SMSR : 43,5 dB (38 dB calculé)
- Longueur d'onde d'émission : $\approx 1548,5$ nm ($\approx 1548,9$ nm calculé)

Caractéristique P(I) sans épaulement

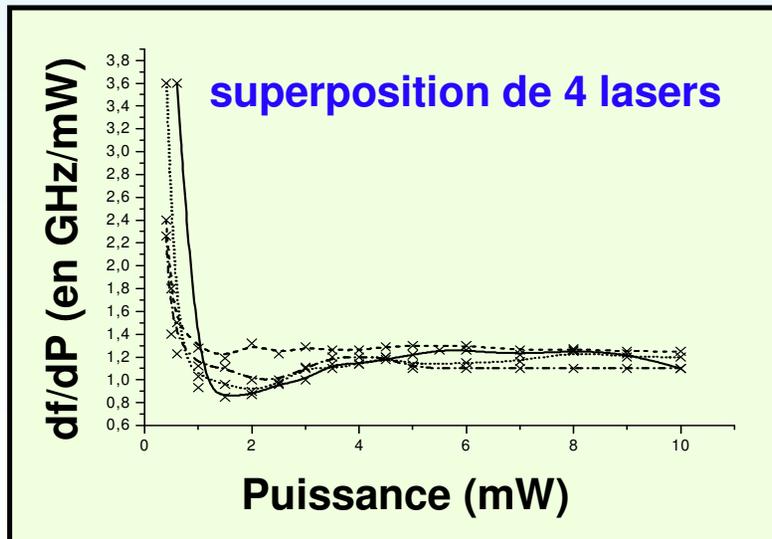
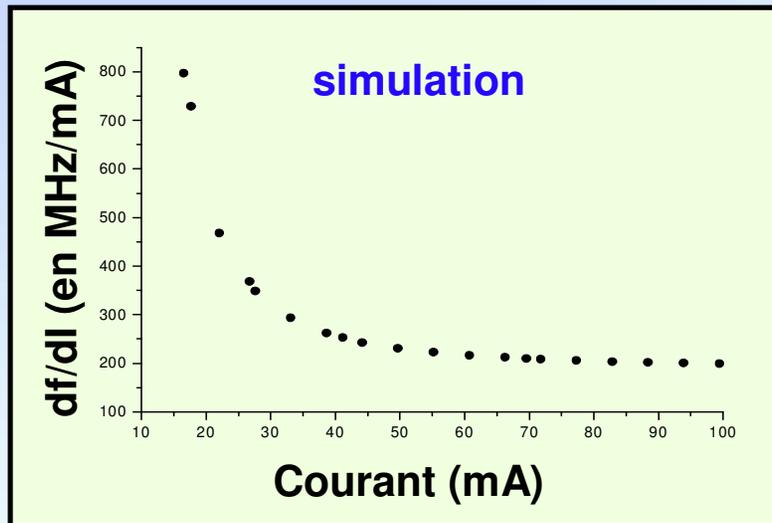


SMS
35 d

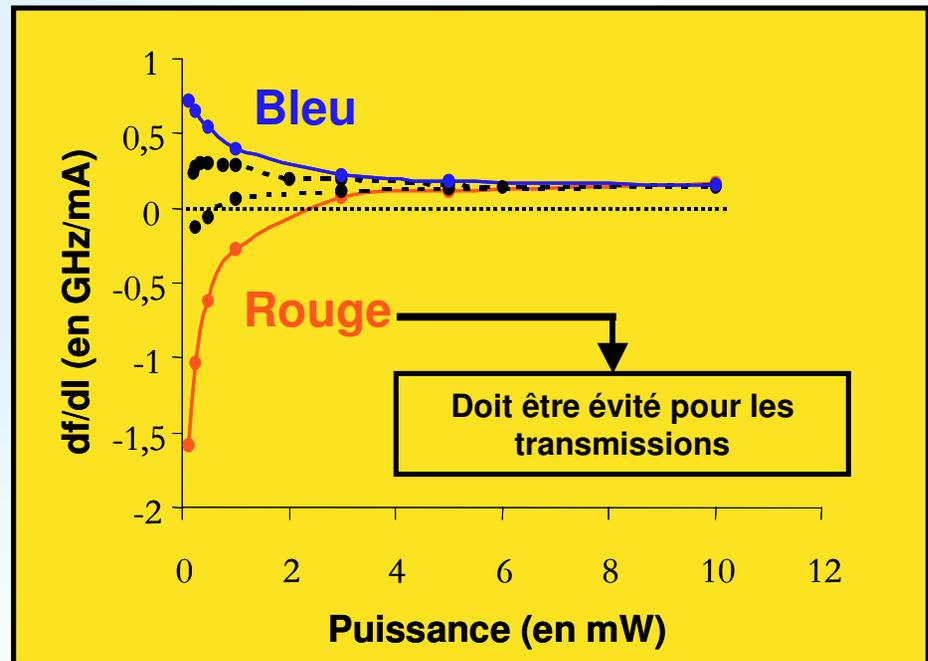


SMS
40 d

Uniformité de la dérive de fréquence adiabatique

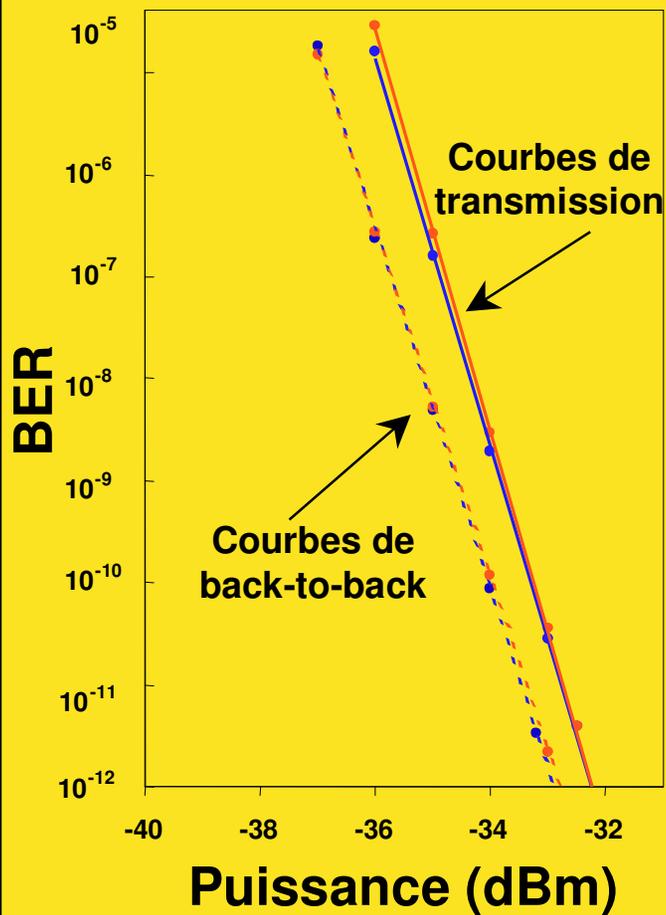


◆ Caractéristiques typiques des lasers conventionnels

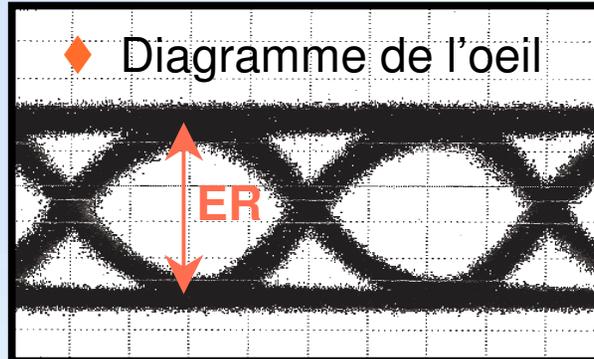


- ◆ Dérive de fréquence adiabatique contrôlée :
 - pas d'effets de phases à basse puissance
 - dérive de fréquence vers le bleu
 ⇒ Uniformité de la dérive de fréquence

◆ Résultats sur deux lasers :



◆ Diagramme de l'oeil



◆ Conditions de transmission

- propagation = 90 km
- Température = 25 °C
- ER=8% et 10 %
- P=5 mW

◆ Des transmissions sans plancher ont été réalisées :

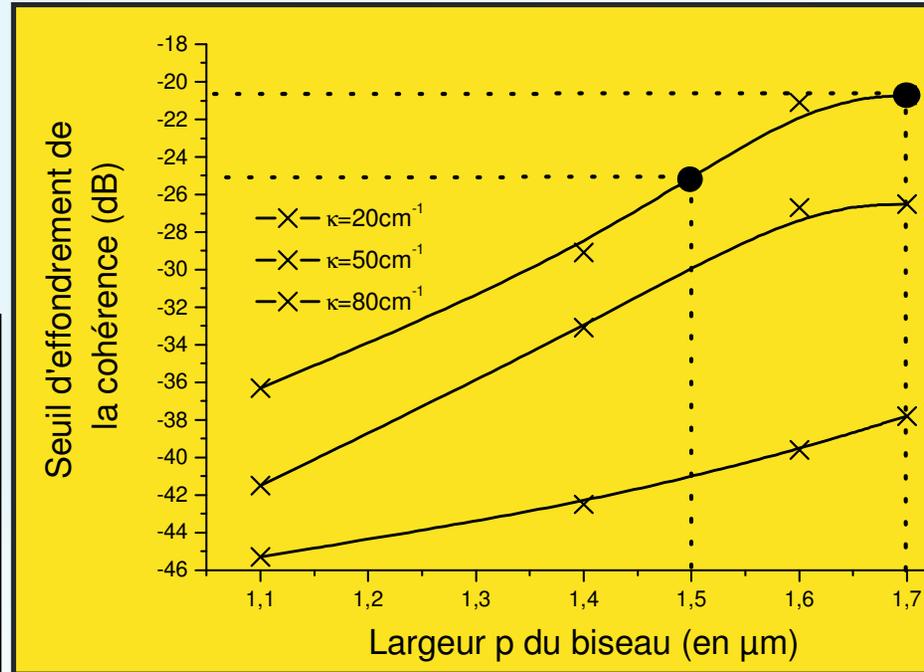
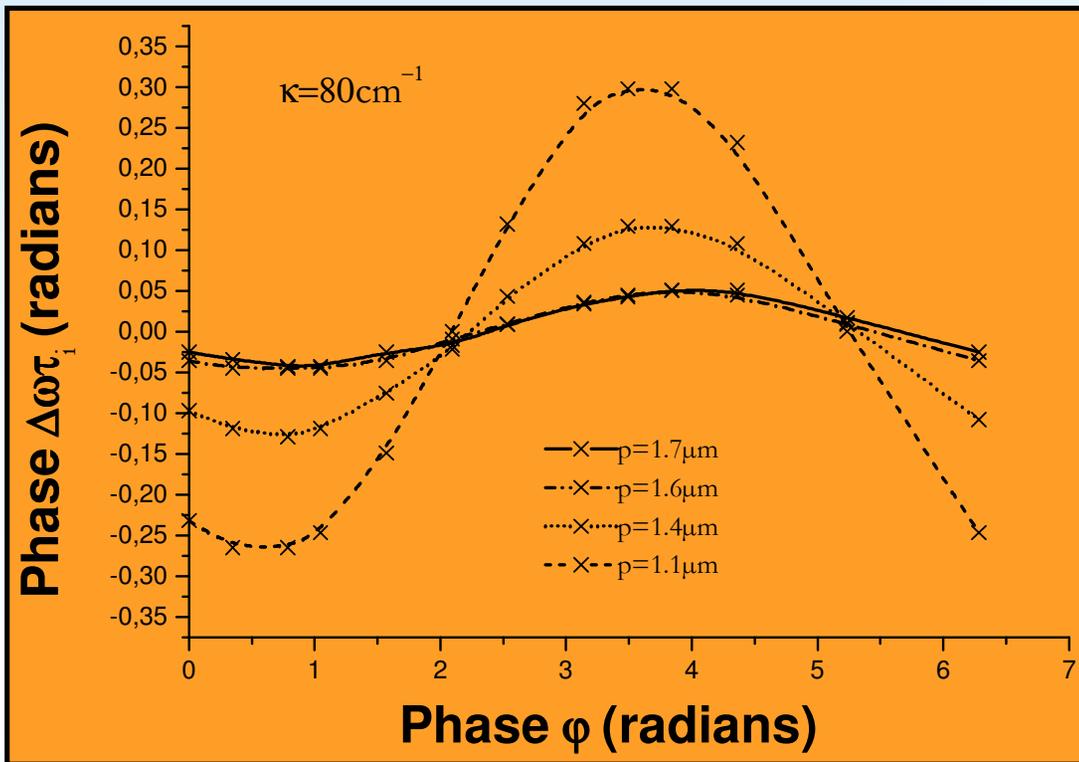
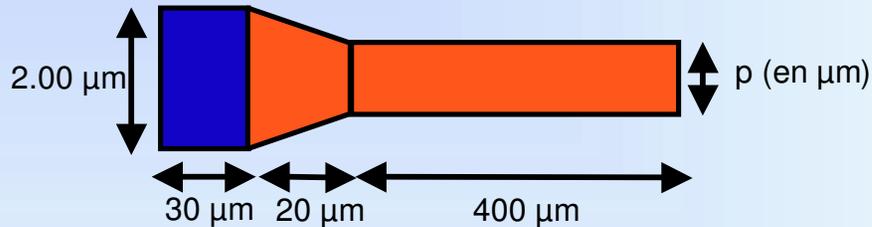
- $\langle p \rangle = +0,7$ dB à ER=10 %
- $\langle p \rangle = +1,0$ dB à ER=8%

◆ Ces résultats démontrent :

- une dérive de fréquence contrôlée de la structure
- une excellente stabilité spectrale sous modulation

Simulation du seuil d'effondrement de la cohérence

◆ Laser typique utilisé :



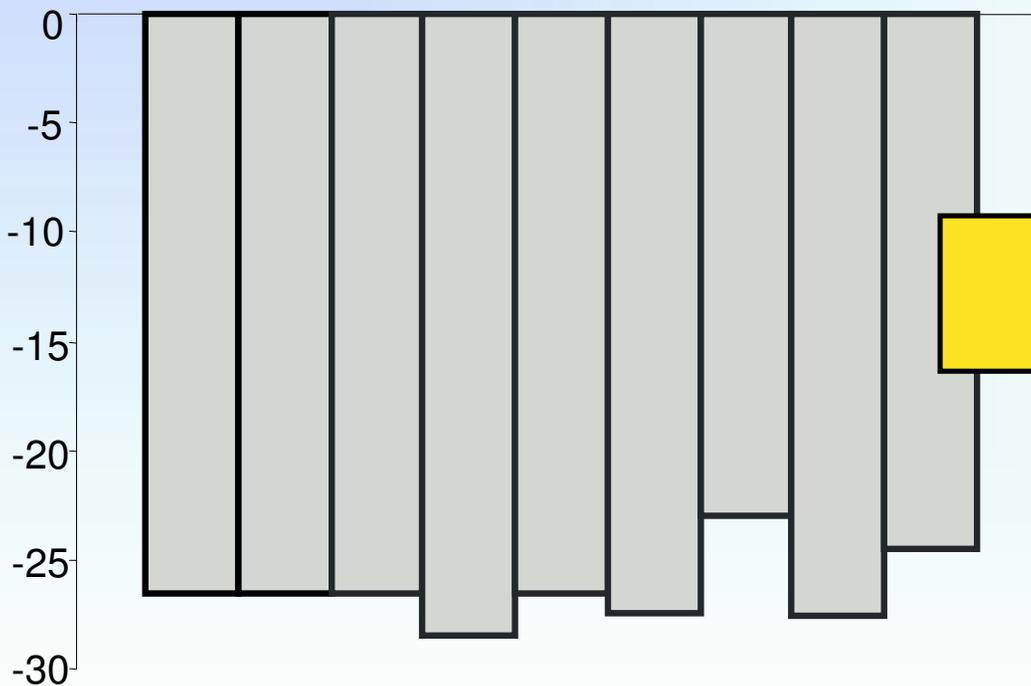
◆ Seuils d'effondrement de la cohérence :

- $p=1,5\mu\text{m} \Rightarrow -25\text{ dB}$ (-26 dB mesuré)
- $p=1,7\mu\text{m} \Rightarrow -21\text{ dB}$ (-22 dB mesuré)

Uniformité du seuil d'effondrement de la cohérence

- ◆ Seuils d'effondrement de la cohérence mesurés à 10mW (T=25°C) : 9 lasers identiques

Seuil d'effondrement de la cohérence mesuré (dB)

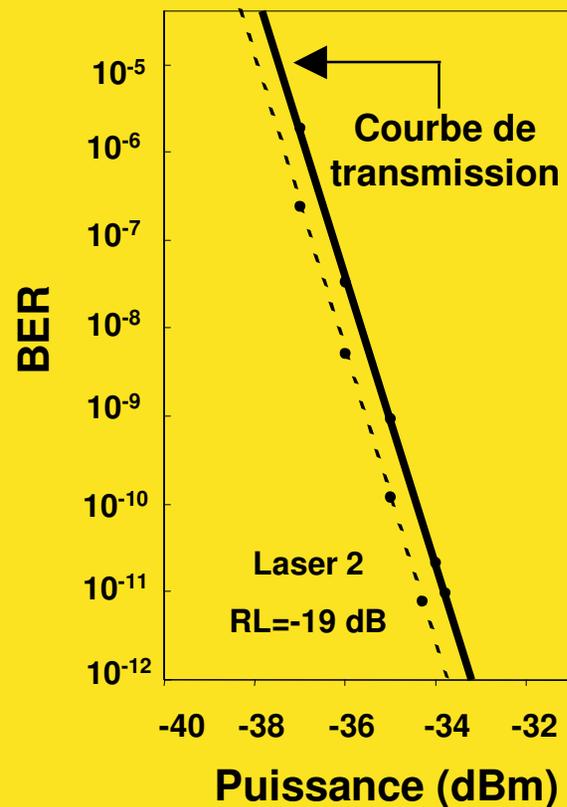
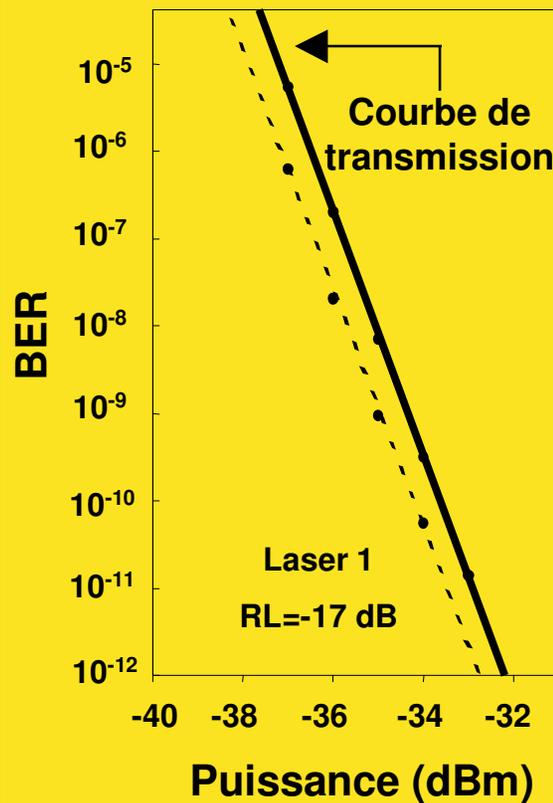


◆ Seuil d'effondrement de la cohérence moyen : $\langle RL_c \rangle \approx -25$ dB

⇒ excellente homogénéité entre les seuils d'effondrement de la cohérence :
Comportement en transmission uniforme de laser à laser

Transmissions à 2,5 Gbit/s sous rétroaction optique externe

- ◆ Résultats sur deux lasers au dessus du seuil d'effondrement de la cohérence :



- ◆ Conditions de transmission

- dispersion = 300 ps/nm
- Température = 25 °C
- ER=5%
- P=5 mW

- ◆ Transmissions sans plancher sous condition ITU :

- $p_{\text{laser1}} = +0,6 \text{ dB à } 10^{-10}$
- $p_{\text{laser2}} = +0,5 \text{ dB à } 10^{-10}$

- ◆ Contexte de la thèse
- ◆ Transmission et rétroaction optique externe
- ◆ Les lasers DFB à réseau uniforme
- ◆ Les lasers DFB à réseau asymétrique
- ◆ **Conclusions et perspectives**

- ◆ Le régime d'effondrement de la cohérence : point-clef pour améliorer la qualité des transmissions :
 - Augmentation importante de la pénalité au-dessus du seuil
 - La dégradation de la pénalité est principalement induite par du bruit d'intensité (300 ps/nm)
 - Dépendance avec les effets de phases aux facettes

- ◆ Laser DFB à réseau uniforme :
 - Possibilité de concevoir un module sans isolateur optique sur des lasers DFB 1.3 μ m AR/HR :
 - rendement externe moyen de 0,16 W/A à 85 °C
 - transmissions à 2,5 GBit/s en présence de rétroaction optique sous conditions ITU
 - Module sans optique de couplage : laser DFB 1,3 μ m AR/HR avec biseau (divergence = 14° × 16°)

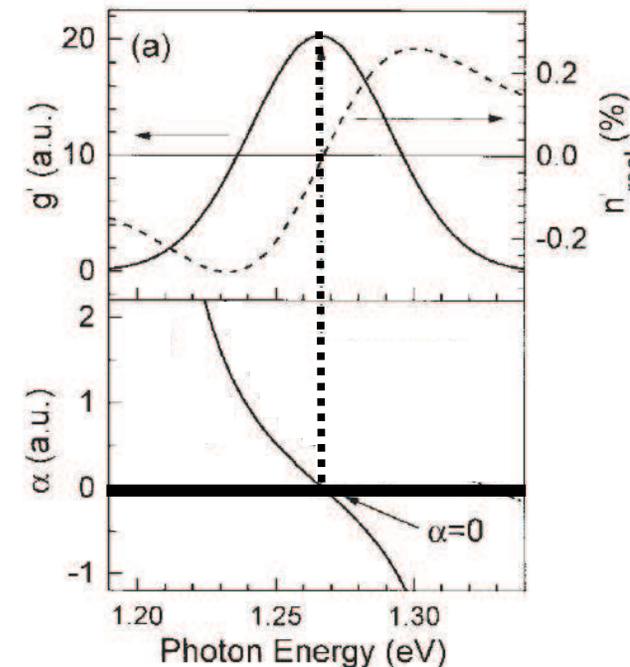
- ◆ Première démonstration expérimentale de lasers DFB tous monomodes avec un réseau asymétrique montrant :
 - Excellente uniformité spectrale
 - Uniformité de la dérive de fréquence adiabatique
 - Augmentation du SMSR avec la puissance injectée
 - Seuils d'effondrement de la cohérence faibles et uniformes de laser à laser
 - Fonctionnels à 2,5 GBit/s sous conditions ITU sans isolateur en présence de rétroaction optique

- ◆ Vers des lasers modulés directement à 10 GBit/s⁸ :
 - Nécessité d'une fréquence de résonance plus élevée.
 - En marge de la thèse : transmission sans plancher (140 ps/nm) sous rétroaction optique optique (-30 dB) sur des DFB AR/HR conventionnels

[8] High temperature 10 Gbit/s directly modulated 1.3 μ m DFB lasers using InAsP/InGaAsP materials , O. Gauthier-Lafaye *et al.*, *IEE Electronics Letters* , Vol. 38, 6, 2002

- ◆ Lasers à boîtes quantiques⁹ :
 - symétrie du gain dans le domaine spectral
 - Facteur de couplage phase-amplitude entre 0 et 1.
 - Seuil d'effondrement de la cohérence très élevé.
 ⇒ pas de dégradation de la pénalité en transmission.

[9] InGaAS-GaAs quantum dot lasers, D. Bimberg *et al.*, *IEEE Journal of Selected Quantum Electronics*, Vol. 3, 2, pp.196-205, 1997



◆ **Un grand merci aux personnes suivantes pour leurs collaborations discussions fructueuses ou leur soutien quotidien :**

Bertrand Riou, Luis Lucatero, Olivier Gauthier-Lafaye, Guang-Hua Duan, Bruno Thedrez, Philippe Brosson, Jean-François Palmier, Jean-Guy Provost, François Favre, Frank Mallecot, Joël Py, Aurélien Bergonzo, Cornélia Cuisin, Elizabeth Boer, Joël Jacquet, Hélène Sillard, Sylvain Blayac, Stéphane Demiguel, Jean Yves Gourmont, Hakon Helmers, Alexandra Labrousse, Christophe Ougier, Pascal Pecci, Antonina Plais, Louissette Roux, Alexandre Shen, Vincent Voiriot, Abed-Ehlak Kasbari, Chafik Méliani, Bernadette Duval, Colette Delavault, Pascale Téfaine, Bruno Fernier, Mohand Achouche, Sabine Louis, Véronique Colson, Jean-Luc Lafragette, Jean Landreau, Christian Gourdain.....

.....et à ma famille, mes amis.....

..... ainsi qu'à celles et ceux que j'ai oubliés