



École Nationale Supérieure
de Sciences Appliquées
et de Technologie



**Réalisation de lasers à fibre à contre-réaction
répartie pour l'étude de l'injection optique :
comparaison à l'injection avec
des lasers à semi-conducteurs**

Stéphane Blin

Soutenance de thèse

~

3 Décembre 2003



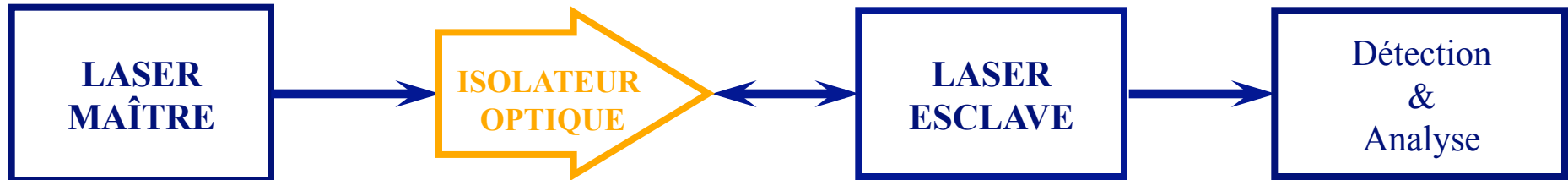
Centre d'Optique,
Photonique et Lasers



Injection optique

2

Introduction

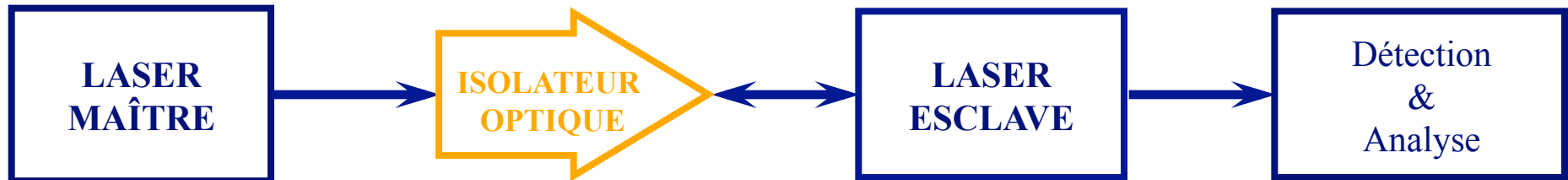


- Couplage unidirectionnel de deux lasers
- Propriétés usuelles de l'injection :
 - *accrochage en fréquence*
 - *transfert de pureté spectrale du maître à l'esclave*
- Une compétition apparaît entre l'émission spontanée du laser esclave et la source externe.

Paramètres de contrôle de l'injection

3

Introduction



- **Puissance injectée P_i**

Puissance injectée à l'intérieur de la cavité esclave

- **Désaccord $\Delta\nu$**

*Différence de fréquence entre celle du maître ν_M
et celle de l'esclave libre $\nu_{E \text{ libre}}$: $\Delta\nu = \nu_M - \nu_{E \text{ libre}}$*

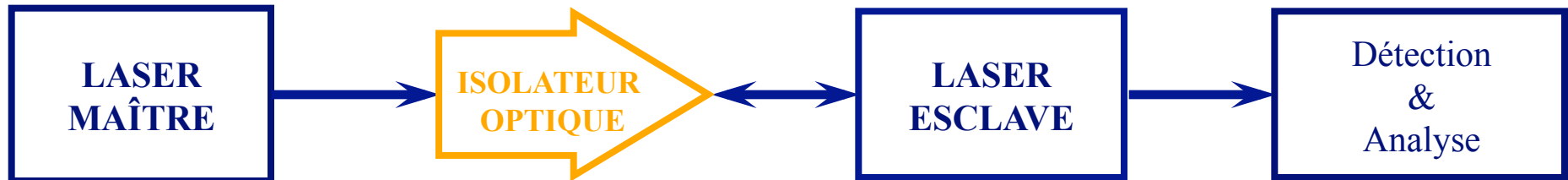
- **Taux de pompage de l'esclave r**

*Rapport du courant de pompe du laser esclave I
sur le courant de pompe au seuil I_{seuil} : $r = I / I_{\text{seuil}}$*

Différents lasers utilisés

4

Introduction



- **Lasers maîtres :**

- Laser à *semi-conducteurs* accordable (125 kHz)
- Laser à *fibre* à contre-réaction répartie (20 à 50 kHz)

- **Lasers esclaves :**

- Laser à *semi-conducteurs* à contre-réaction répartie (10 à 100 MHz)
- Laser à *fibre* à contre-réaction répartie (20 à 50 kHz)

Principales différences entre ces lasers :

*cohérence, fréquence des oscillations de relaxation, facteur de couplage phase-amplitude, force du réseau du laser esclave DFB**

*DFB : Distributed FeedBack, i.e. à contre-réaction répartie

- I. Vue générale de l'injection :
laser esclave à semi-conducteurs**

- II. Vers une définition de l'accrochage**

- III. Modèle théorique**

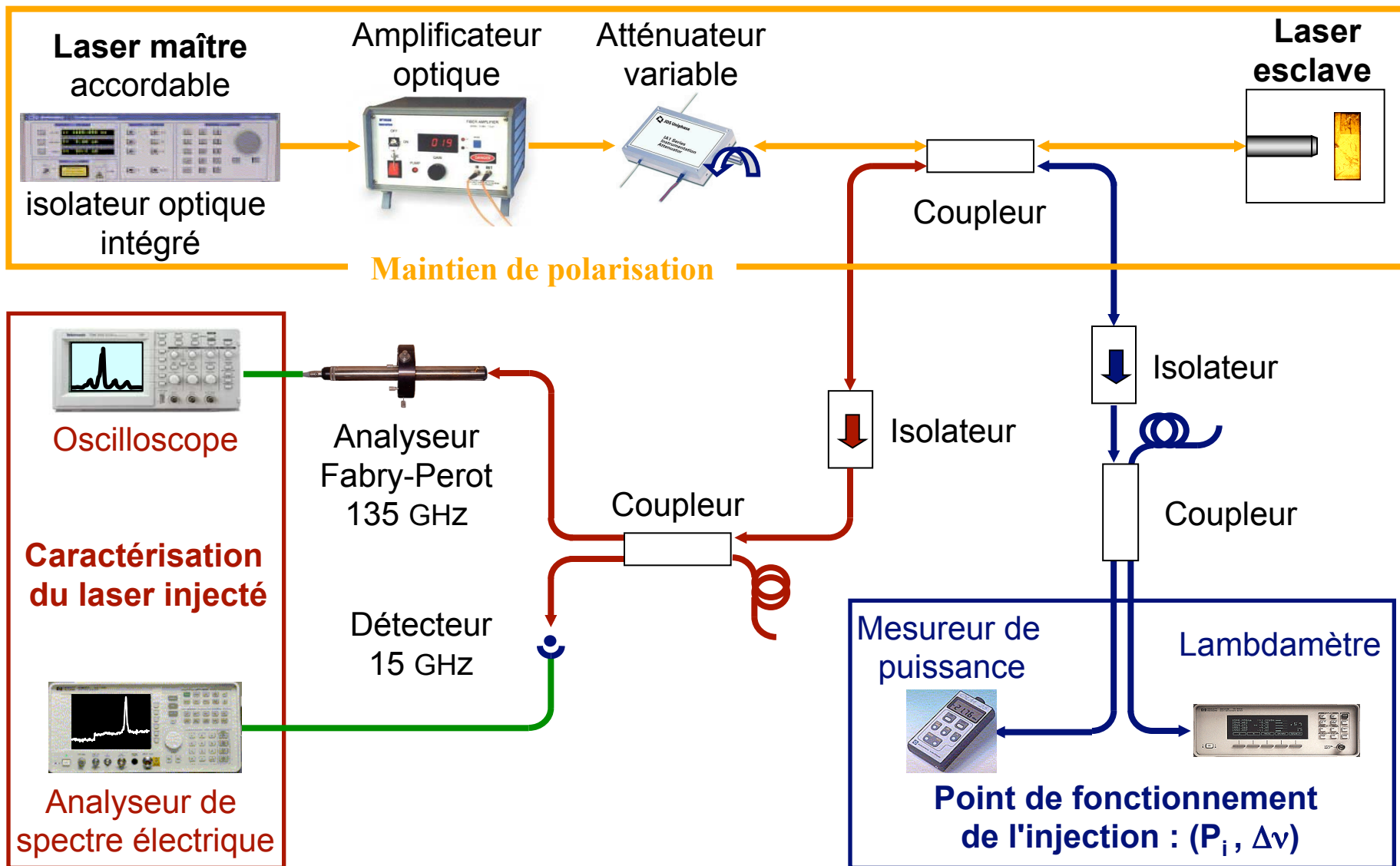
- IV. Injection d'un laser à fibre**

- V. Influence de la cohérence du maître**

Montage expérimental

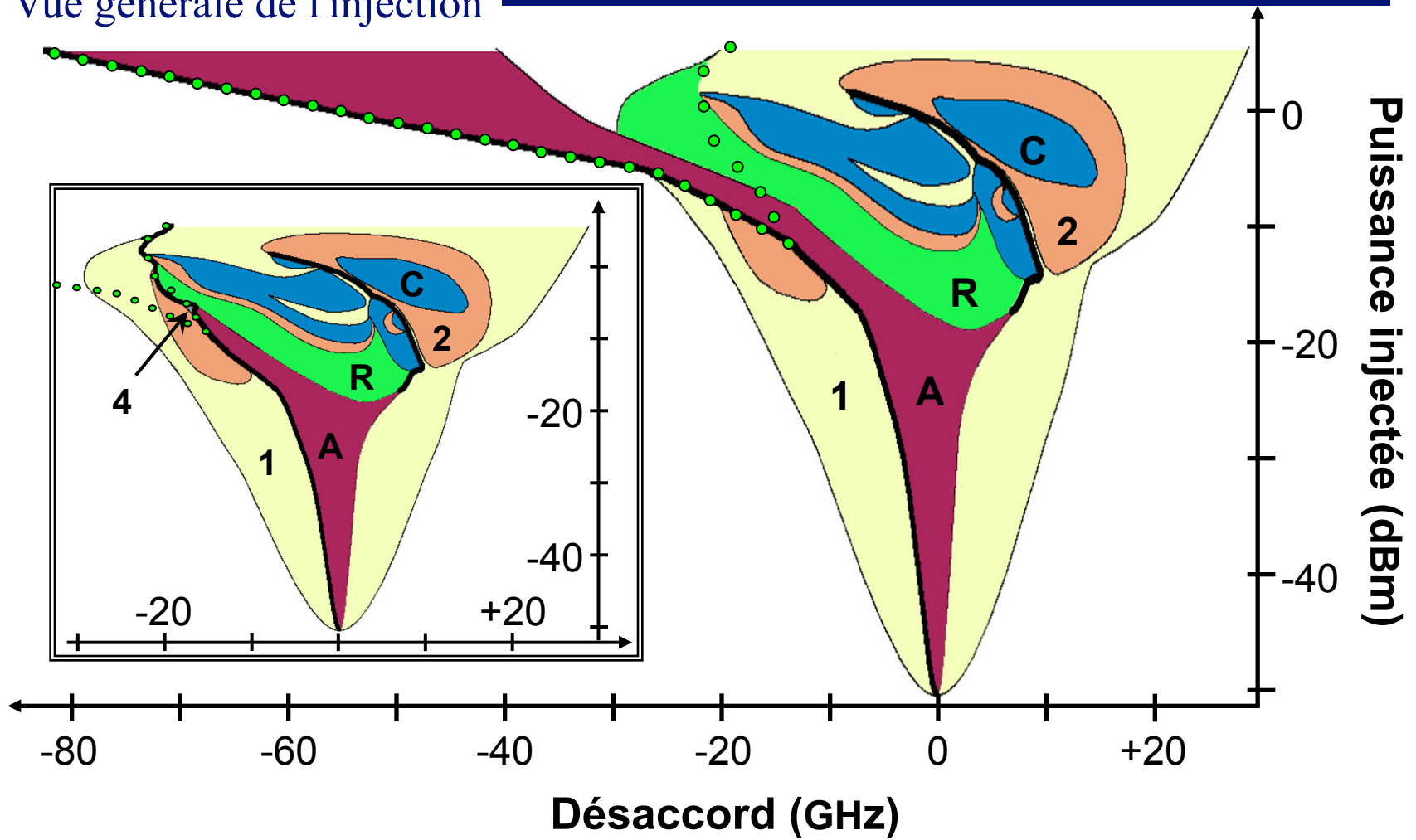
6

I. Vue générale de l'injection



Cartographie à 4 fois le seuil (1)

I. Vue générale de l'injection



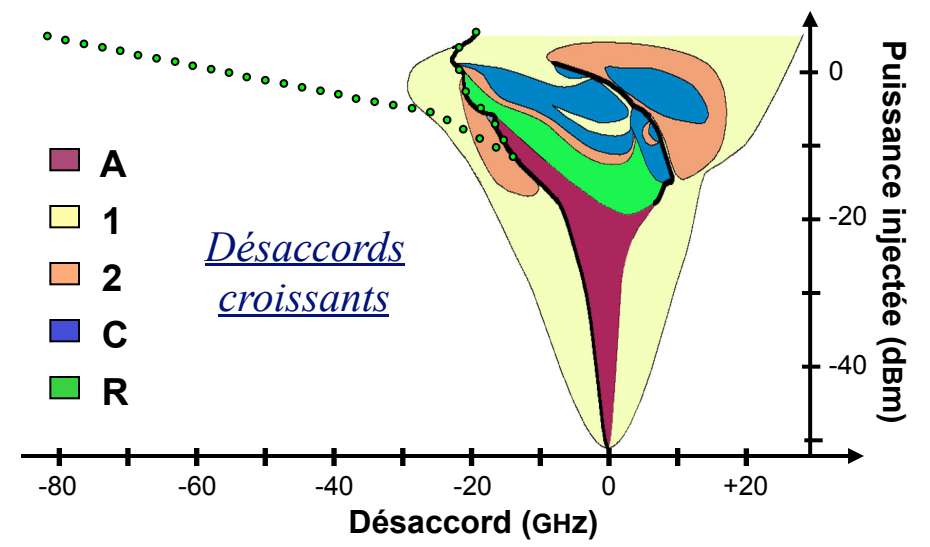
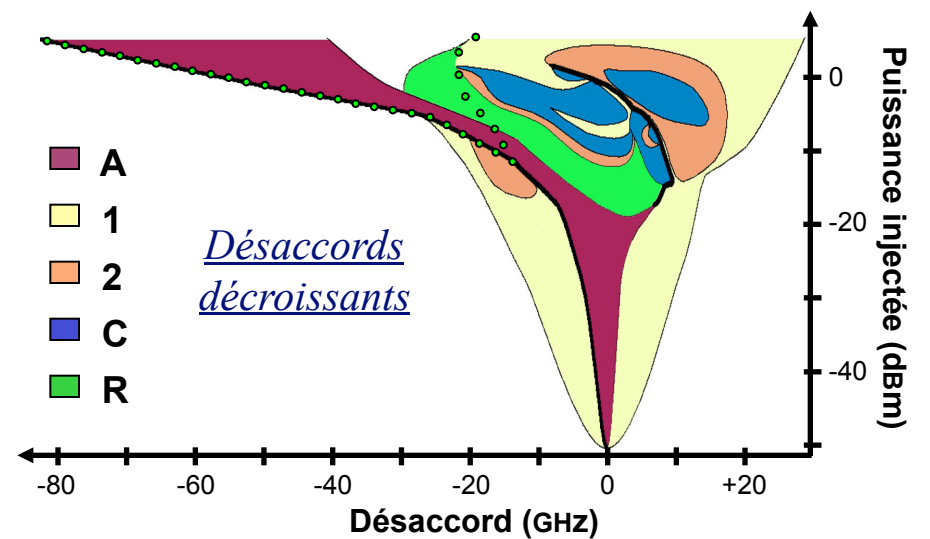
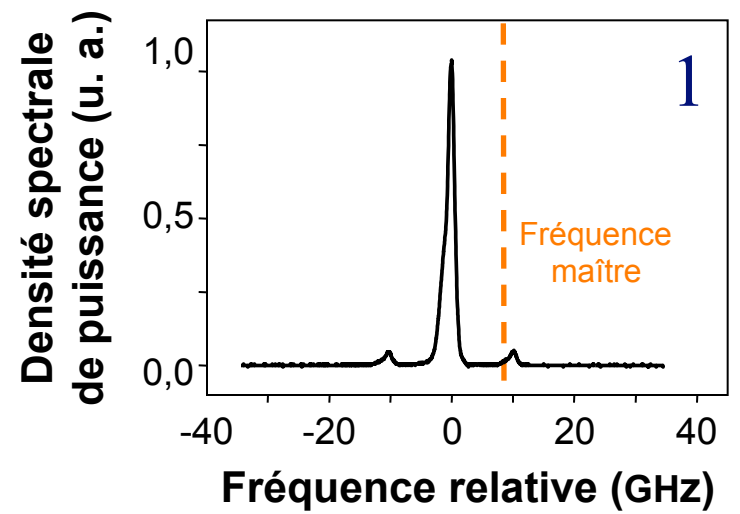
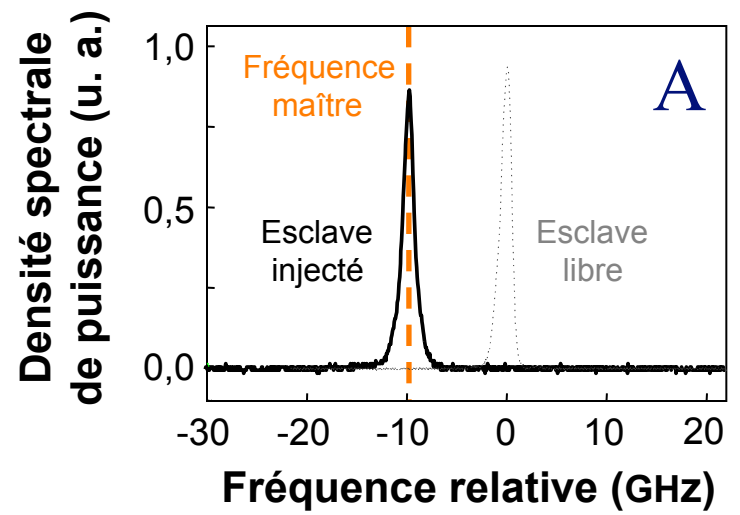
••• Limites de la zone bistable

— Transition abrupte

A : accrochage ; 1, 2, 4 : mélanges d'ondes ; R : relaxation ; C: Chaos.

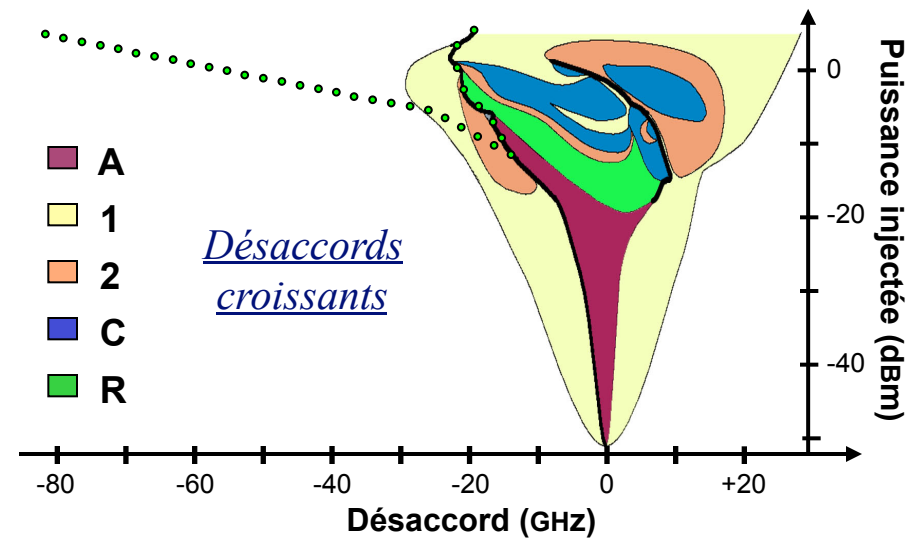
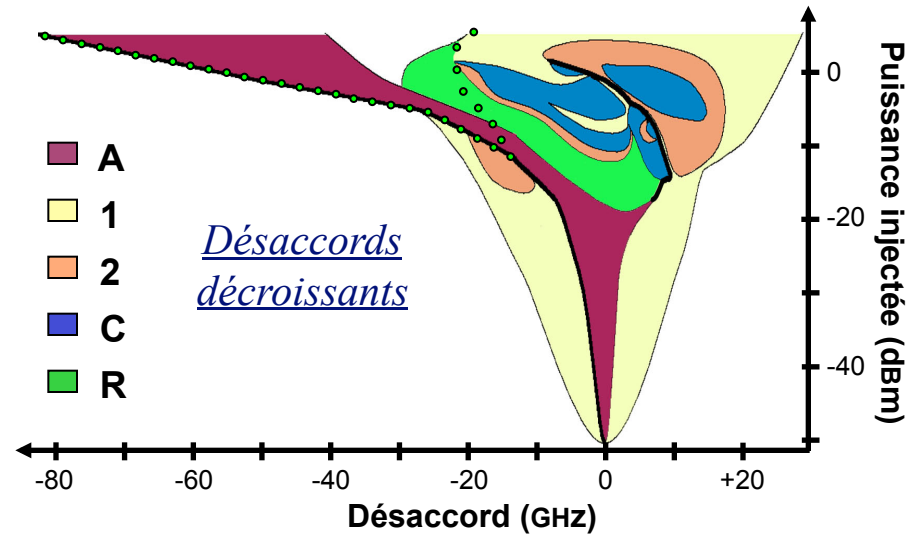
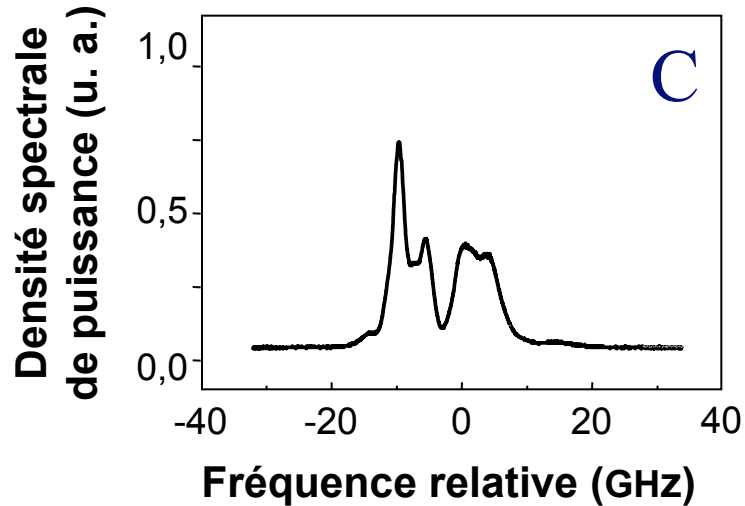
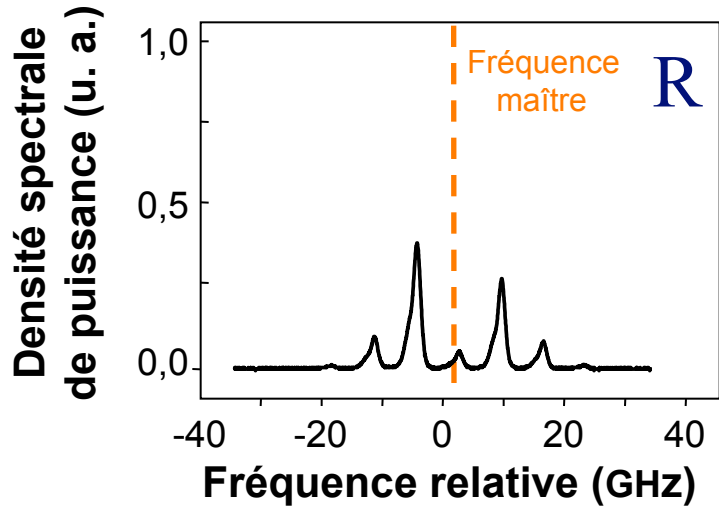
Cartographie à 4 fois le seuil (2)

I. Vue générale de l'injection



Cartographie à 4 fois le seuil (3)

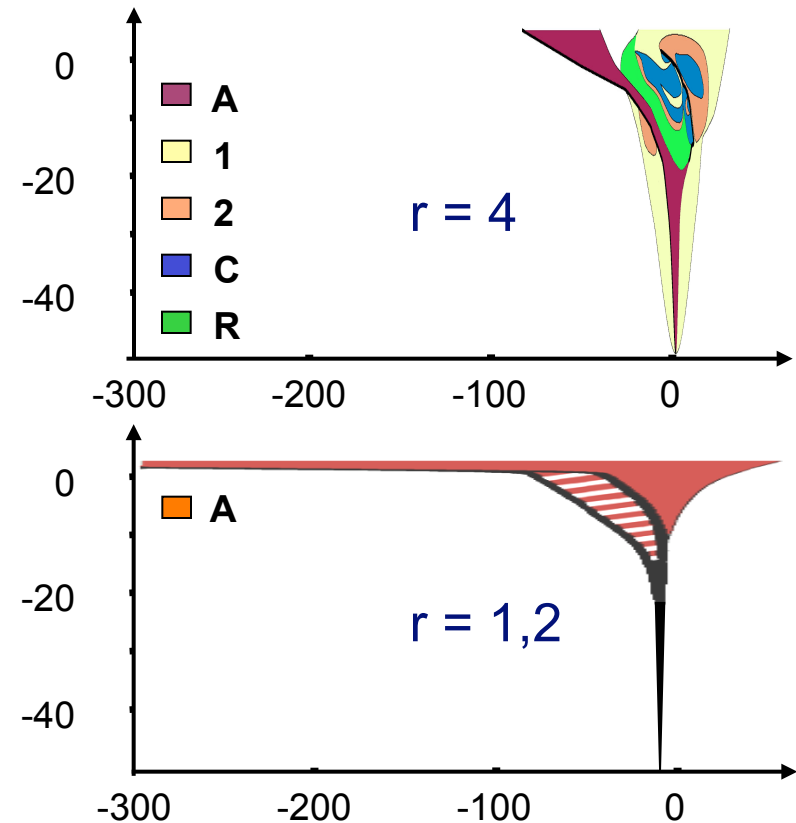
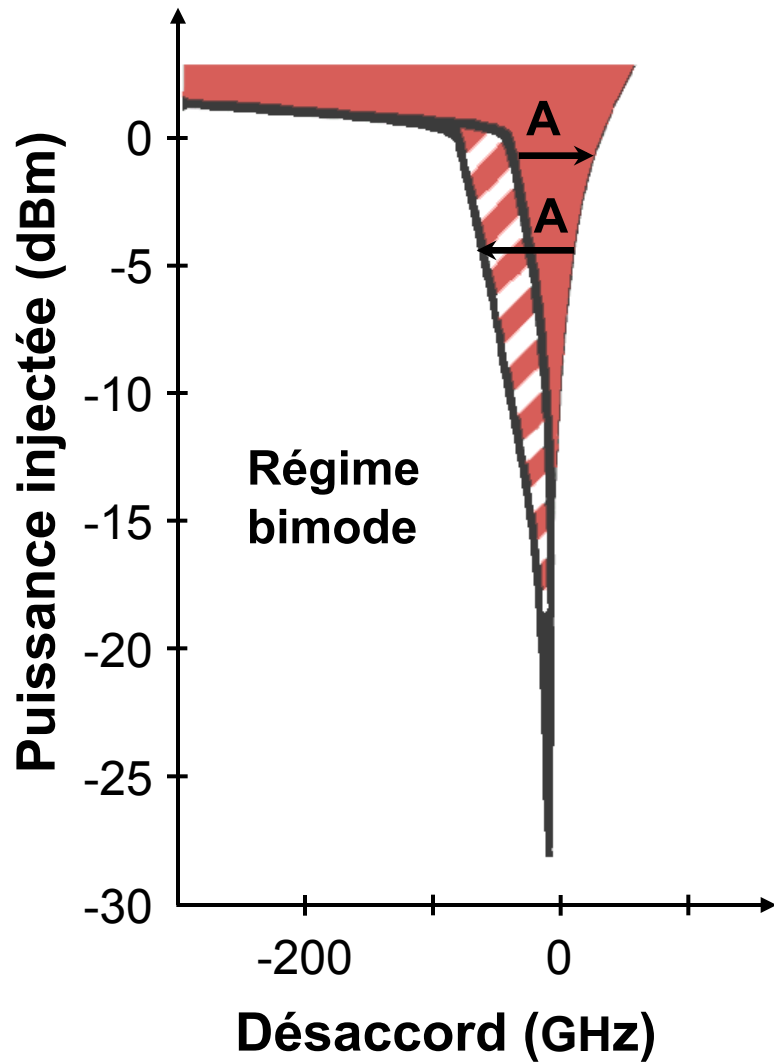
I. Vue générale de l'injection



Cartographie à 1,2 fois le seuil

10

I. Vue générale de l'injection



Cartographie près du seuil :

- moins de régimes
- accrochage plus étendu

- I. **Vue générale de l'injection :
laser esclave à semi-conducteurs**

- II. **Vers une définition de l'accrochage**

- III. **Modèle théorique**

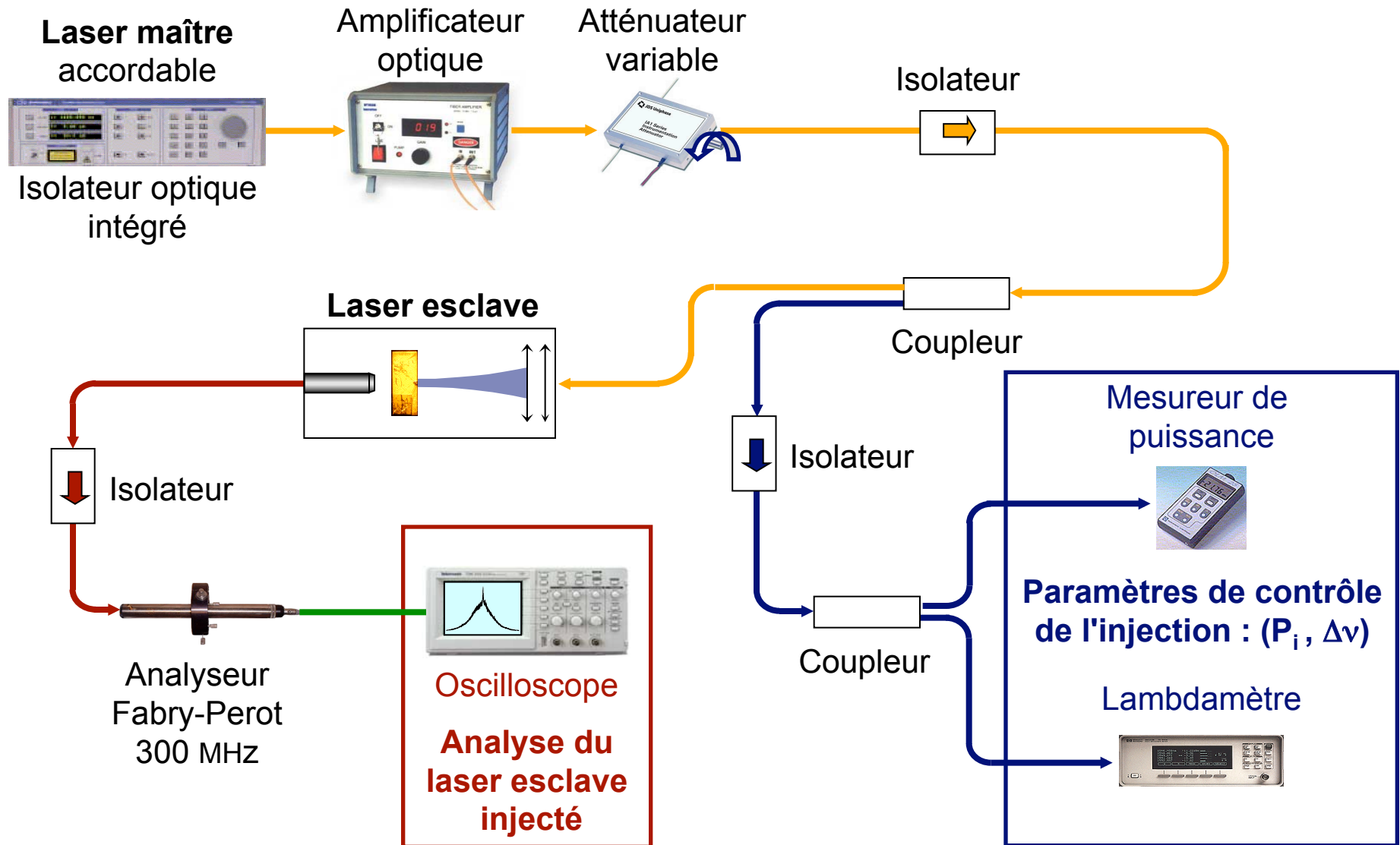
- IV. **Injection d'un laser à fibre**

- V. **Influence de la cohérence du maître**

Montage expérimental

12

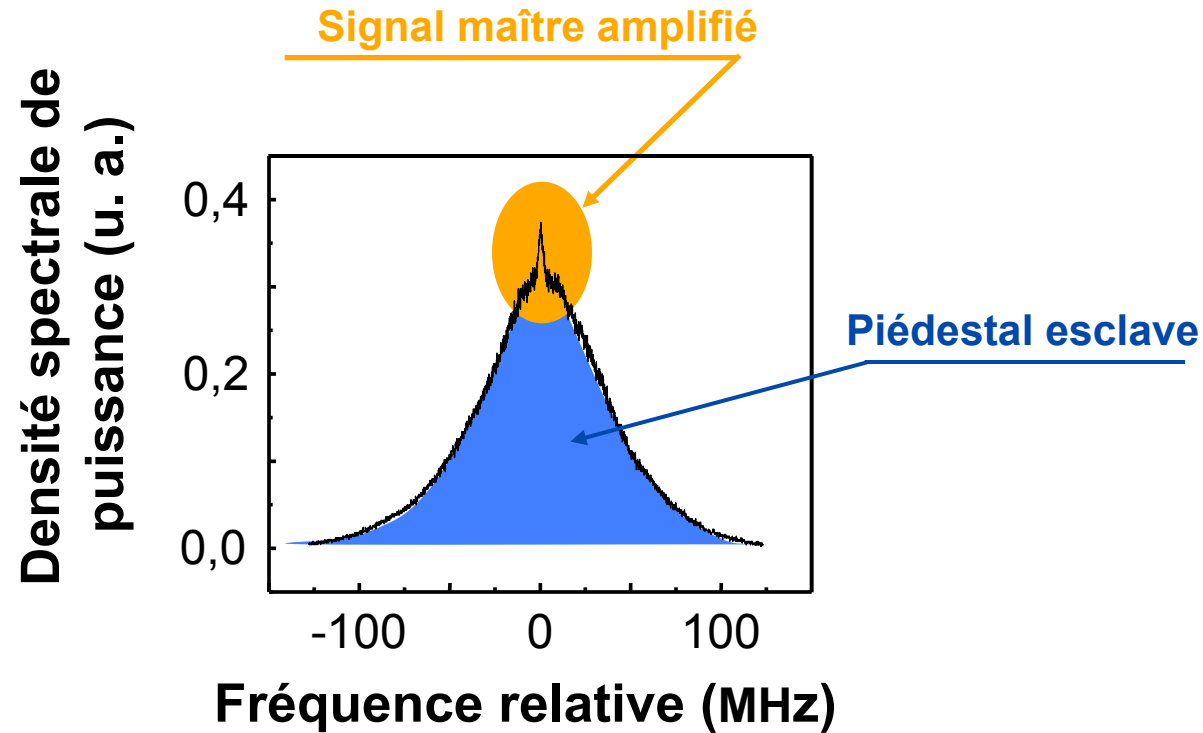
II. Vers une définition de l'accrochage



Esclave injecté par un faible signal cohérent

13

II. Vers une définition de l'accrochage



Injection d'un signal faible cohérent :

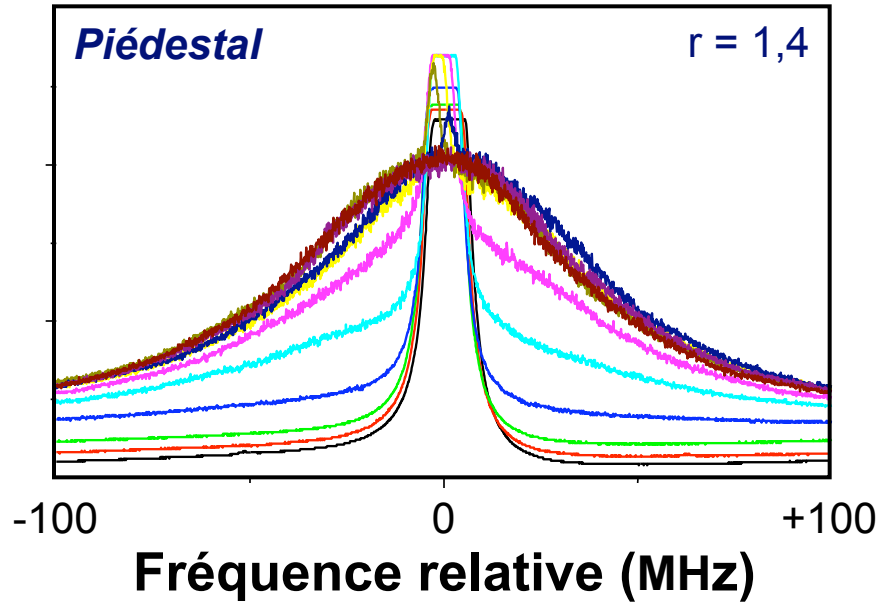
- Maître : 125 kHz
- Esclave : 80 MHz

(Pleines largeurs spectrales à mi-hauteur)

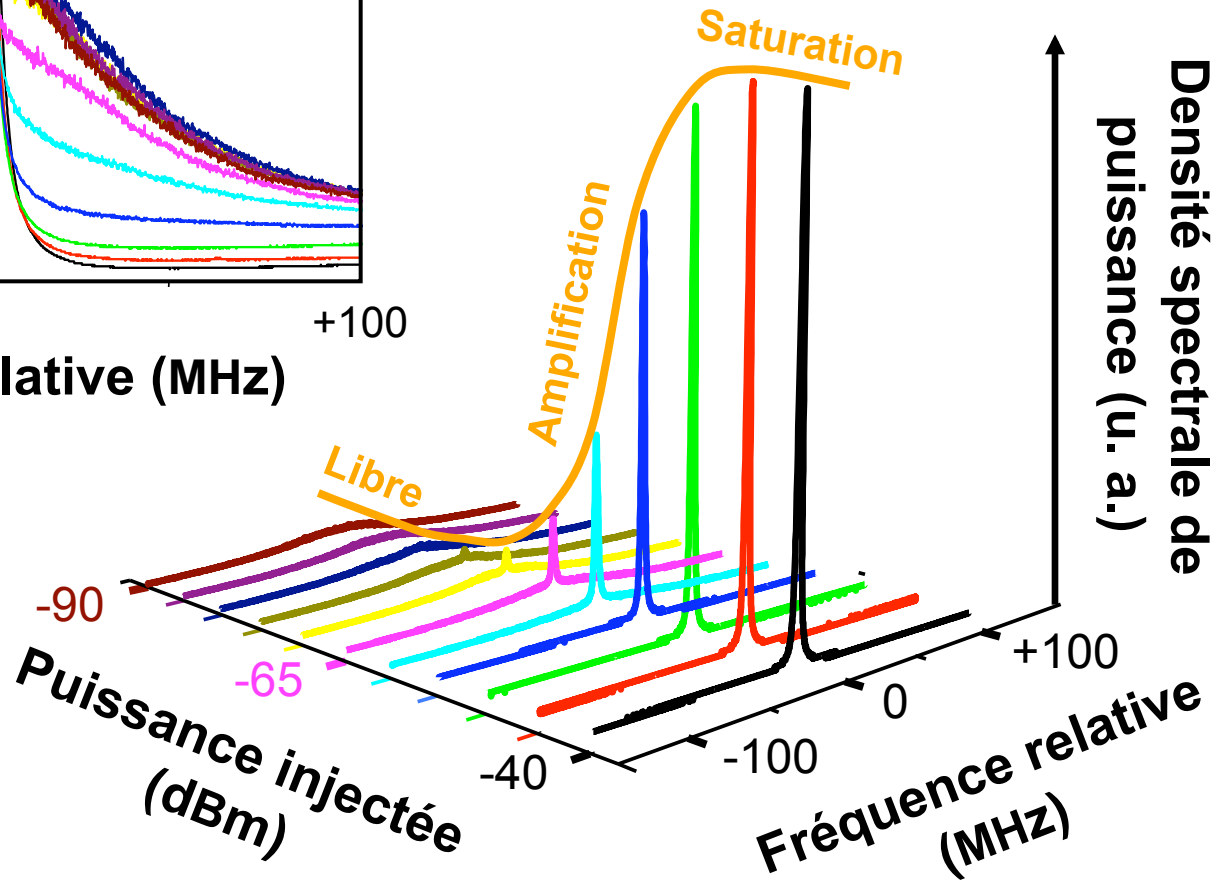
Transfert de pureté spectrale

II. Vers une définition de l'accrochage

Densité spectrale de puissance optique

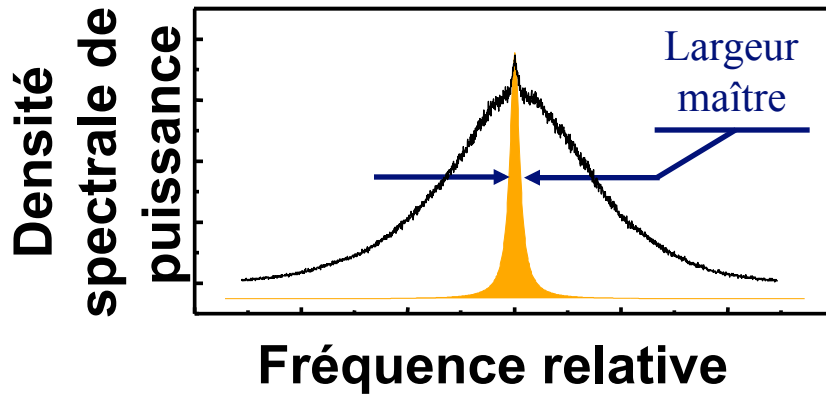


Densité spectrale de puissance (u. a.)



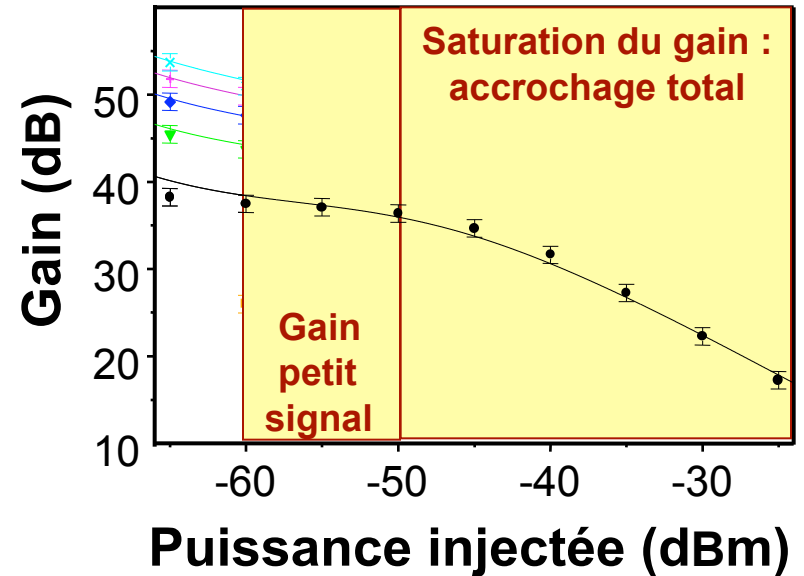
L'accrochage total correspond à la saturation de l'amplification

II. Vers une définition de l'accrochage



$$Gain = \frac{P_{\text{esclave dans la bande maître}}}{P_i}$$

- **Fort gain :**
gain de 40 à 50 dB
30 dB pour un SOA* usuel
- **Faible puissance de saturation :**
environ -50 dBm
-25 dBm pour un SOA usuel

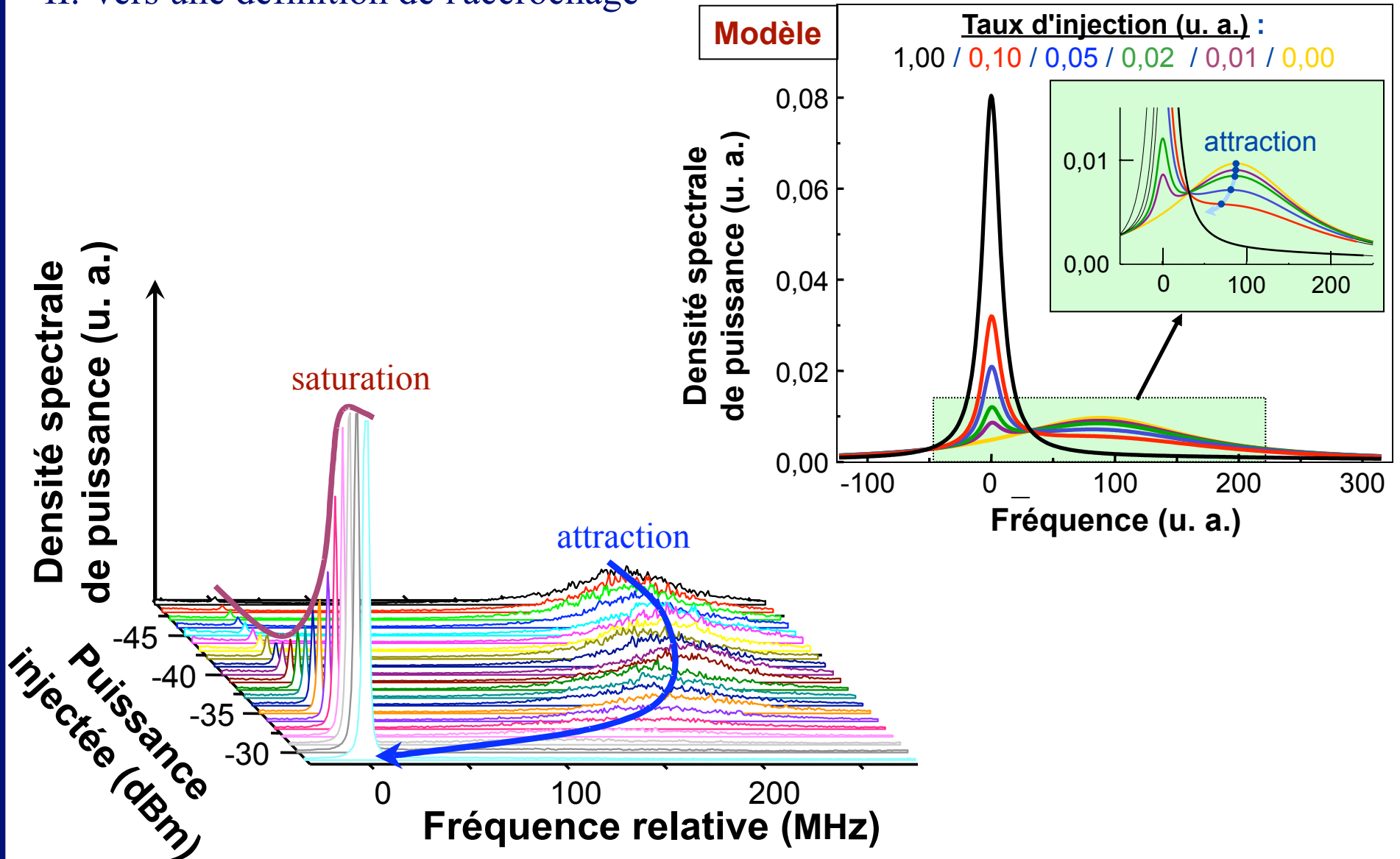


Taux de pompage :	1,1	1,4	1,8
	1,2	1,6	2,0

*SOA : Semiconductor Optical Amplifier, i.e. amplificateur optique à semi-conducteurs

Désaccord non nul

II. Vers une définition de l'accrochage



- I. **Vue générale de l'injection :
laser esclave à semi-conducteurs**

- II. **Vers une définition de l'accrochage**

- III. **Modèle théorique**

- IV. **Injection d'un laser à fibre**

- V. **Influence de la cohérence du maître**

III. Modèle théorique

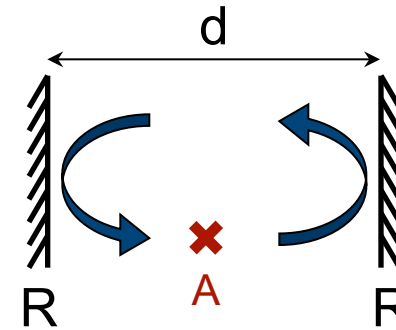
- Modèle simple
- Repose sur la fonction de transfert de la cavité
- Description du laser pompé
au-dessus, au-dessous ou à travers le seuil
- Modèle pour un laser à semi-conducteurs de type Fabry-Perot
*tout laser dont la fonction de transfert est connue
peut être simulé de manière numérique*
- Étude principalement qualitative, quantitative facilement accessible

III. Modèle théorique

• Cavité Fabry-Perot :

$$I_A = \frac{T}{[1 - R]^2 + 4 \cdot R \cdot \sin^2(\phi / 2)}$$

avec $\phi = \frac{4 \cdot \pi \cdot \nu \cdot n \cdot d}{c}$



• Laser :

$$y = \frac{S}{[1 - e^{-L+G}]^2 + 4 \cdot e^{-L+G} \cdot \sin^2(\phi / 2)} \quad \text{avec} \quad Y = \int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot d\nu$$

y : densité spectrale du champ laser
 S : puissance spontanée
 L : pertes

G : gain saturé sur un aller-retour
 φ : phase cumulée sur un aller-retour
 Y : intensité totale

Prise en compte des trois fondamentaux du laser :
émission spontanée, émission stimulée, filtrage

Fonction de transfert du laser injecté

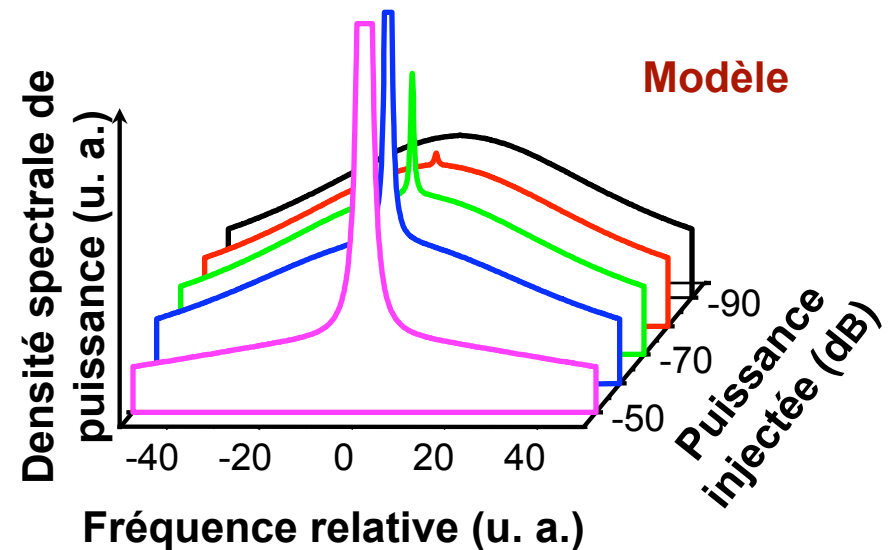
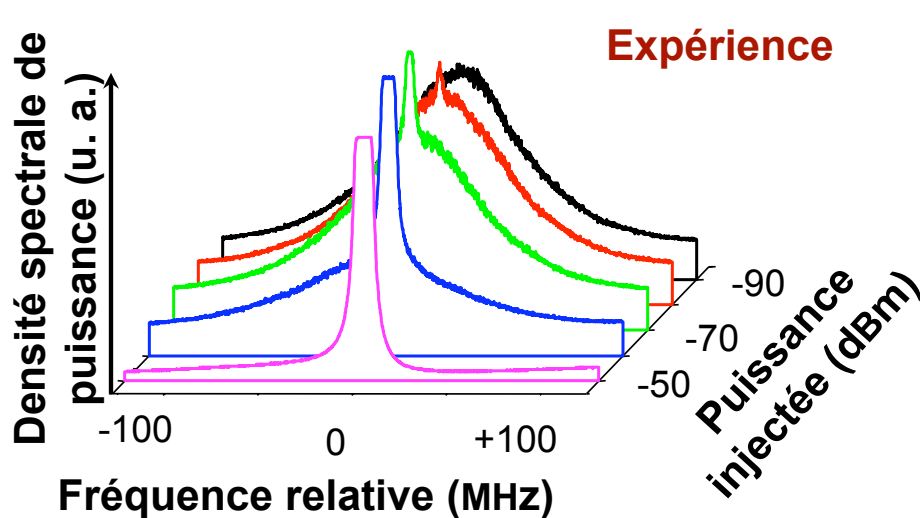
III. Modèle théorique

- **Esclave libre :**

$$y(\nu) = \frac{S}{[1 - e^{-L+G}]^2 + 4 \cdot e^{-L+G} \cdot \sin^2(\phi/2)}$$

- **Laser injecté :**

$$y(\nu) = \frac{S + \eta \cdot y_m(\nu)}{[1 - e^{-L+G}]^2 + 4 \cdot e^{-L+G} \cdot \sin^2(\phi/2)} \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta : \text{taux d'injection} \\ y_m : \text{densité spectrale maître} \end{array} \right.$$



- I. **Vue générale de l'injection :
laser esclave à semi-conducteurs**

- II. **Vers une définition de l'accrochage**

- III. **Modèle théorique**

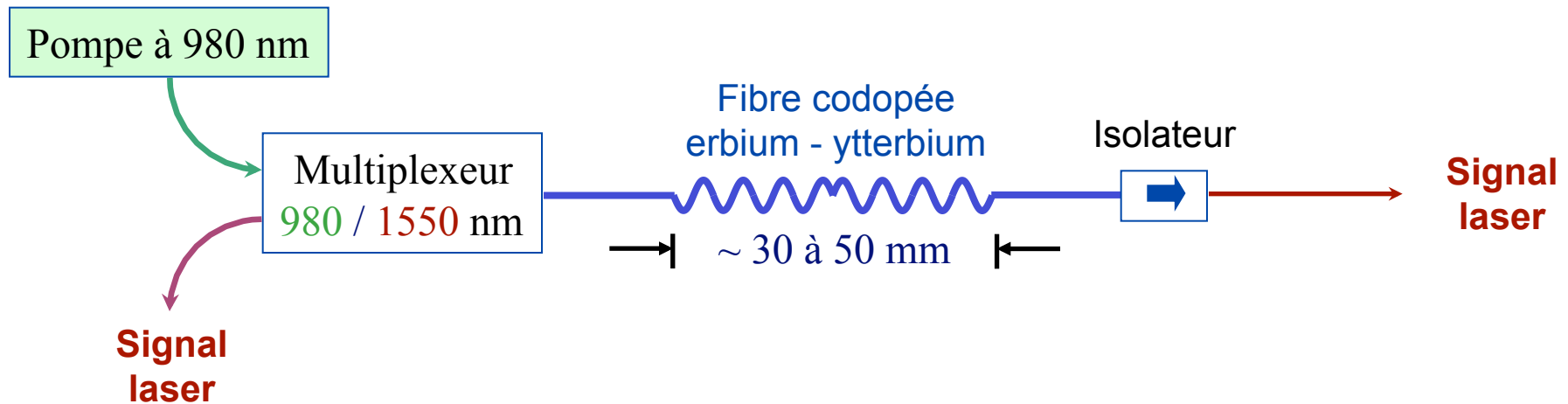
- IV. **Injection d'un laser à fibre**

- V. **Influence de la cohérence du maître**

Principe du lasers à fibre DFB (1)

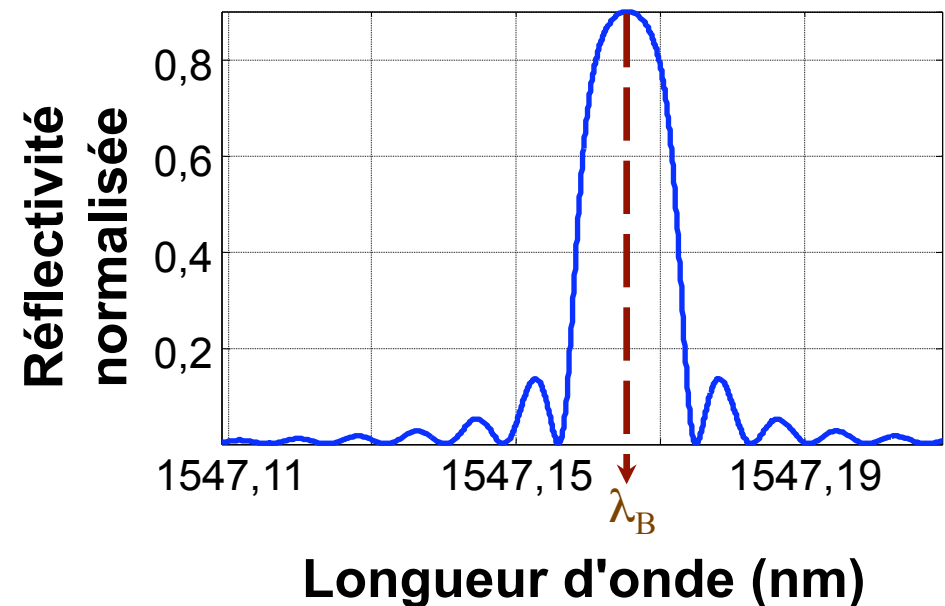
22

IV. Injection d'un laser à fibre



Réseau de Bragg :
modulation spatiale périodique
de l'indice effectif de la fibre

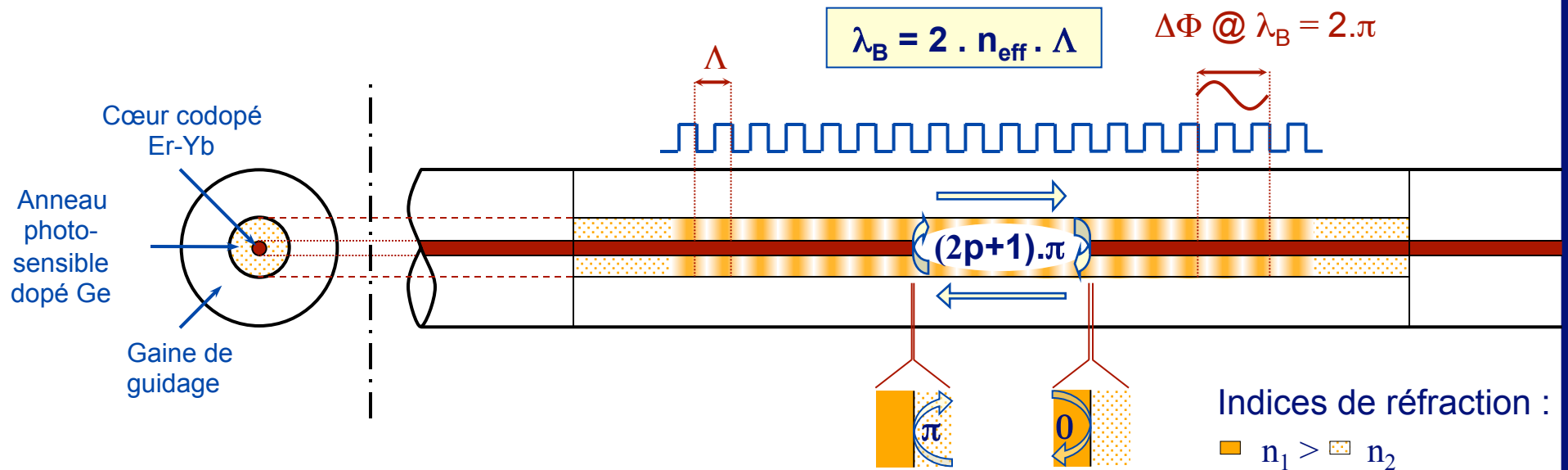
- *miroir sélectif en fréquence*
- *cavité répartie*



Principe du lasers à fibre DFB (2)

23

IV. Injection d'un laser à fibre



Propriétés générales des lasers obtenus :

- continu
- monomode ($SMSR^* > 28 \text{ dB}$)
longitudinal, transverse, polarisation
- accordable (*plusieurs nm*)
- stable en fréquence (*gigue < 10 MHz*)

*SMSR : Single Mode Suppression Ratio,
i. e. rapport de suppression de mode

λ_B anti-résonante

⇒ *effet laser à 2 fréquences
symétriques autour de λ_B*

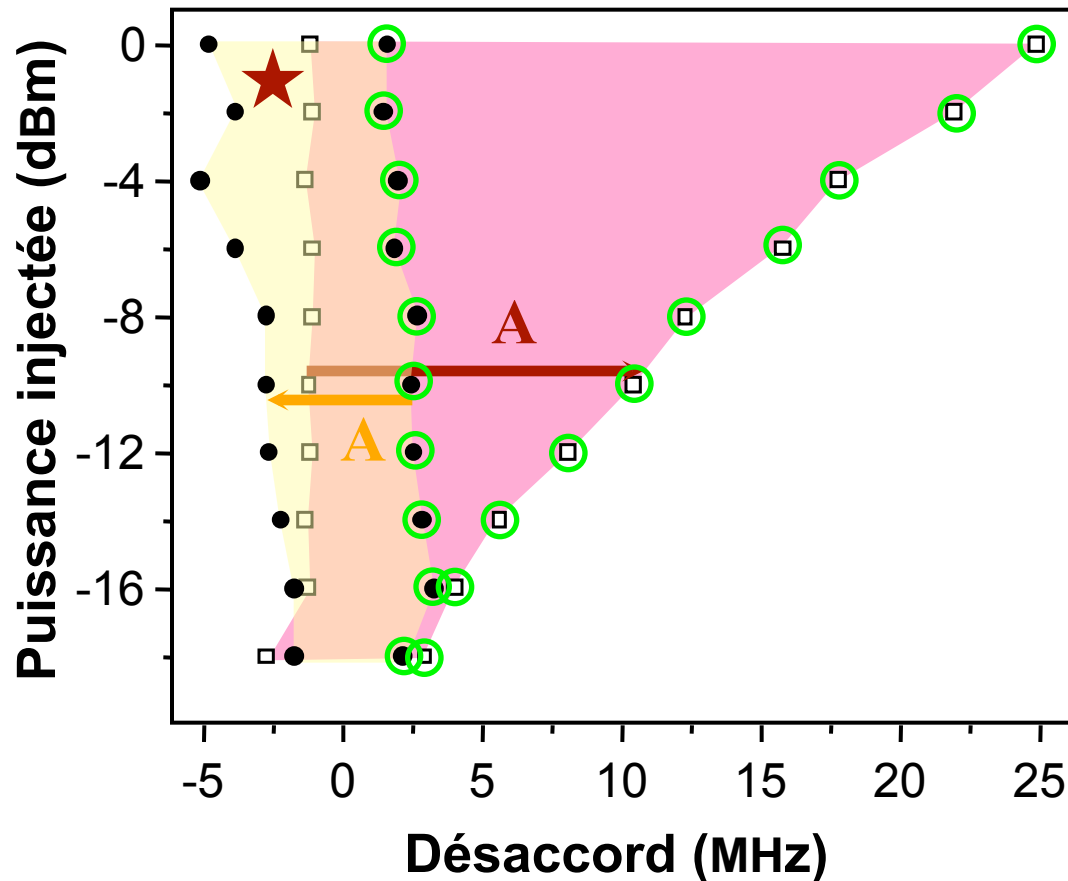
***Insertion d'un saut de phase de
π/2 rad pour fonctionnement
monomode***

Cartographie à 1,7 fois le seuil

24

IV. Injection d'un laser à fibre

- Désaccords croissants
- Désaccords décroissants
- Zone bistable



Comparaison à un laser à semi-conducteurs injecté :

La plage d'accrochage est :

- étroite

(2000 fois moindre)

⇒ force du réseau, cavité Fabry-Perot pour les lasers à semi-conducteurs

- étendue pour des désaccords croissants seulement

- dissymétrique

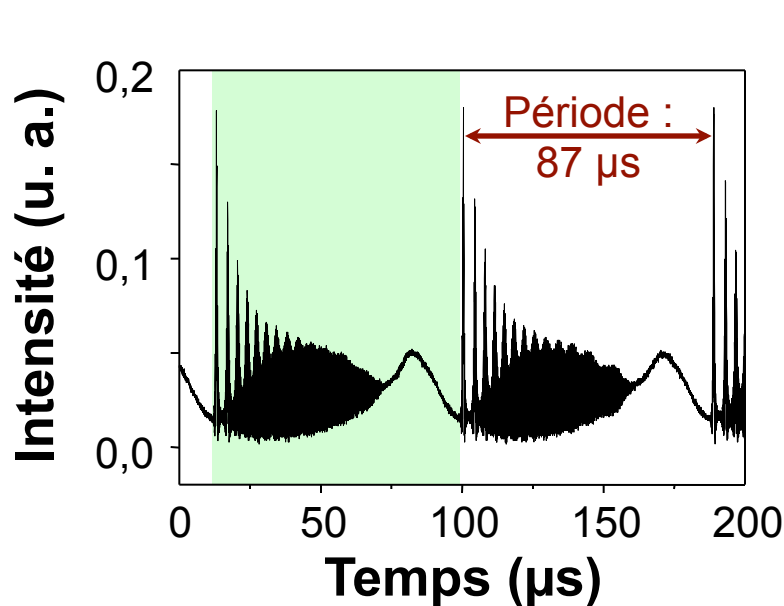
⇒ facteur de couplage phase-amplitude ?

Réponse temporelle

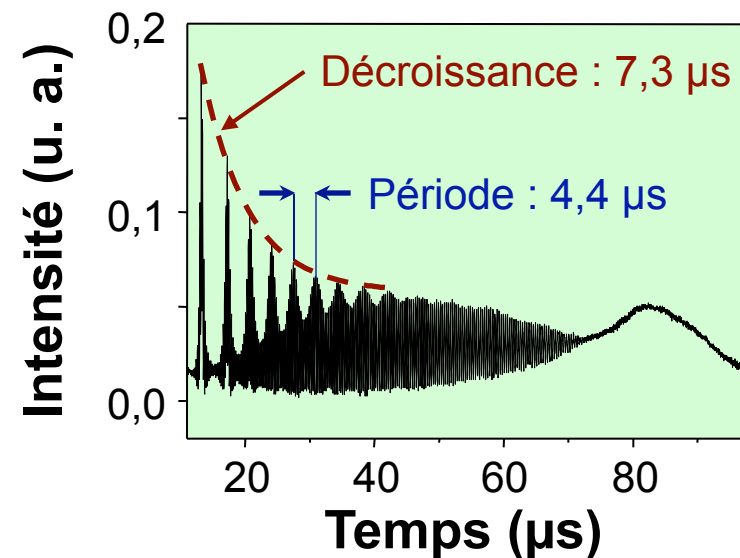
IV. Injection d'un laser à fibre

Évolution temporelle pour un désaccord négatif proche de la zone d'accrochage :

$$r = 2 \text{ \& } P_i = -1,7 \text{ dBm}$$



87 μs ⇔ 11,5 kHz
Origine physique ?

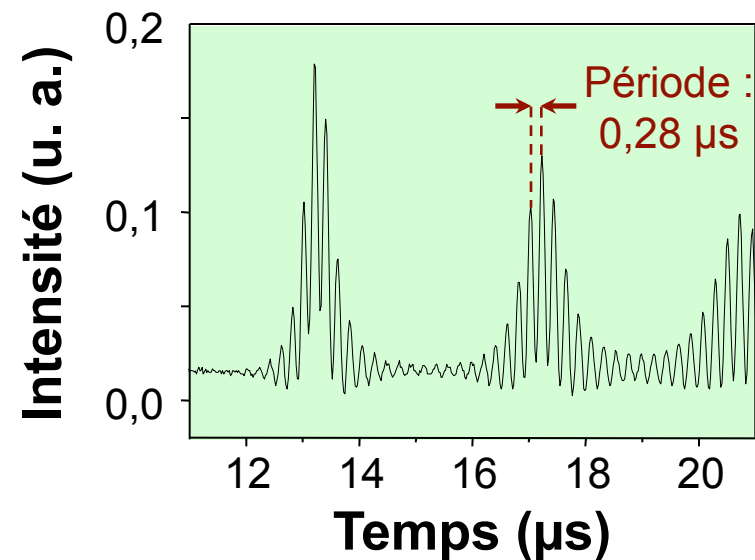
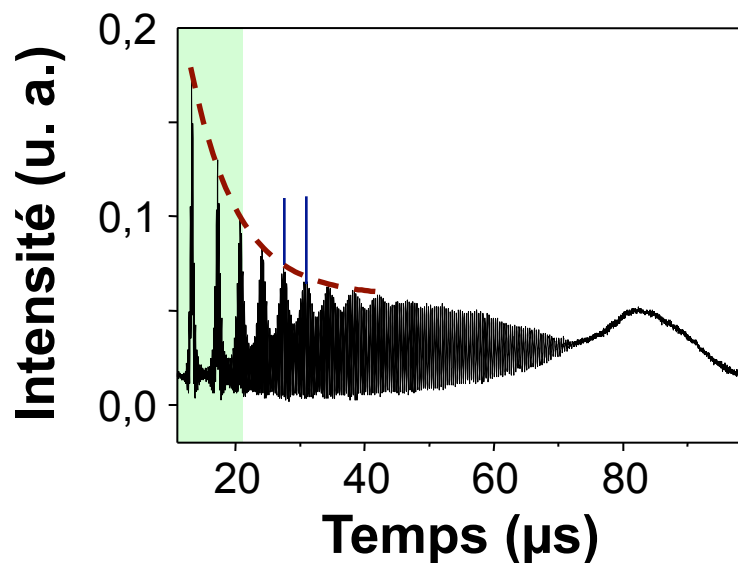


4,4 μs ⇔ 230 kHz
Relaxation

IV. Injection d'un laser à fibre

Évolution temporelle pour un désaccord négatif proche de la zone d'accrochage :

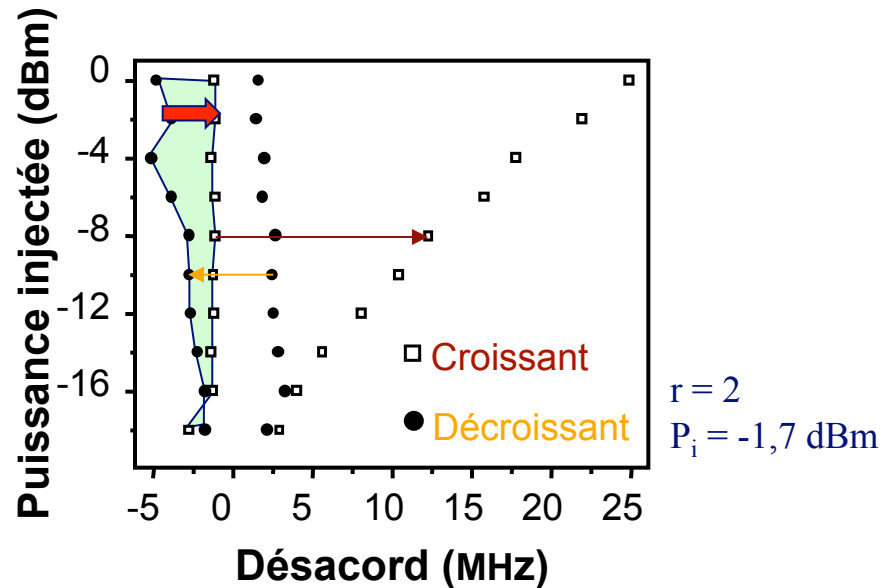
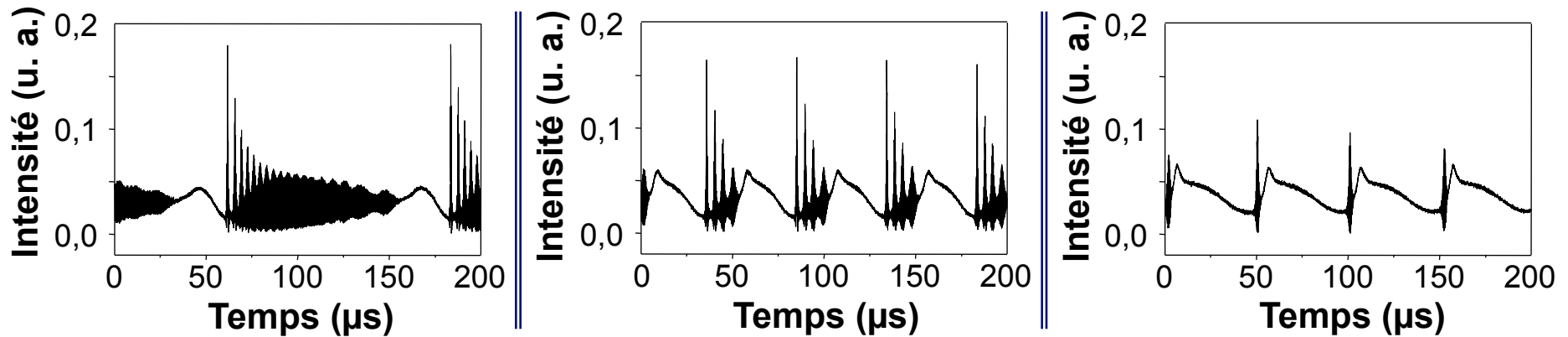
$$r = 2 \text{ \& } P_i = -1,7 \text{ dBm}$$



0,28 μs ⇔ 3,6 MHz
Désaccord ?

IV. Injection d'un laser à fibre

Évolution temporelle pour des désaccords négatifs croissants



Avant accrochage :

- la période générale décroît
- le nombre de picots décroît

⇒ *comportements stables et répétables à étudier plus en détails*

- I. **Vue générale de l'injection :
laser esclave à semi-conducteurs**

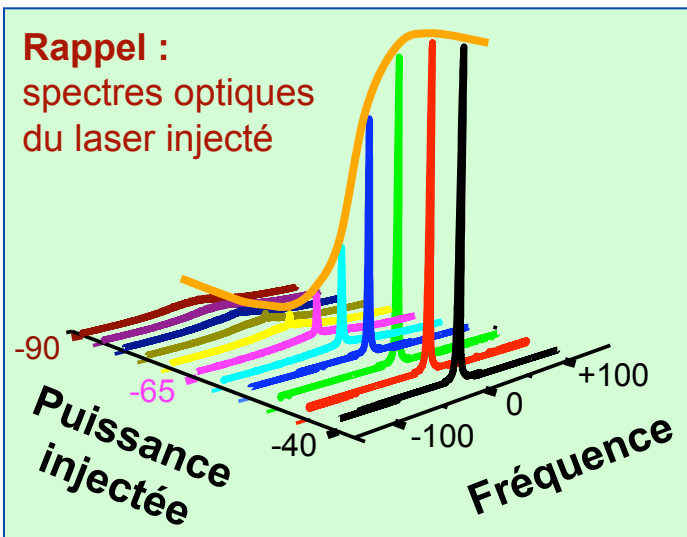
- II. **Vers une définition de l'accrochage**

- III. **Modèle théorique**

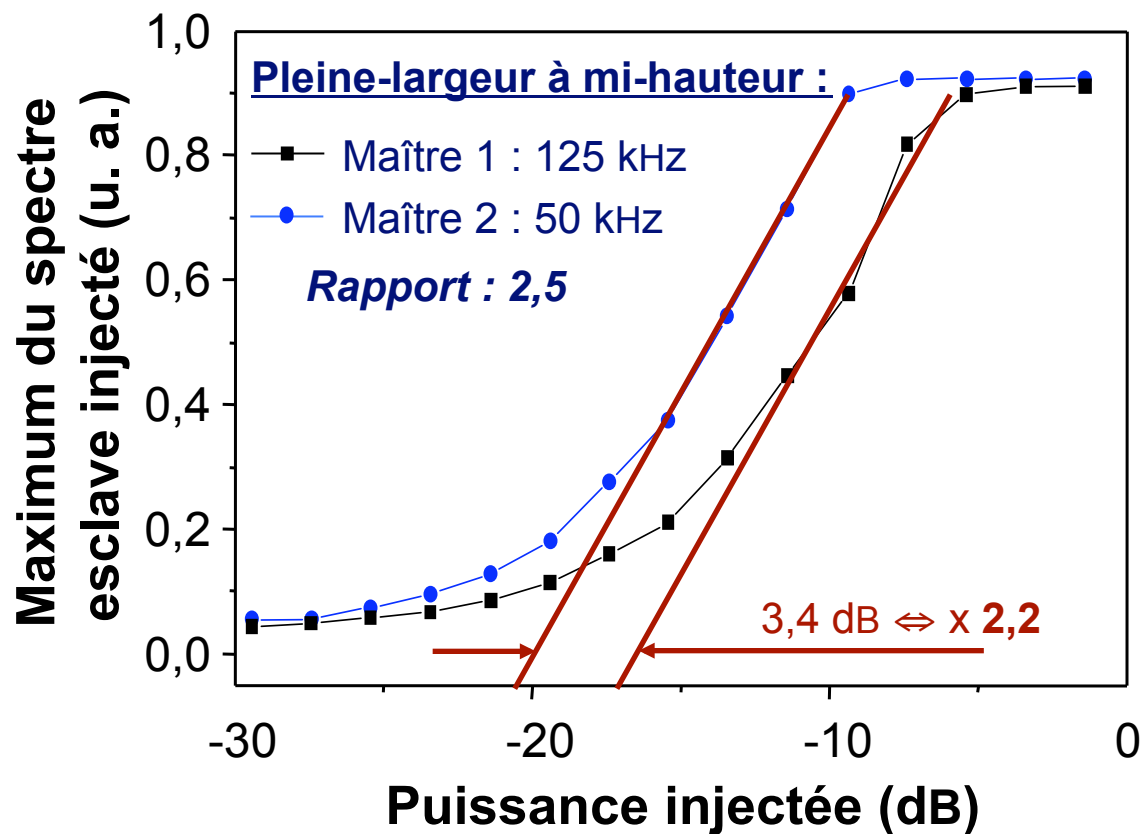
- IV. **Injection d'un laser à fibre**

- V. **Influence de la cohérence du maître**

V. Influence de la cohérence maître

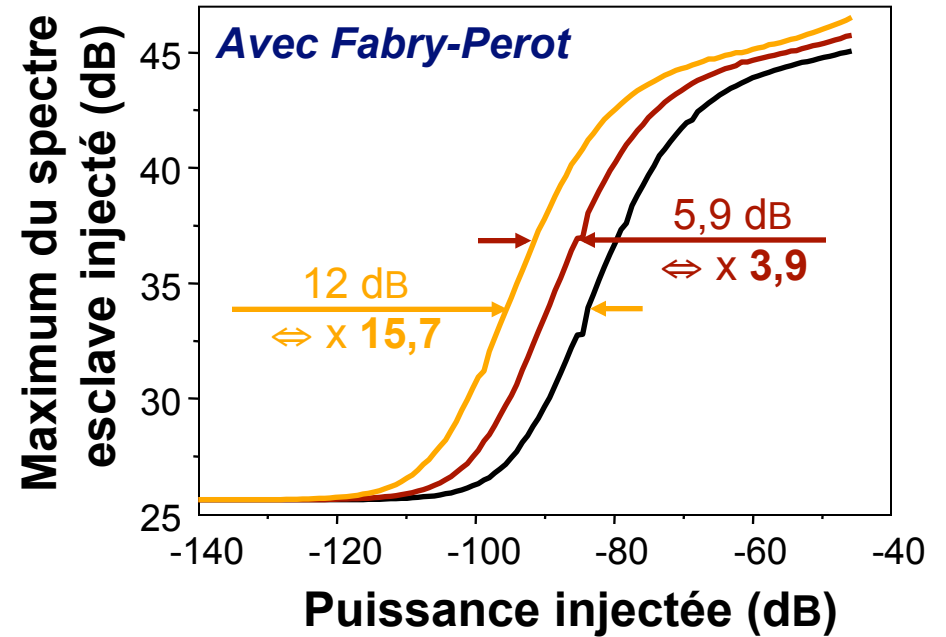
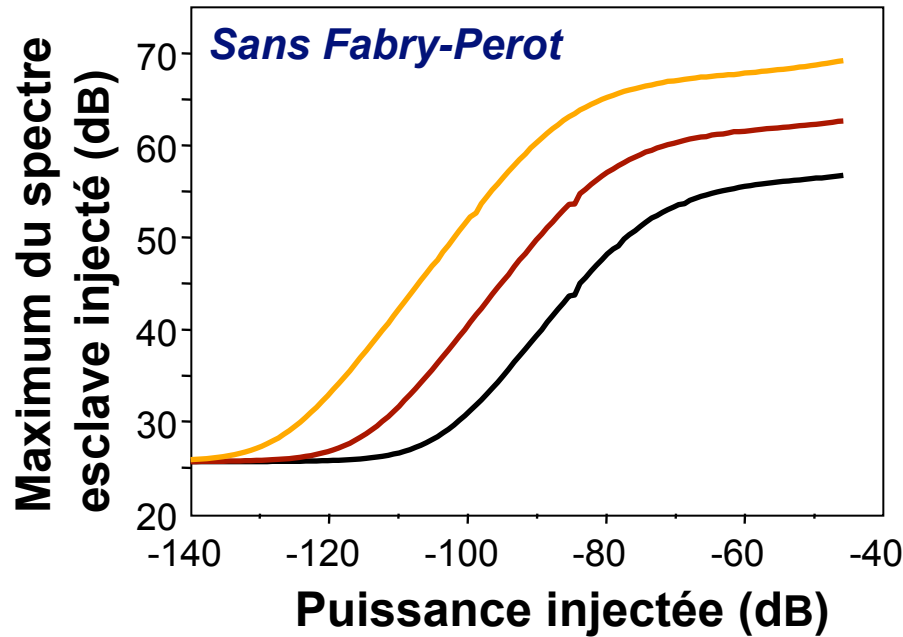


**Nouvelle méthode
de mesure de largeurs
de raie pour des lasers
très cohérents (< Hz ?)**



Modélisation et influence du Fabry-Perot

V. Influence de la cohérence maître



Largeur spectrale maître (u. a.) : — 1,0 — 4,0 — 14

Le modèle valide la faisabilité de la mesure de largeurs spectrales
Importance de la prise en compte du filtrage de l'analyseur Fabry-Perot

- **Injection d'un laser à semi-conducteurs**

- la cartographie de l'injection dépend de la nature de l'esclave, à travers :
 - *le facteur de couplage phase-amplitude*
 - *la force des réseaux des lasers DFBS*
 - *les fréquences de relaxation*
- cartographie du comportement bistable
- cartographie expérimentale du régime de relaxation
- synchronisation de chaos (cryptographie)

- **Réponse temporelle du laser à fibre injecté**

- réponses originales et curieuses qui restent à expliquer

- **Faible injection**

- l'esclave est un amplificateur idéal pour des signaux faibles et cohérents
- l'accrochage total est défini comme à saturation de l'amplification
- l'efficacité de l'injection dépend de la cohérence du laser maître
- attraction en fréquence

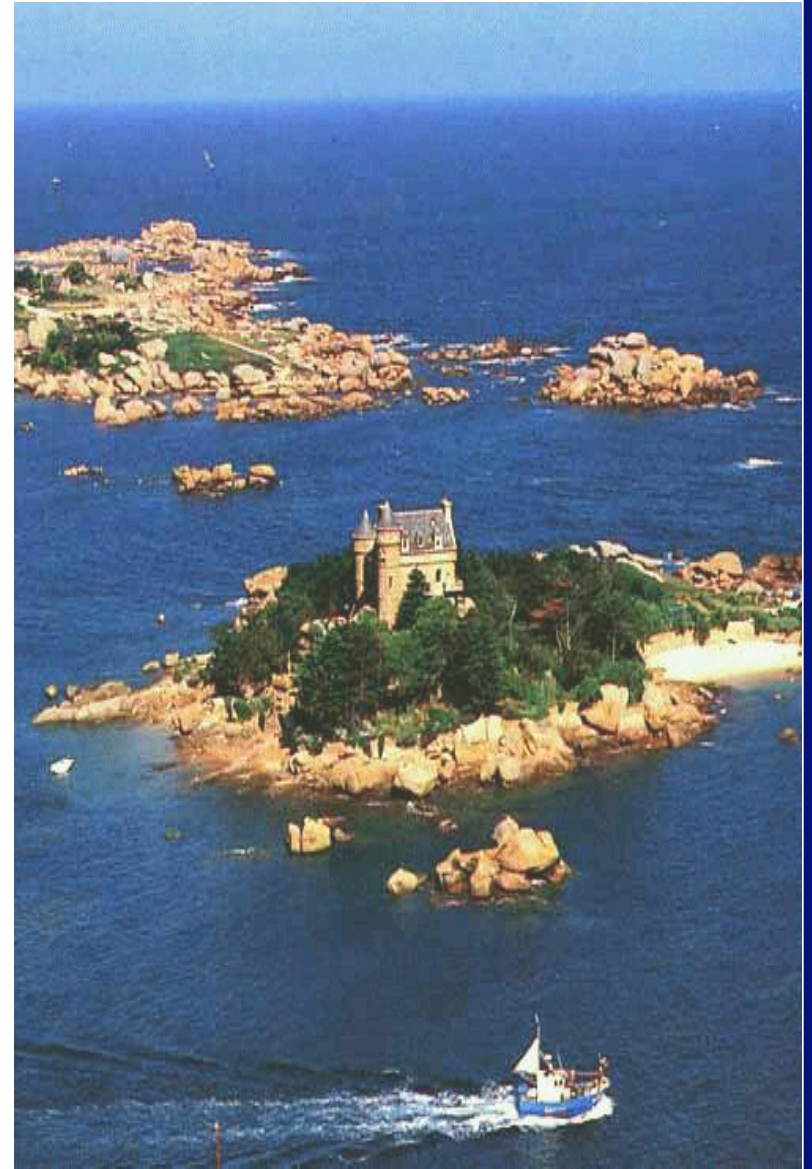
- **Modèle**

- simple et en bon accord qualitatif avec les expériences
- prise en compte de la fonction d'appareil du Fabry-Perot
- études quantitatives...

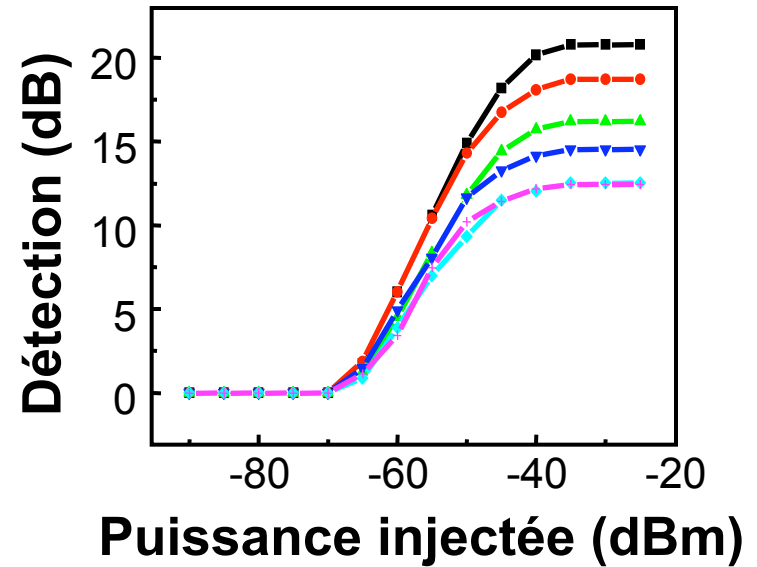
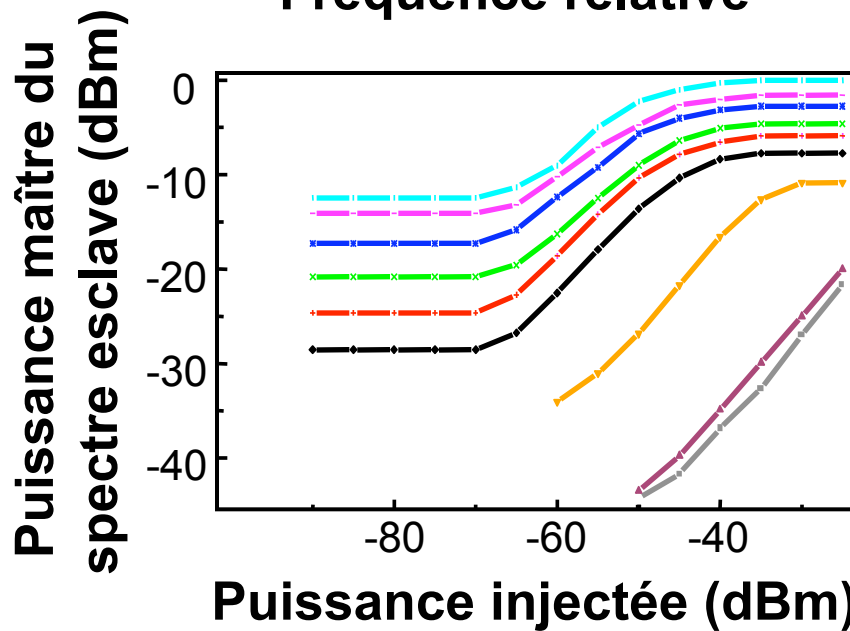
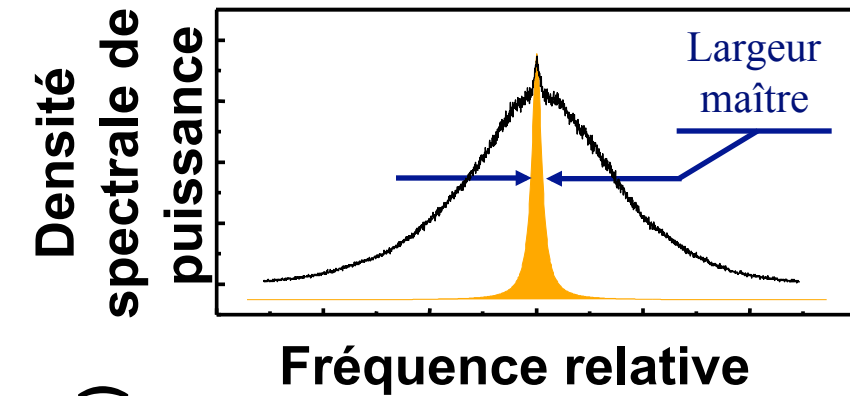
Un grand merci :

- **aux membres du jury** : Marc Brunel, Yves Champagne, John Dudley et Pierre Tremblay ;
- **ENSSAT** : Pascal Besnard, Renaud Gabet, Guy Stéphan, Jean-Claude Simon, Vincent Roncin, Mathilde Gay, Céline Guignard, Réjane Le Roy, Sylvain Fève, Serge Le Flécher, Olivier Vaudel, Julien Poëtte, etc ;
- **COPL** : Sophie LaRoche, Paul Verville, Chrystelle Juignet, Isabelle Castonguay, Radan Slavík, Serge Doucet, Julien Magné, Ghislaine L'Hebreux, etc ;
- **mais aussi** : Carlos Palavicini, Yves Jaouën, Tran Thi Tam, Michel Guillou, Clément Girard, Brigitte Moore, et ceux que j'aurais malencontreusement oubliés...

Des questions ?



Discussions...



Meilleure détection près du seuil :
Détection hétérodyne de -117 dBm par R. Gabet

Taux de pompage : — 0,9 — 1,0 — 1,1 — 1,2 — 1,3 — 1,4 — 1,6 — 1,8 — 2,0

Discussions...

35