

# Amplification Raman pour liaisons opto-hyperfréquences

**Kafing KEÏTA**

**Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, **manolia**, CNRS/IO/UPS  
Thales Research & Technology-France**

# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle
2. le bruit
  - i. émission spontanée amplifiée
  - ii. transfert du bruit de la pompe
3. mesures expérimentales de gain et d'ASE
4. réduction du bruit
  - i. modèle classique
  - ii. modèle quantique

conclusion et perspectives

# progression

## introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle
2. le bruit
  - i. émission spontanée amplifiée
  - ii. transfert du bruit de la pompe
3. mesures expérimentales de gain et d'ASE
4. réduction du bruit
  - i. modèle classique
  - ii. modèle quantique

conclusion et perspectives

# introduction à l'optique hyperfréquence

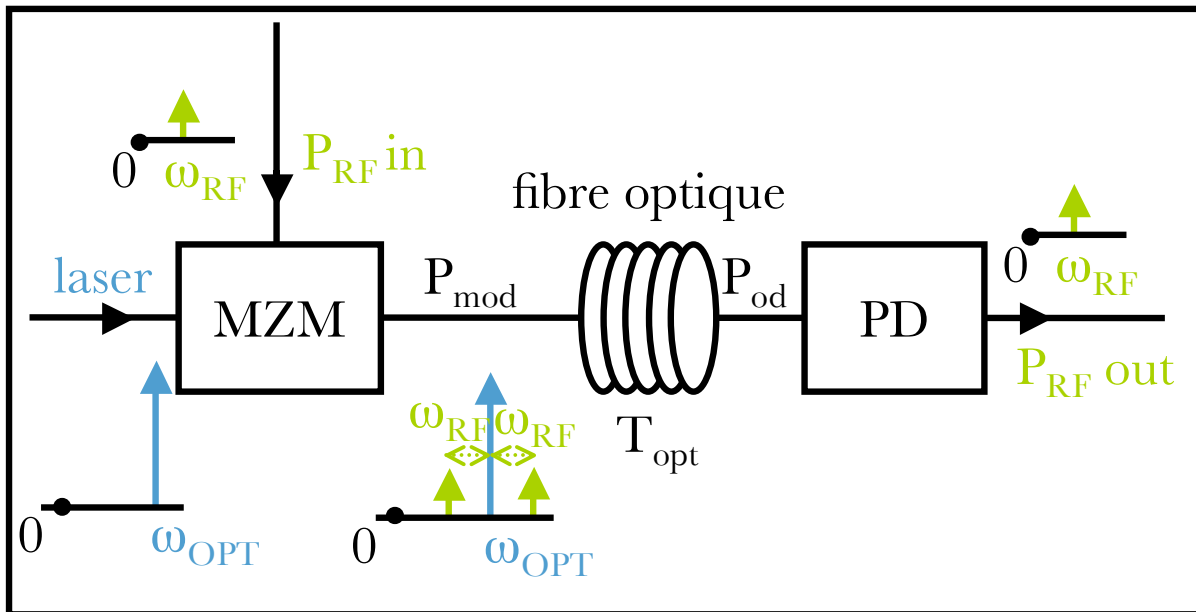
*intérêts d'une liaison micro-onde  
analogique sur fibre optique*

- légèreté, compacité
- faibles pertes optiques
- faible dispersion
- pas d'interférence électromagnétique
- bénéficie des progrès matériels des télécommunications numériques

*applications*

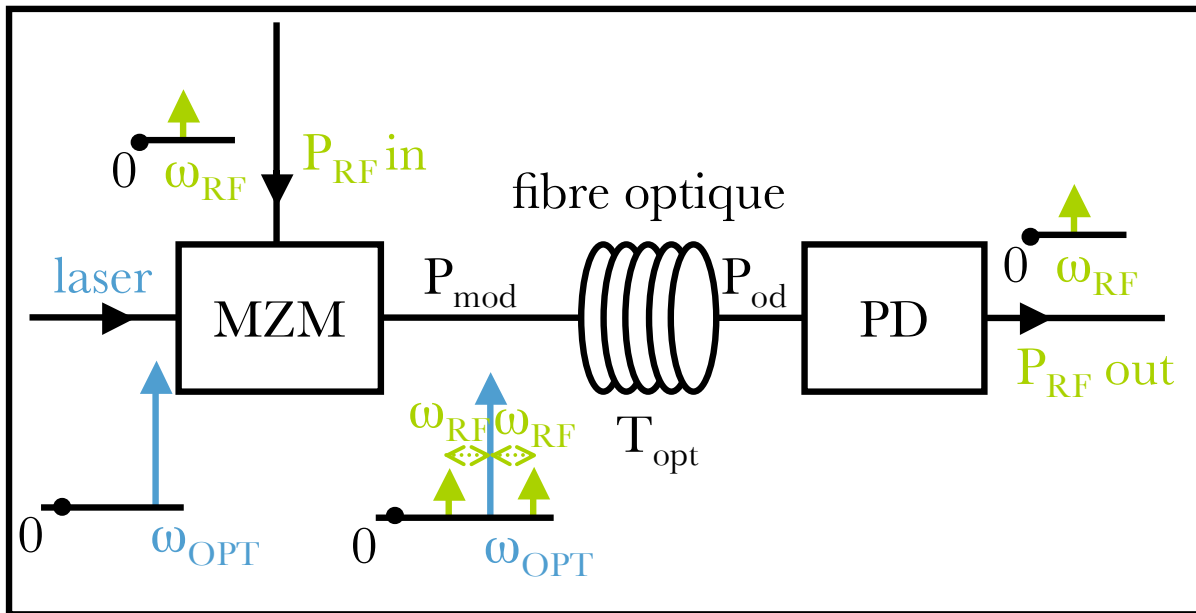
- distribution de signaux à des antennes lointaines
- antennes réseaux actives
- acheminement de signaux à bord de bateaux, d'avions

# introduction à l'optique hyperfréquence



une ligne analogique modulée sur fibre  
optique pour la transmission hyperfréquence

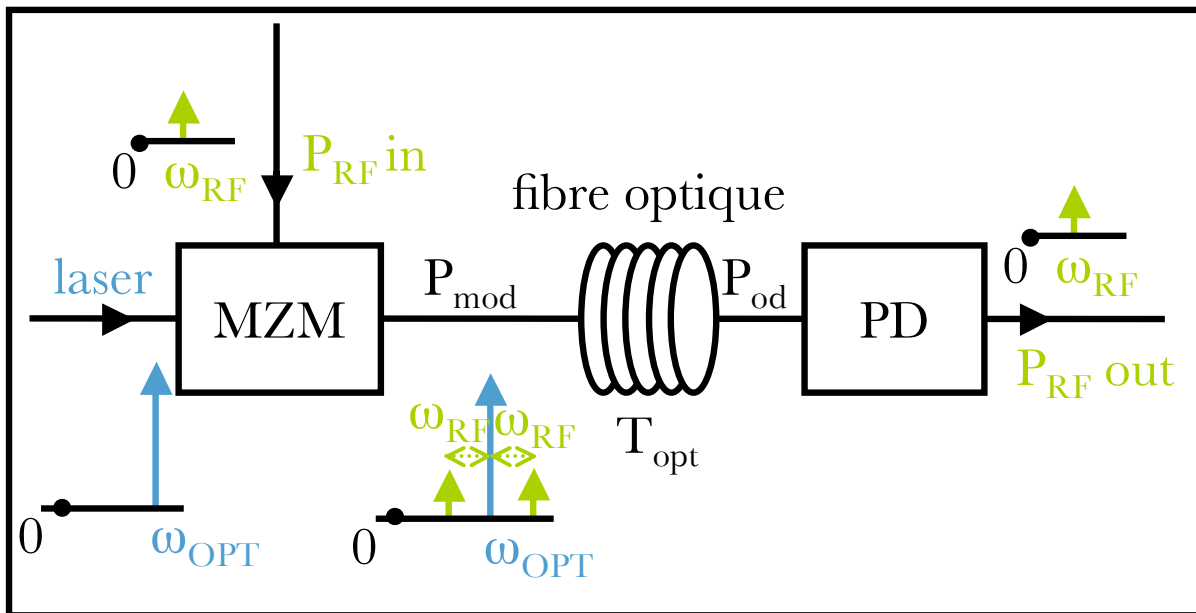
# introduction à l'optique hyperfréquence



une ligne analogique modulée sur fibre  
optique pour la transmission hyperfréquence

$$G = \frac{P_{RF,out}}{P_{RF,in}} = \underbrace{\frac{P_{mod}^2}{P_{RF,in}}}_{\text{conversion electro-optique}} \cdot T_{opt}^2 \cdot \underbrace{\frac{P_{RF,out}}{P_{od}^2}}_{\text{conversion opto-electronique}}$$

# introduction à l'optique hyperfréquence



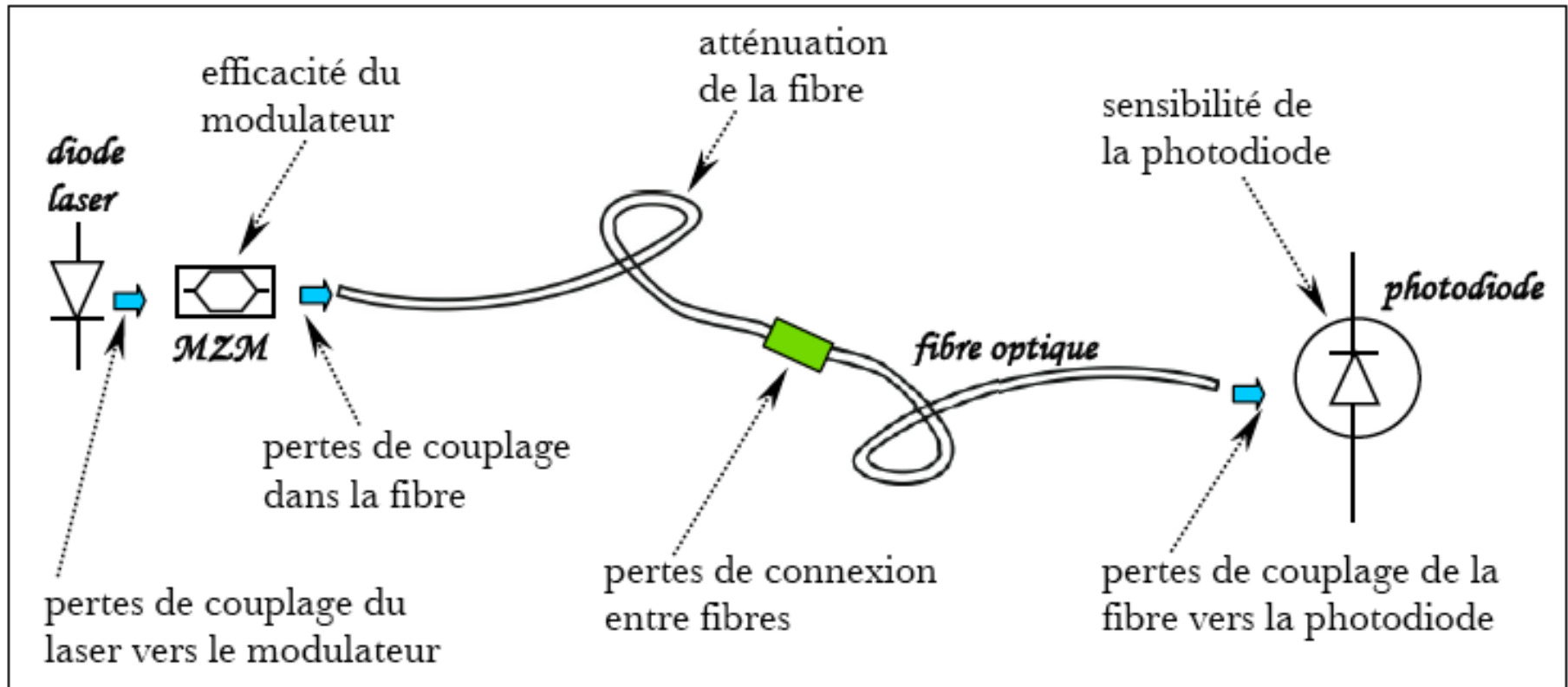
une ligne analogique modulée sur fibre  
optique pour la transmission hyperfréquence

$$G = \frac{P_{RF, out}}{P_{RF, in}} = \underbrace{\frac{P_{mod}^2}{P_{RF, in}}}_{\text{conversion electro-optique}} \cdot T_{opt}^2 \cdot \underbrace{\frac{P_{RF, out}}{P_{od}^2}}_{\text{conversion opto-electronique}}$$

## 2 possibilités pour moduler la porteuse optique

1. la modulation directe:
  - ⊕ un seul dispositif comme source et modulateur (DFB, FP).
  - ⊖ bruit, puissance.
2. la modulation externe:
  - ⊕ ↗  $P_{laser}$  implique ↗  $G$
  - ⊖ complexe, coûteux.

# introduction à l'optique hyperfréquence



origines des pertes de la ligne

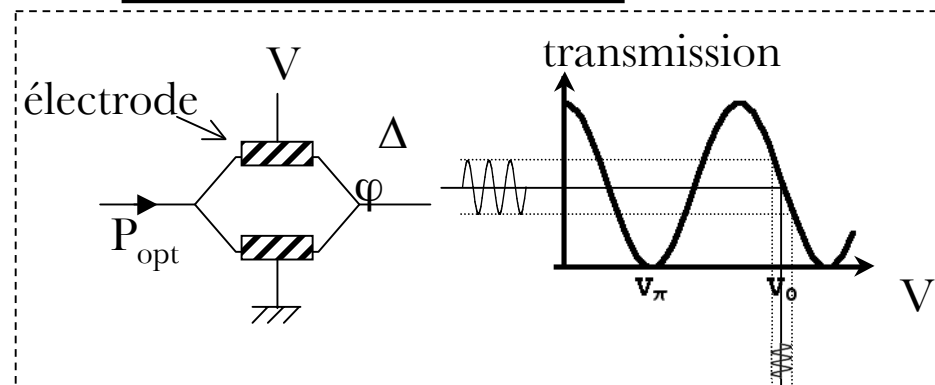


# introduction à l'optique hyperfréquence

*problème:* faibles puissances

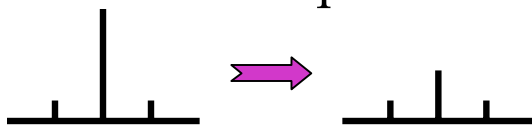
*raisons:*

- modulation externe



*MZM, principe d'opération*

- traitement optique du signal  
atténuation de porteuse



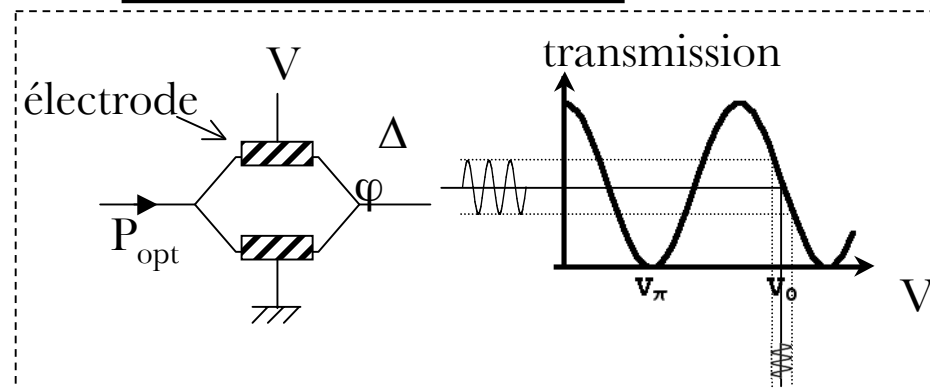
comment amplifier?

# introduction à l'optique hyperfréquence

*problème:* faibles puissances

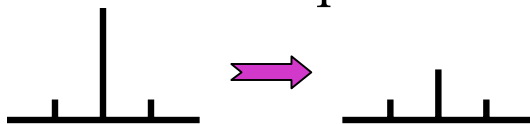
*raisons:*

- modulation externe



*MZM, principe d'opération*

- traitement optique du signal  
atténuation de porteuse



→ comment amplifier?

*solutions:* 1- EDFAs.

☹ ASE, largeur de bande

2- SOAs

☹ ASE, processus nonlinéaires

3- amplificateurs Raman

😊 large bande passante

**Q:** l'amplificateur Raman a-t-il *de meilleures caractéristiques de bruit* que les EDFAs?

# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle

2. le bruit

- i. émission spontanée amplifiée
- ii. transfert du bruit de la pompe

3. mesures expérimentales de gain et d'ASE

4. réduction du bruit

- i. modèle classique
- ii. modèle quantique

conclusion et perspectives

## diffusion Raman stimulée

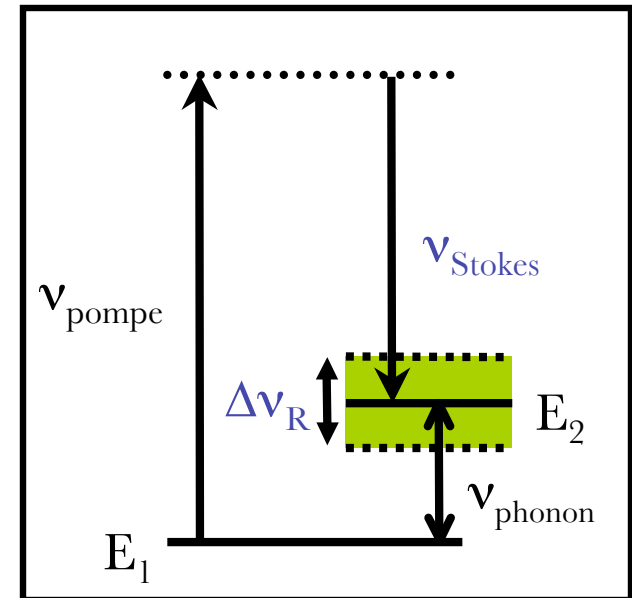
- *diffusion inélastique* de la lumière par les phonons optiques
- le *milieu*, détermine  $\nu_{\text{Stokes}}$  et  $\Delta\nu_{\text{R}}$ .
- *spontané* et peut être *stimulé*

⇒ amplification Raman stimulée

- milieu Raman:  *fibre monomode*
- équations de propagation:

$$\begin{cases} \frac{dN_P}{dz} = -kN_P(N_S + 1) - \alpha_P N_P \\ \frac{dN_S}{dz} = \pm kN_P(N_S + 1) \mp \alpha_S N_S \end{cases}$$

- principale source de bruit:  
*Émission Spontanée Amplifiée (ASE)*



# diffusion Raman stimulée

- *diffusion inélastique* de la lumière par les phonons optiques
- le *milieu*, détermine  $\nu_{\text{Stokes}}$  et  $\Delta\nu_{\text{R}}$ .
- *spontané* et peut être *stimulé*

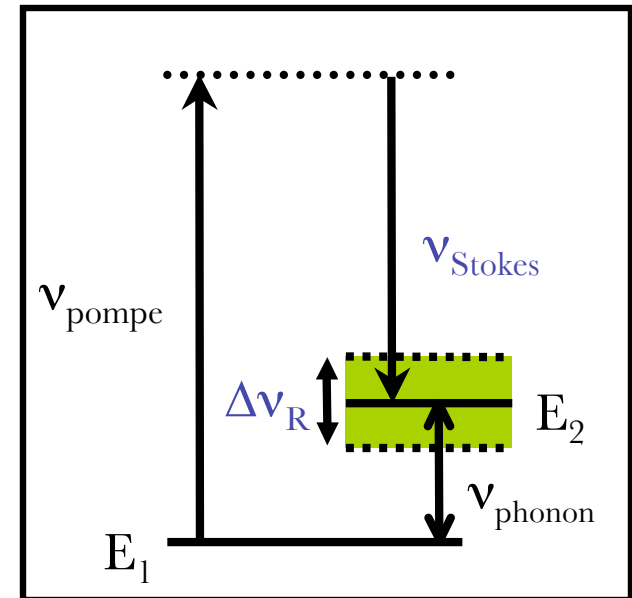
⇒ amplification Raman stimulée

- milieu Raman: *fibre monomode*
- équations de propagation:

$$\begin{cases} \frac{dN_P}{dz} = -kN_P(N_S + 1) - \alpha_P N_P \\ \frac{dN_S}{dz} = \pm kN_P(N_S + 1) \mp \alpha_S N_S \end{cases}$$

- principale source de bruit:  
*Émission Spontanée Amplifiée (ASE)*

- quelques hypothèses:  $\rightarrow I_{\text{Pompe}} \gg I_{\text{Stokes}}$



# diffusion Raman stimulée

- *diffusion inélastique* de la lumière par les phonons optiques
- le *milieu*, détermine  $\nu_{\text{Stokes}}$  et  $\Delta\nu_{\text{R}}$ .
- *spontané* et peut être *stimulé*

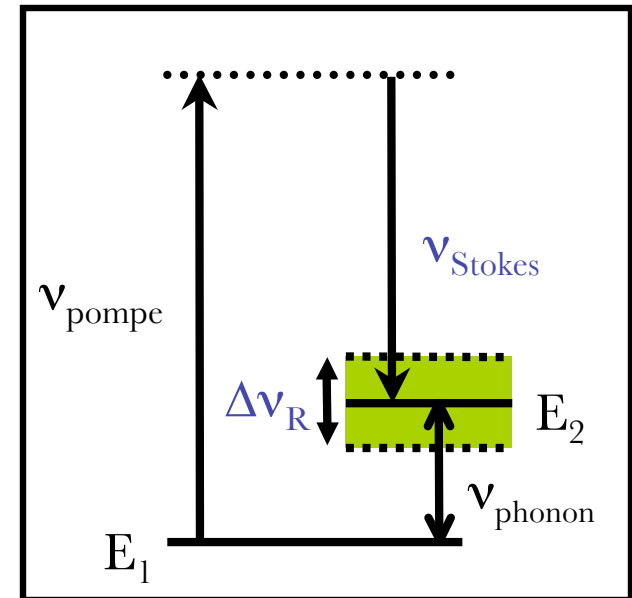
⇒ amplification Raman stimulée

- milieu Raman: *fibre monomode*
- équations de propagation:

$$\begin{cases} \frac{dN_P}{dz} = -kN_P(N_S + 1) - \alpha_P N_P \\ \frac{dN_S}{dz} = \pm kN_P(N_S + 1) \mp \alpha_S N_S \end{cases}$$

- principale source de bruit:  
*Émission Spontanée Amplifiée (ASE)*

- quelques hypothèses:  $\rightarrow I_{\text{Pompe}} \gg I_{\text{Stokes}}$
- $\rightarrow I_{\text{Stokes}} \gg I_{\text{ASE}}$

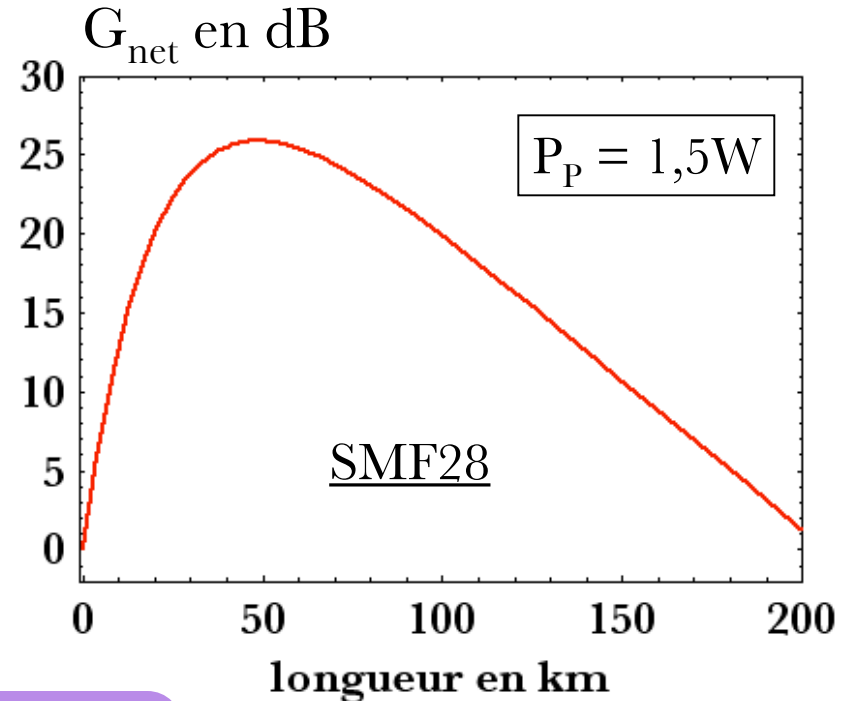


## diffusion Raman stimulée

$$\begin{cases} \frac{dN_P}{dz} = -kN_P(N_S + 1) - \alpha_P N_P \\ \frac{dN_S}{dz} = \pm kN_P(N_S + 1) \mp \alpha_S N_S \end{cases}$$

$$N_{P/out} = N_{P/in} \cdot e^{-\alpha_P L}$$

$$N_{S/out} = N_{S/in} \cdot e^{-\alpha_S L} \cdot \exp\left(k N_{P/in} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_P L}}{\alpha_P}\right)$$



G, gain net

# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle

2. le bruit

i. émission spontanée amplifiée

ii. transfert du bruit de la pompe

3. mesures expérimentales de gain et d'ASE

4. réduction du bruit

i. modèle classique

ii. modèle quantique

conclusion et perspectives



# le bruit en amplification Raman, l'ASE

en co-propageant,

$$\begin{cases} \frac{dN_P}{dz} = -kN_P(N_S + 1) - \alpha_P N_P \\ \frac{dN_S}{dz} = +kN_P(N_S + 1) - \alpha_S N_S \end{cases}$$



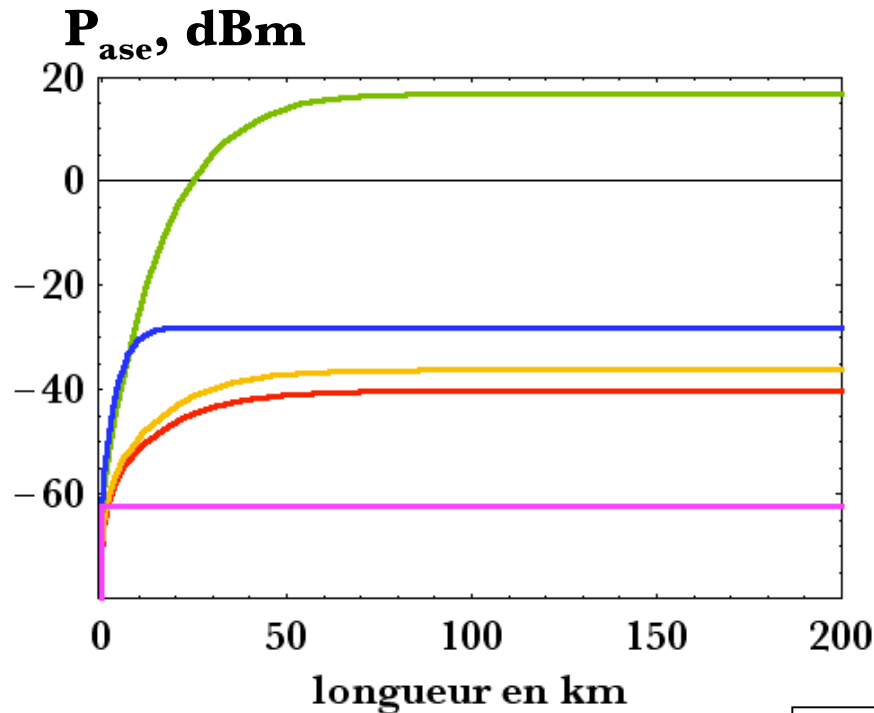
$$N_{ASE}(\nu, L) = \int_0^L k N_P(z) dz \cdot e^{-\alpha_S(L-z)} \cdot \exp\left(k N_{P_0} \cdot \frac{e^{-\alpha_P z} - e^{-\alpha_P L}}{\alpha_P}\right)$$

$$P_{ASE/out} = \int_{\Delta\nu_R} h\nu N_{ASE/out}(\nu) d\nu$$

# le bruit en amplification Raman, l'ASE

<i>fibre</i>	<i>pertes (dB.km<sup>-1</sup>)</i>	<i>aire effective (μm<sup>2</sup>)</i>	<i>fibre</i>	<i>pertes (dB.km<sup>-1</sup>)</i>	<i>aire effective (μm<sup>2</sup>)</i>
<b>SMF28</b>	0,19	80,0	DCF Lucent	0,49	20,1
<b>NZ-DSF Alcatel</b>	0,20	65	<b>HNLF Fitel-Photonics Lab.</b>	0,8	12,6
NZ-DSF Corning	0,25	55,4	HNLF-DSF Sumitomo	0,51	10,7
DSF Corning	0,25	51,2	<b>PCF</b>	40	2,9
<b>DFF</b>	0,225	20,8	PM-PCF	1,3	? <10

caractéristiques de quelques fibres @ 1550nm

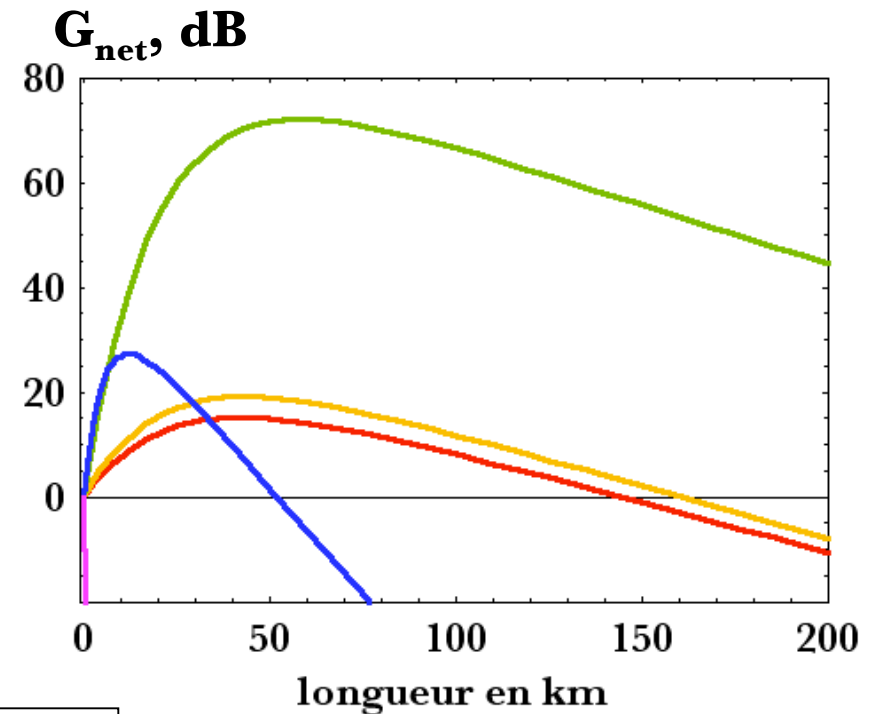
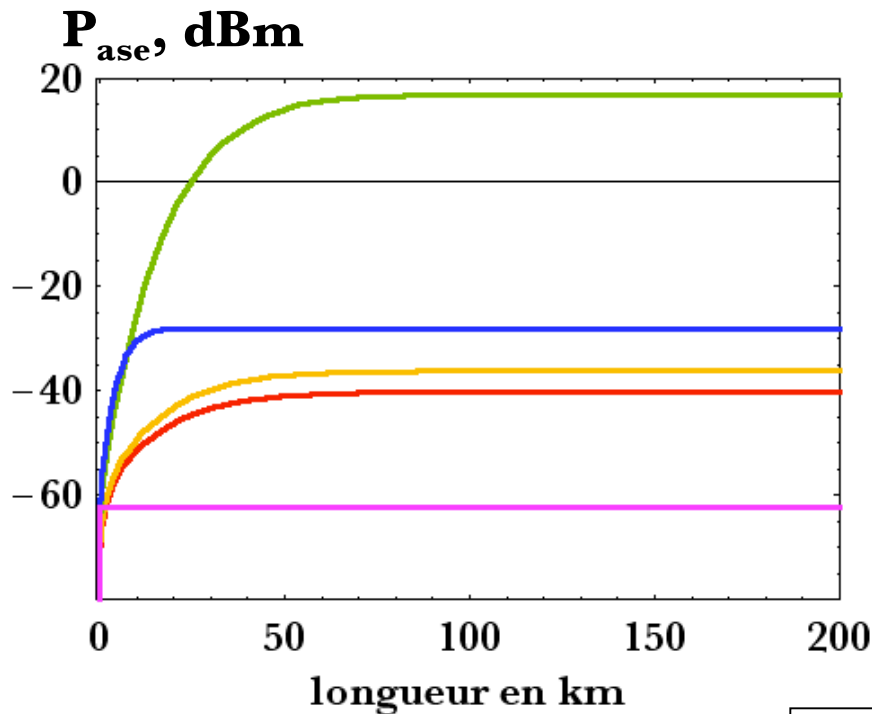


$$P_p = 1W$$

# le bruit en amplification Raman, l'ASE

<i>fibre</i>	<i>pertes (dB.km<sup>-1</sup>)</i>	<i>aire effective (μm<sup>2</sup>)</i>	<i>fibre</i>	<i>pertes (dB.km<sup>-1</sup>)</i>	<i>aire effective (μm<sup>2</sup>)</i>
<b>SMF28</b>	0,19	80,0	DCF Lucent	0,49	20,1
<b>NZ-DSF Alcatel</b>	0,20	65	<b>HNLF Fitel-Photonics Lab.</b>	0,8	12,6
NZ-DSF Corning	0,25	55,4	HNLF-DSF Sumitomo	0,51	10,7
DSF Corning	0,25	51,2	<b>PCF</b>	40	2,9
<b>DFF</b>	0,225	20,8	PM-PCF	1,3	? <10

caractéristiques de  
quelques fibres  
@ 1550nm



$$P_p = 1W$$

# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle

2. le bruit

i. émission spontanée amplifiée

ii. transfert du bruit de la pompe

3. mesures expérimentales de gain et d'ASE

4. réduction du bruit

i. modèle classique

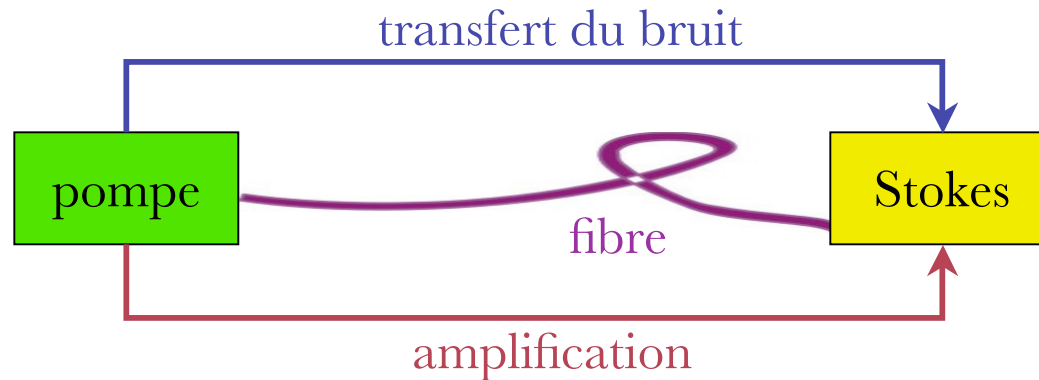
ii. modèle quantique

conclusion et perspectives

# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN



# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN



$$RIN(z, \nu) = \frac{\Delta \nu * W(z, \nu)}{\pi \langle P(z, t) \rangle^2}$$

$\Delta \nu$  : largeur spectrale de la mesure

$W(z, \nu)$  : densité spectrale de puissance

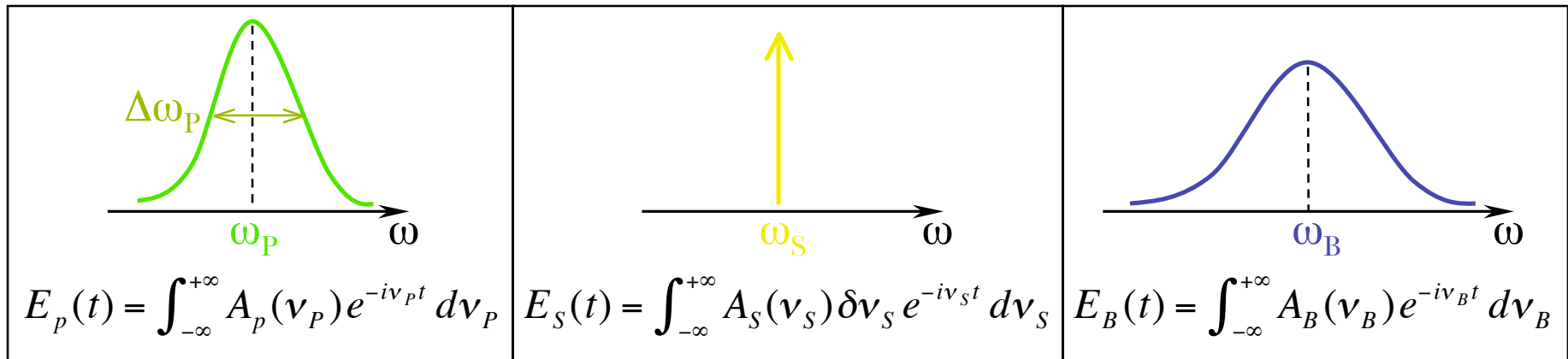
$\langle P(z, t) \rangle$  : puissance moyenne

$$\rho = \frac{RIN_S(z, \nu)}{RIN_P(z, \nu)}$$

# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

## principe du calcul

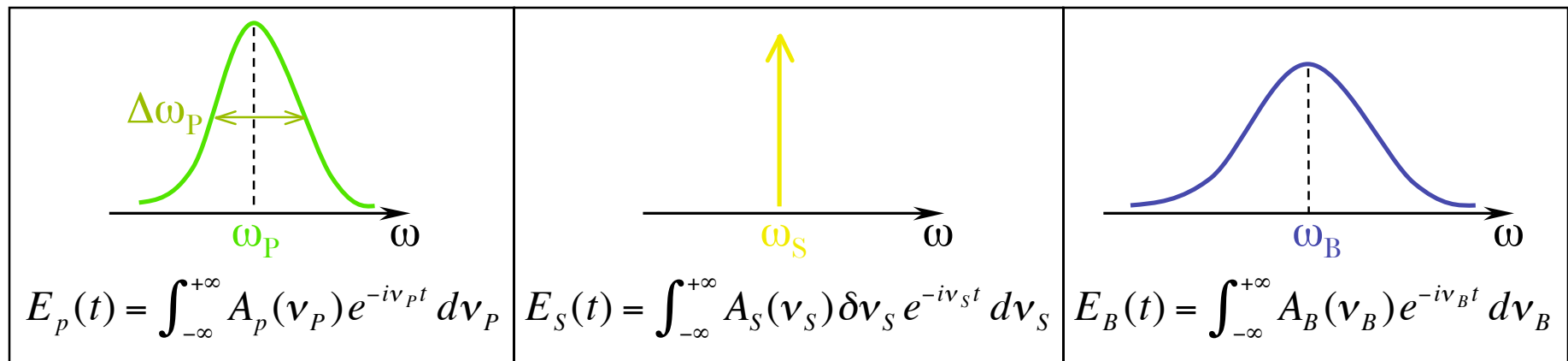
### » définition des ondes



# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

## principe du calcul

### » définition des ondes



→  $j_P(\nu)$ , la TF de  $|E_P(t)|^2$

$|j_P(0)|^2 \propto$  intensité moyenne

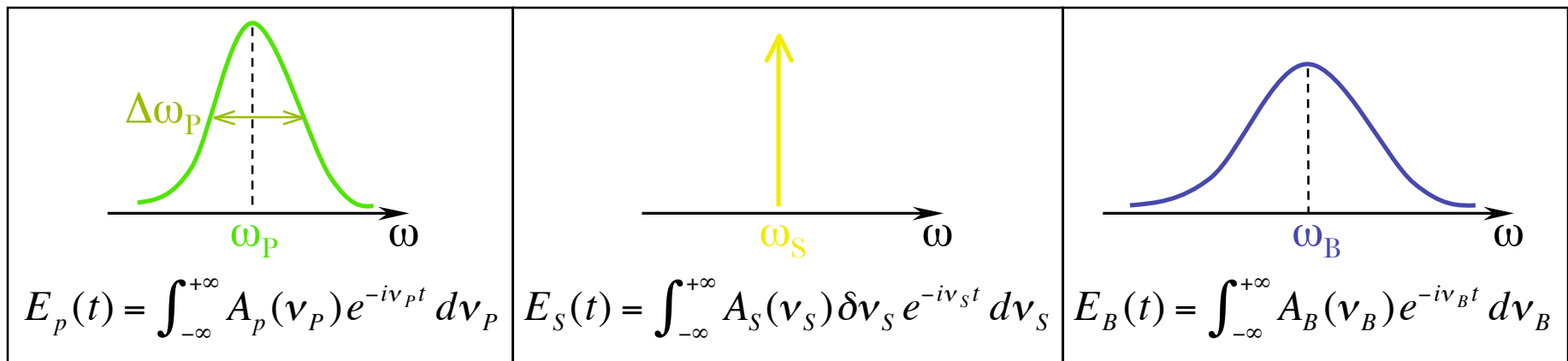
$|j_P(\nu)|^2 \propto$  bruit d'intensité



# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

## principe du calcul

### » définition des ondes



→  $j_P(\nu)$ , la TF de  $|E_P(t)|^2$

$|j_P(0)|^2 \propto$  intensité moyenne

$|j_P(\nu)|^2 \propto$  bruit d'intensité

si  $\Delta\omega_P \ll \Delta\omega_R$

on montre que  $G_R \propto \langle |E_P(t)|^2 \rangle$

# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

» équation de propagation du bruit

$$\frac{da_b(z, \nu_S)}{dz} = \pm i \frac{4\pi^2}{n\lambda} \chi_{eff}^{(3)}(\omega_P, -\omega_P, \omega_S) A_S(z) j'_P(z, \nu_S) \exp[i\Delta k_{\pm}^{(1)} z] \pm \frac{(2\pi)^{\frac{3}{2}}}{n\lambda} \chi_{eff}^{(3)}(\omega_P, -\omega_P, \omega_S) \int_{-\infty}^{+\infty} d\nu'_S j'_P(z, \nu_S - \nu'_S) a_b(z, \nu'_S) \exp[i\Delta k_{\pm}^{(2)} z] \mp \frac{\alpha_S}{2} a_b(z, \nu_S)$$

FWM pompe/signal

amplification Raman du bruit

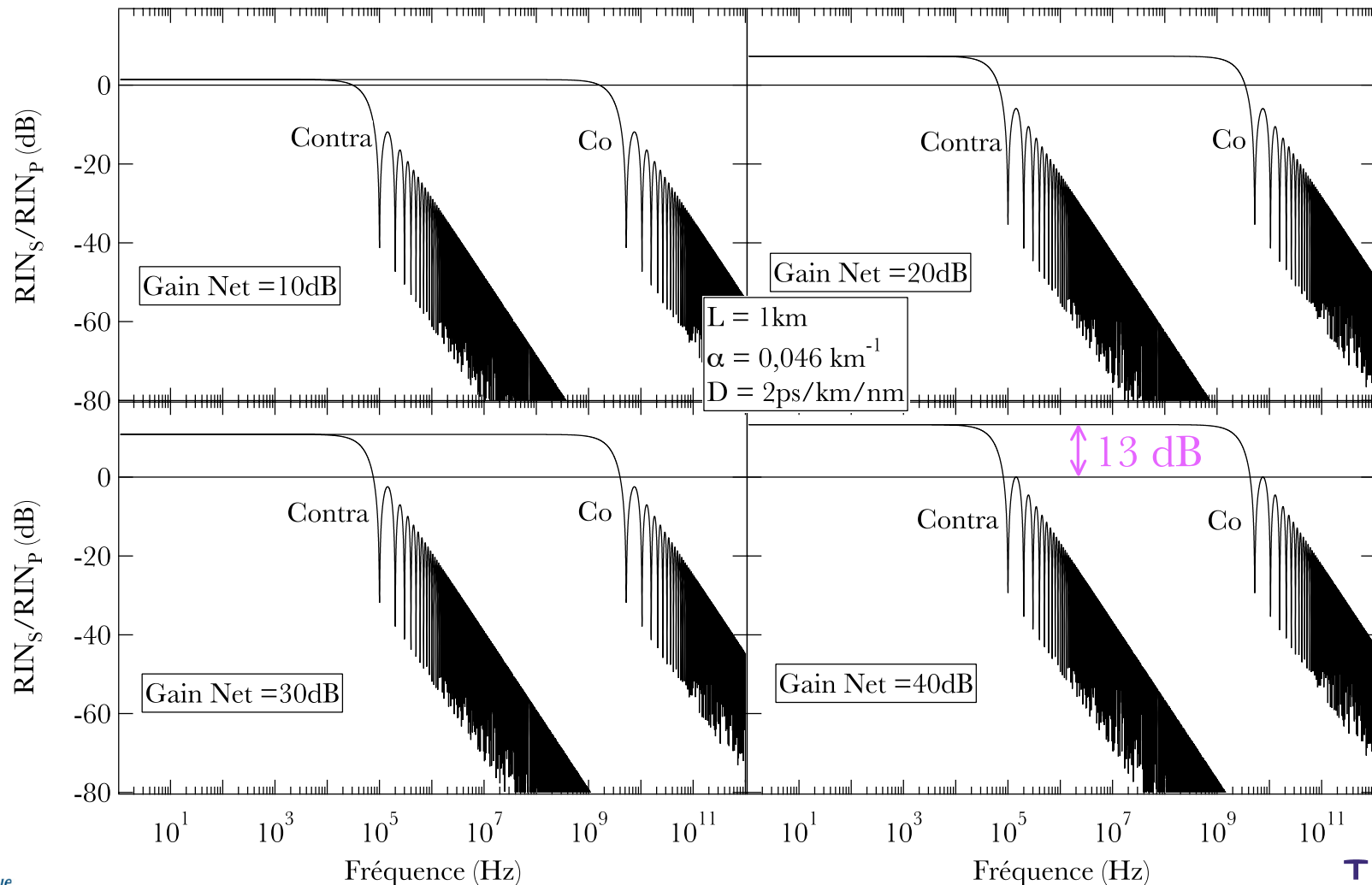
pertes de propagation

désaccords :  $\Delta k_{\pm}^{(1)} = \left( \frac{1}{v_P} \mp \frac{1}{v_S} \right) \nu_S$  et  $\Delta k_{\pm}^{(2)} = \left( \frac{1}{v_P} \mp \frac{1}{v_S} \right) (\nu_S - \nu'_S)$

$v_x$ , vitesses de groupe

# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

pompe monochromatique modulée en amplitude,  $E_p(0,t) = A_p(0) \left[ 1 + \frac{m}{2} \sin(\Omega t + \Phi) \right]$



# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

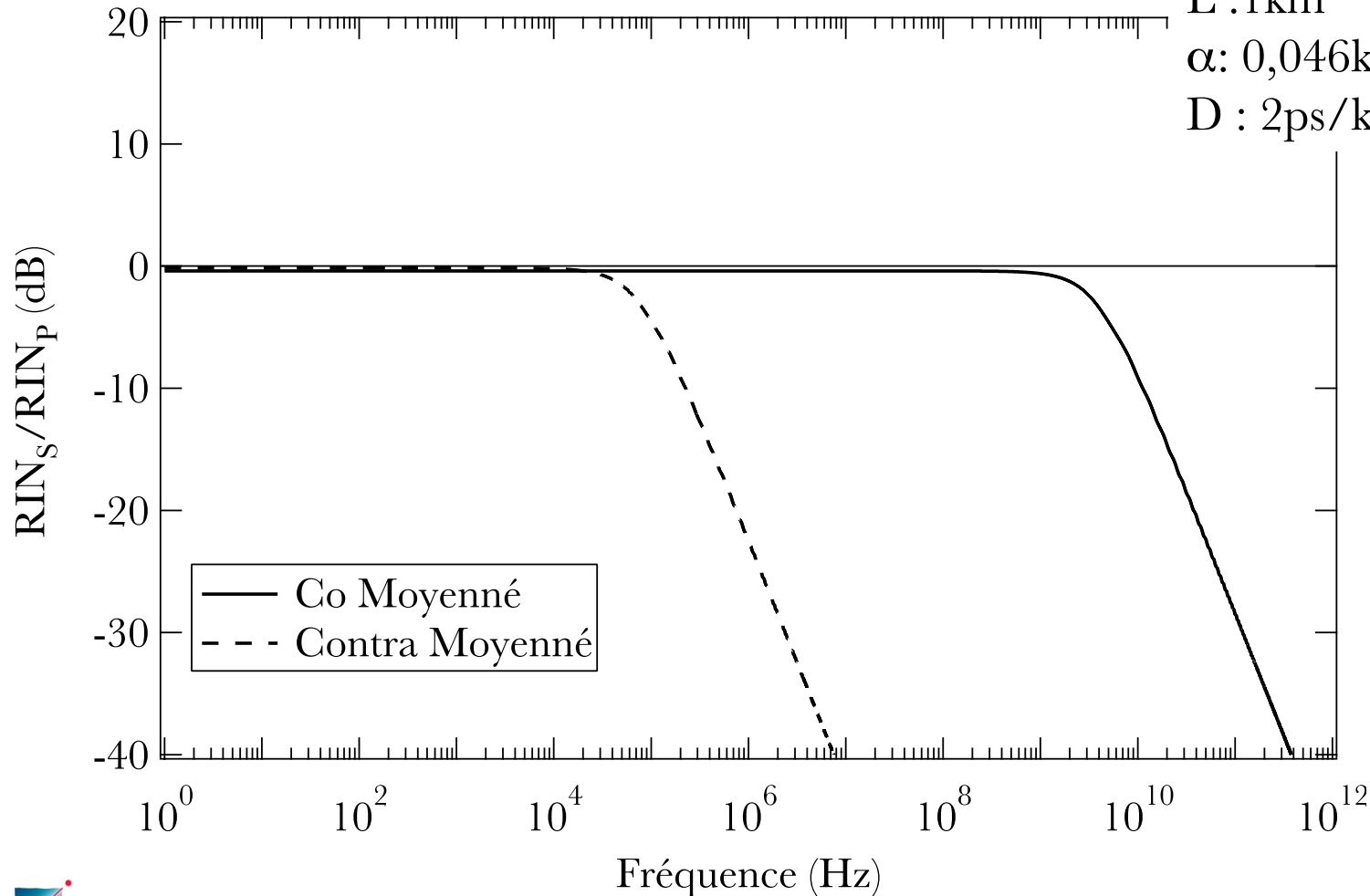
pompe à spectre large

amplification nette : 40dB

L : 1km

$\alpha$  : 0,046km<sup>-1</sup>

D : 2ps/km/nm



# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

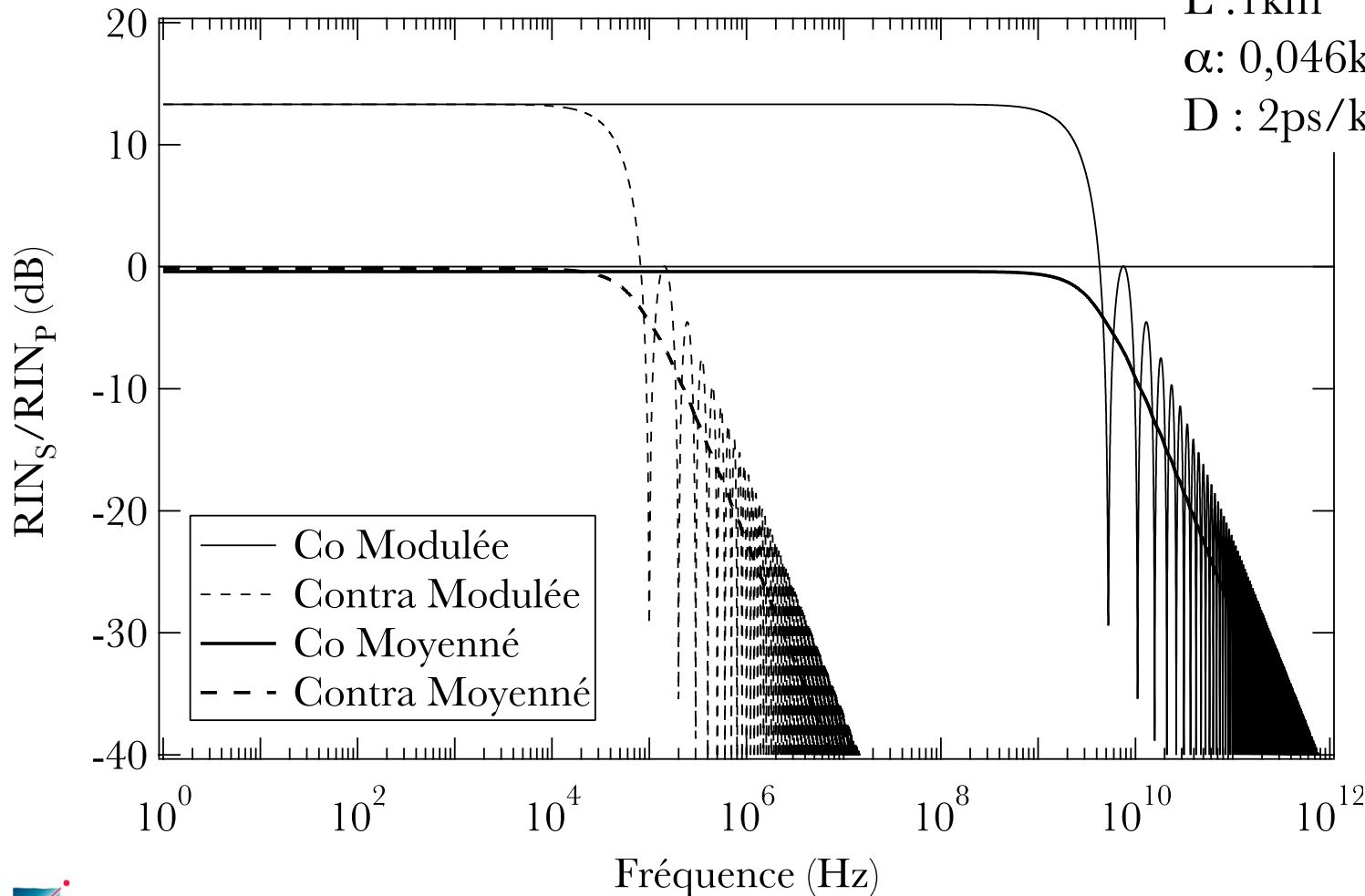
pompe à spectre large

amplification nette : 40dB

L : 1km

$\alpha$  : 0,046km<sup>-1</sup>

D : 2ps/km/nm



# le bruit en amplification Raman, transfert de RIN

En bref,

- ✓ configuration contra-propageante favorable
- ✓ transfert constant pour les basses fréquences ( $< 100$  kHz)
- ✓ décroissance quadratique du transfert à hautes fréquences
- ✓ pompe modulée: excès de bruit basses fréquence  $\propto$  gain net
- ✓ pompe spectre large: pas d'excès de bruit BF

# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle

2. le bruit

i. émission spontanée amplifiée

ii. transfert du bruit de la pompe

3. mesures expérimentales de gain et d'ASE

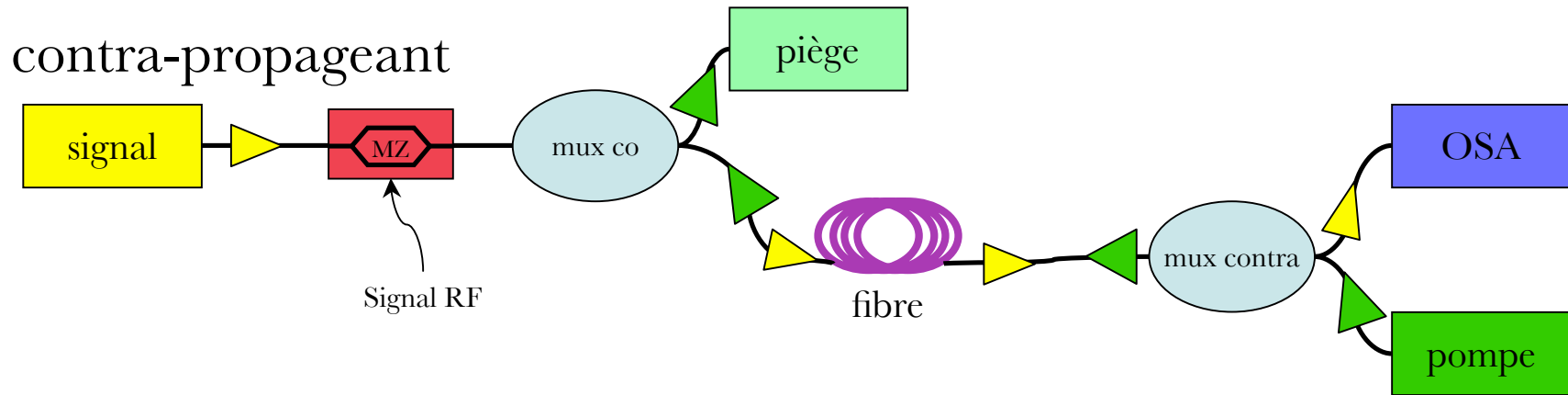
4. réduction du bruit

i. modèle classique

ii. modèle quantique

conclusion et perspectives

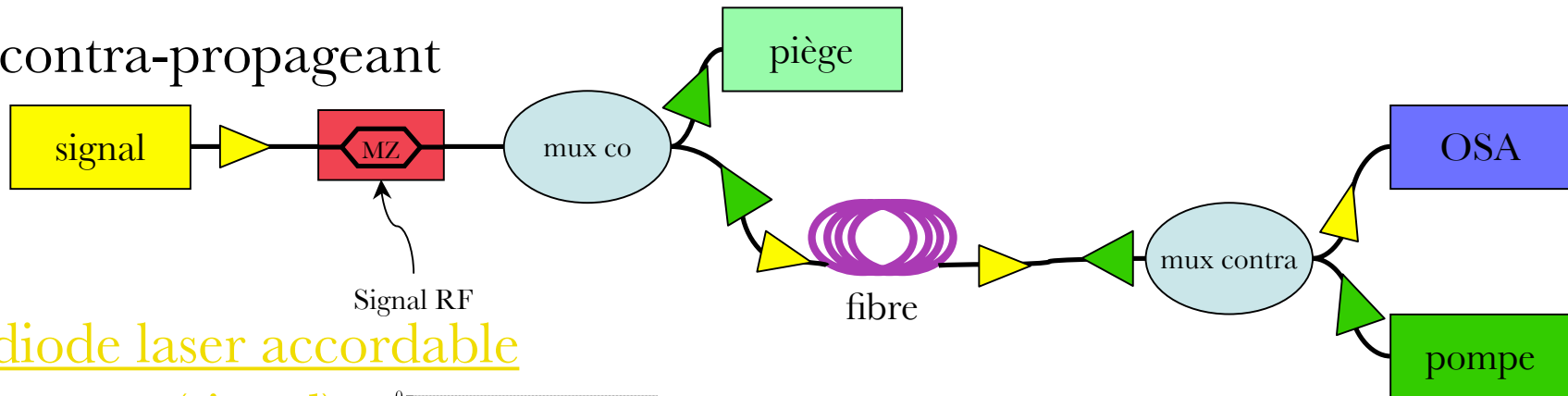
## mesures expérimentales, montage





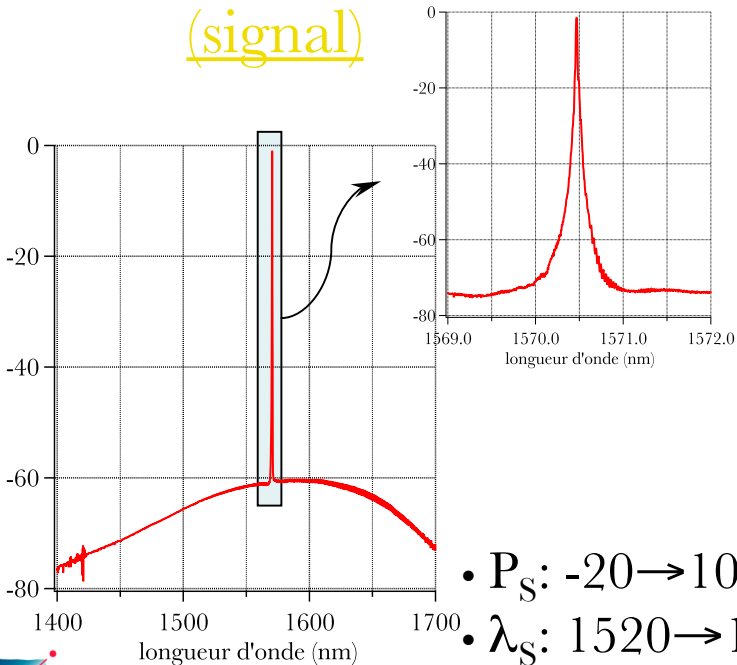
# mesures expérimentales, montage

contra-propageant



diode laser accordable

(signal)

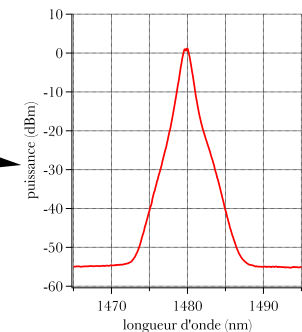
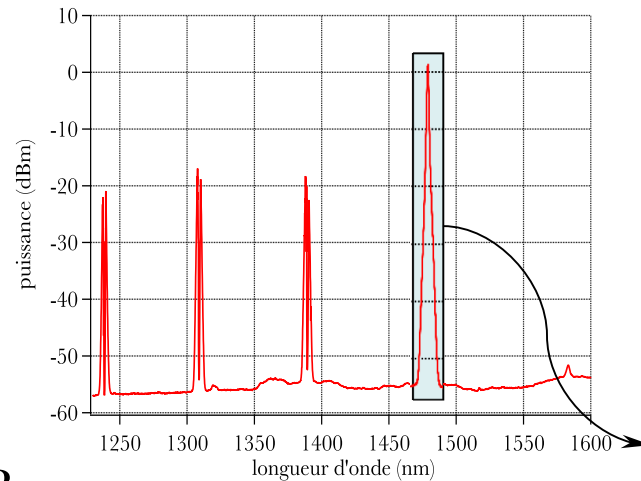


- $P_S$ : -20 → 10 dBm
- $\lambda_S$ : 1520 → 1620 nm
- FWHM < 1 MHz

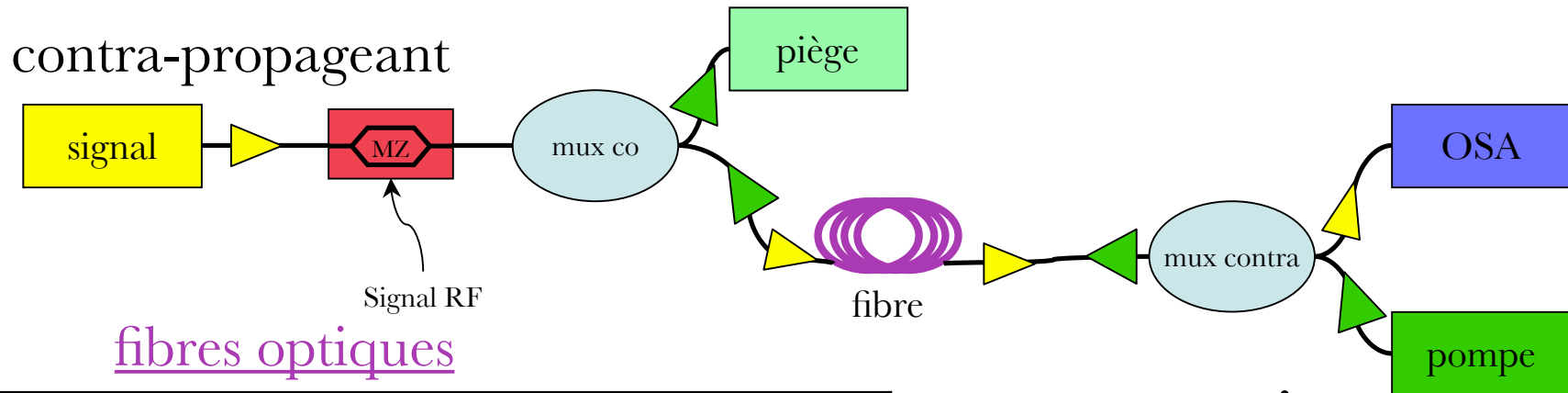
laser Raman Keopsys

(pompe)

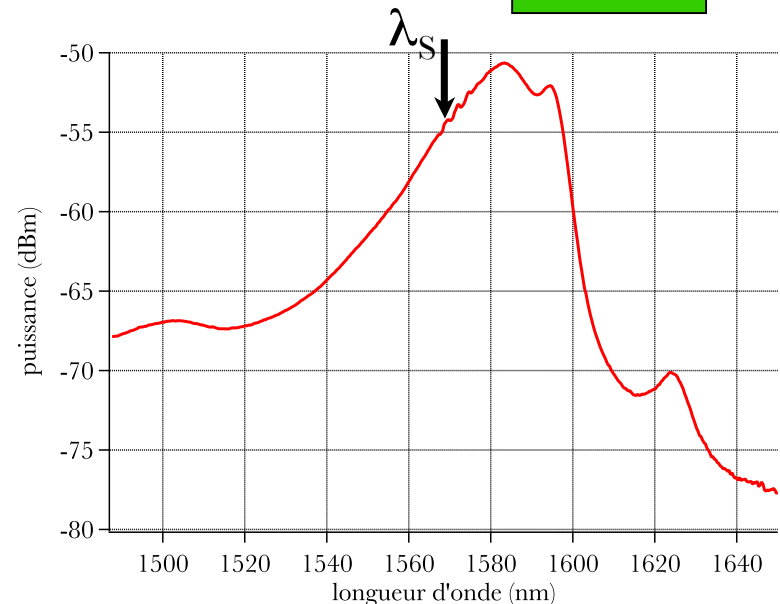
- $P_p$  max: 2 W
- $\lambda_p$ : 1481 nm
- FWHM: 1 nm



## mesures expérimentales, montage



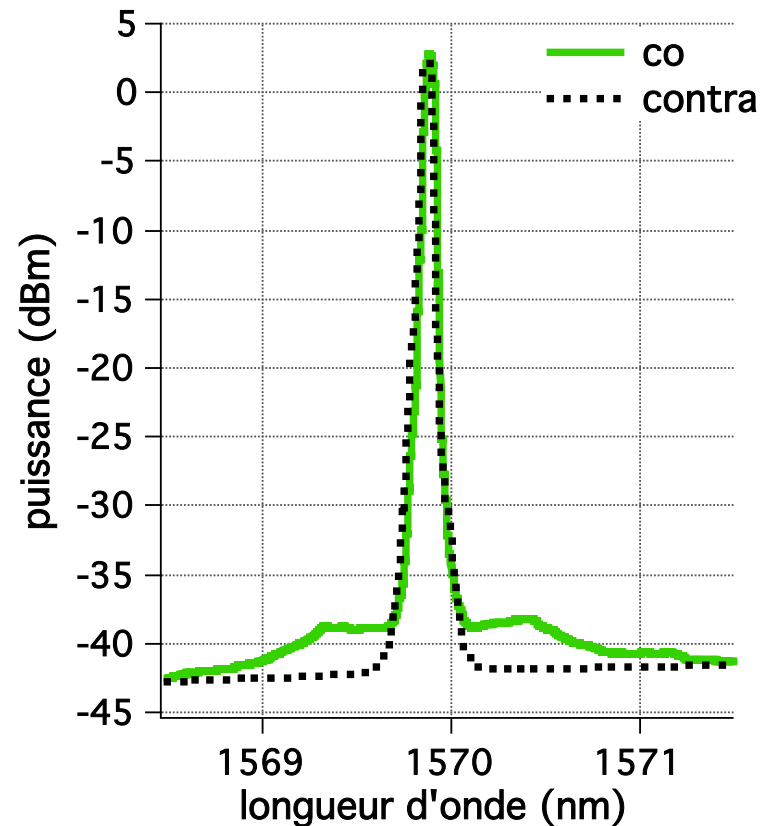
@1,55 $\mu\text{m}$	SMF28	NZ-DSF
$A_{\text{eff}}$	80 $\mu\text{m}^2$	65 $\mu\text{m}^2$
D	17ps/(nm.km)	8ps/(nm.km)
S	0,09ps/(nm <sup>2</sup> .km)	0,06ps/(nm <sup>2</sup> .km)
$\alpha$	0,2dB/km	



- L = 20 km SMF
- $P_{P0} = 1500$  mW
- $g_R$  max:  $1,3 \cdot 10^{-13}$  m/W
- FWHM: 20 nm

## mesures expérimentales, résultats co/contra

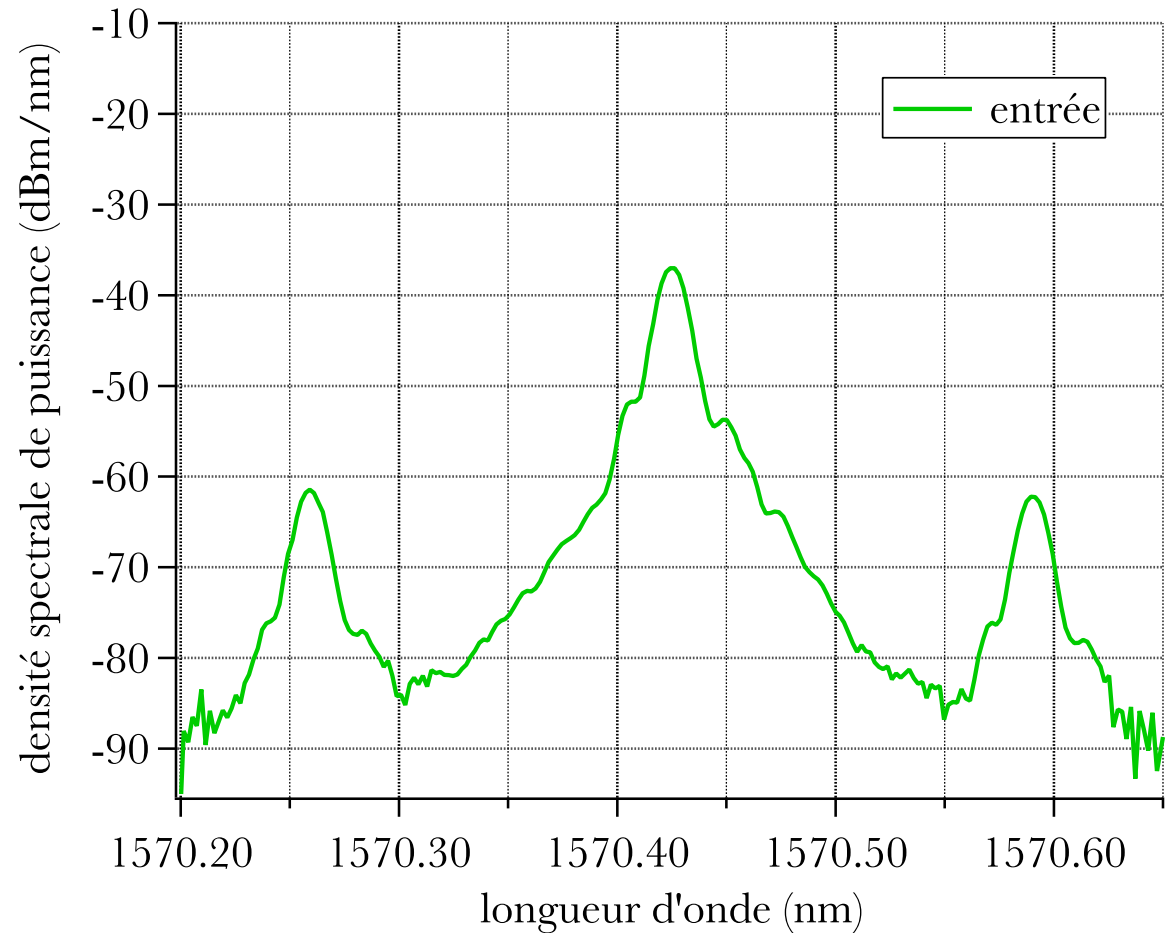
- ❖  $L = 22,5$  km SMF
- ❖  $P_P = 1700$  mW
- ❖  $P_{S\text{in}} = -20$  dBm
- ❖  $G = 24,5$  dB (net)



avantage au contra-propageant

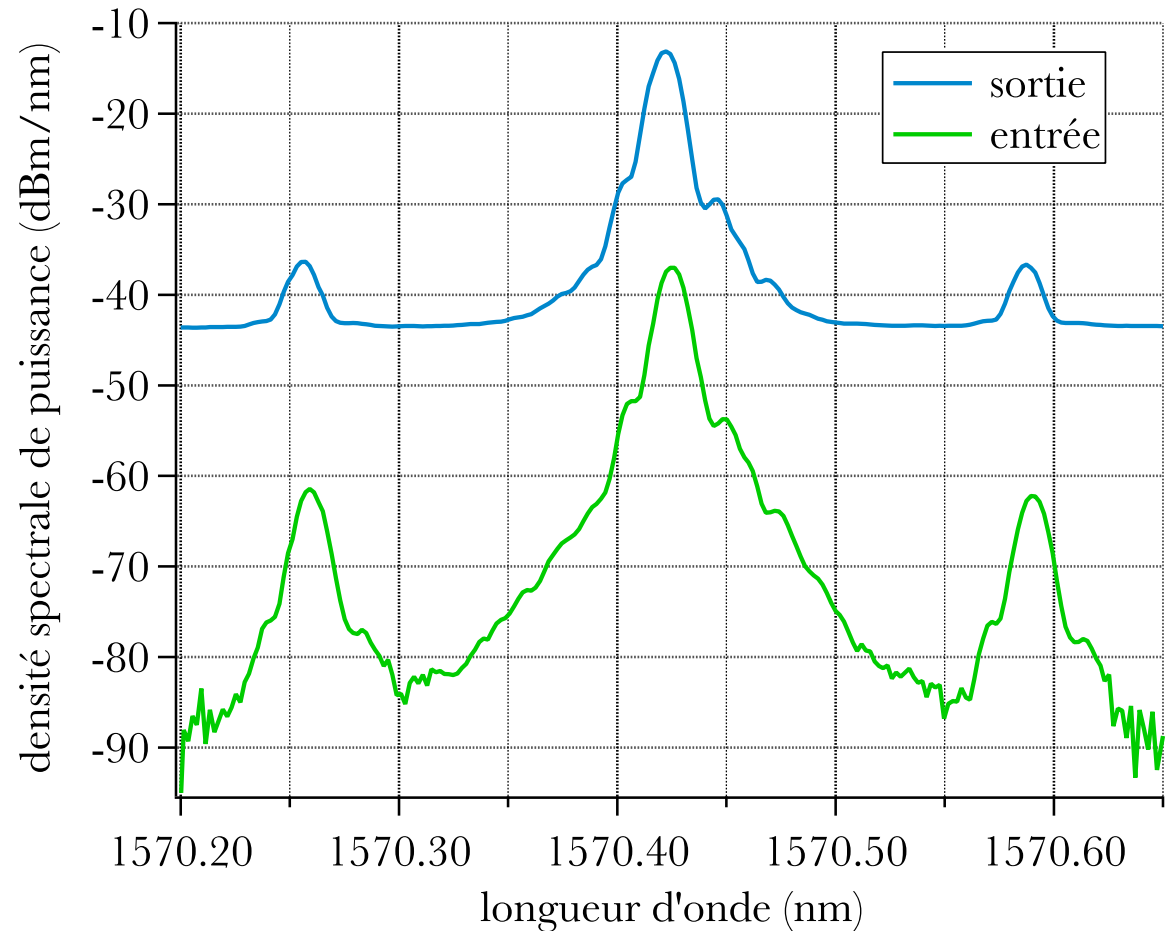
## mesures expérimentales, influence de la modulation RF

- ❖  $P_{S\text{in}} = -20 \text{ dBm}$
- ❖ fréq. mod 20 GHz
- ❖ ampl. mod 10 dBm



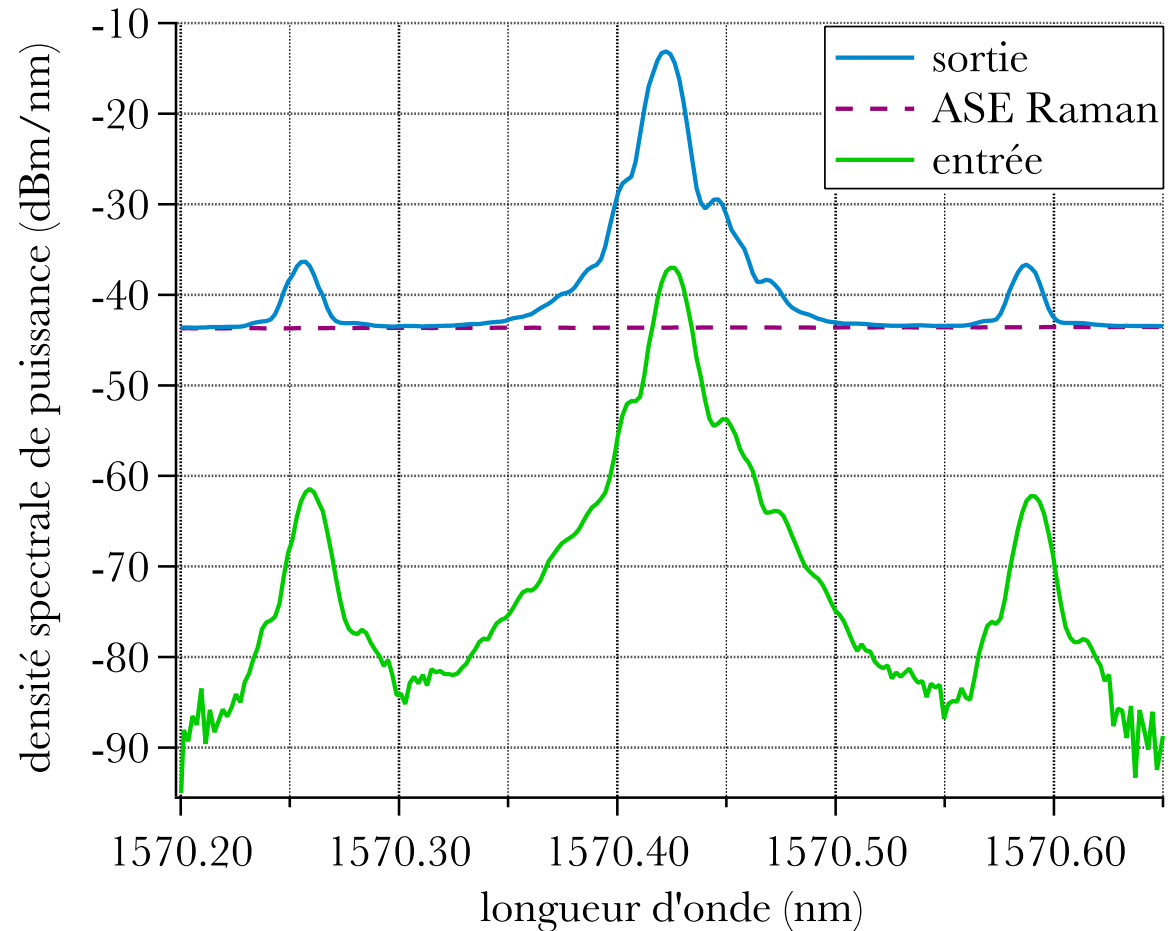
## mesures expérimentales, influence de la modulation RF

- ❖  $P_{S\text{in}} = -20 \text{ dBm}$
- ❖ fréq. mod 20 GHz
- ❖ ampl. mod 10 dBm
- ❖  $P_p = 1600 \text{ mW}$
- ❖  $L = 22,5 \text{ km SMF}$
- ❖  $G = 21 \text{ dB (net)}$



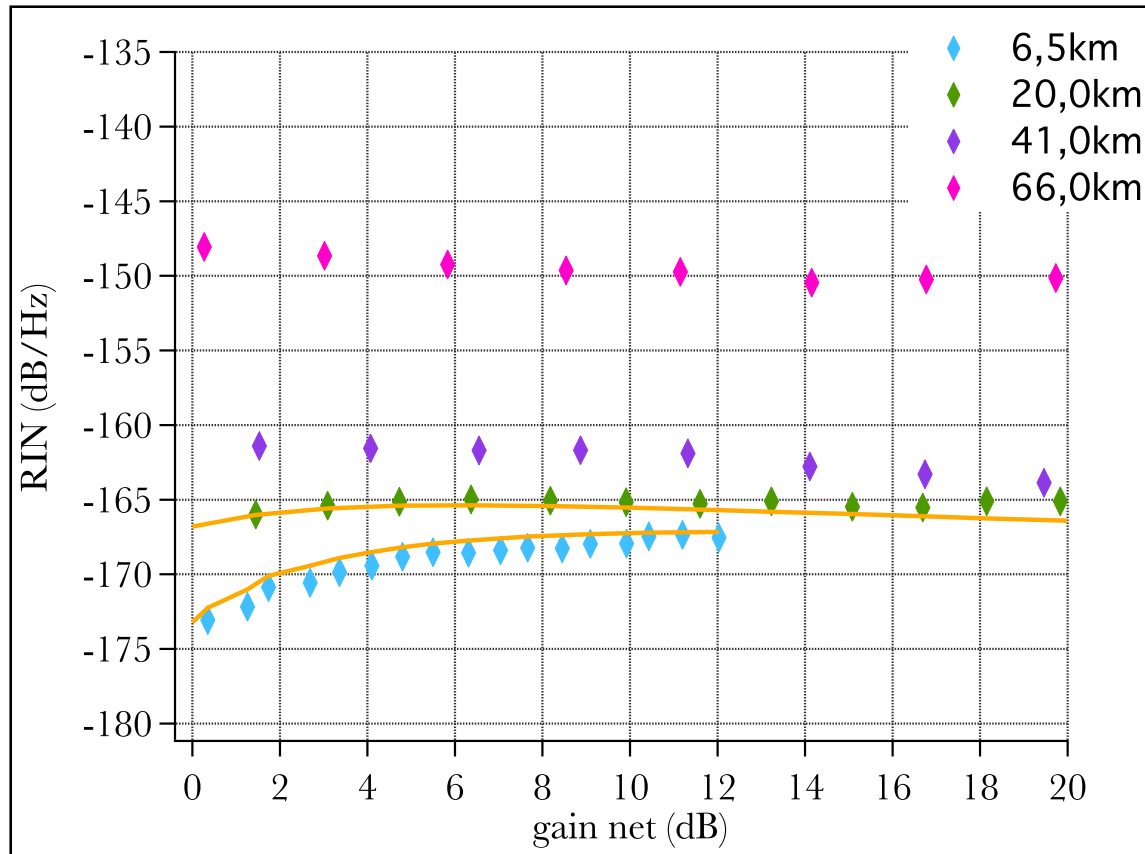
## mesures expérimentales, influence de la modulation RF

- ❖  $P_{S,in} = -20$  dBm
- ❖ fréq. mod 20 GHz
- ❖ ampl. mod 10 dBm
- ❖  $P_p = 1600$  mW
- ❖  $L = 22,5$  km SMF
- ❖  $G = 21$  dB (net)



optiquement, pas de dégradation du signal RF

## mesures expérimentales, RIN

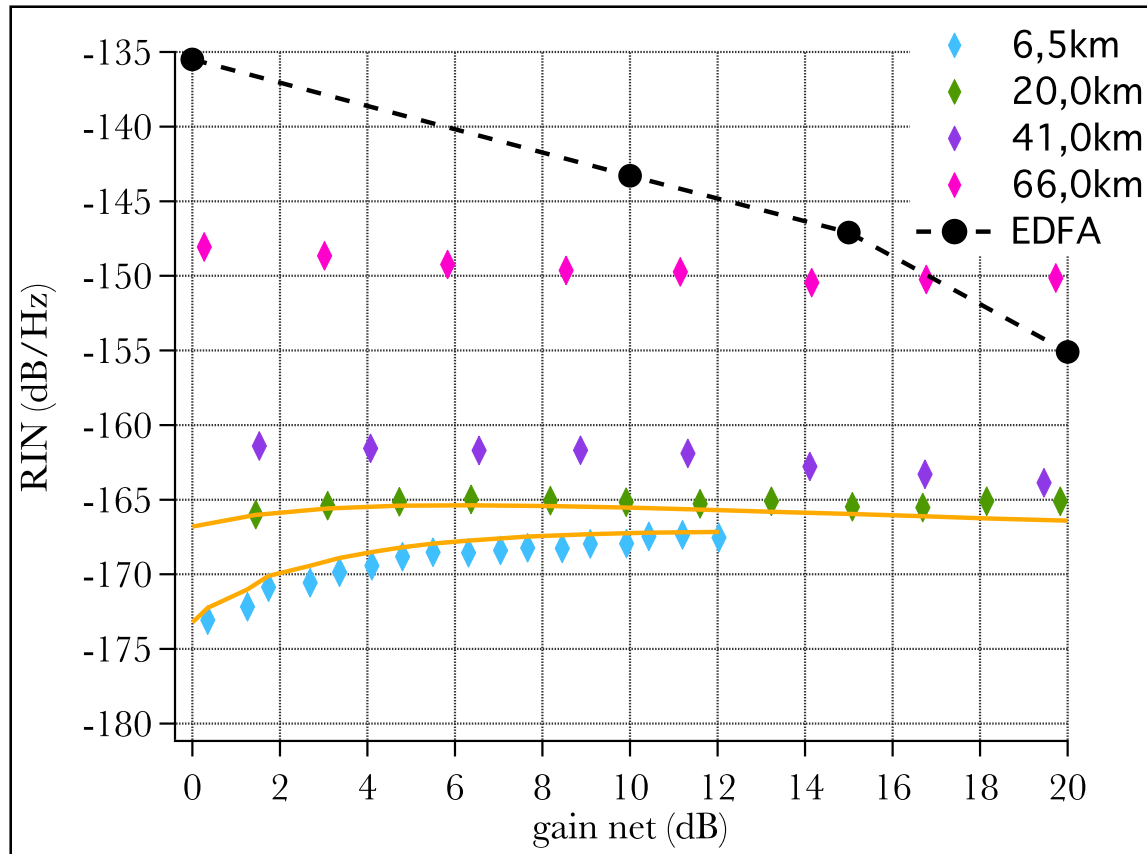
Comparaison de RIN

$P_S$  in: -20 dBm

$$OSNR_{out} = \frac{P_{S,out}}{P_{ASE}}$$

$$RIN = \frac{1}{(OSNR)^2} \cdot \frac{1}{BP \text{ (en Hz)}}$$

## mesures expérimentales, l'EDFA



### Comparaison de RIN

$P_S$  in: -20 dBm

$$OSNR_{out} = \frac{P_{S,out}}{P_{ASE}}$$

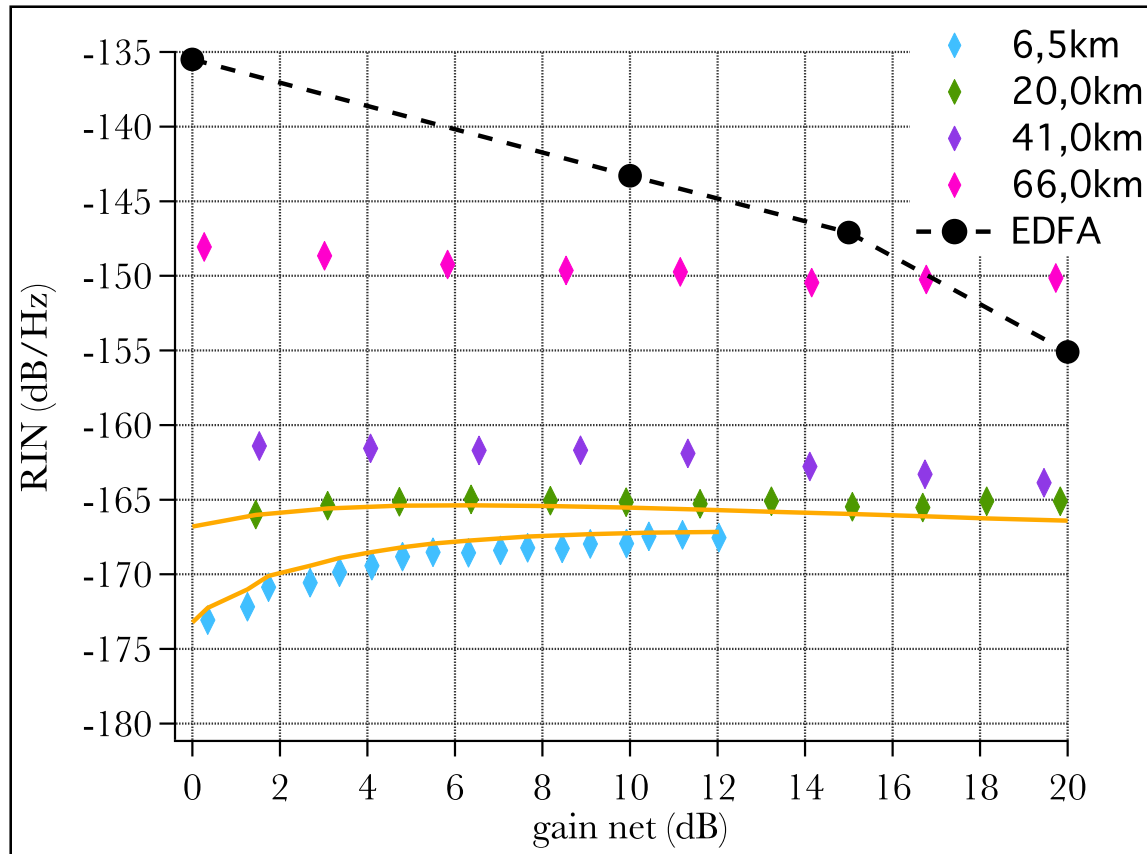
$$RIN = \frac{1}{(OSNR)^2} \cdot \frac{1}{BP \text{ (en Hz)}}$$

### EDFA Keopsys

- $G_{max}$  petit signal : 40 dB
- $P_S$  out max: 27 dBm



## mesures expérimentales, l'EDFA

Comparaison de RIN

$P_S$  in: -20 dBm

$$OSNR_{out} = \frac{P_{S,out}}{P_{ASE}}$$

$$RIN = \frac{1}{(OSNR)^2} \cdot \frac{1}{BP \text{ (en Hz)}}$$

EDFA Keopsys

- $G_{max}$  petit signal : 40 dB
- $P_S$  out max: 27 dBm



amplificateur Raman



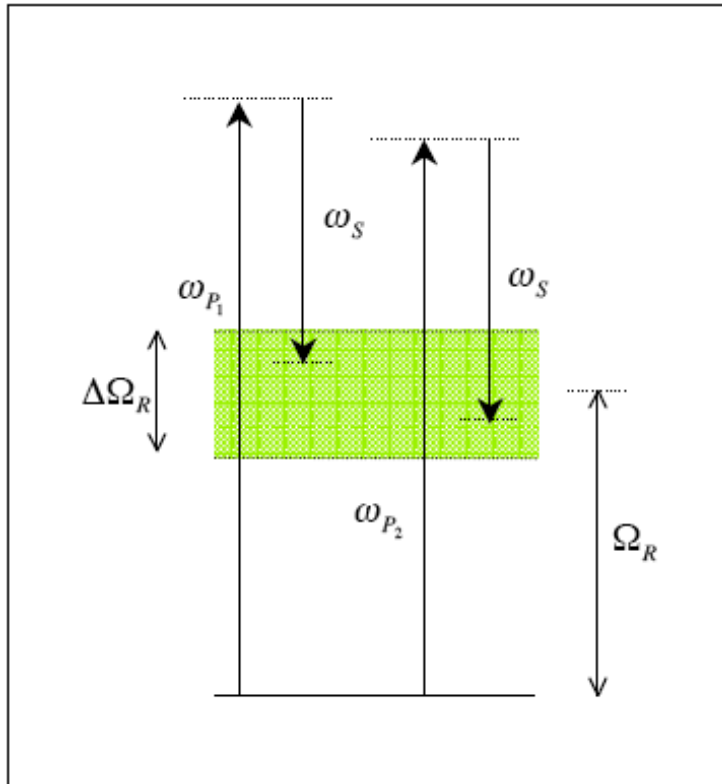
# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle
2. le bruit
  - i. émission spontanée amplifiée
  - ii. transfert du bruit de la pompe
3. mesures expérimentales de gain et d'ASE
4. réduction du bruit
  - i. modèle classique
  - ii. modèle quantique

conclusion et perspectives

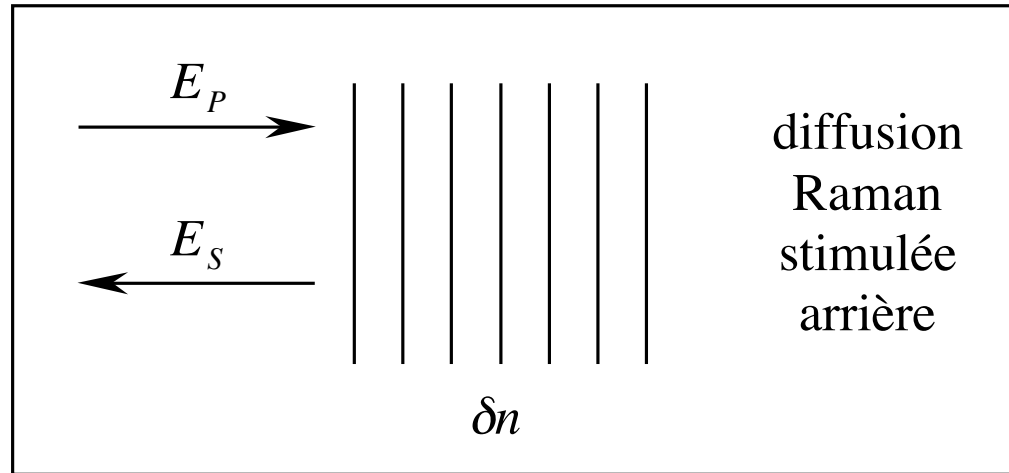
## réduction du bruit



- » un milieu Raman, transition  $\Omega_R$
- » un signal, fréquence  $\omega_S$
- » 2 pompes, fréquences  $\omega_{P1}$  et  $\omega_{P2}$
- » configuration contra-propageante
- »  $\omega_{P1} - \omega_{P2} \ll \Delta\Omega_R$

$$G = \frac{4\pi^2}{n\lambda} \chi_{eff}^{(3)} \left[ |E_{P1}|^2 + |E_{P2}|^2 \right]$$

## réduction du bruit, modèle classique



modulation d'indice :  $\Delta n = \delta n \cdot \exp[i(\underline{K}z - \Omega t)] + c.c.$

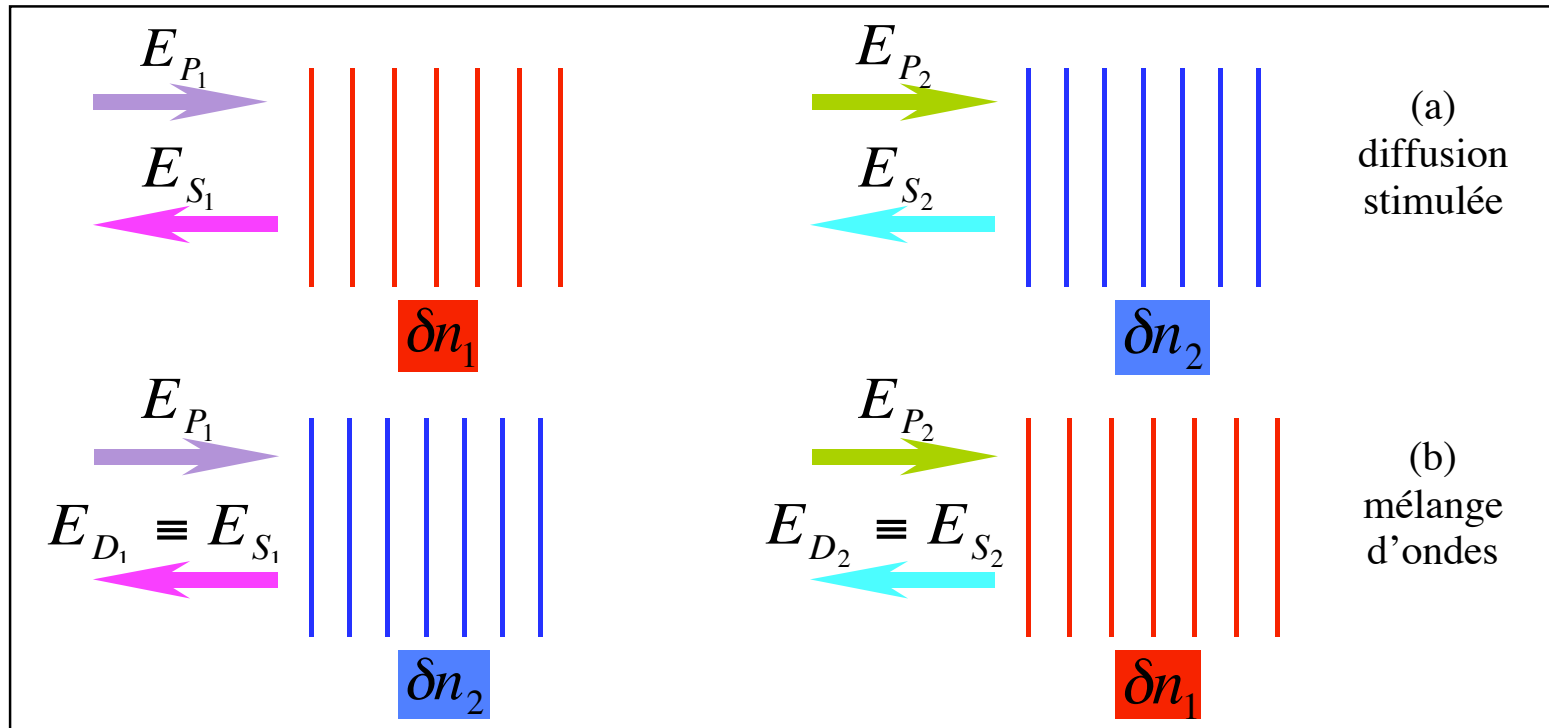
d'amplitude :  $\delta n = \mathcal{A} \underline{E}_P^* \cdot \underline{E}_S$

de fréquence :  $\Omega = \omega_P - \omega_S$

de vecteur d'onde :  $\underline{K} = \underline{k}_P + \underline{k}_S$

# réduction du bruit, modèle classique

suppression du gain Raman  $|\omega_{P_1} - \omega_{P_2}| \gg \Delta\Omega_R$



- à la fréquence  $\omega_{S_1}$  :  $E_{D_1} \propto E_{P_1} (\delta n_1 + \delta n_2) \propto E_{P_1} (E_{P_1}^* E_{S_1} + E_{P_2}^* E_{S_2})$
  - à la fréquence  $\omega_{S_2}$  :  $E_{D_2} \propto E_{P_2} (\delta n_2 + \delta n_1) \propto E_{P_2} (E_{P_2}^* E_{S_2} + E_{P_1}^* E_{S_1})$
- gain nul  $\Rightarrow E_{P_2}^* E_{S_2} + E_{P_1}^* E_{S_1} = 0 \Rightarrow -\varphi_{P_{1/2}} + \varphi_{S_{1/2}} = \pi - \varphi_{P_{2/1}} + \varphi_{S_{2/1}}$

dans le cas où  $\varphi_{S_1} = \varphi_{S_2}$  alors  $\boxed{\varphi_{P_1} - \varphi_{P_2} = \pi}$

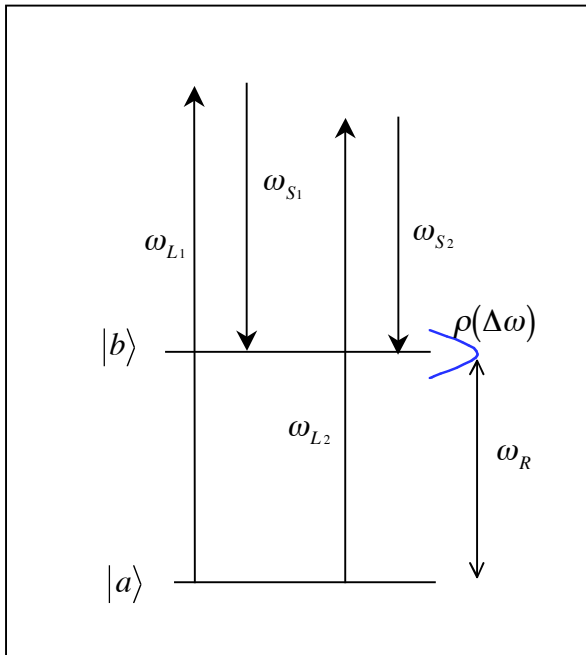
# progression

introduction: l'optique hyperfréquence

1. l'amplification Raman, modèle
2. le bruit
  - i. émission spontanée amplifiée
  - ii. transfert du bruit de la pompe
3. mesures expérimentales de gain et d'ASE
4. réduction du bruit
  - i. modèle classique
  - ii. modèle quantique

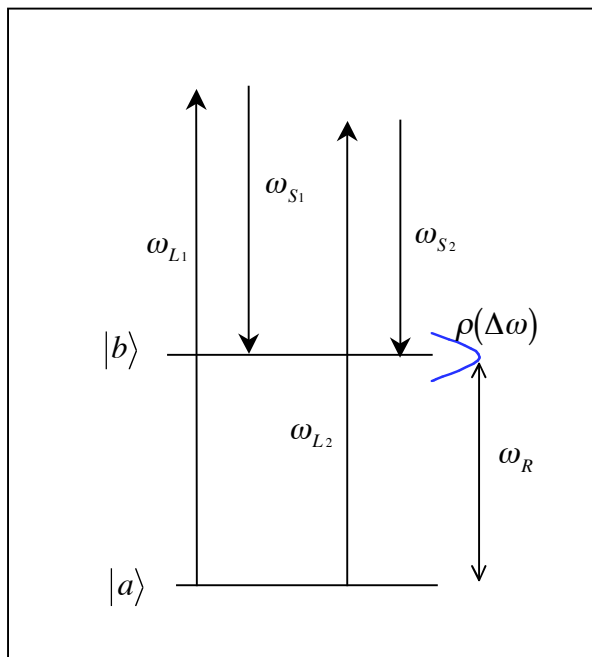
conclusion et perspectives

## réduction du bruit, modèle quantique



- **transition Raman** de l'état  $|a\rangle$  vers l'état  $|b\rangle$
- **2 faisceaux pompe** représentés par des états de Fock à  $N_{L1/2}$  photons
- **ondes Stokes** représentées par des états de Fock à 0 ou 1 photon:  $|0\rangle_{S1/2}$  et  $|1\rangle_{S1/2}$

## réduction du bruit, modèle quantique



- **transition Raman** de l'état  $|a\rangle$  vers l'état  $|b\rangle$
- **2 faisceaux pompe** représentés par des états de Fock à  $N_{L1/2}$  photons
- **ondes Stokes** représentées par des états de Fock à 0 ou 1 photon:  $|0\rangle_{S1/2}$  et  $|1\rangle_{S1/2}$
- **opérateurs champs électriques** des ondes pompe et Stokes:

$$\underline{E}_{L_i}(\omega_{L_i}) = i\sqrt{\frac{4\pi}{L^3}} \frac{\omega_{L_i}}{n_{L_i}} \hat{e}_{L_i} \left[ q_{L_i} \exp(i\mathbf{k}_{L_i} \cdot \mathbf{r}) \exp(i\varphi_{L_i}) - q_{L_i}^+ \exp(-i\mathbf{k}_{L_i} \cdot \mathbf{r}) \exp(-i\varphi_{L_i}) \right]$$

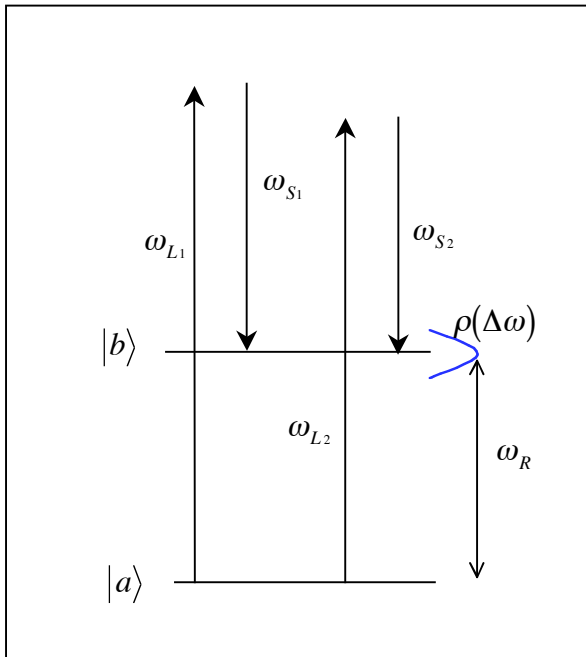
$$\underline{E}_{S_i}(\omega_{S_i}) = i\sqrt{\frac{4\pi}{L^3}} \frac{\omega_{S_i}}{n_{S_i}} \hat{e}_{S_i} \left[ q_{S_i} \exp(i\mathbf{k}_{S_i} \cdot \mathbf{r}) - q_{S_i}^+ \exp(-i\mathbf{k}_{S_i} \cdot \mathbf{r}) \right]$$

$$\text{action des opérateurs: } \langle N_j | q_j | N_j + 1 \rangle = \langle N_j + 1 | q_j^+ | N_j \rangle = \left[ \frac{\hbar(N_j + 1)}{2\omega_j} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad j = L_i, S_i$$



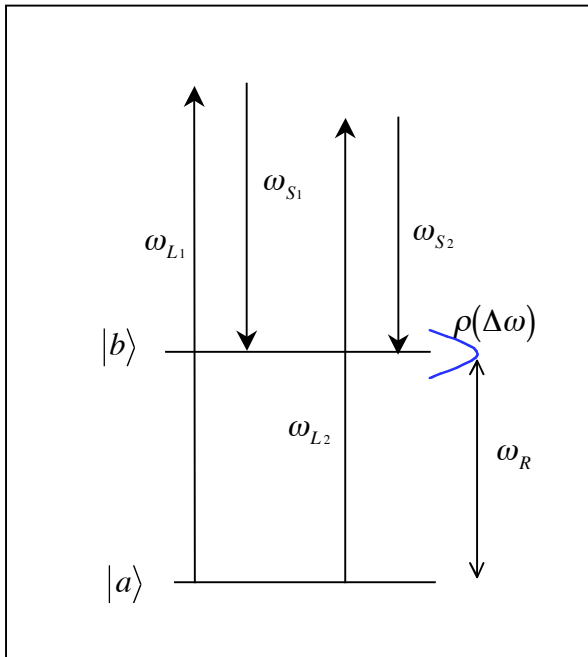
## réduction du bruit, modèle quantique

- état **initial** du système:  $|i\rangle = |a\rangle |N_{L_1}\rangle |N_{L_2}\rangle |0\rangle_{S_1} |0\rangle_{S_2}$
- état **final** dégénéré:  $|f_1\rangle = |b\rangle |N_{L_1} - 1\rangle |N_{L_2}\rangle |1\rangle_{S_1} |0\rangle_{S_2}$  et  $|f_2\rangle = |b\rangle |N_{L_1}\rangle |N_{L_2} - 1\rangle |0\rangle_{S_1} |1\rangle_{S_2}$



## réduction du bruit, modèle quantique

- état **initial** du système:  $|i\rangle = |a\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2}\rangle |0\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$
- état **final** dégénéré:  $|f_1\rangle = |b\rangle |N_{L1} - 1\rangle |N_{L2}\rangle |1\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$  et  $|f_2\rangle = |b\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2} - 1\rangle |0\rangle_{S1} |1\rangle_{S2}$



- probabilité** d'effectuer la transition Raman de l'état  $|a\rangle$  vers l'état  $|b\rangle$

$$\frac{dp_{i \rightarrow \{|f_i\}}}{dt} \propto |K_{fi}^{(2)}|^2$$

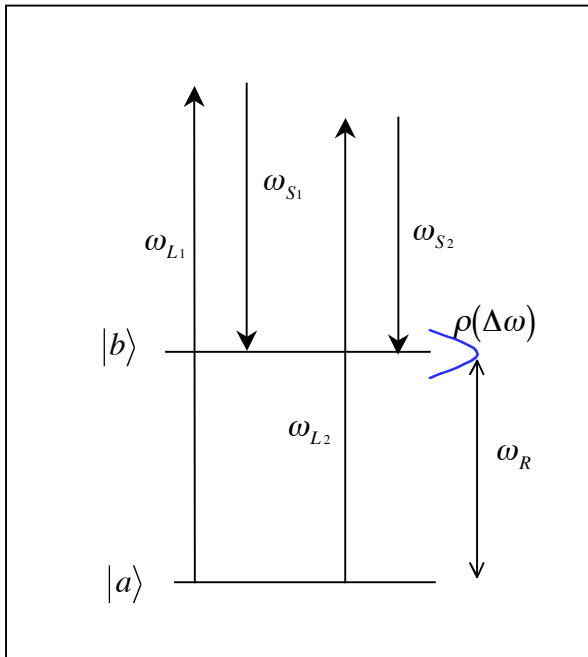
$$K_{fi}^{(2)} = \sum_n \left\{ \frac{\langle f | H' | g_{1n} \rangle \langle g_{1n} | H' | i \rangle}{E_f - E_{g_{1n}}} + \frac{\langle f | H' | g_{2n} \rangle \langle g_{2n} | H' | i \rangle}{E_f - E_{g_{2n}}} \right\}$$

↘ opérateur transition à 2 photons

$$H' = -\underline{E} \cdot \underline{P}$$

## réduction du bruit, modèle quantique

- état **initial** du système:  $|i\rangle = |a\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2}\rangle |0\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$
- état **final** dégénéré:  $|f_1\rangle = |b\rangle |N_{L1} - 1\rangle |N_{L2}\rangle |1\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$  et  $|f_2\rangle = |b\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2} - 1\rangle |0\rangle_{S1} |1\rangle_{S2}$



- probabilité** d'effectuer la transition Raman de l'état  $|a\rangle$  vers l'état  $|b\rangle$

$$\frac{dp_{i \rightarrow \{|f_i\}}}{dt} \propto |K_{fi}^{(2)}|^2$$

$$K_{fi}^{(2)} = \sum_n \left\{ \frac{\langle f | H' | g_{1n} \rangle \langle g_{1n} | H' | i \rangle}{E_f - E_{g_{1n}}} + \frac{\langle f | H' | g_{2n} \rangle \langle g_{2n} | H' | i \rangle}{E_f - E_{g_{2n}}} \right\}$$

↘ opérateur transition à 2 photons

$$H' = -\underline{E} \cdot \underline{P}$$

- états **intermédiaires**:

$$|g_{1n}\rangle = |n\rangle |N_{L1} - 1\rangle |N_{L2}\rangle |0\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$$

$$|g_{2n}\rangle = |n\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2} - 1\rangle |0\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$$

$$|g'_{1n}\rangle = |n\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2}\rangle |1\rangle_{S1} |0\rangle_{S2}$$

$$|g'_{2n}\rangle = |n\rangle |N_{L1}\rangle |N_{L2}\rangle |0\rangle_{S1} |1\rangle_{S2}$$

## réduction du bruit, modèle quantique

pour des ondes pompes de fréquence voisines et dans le même état de polarisation

$$\frac{dp_{i \rightarrow \{|f_i\rangle\}}}{dt} \propto N_{L_1} + N_{L_2} + 2\sqrt{N_{L_1}N_{L_2}} \cos[\varphi_{L_1} - \varphi_{L_2}]$$

⇒ minimale lorsque les ondes pompes sont en opposition de phase

⇒ nulle si, de plus les ondes pompe sont d'intensité égales

➤ **SUPPRESSION DE L'ÉMISSION SPONTANÉE**

## réduction du bruit, modèle quantique

pour des ondes pompes de fréquence voisines et dans le même état de polarisation

$$\frac{dp_{i \rightarrow \{|f_i\rangle\}}}{dt} \propto N_{L_1} + N_{L_2} + 2\sqrt{N_{L_1}N_{L_2}} \cos[\varphi_{L_1} - \varphi_{L_2}]$$

⇒ minimale lorsque les ondes pompes sont en opposition de phase

⇒ nulle si, de plus les ondes pompe sont d'intensité égales

➤ **SUPPRESSION DE L'ÉMISSION SPONTANÉE**

Q: l'incidence  
de conditions  
approximatives?

## réduction du bruit, modèle quantique

pour des ondes pompes de fréquence voisines et dans le même état de polarisation

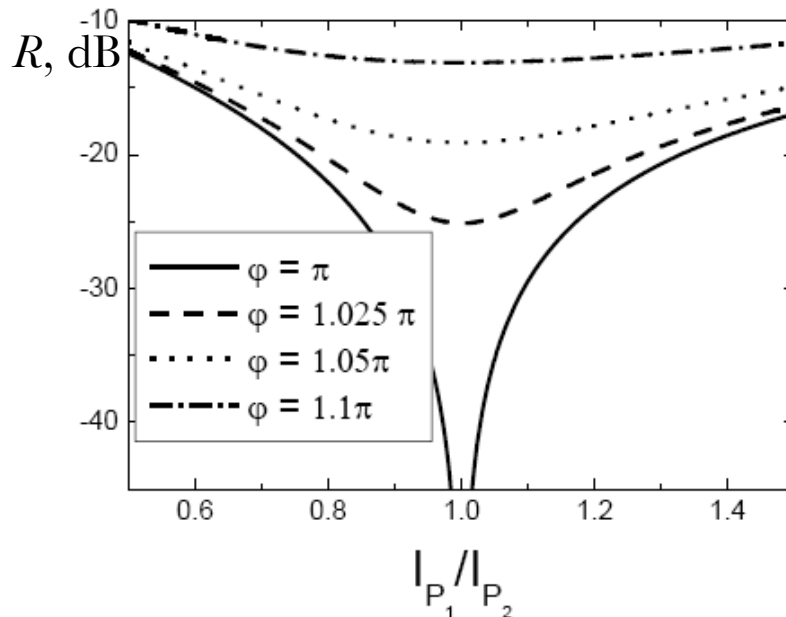
$$\frac{dp_{i \rightarrow \{|f_i\rangle\}}}{dt} \propto N_{L_1} + N_{L_2} + 2\sqrt{N_{L_1}N_{L_2}} \cos[\varphi_{L_1} - \varphi_{L_2}]$$

⇒ minimale lorsque les ondes pompes sont en opposition de phase

⇒ nulle si, de plus les ondes pompe sont d'intensité égales

### ➤ SUPPRESSION DE L'ÉMISSION SPONTANÉE

Q: l'incidence de conditions approximatives?



$R$ : suppression du bruit

$$R = \frac{N_{L_1} + N_{L_2} + 2\sqrt{N_{L_1}N_{L_2}} \cos[\varphi_{L_1} - \varphi_{L_2}]}{N_{L_1} + N_{L_2}}$$

## conclusion

- ✓ amplification Raman + micro-ondes : bruit 😊  
gain 😊
- ✓ amplificateur Raman à fibre : alternative aux EDFAs
- ✓ identification des principales sources de bruit :
  - » ASE
  - » transfert de bruit de la pompe
    - atténuation en  $\nu^2$  pour  $\nu > 100\text{kHz}$
    - pas d'ajout de bruit en pompe large
- ✓ développement d'un modèle original de réduction du bruit d'émission spontanée

## perspectives

- mesures électriques de RIN, à haute fréquence  
de bruit de phase
- optimisation (laser(s) de pompe, fibre...)
- montage de suppression du bruit d'émission spontanée amplifiée,  
utilisation de PMF
- étude en régime de saturation de l'ampli



sébastien maerten & co

mathieu jacquemet

robert frey

**merci...**

vincent reboud

bertrand

tout le personnel de l'institut d'optique

marianne/jo'fab

nadia boulay

magali astic

carole arnaud

philippe delaye

mr mme K.

stéphanie molin

antoine godard

antoine/maité

gilles pauliat

gérald roosen

sébastien de rossi

pierre lecaruyer

nicolas dubreuil

xtof/mylène

jean-michel desvignes

jean-pierre huignard

daniel dolfi

guillaume maire

peg/alex

sylvie lebrun

frédéric guattari

sylvie tonda

marie-claire

alima/haby/aminata

ben

mireille cuniot-ponsard

sofiane bahbah

evelin weidner

jean-michel jonathan

philippe/lenaïck