

Optique quantique dans les oscillateurs paramétriques optiques

Du monomode au multimode

Agnès Maître



Université Paris VII Denis Diderot

Laboratoire Kastler Brossel

Fédération de recherche
Matériaux et Phénomènes Quantiques

Optique quantique dans les OPO

Monomode

- *Optique quantique dans les OPO*
- *Spectroscopie de grande sensibilité*
- *Compression de la pompe réfléchie*

Multimode

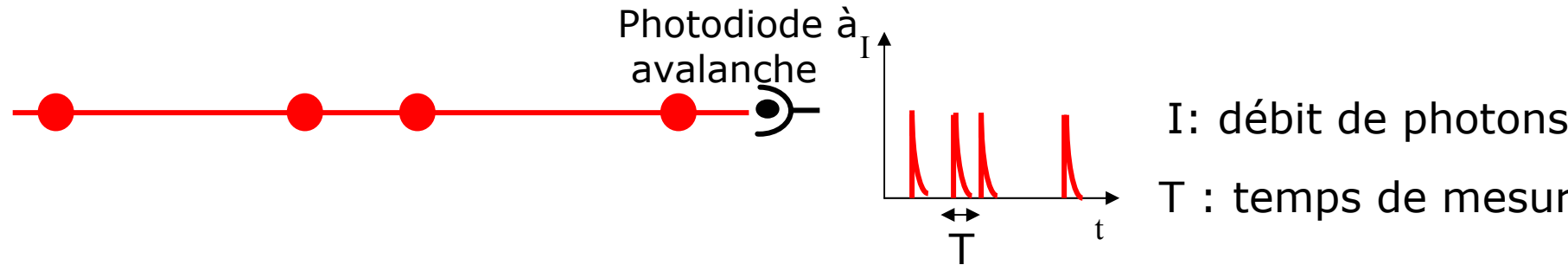
- *Distribution spatiale des fluctuations*
- *Mesure d'un faible déplacement*
- *OPO confocal*

Perspectives

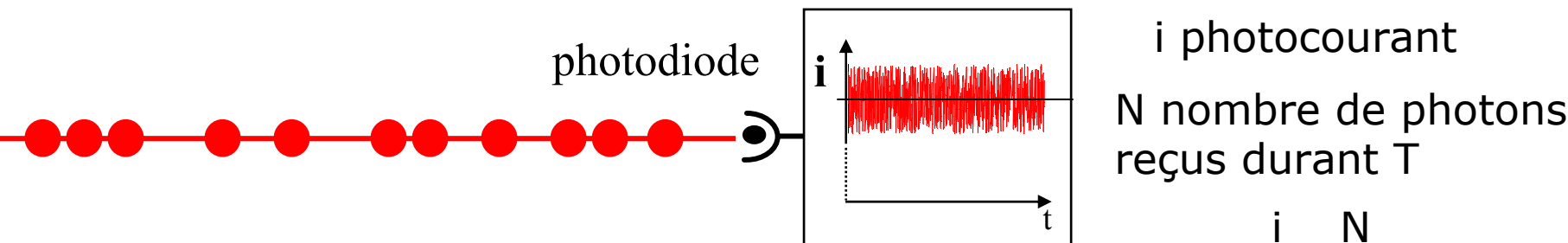
- *OPO sous le seuil*
- *Imagerie à deux photons*

Le bruit quantique en optique

Régime de comptage de photons (10^6 photons/s)



Faisceaux intenses (1mW à $1\mu\text{m} \sim 10^{17}$ photons/s)

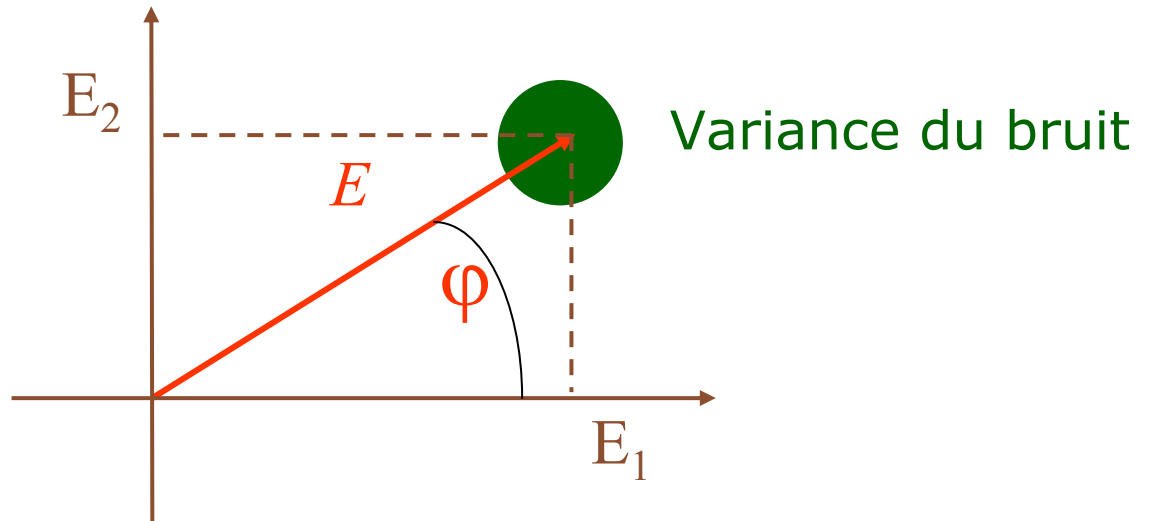


Représentation de Fresnel

Pour un champ monomode

$$E = E e^{i\varphi} e^{i(\omega t - kz)}$$

$$E = \langle E \rangle + \delta E$$



Inégalité de Heisenberg

Quadratures du champ

$$\Delta E_1 \Delta E_2 \geq \varepsilon_1^2$$

Intensité / phase

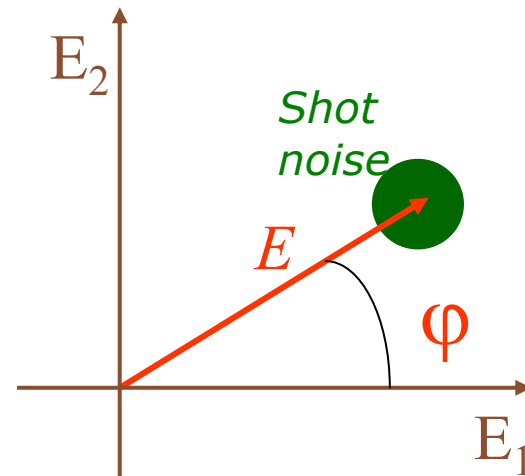
$$\Delta N \Delta \varphi \geq 1/2$$

Champ cohérent

Pas d'excès de bruit classique

$$\Delta E_1 = \Delta E_2 = \varepsilon_1$$

statistique poissonnienne



Flux de photons décorrélés

$$\Delta N \Delta \varphi = 1/2$$

$$\Delta N = \sqrt{N}$$



bruit de grenaille, bruit de photons (**shot noise**)

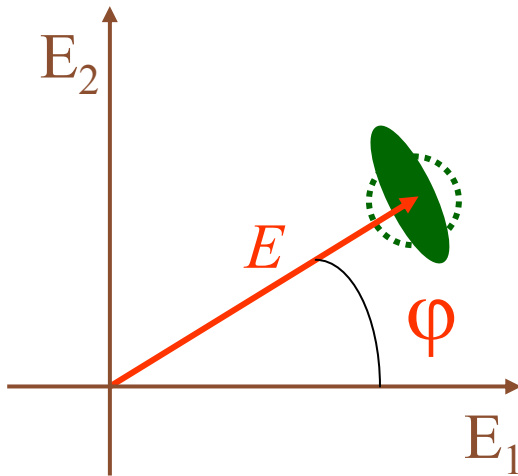
Champ comprimé

Champ comprimé

en quadrature

$$\Delta E_1 < \varepsilon_1 \quad \Delta E_2 > \varepsilon_1$$

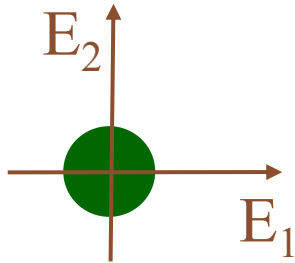
en intensité



$$\Delta N < \sqrt{N}$$

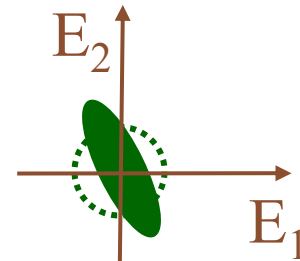
Vide

Vide: état cohérent de valeur moyenne nulle



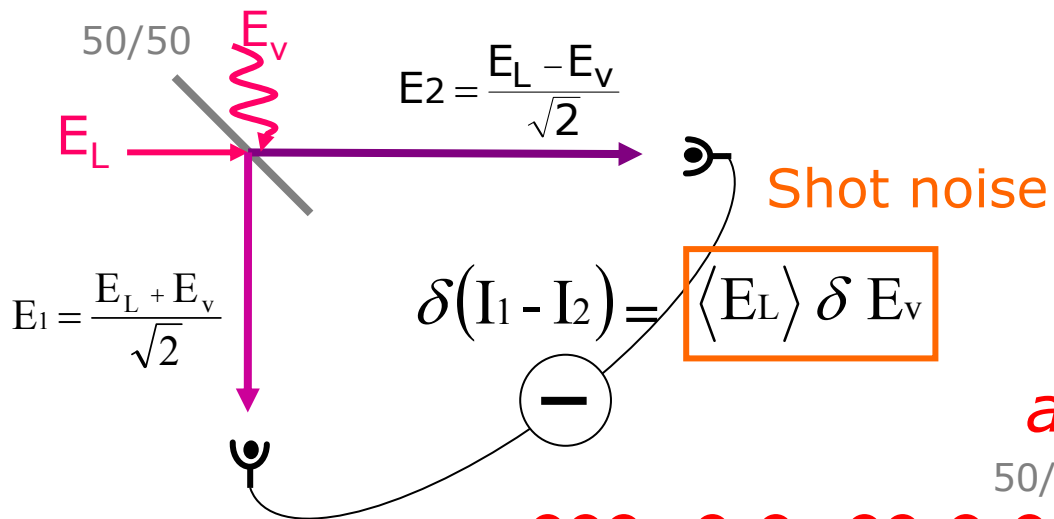
État comprimé de valeur moyenne nulle appelé:

Vide comprimé

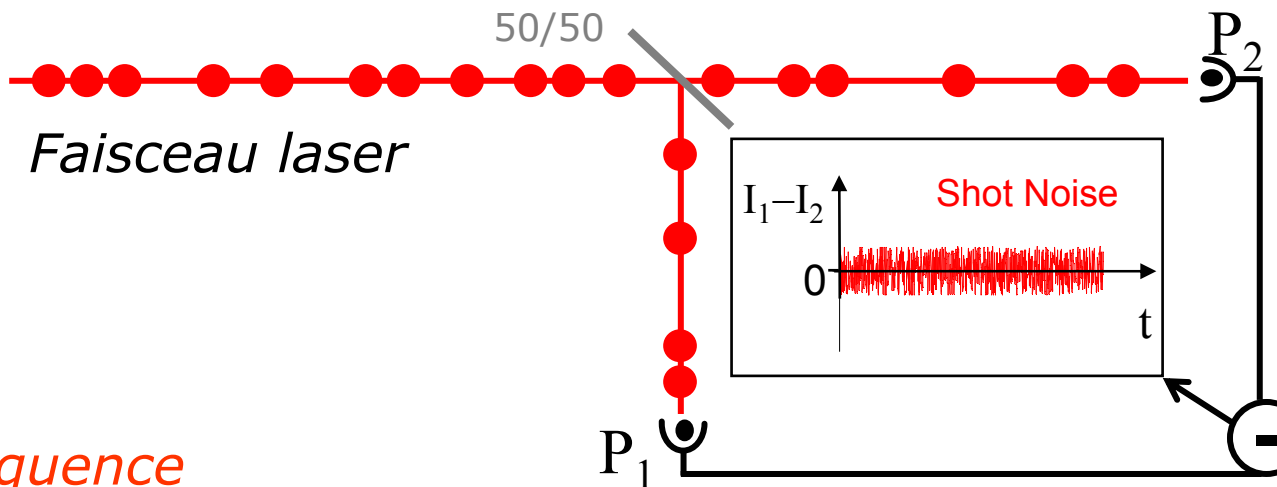


Mesurer les fluctuations du vide

approche ondulatoire

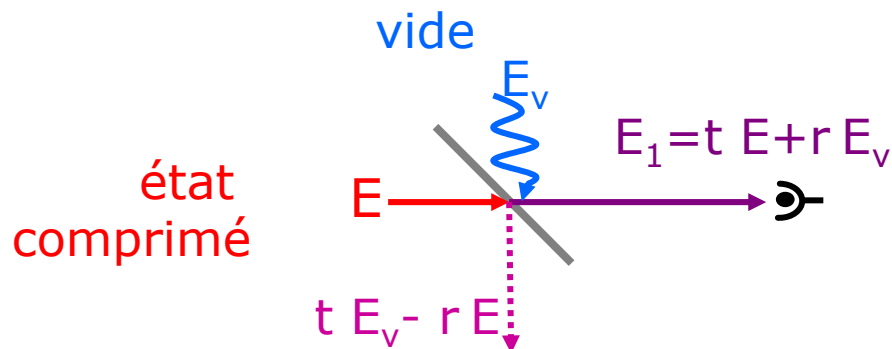


approche corpusculaire



Le bruit haute fréquence d'un laser est au shot noise

les pertes en Optique Quantique



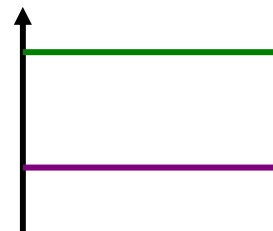
Bruit

shot noise



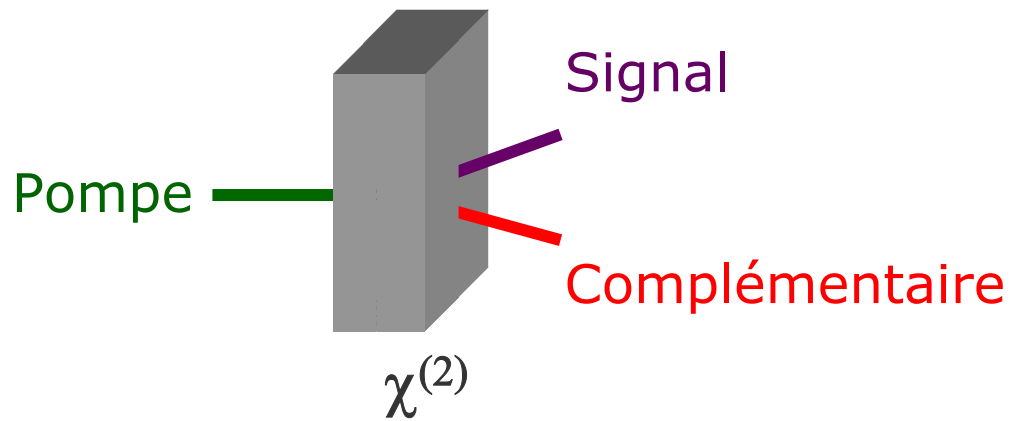
Bruit

shot noise



L'oscillateur paramétrique optique

Fluorescence paramétrique

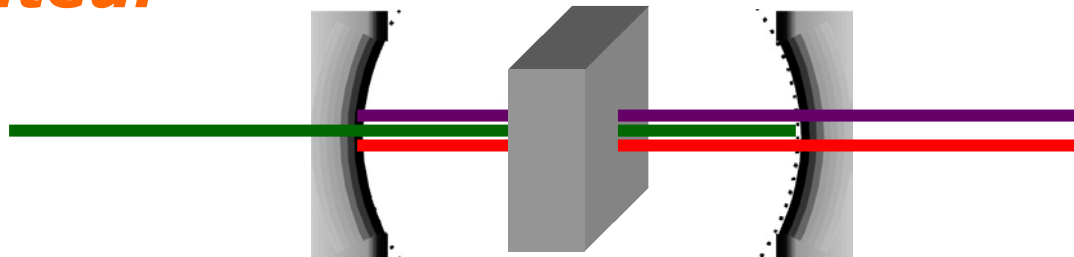


$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_c + \hbar\omega_s$$

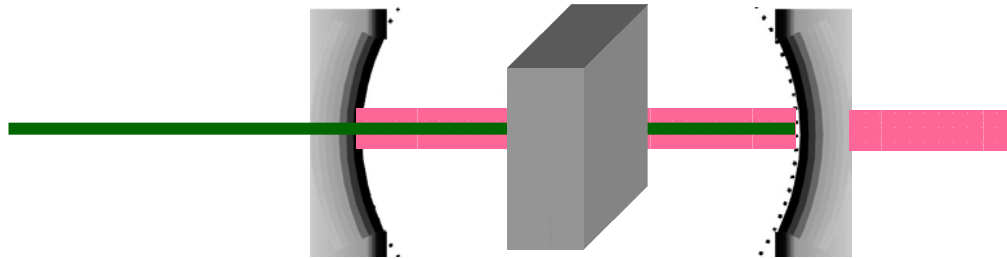
$$\vec{k}_p \stackrel{a}{=} \vec{k}_c + \vec{k}_s$$

Accord de phase

L'oscillateur



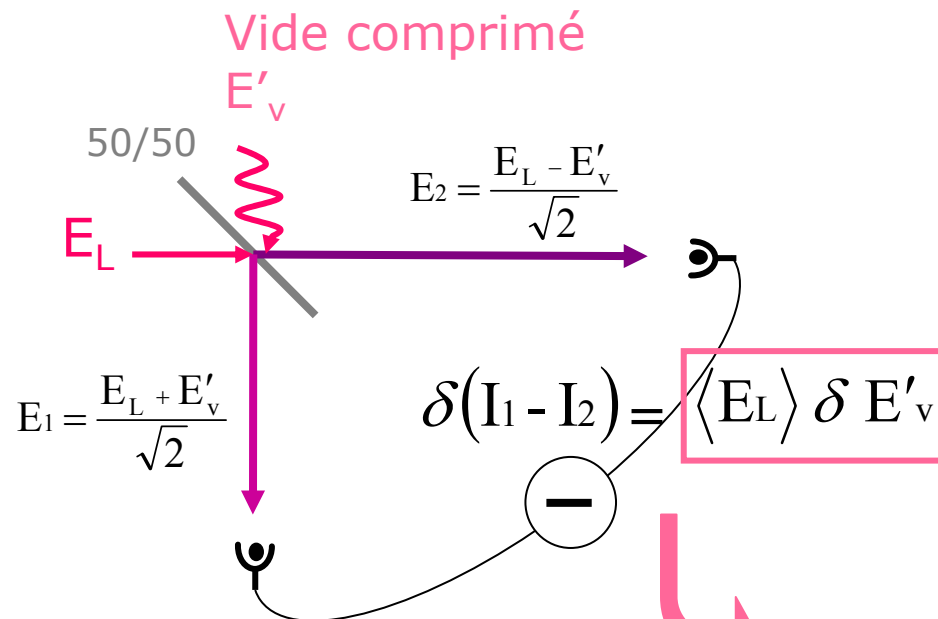
L'OPO sous le seuil



Vide comprimé
à la dégénérescence
en fréquence

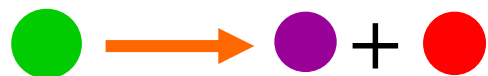
$$\omega_S = \omega_C = \frac{1}{2}\omega_p$$

champ intense
(oscillateur local)

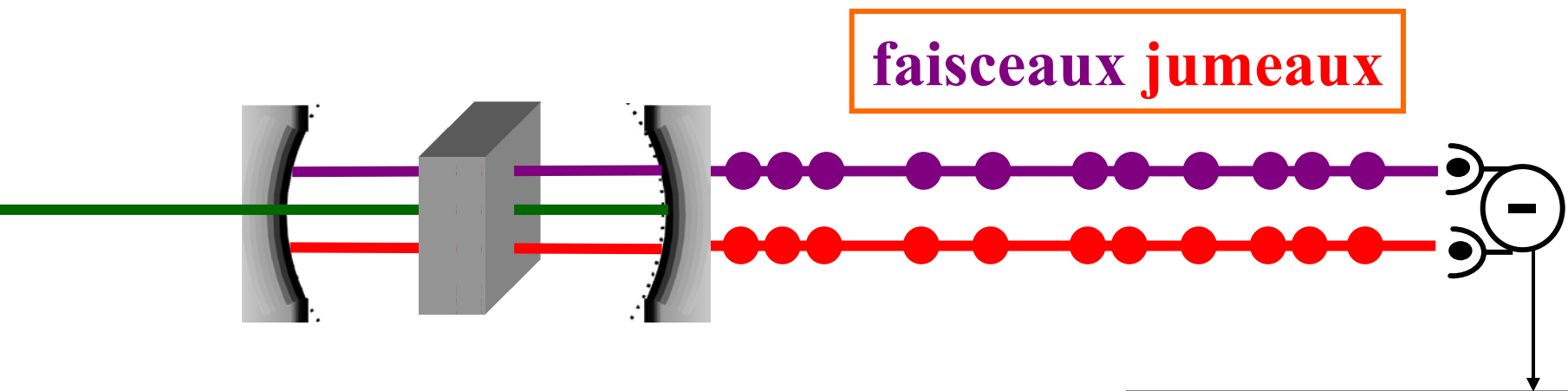


Analyse de Fourier du bruit

les faisceaux jumeaux

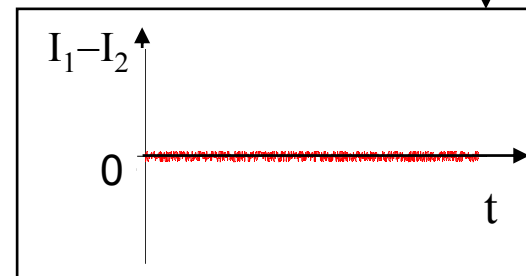


Émission simultanée du **signal** et **complémentaire**

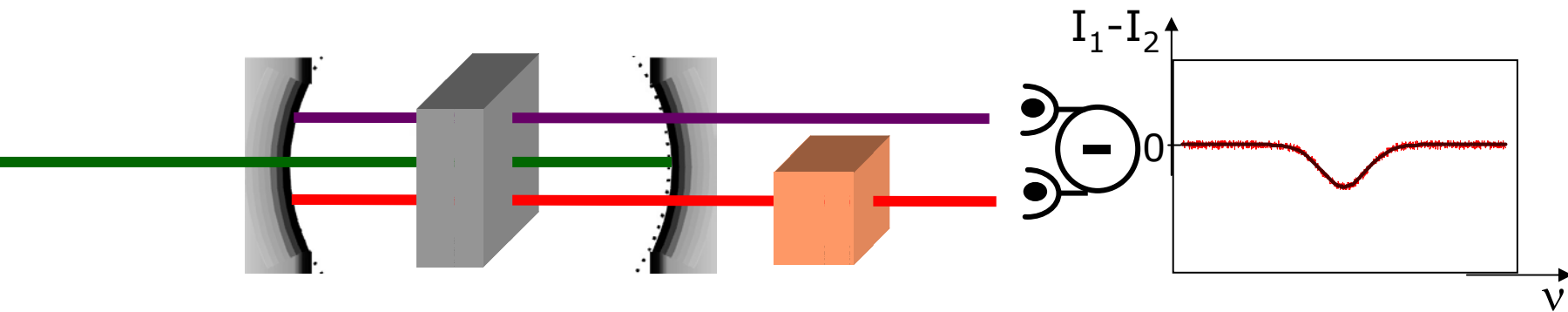
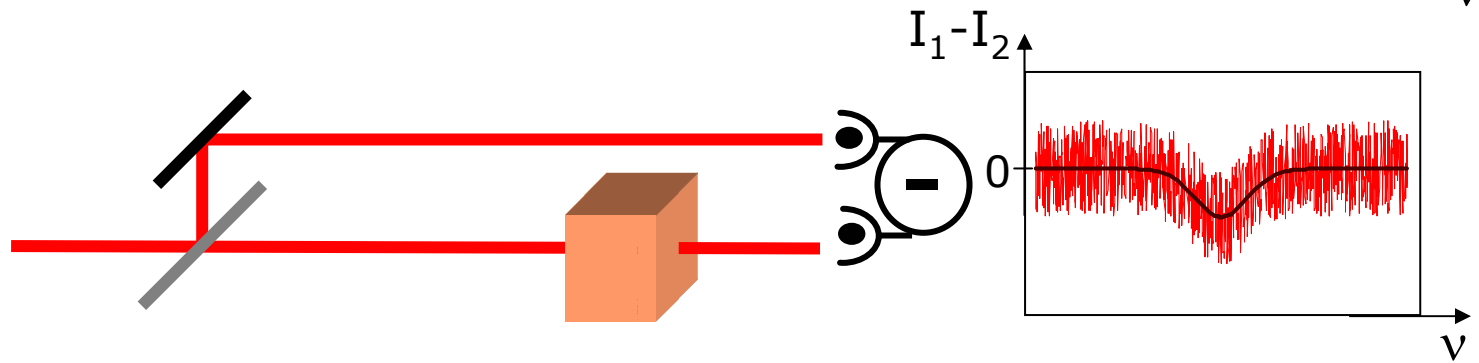
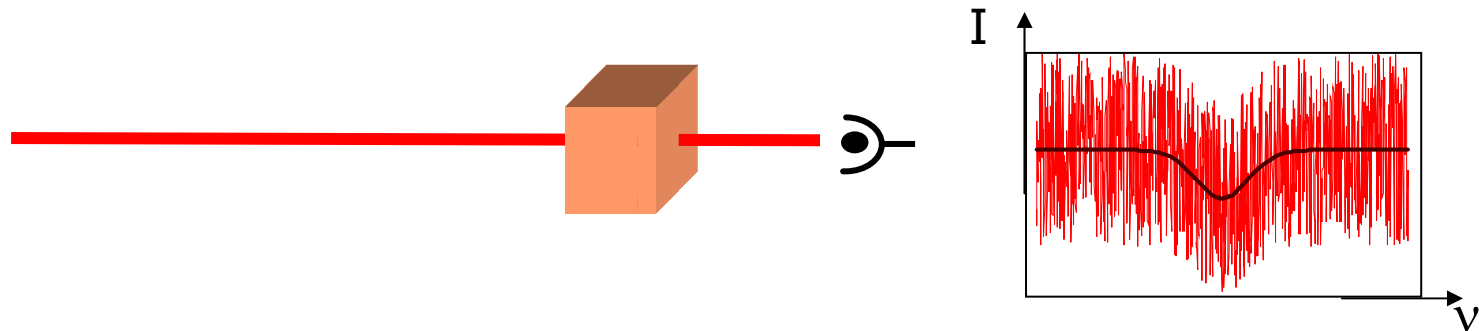


$$\Delta I_{\text{jumeaux}} = \Delta I_{\text{shot noise}} / 10$$

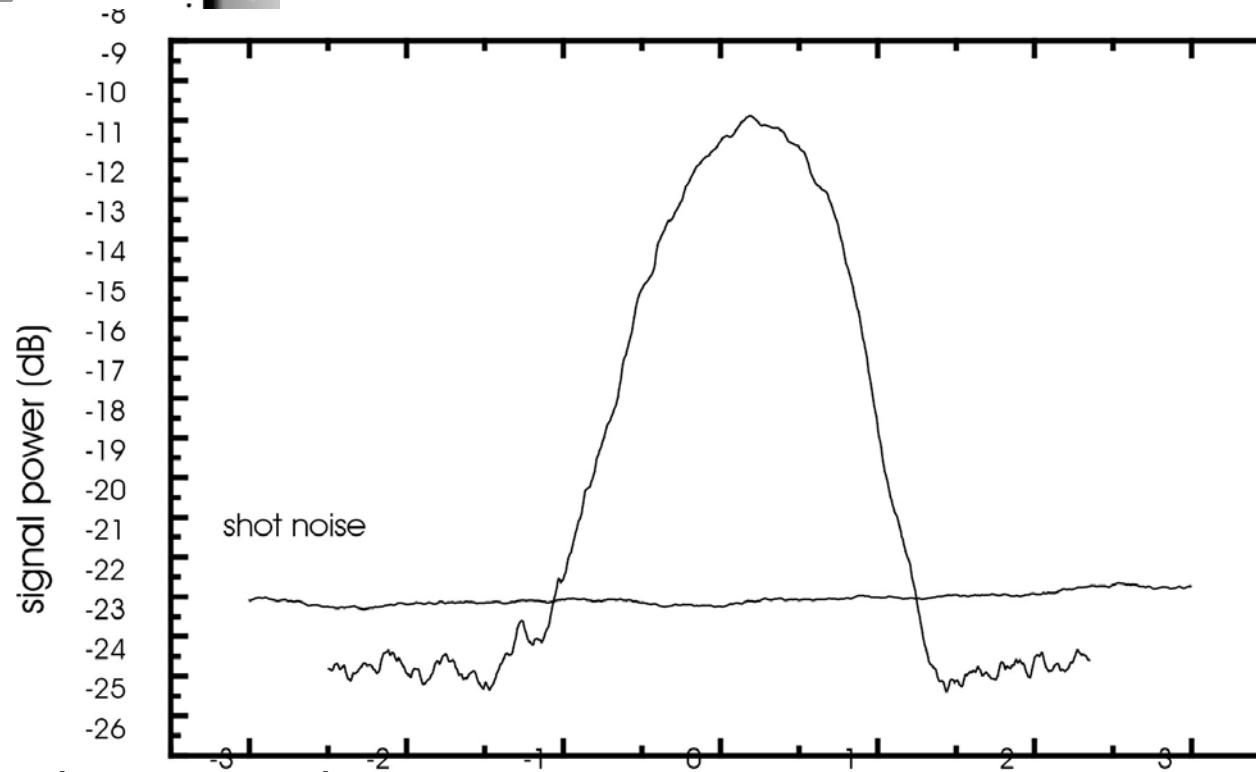
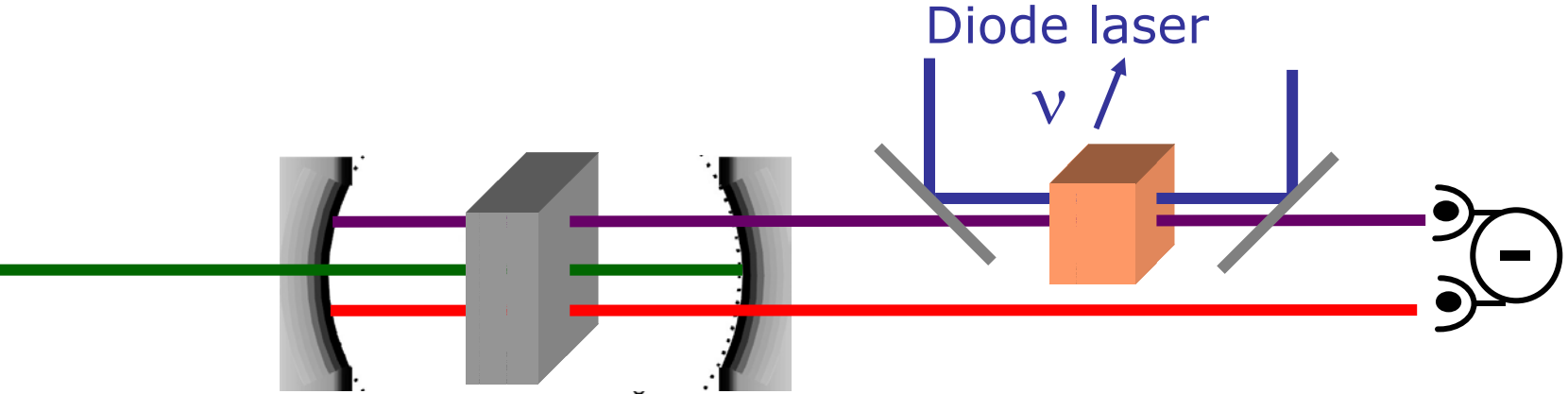
(*expérimentalement*)



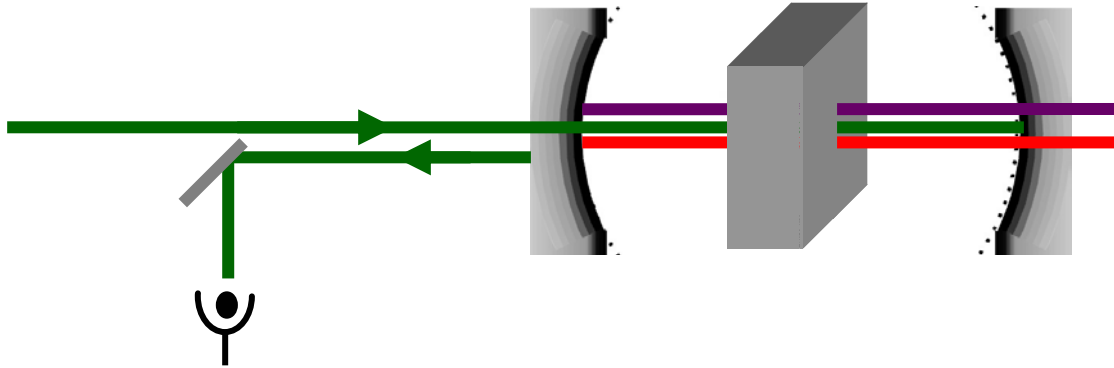
la spectroscopie sous le shot



Absorption dans le Rubidium



Compression de la pompe



Cristal à quasi accord de phase (PPLN)

Pompe à $1,06\mu\text{m}$, signal et complémentaire autour de $2,12\mu\text{m}$

Compression du bruit de la pompe réfléchi par la cavité:
30% sous le shot noise

Optique quantique dans les OPO

Monomode

- *Optique quantique dans les OPO*
- *Spectroscopie de grande sensibilité*
- *Compression de la pompe réfléchie*

Multimode

- *Distribution spatiale des fluctuations*
- *Mesure d'un faible déplacement*
- *OPO confocal*

Perspectives

- *Amplification des images*
- *Reconstruction d'images*

Fluctuations d'un état monomode



Opérateur champ

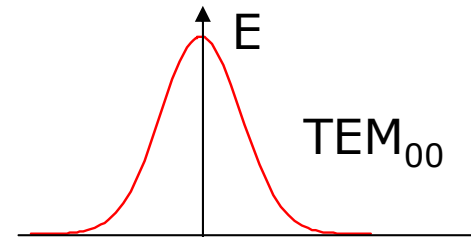
$$\hat{E}(r,z) = i \sqrt{\frac{\hbar \omega_0}{2\epsilon_0}} \sum_{\tau} \hat{a}_i(z) u_i(r,z)$$

base $\{\hat{a}_i, u_i\}$

\hat{a}_i opérateur d'annihilation de photons
 u_i mode transverse

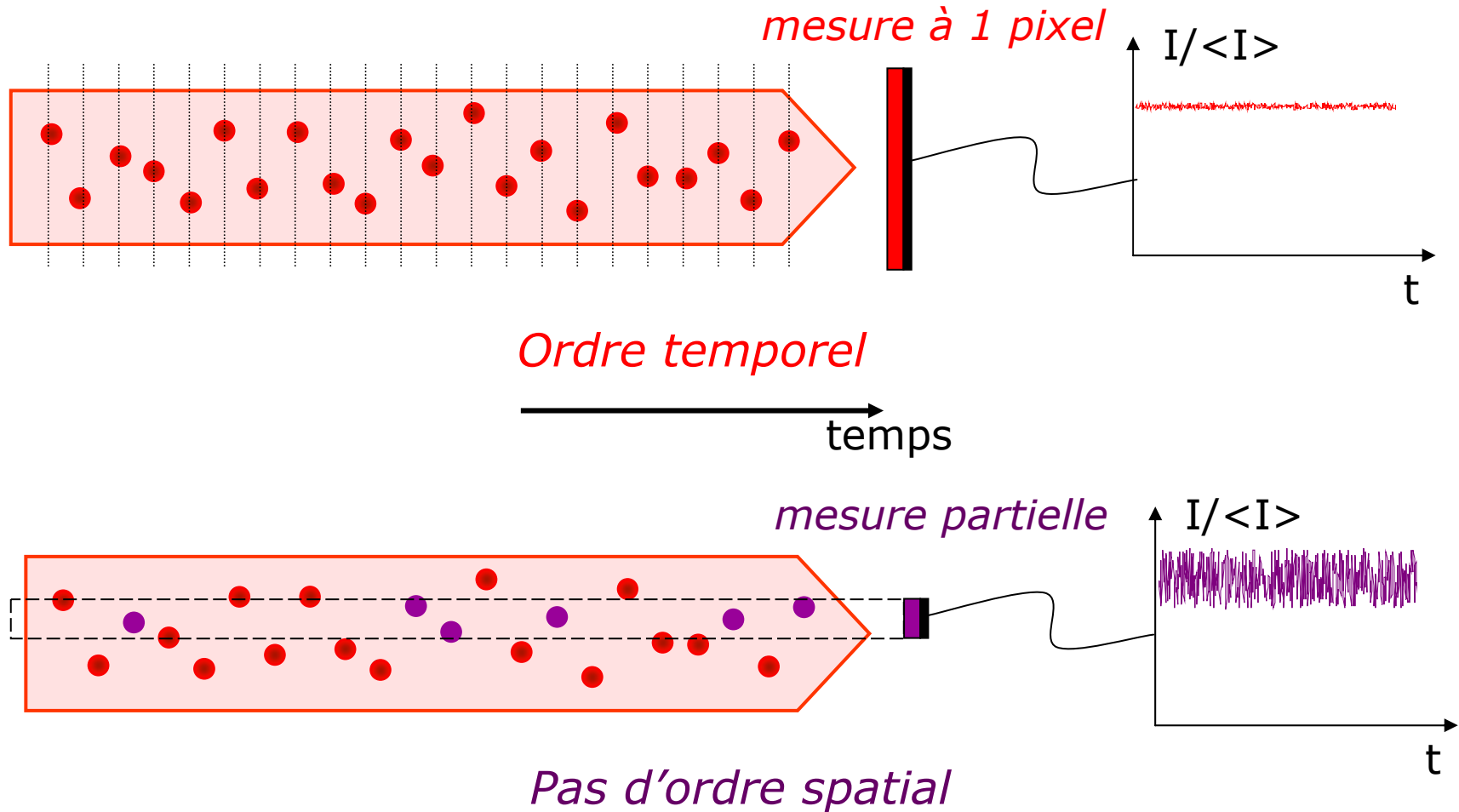
Etat monomode

$$|\psi\rangle = |\psi_0\rangle \otimes |0, 0, \dots\rangle$$

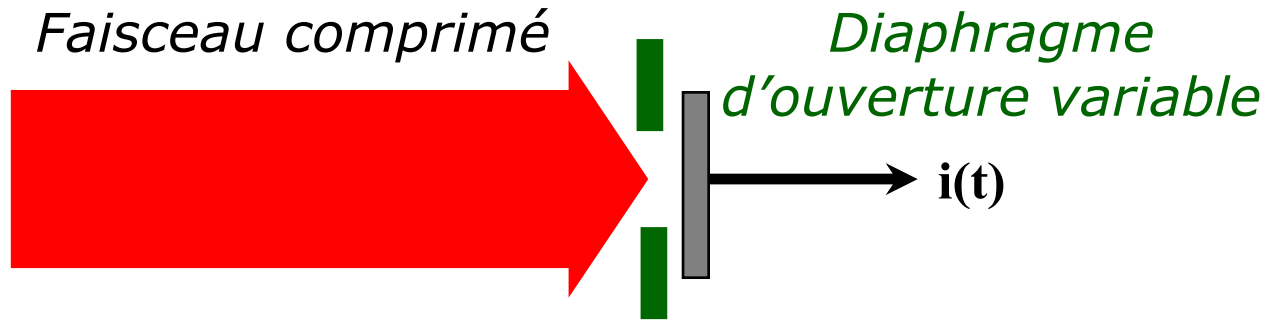


Les fluctuations sont réparties aléatoirement dans l'espace

Faisceau monomode comprimé en intensité



Mesure partielle

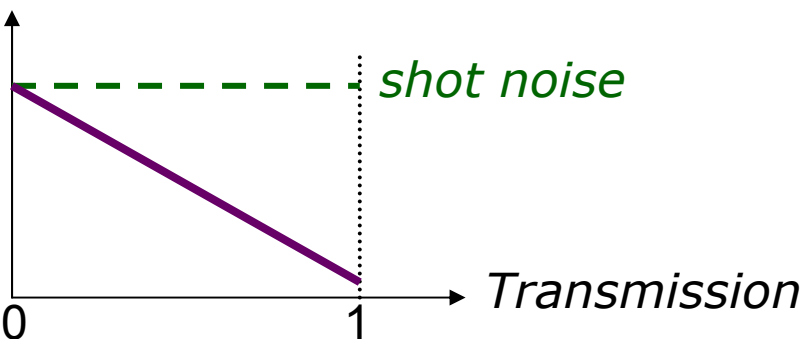


Faisceau monomode comprimé

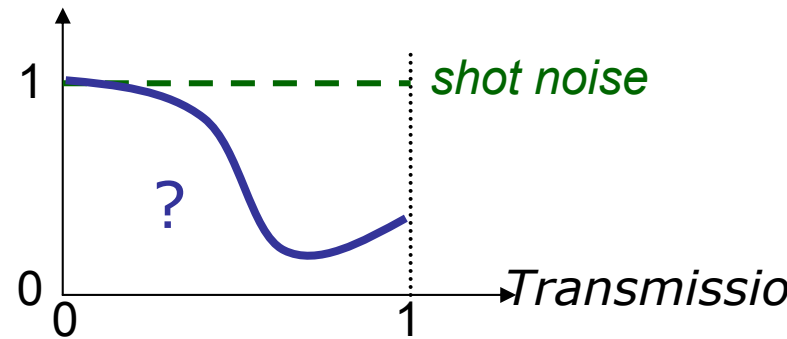
Faisceau multimode comprimé

$$|\psi\rangle = |\psi_0\rangle \otimes |0, 0, \dots\rangle$$

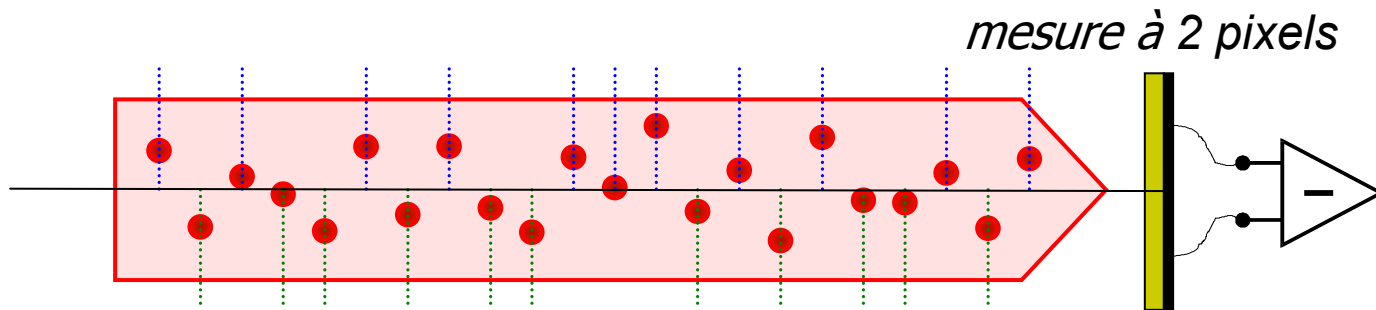
Bruit normalisé



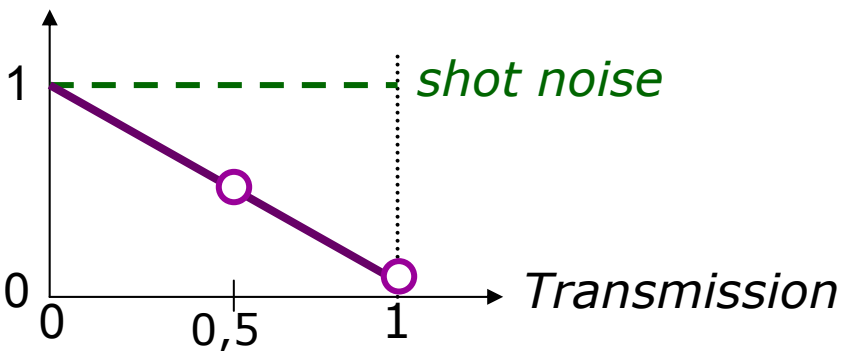
Bruit normalisé



corrélation spatiale pour un faisceau monomode comprimé



Bruit normalisé

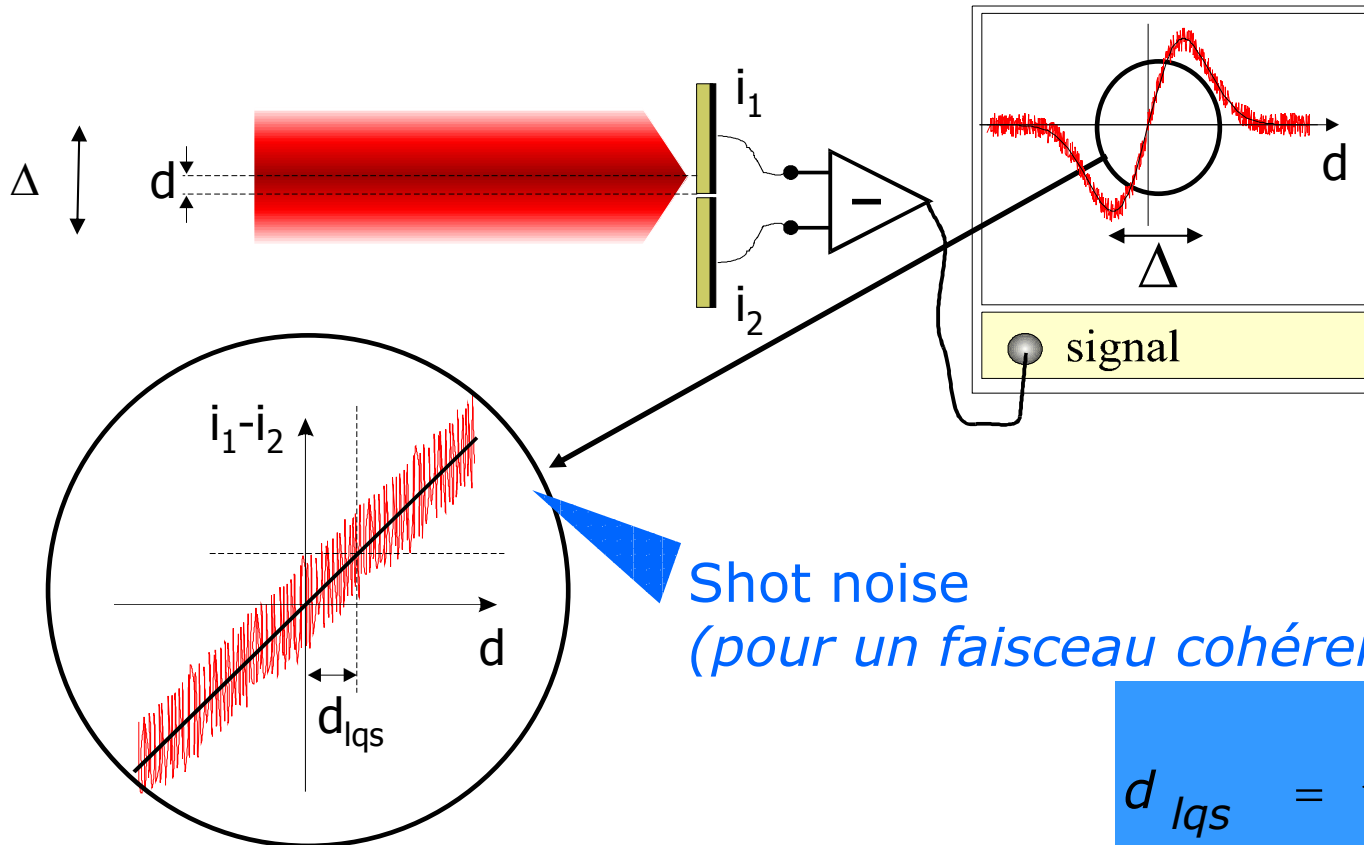


compression totalité du faisceau
=
2 (compression moitié du faisceau,



anticorrélations entre les 2 moitiés du faisceau

Mesure de petits déplacements



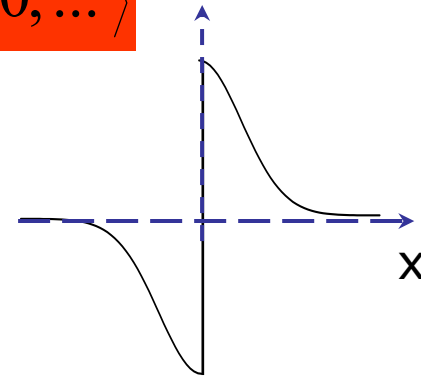
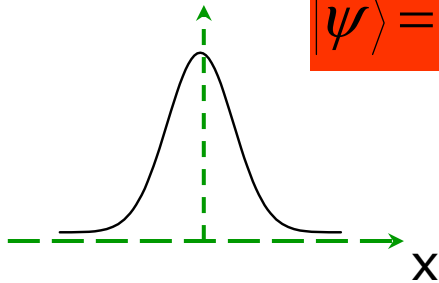
$$d_{lqs} = \frac{\Delta}{\sqrt{N}} \ll \lambda$$

- Faisceau de 3 mW
- $\Delta = 300 \mu\text{m}$
- Temps d'intégration = $10 \mu\text{s}$

$$d_{lqs} = 4 \text{ \AA}$$

état «bimode» non classique

$$|\psi\rangle = |\phi_0\rangle \otimes |\alpha_1\rangle \otimes |0, 0, \dots\rangle$$

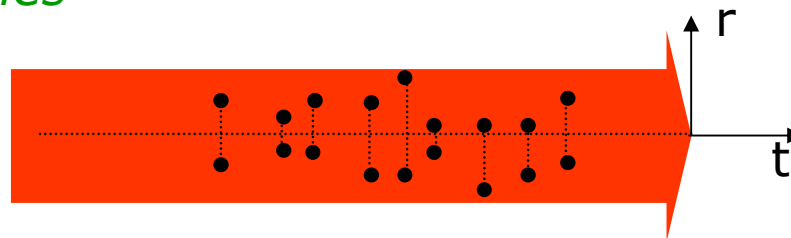


Vide comprimé monomode

*anticorrélations
entre les 2 moitiés*

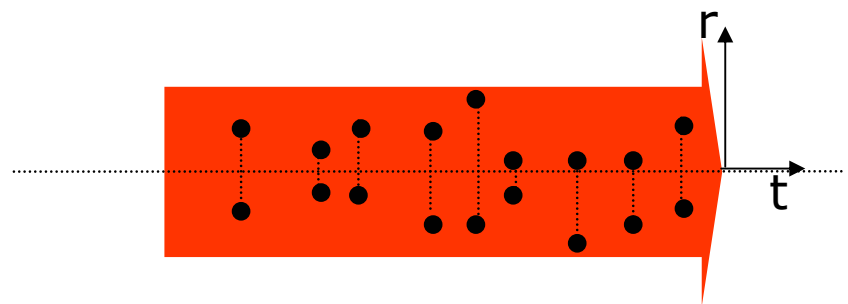
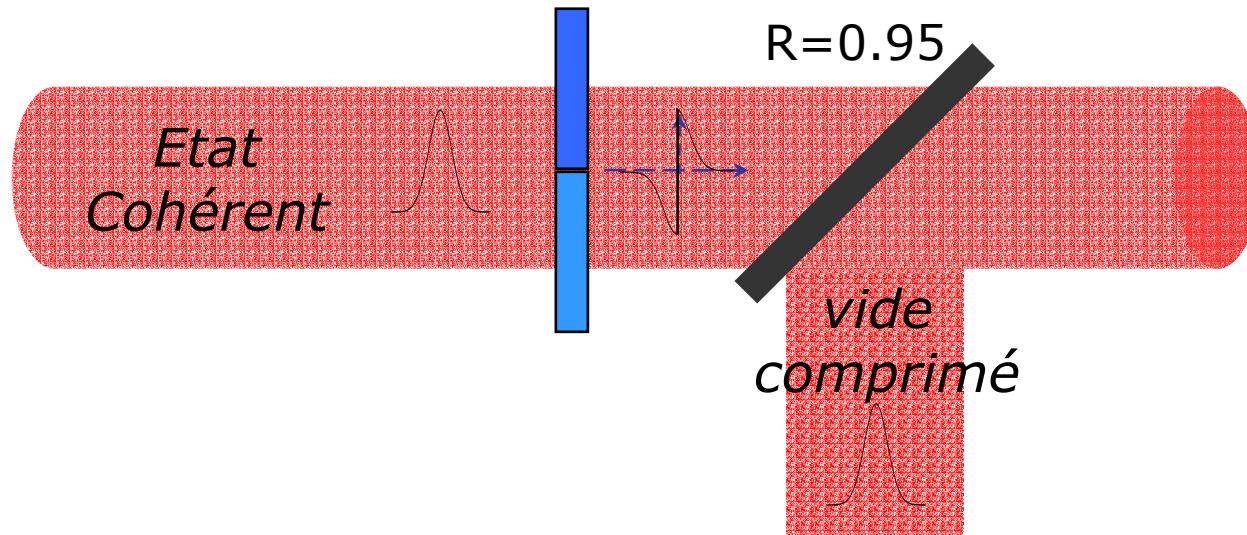


Faisceau cohérent intense
"retourné"



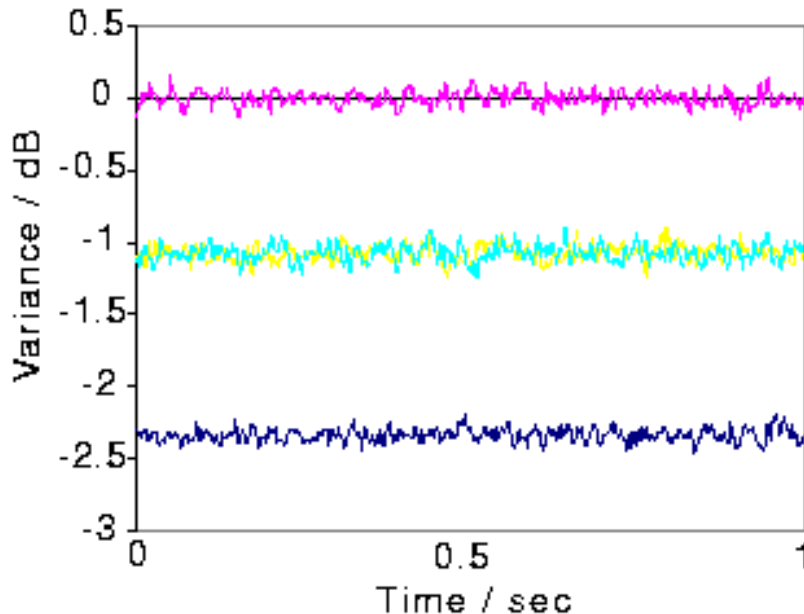
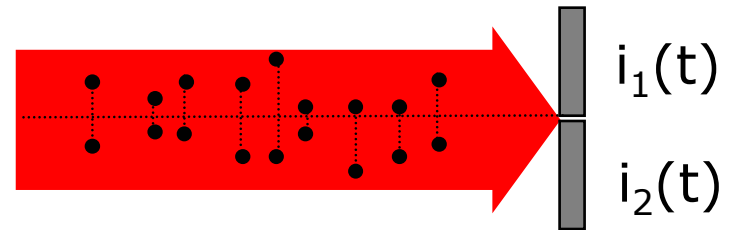
Les anticorrélations du bruit sont transformées en corrélations

Synthèse de l'état bimode



Compression et corrélations spatiales

fréquence d'analyse : 4.5 MHz



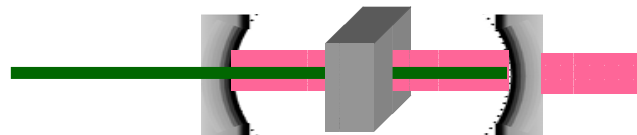
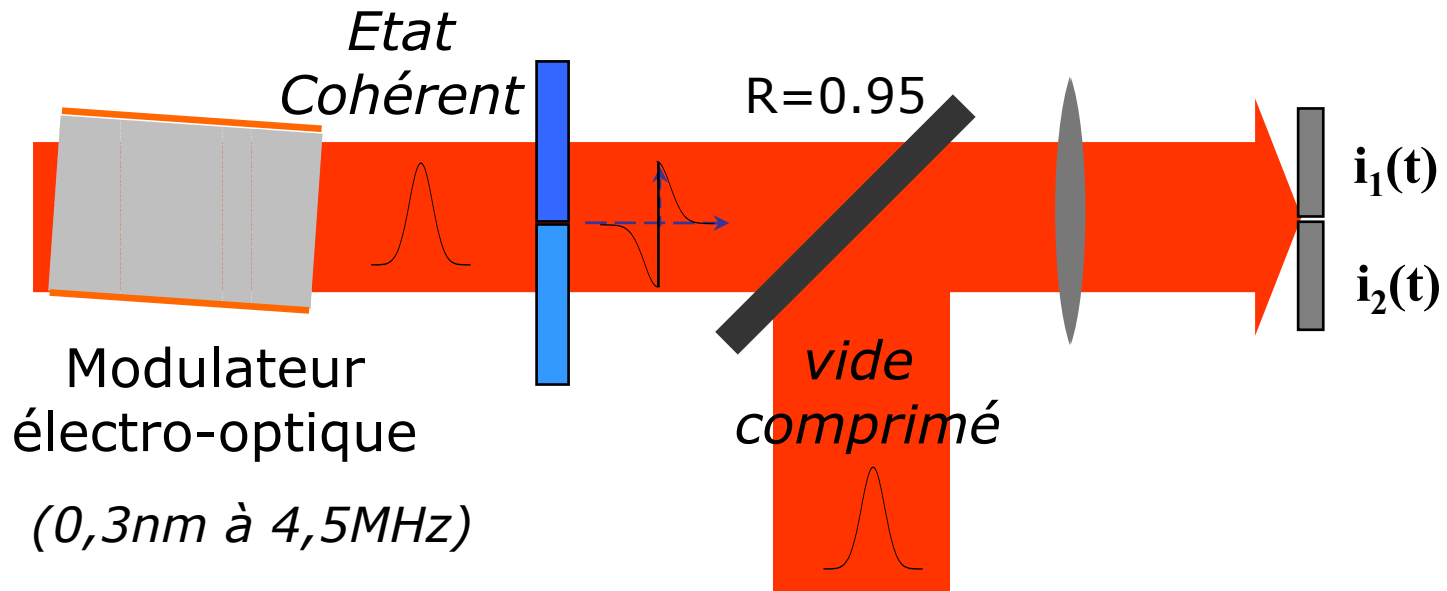
$$\text{Shot noise} = i_1(t) + i_2(t)$$

$$i_1(t) = i_2(t) \quad \mathbf{-1.08 \text{ dB}}$$

$$i_1(t) - i_2(t) \quad \mathbf{-2.34 \text{ dB}}$$

Mesure d'un faible déplacement

Schéma expérimental

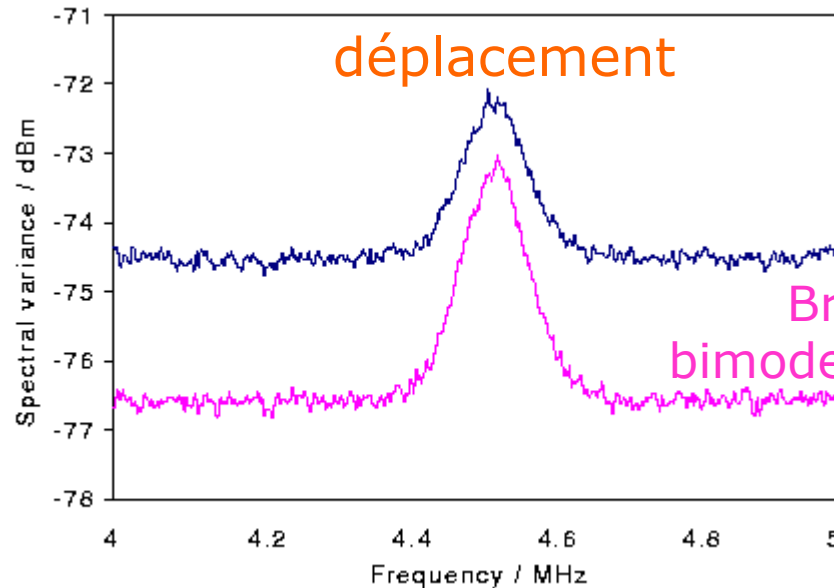


OPO sous le seuil

Mesure d'un faible déplacement

Vide cohérent
(limite quantique standard)

Vide comprimé



Shot noise

Bruit du faisceau
bimode non-classique

3 mW, Waist = 300 μ m, RBW=100 kHz, 10 acquisitions

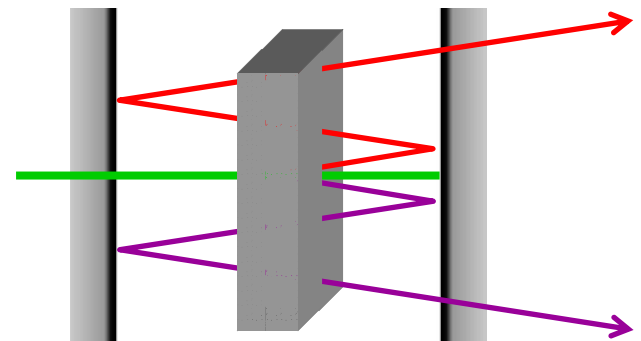
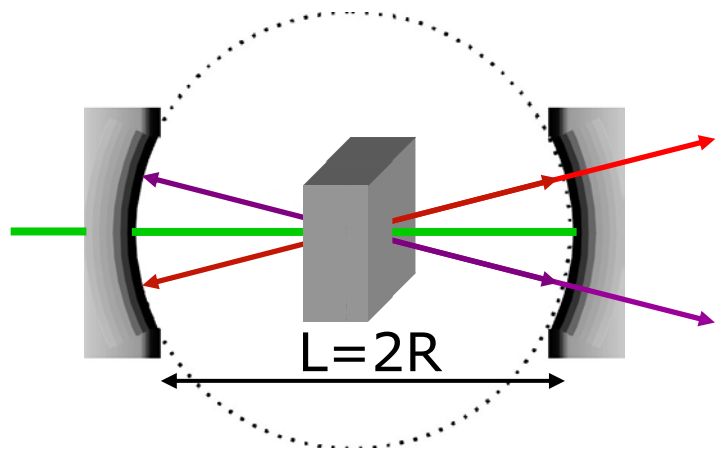
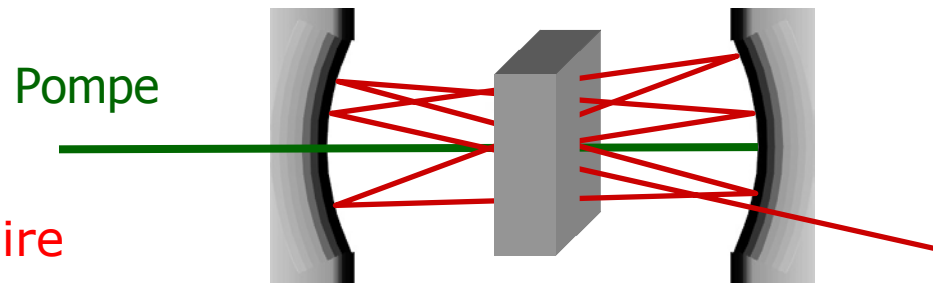
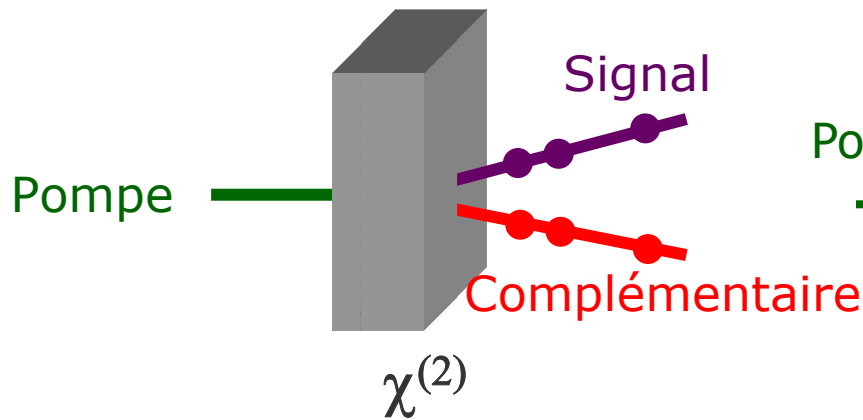
Rapport signal/bruit:

faisceau cohérent: **0,68**

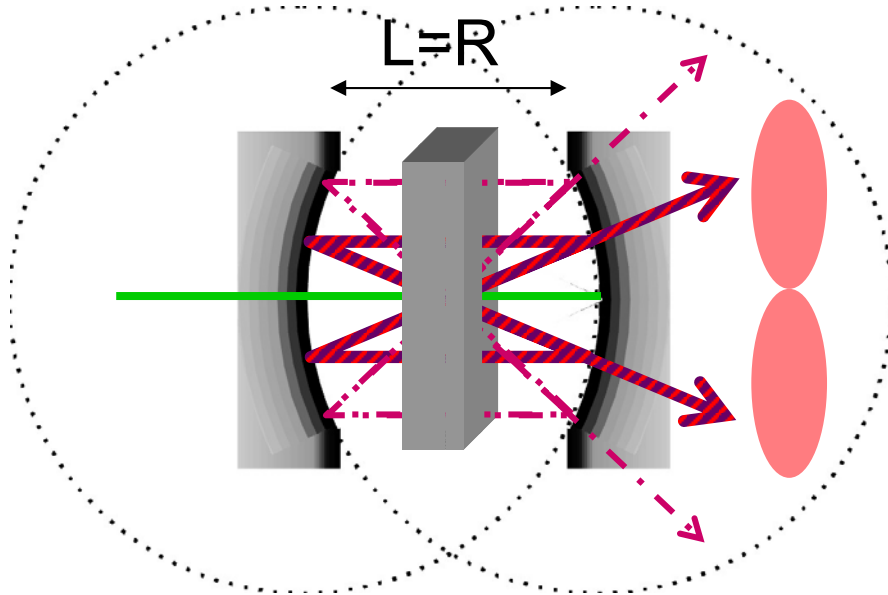
état non-classique: **1,2**

*Sensibilité améliorée de 2,3dB
par rapport à la limite quantique standard*

OPO dégénérés en modes transverses



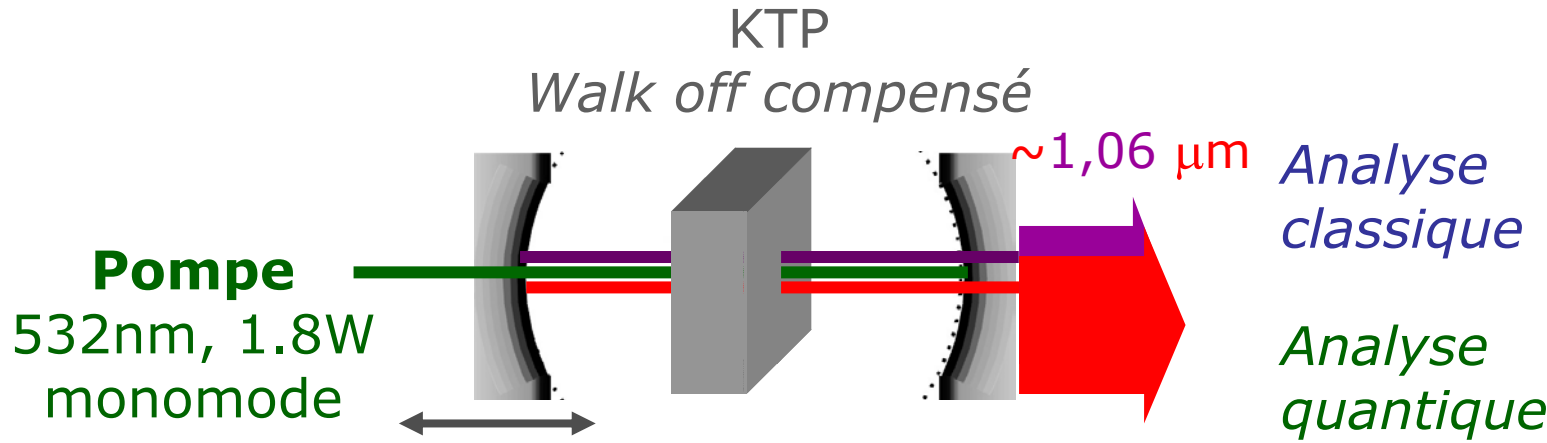
Optique quantique dans un OPO confocal



OPO confocal

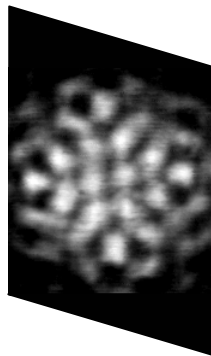
à la dégénérescence en fréquence,
sous le seuil
sur n'importe quelle zone symétrique à l'axe
compression locale du vide

Schéma expérimental



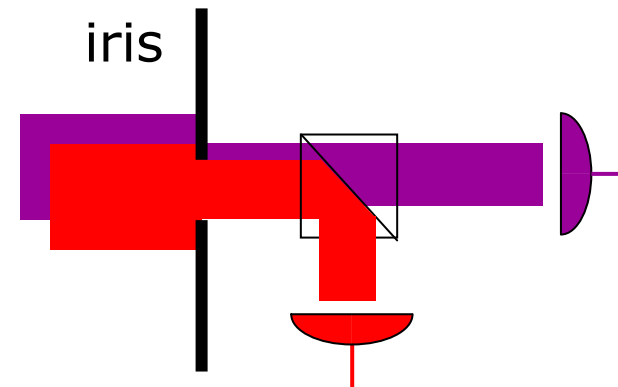
Analyse classique

Champ proche, champ lointain



Analyse quantique

distribution spatiale des fluctuations

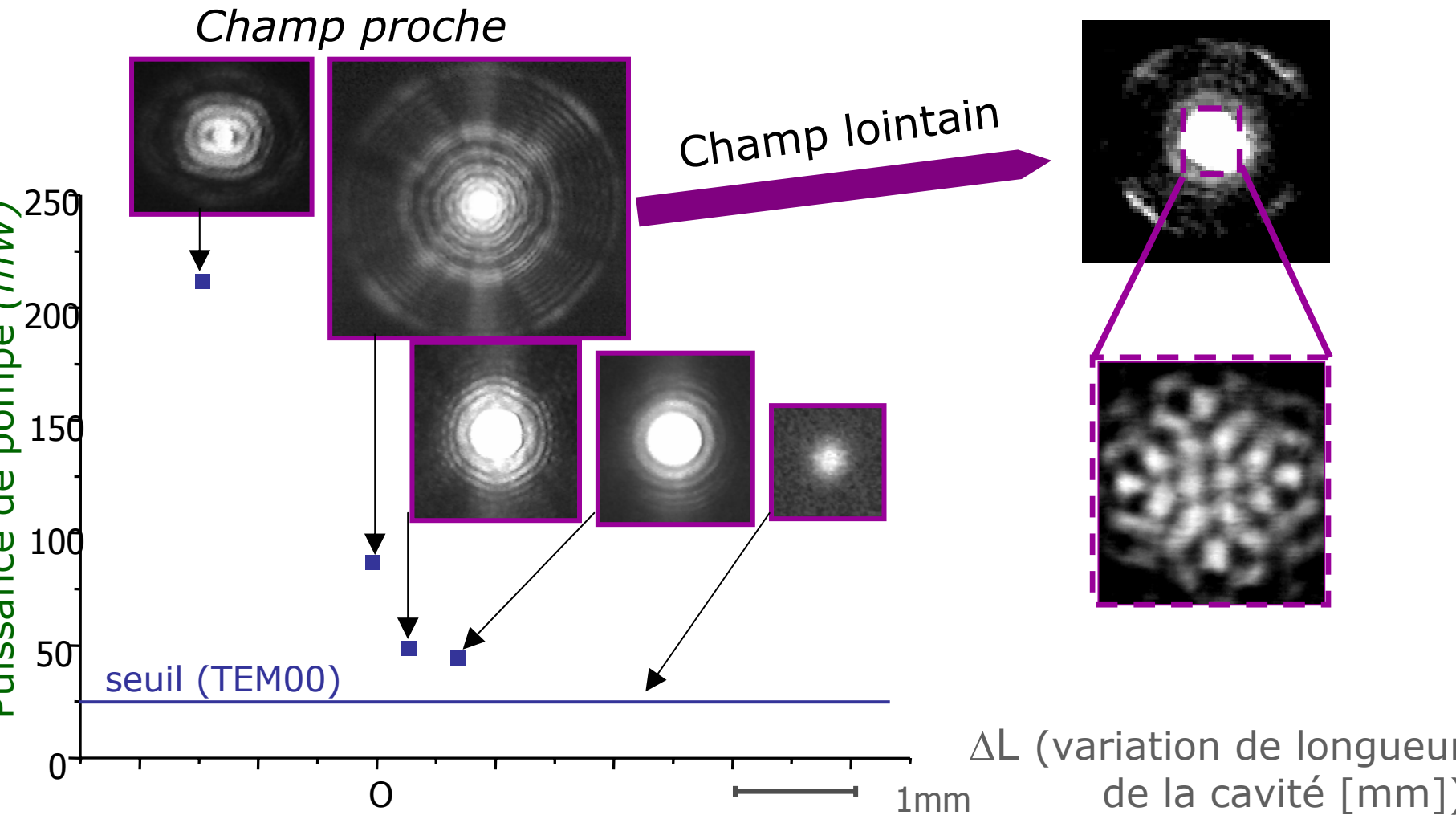


Matthias Vaupel, Sara Ducci

Nicolas Treps, Marcelo Martinelli, Sylvain Gigan

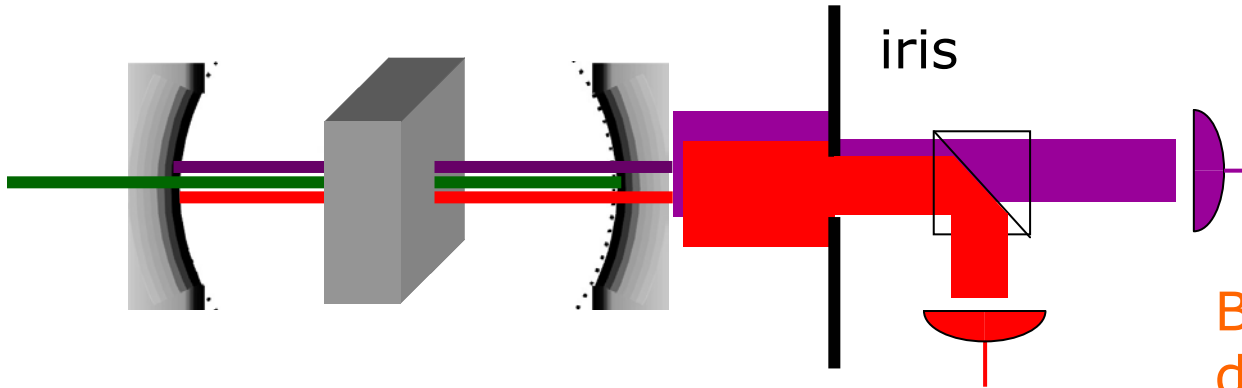
OPO quasi-confocal

seuil d'émission des structures



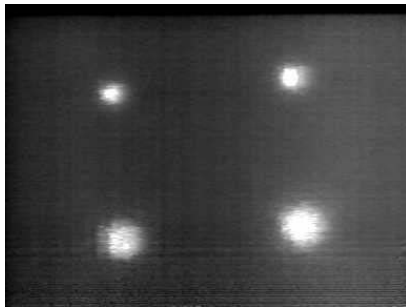
Zone de confocalité (effets thermiques)

Corrélations spatiales



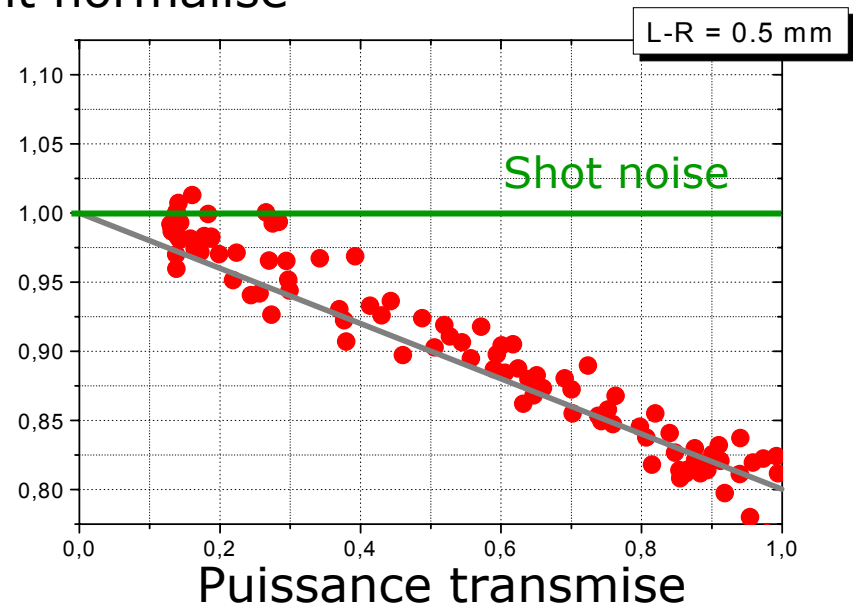
Bruit sur la différence
des intensités

Hors zone de confocalité
(*Confocal*+0,5mm)



Ligne grise: faisceau monomode
points rouges: faisceaux de l'OPO

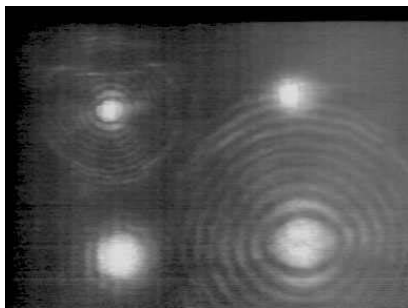
Bruit normalisé



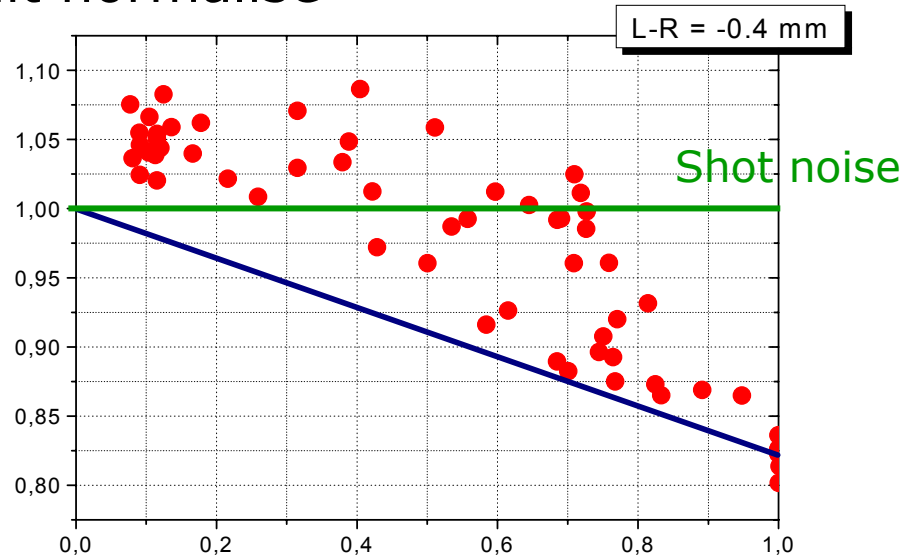
Corrélations spatiales pour un OPO quasi confocal

Dans la zone de confocalité Bruit normalisé

Confocal moins 0,4mm



Bruit normalisé



Ligne bleue: faisceau monomode
points rouges: faisceaux de l'OPO

Puissance transmise

Répartition non triviale des corrélations



La lumière émise est multimode et non classique

Optique quantique dans les OPO

Monomode

- *Optique quantique dans les OPO*
- *Spectroscopie de grande sensibilité*
- *Compression de la pompe réfléchie*

Multimode

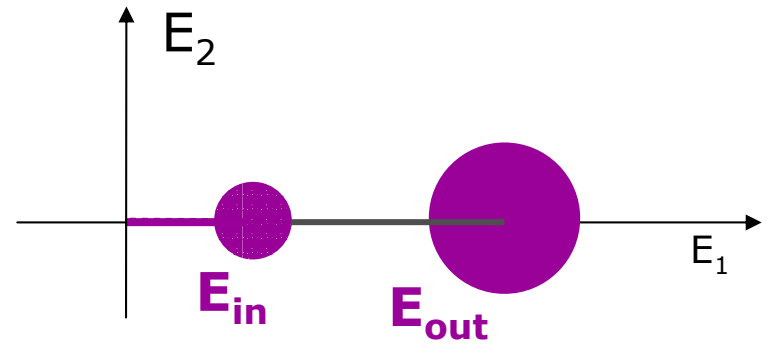
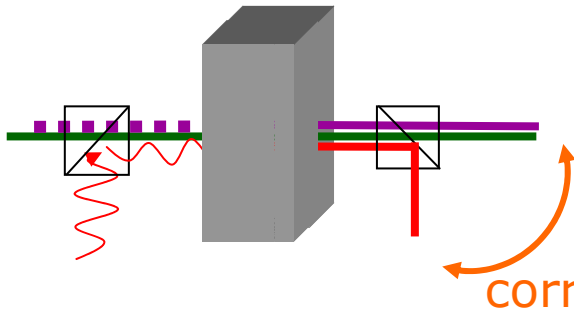
- *Distribution spatiale des fluctuations*
- *Mesure d'un faible déplacement*
- *OPO confocal*

Perspectives

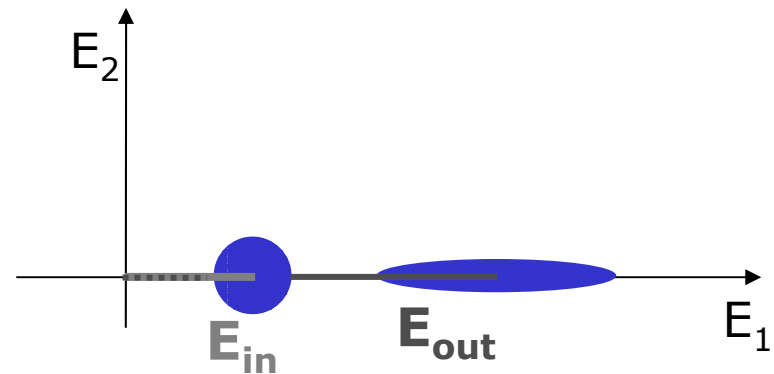
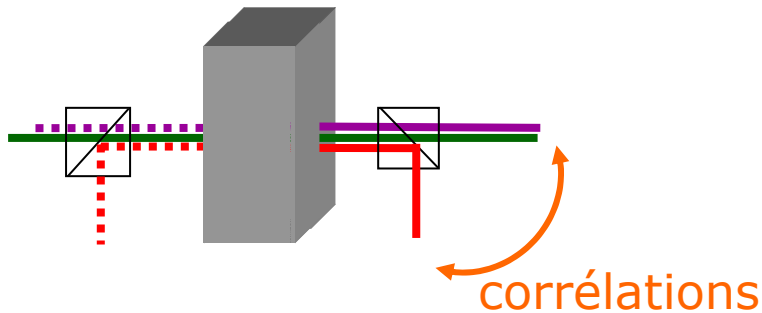
- *Amplification des images*
- *Imagerie à deux photons*

Amplification monomode sans bruit

Amplification

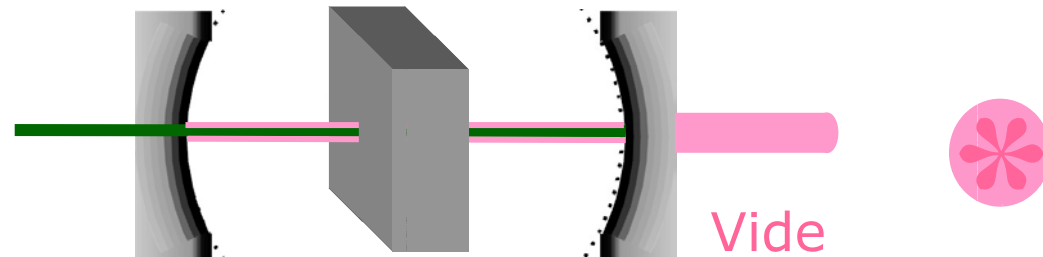


Amplification sans bruit



Amplification des images

OPO confocal sous le seuil



compression locale
Sur des zones
Symétriques/axe?

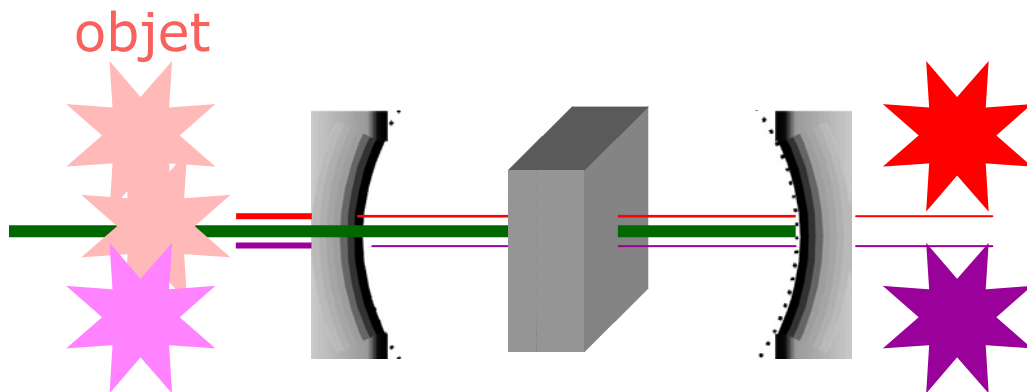


Image amplifiée
corrélacion
Image amplifiée

Amplification et amplification sans bruit

Imagerie à « deux » photons

Comptage de photons

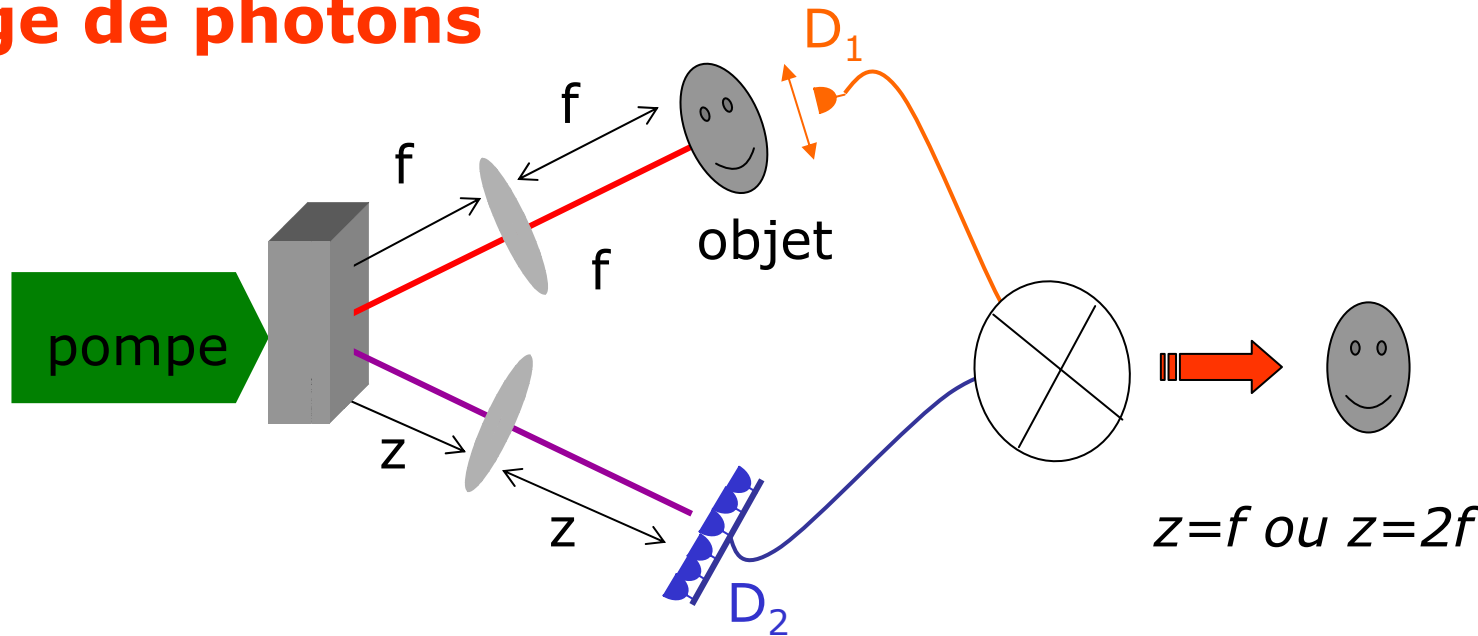


Image reconstruite à partir des coïncidences

Régime de faisceaux intenses

reconstruction à partir des corrélations

Conclusions

- OPO au-dessus du seuil

*Beaucoup de photons,
mais
non dégénérescence en fréquence
Asservissements
cavité*

- Comptage de photons

*Fluorescence paramétrique seule
mais
peu de photons*

- ❖ OPO près du seuil

*dégénérescence en fréquence
Plus contrôlable
Régime intermédiaire*

- ❖ OPO sous le seuil injecté

*Emission stimulée
Dégénérescence en fréquence
Plus contrôlable*