

Mesure de la dispersion chromatique par interférométrie quantique à deux photons

Marouane KHLIFA¹, Romain DALIDET², Sébastien TANZILLI², Laurent LABONTÉ²

¹ Master Ondes, Atomes, Matières, Université Côte d'Azur

² INPHYNI, CNRS, Université Côte d'Azur

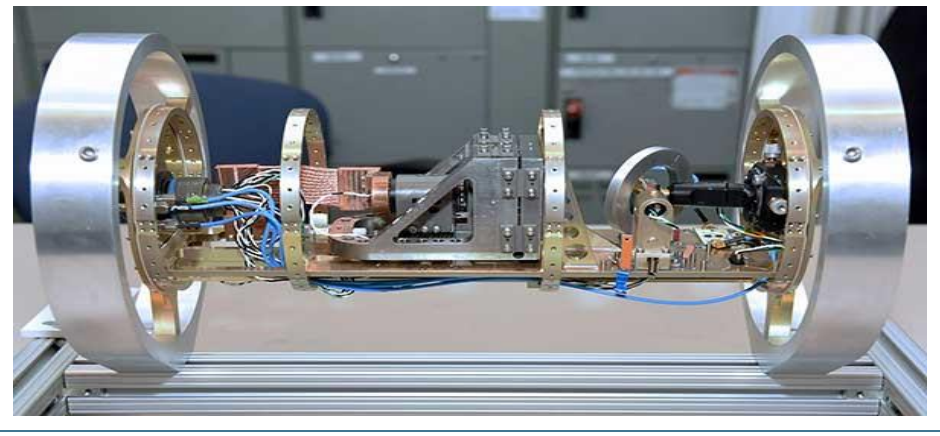
UNIVERSITÉ
CÔTE D'AZUR

Résumé

Nous exploitons avantageusement les effets d'interférence à deux photons pour effectuer une mesure de la dispersion chromatique. Nous proposons d'autant plus une méthode "plug & play" qui permet de s'affranchir de la stabilisation et de l'usage d'un spectromètre. Dans ce travail, nous avons établi le modèle théorique, développé l'expérience permettant d'aboutir à la mesure et avons validé un premier modèle.

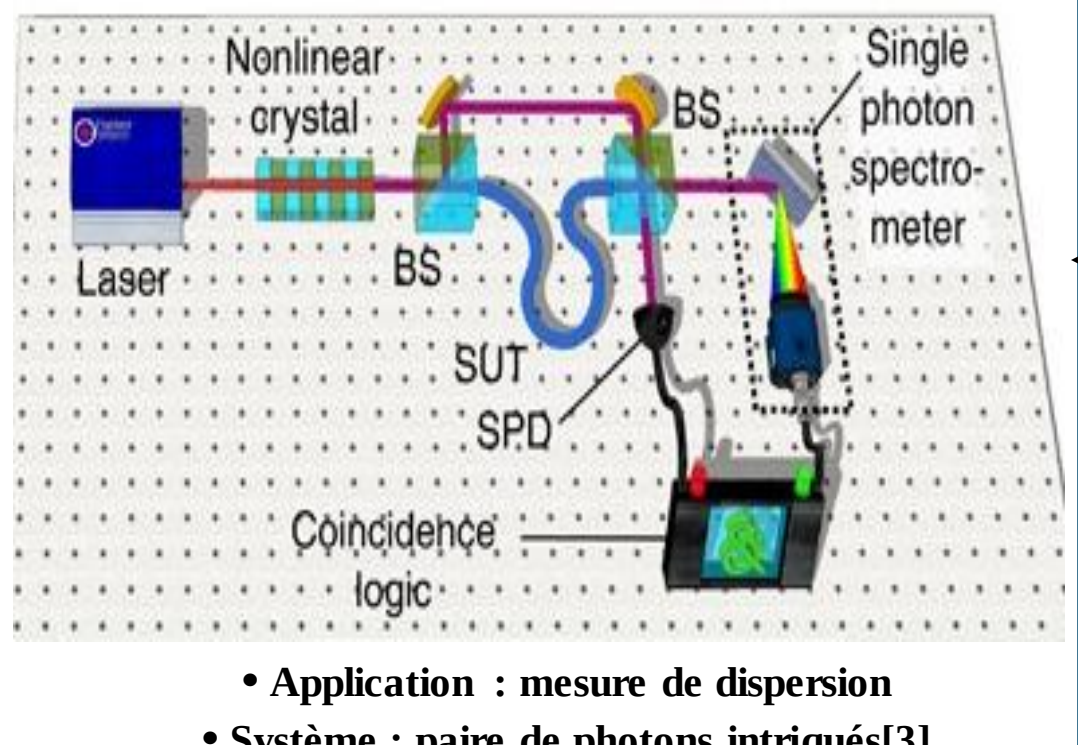
1. Contexte

Capteur champ magnétique



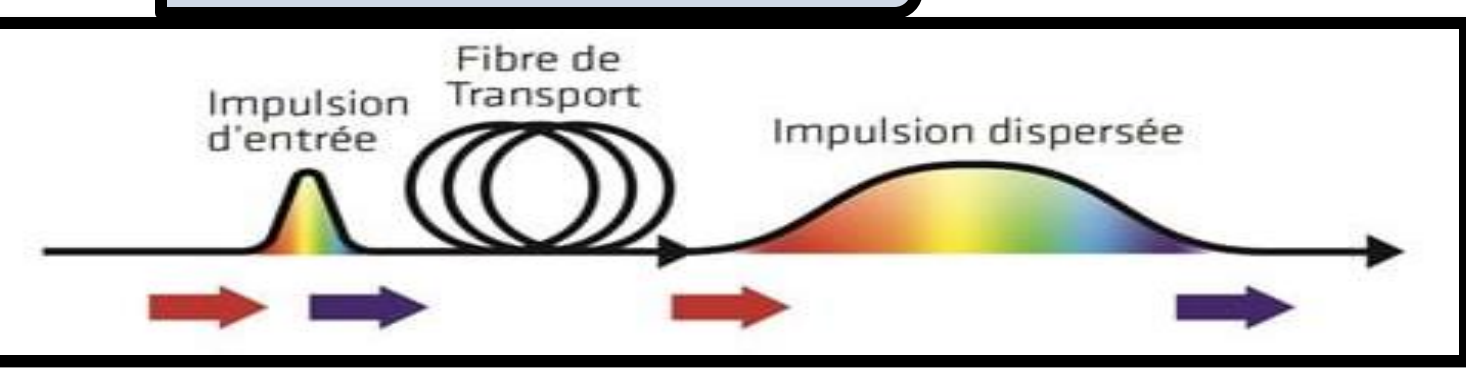
- Application: détection bio-médicale
- Système: Centre NV[1]

Interférences à 2 photons



- Application: mesure de dispersion
- Système: paire de photons intriqués[3]

Dispersion chromatique



- Objectif scientifique:

Nous proposons une méthode précise, « plug & play », pour mesurer la dispersion en s'affranchissant de l'utilisation de la stabilisation et du spectromètre.

3. Modèle théorique

$$|\Psi_{in}\rangle = \iint G(\omega_s, \omega_i) a_{\omega_s}^\dagger a_{\omega_i}^\dagger |0\rangle d\omega_s d\omega_i \xrightarrow{\text{Evolution au travers de l'interféromètre}} |\Psi_{out}\rangle$$

$$P_c = \int_{-\infty}^{+\infty} |\langle \omega_c' \omega_d'' | \Psi_{out} \rangle|^2 d\omega' d\omega''$$

$$P_c^{FR} = \int_{-\infty}^{+\infty} d\Omega |G'(\Omega)|^2 \times \cos(\Phi(\Omega) + \Phi(-\Omega))$$

- Effets de dispersion

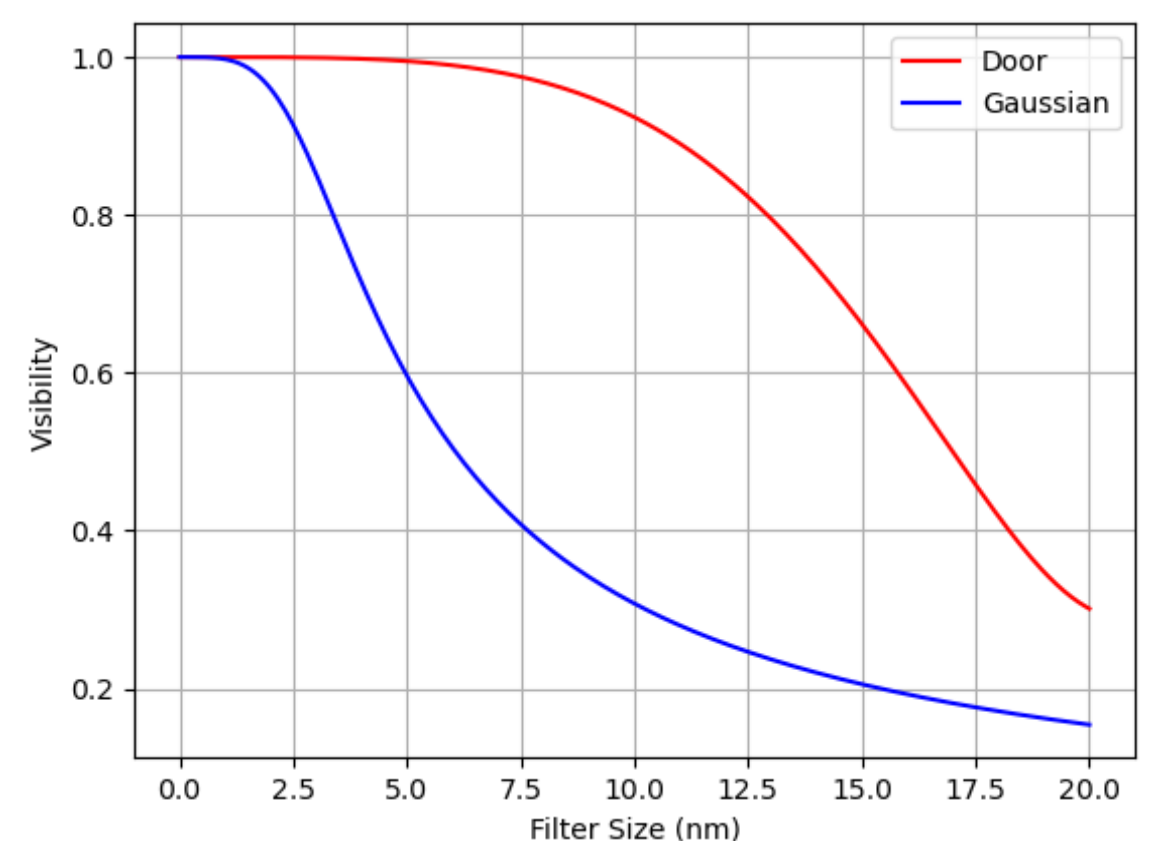
$$\Phi(\Omega) = \frac{\omega_p}{2} \tau + \Omega \tau + \frac{\beta_{tot}^{(2)}}{2!} \Omega^2 + \frac{\beta_{tot}^{(3)}}{3!} \Omega^3 + \dots$$

$$P_c^{FR} = \int_{-\infty}^{+\infty} d\Omega |G'(\Omega)|^2 \times \cos(\omega_p \tau + \beta_{tot}^2 \Omega^2)$$

$$\begin{cases} I = \int_{-\infty}^{+\infty} d\Omega |G'(\Omega)|^2 \times \cos(\beta_{tot}^2 \Omega^2) \\ J = \int_{-\infty}^{+\infty} d\Omega |G'(\Omega)|^2 \times \sin(\beta_{tot}^2 \Omega^2) \end{cases}$$

$$V_D(d) = \sqrt{I_G^2 + J_G^2} = \frac{1}{(1+d^2)^{\frac{1}{4}}}$$
$$d = \beta_{tot}^{(2)} \cdot L \cdot \delta$$

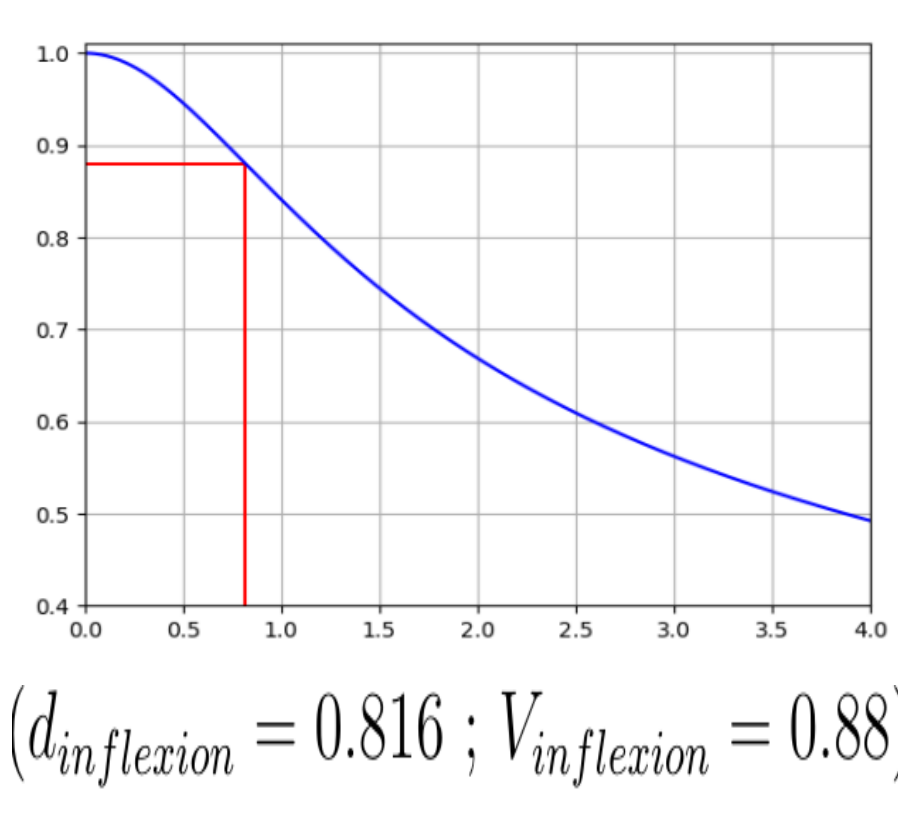
=> Expression analytique.



$$I_D = \int_{-\Omega_0}^{+\Omega_0} d\Omega \cos(\beta_{tot}^{(2)} \Omega^2)$$
$$J_D = \int_{-\Omega_0}^{+\Omega_0} d\Omega \sin(\beta_{tot}^{(2)} \Omega^2)$$

=> Exploitation numérique seulement.

On effectue la mesure pour le point d'inflexion



$$(d_{inflexion} = 0.816; V_{inflexion} = 0.88)$$

5. Résultats & discussion

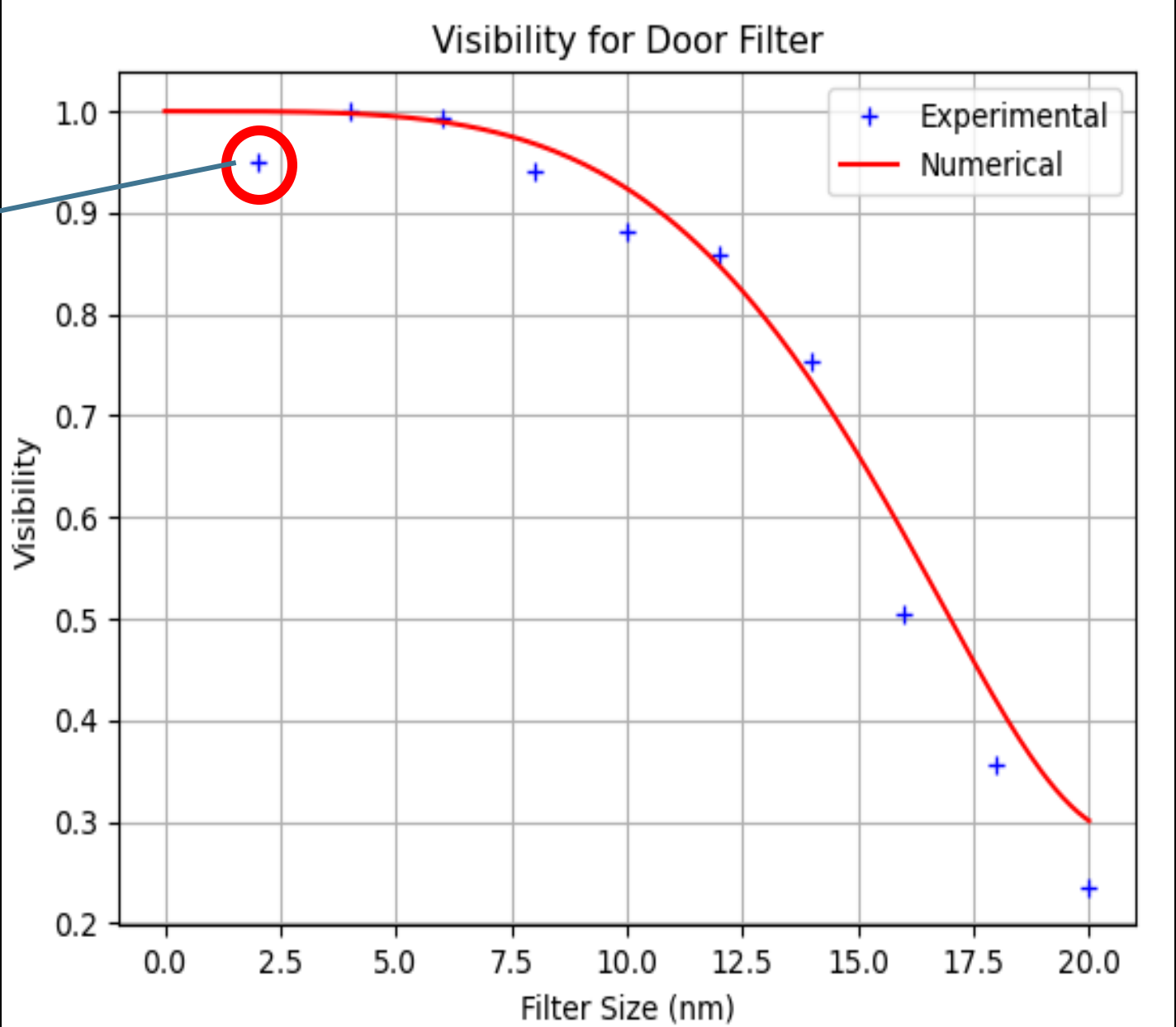
Les résultats pour filtre carré

C'est un point à la frontière entre les deux profils => chute de visibilité correspondant au filtre gaussien.

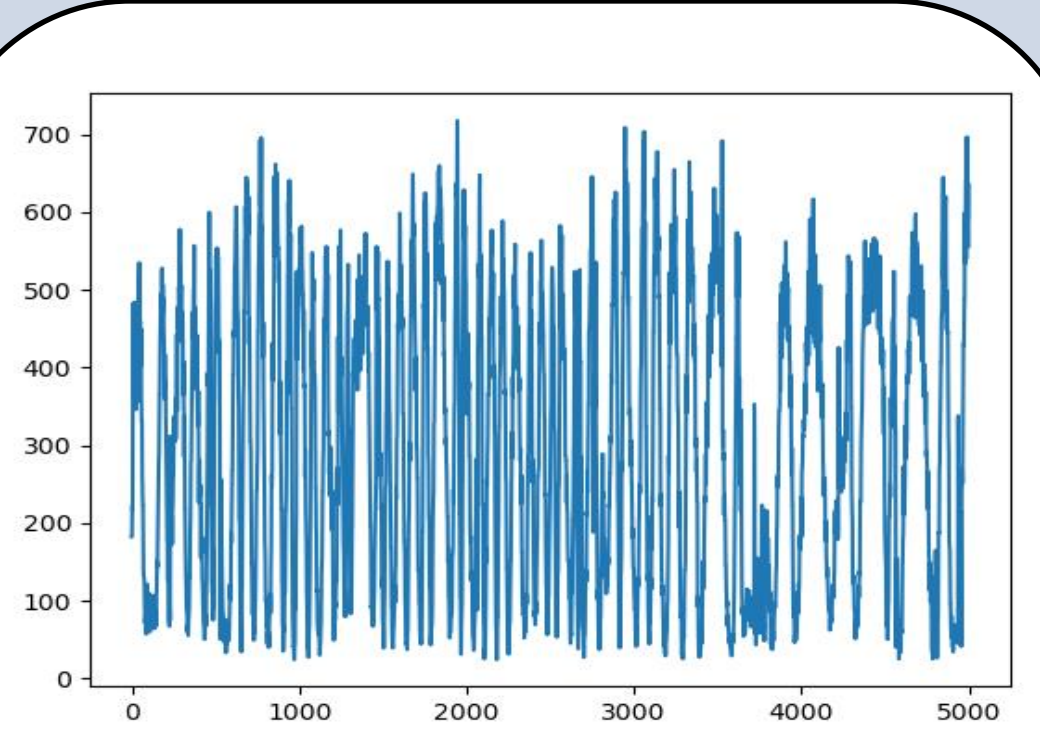
✓ Accord théorie \ manipulation.

✗ Modèle analytique.

➡ Exploitation filtre gaussien.



Les résultats pour filtre gaussien



• Après avoir isolé l'interféromètre, les oscillations restent rapides (essais en cours).
=> incapacité à extraire la valeur précise de la visibilité.

6. Conclusion & perspectives

❖ Conclusion:

- ✓ Proposer un modèle théorique pour la mesure de la dispersion chromatique pour deux types de filtres.
- ✓ Réaliser un banc expérimental pour effectuer cette mesure, sans stabilisation, sans spectromètre.
- ✓ Valider le modèle relatif au filtre d'allure carrée.

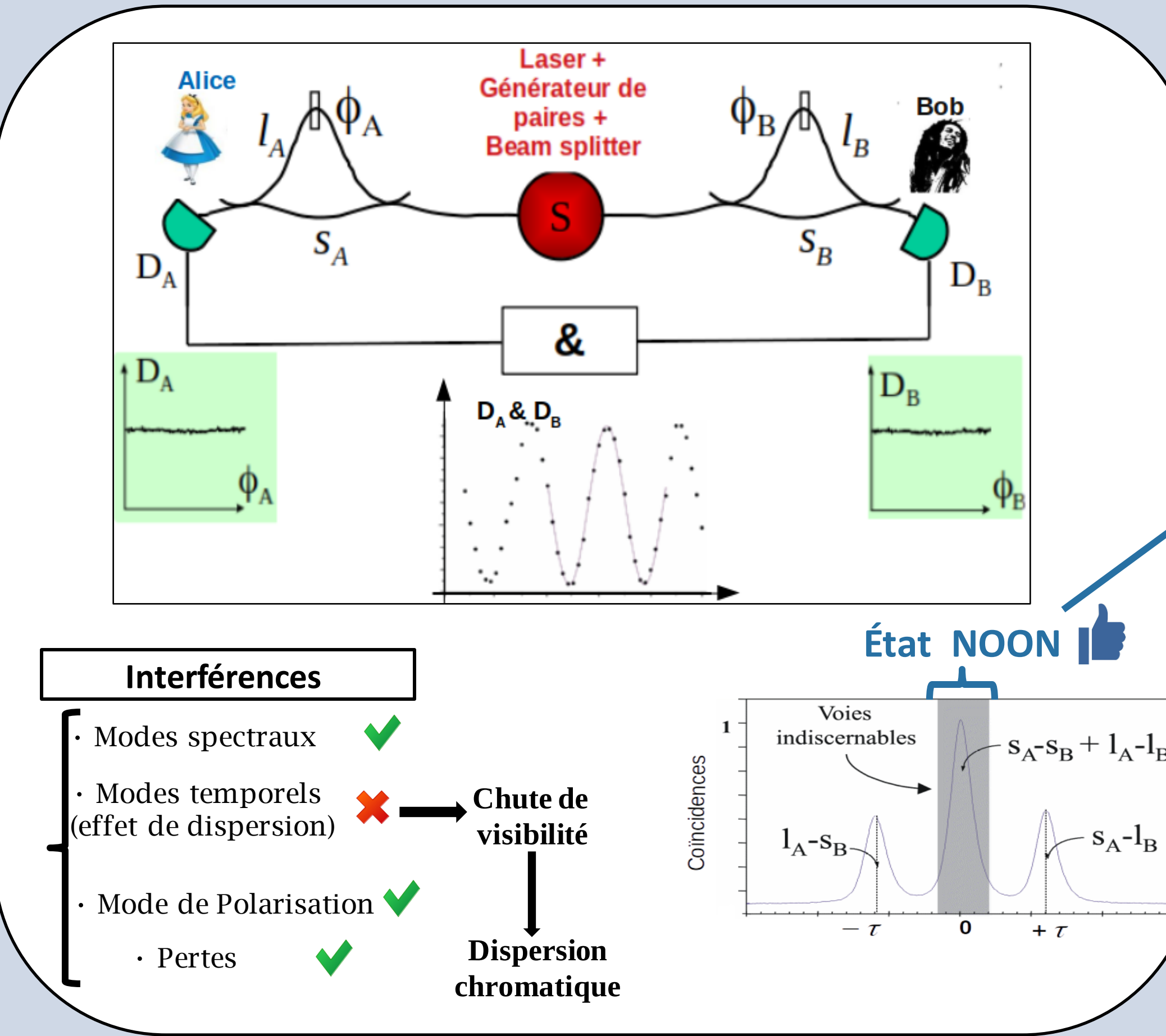
❖ Perspectives :

L'objectif de ce travail est de démontrer la faisabilité de la méthode "low cost" pour mesurer la dispersion chromatique. On peut donc envisager de :

- Réduire les fluctuations en contrôlant la température de l'interféromètre.
- Utiliser un module de pouvoir dispersif plus grand et une petite longueur pour atténuer les fluctuations.
- Utiliser une approche numérique qui exploite les résultats validés du filtre carré.

2. Principe de la mesure

❖ Génération & Analyse d'un état à deux photon intriqués

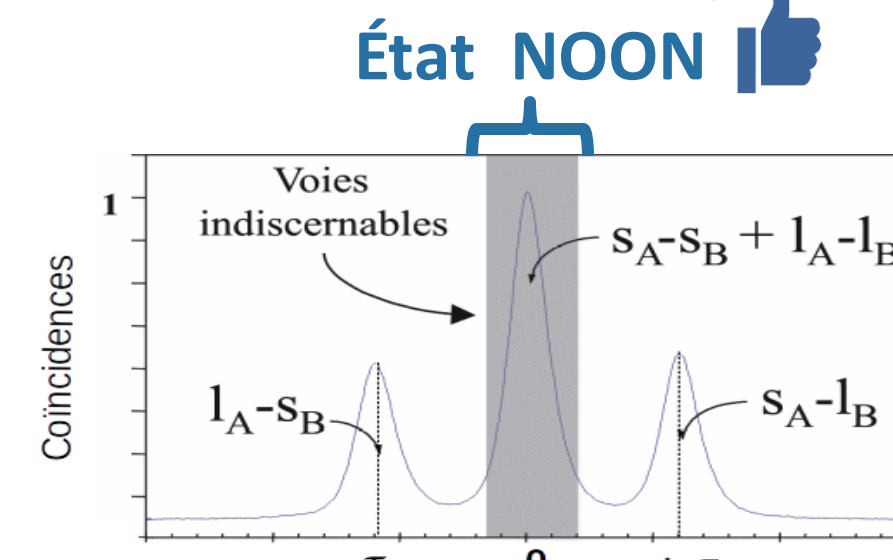


Interférences

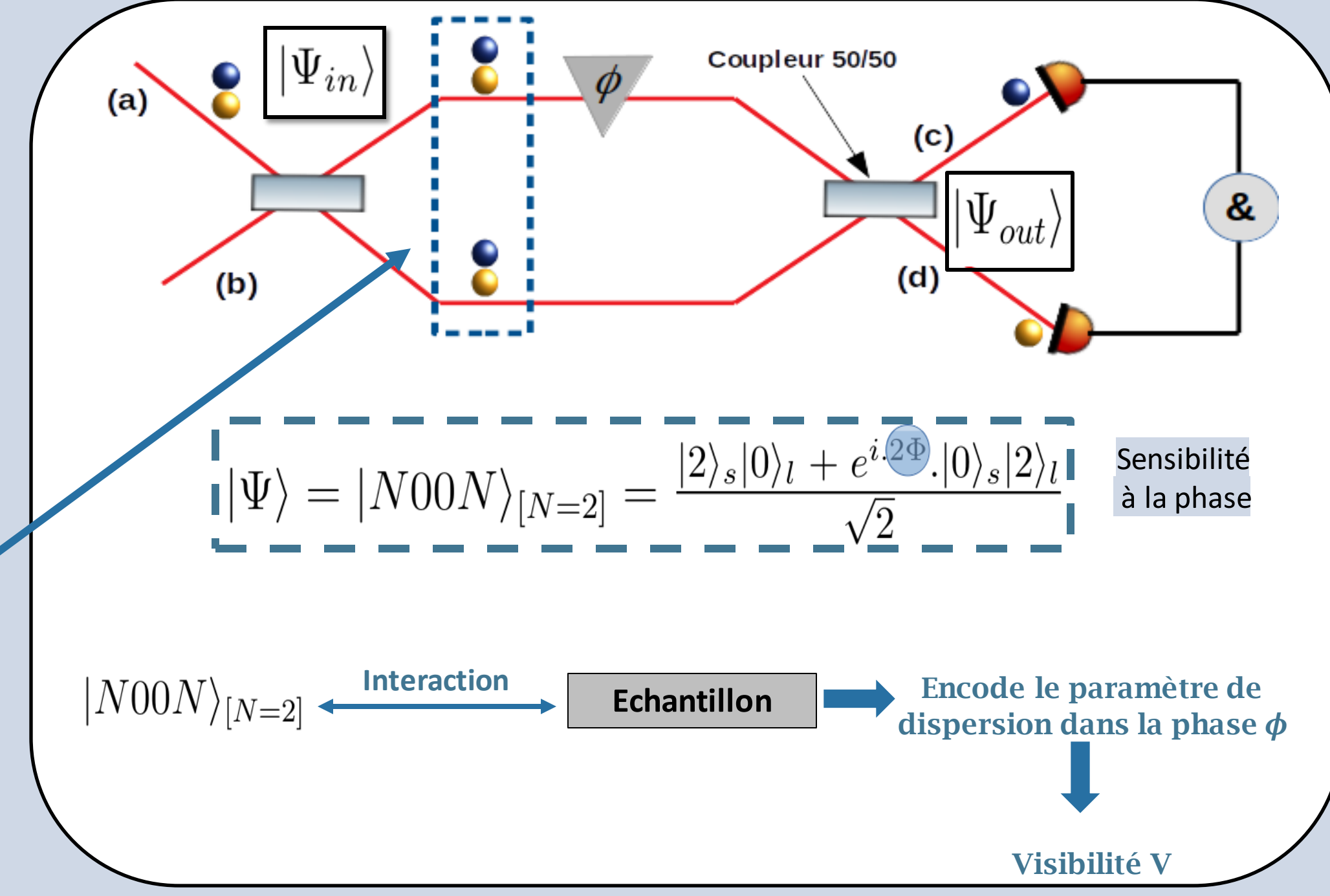
- Modes spectraux ✓
- Modes temporels ✗
- Mode de Polarisation ✓
- Pertes ✓

Chute de visibilité

Dispersion chromatique

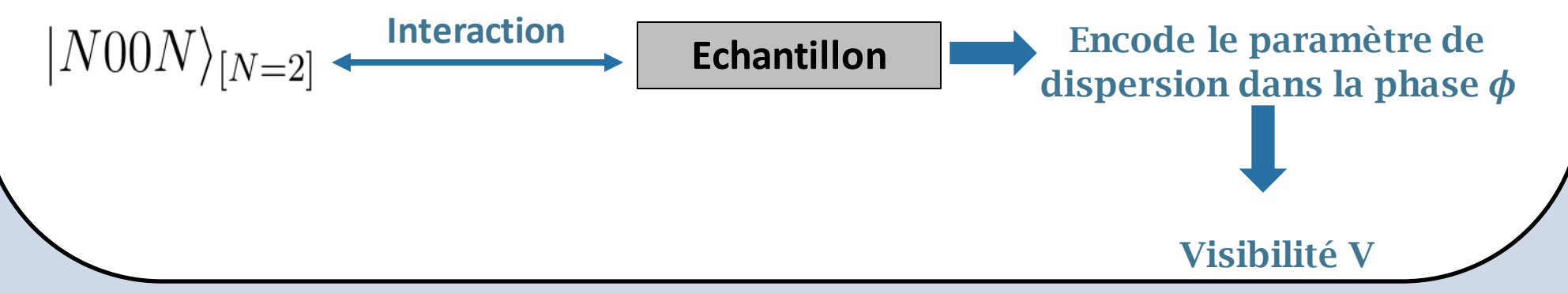


❖ Interféromètre de Franson replié



$$|\Psi\rangle = |N00N\rangle_{[N=2]} = \frac{|2\rangle_s |0\rangle_l + e^{i\frac{2\pi}{\lambda} \phi} |0\rangle_s |2\rangle_l}{\sqrt{2}}$$

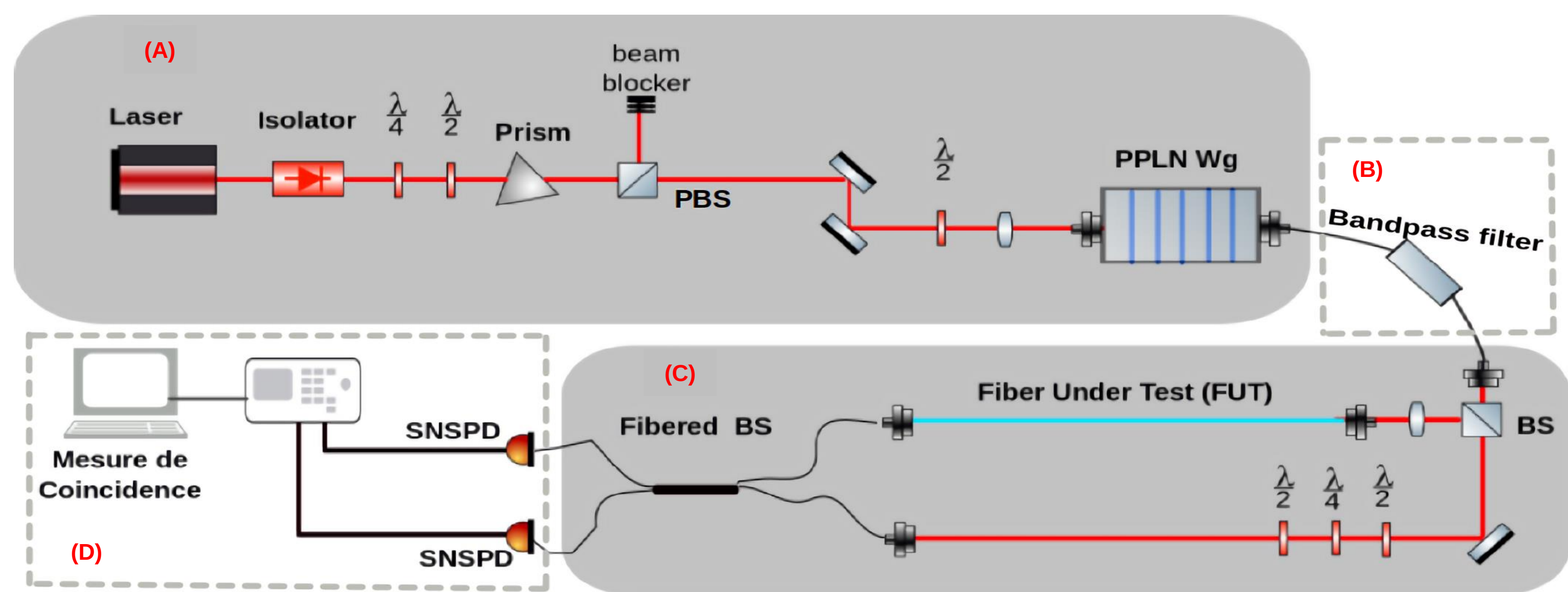
Sensibilité à la phase



❖ Etapes clés de la mesure

- Préparation des états quantiques => Paires de photons intriqués.
- Stratégie d'exploitation => Protocole de Franson.
- Acquisition et mesures => Visibilité.
- Remonter au paramètre objet de la mesure => Modèle théorique.

4. Mesures & traitement de données



(A): création de paires

(B): Filtrage

(C): Interféromètre de Mach-Zehnder en configuration Franson replié

(D): Acquisition des coïncidences

❖ Oscillations aléatoires dues aux fluctuations thermiques

• L'indice du milieu dépend de la température, donc :

Fluctuations de la température => variation de l'indice => variation de la phase => oscillations aléatoires => difficile d'extraire la visibilité directement.

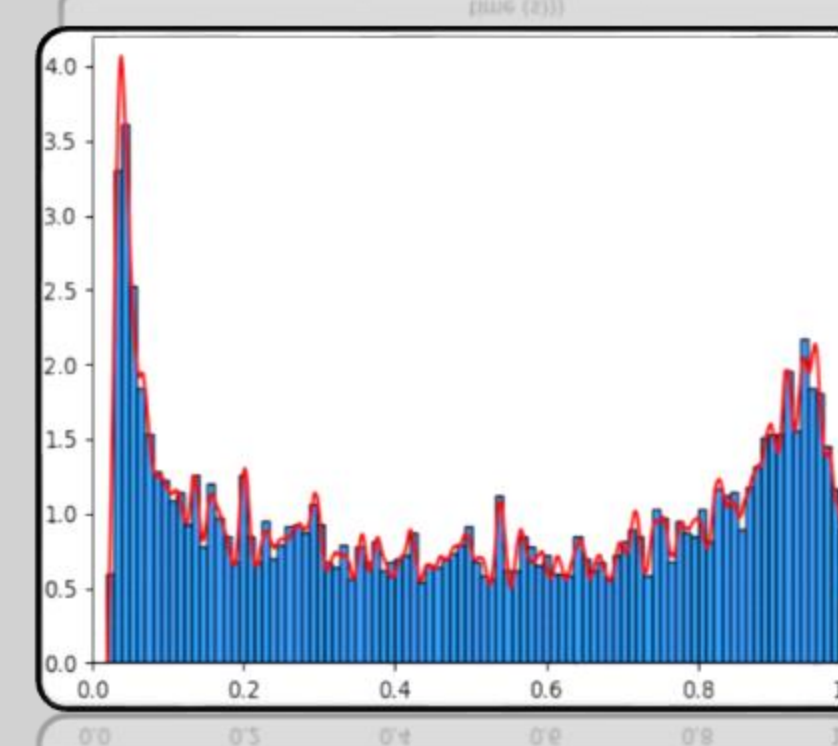
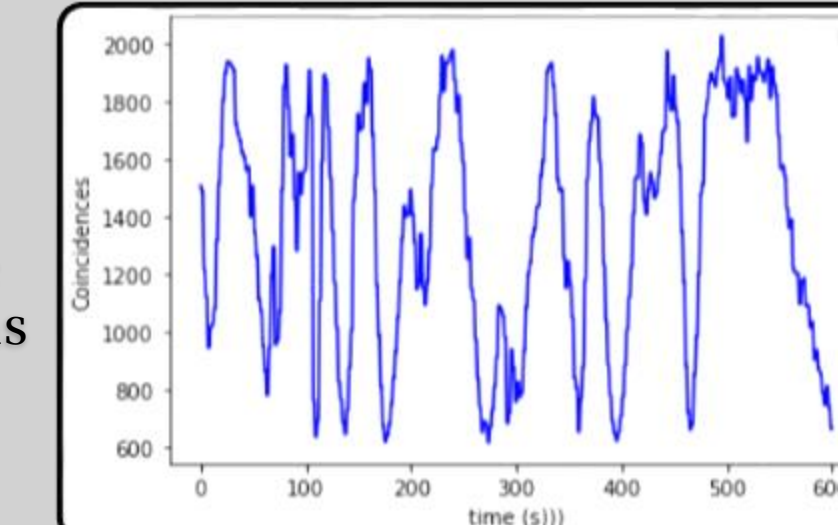
❖ Extraction statistique de la visibilité

• Tri statistique des données.

• Fitting avec l'expression de la densité de probabilité.

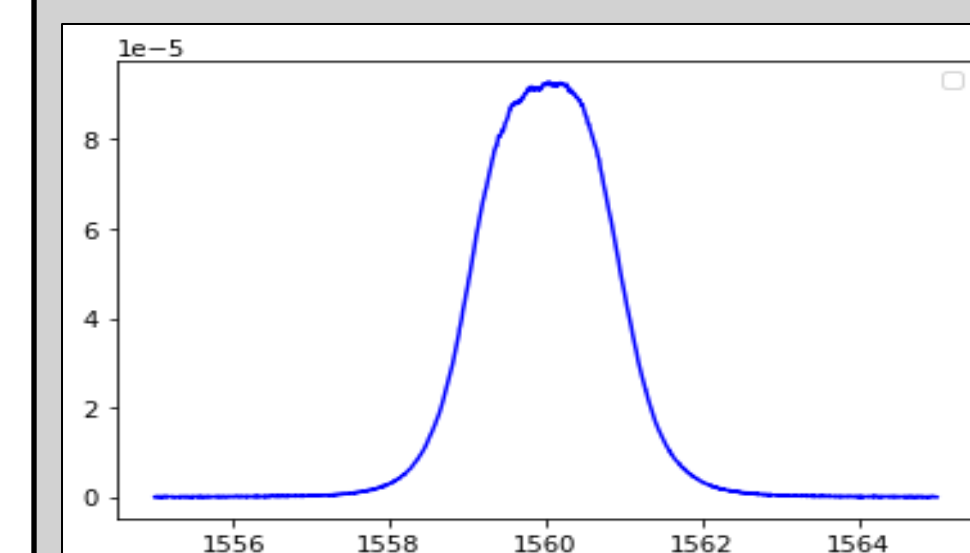
$$PFD = \frac{2}{\pi \cdot V \sqrt{1 + \frac{1 - 4 \cdot \phi^2 + 4 \cdot \phi - 1}{V^2}}}$$

Ajuster et extraire



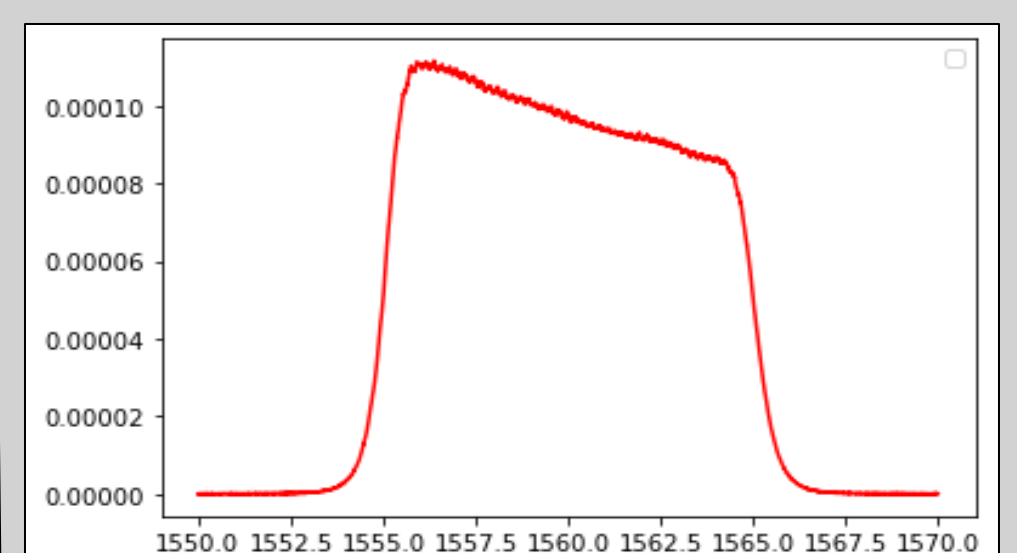
❖ Caractérisation du filtre utilisé dans la mesure

$\delta \in [0 \text{ nm}, 2 \text{ nm}]$



✗ Petite largeur de filtre
Plus grande longueur pour avoir une chute considérable de visibilité (L = 20m) :
=> Fluctuations plus rapides.

$\delta \in [2 \text{ nm}, 20 \text{ nm}]$



✓ Grande largeur de filtre
Petite longueur à utiliser L = 1m :
=> Fluctuations moins rapides.

Références

- [1] Akihiro Kuwahata et al., "Magnetometer with nitrogen-vacancy center in a bulk diamond for detecting magnetic nanoparticles in biomedical applications", Nature Scientific Reports, 10, 2483(2020).
- [2] Remi Geiger, Arnaud Landragin, Sébastien Merlet, Franck Pereira Dos Santos., "High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors", AVS Quantum Sci., 2, 024702 (2020).
- [3] Florian Kaiser, Panagiotis Verghyris, Djeylan Aktas, Charles Babin, Laurent Labonté, Sébastien Tanzilli., "Quantum enhancement of accuracy and precision in optical interferometry", Light: Science & Applications, 7, 17163 (2018).

INPHYNI
INSTITUT DE PHYSIQUE DE NICE

cnrs