

Réalisé par Clara BOKOBZA, Étienne CHAN-LAP, Arthur GUILLERME, Nathan LAGOUTTE et Darius FAROKHPEY TÉHRANI.
Encadré par Benjamin VEST, Lionel JACUBOWIEZ, Thierry AVIGNON et Cédric LEJEUNE.

Comment mettre en évidence expérimentalement les différentes statistiques de sources de photons ?

Contexte Scientifique

- Source de photons uniques à l'état solide et à température ambiante : **centre NV du diamant**.
- Mesurer la **fonction de corrélation $g^{(2)}(\tau)$** de sources de photons grâce à l'effet **Hanbury-Brown et Twiss (HBT)**.

Enjeux du Projet

- Illustrer les **3 statistiques de photons**.
- Mettre en place un **microscope confocal**.
- Utiliser un **compteur photons uniques**.
- Réaliser des **cartes de photoluminescence** de centres NV sur des échantillons de nano-diamants.
- Rédiger un sujet de TP M2-QLMN.

Démarche

- Conception et alignement du montage.
- Trouver le plan de l'échantillon (mise au point).
- Réaliser des **cartes de photoluminescence**.
- Réaliser des **mesures des taux des coïncidences** de photons pour les différentes sources utilisées.
- Tracés et analyses des **$g^{(2)}(\tau)$** .

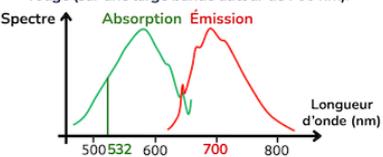
Centre NV

Un **centre NV** dans un diamant est composé d'un atome d'azote (**Nitrogen**) (impureté) et d'une lacune (**Vacancy**) au sein de la maille cristalline.

Un centre NV peut piéger un électron localement dans un cristal. Cela introduit des niveaux (électroniques) d'énergie discrets dans la bande interdite du diamant. On parle souvent d'"**atome artificiel**" pour désigner un centre NV.

Du fait de la nature cristalline du diamant, les transitions entre niveaux d'énergie sont considérablement élargies par la présence de vibrations mécaniques de la maille cristalline (mode de **phonons**). Cela correspond à un décalage Stokes.

Dans le cadre de cette expérience, nous excitons les centres NV avec un **laser vert (532 nm)** et récupérons la fluorescence dans le rouge (sur une large bande autour de 700 nm).



Microscopie

Objectif x100 très ouvert (ON = 0.95).
Échantillon sur une cale piézo pour carte de fluorescence.

Excitation des centres NV

LASER Vert (532 nm) contrôlé en puissance pour pomper l'échantillon de centre NV.

Séparatrice fibrée 50:50

Effet HBT - Analyse de la statistique de source de photon.

Source Pseudo-Thermique

Reproduit les propriétés d'une source thermique (lampe spectrale/ corps noir) avec un LASER (633 nm) grâce au dépoli tournant.

Dépoli Tournant

La focalisation du LASER sur le dépoli permet d'agrandir les grains de speckle pour n'en injecter qu'un dans la fibre. La rotation du dépoli fait fluctuer aléatoirement la phase du speckle. Cela brise la cohérence et engendre un regroupement de photons (**bunching**).

Lumière Blanche

Mise au point de l'échantillon (caméra).
Imagerie champ large.

Filtre Dichroïque

Réfléchit la pompe (verte 532 nm) et transmet la fluorescence (rouge).

Confocal

Limite le flux collecté à celui provenant strictement du volume excitée.

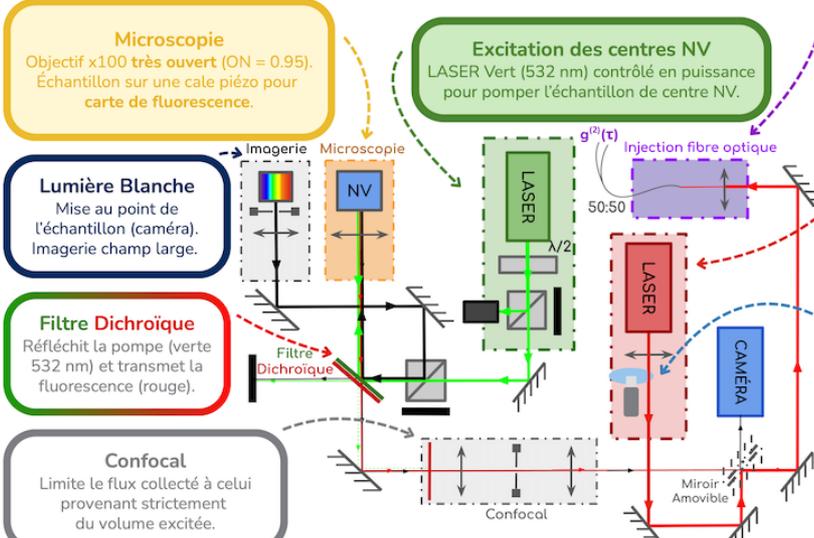
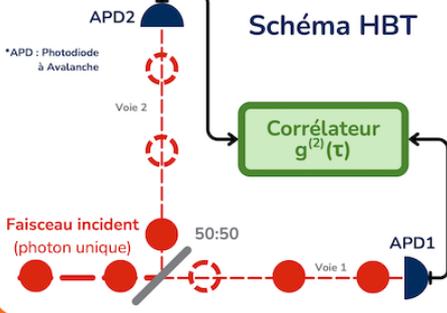


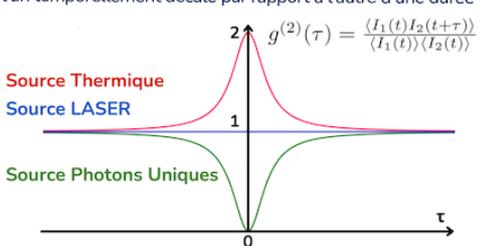
Schéma HBT

*APD : Photodiode à Avalanche



Fonction de Corrélation $g^{(2)}(\tau)$

Compare le signal du détecteur 1 avec le signal du détecteur 2, l'un temporellement décalé par rapport à l'autre d'une durée τ .

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_1(t)I_2(t+\tau) \rangle}{\langle I_1(t) \rangle \langle I_2(t) \rangle}$$


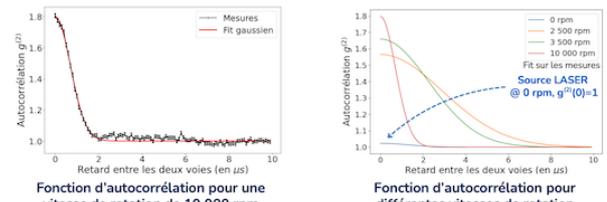
Interprétation

- Si $g^{(2)}(0) > 1$, regroupement de photons (**bunching**), corrélation positive entre les détecteurs (caractéristique des sources incohérentes).
- Si $g^{(2)}(0) = 1$, flux décorrélé entre les détecteurs. (caractéristique d'une source poissonnienne type LASER).
- Si $g^{(2)}(0) < 1$, anti-corrélation, typique des sources de photons dégroupés (**anti-bunching**), par exemple, une source de **photons uniques**.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

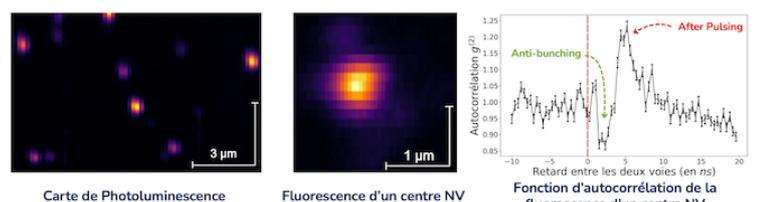
Source Pseudo-Thermique

- Mesures réalisées au corrélateur puis traitement des données pour obtenir un $g^{(2)}(\tau)$ caractéristique d'une **source thermique**.
- Le **temps de cohérence** de la source est inversement proportionnel à la vitesse du dépoli au niveau du spot laser. plus la vitesse est élevée, plus la cohérence du laser est brisée et plus le phénomène de **bunching** est important : $g^{(2)}(0) \sim 2$.



Source de Photons Uniques

- Carte de **photoluminescence** de l'échantillon de poudre de nano-diamants contenant des centres NV.
- Localisation d'un **centre NV** et optimisation du rapport signal sur bruit avec la **microscopie confocale** (trou confocal) & **asservissement en position** des cales piézoélectriques.
- Acquisition d'un $g^{(2)}(\tau)$ caractéristique d'une **source de photons uniques**.



Limites - Ouverture

- Influence de la polarisation de la pompe sur la fluorescence des centres NV.
- Concentration des nano-diamants.
- Installer la sécurité LASER pour le TP.
- Finir la rédaction du sujet de TP 3A-QLMN.

Impact Environnemental

Majorité du matériel réutilisé



11 191 kg CO₂ éq

Références

- Measurement of the second-order coherence of pseudothermal light, Tom A. Kuusela (2017).
- Photon Counting Statistics - Undergraduate Experiment, P. Koczyk et AL (1995).
- Photon antibunching in the fluorescence of individual colored centers in diamond, R. Tualle-Broui et AL (2000).
- Harnessing individual NV centers with a compact and portable confocal microscope, I. Panadero et AL (2024).

