

Rapport de stage de fin de L3 : L'expérience de Grangier, Roger et Aspect - Etude des fonctions de corrélation.

Claire Teulon

Juin 2010

1 Présentation

1.1 Laboratoire d'accueil

J'ai effectué mon stage de fin de L3 au service des Travaux Pratiques de l'Institut d'Optique Graduate School, à Palaiseau, sous la direction de Lionel Jacubowicz, responsable du service. J'ai travaillé en partie avec Emmanuel Rousseau, post-doctorant à l'Institut, qui m'a beaucoup aidé à comprendre et à régler l'expérience, dans les premiers temps. D'autre part, j'ai souvent eu affaire à Thierry Avignon et Cédric Lejeune, techniciens du service des TP, qui m'ont aidé à résoudre tous les problèmes matériels.

1.2 Objectif du stage

Au départ, je devais travailler sur une expérience de plasmons de surface : le principe est d'envoyer un faisceau laser sur un réseau permettant de générer efficacement des plasmons de surface. Une fois créé, le plasmon se propage vers la droite ou vers la gauche jusqu'à une large fente où il se recouple en onde radiative. On peut ensuite mesurer le facteur de corrélation entre les photons sortant de ces deux fentes, et on peut voir ce qui se passe si on envoie des photons uniques. On peut aussi étudier ce que l'on obtient lorsqu'on fait interférer des plasmons de surface générés par des photons uniques.

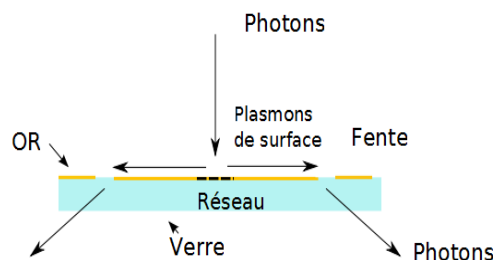


FIGURE 1 – Schéma de l'expérience sur les plasmons de surface

L'objectif de mon stage a finalement été de mettre en place une expérience de mesure de corrélation similaire à celle de Grangier, Aspect *et al.* de 1986, dans le but de tester le comportement de la nouvelle carte de comptage des coïncidences et d'améliorer notre source de photons uniques pour une utilisation future dans l'expérience des plasmons de surface.

2 L'expérience de Grangier, Roger et Aspect de 1986 - étude des fonctions de corrélation.

2.1 Présentation de l'expérience

Cette expérience s'intéresse à un aspect du comportement quantique de la lumière : dans quel cas la lumière se comporte-t-elle comme une onde (cas classique), comme une particule (cas quantique) ? Grangier, Roger et Aspect ont montré que dans le cas d'une source de photons uniques, ceux-ci se comportaient comme des particules ou comme une onde selon l'expérience considérée.

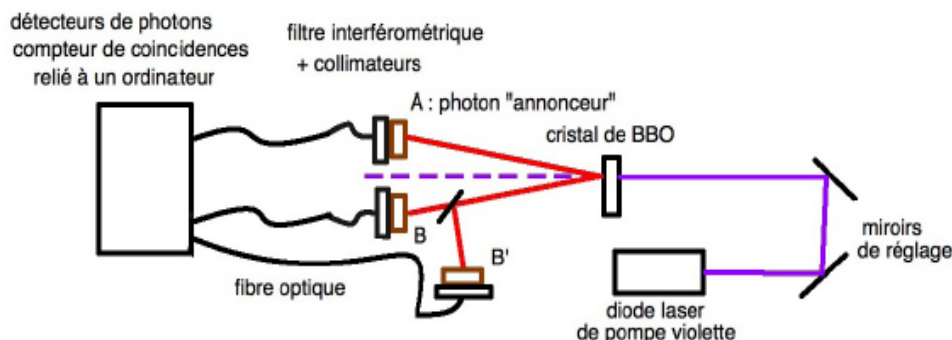


FIGURE 2 – Schéma du montage

Montage Une diode laser émet des photons de longueur d'onde 405nm, qu'on focalise sur un cristal non linéaire. Une partie des photons incidents donnent alors naissance, par conversion paramétrique spontanée, à une paire de photons jumeaux vérifiant deux conditions :

- il y a conservation de l'énergie : on choisit les deux photons émis de longueur d'onde 810nm
- la somme des vecteurs d'ondes des deux photons émis est égale au vecteur d'onde du photon incident

On détecte ensuite l'un des deux photons jumeaux, le photon 'annonceur' sur un détecteur A, et on envoie l'autre sur un cube séparateur (50/50) : il peut arriver soit sur un détecteur B, soit sur un détecteur B'. Ces trois détecteurs sont des photodiodes à avalanche : elles envoient un pulse d'une longueur de l'ordre de 25 ns à l'arrivée d'un photon. Techniquement, on peut compter jusqu'à $N_A = 1,3 \cdot 10^6$ coups par seconde sur A (à la puissance maximale de la diode laser) et de l'ordre de $N_B = 800000$ coups par seconde sur B et $N_{B'} = 500000$ coups par seconde sur B'. Les impulsions sont ensuite envoyés vers une carte d'acquisition, qui compte les coïncidences par seconde N_{AB} , $N_{AB'}$ ou $N_{ABB'}$ entre les différents détecteurs.

Le paramètre que nous étudions ici est la fonction de corrélation avec trois détecteurs $g_2(\tau)$, τ étant l'éventuel retard introduit sur la voie B'. On définit $g_2(\tau)$, tout d'abord pour deux détecteurs, par

$$g_2(\tau) = \frac{\langle I_B(t) \rangle \langle I_{B'}(t + \tau) \rangle}{\langle I_B(t) I_{B'}(t + \tau) \rangle}$$



FIGURE 3 – Photo du montage

Cas classique Dans le cas classique, puisqu'on a un cube séparateur 50/50, on a $I_B(t) = I_{B'}(t) = \frac{1}{2}I_I(t)$ avec $I_I(t)$ l'intensité incidente. Donc

$$g_2(0) = \frac{\langle I_I(t)^2 \rangle}{\langle I_I(t) \rangle^2}$$

Or on a d'après l'égalité de Cauchy-Schwartz $\langle I_I(t)^2 \rangle \geq \langle I_I(t) \rangle^2$ donc

$$g_2(0) \geq 1$$

Avec des compteurs de photons Ici, on ne mesure pas des intensités mais on compte le nombre de photons reçus sur un détecteur (photodiode à avalanche). D'après la théorie semi-classique décrivant la détection par effet photoélectrique, on a la probabilité d'avoir un coup sur B qui vaut $P_B = \eta_B \langle I_B(t) \rangle$, avec η_B l'efficacité du détecteur B, et la probabilité d'avoir une coïncidence BB' (avec un éventuel retard τ sur B') vaut $P_{BB'} = \eta_B \eta_{B'} \langle I_B(t) I_{B'}(t + \tau) \rangle$. Donc

$$g_2(\tau) = \frac{P_{BB'}(\tau)}{P_B(t)P_{B'}(t + \tau)}$$

Si maintenant on ajoute le troisième détecteur comptant les photons annonceurs, toutes les probabilités sont normalisées sur N_A (donc $P_A = 1$) et

$$g_2(\tau) = \frac{P_{ABB'}}{P_{AB}P_{AB'}}$$

avec $P_{ABB'} = \frac{N_{ABB'}}{N_A}$ la probabilité d'avoir une coïncidence entre A, B et B', $P_{AB} = \frac{N_{AB}}{N_A}$ et $P_{AB'} = \frac{N_{AB'}}{N_A}$ les probabilités d'avoir une coïncidence respectivement sur A et B et sur A et B' (ces probabilités sont normalisées par le nombre de coups par seconde N_A reçus sur A, le détecteur annonceur). Soit, avec des paramètres mesurés ici

$$g_2(\tau) = \frac{N_{ABB'} N_A}{N_{AB} N_{AB'}}$$

Des photons annoncés, c'est-à-dire des photons uniques, ne peuvent prendre qu'un chemin à la fois : ils arriveront soit sur B, soit B' mais pas sur les deux détecteurs à la fois donc on s'attend à $N_{ABB'} = 0$, soit $g_2(0) = 0$. Cela prouverait donc la nature corpusculaire de la lumière.

3 Travail effectué

J'ai d'abord pris progressivement l'expérience en main, essentiellement en refaisant les réglages nécessaires (alignement des composants, focalisation du faisceau incident sur le cristal puis placement des détecteurs pour recevoir les photons jumeaux...).

Nous avons ensuite remarqué que la fonction de corrélation $g_2(0)$ n'arrivait pas aux valeurs attendues. Nous avons donc étudié la carte d'acquisition plus en détail pour comprendre cette divergence.

3.1 La carte d'acquisition

Pour compter les coïncidences, la carte limite d'abord par des opérations logiques la longueur des pulses incidents à la durée choisie (5ns, 7ns, 10ns ou 25ns). Ensuite, elle effectue un *et* logique entre les détecteurs pour compter des coïncidences : quand des pulses sur plusieurs détecteurs différents se chevauchent, une impulsion est créée et la carte compte une coïncidence. On a remarqué que, pour une fenêtre temporelle choisie, la carte compte N_{AB} , $N_{AB'}$ et $N_{ABB'}$ avec des fenêtres de coïncidence qui sont sensiblement différentes : on ne trouve pas les valeurs attendues.

J'ai donc essayé de comprendre comment la carte comptait les coïncidences et j'ai mesuré la longueur effective de chaque fenêtre de coïncidence. J'ai ensuite montré que, le facteur de corrélation $g_2(\tau)$ dépendant de ces fenêtres, on pouvait prédire les différentes valeurs obtenues.

3.2 Source de photons uniques

Source de photons uniques Un photon annoncé se comporte de manière corpusculaire. Il ne peut pas passer par deux voies différentes donc on aura $P_{ABB'} = 0$ soit $g_2(0) = 0$. On trouve expérimentalement, en choisissant une longueur d'impulsion de 5 ns :

$$g_2^{exp}(0) = 0,015 \pm 0,006$$

Cette valeur non nulle est expliquée par les coïncidences fortuites entre les détecteurs. On montre donc qu'on ne peut pas décrire cette source de lumière par un comportement classique, car $g_2(0) < 1$: elle a un comportement quantique.

Influence de l'intensité A une fenêtre temporelle donnée, on remarque que $g_2(0)$ varie avec l'intensité. La valeur non nulle de $g_2(0)$ est toujours expliquée par les coïncidences fortuites entre les détecteurs : en calculant la valeur de $g_2^{th}(0)$ due aux coïncidences fortuites (à l'aide des fenêtres de coïncidences trouvées en étudiant la carte d'acquisition), on retrouve les valeurs expérimentales trouvées. On obtient, par exemple à 5 ns, l'évolution sur la figure 4 ci-dessous.

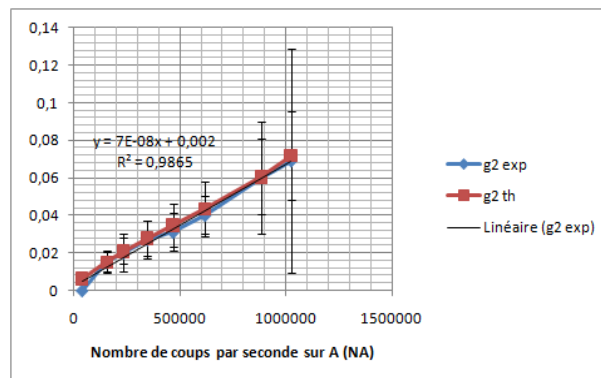


FIGURE 4 – Evolution de $g_2(0)$ selon l'intensité (nombre de coups N_A).

Introduction d'un retard On a ensuite introduit un retard sur la voie B'. On a mesuré et tracé $g_2(\tau)$ en fonction du retard τ introduit, pour deux longueurs différentes d'impulsion : 5ns et 25ns. On obtient les courbes sur la figure 5.

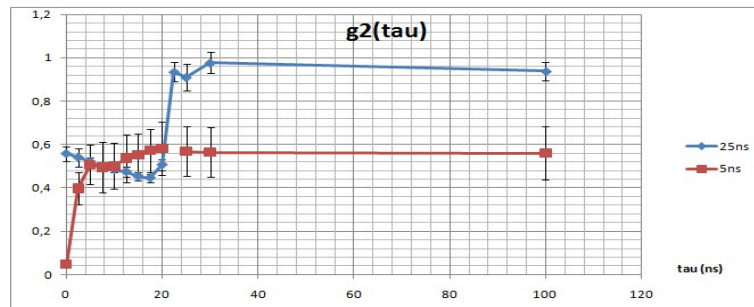


FIGURE 5 – Evolution de $g_2(\tau)$ lorsqu'on introduit un retard sur la voie B'.

On remarque que le facteur de corrélation augmente très fortement pour un retard de l'ordre de la longueur d'un pulse : dans ce cas, B' n'est plus compté en coïncidence avec A, mais il peut y avoir des coïncidences fortuites entre B' et les deux autres détecteurs.

Le fait que la valeur de $g_2(\tau)$ décroît avec τ , à l'intérieur même de la fenêtre, est dû à la variation de la taille de la fenêtre de coïncidence quand on introduit un retard sur B' : A et B' sont systématiquement décalés donc on compte moins de coïncidences fortuites entre A, B et B' et $g_2(\tau)$ diminue.

De même, le facteur de corrélation ne tend pas vers 1 car les fenêtres de coïncidence sont différentes selon les types de coïncidences qui peuvent avoir lieu.

3.3 Interférences avec des photons uniques

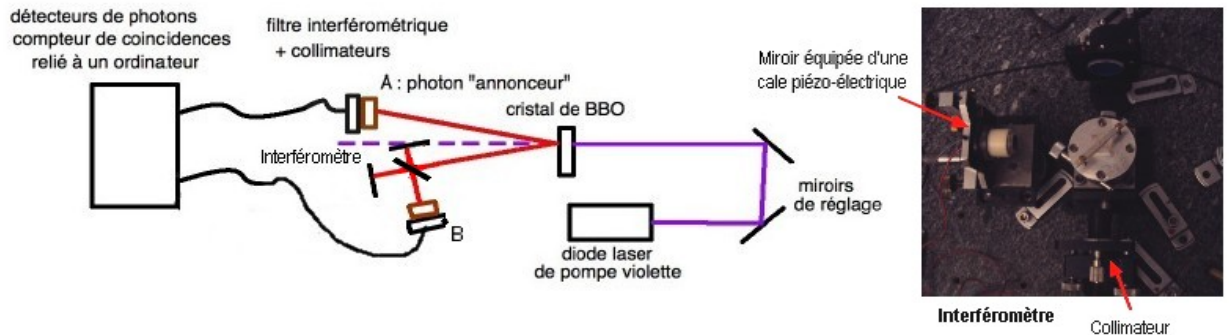


FIGURE 6 – Schéma du montage modifié

J'ai ensuite modifié l'expérience pour essayer de voir le comportement "ondulatoire" de photons uniques (voir le schéma figure 6). J'ai gardé la même source de photons uniques : la diode laser suivie du cristal biréfringent, et le détecteur A comptant les photons annonceurs.

Devant le détecteur B, j'ai placé un interféromètre de Michelson, dont un des deux miroirs était monté sur une cale piézo-électrique qui permet des déplacements infimes. J'ai réglé cet interféromètre au plus près du contact optique possible, avec une source de faible longueur de cohérence (LED rouge).

En faisant varier la tension appliquée à la cale piézo-électrique, on voit que le nombre de coïncidences vraies AB (c'est-à-dire le nombre de photons arrivant sur B qui sont bien des

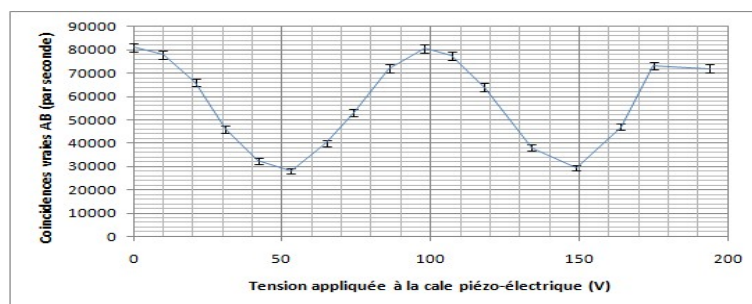


FIGURE 7 – Evolution de N_{AB} en fonction de la différence de marche (tension appliquée à la cale piézo-électrique).

photons uniques créés par le cristal) est fonction de la différence de marche entre les deux miroirs : figure 7.

Ici, les photons uniques passant à travers l'interféromètre ont donc un comportement ondulatoire : on observe des interférences.

3.4 Conclusion

Maintenant qu'on connaît bien le comportement de notre source de photons uniques selon l'expérience réalisée (cube séparateur ou interféromètre), ainsi que la façon dont la carte compte les coïncidences entre plusieurs signaux, on peut s'intéresser au comportement des plasmons de surface lorsqu'on les excite avec des photons uniques !

4 Bilan personnel

Ce stage m'a beaucoup plu et a été pour moi très enrichissant, pour différentes raisons. Tout d'abord, j'ai pu découvrir le monde de la recherche, même si je n'étais pas exactement dans un laboratoire. Même si j'ai travaillé sur une expérience "historique" qui a marché assez vite, j'ai rencontré les problèmes de mise en place d'une expérience et d'interprétation des résultats obtenus : j'ai donc fait un véritable travail de recherche. De plus, au cours de mon stage, j'ai pu croiser quelques chercheurs et assister à une conférence. J'ai aussi suivi, de loin, l'expérience d'Emmanuel et Lionel sur les plasmons de surface, et le fait d'être au service des TP m'a permis de voir d'autres expériences (comme l'étude d'un objectif chromatique de caméra pour mesurer des distances)... Je n'ai donc pas eu le temps de m'ennuyer !

Du point de vue humain, toute l'équipe du service des TP de SupOptique a été très accueillante et avenante. J'ai beaucoup apprécié d'avoir travaillé avec Emmanuel au début de mon stage : j'ai ainsi pu comprendre et apprendre comment régler le montage plus rapidement. Ensuite, le fait d'être seule par moments ne m'a pas du tout gênée : j'étais très heureuse quand j'ai enfin réussi à obtenir 15% de vraies coïncidences, par moi-même ! J'ai pu ainsi essayer par mes propres moyens ce que je voulais faire, sachant que Lionel était dans les parages pour m'aider en cas de problèmes. J'ai aussi appris, notamment grâce à Lionel, à sa patience et au temps qu'il a pu me consacrer, un grand nombre de choses pratiques (comme pourquoi placer deux miroirs entre deux composants, comment les régler, ...et quelques bases qui me manquaient en optique instrumentale).

Je suis donc ravie d'être venue à SupOptique : en cinq semaines, j'ai beaucoup appris ! J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler sur cette expérience, et cela a confirmé mon envie de continuer une formation en recherche plus tard, plus particulièrement dans le domaine de l'optique.