



## Sujet de thèse -2017 / PhD subject -2017

**Titre: Coïncidences spatiales d'un speckle à deux photons**

**Title: Spatial coincidences of a biphoton speckle**

**Mots-clés:** milieu diffusant, imagerie, optique quantique / **Keywords:** diffusing media, imaging, quantum optics

**Spécialité de la thèse :** Optique et Photonique / **PhD speciality :** Optics and Photonics

**Encadrants / Advisors :** Fabrice Devaux (directeur de thèse / PhD supervisor), Eric Lantz (co-encadrant / co-supervisor)

**Contact :** [fabrice.devaux@univ-fcomte.fr](mailto:fabrice.devaux@univ-fcomte.fr)

**Sujet:** Si on illumine un milieu diffusant avec des paires de photons intriqués, on détecte une répartition gaussienne de ces photons en champ lointain : l'absence de speckle traduit la nature incohérente (thermique) du rayonnement correspondant à un photon de la paire intriquée. En revanche, la répartition spatiale de coïncidences reproduit une figure de speckle. A la suite des travaux du groupe dirigé par M.P. Van Exter à Leiden<sup>1</sup>, cet effet est bien compris sur le plan théorique et, en balayant le champ de détection avec deux détecteurs ponctuels, ce groupe a observé expérimentalement que le taux de coïncidences reproduit de fait un speckle. Ici, une "coïncidence" correspond à deux photons arrivant simultanément sur les deux détecteurs.

Dans le cadre de ce projet, nous proposons d'imager directement les plans de détection, à l'aide de caméras EMCCD, capables de détecter des photons uniques. Une simple corrélation des images devrait permettre de retrouver les figures de speckle, illustrant une nouvelle fois la notion de "coïncidence spatiale". Nous avons récemment introduit cette notion dans l'étude d'images jumelles, et pu ainsi montrer des corrélations non locales dites de "Einstein-Podolsky-Rosen" (EPR)<sup>2</sup>. Les avantages de cette méthode sont de deux ordres:

- tous les photons sont détectés, ou, au moins, ont une chance égale d'être détectés, sans sélectionner a priori ceux qui sont en coïncidence. Les corrélations sont montrées sur cet ensemble complet de photons.
- La méthode est extrêmement rapide, contrairement aux méthodes de balayage, où une toute petite partie des paires est effectivement détectée.

Nous étudierons les différentes configurations possibles : milieu diffusant dans le plan image du cristal, en champ lointain, ou épais. Le type de "speckle de coïncidences" attendu est différent dans chaque cas. Dans le cas d'un milieu épais, il faudra confronter l'expérience à des articles théoriques qui indiquent dans quelle mesure les corrélations caractérisant un biphoton survivent à la propagation<sup>3</sup>. Nous chercherons à faire le lien avec les travaux récents liés au "boson sampling", c'est à la description de la propagation des photons sous forme de marche aléatoire<sup>4</sup>.

[1] W.H Peeters, J.J.D. Moerman and M.P. Van Exter, "Observation of Two-Photon Speckle Patterns", *Phys. Rev. Letters* **104**, 173601 (2010)

[2] P.A Moreau, F. Devaux, and E. Lantz, "Einstein-Podolsky-Rosen Paradox in Twin Images", *Phys. Rev. Letters* **113**, 160401 (2014)

[3] M. Candé, A. Goetschy, S.E. Skipetrov, "Transmission of quantum entanglement through a random medium", *Europhysics Letters* **107**, 54004 (2014)

[4] H. Defienne et al., "Two-photon quantum walk in a multimode fiber", *Sci. Adv.* **2**, e1501054 (2016)



**Subject description:** if a scattering medium is illuminated by pairs of entangled photons, no speckle structure is detected in the image, because of the incoherent nature of the light corresponding to a photon of the pair. On the other hand, the spatial repartition of coincidences exhibits a speckle structure. This effect has been shown experimentally by the group of Leiden University<sup>1</sup>: with two punctual detectors scanned over the different image positions, they recorded the temporal coincidences.

We propose here to directly inter-correlate images acquired with EMCCD cameras to exhibit much more rapidly these speckle structures. We will use the notion of spatial coincidence that we have introduced in our recent studies about the "Einstein-Podolsky-Rosen" effect<sup>2</sup>.

Advantages of this scheme are twofold:

- all photons are detected or, at least, have an equal chance of being detected, without any a priori selection of photons in temporal coincidence. Correlations are evidenced on the whole set of photons.
- The method is almost instantaneous, in stark contrast with scanning schemes.

We will study different configurations, i.e. a thin diffusing medium either in the near (image plane) or the far field, or a thick medium. The expected coincidence speckle should be different in each case.

For a thick medium, we will compare our experimental results with recent theoretical results<sup>3</sup> which show that entanglement survives multiple scattering. We will also establish links with the vivid field of boson sampling and random walks<sup>4</sup>.

[1] W.H Peeters, J.J.D. Moerman and M.P. Van Exter, "Observation of Two-Photon Speckle Patterns", *Phys. Rev. Letters* **104**, 173601 (2010)

[2] P.A Moreau, F. Devaux, and E. Lantz, "Einstein-Podolsky-Rosen Paradox in Twin Images", *Phys. Rev. Letters* **113**, 160401 (2014)

[3] M. Candé, A. Goetschy, S.E. Skipetrov, "Transmission of quantum entanglement through a random medium", *Europhysics Letters* **107**, 54004 (2014)

[4] H. Defienne et al., "Two-photon quantum walk in a multimode fiber", *Sci. Adv.* **2**, e1501054 (2016)

**Environnement (Dépt. De recherche, équipe ; matériel à disposition) :** Dépt. Optique de FEMTO-ST, Équipe Optique Non Linéaire ( ) ; Caméras EMCCD, laser powership, moyens de calcul, logiciels de dépouillement, etc... (matériel et logiciels semblables à nos manip EPR)

**Environment description (Research department, team, facilities):** Optics Dept. of FEMTO ST, nonlinear optics group, powership laser, EMCCD cameras, numerical and experimental background about detection of spatial coincidences.