

Centre for Quantum Information and Communication<http://quic.ulb.ac.be>**Sujets des Mémoires de Fin d'Etudes pour l'année académique 2011-12**

Contact général : Prof. Nicolas Cerf (local UA3.217, tél.: 2858, ncerf@ulb.ac.be)

Thème général : Sciences de l'Information Quantique

1. Rôle de l'intrication quantique dans la mesure optimale des états quantiques « comprimés » de la lumière

Co-Promoteurs : E. Karpov (ekarpov@ulb.ac.be),
J. Niset (juniset@ulb.ac.be)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

En théorie de l'information quantique, l'un des problèmes importants concerne l'information qu'il est possible d'extraire de la mesure d'un système quantique. La mesure quantique représente un problème nettement plus compliqué, d'un point de vue opérationnel comme d'un point de vue conceptuel, que la mesure en physique classique. On sait notamment que la mesure de plusieurs systèmes quantiques à deux niveaux (appelés « bits quantiques ») peut fournir plus d'information si l'on permet une opération conjointe au lieu d'une mesure individuelle de chaque système suivie d'un traitement classique statistique des résultats de mesure. En particulier, l'intrication quantique (corrélacion intrinsèquement quantique que peuvent exhiber des systèmes quantiques et qui n'a pas d'analogie classique) joue un rôle dans ce contexte car elle permet d'augmenter l'information extraite d'une mesure même si les systèmes mesurés ne sont pas initialement corrélés.

L'objectif de ce mémoire sera d'envisager la mesure de plusieurs états quantiques dits « comprimés » de phase de la lumière afin de déterminer si l'intrication quantique de la lumière peut également être exploitée dans le contexte. Un cas d'étude intéressant serait de considérer une paire d'états comprimés identiques ou conjugués en phase. Les états comprimés de la lumière sont aujourd'hui accessibles en laboratoire, ce qui permettrait d'envisager (au-delà de ce mémoire) la vérification expérimentale de l'effet qui serait éventuellement mis en évidence.

2. Amplificateurs optiques et correction d'erreurs quantiques

Co-Promoteurs : E. Karpov (ekarpov@ulb.ac.be),
C. Gagatsos (cgagatso@ulb.ac.be)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

Nous proposons d'étudier des schémas optiques qui réalisent l'amplification de signaux quantiques. Plus précisément, il s'agit de l'amplification de signaux optiques de très faible intensité (états cohérents atténués émis par les lasers) par des circuits d'optiques linéaires accompagné par une sources d'états dits « comprimés » de la lumière. Récemment, un schéma optique a été proposé permettant de corriger des erreurs (atténuation aléatoire) dans un canal de communication quantique dans lequel transitent ces états cohérents lumineux. Ce schéma est lié au circuit permettant de réaliser un amplificateur optique quantique utilisant une mesure quantique suivie d'une modification du signal en fonction du résultat de la mesure (feed forward).

Le but de ce mémoire est d'analyser de nouveaux schémas d'amplification optique inspirés par les schémas de codes quantiques correcteurs d'erreurs et de proposer des amplificateurs optimaux. Un lien pourrait être établi avec la proposition très récente d'amplificateur « sans bruit » (réalisation probabiliste d'un amplificateur optique permettant d'éviter le bruit intrinsèque quantique standard sur la base d'une post-sélection). Ceci pourrait mener à une nouvelle façon d'aborder la correction d'erreurs quantiques dans un canal à perte ou à bruit ajouté. Les applications pour le clonage quantique et l'analyse de la sécurité de la distribution quantique de la clé secrète pourront aussi être envisagées.

3. Invariants de l'intrication quantique « hybride »

Co-Promoteur : K. Mandilara (mandkat@gmail.com)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

L'intrication quantique est un phénomène intrinsèque à la mécanique quantique, qui n'a pas d'explication dans le cadre d'une théorie classique de la physique. Il s'agit d'une forme « non locale » de corrélation statistique entre des systèmes qui dépasse toute forme de corrélation permise dans la cadre de la théorie classique des probabilités. Cette corrélation quantique revêt une importance particulière dans le cadre de la théorie de l'information quantique car elle s'avère une ressource indispensable à la plupart des processus informationnels quantiques (algorithmes quantiques, téléportation quantique, etc.) Un des problèmes fondamentaux des sciences de l'information quantique consiste donc à tenter de quantifier la quantité d'intrication disponible dans un état quantique donné. Une réponse possible à ce problème consiste à identifier des invariants, c'est-à-dire des paramètres qui mesurent l'intrication et ne varient pas sous l'effet de transformations locales.

L'objectif de ce mémoire est d'analyser l'intrication quantique dite « hybride », c'est-à-dire l'intrication pouvant exister entre un système discret comme un bit quantique (système à deux niveaux) et un système continu comme un mode du champ électromagnétique (oscillateur harmonique). L'intrication a fait l'objet de très nombreuses études pour le cas des bits quantiques, par exemple, ou pour les états Gaussiens du champ électromagnétique, mais il n'y a par contre presque aucune étude du cas « hybride ». Celui-ci correspond pourtant à des situations tout à fait réalistes dans d'expériences actuelles, comme un atome à deux niveaux placé dans une cavité optique, ce qui motive le travail de recherche proposé.

4. Capacité de canaux quantiques multimodaux

Co-Promoteurs : E. Karpov (ekarpov@ulb.ac.be),
J. Schaefer (joschaef@ulb.ac.be)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

Dans la théorie de l'information quantique, l'analyse de la capacité des canaux de communication quantique est l'un des sujets d'étude majeurs, tout comme c'est le cas dans la théorie de Shannon pour les canaux dits classiques. La quasi-totalité des travaux concernant les canaux de communication quantique concernent le cas d'un canal à un mode, le plus fréquent étant le canal bosonique (p.ex. photonique) gaussien. Cependant, si l'on veut prendre en compte l'aspect temporel, fréquentiel, ou spatial, il est indispensable de pouvoir traiter le cas multimodal, où le bruit entre les modes est *a priori* corrélé.

L'objectif de ce mémoire sera d'explorer cette nouvelle voie de recherche, dans la suite des travaux effectués récemment au QuIC. Le point de départ sera l'analyse de la capacité d'une collection de canaux bosoniques gaussiens soumis à une contrainte d'énergie commune (la variance de modulation étant exprimée en nombre de photons thermiques, et donc, en définitive, comme une énergie). Ensuite, l'optimalité de la capacité par rapport à divers paramètres décrivant le bruit de canal pourra être traitée. Une extension naturelle concernerait les canaux bosoniques gaussiens à bande finie. Enfin, un dernier problème (difficile) pourrait éventuellement être abordé, concernant la démonstration du fait que la capacité de ces canaux bosoniques gaussiens est atteinte pour des signaux d'entrée correspondant à des états Gaussiens (conjecture non démontrée à ce jour).

5. Protocole quantique de partage d'une image secrète

Co-Promoteur : D. Daems (ddaems@ulb.ac.be)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

Un riche ingénieur physicien souhaite transmettre la combinaison de son coffre à ses trois fils. Etant de nature méfiante, au lieu de donner la combinaison à chacun

de ses fils, il souhaite distribuer l'information de manière à ce qu'aucun d'eux n'ait, seul, la moindre information sur la combinaison alors qu'à deux, n'importe quelle paire peut déterminer la combinaison. Cette tâche peut être accomplie à l'aide d'un protocole classique dit de « partage de secret ». La physique quantique permet, en outre, de réaliser un tel protocole sans n'utiliser aucune hypothèse calculatoire, et de rendre dès lors le partage de secret inconditionnellement sûr. Malheureusement pour les fils, l'image de l'arbre sous lequel se trouve le coffre est également secrète, et, comme il n'existe pas à ce jour de protocole quantique de partage d'image, leur père ne leur révèle pas cette image.

L'objectif de ce mémoire est de généraliser les protocoles quantiques de partage de secrets au partage d'images. Le contexte de ce mémoire est à la frontière avec le domaine de l'imagerie quantique, dans lequel on prend en compte le degré de liberté spatial du champ électromagnétique quantifié.

6. Etude des états invariants par permutation de bits quantiques grâce à la représentation de Majorana

Co-Promoteur : L. Arnaud (ludox09@gmail.com)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

L'information quantique est basée sur l'idée qu'il est possible de construire des bits quantiques (qubits) pouvant être manipulés de manière "cohérente", c'est-à-dire en conservant leurs propriétés purement quantiques qui les différencient des bits classiques. Ces propriétés, telle l'intrication quantique, font l'objet de nombreuses études car elles semblent être à l'origine, par exemple, de la rapidité connue des algorithmes quantiques. La difficulté de ce genre d'étude réside dans l'incroyable richesse qu'offre l'espace des états d'un système de n qubits, dont la taille croît exponentiellement en n . L'une des approches possibles est alors de ne considérer que certaines classes d'états de n qubits.

L'objectif de ce mémoire est de s'intéresser à la classe particulière des états de n qubits qui sont invariants par la permutation de plusieurs qubits entre eux. Bien qu'étant un sous-ensemble des états accessibles par un système de n qubits, on peut montrer que ces états restent « typiquement » quantiques. Leur intérêt réside dans leurs propriétés mathématiques très intéressantes. En particulier, le but du mémoire sera d'utiliser la représentation de Majorana de ces états pour obtenir numériquement et peut-être analytiquement des résultats sur certaines propriétés comme l'entropie de sous-ensembles de qubits. Un autre objectif du mémoire pourrait être aussi d'étendre ces résultats à des systèmes de qubits dont seules certaines parties (sous-ensembles) restent invariantes par permutation.

7. Theory of quantum feedback control

Co-Promoteur : O. Oreshkov (oreshkov@ulb.ac.be)

Etudiants concernés : Ir. civil physiciens

Quantum control is a new and rapidly developing area of quantum information science, which studies methods for control of quantum systems for the purpose of information processing. In quantum feedback control (QFC), the system of interest is monitored continuously via a weak interaction with a measurement device, and the result of the measurement is used to steer the system in real time (for example, by continually modifying the Hamiltonian or the measurement being made). Unlike classical feedback control, however, gaining any information about the system in the quantum case inevitably leads to a disturbance of the system due to the uncertainty principle, which makes the problem of QFC fundamentally different. QFC has been proven advantageous for a variety of quantum information processing tasks, such as quantum state discrimination, state purification, or quantum error correction. Yet, the general formalism developed so far concerns only problems in which the task is to prepare a fixed target state, while in many quantum information scenarios the goal is to perform a concrete operation where the state of the system is not known.

Therefore, one problem of significant interest is to develop a theoretical framework for quantum feedback control for the case where the target is not a state but a general quantum operation. This project will aim towards developing such a framework and may eventually lead to publishable results. It requires basic knowledge of quantum mechanics, probability theory, and linear algebra.