





## Rapport sur le mémoire de thèse intitulé

### Modélisation des systèmes de traitement de l'information quantique

Présenté par: Said Taoufik

pour l'obtention du **Doctorat en sciences (Discipline: Physique et Applications)**

L'information quantique est un des domaines les plus dynamiques de la physique quantique actuelle et pourrait conduire à des réalisations technologiques nouvelles. Elle se veut une nouvelle science utilisant les lois régissant le monde quantique et regroupant toutes les disciplines alliant la théorie de l'information à la physique quantique. A l'heure actuelle, elle porte essentiellement sur deux challenges majeurs. Le premier est la conception d'un ordinateur quantique capable d'exécuter rapidement certains calculs qui nécessitent un temps exponentiellement long sur un ordinateur conventionnel. Le second concerne l'utilisation de la cryptographie quantique pour effectuer des communications privées très sécurisées. Les protocoles quantiques garantissent la confidentialité des communications, non pas grâce à la complexité du cryptage mais grâce aux lois de la physique quantique. Dans ce contexte, des progrès considérables ont été achevés et des expériences grandeur nature ont été réalisées. Cependant, la conception de l'ordinateur quantique se heurte à l'extrême fragilité des bits quantiques qu'une telle machine devrait manipuler: la moindre perturbation fausserait le calcul. Nul doute, la mécanique quantique, qui a profondément marqué le développement de la physique moderne, n'a pas encore livré tous ses secrets. Elle a conduit par le passé à de remarquables avancées conceptuelles de notre compréhension du monde microscopique et à des applications révolutionnaires dans divers domaines tels que le traitement de l'information grâce à l'emploi des structures de bandes du silicium, les lasers, l'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire, etc. Depuis quelques années l'intérêt pour la mécanique quantique est entrain de vivre une seconde révolution suite aux récents exploits expérimentaux comme la téléportation quantique et les potentialités offertes par les propriétés des systèmes quantiques pour stocker, coder et transmettre de l'information. Cette convergence de la théorie classique de l'information et la physique quantique est communément appelée dans la littérature spécialisée: information quantique. Plusieurs travaux théoriques mettent en avant des perspectives très prometteuses de l'information quantique dans le traitement et la transmission de l'information. On peut citer à titre d'exemple le protocole de Bennett et Brassard qui offre un schéma de distribution de clefs quantiques inconditionnellement sûr par rapport aux protocoles cryptographiques classiques.

Il y a également les algorithmes de calculs pour la factorisation des grands nombres entiers ou encore l'algorithme de Grover qui est un algorithme quantique permettant de chercher un élément dans une structure non-ordonnée en un temps très court comparativement aux algorithmes classiques. Ces résultats justifient l'engouement pour la recherche de nouvelles applications de la physique quantique dans le domaine de l'information.

Le mémoire, soumis pour examen, par Monsieur Said Taoufik s'inscrit dans ces tendances actuelles de recherches en physique quantique de l'information. Il traite des outils d'implementations de systèmes physiques pour le traitement de l'information quantique. Il concerne essentiellement la réalisation de portes quantiques qui constituent les briques élémentaires des ordinateurs quantiques. Aussi, cette implémentation revêt une importance capitale puisque tout calcul quantique nécessite un minimum de portes quantiques à partir desquelles par combinaisons linéaires d'autres portes quantiques peuvent être obtenues. L'auteur considère à cet effet la réalisation des portes quantiques par l'interaction du champ radiatif avec des atomes, présentant deux états métastables qui sont identifiés comme des qubits logiques. Dans ce protocole, l'implémentation est faite par le contrôle des transitions atomiques sous l'effet du champ électromagnétique. Grâce à cette démarche générale, un protocole effectif a été mis au point. Il consiste en la réalisation d'une porte de phase avec un qubit qui contrôle simultanément  $N$  qubits cibles en exploitant le couplage dipolaire entre les atomes. L'intérêt majeur de ce protocole réside dans le fait que la durée d'action de la porte est relativement courte par rapport au temps de décroissance radiative des atomes et la durée de vie des photons au sein de la cavité électromagnétique. Des résultats similaires ont été obtenus avec des qubits supra-conducteurs. Ces résultats fort intéressants ont été appliqués pour l'implémentation de l'algorithme quantique de Grover.

Le mémoire de thèse est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre dresse un bref résumé des notions essentielles à la compréhension de l'information quantique et du calcul quantique avec un accent particulier sur quelques modèles d'interaction rayonnement-matière comme celui de Jaynes-Cummings. Le second chapitre porte sur le traitement de l'information quantique par l'action de portes quantiques. Une porte quantique est une opération unitaire agissant sur un ou plusieurs qubits. Le calcul quantique est donc réversible par construction. Il existe un nombre infini de portes quantiques, qui peuvent toutes s'obtenir par combinaisons de quelques portes élémentaires, constituant un ensemble universel de portes quantiques. Dans ce contexte, l'auteur étudie la réalisation des portes NTPC en cavité électromagnétique en tenant compte du couplage dipôle-dipôle entre les atomes. Le troisième chapitre concerne la réalisation des portes NTPC, NTCP-NOT et NTQ-NOT dans une cavité QED avec un système de plusieurs qubits. Le quatrième chapitre est un prolongement des résultats obtenus dans les chapitres précédents en considérant des qubits transmon. Une attention spéciale est accordée au temps d'implémentation (durée de vie de la porte quantique) qui doit être évidemment plus court en comparaison avec le temps de décohérence. Le dernier chapitre porte sur une possible implémentation du protocole de calcul quantique de Grover. Différents scénarios d'implémentations ont été discutés: (i) deux atomes dans une cavité QED, (ii) deux qubits transmon en circuit QED et (iii) deux qubits supra-

conducteurs dans une cavité QED. Nul doute, ces propositions sont théoriques et seule l'expérience tranchera quant à leurs faisabilités qui il faut reconnaître restent limitées par des problèmes d'ordre technique. Il faut avouer que le sujet, bien que très complexe, revêt une importance grandissante dans le contexte des nouveaux protocoles de codage et transmission de l'information codée dans des systèmes quantiques. Certes, ce domaine continuera à se développer grâce aux résultats expérimentaux déjà obtenus ou ceux attendus dans divers laboratoires dédiés à ce champ de recherches. Sans aucun doute, ceci apportera de nouvelles données relatives à une compréhension plus approfondie du monde microscopique. Les limitations actuelles sont d'une nature purement technologique afin de maîtriser les effets de décohérence pour une exploitation meilleure des lois quantiques pour des protocoles de cryptographie, codage et calcul quantiques.

Le présent travail est une contribution de bonne facture dans de le domaine de la théorie quantique de l'information et apporte des résultats fort intéressants. En effet, le candidat a co-signé des articles, présentant ses travaux de recherches, dans des revues internationales:

1. Realizing an  $N$  Quantum Controlled Phase Gate In a Cavity QED With Dipole-Dipole Interaction. Quant. Inf. Rev. 4 (2016) 9-15.
2. Realizing an  $N$  two-qubit quantum logic gates in a cavity QED with nearest qubit-qubit interaction. Quantum Information and Computation 16 (2016) 0465-0482.
3. Implementing  $N$ -quantum phase gate via circuit QED with qubit-qubit interaction. Modern Physics Letters B 30 (2016) 1650050.
4. Implementation of Grover quantum search algorithm with two transmon qubits via circuit QED. Soumis pour publication (2016).

En résumé, Said Taoufik, a effectué un travail de thèse novateur et particulièrement intéressant. Le manuscrit laisse transparaître sa parfaite maîtrise des outils mathématiques utilisés en physique quantique et particulièrement en théorie quantique de l'information. Je considère que les qualités de ce travail justifient amplement sa présentation comme thèse de Doctorat à l'Université Hassan II de Casablanca. En conséquence, j'estime que **Said Taoufik mérite amplement de soutenir son mémoire de thèse et tout à fait digne du diplôme de Doctorat en sciences (Discipline: Physique et Applications).**

Fait à Casablanca le 03 Septembre 2016.

Mohammed Daoud, Professeur de l'enseignement supérieur,  
Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences-Ain Chock.

Mohammed  
Daoud

