Métrologie à la limite de Heisenberg

La théorie de l'information quantique nous enseigne qu'il peut être possible de concevoir des états quantiques de systèmes relativement larges et d'exploiter leurs propriétés non-classiques. Les Mesures Quantiquement Améliorées (MQA) utilisent ces états quantiques dans le but de mesurer des quantités classiques, comme la longueur d'une cavité optique ou la différence de phase dans le bras d'un interféromètre, avec une sensibilité inégalée. Ces mesures sont primordiales pour beaucoup d'applications importantes, aussi bien scientifiques que technologiques, et le succès de l'implémentation des MQAs pourrait donc avoir un impact important dans de nombreux domaines, comme l'amélioration des standards de fréquences [1], la détection des ondes gravitationnelles [2], la navigation [3], la télédétection, les mesures de champs magnétiques très faibles [4] (avec applications aux à l'imagerie du cœur et cerveau, la détection de traces résiduelles d'éléments chimiques tel que des polluants environnementaux ou des explosifs, la détection de micro-fissures), et beaucoup d'autres. En effet, l'histoire des sciences nous montre que les progrès scientifiques majeurs ont toujours été pleinement accomplis grâce à l'amélioration significative des mesures.

Le but principal dans le domaine de la MQA a été pendant longtemps de dépasser la Limite Quantique Standard (LQS) typique des mesures classiques, pour laquelle l'incertitude minimale évolue comme $1/\sqrt{N}$, où N est le nombre de mesures indépendantes. Fondamentalement tous les systèmes proposés jusqu'ici utilisent des états intriqués ou comprimés, où l'incertitude dans une variable est réduite au prix de l'augmentation de l'incertitude dans une autre variable [5]. Cela devrait autoriser en principe d'atteindre la limite de Heisenberg, pour laquelle l'incertitude minimale dans les résultats des mesures évolue comme $1/N$, ce qui est une amélioration énorme en comparaison de l'évolution en $1/\sqrt{N}$ typique de la LQS.

Malheureusement, jusqu'ici seulement quelques expériences ont démontrée une légère amélioration par rapport à la LQS [6] et elles semblent ne pas être transposables à des valeurs de *N (nombre de sous-systèmes)* beaucoup plus importantes. Les difficultés les plus importantes sont la production et la stabilité des états quantiques requis, en effet ils sont dans la plupart des cas hautement intriqués et très sensibles à la décohérence. La décohérence tend à détruire les propriétés vitales de la cohérence des états non-classiques extrêmement rapidement, et dans ce cas ils deviennent inutiles pour l'augmentation de la sensitivité de la mesure [1]. Tous les systèmes de mesures proposés jusqu'à maintenant essayent, autant que possible, de supprimer la décohérence, avec jusqu'ici des succès limités.

Au vu de l'état de l'art, le sujet de thèse proposé explorera une approche totalement nouvelle des mesures quantiquement améliorées : le ''système du bus quantique''. Ce système, inventé à Toulouse et publié dans « Nature Communications » en 2011, est basé sur le couplage des N constituants vers un "bus quantique" commun, qui peut être tout autre système quantique, et peut être aussi simple qu'un seul bit quantique ou aussi compliqué qu'un environnement complex [7]. Nous avons montré que de cette manière on peut atteindre la sensibilité limitée par la limite de Heisenberg, sans jamais créer ou utiliser l'intrication. Ce système est robuste sous la décohérence, et en fait la dépendance, aux paramètres, de la décohérence elle-même peut être utilisée sous certaines conditions pour atteindre la limite de Heisenberg.

Le but principal de ce projet de thèse est de travailler sur des propositions concrètes de vérifications expérimentales du système du « bus quantique ». Les idées pour aller dans cette

direction incluent une manière entièrement nouvelle de mesurer les champs magnétiques extrêmement faibles avec une grande résolution spatiale, les senseurs inertiels basés sur des systèmes nano-mécaniques, mais aussi la chromatographie hautement sensible et miniaturisée des gaz [8]. Le projet promet d'ouvrir un riche domaine d'études aussi bien dans les sciences fondamentales que dans les applications en relations avec la défense.

[1] Huelga, S. F. et al., *Improvement of Frequency Standards with Quantum Entanglement*, Phys. Rev. Lett. **79**, 3865-3868 (1997).
[2] Goda, K. et al., *A quantum-enhanced prototype gravitational-wave detector*, Nature Physics **4**, 472 (2008).
[3] Giovannetti, V., Lloyd, S., & Maccone, L., *Quantum-enhanced positioning and clock synchronization*, Nature **412**, 417 (2001).
[4] Budker, D. & Romalis, M., *Optical magnetometry*, Nature Physics **3**, 227 (2007).
[5] Wineland, D. J., Bollinger, J. J., Itano, W. M., Moore, F. L., & Heinzen, D. J., *Spin squeezing and reduced quantum noise in spectroscopy*, Phys. Rev. A **46**, R6797 (1992).
[6] Leibfried, D. et al., Nature **438**, 639 (2005); Nagata, T., Okamoto, R., O'Brien, J. L., & Takeuchi, K. S. S., Science **316**, 726 (2007); Higgins, B. L., Berry, D. W., Bartlett, S. D., Wiseman, H. M., & Pryde, G. J., Nature **450**, 393 (2007); Lamine, B., Fabre, C., & Treps, N., Physical Review Letters **101**, 123601 (2008).
[7] Braun, D. and Martin, J., *Heisenberg-limited sensitivity with decoherence-enhanced measurements*, Nature Communications, **2**, 223, (2011).
[8] Braun,D., *Ultimate quantum bounds on mass measurements with a nano-mechanical resonator*, Europ. Phys. Lett. **94**, 68007 (2011).

Information about the LPT: The Laboratoire de Physique Théorique (LPT) is an **AERES A$^+$ rated lab** (A$^+$ in all categories), jointly operated by the University Toulouse Paul Sabatier and CNRS. Between 2005 and 2009, its 21 permanent researchers produced about 300 articles in international per-reviewed journals, and contributed to more than 200 conferences (with 115 invited talks). It has scientific collaborations with more than 200 researchers from 130 different institutions in 22 different countries. LPT is to 85% financed through numerous contracts with the ANR (+4 in 2010), the European Union, as well as national and regional sources. It received the label "Laboratoire d'Excellence" (**LABEX**) in 2011, with the joint project NEXT, involving besides the LPT the laboratories LCAR, LCPQ, LCPNO, and the CEMES. Toulouse is after Paris the 2nd largest university-city in France, with about 100,000 students, and home of the Global Competitiveness Clusters Aerospace Valley, Canceropole, and Agrimip Innovation. The University Toulouse Paul Sabatier and CNRS Midi-Pyrenées operate a major part of France's leading labs in science and air and space engineering, such as the national high-field lab (LNCMP), national space center CNES, ONERA, and the Observatoire Midi-Pyrenées. Toulouse was recently selected for its "Initiative d'Excellence" (**IDEX**) by the French Government.