

Manifestation d'intérêt Projet MITI 80 Prim

“CONV - Contrôle théorique et expérimental des centres NV”

Résumé. De nombreuses technologies quantiques de pointe, telles que les circuits supraconducteurs ou les ions piégés, fonctionnent à des températures ultra-froides ($T \sim \text{mK}$) et nécessitent des infrastructures cryogéniques complexes et coûteuses. Cela rend difficile la mise à l'échelle et l'intégration de ces systèmes quantiques. Les centres colorés du solide ont ainsi émergé comme une alternative intéressante pour le développement de technologie quantiques à des températures cryogéniques moins contraignantes ($T \geq 4\text{K}$) voir à température ambiante. Ainsi, les centres NV du diamant présentent des longs temps de cohérence des états quantiques (de l'ordre de la milliseconde) à température ambiante ; permettant donc la réalisation de systèmes multi-spins capable de calcul quantique. Dans un effort combiné entre les membres du Laboratoire Jean Alexandre Dieudonné (LJAD) et du Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), l'objectif de ce projet est de développer un cadre théorique pour le contrôle optimal des systèmes multi-spins basés sur les centres NV et de vérifier les résultats à l'aide d'un dispositif expérimental. Les centres NV sont une plateforme quantique idéale pour développer une collaboration productive entre deux groupes à la fois via la théorie et l'expérience à un coût humain et matériel relativement faible.

Participants

Unité	Nom	Section CoNRS
LJAD	Ivan Beschastnyi (CRCN)	41
	Jean-Baptiste Caillau (PR), porteur du projet	41
	David Tinoco (PhD)	41
ICB	Charles Babin (postdoc)	04
	Stéphane Guérin (PR)	04
	Hans Jauslin (PR)	04
	Camille Lombard-Latune (CPJ)	04
	Dominique Sugny (PR)	04

Budget. La répartition du budget est donnée ci-dessous. Il comprend l'achat d'équipements électroniques, le financement de visites régulières entre les membres du projet et de déplacements scientifiques pour la diffusion des résultats, deux stages dans les laboratoires des membres et un workshop final, avec présentation des résultats et discussion sur la suite du projet.

Année	Dépense	Type	Valeur
1 ^{ère} année	Amplificateur de micro-ondes hautes puissance (link)	Équipement	3 200
	Missions	Fonctionnement	5 000
	Stages M1/M2 (LJAD)	Fonctionnement	3 500
	Total 1 ^{ère} année		11 700
2 ^{ème} année	Équipements électroniques (Oscilloscope, Générateur de signal, Alimentation de laboratoire)	Équipement	3 000
	Missions	Fonctionnement	3 000
	Stages M1/M2 (ICB)	Fonctionnement	3 500
	Organisation Workshop	Fonctionnement	3 000
	Total 2 ^{ème} année		12 500
	Total		24 200

Projet

Présentation générale. Un centre azote-lacune (NV) est un défaut cristallin dans le diamant consistant en un atome d'azote adjacent à une lacune de carbone. Les électrons non-appareillés piégés spatialement au niveau du défaut forment un spin électronique fluorescent avec des propriétés spin-optique uniques. Bien qu'étudié originellement à des fins métrologiques¹ à température ambiante avec un coût matériel limité, leur capacité à former des systèmes multi-spin² en se couplant à des spins nucléaires de carbone, en fait aujourd'hui une plateforme prometteuse pour le traitement quantique de l'information³. Même s'ils présentent de nombreux avantages, les centres NV sont toujours sujets à la décohérence et des protocoles de contrôle efficaces sont indispensables pour obtenir des fidélités d'opérations permettant la réalisation de technologies quantiques à l'échelle industrielle⁴.

Partie théorique. Le défi mathématique consistera à contrôler des clusters multi-spin composés soit d'un réseau de spins électroniques interagissant avec leurs plus proches voisins, soit d'un centre NV couplé à des spins nucléaires naturellement présents dans la structure cristalline (par ex. ¹³C). La deuxième approche a notamment permis de créer un registre quantique à dix qubits avec des stratégies de contrôle simples mais non optimaux³. L'objectif de cette partie théorique sera de développer de nouvelles méthodes numériques pour trouver des contrôles optimaux pour les opérations multi-spins, la génération d'intrication et d'autres tâches complexes.

Partie expérimentale. Le dispositif expérimental proposé est un microscope confocal de pointe, fonctionnant à température ambiante, conçu pour observer la fluorescence émise par centres NV uniques. Pour étudier de nombreux centres NV, les échantillons de diamant seront placés sur une plateforme de balayage offrant une résolution spatiale à l'échelle nanométrique avec une plage de balayage de plusieurs millimètres. Un aimant sera positionné près du diamant afin de générer un champ magnétique constant, permettant le contrôle et la mesure de l'état quantique des centres NV. Pour produire expérimentalement les signaux issus des travaux théoriques et numériques nous utiliserons des impulsions de contrôle électromagnétiques générées par une source micro-onde (GHz) et radiofréquence (MHz). Un financement à la région Bourgogne-Franche-Comté et au projet EUR EIPHI a été demandé en parallèle pour compléter le dispositif expérimental.

Description des membres du projet. L'équipe du projet est composée de membres de l'équipe Géométrie, Dynamique et Topologie du Laboratoire J. A. Dieudonné (LJAD, UMR CNRS 7351) d'Université Côte d'Azur et de membres de l'équipe DyTeQ du Laboratoire Interdisciplinaire Carnot (ICB, UMR CNRS 6303) de l'Université de Bourgogne. L'équipe DyTeQ est reconnue depuis plus de vingt ans comme experte en technologies quantiques, tout particulièrement pour ses travaux en contrôle quantique, tant théorique qu'expérimental, avec de nombreuses collaborations établies avec divers groupes européens. Les membres du LJAD impliqués dans ce projet sont des spécialistes de contrôle optimal théorique et appliqué, notamment en mécanique spatiale et quantique, et d'algorithmique numérique. Nous bénéficierons de la contribution de Charles Babin, chercheur postdoctoral au sein de l'équipe DyTeQ à partir de janvier 2025, expert des centres colorés d'un point de vue théorique et expérimental, ainsi que de celle de David Tinoco, doctorant depuis novembre 2024 au LJAD en contrôle quantique.

¹ P. Rembold et al. Introduction to quantum optimal control for quantum sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond, AVS Quantum Sci. 2, 024701 (2020), ² G. Waldherr et al. Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register, Nature 506, 204-207 (2014) ³ C.E. Bradley et al. A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute, Phys. Rev. X 9, 031045 (2019) ⁴ C. P. Koch et al. Quantum optimal control in quantum technologies. Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe, EPJ Quantum Technol. 9, 19 (2022)