 <p>Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires</p>	<p>Programme Interne Blanc 2025</p> <p>Présentation du projet scientifique</p>
--	---

Ce formulaire doit être libellé « PIB2025.1_ Nomcandidat_projet »
Il est à retourner à votre institut de rattachement.

DATE LIMITE de SOUMISSION : mardi 1^{er} avril 2025

IDENTIFICATION

Titre long du projet (150 caractères maximum)		Contrôle théorique et expérimental des centres NV
Acronyme du projet		CONV
Porteur ou porteuse du projet		
Civilité/Nom/Prénom	CAILLAU Jean-Baptiste (PR)	
Laboratoire (Sigle)	Labo J.A. Dieudonné (LJAD), UMR CNRS 7351	
Institut* (INP, INSIS...)	INSMI	
Partenaire 1 du projet		
Civilité/Nom/Prénom	SUGNY Dominique (PR)	
Laboratoire (Sigle)	Institut Carnot de Bourgogne (ICB), UMR CNRS 6303	
Institut* (INP, INSIS...)	INP	
Partenaire 2 du projet**		
Civilité/Nom/Prénom		
Laboratoire (Sigle)		
Institut* (INP, INSIS...)		

* institut principal de rattachement du laboratoire

** facultatif : au moins un partenaire est nécessaire

INDICATIONS

Le présent document a pour objectif de présenter votre projet de recherche. Il vous est également demandé de compléter et retourner le fichier « **PIB2025.1_Infos_administratives_Nomcandidat** » sous format .xls.

PROJET DE RECHERCHE 2025-2026

<p>1 - Résumé (20 lignes maximum)</p> <p style="text-align: center;">➔ Voir document joint</p>
<p>2 - Exposé scientifique du projet explicitant les points suivants (3 pages maximum hors figures) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'état de l'art - Les verrous scientifiques et les objectifs, en mettant particulièrement en évidence le caractère interdisciplinaire, innovant, en rupture et exploratoire du projet - Les méthodologies à mettre en place - Les résultats attendus

- L'implication des équipes et la contribution des participants, en insistant sur la complémentarité des équipes et la plus-value interdisciplinaire du projet

➔ Voir document joint

VISA DU DIRECTEUR OU DE LA DIRECTRICE D'UNITE

Signature

Laboratoire J. A. DIEUDONNÉ-UMR CNRS
Mathématiques
(Parc Valrose)
06108 NICE Cedex 02
Fax 04 93 51 79 74

1 – Budget détaillé et justifié par poste de dépenses et par équipe (1 page maximum, se référer aux modalités administratives et financières précisées en annexe)

ANNEE 1 (2025)		ANNEE 2 (2026)	
Déplacements : missions, réunions de travail, workshops, etc. (pour la première année, pas de financement de congrès visant à présenter les résultats du projet) Détail : <ul style="list-style-type: none"> • Réunions de travail LJAD & ICB 	4000 € Total 4000 €	Déplacements : missions, réunions de travail, workshops, etc. Détail : <ul style="list-style-type: none"> • Missions • Workshop LJAD & ICB 	5000 € 3000 € Total 8000 €
Fonctionnement y compris l'organisation de réunions ou ateliers Détail : <ul style="list-style-type: none"> • • 	€ Total €	Fonctionnement y compris l'organisation de réunions ou ateliers Détail : <ul style="list-style-type: none"> • • 	€ Total €
Équipement (détailler les équipements à acheter, indiquer les montants unitaires) Détail : <ul style="list-style-type: none"> • Amplificateur de micro-ondes hautes puissances • Diode laser et carte de contrôle 	4000 € 3000 € Total 7000 €	Équipement (détailler les équipements à acheter, indiquer les montants unitaires) Détail : <ul style="list-style-type: none"> • Equipements électroniques pour le fonctionnement du laboratoire (oscilloscope, générateur de signal, alimentation) 	2000 € Total 2000 €
Prestations de service étroitement liées à la mise en œuvre du projet Détail : <ul style="list-style-type: none"> • • 	€ Total €	Prestations de service étroitement liées à la mise en œuvre du projet Détail : <ul style="list-style-type: none"> • • 	€ Total €
TOTAL ANNÉE 1	11000 €	TOTAL ANNÉE 2	10000 €

Programme Interne Blanc 2025

Contrôle théorique et expérimental des centres NV (CONV)

1 - Résumé (20 lignes max.)

Les centres colorés constituent une alternative innovante permettant de stocker et de traiter de l'information quantique dans des conditions de laboratoire beaucoup moins contraignantes que d'autres systèmes quantiques. Afin d'aller au-delà des preuves de principe, il est nécessaire de rendre l'opération des centres colorés plus efficace et plus robuste. L'étude mathématique d'ensembles de spins couplés se fonde sur la théorie du contrôle optimal, guidée par la possibilité de simuler et d'optimiser numériquement les champs de contrôle pour de tels systèmes. Les lois de contrôle ainsi déterminées pourront être implémentées en laboratoire sur un réseau de spins à l'aide d'un microscope confocal de pointe.

Mots-clés. contrôle quantique, optimisation, ensembles multi-spins, centres NV

2 - Exposé scientifique du projet (3 pages max. hors figures et biblio)

État de l'art. De nombreuses technologies quantiques de pointe, telles que les circuits supraconducteurs ou les ions piégés, fonctionnent à des températures ultra-froides (de l'ordre de quelques mK) et nécessitent des infrastructures cryogéniques complexes et coûteuses. Cela rend difficile la mise à l'échelle de ces systèmes quantiques. Les centres colorés du solide ont ainsi émergé comme une alternative intéressante pour le développement de technologies quantiques à des températures cryogéniques moins contraignantes (supérieures à 4K), voire à température ambiante. Ainsi, les centres azote-lacune (NV pour *Nitrogen-Vacancy*) du diamant présentent de longs temps de cohérence des états quantiques (de l'ordre de la milliseconde) à température ambiante, permettant donc la réalisation de systèmes multi-spins pour le calcul quantique. Les centres NV sont une plateforme quantique idéale pour développer un cadre théorique et expérimental sur le contrôle d'ensembles de spins couplés à un coût humain et matériel relativement faible, tout particulièrement dans le contexte français où cette plateforme technologique est encore très peu présente.

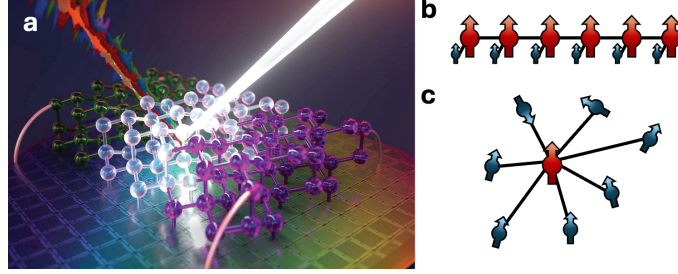


Figure 1: **a** Représentation artistique d'un centre coloré au sein d'un réseau cristallin [5]. **b-c** Représentation des deux architectures étudiées dans le cadre de ce projet de recherche.

Verrous scientifiques et objectifs. Un centre 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'étudiés originellement à des fins métrologiques à température ambiante avec un coût matériel limité [4] [3], la capacité des centres NV à former des systèmes multi-spin [1] en se couplant à des spins nucléaires de carbone en fait aujourd'hui une plateforme prometteuse pour le traitement quantique de l'information [7]. 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 hautes fidélités d'opération permettant la réalisation de technologies quantiques à l'échelle industrielle [2].

Méthodologies à mettre en place. Le défi mathématique consistera à contrôler des clusters multi-spin composés soit d'un réseau de spins électroniques interagissant avec leurs plus proches voisins, voir Fig. 1b, soit d'un centre NV couplé à des spins nucléaires naturellement présents dans la structure cristalline (par ex. ^{13}C), voir Fig. 1c. La deuxième approche a notamment permis de créer un registre quantique à dix qubits avec des stratégies de contrôle simples mais non optimales [1]. 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. Mathématiquement, le système est décrit par un hamiltonien incluant les termes de contrôle. Dans le cas d'un couplage spin électronique et spin nucléaire, ce hamiltonien peut s'écrire [6] :

$$H = \omega_S S_z + \omega_I I_z + A_{||} S_z I_z + A_{\perp} S_x I_z + A_x S_x I_z + u_S S_x + u_I I_x,$$

où les opérateurs agissent soit sur le spin électronique (S), soit sur le spin nucléaire (I). Chaque sous-système spin-1 est traité comme un système spin-1/2 définissant un qubit en ne considérant que deux niveaux sur trois. Les

contrôles associés, u_S et u_I , sont bornés, et la dynamique du système est donnée par l'équation de Schrödinger associée à H . Diverses conditions aux limites et fonctions coûts peuvent être considérées (par ex. un compromis entre durée du contrôle et proximité à la fonction logique que l'on souhaite réaliser), définissant ainsi un problème de contrôle optimal en dimension finie.

Du point de vue expérimental, le dispositif proposé est un microscope confocal de pointe, fonctionnant à température ambiante, conçu pour observer la fluorescence émise par les centres NV. Pour étudier plusieurs 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.

Résultats attendus. Une question fondamentale pour de tels systèmes est celle de la contrôlabilité : quels sont les états que l'on peut atteindre, autrement dit quelles fonctions logiques sur des qubits peut-on implémenter (et avec quelle erreur) grâce aux contrôles dont on dispose ? Ce type d'étude relève du contrôle géométrique et utilise de façon fine la structure du sous-groupe de matrices associé au système. On souhaite de plus pouvoir décrire aussi précisément que possible les stratégies optimales. On a pour cela recours à l'analyse mathématique issue du principe du maximum de Pontryaguine (qui permet de préciser la structure des contrôles—nombre et types d'arcs...) mais aussi à la résolution numérique pour guider l'intuition. Cette interaction entre analyse et simulation utilisera notamment de façon intensive le package `OptimalControl.jl` de la suite logicielle `control-toolbox.org` à la fois pour les méthodes directes qui font appel aux solveurs d'optimisation les plus performants sur CPU et GPU, et pour les méthodes de tir qui savent mettre à profit les informations recueillies pour aboutir à une grande précision de résolution.

En parallèle des études théoriques et numériques, le microscope confocal de haute précision à température ambiante sera mis en place afin de lire l'état de centres NV uniques comprenant un grand nombre d'appareils de contrôle et de mesure à synchroniser. Nous pouvons citer en particulier l'utilisation d'un générateur de formes d'onde arbitraires, nécessaire à l'implémentation expérimentale des champs électromagnétiques optimaux obtenus numériquement, dont l'intégration à un dispositif expérimental peut être chronophage. Ainsi, une part importante de la partie expérimentale du projet sera consacrée à l'installation du montage expérimental et à sa caractérisation fine, la connaissance des caractéristiques techniques du dispositif expérimental (fonction de transfert du circuit, temps de montée, *etc.*) étant primordiale pour dériver

numériquement les champs de contrôle et les implémenter avec succès. L'objectif final du projet est la réalisation expérimentale de portes quantiques à deux qubits (couplage centre NV / spin nucléaire d'azote) d'abord contrôlées en temps minimal, puis en énergie optimale à température ambiante, marquant un premier jalon vers la réalisation de processeurs quantiques exploitant les centres colorés en France.

Complémentarité des équipes et contribution des participants. Le projet réunit des chercheurs provenant 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 Bourgogne Europe. 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. Le projet bénéficiera tout particulièrement de la contribution de Charles Babin, chercheur postdoctoral au sein de l'équipe DyTeQ depuis 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. Les autres participants du LJAD sont Jean-Baptiste Caillau (PR) et Ivan Beschastnyi (CR), ceux de l'ICB sont Dominique Sugny, Stéphane Guérin et Hans Jauslin (tous trois PR) ainsi que Camille Lombard-Latune (CPJ).

Références

- [1] Bradley, C. E. *et al.* A Ten-Qubit Solid-State Spin Register with Quantum Memory up to One Minute. *Phys. Rev. X* **9**, 031045 (2019).
- [2] Koch, C. P. *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).
- [3] Rembold, P. *et al.* Introduction to quantum optimal control for quantum sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond. *AVS Quantum Sci.* **2**, 024701 (2020).
- [4] Rondin, L. *et al.* Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond. *Rep. Prog. Phys.* **77**, 056503 (2014).
- [5] Son, N. T. *et al.* Developing silicon carbide for quantum spintronics. *Appl. Phys. Lett.* **116**, 190501 (2020).
- [6] Taminiau, T. *et al.* Universal control and error correction in multi-qubit spin registers in diamond. *Nature Nanotech* **9**, 171–176 (2014).
- [7] Waldherr, G. *et al.* Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register. *Nature* **506**, 204–207 (2014).

Curriculum vitæ of Jean-Baptiste Caillau

Born May 24, 1973 (France)
Professor of applied mathematics
Université Côte d’Azur, CNRS, Inria, LJAD
Parc Valrose, F-06108 Nice
`caillau.perso.math.cnrs.fr`

Scientific interests

Optimisation and control: geometry, algorithms, applications

Academic positions

Since September 2017, Professor Univ. Côte d’Azur
Member of the CNRS team Géométrie, Dynamique, Topologie of LJAD^[1]
Member of the Inria team McTAO^[2] Sophia Antipolis
Member of the department Math. Applis & Modélisation, Polytech Nice Sophia
2022-2023 On partial leave (Inria) at Sophia Antipolis
2016-2017 On leave (Inria) at Sophia Antipolis
2013-2014 On leave (CNRS) at Lab. J.-L. Lions, Sorbonne Université
2008-2017 Professor Univ. Bourgogne Franche-Comté
2001-2007 Assistant professor ENSEEIHT, Univ. Toulouse

Education

2006 Habilitation applied math. Univ. Toulouse
2000 PhD applied math. Univ. Toulouse (supervisor J. Noailles)
1997 Master math. Univ. Toulouse
1996 Master scientific comp. Univ. Toulouse
1996 Ingénieur ENSEEIHT^[3] applied math. & sci. computing (major)

Distinctions

2022 Prix Défi Défense, Assises des mathématiques du CNRS
2001 Prix Maury, Académie des Sciences de Toulouse
2000 Prix Léopold Escande, Institut National Polytechnique de Toulouse

Author of 60+ publications in journals or conferences, one of the core developers of control-toolbox.org, advisor of 15 docs / postdocs.

¹Labo. J. A. Dieudonné

²Mathematics for Control, Transport and Applications

³École Nationale Supérieure d’Électronique, Électrotechnique, Informatique, Hydraulique et Télécommunications

Prof. Dominique Sugny



Dominique Sugny is a theoretical physicist, Professor (class exceptional) since 2014 at the University of Bourgogne Europe (Dijon, France). His area of expertise is quantum optimal control for applications in quantum technologies ranging from molecular physics, cold atoms, spin systems and superconducting qubits. He also works on nonlinear and classical dynamics. He is the author of one book, one patent and more than 150 papers. He was awarded in 2015 the Hans Fisher Fellowship of the Technical University of Munich (Technische Universität München, Institute for Advanced Study, <http://www.tum-ias.de/>), for his work on the applications of optimal control theory to Nuclear Magnetic Resonance and to Magnetic Resonance Imaging. He has been named Outstanding Referee by the American Physical Society (APS) in 2021. He is currently director of the physics department at the University of Bourgogne.

<https://icb.u-bourgogne.fr/equipe/dominique-sugny/>

<https://scholar.google.com/citations?user=38DyMEIAAAAJ&hl=fr>

[1]- Introduction to the theoretical and experimental aspects of quantum optimal control
Q. Ansel, E. Dionis, F. Arrouas, B. Peaudecerf, S. Guérin, D. Guéry-Odelin and D. Sugny
J. Phys. B 57, 133001 (2024)

[2]- Optimal Floquet state engineering for large scale atom interferometers
T. Rodzinka, E. Dionis, L. Calmels, S. Beldjoudi, A. Béguin, D. Guéry-Odelin, B. Allard, D. Sugny, A. Gauguier
Nature Comm. 15, 10281 (2024)

[3]- Quantum optimal control in quantum technologies. Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe
C. P. Koch, U. Boscain, T. Calarco, G. Dirr, S. Filipp, S. Glaser, R. Kosloff, S. Montangero, T. Schulte-Herbruggen, D. Sugny and F. K. Wilhelm
EPJ Quantum Technol. 9, 19 (2022)