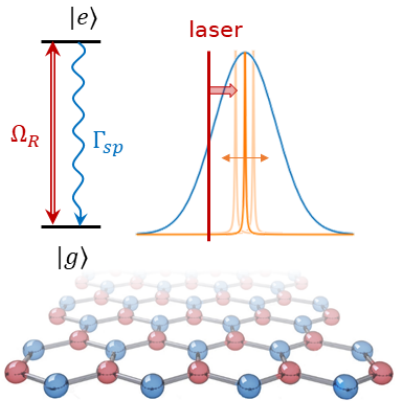
GEMaC

Groupe d'Étude de la Matière Condensée

NANOSTRUCTURES ET CENTRES COLORÉS

(English version here)



Cette thématique de recherche s'attelle à étudier la physique des **centres colorés** natifs ou artificiellement générés dans des **nanostructures semiconductrices à grand gap** et à les intégrer dans des **dispositifs** pour des applications aux **technologies quantiques**

Les centres colorés sont des défauts profonds optiquement actifs, qui présentent un intérêt majeur en information quantique en tant qu'émetteurs de photons uniques. Les centres NV (azote-lacune) du diamant, étudiés à l'échelle individuelle depuis plus d'une vingtaine d'années, en sont un exemple emblématique et sont à l'origine de réalisations expérimentales de grande importance. Au cours de la dernière décennie, il a été établi que plusieurs autres matériaux à grand gap peuvent accueillir des centres colorés possédant des propriétés attractives, tels hBN, SiC, ZnO, GaN, … Certains d'entre eux ont le potentiel de dépasser certaines limitations associées aux centres NV (fabrication du matériau, largeur de raie, extraction de lumière…).

Notre recherche porte sur l'étude et l'ingénierie quantique de centres colorés, principalement dans le nitrure de bore hexagonal (hBN), un matériau 2D, mais aussi dans d'autres matériaux comme ZnO et SiC. Nous étudions des structures ayant des dimensions nanométriques dans au moins une des trois dimensions de l'espace (couches minces, nanofils, nanoflocons…). Elles ouvrent ainsi la voie à la réalisation de dispositifs miniaturisés, intégrant des fonctionnalités optiques (guides d'onde, microcavité optique, résonateur plasmonique) et électriques (contacts pour l'effet Stark).

La thématique s'articule en deux axes :

- **Étude des propriétés physiques des défauts natifs et artificiellement induits**

Cet axe se base principalement sur une analyse optique du flux de photons de fluorescence (photoluminescence, fluorescence de résonance) au moyen de techniques de spectroscopie et de comptage de photons, permettant d'accéder aux propriétés optiques importantes pour les applications en information quantique (mesures de cohérence du 1er et du 2nd ordre, indiscernabilité, etc.). Nous développons des approches optiques novatrices pour l'étude des mécanismes de décohérence.

- **Réalisation de dispositifs intégrés basés sur les centres colorés**

Cet axe se base d'une part sur le contrôle en position des centres colorés au moyen de techniques d'irradiation locale, et d'autre part sur une ingénierie de l'environnement électromagnétique (guide d'onde, microcavité optique, résonateur plasmonique) et/ou électrostatique (contacts électriques) des émetteurs de photons uniques, pour exalter et /ou guider le flux de photon, et réaliser un contrôle de la longueur d'onde d'émission.

Nos études sont menées en collaboration avec l'axe Semiconducteurs, dont la croissance et l'étude de matériaux à grand gap font partie des thématiques centrales.
Principaux systèmes étudiés :

- **» hBN : centres colorés contrôlés spatialement et spectralement**

Nous avons démontré l'activation locale de centres colorés dans des flocons de hBN de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur, en utilisant un faisceau d'électrons focalisé dans un microscope électronique (MEB) [1]. Cette technique a l'avantage majeur de générer des centres colorés dont les transitions optiques sont reproductibles en longueur d'onde (figure 1). Elle a donc le potentiel pour générer des sources de photons uniques indiscernables par des émetteurs distincts, ce qui résout un des inconvénients principaux des centres colorés dans hBN et se prête à la réalisation de dispositifs intégrant plusieurs sources identiques.

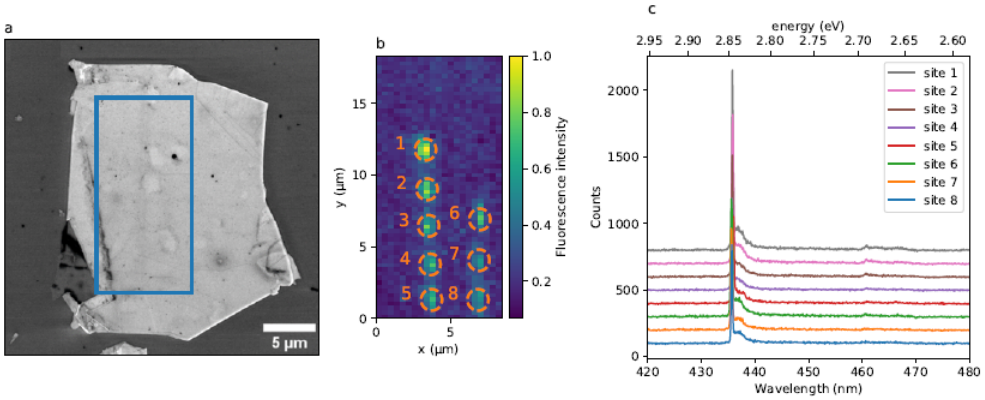


Fig. 1 : (a) flocon de hBN (monocristal de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur). (b) Carte confocale de photoluminescence. Les huit sites d'irradiations ont abouti à la luminescence de centres colorés. (c) Spectres d'émission des huit sites, révélant des raies d'émission similaires.

Nos travaux ont permis de démontrer la génération de photons indiscernables [4,12] et le contrôle laser cohérent [5] de la transition optique, ouvrant la voie à l'utilisation de ces centres colorés pour le calcul quantique. En ce qui concerne l'intégration, nous avons démontré le monitoring in-situ de la création des émetteurs [3,14] ainsi que l'intégration top-down dans un guide d'onde monolithique [6] (figure 2). Nous avons aussi réalisé des structures planaires hybrides métal/diélectrique qui ont permis d'établir l'efficacité quantique (proche de 1) de ces émetteurs, ainsi que leur position verticale dans le cristal [7].

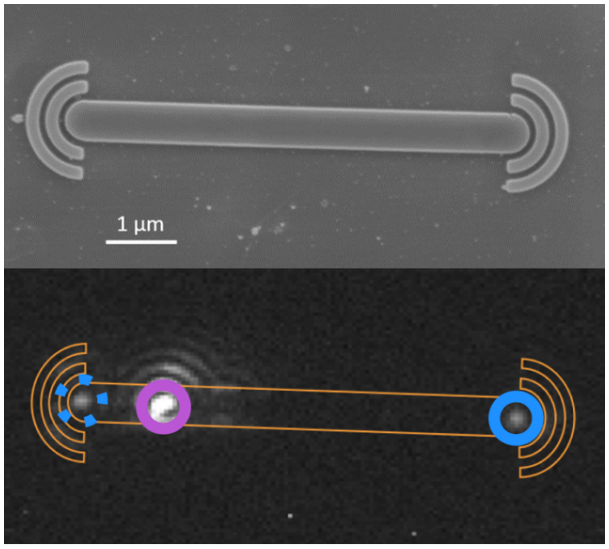


Fig. 2 : haut: image MEB d'un guide d'onde nanofabriqué dans un cristal de hBN. Bas: photoluminescence d'un centre coloré inséré a posteriori dans la structure, de façon contrôlée. La luminescence est guidée jusqu'aux deux coupleurs de Bragg aux extrémités du guide.

Nous étudions également les mécanismes de diffusion spectrale, avec une approche basée sur une combinaison d'excitation laser résonante et de correlations de photons [5,8,9] ainsi que par spectroscopie de Fourier à corrélation de photons [13]. Ces approches permettent d'identifier le type de mécanisme (sauts discrets, diffusion continue) et de le caractériser à toutes les échelles de temps.

» **ZnO : nanofil intégrant un émetteur quantique à sa pointe.**

Outre leurs propriétés de guide d'onde optique, les nanofils peuvent être manipulés individuellement et contactés électriquement, ouvrant la voie à la réalisation de dispositifs quantiques [10].

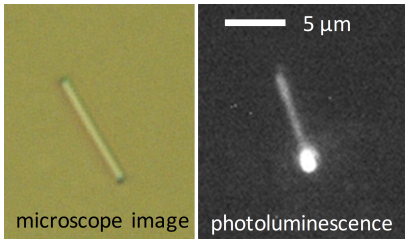


Fig. 3 : nanofil de ZnO au microscope optique (gauche) et en fluorescence (droite) révélant la présence d'un centre coloré à l'extrémité du fil.

» **SiC : de nouvelles transitions optiques proche infrarouge**

Nous étudions, en collaboration avec le MiNaLab (Université d'Oslo), les propriétés optiques quantiques de centres colorés proche infrarouge (les dilacunes de silicium, un

système prometteur pour l'information quantique) [2].

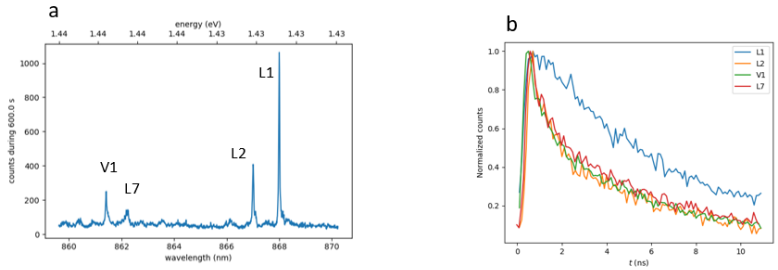


Fig. 4 : (a) spectroscopie haute résolution de la dilacune dans 4H-SiC implanté hélium. On y observe les lignes L. (b) Photoluminescence résolue en temps après filtrage de l' émission par un réseau de transmission, qui révèle la dynamique et le transfert de population entre les différents états.

[1] C. Fournier, A. Plaud, S. Roux, A. Pierret, M. Rosticher, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Buil, X. Quélin, J. Barjon, J.-P. Hermier, A. Delteil,
"Position-controlled quantum emitters with reproducible emission wavelength in hexagonal boron nitride",
Nature Communications **12**, 3779 (2021) (open access) – [HAL] – [arXiv] – [data]

[2] M. E. Bathen, A. Galeckas, R. Karsthof, A. Delteil, V. Sallet, A. Y. Kuznetsov, L. Vines,
"Resolving Jahn-Teller induced vibronic fine structure of silicon vacancy quantum emission in silicon carbide",
Phys. Rev. B **104**, 045120 (2021) – [HAL]

[3] S. Roux, C. Fournier, K. Watanabe, T. Taniguchi, J.-P. Hermier, J. Barjon, A. Delteil,
"Cathodoluminescence monitoring of quantum emitter activation in hexagonal boron nitride",
Appl. Phys. Lett. **121**, 184002 (2022) – [HAL] – [arXiv] – [data]

[4] C. Fournier, S. Roux, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Buil, J. Barjon, J.-P. Hermier, A. Delteil,
"Two-photon interference from a quantum emitter in hexagonal boron nitride",
Phys. Rev. Applied **19**, L041003 (2023) – [HAL] – [arXiv]

[5] C. Fournier, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Buil, J. Barjon, J.-P. Hermier, A. Delteil,
"Investigating the fast spectral diffusion of a quantum emitter in hBN using resonant excitation and photon correlations",
Phys. Rev. B **107**, 195304 (2023) – [HAL] – [arXiv] – [data].

[6] D. Gérard, M. Rosticher, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. Barjon, S. Buil, J.-P. Hermier,

A. Delteil,
"Top-down integration of a hBN quantum emitter in a monolithic photonic waveguide",
Appl. Phys. Lett. 122, 264001 (2023) – [HAL] – [arXiv] – [data]

[7] D. Gérard, A. Pierret, H. Fartas, B. Bérini, S. Buil, J.-P. Hermier, A. Delteil,
"Quantum efficiency and vertical position of quantum emitters in hBN determined by Purcell effect in hybrid metal-dielectric planar photonic structures",
ACS Photonics **11**, 5188 (2024) – [arXiv] – [HAL] – [data]

[8] A. Delteil, S. Buil, J.-P. Hermier,
"Photon statistics of resonantly driven spectrally diffusive quantum emitters",
Phys. Rev. B **109**, 155308 (2024) – [HAL] – [arXiv]

[9] D. Gérard, S. Buil, J.-P. Hermier, A. Delteil,
"Crossover from inhomogeneous to homogeneous response of a resonantly driven hBN quantum emitter",
Phys. Rev. B 111, 085304 (2025) – [arXiv] – [HAL]

[10] O. Capelle, G. Amiri, C. Sartel, S. Hassani, A. Lusson, J.-P. Hermier, S. Buil, V. Sallet, A. Delteil,
"Red and infrared colour centres in zinc oxide epitaxial nanowires",
Nanotechnology **36**, 245001 (2025) – [HAL] – [data]

[11] H. Fartas, S. Hassani, J.-P. Hermier, N. D. Lai, S. Buil, A. Delteil,
"Reproducible generation of green-emitting color centers in hBN using oxygen annealing",
Appl. Phys. Lett. **127**, 014001 (2025) – [HAL] – [arXiv] – [data]

[12] D. Gérard, S. Buil, K. Watanabe, T. Taniguchi, J.-P. Hermier, A. Delteil,
"Resonance fluorescence and indistinguishable photons from a coherently driven B centre in hBN",
Nature Communications **17**, 1843 (2026) – [HAL] – [arXiv] - [data]

[13] A. Delteil, S. Buil, J.-P. Hermier,
"Photon correlation Fourier spectroscopy of a B center in hBN",
Phys. Rev. B **113**, 125308 (2026) – [HAL] – [arXiv]– [data]

[14] A. Nuñez Marcos, C. Arnold, J. Barjon, S. Buil, J.-P. Hermier, A. Delteil, **"Deterministic generation of single B centers in hBN by one-to-one conversion from UV centers"**,
ACS Nano **20**, 10404 (2026) – [HAL] – [arXiv] – [data]

Contact

Aymeric Delteil