



**Promotion IUF 2014  
Rapport d'activité (2014 - 2019)**

- Nom : **FEVE**
- Prénom : **Gwendal**
- Date de naissance : **05/05/1978**
- Grade : **Professeur des Universités**
- Discipline principale : Physique
- CNU : **28**
- Université ou établissement d'appartenance : Sorbonne Université
- Unité de recherche d'appartenance : Laboratoire de Physique de l'ENS
- Catégorie : Junior ou Senior, Junior

**THEMATIQUE DE RECHERCHE :**

Je poursuis des recherches expérimentales dans le domaine de l'électronique quantique, c'est-à-dire sur l'étude du transport du courant électrique dans des micro ou nano-conducteurs placés à très basse température. A ces échelles de taille et de température, la physique quantique joue un rôle déterminant dans la description de la propagation des électrons dans le conducteur. Les électrons adoptent en effet un comportement ondulatoire qui présente de nombreuses analogies avec la propagation de la lumière : on parle d'optique quantique électronique. Plus précisément, j'étudie la propagation de courants électriques élémentaires, se réduisant à une à quelques excitations électroniques, dans un conducteur de basse dimension. En appliquant un fort champ magnétique (quelques teslas) perpendiculaire à un gaz bidimensionnel d'électrons, on peut atteindre le régime d'effet Hall quantique pour lequel la propagation électronique se fait le long des bords de l'échantillon. La propagation électronique est alors unidimensionnelle et chirale, guidée suivant les canaux de bords de l'effet Hall. On peut alors réaliser des interféromètres électroniques, reposant sur des principes et des géométries analogues à ceux développés en optique et permettant d'étudier les propriétés de cohérence et de statistique des sources électroniques.

Le travail de notre groupe consiste à pousser ces expériences dans la limite de manipulation de charges élémentaires. Il est important de noter que l'intérêt de ces expériences va au-delà de la simple reproduction des expériences de l'optique avec des électrons. En effet, contrairement aux expériences d'optique, dans lesquelles les photons se propagent dans le vide, les électrons se propagent dans la matière condensée dans laquelle la manipulation de quantas de charge élémentaire soulève de nouvelles questions. On peut citer deux différences fondamentales avec les systèmes optiques. Tout d'abord, les électrons individuels générés sont émis au-dessus de la mer de Fermi des électrons du gaz bidimensionnel. Il s'agit donc de singulariser et manipuler un électron parmi des milliers d'autres; nos expériences montrent que la présence de la mer de Fermi modifie l'interprétation des expériences d'optique électronique. En second lieu, contrairement aux photons, les électrons émis interagissent avec la mer de Fermi ainsi qu'avec les conducteurs environnants. La propagation d'un seul électron ne peut donc être exactement décrite que par un complexe problème à N corps. Nos expériences visent à déterminer quelles sont les limites des interprétations simples de la propagation électronique en termes de physique à une particule. L'originalité de notre approche consiste à se confronter directement à la physique à une particule en générant précisément des états à un électron et en étudiant leur évolution temporelle, leur

dynamique grâce aux techniques d'excitations et de mesures hyperfréquences développées au sein de notre groupe.

## **RÉSUMÉ SCIENTIFIQUE À PROPOS DE LA RÉALISATION DU PROJET DE RECHERCHE IUF (2 pages maximum) :**

*Avancées majeures / État d'achèvement / réorientations éventuelles au cours des 5 ans / Perspectives ouvertes par le travail réalisé*

Dans le cadre du projet IUF, nous avons développé la technique d'interférométrie Hong-Ou-Mandel (Bocquillon et al., Science 2013) afin de caractériser les propriétés de cohérence des excitations électroniques élémentaires et la manière dont elles sont affectées par la propagation dans le conducteur. Ces travaux ont permis de révéler l'effet des interactions de Coulomb sur la propagation d'une excitation élémentaire. Dans un conducteur unidimensionnel, les excitations élémentaires ne sont plus des modes propres de la propagation. Ces modes propres deviennent alors des excitations collectives appelés modes plasmoniques (magneto-plasmons de bord en régime d'effet Hall quantique). Nous avons ainsi pu mettre en évidence l'existence de deux modes collectifs, un mode neutre et un mode chargé (Nature Communications 2013) entraînant la fractionnalisation (Nature Communication 2015) d'une excitation électronique élémentaire. Une étude quantitative de l'évolution du contraste de l'interféromètre Hong-Ou-Mandel en fonction de la largeur temporelle d'une excitation électronique unique a ensuite permis de valider le scénario de destruction de la quasiparticule élémentaire dans un conducteur unidimensionnel sous l'action de l'interaction de Coulomb (PRB 2016).

Plus récemment, suivant une proposition théorique que nous avons publiée en 2011 (NJP 2011), nous avons exploité la technique d'interférométrie Hong-Ou-Mandel pour imager les états électroniques d'excitations élémentaires se propageant dans un conducteur. En effet, les interférences à deux particules sondent le recouvrement entre les états situés aux deux entrées d'une lame semi-réfléchissante. On peut ainsi reconstruire un état quantique inconnu par la mesure de son recouvrement avec une base connue d'états de référence. Nous avons démontré l'efficacité de la méthode sur des signaux électroniques simples (générés par des excitations sinusoïdales, arXiv:1710.11181) et l'avons ensuite appliquée pour imager la fonction d'onde d'états à un ou deux électrons (Nature Communications 2019).

Nous avons également cherché à appliquer les techniques et concepts de l'optique quantique électronique à une classe de conducteurs pour lesquels les interactions entre électrons jouent un rôle déterminant. Ces conducteurs très fortement corrélés présentent des propriétés exotiques telles que des excitations de charge fractionnaire obéissant à des statistiques anyoniques, intermédiaires entre les fermions et les bosons. Ces propriétés exotiques peuvent être étudiées, par exemple, dans le régime d'effet Hall quantique fractionnaire, obtenu à des champs magnétiques plus élevés que les champs appliqués dans la première partie du projet réalisée dans le cadre de l'effet Hall quantique entier. Les outils développés dans le cadre du régime Hall quantique entier (mesure des fluctuations de courant dans un collisionneur Hong-Ou-Mandel par exemple) sont également très intéressants dans le régime fractionnaire car ils sont connus pour être directement sensible à la statistique quantique des excitations élémentaires.

Nous avons tout d'abord développé des mesures de bruit dans le régime haute fréquence ( $f \sim 10\text{GHz}$ ) afin d'établir une nouvelle manière de mesurer la charge fractionnaire basée sur la mesure de la fréquence caractéristique  $f_j$  des photons micro-onde générés par le transfert de quasiparticules de charge fractionnaire  $e^*$  au travers d'une barrière de potentiel. En effet, dans le domaine micro-onde, le bruit électronique généré par le transfert stochastique des porteurs de charge peut s'interpréter en terme d'émission et d'absorption de photons. Nous avons ainsi pu étudier la génération de photons par le transfert aléatoire de quasiparticules de charge fractionnaire au travers d'un contact ponctuel quantique (Nature Communications 2019) polarisé par une tension  $V$ . Nous avons observé un seuil dans l'émission de photons,  $f < f_j = e^*V/h$  : aucun photon n'est généré au-delà d'une fréquence caractéristique  $f_j$  directement reliée à la

charge fractionnaire et à la tension appliquée par une relation de type Josephson. Ce seuil traduit à la fois la conservation de l'énergie des quasiparticules et leur statistique d'exclusion : l'émission de photon étant interdite sous le seuil par un effet de blocage résultant du remplissage complet des états de quasiparticules. Il démontre que la dynamique des corrélations de courant est directement sensible à la charge fractionnaire des excitations élémentaires.

Nous avons ensuite réalisé une expérience de collision de type Hong-Ou-Mandel entre des quasiparticules de charge fractionnaire. Il n'existe pas, pour l'instant, de manière permettant de générer de manière déterministe une quasiparticule de charge fractionnaire dans un circuit. Pour contourner cette difficulté, nous avons suivi la proposition de Rosenow et al. (PRL 116, 156802 2016) suggérant d'émettre de manière stochastique ces quasiparticules par leur transmission aléatoire au travers d'une barrière en régime de faible rétrodiffusion. Nous avons ainsi pu étudier les corrélations des fluctuations de courant en sortie d'un collisionneur entre quasiparticules anyoniques générées de manière aléatoire. Les résultats observés présentent une différence remarquable avec une collision similaire entre électrons. Dans ce dernier cas, on observe une suppression des corrélations des fluctuations de courant liés à la statistique fermionique des électrons (anibunching). Les corrélations négatives sont restaurées dans le cas des anyons, traduisant un comportement intermédiaire entre les cas bosoniques et fermioniques. Conformément aux prédictions théoriques, ces corrélations négatives sont proportionnelles au flux incident de quasiparticules avec un facteur de Fano égal à -2 qui est le résultat attendu pour des anyons au facteur de remplissage 1/3 étudié dans notre expérience. Ces résultats (en cours d'évaluation) ouvrent des perspectives importantes dans le domaine de la matière topologique et l'utilisation de statistique quantiques exotiques pour le codage d'information par exemple.

En marge de cette activité expérimentale, j'ai participé aux développements théoriques autour de l'optique quantique électronique dans le cadre d'une collaboration avec plusieurs équipes de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, du Centre de Physique Théorique de Marseille et de l'Université de Chalmers en Suède. J'ai piloté la publication d'un article de revue avec l'ensemble de nos collaborateurs regroupant les travaux définissant le cadre de l'optique quantique électronique (Annalen der Physik 2014). Nous avons ensuite étudié l'effet des interactions de Coulomb sur une excitation électronique élémentaire, conduisant en particulier à la destruction de la quasiparticule (PRL 2014, PRB 2016). Nous avons également étudié comment caractériser les corrélations et l'intrication entre paires d'électrons. Nous avons ainsi pu définir la fonction de corrélation électronique à deux corps contenant ces informations et avons proposé un dispositif électronique expérimental analogue à l'interféromètre de Franson permettant de la mesurer. Nous avons enfin étudié théoriquement la possibilité d'injecter localement une excitation élémentaire dans un conducteur à l'aide d'une simple grille électrostatique (PRB 2018).

## **PRODUCTION SCIENTIFIQUE DE LA PÉRIODE 2014-2019 :**

*Publications scientifiques / Communications orales invitées / Ouvrages / Brevets / Autres réalisations*

### *Publications scientifiques :*

1. G. Fève, *Picosecond detection of electron motion*, Nature Nanotechnology 14, 1005 (2019).
2. R. Bisognin, A. Marguerite, B. Roussel, M. Kumar, C. Cabart, C. Chapdelaine, A. Mohammad-Djafari, J.-M. Berroir, E. Bocquillon, B. Plaçais, A. Cavanna, U. Gennser, Y. Jin, P. Degiovanni, G. Fève, *Quantum tomography of electrical currents*, Nature Communications 10, 3379 (2019).
3. H. Graef, Q. Wilmart, M. Rosticher, D. Mele, L. Banszerus, C. Stampfer, T. Taniguchi, K. Watanabe, J.-M. Berroir, E. Bocquillon, G. Fève, E.H.T. Teo, B. Plaçais, *A corner reflector of graphene Dirac fermions as a phonon-scattering sensor*, Nature Communications 10, 2428 (2019).

4. R. Bisognin, H. Bartolomei, M. Kumar, I. Safi, J.-M. Berroir, E. Bocquillon, B. Placais, A. Cavanna, U. Gennser, Y. Jin, G. Fève, *Microwave photons emitted by fractionally charged quasiparticles*, Nature Communications 10, 1708 (2019).
5. C. Cabart, B. Roussel, G. Fève, P. Degiovanni, *Taming electronic decoherence in one-dimensional chiral ballistic quantum conductors*, Physical Review B 98, 155302 (2018).
6. H. Graef, D. Mele, M. Rosticher, L. Banszerus, C. Stampfer, T. Taniguchi, K. Watanabe, E. Bocquillon, G. Fève, J.-M. Berroir, EHT Teo, B. Plaçais, *Ultra-long wavelength Dirac plasmons in graphene capacitors*, Journal of Physics: Materials 1, 01LT02 (2018).
7. W. Yang, H. Graef, X. Lu, G. Zhang, T. Taniguchi, K. Watanabe, A. Bachtold, E. Teo, E. Baudin, E. Bocquillon, G. Fève, J.-M. Berroir, D. Carpentier, M.O. Goerbig, B. Plaçais, *Landau Velocity for Collective Quantum Hall Breakdown in Bilayer Graphene*, Physical review letters 121, 136804 (2018).
8. M. Misiorny, G. Fève, and J. Splettstoesser, *Shaping charge excitations in chiral edge states with a time-dependent gate voltage*, Phys. Rev. B. 97, 075426 (2018).
9. A. Inhofer, J. Duffy, M. Boukhicha, E. Bocquillon, J. Palomo, K. Watanabe, T. Taniguchi, E. Estève, J.-M. Berroir, G. Fève, B. Plaçais, B.A. Assaf, *RF-quantum capacitance of topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> in the bulk depleted regime*, Physical Review Applied 9, UNSP024022 (2018).
10. Y. Klein, M. Casula, D. Santos-Cottin, A. Audouard, D. Vignolles, G. Fève, V. Freulon, B. Plaçais, M. Verseils, H. Yang, L. Paulatto, and A. Gauzzi, *Importance of non-local electron correlations in BaNiS<sub>2</sub> semimetal from quantum oscillations studies*, Physical Review B 97, 075140 (2018).
11. W. Yang, S. Berthou, X.B. Lu, Q. Wilmart, A. Denis, M. Rosticher, T. Taniguchi, K. Watanabe, G. Fève, J.-M. Berroir, G.Y. Zhang, C. Voisin, E. Baudin, B. Placais, *A graphene Zener-Klein transistor cooled by a hyperbolic substrate*, Nature Nanotechnology 13 47 (2018).
12. A. Inhofer, S. Tchoumakov, B.A. Assaf, BA, G. Fève, J.-M. Berroir, V. Jouffrey, D. Carpentier, M.O Goerbig, B. Placais, K. Bendias, D.M. Mahler, E. Bocquillon, R. Schlereth, C. Brüne, H. Buhmann, L.W. Molenkamp, *Observation of Volkov-Pankratov states in topological HgTe heterojunctions using high-frequency compressibility*, Phys. Rev. B, 96 195104 (2017).
13. A. Marguerite, E. Bocquillon, J.-M. Berroir, A. Cavanna, Y. Jin, P. Degiovanni, and G. Fève, *Two-particle interferometry in quantum Hall edge channels*, Physica Status Solidi B, DOI: 10.1002/pssb.201600618 (2017).
14. B. Roussel, C. Cabart, G. Fève, E. Thibierge, and P. Degiovanni, *Electron quantum optics as quantum signal processing*, Physica Status Solidi B, DOI: 10.1002/pssb.201600621 (2017).
15. A. Marguerite, C. Cabart, C. Wahl, B. Roussel, V. Freulon, D. Ferraro, C. Grenier, J.-M. Berroir, B. Placais, T. Jonckheere, J. Rech, T. Martin, P. Degiovanni, A. Cavanna, Y. Jin, and G. Fève, *Decoherence and relaxation of a single electron in a one-dimensional conductor*, Phys. Rev. B 94, 115311 (2016).
16. D. Santos-Cottin, A. Gauzzi, M. Verseils, B. Baptiste, G. Fève, V. Freulon, B. Plaçais, M. Casula, and Y. Klein, *Anomalous metallic state in quasi-two-dimensional BaNiS<sub>2</sub>*, Phys. Rev. B 93, 125120 (2016).
17. E. Thibierge, D. Ferraro, B. Roussel, C. Cabart, A. Marguerite, G. Fève, and P. Degiovanni, *Two-electron coherence and its measurement in electron quantum optics*, Phys. Rev. B 93, 081302(R) (2016).
18. Q. Wilmart, A. Inhofer, M. Boukhicha, Wei Yang, M. Rosticher, P. Morfin, N. Garroum, G. Fève, J.-M. Berroir, B. Plaçais, *Contact gating at GHz frequency in graphene*, Scientific Reports 6, 21085 (2016).
19. G. Fève, J.-M. Berroir, B. Plaçais, *Time dependent electronic transport in chiral edge channels*, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 76, 12-27 (2016).
20. D. Brunel, S. Berthou, R. Parret, F. Violla, P. Morfin, Q. Wilmart, G. Fève, J.-M. Berroir, P. Roussignol, C. Voisin, B. Plaçais, *Onset of optical-phonon cooling in multilayer graphene revealed by RF noise and black-body radiation thermometries*, Journal of Physics: Condensed Matter 27, 164208 (2015).
21. V. Freulon, A. Marguerite, J.-M. Berroir, B. Plaçais, A. Cavanna, Y. Jin, G. Fève, *Hong-Ou-Mandel experiment for temporal investigation of single-electron fractionalization*, Nature Communication 6, 6854 (2015).
22. D. Ferraro, B. Roussel, C. Cabart, E. Thibierge, G. Fève, Ch. Grenier, P. Degiovanni, *Real-time decoherence of Landau and Levitov quasiparticles in quantum Hall edge channels*, Physical review letters 113 (16), 166403 (2014).
23. Q. Wilmart, S. Berrada, D. Torrin, V. Hung Nguyen, G. Fève, J.-M. Berroir, P. Dollfus, B. Plaçais, *A Klein-tunneling transistor with ballistic graphene*, 2D Materials 1 (1), 011006 (2014).

24. E. Pallecchi, Q. Wilmart, A.C. Betz, S.H. Jhang, G. Fève, J.-M. Berroir, S. Lepillet, G. Dambrine, H. Happy, B. Plaçais, *Graphene nanotransistors for RF charge detection*, Journal of Physics D: Applied Physics 47 (9), 094004 (2014).
25. E. Bocquillon, V. Freulon, F. D. Parmentier, J.-M. Berroir, B. Plaçais, C. Wahl, J. Rech, T. Jonckheere, T. Martin, Ch. Grenier, D. Ferraro, P. Degiovanni, G. Fève, *Electron quantum optics in ballistic chiral conductors*, Annalen Der Physik 526, 1-30 (2014).

### *Communications orales invitées :*

1. *Quantum tomography of electrical currents*, International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS 2019), Matsue, Japon (2019).
2. *Microwave photons emitted by fractionally charged quasiparticles*, Workshop on Physics between Ecole Normale Supérieure and University of Tokyo, Japan (2019).
3. *Quantum tomography of electrical currents*, GDR Physique mésoscopique réunion plénière, Aussois, France (2018).
4. *Spin-charge separation in chiral edge channels*, Chiral modes in optics and electronics in 2D systems, Aussois, France (2018).
5. *Two-particle interferometry for signal processing of a quantum electrical current*, Mesoscopic Transport and Quantum Coherence (QTC 2017), Espoo, Finlande (2017).
6. *Two-particle interferometry for signal processing of a quantum electrical current*, Vietnam 2017 Nanophysics, from fundamental to applications : reloaded, Quy Nhon, Vietnam (2017).
7. *Wigner function of a quantum hall edge channel driven at Ghz frequency*, 22nd International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF 22), Sapporo, Japon (2016).
8. *Electron quantum optics in ballistic chiral conductors*, EMN meeting on Quantum and Mesoscopic Physics, Ile Maurice (2016).
9. *Single electron decoherence in a one-dimensional conductor*, Workshop on Physics between Ecole Normale Supérieure and University of Tokyo, Japan (2015).
10. *Electron quantum optics in quantum Hall edge channels*, Joint conferences EP2DS 21-MSS, Sendai Japon plenary speaker (2015).
11. *Optique quantique électronique dans les conducteurs balistiques*, Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique (COLOQ'14), France (2015).
12. *Electron interferometers*, 27th International Conference on Low Temperature Physics, Argentine, half-plenary speaker (2014).

### **ENCADREMENT DOCTORAL : Direction de thèses**

- Co-Encadrement (80%) de la thèse de Vincent Freulon soutenue le 24 Octobre 2014, *Vincent Freulon est professeur en classes préparatoires depuis Septembre 2014.*
- Co-Encadrement (80%) de la thèse d'Arthur Marguerite soutenue le 03 Juillet 2017, *Arthur Marguerite est en séjour postdoctoral au Weizman Institute for Science.*
- Co-Encadrement (80%) de la thèse de Rémi Bisognin débutée le 1<sup>er</sup> Septembre 2016.
- Co-Encadrement (80%) de la thèse de Hugo Bartolomei débutée le 1<sup>er</sup> Septembre 2018.

### **AUTRES AVANCEES SIGNIFICATIVES AU COURS DE LA PÉRIODE :**

### **PRIX ET DISTINCTIONS SCIENTIFIQUES OBTENUS AU COURS DE LA PÉRIODE (indiquer les dates) :**

Obtention d'un bourse ERC consolidator grant 'Equo' : 2015-2020

### **AUTRES OBSERVATIONS :**

*Acceptez-vous la mise en ligne de ce document sur le site internet de l'IUF : Oui.*