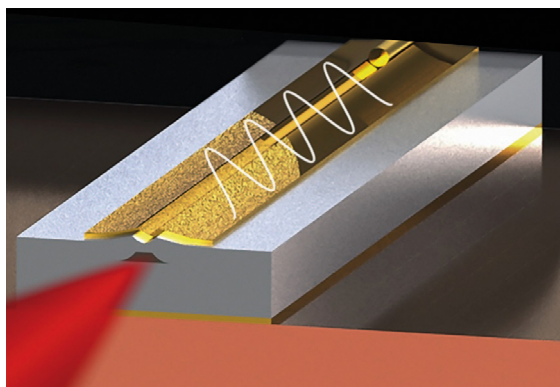


LE LASER À CASCADE QUANTIQUE A TRENTE ANS ET TOUTE LA VIE DEVANT SOI

Carlo SIRTORI*

Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, Paris 75005, France

*carlo.sirtori@ens.fr



Il y a 30 ans je faisais partie de l'équipe des Laboratoires Bell qui a conçu et démontré le laser à cascade quantique, une puissante source de lumière infrarouge, réalisée par une complexe ingénierie qui combine plusieurs phénomènes quantiques, tels que l'effet tunnel et la discrétisation des niveaux d'énergie. Dans cet article, je raconte l'aventure de sa découverte, les conditions qui l'ont permise, le plaisir et la fierté d'être un jeune chercheur.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513030>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

La première démonstration du laser à cascade reste pour moi l'un des moments les plus magiques de ma vie de chercheur. Il est difficile d'expliquer l'immense bonheur provoqué par l'aiguille qui d'un coup va au fond de la course, le voyant rouge s'allume et indique « saturé ». C'est l'aiguille de l'instrument qui mesure la puissance optique émise par la microscopique puce du premier laser à cascade quantique. Quelques instants plus tard, pour une drôle de raison, le bonheur se mélange à

la peur d'avoir juste forcé l'imagination et que la réalité, impitoyable, va révéler que tout est faux. Ces deux sensations antagonistes restent longtemps mélangées. Pendant des jours, on sent le besoin de partager la découverte, on invite les collègues au laboratoire et on reçoit les visites de la hiérarchie. Ce désir de partage est lié à la nécessité d'être rassurés sur la validité de l'expérience, mais sans doute aussi au plaisir de raconter, avec une fierté non dissimulée (que l'on aperçoit dans les photos de la Fig. 1), l'exploit scientifique dont nous sommes les auteurs.

Cette aventure démarre à la fin de mon doctorat en 1990, quand j'ai rejoint les Bell Laboratories en tant que post-doctorant dans le groupe de Federico Capasso. À cette époque, Bell Labs était une des références mondiales dans le domaine de la physique de la matière condensée et des dispositifs à semi-conducteurs. Un laboratoire exceptionnel pour le caractère fondamental et la richesse de ses recherches, tout en étant le centre d'innovation technologique d'une entreprise privée, AT&T. Y travailler signifiait être entouré des meilleurs chercheurs mondiaux dans différents

domaines, ce qui nous permettait d'apprendre la physique quantique et ses implications technologiques d'une façon *osmotique*, par le contact quotidien avec les autres scientifiques. L'environnement exceptionnel de Bell Labs était stimulant et en même temps très exigeant vis-à-vis des jeunes chercheurs : une situation idéale pour lancer leurs carrières, les motiver et les former.

À mon arrivée, j'ai initié l'activité de recherche sur les dispositifs optoélectroniques unipolaires à base de puits quantiques, des fines couches de semi-conducteur, de quelques nanomètres, prises en sandwich entre deux autres semi-conducteurs à plus large bande interdite. Ces structures créent un potentiel artificiel pour les électrons qui restent confinés dans des régions de dimension comparables à leur longueur d'onde, ce qui engendre la formation des niveaux discrets d'énergie.

La première étape vers le laser à cascade quantique a été l'étude des propriétés linéaires et non-linéaires des transitions optiques entre les niveaux électroniques dans la bande de conduction. Ces transitions sont très différentes de celles entre les bandes de conduction et de valence, qui ont lieu dans les diodes électroluminescentes ou les lasers à semi-conducteurs. En effet, les énergies de transition entre niveaux de la bande de conduction ne dépendent pas de la

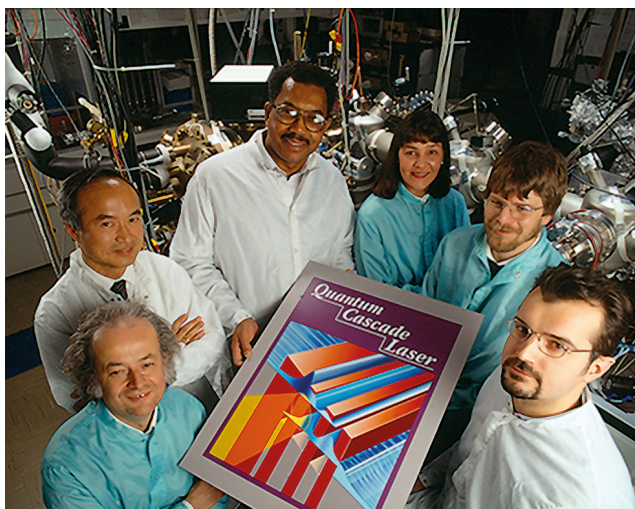
bande interdite et varient donc de pratiquement zéro à une énergie comparable à celle de la profondeur du puits quantique. Ainsi, le domaine spectral de ces transitions optiques s'étend de la région des THz ($\lambda \sim 300 \mu\text{m}$), jusqu'à l'infrarouge moyen ($\lambda \sim 3 \mu\text{m}$).

À la fin de cette étude, nous avons compris que les fonctions d'onde des électrons restent cohérentes et peuvent se délocaliser dans plusieurs puits couplés par des fines barrières tunnel. Nous avons pris conscience, grâce à la technologie des puits quantiques, qu'il était possible de réaliser des potentiels très complexes où nous pouvions maîtriser la séparation énergétique entre les états et le recouvrement des fonctions d'onde. Ces potentiels complexes, formés de séries de puits quantiques couplés par l'effet tunnel, deviendront, deux ans après, la base des régions actives des lasers à cascade quantique.

Le grand tournant du projet a coïncidé avec l'arrivée de Jérôme Faist dans le groupe de Federico Capasso, qui avait déjà, pendant sa thèse, travaillé sur les lasers à semiconducteur. Il apportait des connaissances puissantes en optoélectronique et une intuition inégalée sur les dispositifs

quantiques, deux caractéristiques qui font de lui, aujourd'hui, un grand scientifique reconnu mondialement. Avec sa détermination, il a su rapidement comprendre les résultats de mes recherches et des modèles que j'avais développés pour décrire les structures quantiques et leur interaction avec la lumière. L'exorde de la recherche sur la réalisation d'un laser unipolaire n'a pas été simple et a donné quelques résultats inquiétants. En particulier, l'étude expérimentale du temps de vie de l'état excité du laser donnait des valeurs de l'ordre de la picoseconde, en excellent accord avec la théorie de l'interaction phonon-électron, développée par Gerald Bastard et Robson Ferreira [1]. Le défi était là : générer de l'inversion de population entre deux niveaux électroniques dont l'état excité a un temps de vie d'une picoseconde ou moins. Après un moment de découragement, car nous avons réalisé que c'était impossible d'allonger le temps de vie de l'état excité, nous sommes repartis à l'attaque en cherchant une solution pour raccourcir le plus possible le temps de vie de l'état de basse énergie de la transition laser. La solution de notre problème fut d'imposer une résonance ●●●

Figure 1. À gauche : Les auteurs de l'article relatant l'invention du laser à cascade quantique, avec la couverture de Science. De gauche à droite : Federico Capasso, Alfred Cho, Albert Hutchinson, Deborah Sivco, Jérôme Faist, Carlo Sirtori. À droite : Photo prise par F. Capasso de J. Faist et C. Sirtori dans le laboratoire après la première démonstration du laser à cascade quantique.



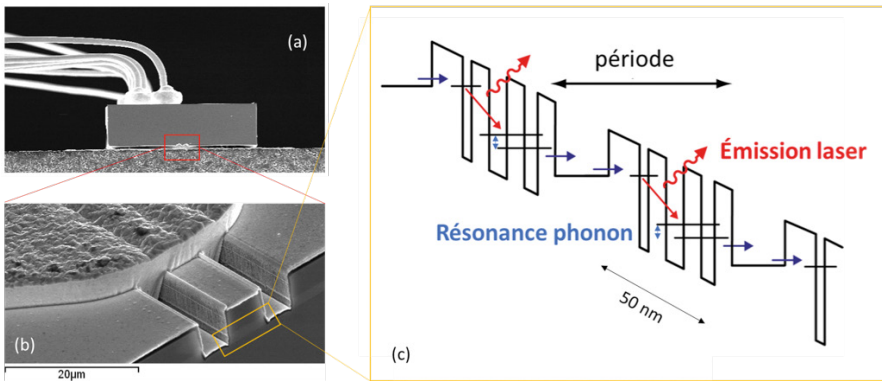


Figure 2. (a) Puce d'un laser à cascade quantique monté « tête en bas ». (b) Ruban laser en double tranchée, partiellement couvert d'une couche d'or électrolytique pour améliorer la dissipation thermique. (c) Schéma simplifié du potentiel électronique utilisé dans la région active d'un laser à cascade quantique, avec les niveaux électroniques principaux.

entre ce niveau et les phonons optiques (voir fig. 2c). Cette résonance nous a permis de réduire le temps de vie de l'état inférieur suffisamment pour obtenir l'inversion de population et donc le gain optique. La dernière étape fut la compréhension et le dessin du potentiel pour injecter les électrons par effet tunnel dans le niveau excité de la transition laser. Après ce dernier effort, tout s'est accéléré. Nous avons tout de suite observé l'électroluminescence et, quelques semaines plus tard, le premier laser que nous avons fabriqué a atteint le seuil : nous avons ainsi mesuré pour la première fois la lumière émise d'un laser à cascade quantique [2]. C'était le 14 janvier 1994, un vendredi soir.

La figure 2 montre une puce de laser à cascade quantique sur trois échelles de taille différentes. A la plus petite échelle (Fig. 2c), on voit le schéma typique du potentiel électronique, constitué de puits quantiques de semiconducteur couplés par effet tunnel et soumis à un potentiel électronique. Les électrons sont injectés dans la région active du laser, où le gain optique est obtenu grâce à la résonance phonon entre l'état fondamental de la transition laser et le niveau d'extraction. Le processus de « cascade » consiste à recycler les électrons extraits en les réinjectant dans la période suivante. La figure 2b montre

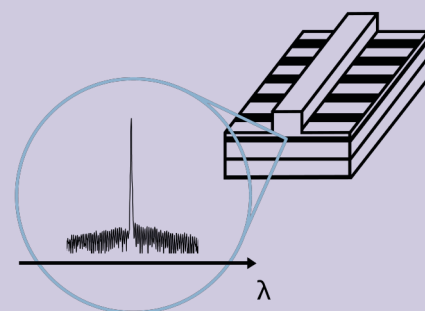
le ruban, constituant le guide d'onde et contenant la région active. Le laser est ensuite monté « tête en bas » sur une embase (Fig. 2a), pour aider la dissipation thermique du composant et permettre ainsi un fonctionnement à température ambiante.

Après la première démonstration du laser à cascade quantique, pendant quatre ans nous nous sommes focalisés à mieux comprendre la physique qui régit son fonctionnement et à améliorer ses performances. Nous étions pratiquement sans compétiteurs, car la complexité du dessin quantique pour obtenir du gain optique rendait difficile la reproduction rapide nos résultats.

Au-delà des exploits scientifiques, un aspect inoubliable de ces années restera toujours pour moi l'excellente relation que Federico, Jérôme et moi avons développée. Il s'agissait d'une véritable synergie basée sur la confiance et le respect réciproque. Bien sûr, Jérôme et moi étions sous le leadership de Federico. Néanmoins, par le partage continu de ses visions illuminées et par son enthousiasme scientifique, il était toujours proche de nos efforts de jeunes chercheurs, au point que nous travaillions avec lui comme de paires : il était notre collègue privilégié plutôt que notre chef directeur. Nous étions une équipe de seulement trois chercheurs, et

travaillions en collaboration étroite avec le groupe de Al Cho qui faisait la croissance des cristaux semiconducteurs à puits quantiques. Une équipe minuscule par rapport aux standards actuels. Toutefois, la structure de Bell Labs était d'une efficacité redoutable et nous permettait d'avoir un rendement bien au-delà des limites thermodynamiques. Nous avions à notre disposition les ateliers de mécanique et d'électronique, une salle blanche pour la fabrication et une « stock-room » où nous pouvions emprunter toute sorte d'outillage et de composants électroniques. Les bouteilles d'hélium liquide étaient dans le sous-sol et il fallait faire juste une promenade de quelques minutes pour aller les chercher, sans devoir les payer ! Federico était chef de département et, pendant certaines périodes, il était occupé par le management ; Jérôme et moi, par contre, pouvions nous concentrer sur la recherche sans pratiquement aucune tâche administrative. Une véritable immersion dans la science.

À la fin de ces quelques années complètement dédiées à « l'enfance » du laser à cascade quantique, en 1997, j'avais décidé de quitter le groupe de Capasso à Bell Laboratories pour poursuivre mes activités scientifiques en Europe. Jérôme Faist, d'une façon complètement indépendante, avait décidé de même. L'aventure continuait donc de l'autre côté de l'Atlantique. J'avais accepté une offre du Laboratoire Central de Recherche de Thomson-CSF, aujourd'hui THALES, afin de travailler sur le développement de lasers à cascade quantique dans des systèmes de matériaux différents de ceux que j'avais utilisés aux États-Unis. Il s'agissait d'un projet ambitieux, visant à démontrer la validité générale des concepts régissant le fonctionnement des lasers à cascade quantique. En effet, le gain optique de ce laser unipolaire peut être conçu indépendamment du système de matériaux semiconducteurs, à condition que celui-ci permette la croissance de puits quantiques à l'état de l'art. Le



- ▲ DFB de 760nm à 2900nm
- ▲ Et ICL de 2800 à 6500nm

MAIS AUSSI, LASERS À CASCADE QUANTIQUE



- ▲ QCL cw et pulsés
- ▲ 6µm à 14µm
- ▲ 20mW (DFB CW)
- ▲ 100mW typ crête (DFB pulsé et FP)
- ▲ Boîtier HHL avec collimation



LASERS ICL DE PUISSANCE BOÎTIER BUTTERFLY



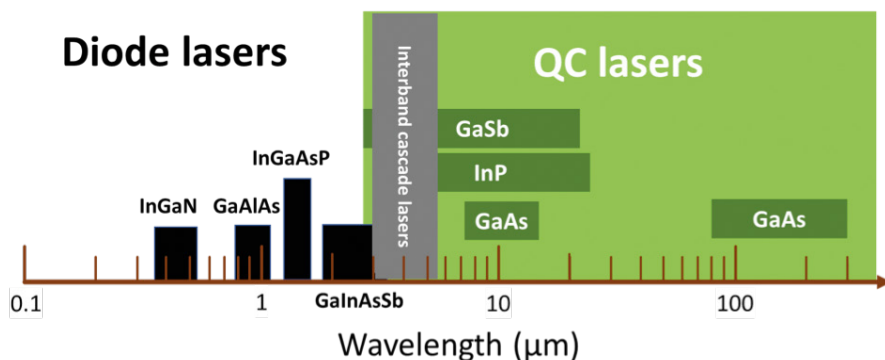
premier système de matériaux que j'ai choisi comme nouveau support pour les concepts des lasers à cascade quantique a été le GaAs/AlGaAs sur substrat de GaAs, qui est, après le silicium, le semiconducteur le plus utilisé en technologie. Mon arrivée à Thomson a été aussi l'occasion pour lancer à niveau européen la technologie de ces lasers. J'ai donc monté et ensuite coordonné un projet européen, comprenant cinq pays, qui visait un véritable transfert technologique des dispositifs déjà démontrés aux USA et le développement de lasers dans de nouveaux systèmes de matériaux. Ce projet a été le premier d'une série de succès qui ont permis d'implanter en Europe le savoir-faire et l'industrialisation des lasers à cascade quantique. Ce n'est pas un hasard que la première compagnie produisant ces sources de lumière, Alpes Lasers, fut fondée en Suisse par Jérôme Faist.

Le projet visant à transférer les lasers à cascade quantique vers de nouveaux systèmes de matériaux a rapidement porté ses fruits. Un an après mon arrivée chez Thomson (THALES), j'ai démontré le premier laser à cascade quantique en GaAs/AlGaAs [3]. En 2003, en collaboration avec l'Université de Montpellier, j'ai également contribué à la réalisation de lasers dans des semi-conducteurs à base d'antimoine (InAs/AlSb sur substrat GaSb) [4]. Dans ces deux projets, j'ai eu la chance de bénéficier du soutien scientifique de chercheurs exceptionnels, comme Julien Nagle chez Thomson, ainsi qu'Alex Baranov et Roland

Teissier à l'Université de Montpellier. Leur expertise dans le domaine des dispositifs semi-conducteurs a été essentielle à la réussite de ces travaux, qui auraient été bien plus complexes sans leurs contributions. Le GaAs est, aujourd'hui, le matériau d'excellence pour la réalisation des lasers à cascade quantique dans le domaine de fréquences THz, i.e. aux longueurs d'onde de l'ordre de 100 µm ou plus (voir Fig. 3). D'autre part, les dispositifs fabriqués dans le système des antimoniures sont aujourd'hui parmi les meilleurs lasers entre 10 et 20 µm ; ils sont produits en France par la société MirSense. De plus, les recherches continuées à l'Université de Montpellier ont démontré que les lasers à cascade quantique dans ce système de matériaux peuvent se faire sur des substrats de silicium [5], ouvrant la voie vers l'intégration de ces sources de lumière avec la technologie C-MOS.

Les premières années après la démonstration de lasers à cascade quantique ont été dédiées surtout à l'amélioration de ses performances, nous étions pressés de saisir son potentiel en tant que futur produit commercial. Néanmoins, en 2003, quand j'avais déjà un poste de professeur à l'Université Paris-Diderot, une jeune théoricienne, Angela Vasanelli, avait rejoint mon groupe en tant que Maître de conférences. C'était une excellente occasion pour changer le cap et démarrer une activité de recherche fondamentale sur la physique du laser. Nous nous sommes, donc, focalisés sur les phonons, ●●●

Figure 2. Plage de fonctionnement des lasers à cascade quantique comparée à celle des diodes lasers. La longueur d'onde d'émission des diodes lasers est fixée par l'énergie de bande interdite du semiconducteur, tandis que celle des lasers à cascade quantique est contrôlée par l'ingénierie quantique.



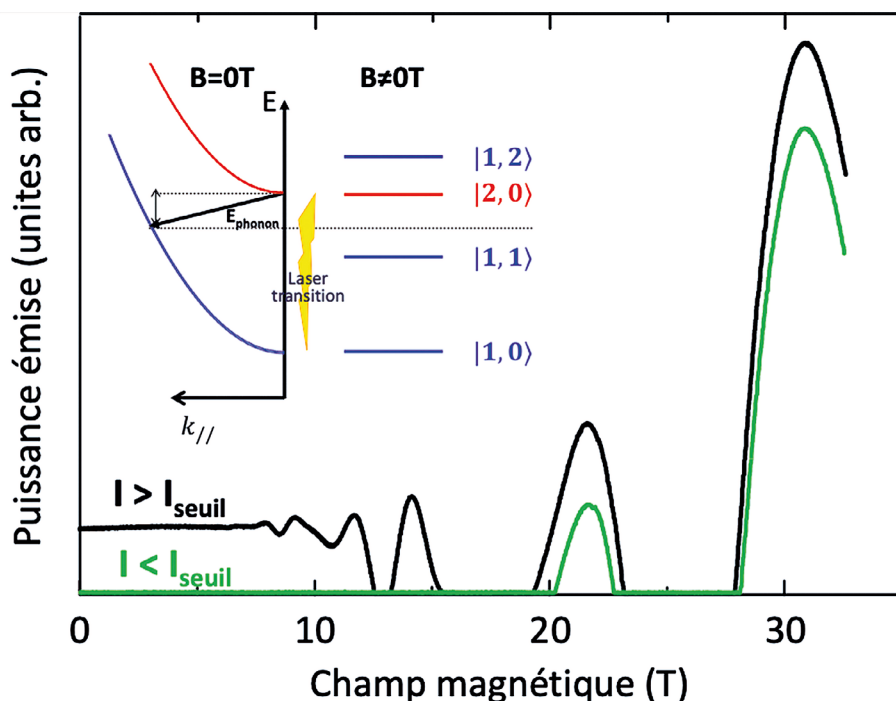


Figure 4. Puissance optique émise par un laser à cascade quantique en fonction du champ magnétique appliqué. Les deux courbes ont été obtenues à courant fixé, en dessous (courbe verte) ou au-dessus (courbe noire) du seuil d'émission laser à champ magnétique nul. L'encart présente un schéma des niveaux d'énergie, montrant la formation des niveaux de Landau en présence d'un champ magnétique.

pour comprendre s'ils étaient vraiment l'ennemi « numéro 1 » de l'inversion de population. Plus précisément nous avons étudié l'interaction électrons-phonons, le phénomène qui rend si court les temps de vie des niveaux excités. L'étude consistait à immerger les lasers dans des champs magnétiques intenses pour briser les bandes des états électroniques en niveaux discrets d'énergie, les niveaux de Landau (encart de fig. 4). Pour ces expériences nous avons eu le plaisir de collaborer avec Jean Leotin et Dmitry Smirnov du Laboratoire de Champs Magnétiques Intenses, qui nous a permis d'accéder à des champs d'une cinquantaine de Tesla ! Les résultats obtenus étaient très clairs : pour tout champ magnétique qui bloquait l'interaction électrons-phonons, le gain du laser augmentait significativement, son seuil diminuait et la puissance optique augmentait d'un ordre de grandeur. Ces résultats sont montrés dans la Fig. 4, où

la puissance optique est tracée en fonction du champ magnétique. À fort champ, la séparation entre les niveaux de Landau est très différente de l'énergie des phonons optiques, ce qui donne lieu à un goulot d'étranglement pour leur émission. La théorie d'Angela reproduisait exactement les résultats expérimentaux [6],

nous n'avions plus aucun doute : les phonons étaient (et sont encore) les responsables du seuil important des lasers à cascade quantique. C'était le premier d'une longue série de travaux qu'Angela et moi menons ensemble. La théorie développée nous a permis, au cours des années, de dessiner et de réaliser plusieurs générations de dispositifs quantiques et d'établir une collaboration très fructueuse avec l'équipe d'Isabelle Sagnes au C2N. Trente ans après leur découverte, les lasers à cascade quantique continuent d'améliorer leurs performances et de stimuler de nouvelles recherches. Actuellement, ils sont produits par une vingtaine d'entreprises réparties entre l'Europe, l'Asie et les États-Unis. Bien que le principal marché soit encore celui des laboratoires de recherche, les applications liées à la transition écologique, en particulier la détection ultrasensible de molécules, prennent une importance croissante. Ces lasers présentent également un fort potentiel commercial dans des domaines tels que les communications en espace libre et l'imagerie médicale. Par ailleurs, leurs applications dans le domaine militaire, notamment pour les contremesures optiques, sont bien établies. Plus que jamais, ces lasers suscitent un intérêt commercial grandissant, et nous sommes sur le point de les voir intégrer des marchés de masse. ●

RÉFÉRENCES

- [1] R. Ferreira and G. Bastard, *Phys. Rev. B* **40**, 1074 (1989)
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho, *Science* **264**, 553 (1994)
- [3] C. Sirtori, P. Kruck, S. Barbieri, P. Collot, J. Nagle, M. Beck, J. Faist, U. Oesterle, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3486 (1998)
- [4] R. Teïssier, D. Barate, A. Vicet, D.A. Yarekha, C. Alibert, A.N. Baranov, X. Marcadet, M. Garcia, and C. Sirtori, *Electronics Lett.* **19**, 17 (2003)
- [5] Hoang Nguyen-Van, Alexei N. Baranov, Zeineb Loghmani, Laurent Cerutti, Jean-Baptiste Rodriguez, Julie Tournet, Gregoire Narcy, Guilhem Boissier, Gilles Patriarche, Michael Bahriz, Eric Tournié & Roland Teïssier, *Sci Rep* **8**, 7206 (2018)
- [6] A. Leuliet, A. Vasanelli, A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, G. Bastard and C. Sirtori, *Phys. Rev. B* **73**, 085311 (2006)