

# Le graphène, un étalon de l'ohm quantique et pratique pour le nouveau Système International d'unités

L'effet Hall quantique, déjà exploité dans l'arséniure de gallium pour réaliser un étalon primaire de résistance électrique, est sur le point d'apporter une contribution majeure à la redéfinition du système international d'unités (SI) à partir de constantes fondamentales, notamment pour la redéfinition du kilogramme à partir de la constante de Planck. L'utilisation de l'effet Hall quantique en métrologie nécessite une complète maîtrise expérimentale incluant, en premier lieu, la reproductibilité de la mesure de la résistance avec une précision au milliardième près en valeur relative ( $10^{-9}$ ). Dans l'arséniure de gallium, cet objectif est très contraignant : l'étalon doit être refroidi à 1,5 K, plongé dans un champ magnétique de 10 T, et mesuré avec des courants n'excédant pas des dizaines de  $\mu\text{A}$ , ce qui confine ces mesures à quelques Instituts Nationaux de Métrologie et empêche son transfert vers les utilisateurs industriels.

Dans le graphène, cristal 2D d'atomes de carbone, l'effet Hall quantique est prédit extrêmement robuste grâce aux propriétés quasi-relativistes des électrons qui s'y propagent. Ceci ouvre, en théorie, la voie à la réalisation d'étalons de résistance fonctionnant dans des conditions de mesure moins contraignantes et moins coûteuses. Cependant la réalisation de cet objectif est restée jusqu'ici hors d'atteinte, car l'obtention de feuillets de graphène homogènes sur plusieurs centimètres avec des porteurs de charge de bonne mobilité et en faible concentration est une gageure.

Il aura fallu attendre 2015 pour voir se réaliser complètement les promesses du graphène pour l'application en métrologie grâce aux travaux d'un consortium réunissant cinq laboratoires français [1-2]. Le graphène utilisé pour cette démonstration a été produit au CRHEA-CNRS selon une technique originale de dépôt en phase vapeur de propane/hydrogène sur carbure de silicium. L'uniformité et les bonnes propriétés électroniques du matériau ont été mises en évidence au L2C-CNRS/Université de Montpellier et au CINAM-CNRS/Université d'Aix Marseille ; le LPN-CNRS a produit des dispositifs à effet Hall quantique de grande dimension ( $100\ \mu\text{m} \times 420\ \mu\text{m}$ ) avec des contacts métalliques de très faible résistance ( $<1\ \Omega$ ), et enfin, le LNE a réalisé des mesures métrologiques de haute précision qui ont montré, dans le meilleur dispositif, une quantification de la résistance de Hall parfaite à  $1 \times 10^{-9}$  près, à des champs magnétiques aussi faibles que 3,5 T, des températures aussi élevées que 10 K et des courants de mesure aussi élevés que 0,5 mA, ce qui constitue de nouveaux records.

Par la comparaison de ce dispositif en graphène à un dispositif en arséniure de gallium, l'universalité de l'effet Hall quantique a également été vérifiée par le LNE avec une précision inégalée jusqu'ici ( $8,2 \times 10^{-11}$ ), supportant la relation directe de la résistance de Hall quantique à la constante de Planck et à la charge de l'électron, cruciale pour l'établissement du nouveau SI.

Ces nouveaux résultats démontrent la maturité de la technologie graphène pour une application très exigeante, contribuent à la future refonte du système international d'unités et ouvrent la voie à une amélioration significative des mesures électriques en général.

[1] F. Lafont, R. Ribeiro-Palau, D. Kazazis, A. Michon, O. Couturaud, C. Consejo, T. Chassagne, M. Zielinski, M. Portail, B. Jouault, F. Schopfer and W. Poirier, **Nature Communications** **6**, 6806 (2015).

[2] R. Ribeiro-Palau, F. Lafont, J. Brun-Picard, D. Kazazis, A. Michon, F. Cheynis, O. Couturaud, C. Consejo, B. Jouault, W. Poirier, F. Schopfer, to be published in **Nature Nanotechnology** on 7 September 2015.

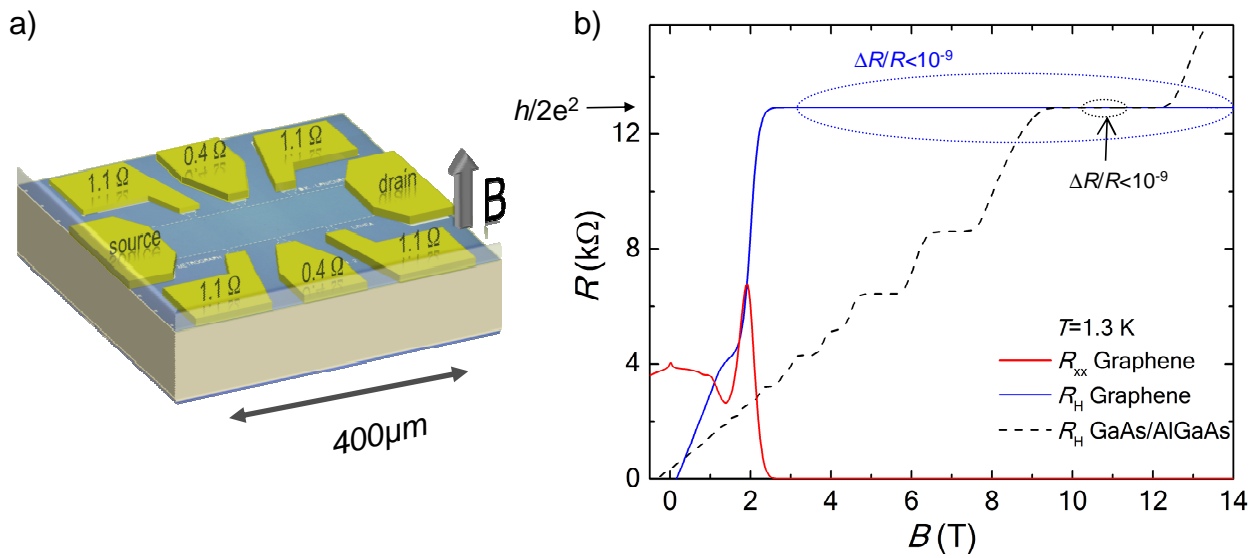


Figure: a) Vue schématique de l'étalon en graphène. Les résistances de contacts sont indiquées. La densité d'électrons est  $1,8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  et la mobilité est  $9400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . b) Résistance longitudinale (rouge) et transverse (bleu) de l'étalon en graphène, en fonction de la densité de flux magnétique, à une température de 1.3 K. La résistance transverse d'un étalon semiconducteur en arséniure de gallium est indiquée en noir (pointillés) pour comparaison. Les contours pointillés entourent les intervalles de champ magnétique où la résistance transverse dans le graphène et dans l'arséniure de gallium est en accord avec  $h/2e^2$  à  $1 \times 10^{-9}$  près.