

Le graphène

Quand la mécanique quantique rencontre la relativité dans un trait de crayon

Jean-Noël Fuchs⁽¹⁾, Mark Oliver Goerbig⁽¹⁾ et Bernard Plaçais⁽²⁾ (bernard.placais@lpa.ens.fr)

(1) Laboratoire de Physique des Solides, Université Paris-Sud et CNRS, 91405 Orsay Cedex

(2) Laboratoire Pierre Aigrain, École normale supérieure et Université Pierre et Marie Curie, 24 rue Lhomond, 75005 Paris.

Le graphène a été mis à l'honneur par le prix Nobel de physique 2010.

Ce cristal de carbone d'épaisseur atomique, apparenté au graphite, cache un gaz d'électrons bidimensionnel tout à fait exceptionnel.

En effet, ces électrons ont une masse effective nulle et se déplacent toujours à la même vitesse, imitant des particules « ultra-relativistes » comme les photons ou les neutrinos.

Le graphène est aussi le premier cristal strictement bidimensionnel à être étudié, ouvrant la voie à une nouvelle famille de matériaux. En ce qui concerne les applications, la miniaturisation de composants électroniques comme le transistor semble une direction prometteuse.

Le prix Nobel de physique 2010 a été attribué à Kostya Novoselov et Andre Geim (Université de Manchester) pour leurs « expériences innovantes sur le matériau bidimensionnel appelé graphène » – un cristal de carbone de l'épaisseur d'un atome. En réalité, le graphène était déjà (peu) connu de la communauté scientifique depuis les années 60. La contribution essentielle de Novoselov et Geim est d'avoir montré que le graphène est un conducteur électrique bidimensionnel (2D) exceptionnel, d'avoir rendu sa fabrication très simple et d'avoir ouvert la voie à l'étude d'autres cristaux 2D grâce à leur technique d'exfoliation mécanique (dite « astuce du scotch »).

Dans cet article, nous présentons les propriétés remarquables du graphène dans la suite des expériences fondatrices de 2004-2005. Si on ne retenait qu'une seule phrase au sujet du graphène, ce serait : « un cristal de carbone d'épaisseur atomique, conducteur, et dont les porteurs de charge se comportent comme des particules ultra-relativistes sans masse ».

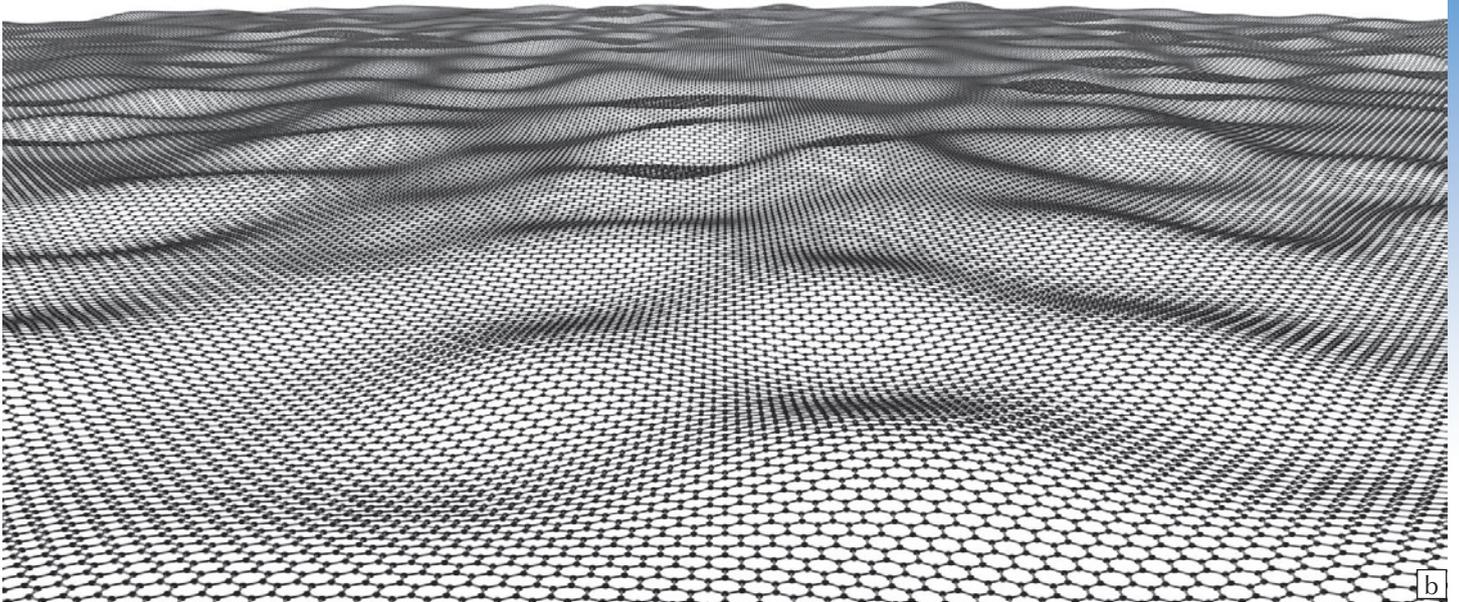
Du graphite au graphène

Comme l'indique son nom, le graphène est apparenté au graphite de nos mines de crayon. La fabrication du graphène proposée par le groupe de Manchester utilise précisément la propriété du graphite qui nous permet d'écrire avec un crayon : le graphite de la mine consiste en des feuilles de graphène empilées et très faiblement liées entre elles, et ces feuilles restent alors accrochées à la surface lorsqu'on fait glisser le crayon sur le papier. Dans l'astuce du scotch, Novoselov et Geim ont remplacé

la mine de crayon par une fine pastille de graphite et le papier par une sorte de scotch qu'ils ont replié sur la pastille ; après l'avoir déplié à nouveau, la pastille s'est scindée en deux feuillets plus fins encore, et la répétition de ce procédé leur a permis, non seulement de salir le scotch, mais d'obtenir des couches graphitiques de l'épaisseur de quelques atomes, voire d'un seul. La dernière exfoliation s'effectue lors du transfert sur un substrat isolant sur lequel est appliqué le scotch sale, car la couche de graphène est plus attirée par le substrat que par les autres couches graphitiques collées au scotch. Une fois la feuille de graphène identifiée par microscopie optique sur le substrat – c'est l'étape la plus difficile –, des contacts électriques peuvent y être déposés afin de mesurer les propriétés électriques du graphène.

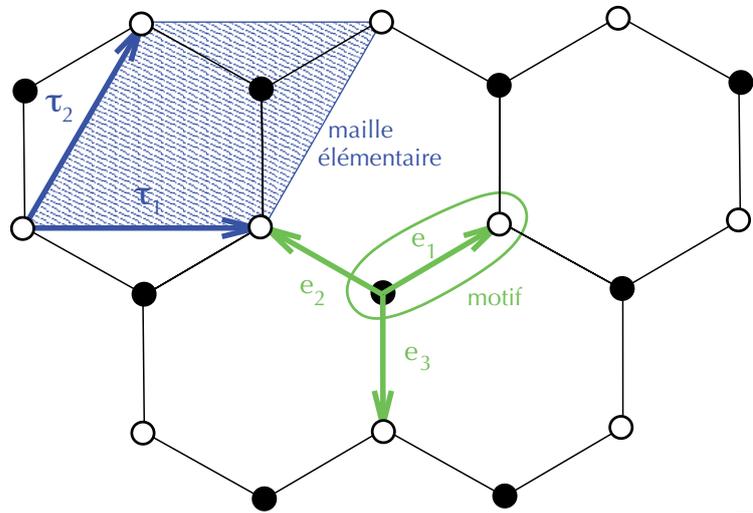
En plus de cette possibilité assez « artisanale » de fabrication d'un système électronique 2D, le groupe de Manchester a montré que le graphène peut être dopé en électrons (et en trous) à l'aide d'une tension électrique appliquée à une électrode planaire séparée du graphène par un isolant – l'électronique à base de graphène était née. Nous reviendrons sur ce point plus loin, dans la discussion des propriétés électroniques.

Au vu de la simplicité de fabrication, il est étonnant de constater que le graphène est (historiquement) le membre le plus jeune de la famille graphitique ; l'aîné est certainement le graphite, dont la découverte date du 16^e siècle mais qui a longtemps été pris pour une sorte de plomb, notamment en raison de son aspect brillant et « mou ». Ce n'est qu'au milieu du 18^e siècle qu'on a compris que le graphite était composé



d'atomes de carbone. Les propriétés physiques du graphite ont été intensément étudiées au milieu du 20^e siècle, en raison de son utilité pour la technologie nucléaire. Alors que le graphite peut être vu comme des feuilles de graphène empilées, il existe d'autres membres de la famille graphitique. Tous sont construits de feuilles de graphène ; dans chaque feuille, les atomes de carbone sont arrangés en un réseau hexagonal, dit en nid d'abeille (fig. 1a). En 1985, les chimistes Robert Curl, Harold Kroto et Richard Smalley ont découvert les fullérènes, sorte de ballons de football formés d'une petite feuille de graphène enroulée sur elle-même lorsqu'on remplace quelques hexagones par des pentagones. Une feuille de graphène peut aussi être roulée comme une cigarette pour donner un nanotube de carbone, abondamment étudié en physique depuis les années 90.

L'exfoliation est-elle la seule technique de fabrication du graphène ? La réponse est non ! Une autre technique, contemporaine de celle de Novoselov et Geim, a été perfectionnée par Claire Berger (CNRS, Grenoble et GaTech, Atlanta) et Walt de Heer (GaTech, Atlanta) : c'est le graphène dit « épitaxié ». Cette technique consiste à graphitiser (thermiquement) la surface d'un cristal de carbure de silicium : lors du chauffage de la surface, les atomes de silicium s'évaporent, alors que les atomes de carbone se réarrangent pour former des couches de graphène. Cette technique permet d'obtenir, de manière contrôlée, une monocouche ou une bicouche de graphène, voire un plus grand nombre de couches quasiment découpées.



a

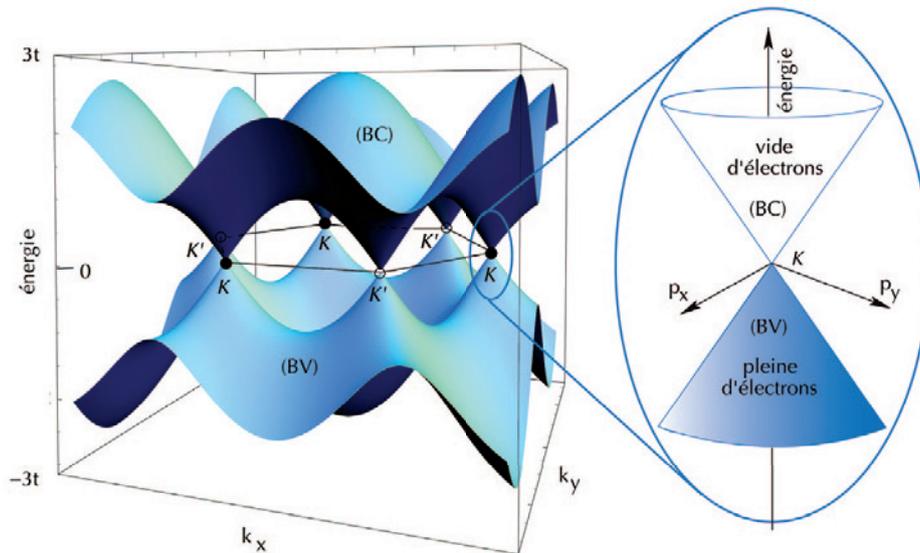
1. Structure du graphène.

a : Structure cristalline du graphène, dite en nid d'abeille, et qui réalise un pavage hexagonal du plan. Chaque atome de carbone est symbolisé par un disque soit blanc (atome dit de type A), soit noir (atome dit de type B) ; les traits sont des liaisons covalentes entre carbones. Les atomes A et B sont à des positions géométriquement non équivalentes. Le motif est constitué d'un atome de chaque type et, dans une maille élémentaire, le motif apparaît une seule fois. (Crédit : M.O. Goerbig, Laboratoire de Physique des Solides, Orsay).

b : Vue d'artiste d'une feuille de graphène, basée sur des données de microscopie électronique en transmission. Les vaguelettes statiques ont une hauteur d'environ 1 nanomètre et une taille latérale d'environ 10 nanomètres. (Illustration par Jannik Meyer)

Une autre technique très prometteuse pour les applications industrielles est certainement le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), qui consiste à faire croître du graphène sur un film métallique exposé à une vapeur d'hydrocarbures. Ce film métallique, du cuivre par exemple, sert de catalyseur qui casse les hydrocarbures et collecte les atomes de carbone qui forment le graphène. Cette technique était connue depuis les années 1980, mais la présence du film métallique était gênante pour la

caractérisation électrique du graphène en raison de sa propre conductivité. Ce problème a très récemment été contourné... par la simple destruction du film dans une solution chimique. La feuille de graphène, préalablement fixée par exemple par un film de polymères, peut alors être pêchée dans la solution, comme une étiquette sur une bouteille de vin (vide quand même) dans une bassine d'eau chaude, et transférée sur un autre substrat plus adapté à l'électronique.



2. Relation de dispersion (énergie E en fonction de l'impulsion $p = \hbar k$) **des électrons de conduction du graphène.** L'agrandissement montre la proximité d'un point de contact que, par convention, on place à énergie nulle, entre les bandes de valence (BV) et de conduction (BC) : la relation de dispersion, localement en forme de cône, correspond à celle d'une particule de masse nulle ou « ultra-relativiste ». L'appellation « masse nulle » provient de l'analogie avec la relation de dispersion d'une particule relativiste : $E = \pm (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$, qui devient $E = \pm pc$ dans la limite de masse nulle, au lieu de $\pm mc^2 \pm p^2/2m$ environ dans le cas d'une masse finie.

© M.O. Goerbig, Laboratoire de Physique des Solides, Orsay.

Quand les électrons perdent leur masse

Les propriétés électroniques exceptionnelles du graphène présentent un très grand intérêt, autant pour la recherche fondamentale que pour les applications techniques et industrielles. Premièrement, il faut mentionner la haute mobilité de ses électrons qui excède largement celle des électrons du silicium, matériau de base dans l'électronique d'aujourd'hui. Alors que les électrons dans les hétérostructures semi-conductrices à base d'arséniure de gallium (GaAs) restent encore les plus mobiles, il faut comparer le grand effort investi dans leur fabrication à celle, artisanale, du graphène. De plus, remarquons que ce record de mobilité électronique de GaAs est obtenu à très basse température, tandis que les électrons du graphène conservent à température ambiante une mobilité typiquement 100 fois supérieure à celle de GaAs ou du Si. Cette haute mobilité est avant tout due à un nombre réduit de diffuseurs dans le graphène : en raison de la grande force des liens chimiques (covalents), qui donnent entre autres une rigidité exceptionnelle au graphène, il y a fort peu de défauts cristallins, qui représentent une source considérable de diffusion électronique dans la plupart des matériaux. En plus, on peut, par l'application

d'un fort courant électrique à travers le graphène, éjecter de la feuille les atomes ou molécules parasites (comme l'eau) qui sont des diffuseurs chargés.

Une autre source de cette grande mobilité est plus intimement liée au caractère exceptionnel des électrons du graphène eux-mêmes : ceux-ci, contrairement aux électrons de la majorité des matériaux, doivent être considérés comme des particules de masse effective nulle. Pour comprendre ce caractère inhabituel des électrons dans le graphène, il faut étudier leur relation de dispersion, c'est-à-dire l'énergie d'un électron en fonction de son impulsion. Considérons d'abord un semi-conducteur ordinaire, qui a une bande de valence pleine d'électrons séparée par un *gap* (un écart en énergie) d'une bande de conduction vide. La relation de dispersion est en général parabolique, et le semi-conducteur est rendu conducteur en le dopant chimiquement, soit en ajoutant des électrons dans la bande de conduction, soit en retirant de la bande de valence. De manière surprenante, pour le graphène, les deux bandes ne sont pas séparées mais se touchent en deux points appelés « points de Dirac », et le *gap* est donc nul (fig. 2). On choisit conventionnellement le zéro d'énergie en ces points de contact. Quand le graphène n'est pas dopé, les électrons remplissent la bande de valence

jusqu'aux points de Dirac, tandis que la bande de conduction est vide. Au voisinage des points de Dirac, la relation de dispersion est linéaire (voir agrandissement dans la figure 2), ce qui, dans le vide, correspondrait à des particules « ultra-relativistes », c'est-à-dire de masse nulle, comme les photons par exemple. La vitesse des électrons n'est toutefois pas celle de la lumière dans le vide mais une vitesse, dite de Fermi, 300 fois inférieure. Pour autant, cette vitesse reste dix fois supérieure à celle des porteurs dans les meilleurs semi-conducteurs ordinaires, ce qui fait du graphène un candidat de choix pour l'électronique rapide. La description théorique de ces électrons exceptionnels se fait en termes d'une fonction d'onde à deux composantes, qui vérifie une équation empruntée à la mécanique quantique relativiste : l'équation de Dirac. C'est pourquoi on appelle ces électrons des « fermions de Dirac de masse nulle ».

Du point de vue de la théorie des bandes (1928-1930), qui cherche à classer les cristaux conducteurs, le graphène est un « ovni ». On aurait envie de le ranger avec les semi-conducteurs ; mais son *gap* est nul et, expérimentalement, sa conductivité ne s'annule pas, même aux plus basses températures, ce qui ne correspond pas à l'idée qu'on se fait d'un semi-conducteur. On parle donc plutôt de semi-métal, mais

dont le recouvrement entre bandes est nul. Cela signifie qu'il n'a pas de porteurs de charge en l'absence de dopage, ce qui *a priori* n'est pas terrible pour un métal...

Expérimentalement, le graphène exfolié est très souvent équipé d'une grille métallique qui permet de réaliser un effet de champ électrique et de le doper. Le graphène est posé sur un substrat en silicium. En réalité, immédiatement sous la feuille de graphène se trouve une couche de 300 nm d'épaisseur de dioxyde de silicium (un isolant), avant d'accéder au silicium proprement dit. Ce dernier est très fortement dopé (chimiquement) pour le rendre métallique. Si on applique une différence de potentiel électrique entre le silicium dopé (la « grille arrière ») et la feuille de graphène, on réalise un condensateur dont le diélectrique est le dioxyde de silicium. Par effet de champ électrique, en réglant la différence de potentiel, on peut ajouter ou enlever des électrons au graphène. Comme le graphène non dopé ne comporte pas de porteurs de charge, on dispose donc d'un

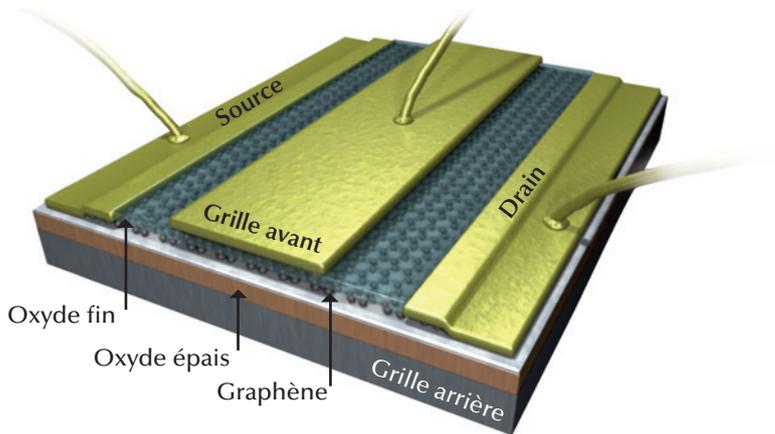
« bouton » permettant de contrôler électriquement le dopage en porteurs de charge. En changeant le signe de cette différence de potentiel, on peut passer continûment d'un dopage en électrons à un dopage en trous. En utilisant cet effet condensateur et en mesurant simultanément la résistance électrique d'une feuille de graphène, Novoselov *et al.* ont montré en 2004 qu'il était possible de passer continûment d'une conduction électrique par des électrons à une conduction par des trous (transport ambipolaire). Notons qu'en plus de la grille arrière, il est possible d'ajouter une « grille avant », mieux couplée au graphène car plus proche (fig. 3).

En mesurant systématiquement la conductivité électrique en fonction de la tension de grille (et donc de la densité de porteurs, voir figure 4), des surprises sont apparues. Le résultat le plus étonnant sans doute été que la conductivité du graphène ne s'annule jamais, même à basse température et même à dopage nul, quand on s'attend à une absence de porteurs de charge !

Certes, à dopage nul, la conductivité est minimale (par rapport à tout autre dopage) mais elle reste de l'ordre de grandeur du quantum de conductance⁽¹⁾. Le transport électronique du graphène à dopage nul est fascinant, notamment quand on étudie l'influence du désordre et des impuretés. En présence de désordre, un conducteur 2D ne devrait pas exister en vertu de la théorie d'échelle de la localisation (Anderson *et al.*, 1979). Le graphène semble être une exception. De plus, dans la limite opposée d'une feuille de graphène parfaitement propre, on s'attendrait à une conductivité soit infinie (s'il y a des porteurs de charge), soit nulle (s'il n'y en a pas). Or dans ce cas, la théorie ainsi que quelques expériences réalisées sur des échantillons très petits montrent que la conductivité est proche de $4e^2/(\pi h)$.

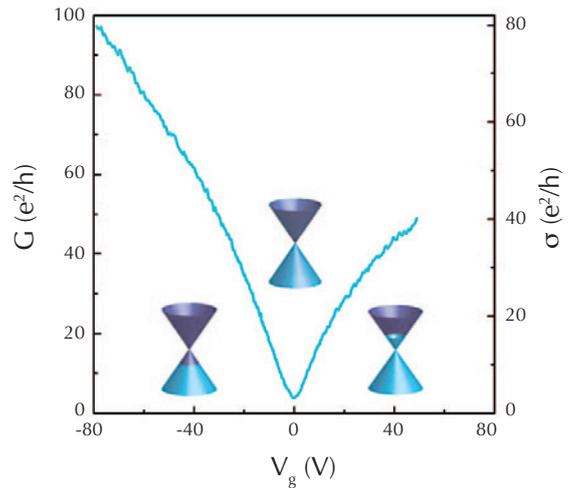
Un moyen particulièrement spectaculaire de révéler la présence de fermions de Dirac de masse nulle dans le graphène est de les soumettre à un fort champ magnétique perpendiculaire au plan de la feuille. Les

(1) Le quantum de conductance $e^2/h = 1/(25770 \text{ ohms})$ (où e est la charge de l'électron et h la constante de Planck) représente *grosso modo* la conductance critique qui sépare les conducteurs des isolants.



3. Image d'artiste d'un dispositif de type transistor à effet de champ (FET) à monocouche de graphène. Une feuille de graphène, déposée sur un substrat de silicium oxydé (SiO_2), est dotée de contacts métalliques (source et drain) et, le cas échéant, d'une grille avant qui permet de contrôler le passage d'un courant électrique de la source au drain. La grille avant est séparée du graphène par une fine couche diélectrique (Al_2O_3 par exemple). Si le silicium est dopé, il peut servir de grille arrière.

© David Daron, Laboratoire Pierre Aigrain, Paris



4. Dépendance en tension de grille V_g (i.e. en densité de porteurs) de la conductivité σ et de la conductance G d'une feuille de graphène monocouche. Le remplissage des bandes (en bleu), représentées par des cônes de Dirac, montre le dopage en trous ($V_g < 0$) et en électrons ($V_g > 0$). En l'absence de dopage, la bande de valence est pleine et la bande de conduction est vide, mais la conductivité reste finie et de l'ordre de $4e^2/h$.

© M. Monteverde, Laboratoire de Physique des Solides, Orsay.

niveaux dégénérés, dits de Landau, du graphène sont anormaux (voir encadré). Par exemple : 1) ils varient comme la racine carrée du champ magnétique plutôt que linéairement ; 2) il existe un niveau de Landau à énergie nulle, i.e. d'énergie égale à celle des points de Dirac, quel que soit le champ magnétique ; 3) il existe des niveaux de Landau à énergie positive (bande de conduction) et à énergie négative (bande de valence), accessibles grâce aux points de contact entre bandes.

Certaines de ces anomalies se révèlent en mesurant le magnéto-transport, c'est-à-dire le transport électronique sous fort champ magnétique. La quantification de Landau donne lieu à un effet remarquable, appelé « effet Hall quantique » : lorsqu'on fait passer un courant à travers l'échantillon, on mesure une tension transverse (dite de Hall) non nulle, qui révèle des plateaux quand elle est tracée en fonction du champ magnétique. Ces plateaux correspondent habituellement à des facteurs de remplissage

entiers (voir encadré), mais dans le graphène il s'agit de demi-entiers. C'est cette anomalie dans la série des plateaux qui a permis au groupe de Manchester et à celui de Philip Kim à Columbia University (New York) de mettre en évidence le caractère « ultra-relativiste » des électrons dans le graphène. Notons enfin que cette découverte en 2005 a été à l'origine de l'engouement scientifique pour le graphène.

Le premier cristal bidimensionnel

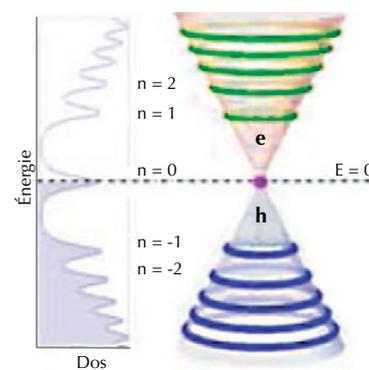
Le graphène ne présente pas seulement un intérêt en raison de ses propriétés électroniques, mais il est aussi tout à fait exceptionnel d'un point de vue mécanique. On peut le voir comme une membrane carbonée rigide dans le plan, mais flexible hors du plan (fig. 1b). La rigidité de la structure est due aux liaisons covalentes entre atomes de carbone, mais aussi à « l'aromaticité » : les électrons de conduction sont délocalisés sur tout le cristal, comme

dans une molécule de benzène. L'existence d'un cristal 2D n'est pas évidente quand on pense au célèbre théorème de Mermin et Wagner, dont la conclusion (rapide) est qu'« il n'existe pas de cristaux à une ou deux dimensions à température non nulle ». En réalité, ce théorème montre par l'absurde qu'un cristal 2D devrait fondre sous l'effet des fluctuations thermiques dans le plan. Or le graphène est bien un cristal 2D mais plongé dans un espace 3D, l'espace ordinaire : les fluctuations thermiques peuvent se développer non seulement dans le plan, mais également hors du plan. Quand on les considère séparément, chacun de ces deux types de fluctuations menace la stabilité du cristal : les fluctuations dans le plan semblent capables de faire fondre le cristal (argument de Mermin et Wagner), celles hors du plan de froisser la membrane au point d'en faire une boulette de papier (carbone). En réalité, il semble que ce soit le couplage entre les deux types de fluctuations qui stabilise la membrane en la sauvant de ces

► Niveaux de Landau et effet Hall quantique

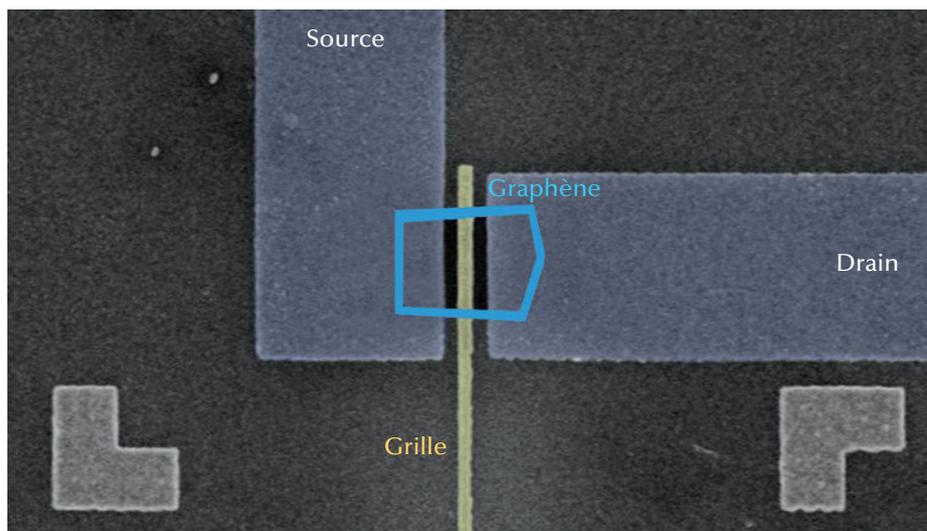
On rappelle ici quelques propriétés des électrons confinés dans un plan de surface S et soumis à un champ magnétique B perpendiculaire au plan. Classiquement, sous l'effet de la force de Lorentz magnétique, un électron suit une trajectoire circulaire appelée orbite cyclotron. Le rayon de cette orbite est quelconque et dépend continûment de l'énergie de l'électron. La mécanique quantique lève cet arbitraire en imposant des valeurs discrètes à ce rayon, comme c'est le cas pour les orbites fermées des électrons autour du noyau d'un atome. De même que pour ces derniers, les orbites cyclotrons quantifiées donnent lieu à des énergies discrètes, dites niveaux de Landau. Ces niveaux – c'est une particularité du système – sont hautement dégénérés, c'est-à-dire qu'ils peuvent abriter un très grand nombre d'électrons (N_B) qui équivaut au flux magnétique total BS traversant l'échantillon occupant une surface S , compté en unités du « quantum de flux » h/e . Pour des électrons ayant une relation de dispersion parabolique (électrons massifs usuels), les énergies des niveaux de Landau sont proportionnelles au champ magnétique. Pour des fermions de Dirac de masse nulle, la relation de dispersion est linéaire et les niveaux de Landau varient comme la racine carrée du champ magnétique et de l'indice n du niveau. Ceci se traduit par une densité d'états montrant des pics qui ne sont pas équidistants, mais dont l'espacement varie comme la racine carrée de leur indice (voir la figure ci-contre).

Une manifestation particulièrement spectaculaire de l'existence de niveaux de Landau est l'effet Hall quantique. Commençons par rappeler l'effet Hall classique. Lorsqu'on fait passer un courant dans une plaque conductrice exposée à un champ magnétique perpendiculaire, on détecte une accumulation de charges électriques sur les bords latéraux de l'échantillon. Expérimentalement, on mesure une tension transverse (dite de Hall), fonction du rapport entre le champ magnétique B et le nombre N de porteurs de charge (électrons ou trous) dans le système. Correctement normalisé, l'inverse de ce rapport donne le facteur de remplissage des bandes ($1/\text{facteur de remplissage} = N_B/N \sim B$). Classiquement, la tension de Hall est proportionnelle à B : on mesure alors une droite qui passe par l'origine. Lorsqu'on place l'échantillon à très basse température (disons les 4 kelvin de l'hélium liquide) et sous un fort champ magnétique (quelques teslas), on peut voir un effet quantique dans l'expérience de Hall. Des plateaux dans la tension de Hall peuvent apparaître en fonction du facteur de remplissage (inverse) : plutôt qu'une droite, on observe un escalier montant (qui, en moyenne, reproduit la droite de l'effet Hall classique). Les plateaux correspondent à des facteurs de remplissage entiers et à des tensions de Hall quantifiées. On parle d'effet Hall quantique.



À gauche : les niveaux de Landau (indiqués par l'entier n) du graphène apparaissent comme des pics dans la densité d'états (DoS, axe horizontal) en fonction de l'énergie (axe vertical). Ces pics ont une largeur finie en raison de la présence inévitable de désordre. On remarque en particulier le niveau de Landau $n = 0$ à énergie nulle. À droite : sur le cône de Dirac sont représentées les orbites cyclotrons (dans l'espace des impulsions) quantifiées pour les électrons (e, en vert) et pour les trous (h, en bleu). À fort champ magnétique, il n'y a plus de cône de Dirac mais uniquement des niveaux de Landau bien séparés.

D'après A. Luican, G. Li et E. Andrei, *Phys. Rev. B* **83** (2010) 041405(R).



5. Image en microscopie électronique à balayage d'un nanotransistor micro-onde réalisé à partir d'une monocouche de graphène exfolié (contour bleu), de largeur 900 nm. Une fine grille de largeur 100 nm (jaune) est déposée par-dessus un oxyde d'aluminium de 8 nm d'épaisseur. Ce dispositif a une fréquence de coupure de 17 GHz ; des dispositifs plus récents dépassent les 100 GHz. © E. Pallechi, Laboratoire Pierre Aigrain, ENS Paris.

deux écueils. Le prix à payer pour ce faire est l'apparition de vaguelettes statiques ("ripples") à la surface de la membrane. De telles vaguelettes ont été observées en 2007 (fig. 1b) sur du graphène suspendu et tenu par les côtés (plutôt que posé sur un substrat). Elles ont typiquement une hauteur (hors du plan) de 1 nanomètre et une taille (dans le plan) de 10 nanomètres, alors que la distance entre deux atomes voisins est d'environ 0,14 nm.

Les cristaux 2D existent donc bel et bien, et l'astuce du scotch de Novoselov et Geim devrait permettre d'exfolier d'autres cristaux 3D « en couches » pour en faire des mono-feuillets. À titre d'exemple, on citera les cristaux de dichalcogénure de molybdène (MoS_2), dont des monocouches ont déjà été réalisées en 2005 par Novoselov *et al.*

Vers une électronique carbone

On a vu que, de par son épaisseur monoatomique, le graphène revêt nombre des propriétés remarquables du monde microscopique dominé par la physique quantique. C'est ainsi qu'on explique la quantification de l'absorption optique du graphène, donnée par la constante de structure fine (multipliée par π), soit : $\pi e^2 / (\hbar c) = \pi / 137 = 2,3\%$ par monocouche.

Les propriétés mécaniques aussi sont remarquables, avec un module d'Young très élevé ; on a ainsi pu réaliser des nano-résonateurs électromécaniques fonctionnant dans la gamme du GHz pour les télécommunications. La grande flexibilité du graphène lui permet aussi de s'adapter à la plupart des substrats, notamment aux subs-

trats souples. L'ensemble de ces propriétés, telle l'excellente conduction thermique, a conduit André Geim à parler de « superlatifs du graphène ». En réalité, elles confèrent au graphène la qualité d'une plate-forme technologique de grande souplesse, que les ingénieurs ne vont pas tarder à exploiter. C'est une technologie relativement douce et robuste qui a pu naître et se développer dans les laboratoires académiques et rapidement se transférer à l'industrie, grâce notamment aux techniques de synthèse par graphitisation ou CVD mentionnées ci-dessus (films de 30 pouces synthétisés chez Samsung).

Parmi les applications, on pense naturellement à la microélectronique à cause des propriétés de transport remarquables du graphène décrites plus haut. Le terrain est aujourd'hui occupé par les semi-conducteurs, essentiellement le silicium pour les transistors à effet de champ de type Métal-Oxyde-Semi-conducteur (en anglais MOS-FET) utilisés en électronique numérique, et les composés III-V (arséniure de gallium ou d'indium) pour les transistors de haute mobilité à modulation de dopage utilisés en télécommunication (satellites et téléphonie mobile). Le graphène qui, rappelons-le, n'est pas un semi-conducteur, a une très grande mobilité électronique comme nous l'avons vu plus haut. Une autre qualité est la robustesse de ses propriétés électroniques en présence d'une grille avant dans une géométrie Métal-Oxyde-Graphène (on parlera alors plutôt de MOG-FET, voir figure 5) avec des oxydes ultra-fins (épaisseur équivalente de SiO_2 de l'ordre du nanomètre) qui augmentent le couplage électrostatique de la grille au canal, ce qui

est favorable aux hautes fréquences. Les objectifs actuels de réaliser des détecteurs à ultra-bas bruit fonctionnant à 100 GHz (bande W), sont déjà partiellement atteints. La concurrence avec le MOS-FET silicium pour les applications en logique est plus difficile, et ceci pour des raisons fondamentales. Le graphène conduit trop bien ! En effet, en l'absence d'un *gap*, il est quasiment impossible d'éteindre le courant sous l'action d'une grille, tant les phénomènes quantiques sont efficaces pour permettre aux fermions de Dirac de masse nulle de franchir des barrières de potentiel (phénomène qu'on appelle « effet tunnel de Klein »). Des solutions sont à l'étude pour créer un petit *gap* dans la relation de dispersion des électrons du graphène. Par exemple, en taillant un étroit ruban de graphène (on parle de nanoruban), on peut induire un *gap* de confinement quantique et donc réintroduire quelques propriétés semi-conductrices, fut-ce au prix d'une certaine dégradation de la mobilité électronique. ■

En savoir plus

- J.N. Fuchs, M.O. Goerbig et M. Potemski, « Des électrons sans masse dans une feuille de carbone », *Images de la physique* (2007), pp. 50-56, CNRS.
- A.K. Geim et P. Kim, "Carbon wonderland", *Scientific American* (avril 2008), pp. 90-97.
- J.N. Fuchs et M.O. Goerbig, « Le graphène, premier cristal bidimensionnel », *Pour la Science* **367** (mai 2008) 36-43.
- A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov et A. K. Geim, "The electronic properties of graphene", *Rev. Mod. Phys.* **81** (2009) 109.
- G. Fleury et X. Waintal, « Existe-t-il des métaux bidimensionnels ? », *Reflète de la physique* **20** (juillet-août 2010) 6-10.