

La masse des électrons rayée d'un trait de crayon... Ainsi pourrait-on résumer l'un des aspects les plus fascinants d'un nouveau matériau obtenu en 2004 à partir du graphite, forme cristalline de carbone bien connue et dont on fait les mines des crayons à papier. Cette année-là, l'équipe d'Andre Geim, à l'Université de Manchester, en Grande-Bretagne, a réussi à fabriquer un cristal bidimensionnel, c'est-à-dire un solide ordonné dont l'épaisseur est de seulement un atome. Les cristaux les plus minces obtenus auparavant avaient une épaisseur d'au moins une dizaine de plans atomiques. En partant du graphite, A. Geim et ses collègues ont obtenu une sorte de molécule plane géante, nommée graphène et formée uniquement d'atomes de carbone liés entre eux de façon à former un réseau d'hexagones, comme un nid d'abeilles (voir la figure 1).

À la suite de cette percée expérimentale, de nombreux physiciens se sont lancés dans l'étude de ce nouveau composé. Ils ont surtout été attirés par les propriétés électroniques hors du commun du graphène, que des théoriciens avaient en partie prédites au cours des décennies précédentes.

D'où viennent les électrons dans le graphène? Chaque atome de carbone a quatre électrons externes disponibles pour des liaisons chimiques. Or dans le graphène, chacun des atomes de carbone étant lié à trois autres, il reste un électron par atome susceptible de se déplacer le long du réseau cristallin.

Partant de cette situation – des électrons mobiles dans un réseau plan hexagonal –, la théorie et l'expérience montrent que les propriétés électroniques du graphène ne sont ni celles d'un conducteur métallique, ni celles d'un semi-conducteur. Entre autres particularités, les électrons du graphène évoluent à la manière de particules quantiques et relativistes, comme s'ils avaient perdu leur masse et se déplaçaient à la vitesse de la lumière!

Détaillons dans un premier temps la structure du graphène, avant de décrire les méthodes permettant de l'obtenir. Nous verrons ensuite pourquoi le graphène est étonnant et quel intérêt il présente.

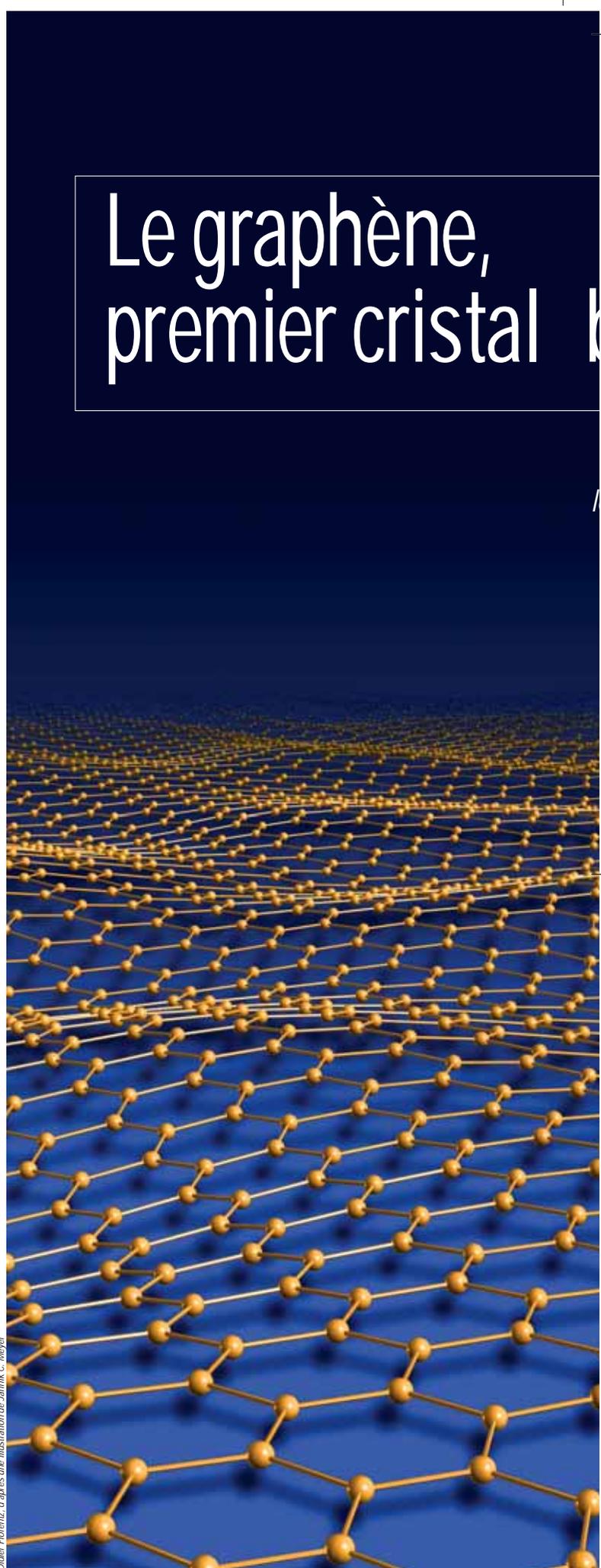
Un réseau hexagonal plan

Le graphène est un plan de carbone, où les atomes sont positionnés suivant un ordre régulier de structure hexagonale, similaire à celle d'un nid d'abeille. C'est la plus mince membrane obtenue à ce jour : son épaisseur est inférieure au nanomètre (le millionième du millimètre), les échantillons obtenus faisant quelques micromètres (millièmes de millimètre) de largeur ou de longueur.

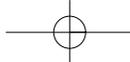
Le graphène s'apparente au graphite et non au diamant, l'autre forme cristalline du carbone utilisée en bijouterie (où les atomes de carbone forment un réseau tétraédrique). Le graphite est un cristal de carbone qu'on trouve à l'état naturel et qui a une structure en couches : c'est une superposition de feuilles de graphène faiblement liées les unes aux autres.

Il est commode de classer les cristaux de carbone en fonction de leur dimensionnalité, c'est-à-dire du nombre de dimensions d'espace dans lesquelles le cristal s'étend. Le graphite, sorte de millefeuille de graphène, est un représentant tridimensionnel ; c'est aussi le plus anciennement connu.

Le graphène, premier cristal



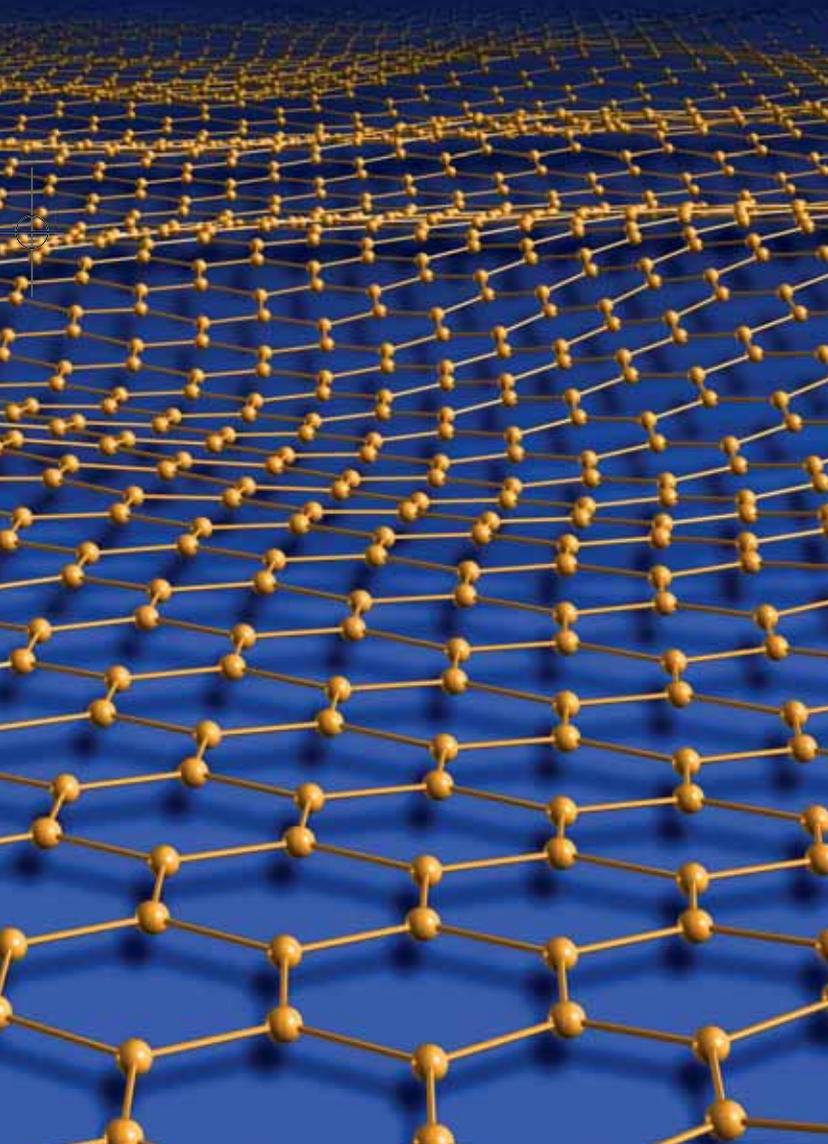
Didier Florentz, d'après une illustration de Janik C. Meyer



Graphène Cristal bidimensionnel

Jean-Noël Fuchs • Mark Oliver Goerbig

Une nouvelle forme du carbone est née : le graphène, feuille de graphite d'épaisseur monoatomique. Dans ce matériau qui captive les physiciens, les électrons se déplacent comme s'ils allaient à la vitesse de la lumière et avaient une masse nulle.



Physique

Dans les années 1980, les Américains Robert Curl et Richard Smalley, et leur collègue anglais Harry Kroto ont découvert les fullerènes, des molécules géantes de carbone. Parmi eux, le footballène ou C_{60} – dont la forme et la structure rappellent un ballon de football – est sans doute le plus célèbre (voir la figure 2). Comme les fullerènes ne s'étendent dans aucune direction – le ballon est de rayon microscopique –, on leur attribue une dimensionnalité nulle.

En 1991, le physicien japonais Sumio Iijima a découvert les nanotubes de carbone, que l'on peut voir comme des tubes de graphène enroulé (voir la figure 2). Étant longs et très fins, ce sont des cristaux de dimensionnalité un. Le petit dernier est le graphène : c'est le cristal de carbone qui manquait dans la famille, celui de dimensionnalité deux. Surtout, c'est le premier cristal bidimensionnel réalisé : on n'en connaissait pas d'autres.

Deux types de graphène

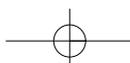
Comment obtient-on du graphène ? Une première méthode consiste à extraire mécaniquement une feuille unique de graphène d'un cristal de graphite. On parle d'exfoliation mécanique. Dans la pratique, on part d'un cristal très pur de graphite. On utilise ensuite un ruban adhésif (du Scotch) pour peler des feuilles de graphène du graphite et les déposer sur un substrat de dioxyde de silicium (SiO_2), qui est un isolant électrique.

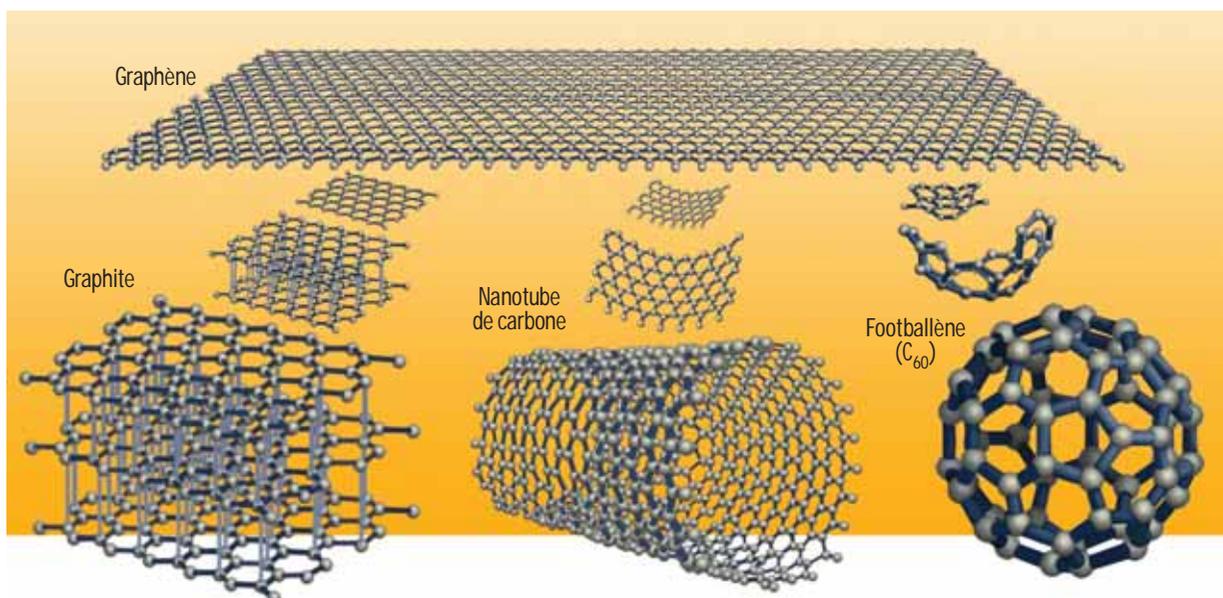
Cette technique, mise au point en 2004 par A. Geim et son équipe et qui permet d'obtenir du « graphène exfolié », est maintenant connue sous le nom d'« astuce du Scotch ». Le procédé est comparable à l'écriture sur un tableau noir à l'aide d'une craie : lorsqu'on écrit, des couches de calcaire se détachent du bâton de craie et laissent des traces sur le tableau en ardoise. Ici, la craie serait en graphite et le tableau en dioxyde de silicium. Parmi les dépôts de graphite sur le substrat, figurent de nombreux microcristaux de graphite formés le plus souvent de plusieurs dizaines ou centaines de couches de graphène, c'est-à-dire de petits millefeuilles de carbone. Seule une très petite fraction des dépôts comporte des feuilles isolées de graphène.

Or ces monocouches sont invisibles à l'œil nu, et l'expérimentateur doit les trouver à l'aide d'un microscope optique. Cette étape est délicate, car le contraste sur le substrat entre l'absence et la présence d'une feuille de carbone d'épaisseur atomique est très faible.

Un verrou a été levé lorsqu'on s'est aperçu qu'il existe une épaisseur optimale pour le substrat de dioxyde de silicium : à environ 300 nanomètres d'épaisseur, le contraste est maximal et permet de bien détecter la présence de feuilles de graphène. Une fois ces feuilles repérées, on peut les isoler et les manipuler. Par exemple, on peut y déposer de petits plots de métal pour réaliser des

1. Le graphène est un cristal de carbone dont l'épaisseur est de un atome seulement. Il correspond à un feuillet élémentaire de graphite. Les atomes de carbone sont chimiquement liés de façon à former un réseau régulier d'hexagones. Le réseau, s'il était parfaitement plan, serait instable vis-à-vis de l'agitation thermique. Dans la réalité, il présente des ondulations statiques dont la hauteur est de l'ordre du nanomètre et dont l'extension latérale est d'une dizaine de nanomètres.





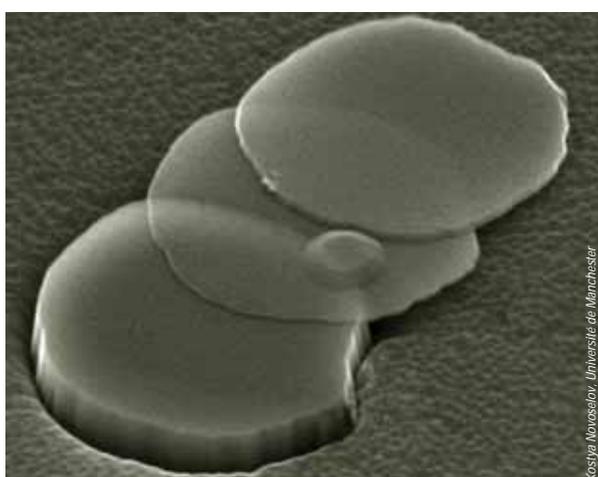
2. Le graphène constitue l'élément structural de divers matériaux dits graphitiques. Le graphite (à gauche) est ainsi un empilement de feuilles de graphène faiblement liées (liaisons représentées

ici par des traits verticaux). Enroulé sur lui-même, le graphène peut former des nanotubes de carbone (au milieu) ou des fullerènes tels que le footballène, ou C₆₀ (à droite).



contacts électriques, afin de mesurer les propriétés électriques du graphène.

Une autre méthode pour obtenir du graphène consiste à partir non pas d'un cristal de graphite, mais d'un cristal de carbure de silicium (SiC). Si l'on chauffe ce dernier à plus de 1000 °C dans un four et sous vide, des atomes de silicium se dissocient et s'évaporent; ils ne laissent alors à la surface du cristal que des atomes de carbone, qui se lient spontanément en formant un réseau hexagonal. Cette méthode, développée surtout par l'équipe de Walt de Heer (Institut de technologie de Georgie, aux États-Unis) et Claire Berger (CNRS, à Grenoble), permet de réaliser la croissance orientée d'un cristal de graphène sur un substrat isolant de carbure de silicium. On parle alors de « graphène épitaxié », par opposition au « graphène exfolié ».



Bien que cousins très proches, il semble que les deux types de graphène diffèrent légèrement du point de vue de leurs propriétés électroniques. Pourquoi? Une des raisons est sans doute à chercher du côté des différences de substrat – dioxyde de silicium amorphe dans le cas du graphène exfolié, cristal ordonné de carbure de silicium dans le cas du graphène épitaxié. Le graphène épitaxié est sans doute le plus prometteur pour les applications, en raison du caractère reproductible et contrôlable de sa méthode de fabrication. Une nouveauté est d'ailleurs apparue il y a quelques semaines : Peter Sutter et ses collègues, du Laboratoire Brookhaven aux États-Unis, ont obtenu du graphène épitaxié sur un cristal de ruthénium, leur méthode ayant l'avantage de produire des feuillets de graphène très peu liés au substrat métallique.

3. De minuscules disques de quelques couches de graphène (ci-dessus, grossis plus de 6 000 fois) peuvent être obtenus en attachant un microcristal de graphite à la pointe d'un microscope à force atomique, et en passant doucement la pointe sur une surface lisse de silicium. Photographie du haut : du graphène suspendu sur une grille d'or; même en l'absence de substrat, le graphène est stable.

Pour des expérimentateurs chevronnés, la fabrication du graphène n'est pas très difficile – une fois la recette connue – lorsqu'on la compare à celle d'autres matériaux actuellement à l'étude. Pourquoi alors le graphène n'a-t-il pas été découvert avant 2004? Le graphite est connu depuis très longtemps : découvert en Angleterre au XVI^e siècle, il a été

identifié comme cristal de carbone en 1779 par le pharmacien et chimiste germano-suédois Carl Scheele et nommé ainsi, en raison de son utilisation comme crayon, en 1789 par le géologue allemand Abraham Werner. La raison principale qui a empêché de découvrir le graphène est sans doute d'ordre psychologique : la plupart des physiciens pensaient qu'un cristal bidimensionnel ne pouvait exister.

Un théorème interdit en effet l'existence de cristaux à deux dimensions d'espace. Ce théorème, dit de Mermin-Wagner et établi vers 1966-1968, repose sur une démonstration par l'absurde : on commence par supposer l'existence d'un cristal bidimensionnel – dans un monde qui serait lui aussi bidimensionnel – et on montre qu'un tel cristal est instable. Pourquoi ? Parce que sous l'effet de l'agitation thermique des atomes, même à basse température, il se désordonne spontanément et devient liquide.

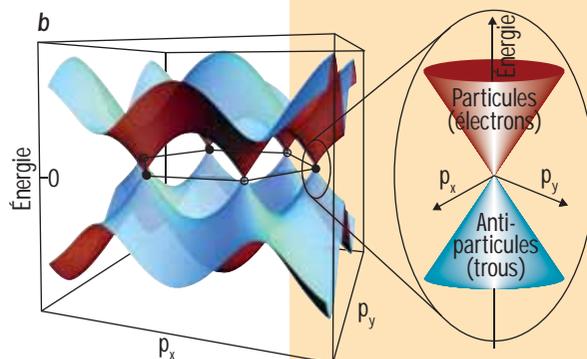
Des cristaux bidimensionnels que l'on pensait impossibles...

Dans un cristal, l'agitation thermique crée des vibrations, similaires à des ondes sonores graves, qui peuvent détruire l'ordre du cristal au point de le faire fondre. D'après les calculs, ces vibrations sont d'autant plus violentes que la dimension d'espace est petite, c'est-à-dire qu'elles disposent de moins d'espace pour se débattre. Ainsi, bien qu'inoffensives à trois dimensions, elles sont dangereuses à deux (et encore plus à une) dimensions d'espace. Au point de penser qu'un cristal bidimensionnel ne peut avoir d'existence durable.

Dans le cas du graphène obtenu en laboratoire, le cristal est bien bidimensionnel, mais le monde dans lequel il se trouve est l'espace ordinaire, à trois dimensions. Les fluctuations thermiques peuvent alors s'étendre dans la troisième direction, ce qui atténue leur violence. C'est ainsi l'existence d'une troisième direction spatiale qui confère au cristal sa stabilité (et qui permet au théorème de Mermin-Wagner de rester valable !), et non le fait que la feuille de graphène repose sur un substrat, comme on l'a cru dans un premier temps.

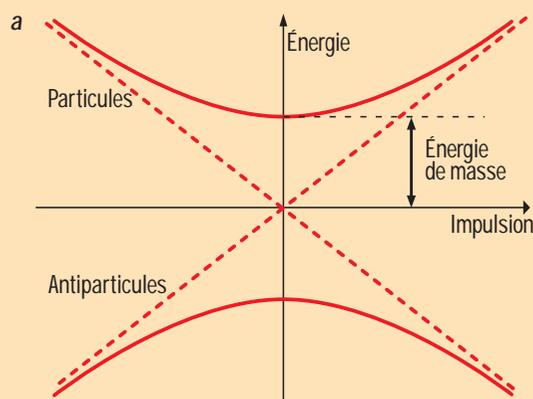
Pour confirmer qu'un cristal bidimensionnel peut être stable sans l'aide d'un substrat-béquille, A. Geim et ses collègues ont réalisé du graphène suspendu sur une grille métallique microscopique ; cette dernière joue le rôle d'un échafaudage et permet de se passer de substrat (voir la figure 3). Le graphène se révèle stable dans ces conditions : il ne se liquéfie pas.

Cependant, cette stabilité a un coût. Le graphène se déforme hors de son plan, dans la troisième direction d'espace, et n'est donc plus réellement plat. Il ressemble alors à un film ultramine parcouru de vagues statiques (voir la figure 1). Ces ondulations ont une hauteur d'environ un nanomètre et une dimension latérale de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Il est remarquable que les déformations transversales de la feuille de graphène soient douces et se



Des électrons de masse effective nulle

La « relation de dispersion » d'une particule (*a*, en traits pleins pour une particule de masse non nulle, en pointillés pour une masse nulle) représente l'énergie E d'une particule en fonction de son impulsion p . Le signe de l'énergie indique s'il s'agit de particules (+, énergie positive) ou d'antiparticules (–, énergie négative). Dans la théorie de la relativité d'Einstein, la masse d'une particule est une forme d'énergie, nommée énergie de masse. C'est l'énergie de la particule lorsqu'elle est immobile, c'est-à-dire lorsque son impulsion est nulle. La vitesse de la particule est donnée par la pente de la courbe représentant l'énergie en fonction de l'impulsion ; cette courbe montre que la vitesse est toujours inférieure (pour une masse non nulle) ou égale (pour une masse nulle) à celle de la lumière.



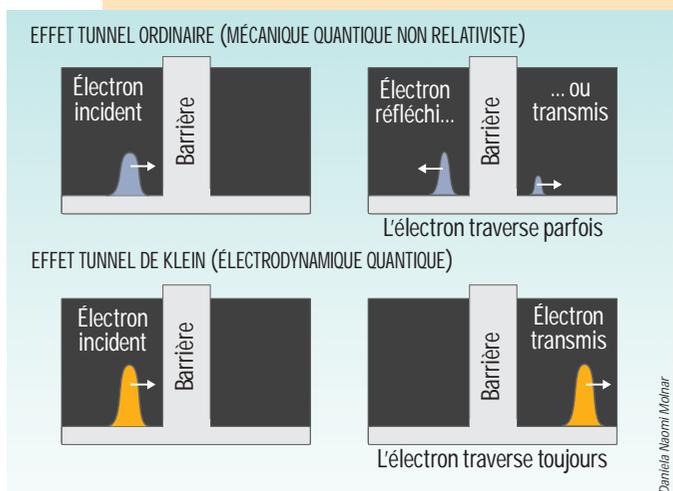
A priori, le mouvement d'un électron dans un cristal n'a rien à voir avec celui d'un électron libre. Le physicien d'origine suisse Felix Bloch a pourtant démontré en 1928 qu'une des conséquences de la mécanique quantique est qu'un électron se déplace dans un cristal parfait presque comme un électron libre, à ceci près que ce déplacement est décrit par une relation de dispersion différente de celle valable dans le vide et qui dépend des caractéristiques du cristal. En particulier, la masse (effective, due à l'interaction avec le réseau cristallin) de l'électron est modifiée.

L'électron pouvant se déplacer dans le plan xOy du graphène, son mouvement est décrit par deux impulsions : p_x dans la direction Ox et p_y dans la direction Oy . La relation de dispersion d'un électron dans une feuille de gra-

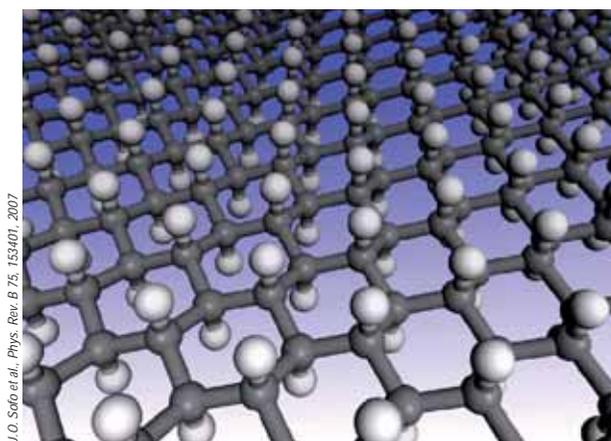
phène ressemble à deux couronnes à six pics – l'une à l'endroit, l'autre à l'envers – posées l'une sur l'autre, les pics se faisant face. À basse température, tous les états d'énergie négative (la couronne du bas) sont remplis d'électrons : on parle d'une mer d'électrons ou mer de Fermi. Au contraire, tous les états d'énergie positive (la couronne du haut) sont vides. Les électrons importants pour la conduction électrique dans le graphène sont ceux qui se trouvent à la surface de la mer de Fermi, c'est-à-dire au voisinage des points de contact

entre la couronne du bas et celle du haut. À proximité de ces points de contact, la relation de dispersion ressemble à un sablier (zoom dans la figure). Ce sablier est à moitié plein. On remarque la ressemblance entre ce sablier et la ligne en pointillés de la figure *a*, correspondant à une particule de masse nulle : au voisinage de la surface de la mer de Fermi, un électron du graphène se comporte comme une particule sans masse, se déplaçant à une vitesse d'environ 1 000 kilomètres par seconde donnée par la pente du sablier (et non à la vitesse de la lumière). Les antiparticules sont ici des trous (ou des bulles) dans la mer de Fermi, laissés par des électrons excités.

L'effet tunnel de Klein



Dans le graphène, le comportement des électrons mobiles peut être décrit par des équations identiques à celles de l'électrodynamique quantique à deux dimensions d'espace, en attribuant aux électrons une masse nulle. Une telle théorie à la fois quantique et relativiste prédit des phénomènes surprenants. L'un d'eux est l'effet tunnel de Klein, apparenté au « paradoxe de Klein » remarqué en 1929 sur l'équation relativiste de Dirac. Dans l'effet tunnel ordinaire de la mécanique quantique (non relativiste), un électron, représenté par une onde incidente (*en bleu*), peut franchir une barrière avec une certaine probabilité, qui n'atteint pas 100 pour cent et qui diminue avec la hauteur ou l'épaisseur de la barrière (en physique classique, cette probabilité est nulle : la particule ne peut franchir la barrière, n'ayant pas assez d'énergie). Dans l'effet tunnel de Klein, l'onde électronique (*en orange*), qui se déplace à la vitesse de la lumière puisque la masse de l'électron est ici nulle, franchit la barrière avec une probabilité de 100 pour cent. Cet effet, dont l'interprétation physique est délicate, est lié au fait que l'état quantique correspondant au vide (l'absence d'excitations, ou de particules) dans la barrière n'est pas le même que l'état du vide en dehors.



4. Le graphane ressemble à du graphène, dont chaque atome de carbone (*en gris*) serait lié à un atome d'hydrogène (*en blanc*) se trouvant soit au-dessus du plan, soit au-dessous. En 2007, Jorge Sofo et ses collègues, de l'Université de Pennsylvanie, ont prédit que cet hydrocarbure, non encore synthétisé, serait stable. Le graphane pourrait être un matériau de choix pour stocker l'hydrogène.

produisent sans que la feuille ne se casse et sans que des défauts n'y apparaissent : les hexagones d'atomes de carbone restent des hexagones et ne cèdent pas la place à des pentagones ou des heptagones, qui constitueraient des imperfections. En fait, la structure atomique du graphène est étonnamment propre et parfaite. Les observations n'y révèlent presque aucun défaut.

Depuis sa découverte expérimentale, le graphène offre surtout un nouveau et passionnant terrain de jeu pour la physique fondamentale. Au-delà de sa structure bidimensionnelle qui en fait un cristal unique, ce sont les propriétés électroniques extraordinaires du graphène qui captivent les chercheurs. Elles réalisent en effet un pont entre la physique des solides et celle des particules élémentaires.

De la physique des particules à celle des solides

La physique des particules élémentaires est née de la réunion de deux domaines de la physique moderne : la mécanique quantique, qui régit le comportement des objets à l'échelle microscopique, et la théorie de la relativité, qui décrit la physique aux très grandes vitesses ou énergies. Selon la théorie de la relativité, aucune particule ne peut dépasser la vitesse de la lumière, qui constitue une limite absolue. Seules les particules de masse nulle, comme les photons de la lumière, peuvent l'atteindre, sans pouvoir la dépasser. Contrairement aux particules dépourvues de masse, la vitesse des particules de masse non nulle (tels les électrons, les protons ou les neutrons) est nécessairement inférieure à celle de la lumière (*voir l'encadré page ???*).

Comment décrire les particules qui sont microscopiques (et donc quantiques) et qui se déplacent à grande vitesse (et qui sont donc relativistes) ? La réponse fut donnée dans les années 1920 à 1940 avec l'élaboration de la « théorie quantique des champs », qui marie justement la physique quantique à la relativité (restreinte) d'Einstein. Cette théorie qui a été maintes fois vérifiée constitue le socle conceptuel de la physique des particules.

Une prédiction étrange fut celle du physicien anglais Paul Dirac, un des pères de la théorie quantique des champs : en résolvant une équation, qui porte désormais son nom et qui était censée décrire les électrons (entre autres), il trouva deux fois plus de solutions qu'attendues. D'après les caractéristiques de ces solutions, dont la moitié semblaient correspondre à des énergies négatives, il fit en 1930 une hypothèse audacieuse, folle selon certains de ses contemporains : il y aurait un second type de particules, identiques en tout aux électrons mais porteurs d'une charge opposée, positive. Dirac prédisait ainsi l'existence des antiparticules. Cette prédiction fut vérifiée deux ans plus tard, en 1932, quand l'Américain Carl Anderson découvrit expérimentalement le positron, l'antiparticule de l'électron.

Une conséquence de la dualité électron-positron est que le vide n'est jamais vraiment vide. Imaginons une boîte de billes blanches qu'on a vidée de son contenu. Selon la théorie quantique des champs et les prédictions de Dirac, même lorsque la boîte est vide, des billes peuvent se créer et s'annihiler par paires de billes blanches et noires, de manière aléa-

toire. En moyenne, la boîte reste alors vide, mais nous pouvons, à certains moments, y trouver une bille blanche accompagnée d'une bille noire. Ici, les billes blanches représentent les particules et les billes noires les antiparticules.

L'électrodynamique quantique testée dans un trait de crayon

Pour mieux comprendre l'électrodynamique quantique, c'est-à-dire la théorie quantique des champs qui décrit les interactions électromagnétiques (véhiculées par les photons) entre particules relativistes chargées (électrons, positrons, etc.), les physiciens, comme c'est souvent le cas, ont cherché à construire des modèles théoriques aux simplifications parfois grossières, mais qui retiennent l'essentiel des phénomènes à expliquer. C'est ainsi que, autour des années 1950 à 1970, des théoriciens ont étudié l'électrodynamique quantique dans un espace bidimensionnel, et non tridimensionnel. Évidemment, cette physique ne correspond pas à la réalité, mais elle est plus facile à étudier mathématiquement.

Les physiciens ont examiné, dans ce monde plat imaginaire, le comportement de particules qui n'existent pas non plus : des particules électriquement chargées et de masse nulle – alors que toutes les particules élémentaires chargées que nous connaissons aujourd'hui ont une masse. Probablement aucun des théoriciens qui ont conçu cette théorie à deux dimensions n'aurait cru qu'il existe dans la nature

un système qui lui corresponde. Un tel système a pourtant été trouvé avec le graphène, et il est constitué par les électrons qui s'y déplacent : il s'avère qu'on peut décrire leur comportement à l'aide d'équations similaires à celles de l'électrodynamique quantique à deux dimensions, avec des particules chargées de masse nulle.

Il semble incroyable que l'on retrouve la théorie quantique des champs dans le graphène, c'est-à-dire dans un simple trait de crayon ! C'est pourtant ce qu'avaient compris les physiciens du solide qui avaient exploré théoriquement le graphène, plusieurs décennies avant qu'il ne soit isolé. Et c'est ce qu'ont confirmé simultanément en 2005 deux groupes d'expérimentateurs, celui de A. Geim et celui de Philip Kim, à l'Université Columbia aux États-Unis.

Sur la base d'un effet Hall (l'effet Hall quantique relativiste, voir l'encadré page ???), ces physiciens ont conclu que les électrons dans le graphène se comportent comme s'ils étaient des particules relativistes dépourvues de masse, comme les photons, à ceci près qu'ils sont astreints à se déplacer sur la feuille de graphène, donc à deux dimensions d'espace seulement, et qu'ils sont dotés d'une charge électrique élémentaire (contrairement aux photons, qui ne sont pas chargés).

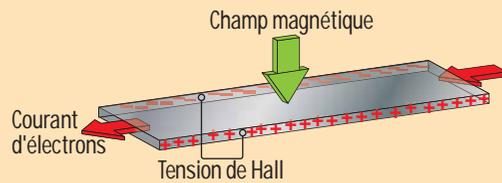
Précisons aussi que les électrons dans le graphène ne se déplacent pas vraiment à la vitesse de la lumière, mais à une vitesse caractéristique 300 fois inférieure, nommée vitesse de Fermi et qui joue le rôle de vitesse limite dans ce matériau (environ 1 000 kilomètres par seconde).

Comme dans l'exemple proposé par Dirac, le graphène comporte aussi des antiparticules. À l'instar des électrons

1/2 pub

Les différents effets Hall

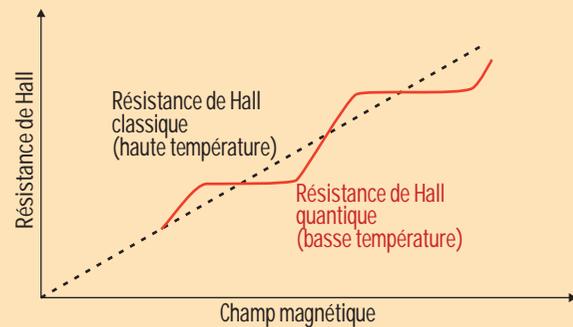
Lorsqu'une plaque métallique parcourue par un courant électrique est exposée à un champ magnétique perpendiculaire, les électrons (de charge négative) sont déviés par le champ et s'accumulent sur l'un des bords de la plaque; ils laissent un déficit de charges négatives sur l'autre bord (*schéma ci-dessous*). La tension mesurée entre les deux bords de la plaque est alors non nulle. Le rapport entre cette tension dite de Hall et le courant électrique est nommé résistance de Hall: elle est proportionnelle au champ magnétique (*ligne pointillée dans le graphique*). Il s'agit de l'effet Hall (classique), découvert par le physicien américain Edwin Hall en 1879.



Dans des plaques ultraminces et à très basse température, cet effet devient quantique (effet Hall quantique, découvert en 1980): la résistance ne varie plus linéairement avec le champ magnétique, mais par sauts discrets comme des marches d'escalier – elle reste accrochée à des valeurs très précises même si l'on

fait varier légèrement le champ. La marche la plus prononcée est extrêmement plate et est aujourd'hui utilisée en métrologie comme étalon de résistance, en raison de sa formidable précision (l'erreur relative est de seulement un sur un milliard).

Le graphène donne aussi lieu à un effet Hall quantique. Mais ce dernier lui est propre et diffère de l'effet Hall quantique des autres métaux bidimensionnels. Dans le cas du graphène, on parle d'effet Hall quantique relativiste, car la succession des marches dans la résistance de Hall est une conséquence de la relation de dispersion relativiste des électrons du graphène (*voir l'encadré page ???*). Il a été mis en évidence en 2005 par les équipes d'Andre Geim et de Philip Kim.



mobiles du graphène (les « particules »), elles ont une masse effective nulle et se déplacent à la vitesse de Fermi. Ces antiparticules sont des trous, c'est-à-dire des lacunes laissées dans le matériau par des électrons et qui sont équivalentes à une charge électrique positive. La masse effective des électrons et des trous dans le graphène étant nulle, il est même plus facile de créer une paire électron-trou dans le graphène qu'une paire électron-positron dans le vide.

Des propriétés paradoxales

Une manifestation particulièrement étrange de ces antiparticules dans le graphène est l'« effet tunnel de Klein ». Ce dernier est apparenté au « paradoxe de Klein » de l'électrodynamique quantique, remarqué théoriquement par le physicien suédois Oskar Klein en 1929, mais jamais directement observé. Suivant l'effet tunnel de Klein, un électron franchit à coup sûr une barrière d'énergie élevée, sans être réfléchi (*voir l'encadré page ???*). Cet effet, dont il n'existe pas une interprétation physique simple, est une conséquence de l'équation de Dirac (pour une particule de masse nulle) et des interférences que cette équation décrit. Il diffère de l'effet tunnel ordinaire, où la particule a une probabilité de traverser d'autant plus faible que la barrière d'énergie est haute et épaisse.

L'effet tunnel de Klein a été étudié dans le graphène en 2007 par David Goldhaber-Gordon et ses collègues, à l'Université Stanford en Californie. Dans l'expérience réalisée par ces physiciens, une barrière de potentiel électrique est créée à l'aide d'un contact métallique posé sur la feuille de graphène. Ces chercheurs ont étudié la résistance électrique de la feuille en fonction de la tension électrique appliquée au contact, qui sert à contrôler la hauteur de la barrière.

Les résultats de leurs mesures sont en accord avec l'image d'un effet tunnel de Klein.

L'effet tunnel de Klein, l'effet Hall relativiste et les autres propriétés du graphène suscitent un grand intérêt. Leur étude reste à approfondir, mais cela n'empêche pas les scientifiques de s'intéresser déjà aux applications potentielles du graphène. Celles-ci font toutes appel soit à la rigidité mécanique exceptionnelle de ce matériau, soit à ses étonnantes propriétés électroniques.

Citons quelques-unes des idées: papier très souple et très résistant à base d'oxyde de graphène, détecteurs de gaz sensibles à la molécule près, batteries électriques à base de poudre de graphène, stockage d'hydrogène sur du graphène (un hydrocarbure non encore synthétisé, similaire au graphène et contenant autant d'atomes de carbone que d'hydrogène, *voir la figure 4*), etc. On envisage aussi des applications à la métrologie: en exploitant l'effet Hall quantique relativiste, il serait possible d'améliorer la définition de l'unité de résistance électrique (l'ohm). Certaines de ces applications ont déjà vu le jour en laboratoire, d'autres sont encore à l'état de projet, mais aucune ne semble au stade de la réalisation industrielle.

Cependant, la direction la plus prometteuse pour l'utilisation du graphène semble être la nanoélectronique, c'est-à-dire la miniaturisation extrême des composants électroniques. L'électronique intégrée actuelle, fondée sur le silicium, est proche de sa limite absolue de miniaturisation, qui est de l'ordre de 50 nanomètres pour un transistor. L'électronique à base de graphène est certainement l'alternative la plus crédible au silicium.

En taillant un étroit ruban de graphène, on peut réaliser un câble électrique de l'épaisseur d'un atome et d'une largeur de quelques nanomètres seulement: une sorte de capillaire

électrique, irréalisable avec du silicium ! Des expériences menées récemment dans les laboratoires d'IBM ont montré que l'on pouvait utiliser un tel ruban de graphène comme un transistor, c'est-à-dire comme le composant de base de l'électronique. Outre IBM, un autre géant de l'électronique, *Intel*, s'intéresse au graphène. Il existe même une jeune pousse, nommée *Graphene Industries* et basée à Manchester, qui se consacre entièrement à la fabrication du graphène et qui fournit déjà quelques entreprises du secteur de l'électronique.

Le graphène est donc un candidat très sérieux au remplacement du silicium car, outre sa taille nanométrique, ses qualités de conducteur électrique sont nombreuses : il est stable à température ambiante et ses électrons peuvent, dans les échantillons les plus propres, se propager en ligne droite sur de grandes distances par rapport à l'échelle atomique (de l'ordre du micromètre, soit environ 5 000 atomes) et à une vitesse élevée (d'environ 1 000 kilomètres par seconde). En fait, à température ambiante, le graphène conduit l'électricité plus vite que n'importe quel autre matériau connu.

Une nanoélectronique à base de graphène ?

De plus, on peut facilement changer le nombre d'électrons de conduction dans le graphène en appliquant une tension électrique perpendiculairement à la feuille. Pour ce faire, on place sous le substrat une plaque métallique (nommée grille) dont on peut contrôler la tension électrique et qui, avec la feuille de graphène - laquelle joue le rôle d'une seconde plaque métallique séparée de la première par le substrat isolant -, réalise un condensateur électrique.

Les nanotubes de carbone sont eux aussi étudiés depuis une dizaine d'années pour remplacer le silicium dans les composants électroniques. Comparé avec eux, le graphène n'a pas que des avantages. Il est par exemple très difficile de couper proprement un ruban de graphène, alors qu'un nanotube de carbone ne souffre pas de ce problème : il est enroulé sur lui-même et ne possède donc pas de bords. En réalité, ces deux formes du carbone sont complémentaires. On pourrait donc voir émerger, dans les prochaines années, une électronique hybride, qui combinerait graphène et nanotubes de carbone afin de tirer le meilleur des deux matériaux.

1/2 pub
???

Auteurs & Bibliographie

Jean-Noël FUCHS est enseignant-chercheur à l'Université de Paris-Sud, à Orsay. **Mark Oliver GOERBIG** est chercheur au CNRS. Tous deux travaillent au Laboratoire de physique des solides de l'Université Paris-Sud.

J.-N. FUCHS, M. O. GOERBIG et M. POTEMSKI, *Des électrons sans masse dans une feuille de carbone*, in *Images de la Physique 2007*, pp. 50-56, CNRS, 2007 (article téléchargeable sur : www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique).

A. K. GEIM et A. H. MACDONALD, *Graphene : exploring carbon flatland*, in *Physics Today*, vol. 60, pp. 35-41, août 2007.

J. C. MEYER et al., *The structure of suspended graphene sheets*, in *Nature*, vol. 446, pp. 60-63, 2007.

K. S. NOVOSELOV et al., *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*, in *Nature*, vol. 438, pp. 197-200, 2005.

Y. ZHANG et al., *Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene*, in *Nature*, vol. 438, pp. 201-204, 2005.

