

# Pourquoi le graphène est-il si étonnant ?

## Why Graphene is Amazing

**La structure électronique inhabituelle de graphène permet de produire des effets quantiques cohérents remarquables, même à la température ambiante : ce matériau ouvre la porte à de nouvelles applications dans l'électronique et la spintronique. [Dr Mae-Wan Ho](#)**

**Rapport de l'ISIS en date du 15/07/2013**

Une [version entièrement référencée et illustrée](#) de cet article intitulé Why Graphene is Amazing est accessible par les membres de l'ISIS sur le site [http://www.isis.org.uk/Why\\_Graphene\\_is\\_Amazing.php](http://www.isis.org.uk/Why_Graphene_is_Amazing.php); elle est par ailleurs disponible en téléchargement [ici](#) .

**S'il vous plaît diffusez largement et rediffusez, mais veuillez donner l'URL de l'original et conserver tous les liens vers des articles sur notre site ISIS. Si vous trouvez ce rapport utile, s'il vous plaît, soutenez ISIS en vous abonnant à notre magazine [Science in Society](#), et encouragez vos amis à le faire. Ou jeter un oeil à notre librairie [ISIS bookstore](#) pour d'autres publications**

## **D'innombrables intérêts sont portés sur le graphène après l'invention d'une technique simpliste**

Tout a commencé lorsque Konstantin Novoselov, Andre Geim, et leurs collègues ont fait des expérimentations sur des films minces de une à plusieurs couches de [graphène](#), isolées avec du ruban adhésif ou par simple frottement du [graphite](#), c'est à dire le motif ou le dessin, fixé sur une surface dure [1].

La capacité de contrôler les propriétés électroniques d'un matériau en appliquant un champ électrique externe (potentiel de grille, en anglais [Gate potential](#)) est au cœur de l'électronique moderne. Cela permet de faire varier la concentration de [porteurs de charge](#) dans un dispositif semi-conducteur et donc le courant électrique passant à travers celui-ci.

Comme beaucoup d'autres physiciens de la [matière condensée](#), Novoselov et Geim étaient à l'affût de nouveaux matériaux qui feraient mieux que le silicium dans l'industrie des semi-conducteurs, car le silicium est proche de sa limite de performance (voir [2] [The Computer Aspires to the Human Brain](#), SiS 58) \*.

\* Version en français : "Quand l'ordinateur ambitionne de devenir un cerveau humain" par le Dr Mae-Wan Ho. Traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site <http://isias.transition89.lautre.net/spip.php?article301>

Les chercheurs ont commencé par la recherche de l'effet du champ électrique dans le graphène, et ils ont trouvé l'effet le plus grand, le plus rapide et le plus cohérent jamais observé dans n'importe quel autre matériau.

Ils ont démontré que l'[effet Hall quantique](#) (voir l'encadré ci-dessous) se produit même à la température ambiante, ce qui, jusque-là, ne pouvait être observé qu'à des températures très basses bien maîtrisées et avec des appareils électroniques les plus soigneusement élaborés.

Les collègues chercheurs travaillant sur le graphène ont fait les commentaires suivants sur l'observation de ces effets étonnants [3] « dans un matériau fabriqué par une telle technique aussi simpliste qui a déclenché de très nombreux intérêts qui continuent de se manifester à ce jour ».

Au-delà de la gamme des applications potentielles du graphène, c'est le domaine de la science fondamentale qui suscite le plus de passion. (voir [4] [Le graphène et le New Age de carbone](#) , SiS 59) \*.

\* Version en français : "Le graphène et le nouvel âge du carbone" par le Dr Mae-Wan Ho. Traduction et compléments de Jacques Hallard ; accessible sur le site : <http://isias.transition89.lautre.net/spip.php?article326>

### La nouvelle physique de l'électrodynamique quantique

Les expériences de Novoselov, Geim et de leurs collègues [1] ont montré que la [conductance électrique](#) augmente de façon linéaire et symétrique lorsque le potentiel de grille appliqué est augmenté de 0V dans les deux sens, positif et négatif, indiquant que les porteurs de charge commutent entre les électrons et les trous d'électrons.

Cet effet de champ '[ambipolaire](#)' électrique est bien observé dans d'autres semi-conducteurs, mais jamais d'une manière aussi importante, et le courant ne diminue pas à zéro au minimum (0V), où les porteurs de charge sont un mélange d'électrons et de trous.

Dans le même temps, l'effet Hall quantique (voir encadré) a été trouvé à trois températures différentes: proche du zéro absolu, à 70 K [pour **K** ou **kelvin**, voir dans la rubrique 'Définitions' à la suite de cet article de l'ISIS] et à 300 K (soit la température ambiante) [5]; ceci étend ainsi la gamme précédente de température pour l'effet Hall quantique par un facteur de 10. La raison pour laquelle l'effet Hall quantique peut être observé même à la température ambiante est due à la nature hautement inhabituelle des porteurs de charge dans le graphène, qui se comportent comme des quasi-particules sans masse appelés «fermions de Dirac» ou [particules de Dirac](#) décrites par l'équation de Dirac qui combine la [mécanique quantique](#) avec la [relativité restreinte](#) ; les fermions ou particules de Dirac se déplacent en de fortes densités, environ  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  à 1/300 de la vitesse de la lumière à travers des milliers de distances inter-atomiques sans diffusion.

### L'effet Hall quantique (modifié d'après [6])

### [Encadré]

L'[effet Hall](#) est la production d'une différence de tension (la tension de Hall) à travers un conducteur électrique, transversalement par rapport à un courant électrique dans le conducteur, et en présence d'un champ magnétique perpendiculaire au courant. Il a été découvert par [Edwin Hall](#) en 1879.

Le *coefficient de Hall* est le rapport entre le champ électrique induit sur le produit de la densité de courant et du champ magnétique appliqué ; c'est une caractéristique du matériau conducteur, comme sa valeur dépend de la nature, du nombre et des propriétés des porteurs de charge du courant.

La présence d'un champ magnétique perpendiculaire à la direction du mouvement des charges en mouvement exerce une force sur les charges, ce qui provoque une courbure de leur cheminement, de sorte que la charge en excès s'accumule sur une face du matériau, ce qui laisse des charges égales et opposées se manifester sur l'autre face, et ce qui crée un champ électrique qui s'oppose à une migration de charge supplémentaire.

L'effet Hall quantique est la version mécanique quantique observée dans les systèmes bidimensionnels d'électrons dans lesquels la conductivité de Hall  $\sigma$  prend des valeurs quantifiées:

$$\sigma = \frac{I_{\text{channel}}}{V_{\text{Hall}}} = \nu \frac{e^2}{h}, \quad (1)$$

où  $I_{\text{channel}}$  est le courant du canal,  $V_{\text{Hall}}$  est la tension de Hall,  $e$  est la charge élémentaire,  $h$  est la constante de Planck, et  $\nu$  est le facteur de remplissage qui peut prendre soit des valeurs entières ou fractionnaires.

L'effet Hall quantique est appelé l'effet Hall quantique entier ou l'effet Hall quantique fractionnaire selon que  $\nu$  est un nombre entier ou fractionnaire. [L'effet Hall quantique entier](#) est simplement expliqué en termes d'orbitales d'un électron dans un champ magnétique à particule unique. [L'effet Hall quantique fractionnaire](#) est plus compliqué, car son existence repose fondamentalement sur les interactions entre les électrons et il est compris en termes de 'composites charge-flux' appelés [fermions composites](#). La quantification des conductances de Hall est incroyablement précise, étant un multiple entier ou fractionnaire de  $e^2 / h$  à près d'une partie par milliard.

La figure 1 montre un effet Hall quantique à la température ambiante de la pièce, par Novoselov, Geim et leur équipe [5].

*Figure 1 - Effet Hall quantique à 300 K et un champ magnétique de 29 Tesla*

La conductance de Hall  $\sigma_{xy}$  (axe vertical de droite et courbe rouge) mesurée perpendiculairement au champ magnétique en fonction de la tension de grille  $V_g$  appliquée, révèle des plateaux à  $2e^2/h$  pour les électrons et pour les trous, dans les directions positives et négatives respectivement ; l'axe vertical de gauche (et courbe bleue) montre la magnétorésistance  $r_{xx}$  dans le sens de la circulation du courant, qui passe à zéro aux plateaux de la conductance de Hall.

Il s'agit de la signature de l'effet Hall quantique. L'encadré inséré montre les [niveaux de Landau](#) (LL) d'énergie quantifiée des particules chargées dans des champs magnétiques. Le grand écart énergétique  $DE$  entre le [niveau de Fermi](#)  $E_F$  (le plus haut niveau d'énergie LL des électrons) et le plus bas, est supérieur à l'[énergie thermique](#)  $kT$  d'un facteur de 10. En outre, les très fortes concentrations de porteurs de charges peuvent atteindre  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$

<sup>2</sup>, avec seulement une sous-bande à deux dimensions occupée, d'une part, et une grande mobilité des porteurs de charges - ce qui ne change pas depuis la température de l'hélium liquide jusqu'à la température ambiante - se maintient à  $\sim 10.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , d'autre part, tout cela contribue à la survie de l'effet Hall quantique à la température ambiante.

Des détails plus fins de l'effet Hall quantique du graphène ont été observés par Philip Kim et son équipe à l'Université Columbia à New York aux Etats-Unis, dans des expériences menées à la température de l'hélium liquide 1,6 K. Ils ont fait varier le champ magnétique de 1 à 10 Tesla et maintenu le potentiel de grille à un niveau constant de 15 V ; ou bien ils ont maintenu le champ magnétique constant à 9 Tesla et fait varier le potentiel de grille de -80 V à +80 V. Cela leur a permis d'observer des plateaux multiples de la conductance de Hall  $s_{xy}$  au-delà des deux qui avaient été trouvés par Geim et l'équipe de Novoselov, dont un qui n'a pas été observé à 0V, un point (dit [point de Dirac](#)), où les porteurs de charges passent des [trous](#) aux électrons [7] (figure 2).

*Figure 2 - Niveaux de Landau du graphène et effet Hall quantique fractionnaire (adapté de [7])*

Fait intéressant, les plateaux de  $s_{xy}$  se produisent à des valeurs [demi-entières](#) de la conductance de Hall, une forme très rare de l'effet Hall quantique fractionnaire. Les plateaux apparaissent entre les [niveaux de Landau](#) (LL) et sautent lorsque le niveau est franchi. Dans le graphène,  $s_{xy}$  prend les valeurs quantifiées:

$$s_{xy} = \pm g_s (n + \nu_2) e^2/h \quad (2)$$

où  $\pm g_s (n + \nu_2) = n$ , le coefficient de remplissage (voir encadré) est en valeurs [demi-entières](#),  $n$  est l'indice du niveau de Landau, et  $g_s$  est la dégénérescence (nombre d'états quantiques avec la même énergie). Le premier plateau à  $n = 0$  pour les électrons et les trous se trouve exactement à  $\pm g_s e^2/2 h$ . Lorsque niveau de Fermi (ajusté par la tension de grille) croise le prochain électron (ou trou d'électron) LL,  $s_{xy}$  augmente (ou diminue) d'une quantité  $g_s e^2/h$ , ce qui donne la condition de quantification dans l'équation (2) indiquée ci-dessus.

Dans une publication ultérieure rapportant les résultats des recherches réalisées avec des champs magnétiques plus forts et de meilleurs échantillons de graphène [8], il a été démontré que la dégénérescence a une valeur de 4 : 2 provenant des 2 sous-réseaux de carbone dans le graphène et 2 proviennent de différents spins des électrons. Le fractionnement de la dégénérescence a donné lieu à des plateaux de Hall quantique supplémentaires. Le fractionnement de la dégénérescence de spin au point de Dirac est un phénomène particulièrement intéressant, car il laisse deux états de bords co-existants qui circulent dans des directions opposées avec des spins opposés (voir fig. 3 ci-dessous).

L'effet Hall quantique [demi-entier](#) est accompagné d'un type de [phase géométrique](#), dite *Phase de Berry*, non nulle (non-zéro), une phase quantique acquise au cours d'un cycle, ce qui pourrait servir de base à de nouvelles applications dans l'électronique et l'électronique de spin ou **spintronique** [3, 7].

L'effet Hall quantique demi entier et la phase de Berry non nulle étaient à la fois théoriquement prédits par d'autres chercheurs, et la base de la structure électronique

inhabituelle du graphène, ce qui explique aussi toutes ses autres propriétés étonnantes et extraordinaires.

## La structure chimique et électronique du graphène

Le [graphène](#) se présente sous forme d'une plaque à deux dimensions d'atomes de carbone disposés dans un réseau cristallin en nid d'abeilles, chaque atome étant lié à trois voisins par des liaisons covalentes *s* solides, formées par l'[hybridation des orbitales atomiques](#) des électrons du [carbone 2s, 2p<sub>x</sub> et 2p<sub>y</sub>](#) [3, 9]. Le reste, en dehors du plan 2p<sub>z</sub> ou de l'orbitale *p*, détermine la structure électronique de basse énergie du graphène (voir plus loin).

Les [liaisons covalentes](#) sont responsables de la structure plane de graphène et des liaisons chimiques fortes connues, ce qui représente la résistance mécanique du graphène et aussi sa haute [conductivité thermique](#) (voir [4]).

La structure planaire 2D et les [porteurs de charge](#) inhabituels sans masse qui peuvent être excités à des densités élevées par de faibles énergies (de quelques dizaines à une centaine de volts), font que le graphène est chimiquement très sensible, et donc idéal pour la détection de produits chimiques et pour les [biocapteurs](#). Il a été démontré que la conductance de Hall d'un morceau de graphène d'une taille d'un micromètre, est sensible à l'absorption ou la désorption d'une seule molécule de gaz.

Les propriétés optiques du graphène découlent directement de sa structure planaire et de sa bande zéro. Pour les énergies photoniques supérieures à la température ambiante et l'énergie électronique la plus élevée (au sens de Fermi), la conductivité optique - l'augmentation de la conductivité électrique due à l'absorption de la lumière - est une constante universelle indépendante de la fréquence,  $G = e^2/4h$ , où *e* est la charge de l'électron et *h* est la constante de Planck divisée par 2π.

Par conséquent, toutes les autres propriétés optiques - transmission, réflectance et coefficient d'absorption (opacité) - sont des constantes universelles. Et le rapport de la lumière absorbée sur la lumière incidente pour le graphène est simplement proportionnelle à la constante de structure fine ( $a = e^2 / HC \sim 1/137$ ) :  $P = (1 - T) \approx pa = 2,3 \%$ , où *c* est la vitesse de lumière. Cela fait du film de graphène le plus transparent et le plus puissant qui est disponible. Pour quelques couches de graphène, l'opacité augmente en multiples de 2,3 %.

Les propriétés quantiques électroniques et macroscopique du graphène peuvent être expliquées par la [structure de bande d'énergie](#) créée par les *orbitales p* qui s'étalent pour former deux bandes d'énergie : la bande de liaison (la bande de valence de l'énergie plus faible) et la bande anti-liaison (la bande de valence d'énergie plus élevée).

Une représentation de la structure de la bande d'énergie autour de chaque atome de carbone dans le réseau cristallin est donnée dans la figure 3a. L'écart liaison - anti liaison se réfère à six points appelés points K ou points de Dirac : la géométrie autour de ces points est figurée par des cônes (figure 3B), ce qui explique pourquoi la conductance électrique augmente de façon linéaire lorsque l'énergie (potentiel de grille) s'élève, aussi bien dans des directions positives que négatives.

Figure 3 - La structure de bande d'énergie de graphène (voir le texte)

[Note du traducteur - **Structure de bande des électrons dans le graphène** : sous cette expression, nous avons fait figurer dans la partie 'Définitions', à la suite de cet article de l'ISIS, une note intitulée '**Etude théorique du graphène sous fort champ magnétique**' publiée par le Laboratoire de Physique du Solide - CNRS - Université de Paris Sud - [Période : 2005 et 2006](#) ].

La structure électronique évolue rapidement avec le nombre de couches, s'approchant à la limite du graphite 3D, déjà avec 10 couches. Seulement le graphène et, avec une bonne approximation, sa forme bicouche, ont les spectres d'énergie électronique simples des semi-conducteurs 'à gap nul', avec un type d'électrons et un type de trous. Pour 3 couches et plus, les spectres deviennent de plus en plus compliqués. Plusieurs porteurs de charges apparaissent et les bandes de conduction (anti-liaison) et les bandes de valence (assurant les liaisons) démarrent notamment par des chevauchements.

Il est clair que les explorations sur les prouesses quantiques de [graphène](#), ainsi que sur ses formes chimiquement modifiées, ne font que commencer.

---

© 1999-2013 The Institute of Science in Society

[Contact the Institute of Science in Society](#)

MATERIAL ON THIS SITE MAY NOT BE REPRODUCED IN ANY FORM WITHOUT EXPLICIT PERMISSION. FOR PERMISSION, PLEASE [CONTACT ISIS](#)

### Sélection d'articles en français sur le graphène

- « **Stupéfiant : un effet Hall quantique à température ambiante !** » Publié le 23/02/2007 à 08:31 - Par Laurent Sacco, Futura-Sciences

« L'effet Hall est un phénomène bien connu en physique classique que l'on utilise pour mesurer des champs magnétiques ou construire, entre autres, des claviers d'ordinateurs. Son équivalent quantique se manifeste lui vers 1,5 degré au dessus du zéro absolu, on vient pourtant de l'obtenir à température ambiante avec du graphène ! ».

Découvrir l'article avec illustrations en couleurs sur le site suivant : <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/physique-stupefiant-effet-hall-quantique-temperature-ambiante-10396/>

- **Comment faire du graphène un semi-conducteur.** Publié le 22/06/2009 à 09:32 - Par Laurent Sacco, Futura-Sciences.

« Le graphène est présenté depuis quelques années comme le matériau miracle qui évincera le silicium pour l'électronique des ordinateurs de demain. Un groupe de chercheurs vient de démontrer qu'il était possible de changer à volonté le gap d'énergie dans un dispositif constitué d'une double couche de graphène, ce qui en ferait un bon semi-conducteur ».

Article à lire sur le site : <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/physique-faire-graphene-semi-conducteur-19648/>

- **Graphène : de la théorie à la fabrication** – Document INSP-CNRS Archives 2010.

« Cette année, le prix Nobel de Physique a été attribué à A. Geim et K. Novoselov pour la découverte du graphène, une couche monoatomique de carbone aux propriétés électroniques et mécaniques remarquables. Un prix Nobel pour un matériau sur lequel on travaille seulement depuis quelques années, souligne son impact scientifique... »

Article à lire sur le site : <http://www.insp.jussieu.fr/Graphene-de-la-theorie-a-la.html>

- **Graphène** – Document IRAMIS-CEA

Introduction - Comment fabriquer? – Propriétés – Applications -.

Conclusions. Consulter le diaporama sur le site :

[http://iramis.cea.fr/spcsi/cbarreteau/physique\\_du\\_solide/exposes/graphene.pdf](http://iramis.cea.fr/spcsi/cbarreteau/physique_du_solide/exposes/graphene.pdf)

- **Quelques propriétés du graphène.** Par Gilles Montambaux

Laboratoire de Physique des Solides, Orsay – Présentation à l'Académie des Sciences

France. Diaporama à consulter sur le site : [http://www.academie-](http://www.academie-sciences.fr/activite/conf/exposeMontambaux_290211.pdf)

[sciences.fr/activite/conf/exposeMontambaux\\_290211.pdf](http://www.academie-sciences.fr/activite/conf/exposeMontambaux_290211.pdf)

- [Étude des propriétés électroniques du graphène et des matériaux à base de graphène sous champs magnétiques intenses](#) - These\_de Jean\_Marie\_POUMIROL.pdf- 2011.

Source : [http://hal.archives-](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/64/61/72/PDF/These_Jean_Marie_POUMIROL.pdf)

[ouvertes.fr/docs/00/64/61/72/PDF/These\\_Jean\\_Marie\\_POUMIROL.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/64/61/72/PDF/These_Jean_Marie_POUMIROL.pdf)

- **Le graphène : la relativité rencontre la mécanique quantique dans un trait de crayon.** Diaporama de Mark O. Goerbig, ENS, Cachan, 23/11/2010. A lire sur le site suivant : <http://chercheurs.lps.u-psud.fr/GOERBIG/CachanENS1110.pdf>

- **La conductivité du graphène permet l'étude approfondie des effets de vallées.**

11/04/2013. Rédaction : [marine.ridoux@diplomatie.gouv.fr](mailto:marine.ridoux@diplomatie.gouv.fr) Origine : BE Inde numéro 53

(11/04/2013) - Ambassade de France en Inde / ADIT - <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/72785.htm>

« Les chercheurs de l'Indian Institute of Science de Bangalore, ont découvert des caractéristiques uniques de la conductivité d'une monocouche de graphène lorsque, à de très basses températures, elle est exposée à de faibles champs électriques et magnétiques. Le graphène, est un cristal unique dont la conduction et la bande de valence sont supérieures à l'énergie de Fermi, niveau d'énergie séparant les deux structures de bandes, en deux points conduisant à la formation de deux vallées. Comme le spin des électrons, les vallées sont des états d'électrons dans la structure de bande du graphène. Bien que des fluctuations de la conductivité universelles, UCF, dans le transport électrique à faible température aient déjà été rapportées dans le graphène nanométrique, aucune étude n'avait examiné les effets de vallées sur UCF dans le graphène. Pour cerner l'influence des vallées de l'UCF, les chercheurs ont recouvert une plaque d'oxyde de silicium par une monocouche de graphène qu'ils ont ensuite exposée à de minuscules champs électriques et magnétiques à des températures à une fraction au-dessus du zéro absolu ».




« L'étude a révélé que les fluctuations de la conductivité à l'échelle nanométrique se réduisent lorsque la température augmente, et que les vallées contribuent à ces fluctuations. Indépendamment de la géométrie, de la mobilité des porteurs de charge et de la température, les fluctuations étaient universelles et uniques à travers la monocouche de graphène. Contrairement au spin des électrons, des données concernant les vallées sont extrêmement difficile à détecter, et cette expérience propose une nouvelle méthode pour le faire en utilisant les fluctuations de la conductivité. Un tel comportement de la monocouche de graphène sous l'influence des vallées de l'UCF pourrait ouvrir un nouveau champ de recherche en électronique, la valleytronique en miroir de la spintronique basée sur le spin des électrons. Cette propriété du graphène pourrait être, également, exploitée pour créer une nouvelle génération d'appareils de stockage de données à de mémoire efficaces, des transistors à effet de champ à faible puissance et des composants d'ordinateurs quantiques ».

**Contact pour en savoir plus** : Pal, A. N. et *al.* Direct observation of valley hybridization and universal symmetry of graphene with mesoscopic conductance fluctuations. Phys. Rev. Lett. 109, 196601 (2012). Source : <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/72785.htm>

- **Le graphène : points de Dirac et l'effet Hall quantique**, par Mark O. Goerbig, 01 Avril 2008 - Journée Théoriciens.CNRS - LPS Orsay France. Voir le diaporama sur le site suivant : [http://chercheurs.lps.u-psud.fr/theorie/docs/pdf\\_Goerbig.pdf](http://chercheurs.lps.u-psud.fr/theorie/docs/pdf_Goerbig.pdf)

- **Cohérence Quantique et Effet Kondo dans les Nanostructures** par [Félicien Schopfer](#) (1)

Thèse de Doctorat Ph.D. - Université Joseph-Fourier - Grenoble I (03/06/2005), Alain Benoît (Dir.) -  PDF [These\\_Schopfer.pdf](#) (12.7 MB)

(1)

[CRTBT - Centre de Recherches sur les Très Basses Températures](#)

---

**Introduction** - « Les effets de cohérence quantique sont au cœur de la physique mésoscopique : ils gouvernent le comportement des conducteurs dont la taille devient comparable à la longueur de cohérence de phase des électrons  $L_f$ . Les expériences présentées dans cette thèse concernent les effets de la cohérence de phase électronique sur les propriétés de transport de conducteurs métalliques diffusifs. Nous nous sommes d'abord intéressés aux mécanismes de déphasage électronique en mesurant la magnétorésistance de localisation faible de fils quasi-1D en or contenant des impuretés magnétiques de fer, à très basse température. Le comportement du temps de cohérence de phase électronique  $t_f$  mesuré s'explique bien dans le cadre de la physique des impuretés Kondo, par la combinaison de l'effet Kondo à une impureté, et des interactions entre impuretés de type RKKY. Ce résultat est une contribution importante dans le débat sur la saturation de  $t_f$  à très basse température. Ensuite, nous avons étudié les oscillations quantiques de magnétoconductance, Altshuler-Aronov-Spivak (AAS), et Aharonov-Bohm (AB), dans des réseaux 2D d'anneaux en argent présentant différentes géométries. Notamment, à partir d'une théorie récente, nous avons extrait  $t_f$  à partir des harmoniques de Fourier de l'oscillation AAS. La dépendance en température mesurée, différente de celle extraite d'un fil quasi-1D, laisse supposer un



effet de la topologie sur le déphasage. Enfin, nous avons mesuré la dépendance en taille des amplitudes des oscillations AB et AAS dans des réseaux de  $10^6$  à  $10^8$  anneaux : lorsqu'une dimension du réseau devient inférieure à  $L_f$ , la moyenne d'ensemble des oscillations quantiques est non triviale, révélant que des interférences quantiques subtiles dominent le transport. C'est une signature spectaculaire de la transition dimensionnelle vers la physique mésoscopique ». Source : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011250/en/>

## Définitions

### Électrodynamique quantique – Introduction d'un article Wikipédia

Cet article est une **ébauche** concernant la **physique**. Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

L'**électrodynamique quantique relativiste** (*Quantum electrodynamics* en anglais : **QED**) est une théorie [physique](#) ayant pour but de concilier l'[électromagnétisme](#) avec la [mécanique quantique](#) en utilisant un formalisme [lagrangien relativiste](#). Selon cette théorie, les [charges électriques interagissent](#) par échange de [photons](#).

#### Sommaire

- [1 Histoire](#)
- [2 Description](#)
- [3 La renormalisation](#)
- [4 Le lagrangien de l'interaction](#)
- [5 Notes et références](#)
- [6 Voir aussi](#)
  - o [6.1 Bibliographie](#)
    - [6.1.1 Ouvrages de vulgarisation](#)
    - [6.1.2 Ouvrages de référence](#)
  - o [6.2 Articles connexes](#)

Article complet à lire sur : [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrodynamique\\_quantique#Articles\\_connexes](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrodynamique_quantique#Articles_connexes)

### Énergie de Fermi – Introduction d'un article de Wikipédia



Ne doit pas être confondu avec [Niveau de Fermi](#). [voir ci-après]

L'**énergie de Fermi**,  $E_F$ , est un concept en [mécanique quantique](#) qui désigne l'énergie du plus haut état quantique occupé dans un système par des [fermions](#) à [0 K](#).

Parfois, le terme est confondu avec un le [niveau de Fermi](#) qui décrit un sujet proche quoique différent, le niveau de Fermi représentant le [potentiel chimique](#) des fermions. Ces deux quantités sont les mêmes à 0 K, mais diffèrent pour tout autre température.

## Sommaire

- [1 Définition](#)
  - o [1.1 Définition avancée](#)
- [2 Illustration pour un puits de potentiel carré à une dimension](#)
- [3 Notes et références](#)

## Définition

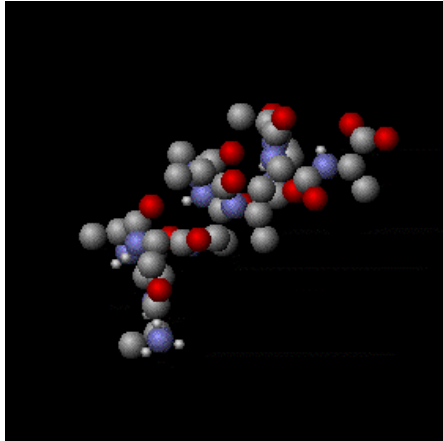
En [mécanique quantique](#), un groupe de particules nommé [fermions](#) (qui inclut par exemple, les [électrons](#), les [protons](#) et les [neutrons](#)) obéit au [principe d'exclusion de Pauli](#), c'est-à-dire que deux fermions ne peuvent occuper le même [état quantique](#), défini par un ensemble de [nombres quantiques](#) (par exemple dans le cas des atomes polyélectroniques chaque état quantique décrit par quatre nombres quantiques,  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  et  $m_s$  ne peut être occupé que par un électron). Dans un système contenant de nombreux fermions, chaque fermion occupe un état quantique différent défini par ses nombre quantiques, ces états étant remplis par énergie croissante : l'état de plus basse énergie est occupé le premier, puis les en fonction du nombre de fermions, des états dont l'énergie est de plus en plus haute sont occupés. On appelle alors **énergie de Fermi** l'énergie de l'état occupé de plus haute énergie.

Ainsi, en théorie, même à 0 K, un [métal](#) possède des électrons dont l'énergie n'est pas nulle, et qui se déplacent toujours. Ceux qui ont l'énergie la plus élevée, l'énergie de Fermi qui est égale à leur énergie cinétique, se déplacent le plus rapidement, à la **vitesse de Fermi**. L'énergie de Fermi est un concept important de la [physique de la matière condensée](#), utilisé par exemple pour décrire les métaux, les [isolants](#) et les [semi-conducteurs](#). C'est un paramètre très important dans la physique des semi-conducteurs, dans la physique des [superfluides](#) comme pour l'[hélium](#) à basse température (aussi bien <sup>3</sup>He normal que superfluide), et il est assez important en [physique nucléaire](#) ainsi que pour comprendre la stabilité des [naines blanches](#) vis-à-vis de l'[effondrement gravitationnel](#).

Article complet sur le site suivant : [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_de\\_Fermi](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_de_Fermi)

## Énergie thermique - Introduction d'un article de Wikipédia

**Cet article [ne cite pas suffisamment ses sources](#)** (mars 2012). Si vous disposez d'ouvrages ou d'articles de référence ou si vous connaissez des sites web de qualité traitant du thème abordé ici, merci de compléter l'article en donnant les références utiles à sa vérifiabilité et en les liant à la section « [Notes et références](#) ». ([Modifier l'article](#))



☞ Mouvement thermique d'un segment de molécule d'une protéine.

L'**énergie thermique** est l'[énergie cinétique](#) d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses [molécules](#) et de ses [atomes](#). L'énergie thermique est une partie de l'[énergie interne](#) d'un corps. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés [transferts thermiques](#) et jouent un rôle essentiel en [thermodynamique](#). Ils atteignent un équilibre lorsque la [température](#) des corps en contact est égale.

### Sommaire

- [1 Énergie et équilibre thermiques](#)
- [2 Origine quantique](#)
- [3 Énergie thermique et température](#)
- [4 Énergie thermique et état de la matière](#)
- [5 Transferts thermiques](#)
- [6 Articles connexes](#)

Article complet à lire sur le site : [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_thermique)

**K (Kelvin) Unité de température thermodynamique** – Extrait, d'un article de Wikipédia

Le **kelvin** (symbole **K**, du nom de [William Thomson \(Lord Kelvin\)](#)) est l'unité [SI](#) de [température thermodynamique](#). Par convention, les noms d'unité sont des noms communs et s'écrivent en minuscule (« kelvin » et non « Kelvin »)<sup>[note 1](#)</sup>.

Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du [point triple](#) de l'[eau](#) (H<sub>2</sub>O), et une variation de température d'1 K est équivalente à une variation d'1 °C<sup>1</sup>. Toutefois, à la différence du [degré Celsius](#), le kelvin est une mesure absolue de la température qui a été introduite grâce au [troisième principe de la thermodynamique](#). La température de 0 K est égale à -273,15 °C et correspond au [zéro absolu](#) (le point triple de l'eau est donc à la température 0,01 °C).

N'étant pas une mesure relative, le kelvin n'est jamais précédé du mot « degré » ni du symbole « ° », contrairement aux degrés [Celsius](#) ou [Fahrenheit](#). À l'origine, en [1954](#), le kelvin s'appelait le « degré Kelvin » et s'écrivait alors °K<sup>2</sup>. Le « degré » fut supprimé lors de la 13<sup>e</sup> [CGPM](#) en [1967](#) et son symbole devint **K**<sup>3</sup>.

## **Sommaire**

- [1 Échelle Kelvin des températures](#)
- [2 Conversion vers les autres unités](#)
- [3 Construction et conséquence de l'unité Kelvin](#)
- [4 Multiples](#)
- [5 Autres échelles de température](#)
- [6 Notes et références](#)
  - o [6.1 Notes](#)
  - o [6.2 Références](#)
- [7 Voir aussi](#)
  - o [7.1 Articles connexes](#)

## **Échelle Kelvin des températures**

L'échelle de températures Celsius est, par définition, la température absolue décalée en origine de 273,15 K :

$$T_K = T_C + 273,15 \text{ avec :}$$

- $T_K$  la température en kelvins.
- $T_C$  la température en [degrés Celsius](#).

On en déduit que :

- Le [zéro absolu](#) est situé à -273,15 °C.
- Les températures en kelvins ne sont jamais négatives<sup>[note 2](#)</sup>.
- Les intervalles de l'échelle du degré Celsius sont identiques à ceux du kelvin.

L'échelle [Fahrenheit](#) est une échelle anglo-saxonne affine de l'échelle Celsius :

$$T_F = 32 + 1,8 \times T_C \text{ où :}$$

- $T_F$  est la température en [degrés Fahrenheit](#) et
- $T_C$  la température en degrés Celsius.

L'inverse de la température est un paramètre qui intervient souvent dans les formules. Les physiciens utilisent parfois le paramètre  $\beta$  tel que :

$$\beta = \frac{1}{k_B T} \text{ avec } T \text{ en kelvins et où } k_B \text{ est la } \underline{\text{constante de Boltzmann}}.$$

Article complet sur le site : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Kelvin>

## **Largeur de bande** - D'après Wikipédia

**Cet article est une [ébauche](#) concernant la [physique](#).** Vous pouvez partager vos connaissances en l'améliorant ([comment ?](#)) selon les recommandations des [projets correspondants](#).

La **largeur de bande** est l'étendue de [fréquences](#) d'une source de vibrations, on peut aussi parler de largeur de [spectre](#).

Une source [cohérente](#) aura une largeur de bande très faible, allant jusqu'au [monochromatisme](#). C'est une notion très importante en [interférométrie](#) car elle conditionne la possibilité d'acquisition des résultats (une [bande passante](#) trop large donne des interférences brouillées).

En [électronique](#), on en parle, par exemple, pour exprimer le domaine de fréquence de travail (donc le domaine de fréquence [amplifié](#)) appelé [bande passante](#) défini par des [filtres](#). Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Largeur\\_de\\_bande](http://fr.wikipedia.org/wiki/Largeur_de_bande)

## **Liaison covalente** - Introduction d'un article Wikipédia

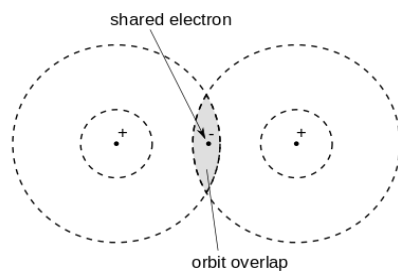
Une **liaison covalente** est une [liaison chimique](#) dans laquelle chacun des [atomes](#) liés met en commun un [électron](#) d'une de ses [couches externes](#) afin de former un doublet d'électrons liant les deux atomes. C'est une des forces qui produit l'attraction mutuelle entre atomes.

La liaison covalente implique généralement le partage équitable d'une seule paire d'électrons, appelé doublet liant. Chaque atome fournissant un électron, la paire d'électrons est délocalisée entre les deux atomes. Le partage de deux ou trois paires d'électrons s'appelle respectivement « [liaison double](#) » et « [liaison triple](#) ».

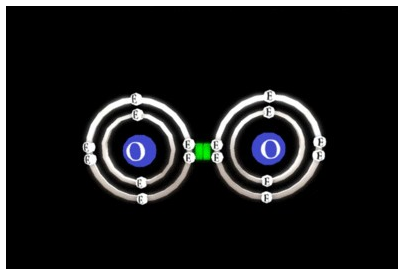
Au contraire des [liaisons ioniques](#) où les atomes sont liés par [attraction coulombienne](#) non-directionnelle, les liaisons covalentes sont fortement directionnelles. En conséquence, les molécules liées par covalence tendent à adopter des formes caractéristiques possédant des [angles de liaison](#) spécifiques.

Une **liaison covalente** est une liaison dans laquelle deux [électrons de valence](#) sont partagés entre deux [non-métaux](#). Dans ce type de liaison, il doit y avoir une différence d'[électronégativité](#) inférieure à 1,7 sur l'[Échelle de Pauling](#). Il y a formation d'une liaison covalente (sauf pour les liaisons de coordinence), lorsqu'il y a un recouvrement de deux [orbitales atomiques](#) ayant chacune un électron de valence. Grâce à ce recouvrement, il y aura la formation d'une seule et unique orbitale commune comme le montre la figure plus bas. Ce recouvrement d'orbitales atomiques conduit à la formation d'une orbitale moléculaire (non-illustrée). Il y a un partage d'électrons entre deux atomes d'[hydrogène](#)

afin de former une seule molécule de dihydrogène. Cette liaison covalente est présentée comme étant : H-H. Seules les liaisons symétriques, homonucléaires, comme H-H ou Cl-Cl sont covalentes.



Recouvrement des orbitales atomiques de H.



Liaison covalente schématisée de deux atomes d'[oxygène](#).

Article complet à lire sur : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison\\_covalente](http://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_covalente)

**Niveau de Fermi** - Introduction d'un article de Wikipédia



Ne doit pas être confondu avec [Énergie de Fermi](#). [voir ci-dessus]



Pour les articles homonymes, voir [Fermi](#).

Le **niveau de Fermi** est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la [température](#). La notion de niveau de [Fermi](#) est utilisée en physique et en électronique, notamment dans le cadre du développement des composants [semi-conducteurs](#).

Concrètement, le niveau de Fermi est une fonction de la température mais il peut être considéré, en première approximation, comme une constante, laquelle équivaldrait alors au niveau de plus haute énergie occupé par les électrons du système à la température de 0 K.

L'article complet figure sur le site [http://fr.wikipedia.org/wiki/Niveau\\_de\\_Fermi](http://fr.wikipedia.org/wiki/Niveau_de_Fermi)

**Orbitale atomique** - Introduction d'un article Wikipédia

Le terme d'**orbitale atomique** est une notion de [physique quantique](#), utilisée dans le modèle quantique de l'[atome](#). Ainsi dans ce modèle, contrairement à l'ancien modèle planétaire de l'atome, on ne considère plus que les [électrons](#) d'un atome sont en orbite circulaire (ou même elliptique) autour du noyau, mais occupent de manière probabiliste certaines régions de l'espace autour du noyau. On définit alors comme orbitale atomique

une zone de l'espace où la [probabilité](#) de trouver un [électron](#) autour du [noyau](#) est de 95 %. Une orbitale peut ne pas être [connexe](#).

Article complet à lire sur : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale\\_atomique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale_atomique)

### **Orbitale électronique** - Introduction d'un article Wikipédia

Une **orbitale électronique** est un lieu dans l'[espace](#) proche du noyau d'un [atome](#) où la probabilité de trouver des [électrons](#) est très forte.

Les premières approches ([Modèle de Bohr](#)) consistaient à croire que les électrons circuleraient autour des atomes sur des *orbites*, de manière identique aux planètes autour du soleil, mais on remarqua rapidement que cela conduisait à des inconsistances en matière magnétique : les électrons seraient très vite tombés sur le noyau.

L'application de l'[équation de Schrödinger](#) a montré que leur comportement est plus compliqué : la position statistique des électrons est régie par la [physique quantique](#), et l'orbitale électronique se révèle plus proche de *nœuds* dont la position détermine la forme des [molécules](#) dans lesquelles l'atome considéré peut se trouver intégré.

Une orbitale peut être en plusieurs zones non contiguës. Cela indique que les électrons, même si on leur attribue une position et une trajectoire, *passent peu de temps* en transition entre ces zones. Bien que les orbitales soient étudiées en physique, leurs formes expliquent la disposition des atomes dans les [liaisons covalentes](#) en chimie.

Article complet à lire sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale\\_%C3%A9lectronique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orbitale_%C3%A9lectronique)

### **Spintronique** - Article Wikipédia

La **spintronique**, **électronique de spin** ou **magnétoélectronique**, est une [technique](#) qui exploite la propriété quantique du [spin](#) des [électrons](#) dans le but de stocker des informations.



## Sommaire

- [1 Introduction](#)
- [2 Le spin](#)
- [3 Applications potentielles](#)
- [4 Qubits](#)
- [5 Notes et références](#)
- [6 Voir aussi](#)
  - o [6.1 Articles connexes](#)
  - o [6.2 Liens externes](#)

## Introduction

L'électronique actuelle repose sur une propriété essentielle d'une particule élémentaire ([électron](#)), sa [charge électrique](#). Avec le développement poussé de la technique du silicium ([technique top-down](#)), la gravure des circuits intégrés va atteindre une limite physique de miniaturisation qu'il ne sera pas possible de dépasser sans devoir repenser le concept même de cette technique (développement d'une [électronique moléculaire](#) ou une autre [technique bottom-up](#)). La spintronique telle que développée en ce moment repose sur la technique du silicium, bien maîtrisée, mais permet d'exploiter une propriété supplémentaire de l'électron, la propriété [quantique](#) de spin. La spintronique ouvrira des portes à des applications nouvelles, sans pour autant modifier totalement la technique employée par les fondeurs.

## Le spin

Article détaillé : [Spin](#).

Le spin est une propriété quantique d'une particule qui, d'une manière imagée (et un peu faussée) pourrait être décrite comme un moment cinétique dû à la rotation de cette particule sur elle-même, à l'instar d'une toupie. Le spin est l'équivalent quantique du [moment cinétique](#) en physique classique. Le moment cinétique quantique a ceci d'étonnant qu'il est responsable du [moment magnétique](#) que porte une particule possédant un spin. D'une manière encore imagée, une particule possédant un spin serait un minuscule aimant.

Quand on lui applique un champ magnétique approprié, le spin de l'électron bascule d'une orientation à l'autre. Les dispositifs spintroniques exploitent cette propriété, qui permet de stocker de l'information : le support matériel est divisé en minuscules zones correspondant à autant de bits d'information, et un champ magnétique est appliqué bit par bit pour orienter les spins des électrons des atomes. Chaque zone correspondra alors à un bit de valeur 0 ou 1 selon l'orientation (haut ou bas) des spins dans cette zone<sup>1</sup>.

Pour mieux se représenter cela, par analogie avec la physique classique, imaginons une charge électrique suivant une trajectoire circulaire. La [loi d'Ampère](#) nous apprend qu'un

courant électrique crée un champ magnétique. L'intensité de ce champ magnétique sera en [relation directe](#) avec la manière dont l'électron tourne sur cette trajectoire circulaire, et une manière de caractériser ce mouvement circulaire est le moment cinétique. En [physique classique](#), le moment cinétique et le moment magnétique sont donc étroitement liés. Il en est de même en [physique quantique](#) où le spin (moment cinétique quantique) et le moment magnétique partagent d'intimes relations.

### **Applications potentielles**

Le spin de l'électron est une sorte de minuscule aimant, il interagit avec des matériaux possédant aussi une aimantation, tels les matériaux ferromagnétiques.

Un courant électrique traversant un matériau ferromagnétique va voir sa proportion d'électrons spin *down* et spin *up* se modifier. On dit que ces électrons sont polarisés en spin. Par ce fait, on arrive à inscrire une information dans le spin des électrons.

Un second matériau ferromagnétique traversé par ce courant polarisé en spin exercera une résistance différente selon la polarisation du courant et l'orientation de l'aimantation du matériau. Une mesure de la résistance électrique nous permet de lire l'information que le spin des électrons possède.

Le principe de base d'une application en spintronique est donc jeté.

L'effet magnétorésistif géant ([GMR](#)) utilisé dans les têtes de lecture des disques durs actuellement est la première application de la spintronique.

L'utilisation conjointe de matériaux aimantés et de l'électronique constitue la base des applications spintroniques de demain. Le phénomène clé à maîtriser reste le contrôle précis de l'orientation de l'aimantation des matériaux ferromagnétiques. Or celui-ci était impossible à contrôler autrement que par l'application d'un champ magnétique, technologiquement difficile à intégrer dans la fabrication des circuits électroniques.

Or il a été découvert expérimentalement en 1999 (sur la base de prédictions théoriques publiées en 1996) qu'un courant polarisé en spin était capable d'agir sur l'orientation de l'aimantation d'un ferromagnétique simplement par le transfert de moment cinétique entre les électrons constituant le courant et les électrons responsables de l'aimantation dans le matériau ferromagnétique ([CIMS](#), *current-induced magnetization switching*). L'inconvénient majeur de cette découverte est que ce phénomène se produit lorsque des densités de courant de l'ordre de  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> sont atteintes. Pour éviter que le circuit se comporte comme un fusible à de telles densités, des structures nanométriques sont donc indispensables.

### **Qubits**

L'utilisation conventionnelle de l'état d'un électron dans un [semi-conducteur](#) est un système purement binaire, puisque l'état représente seulement 1 ou 0, et 8 bits peuvent représenter tous les nombres entiers entre 0 et 255, un nombre à la fois. Les bits en spintronique, nommés [qubits](#), exploitent les états *spin up* et *spin down* comme une superposition de 0 ou 1, et 8 qubits couplés possèdent la propriété de représenter tous les nombres entiers entre 0 et 255 de façon simultanée.

## Notes et références

- ↑ Des ondes de spin pour l'électronique, Dossier Pour la Science n°79, avril-juin 2013

## Voir aussi

## Articles connexes

- [Magnétorésistance géante](#)
- [Filtre à spin](#)
- [MRAM](#)

## Liens externes

- « [Spintronique : on a construit la première puce !](#) », Futura-Sciences, 30 mai 2007
- « [Des ondes de spin pour l'électronique](#) », Dossier Pour la Science n°79, avril-juin 2013

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Spintronique>

## Structure de bande des électrons dans le graphène -

Pour éclairer cette notion, nous avons retenu et reproduit à la suite un article du Laboratoire de Physique du Solide - CNRS - Université de Paris Sud - [Période : 2005 et 2006](#) : ***'Etude théorique du graphène sous fort champ magnétique'***

Auteurs : Mark O. Goerbig, Jean-Noël Fuchs et Pascal Lederer Collaborateurs : Roderich Moessner (LPT-ENS, Paris) et Benoît Douçot (LPTHE, Paris)

La recherche sur le graphène - une feuille de graphite de l'épaisseur d'un atome de carbone - est devenue un thème majeur de la physique de la matière condensée. L'attrait du graphène est dû à sa structure de bande particulière - la bande de conduction et la bande de valence se touchent uniquement aux points K et K', au bord de la première zone de Brillouin (cf. la figure 1) : le graphène est donc un semi-conducteur à gap nul. De plus, à proximité des points K et K', les électrons se comportent comme des fermions relativistes sans masse et avec une vitesse de la lumière effective de l'ordre de 1000km/s.

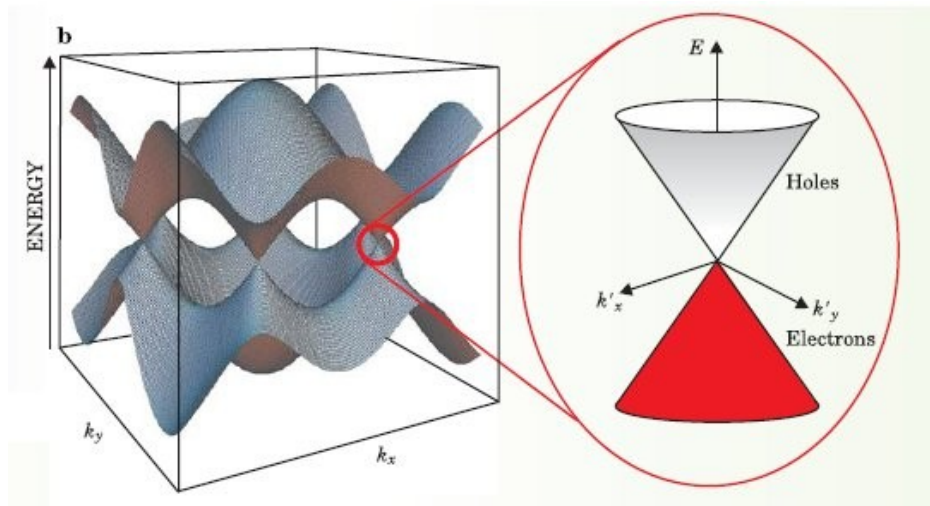


Figure : **Structure de bande des électrons dans le graphène**. Proche de K et K', la relation de dispersion est relativiste avec une masse effective nulle (en forme de diabol). Figure tirée de M. Wilson, *Phys. Today* (janv. 2006, p. 21-23).

Une expérience clef, pour mettre en évidence le caractère relativiste des électrons dans le graphène, a été l'observation en 2005 d'un effet Hall quantique inhabituel. Contrairement à l'effet Hall quantique dans les hétéro-structures semi-conductrices, dans le graphène il existe un niveau de Landau à énergie nulle qui est à moitié rempli (à dopage nul) et les niveaux de Landau ne sont pas équidistants. En l'absence d'interactions entre électrons, les paliers de l'effet Hall quantique dans le graphène se produisent à des facteurs de remplissage  $4(\text{entier}+1/2)$ . L'observation (par Zhang et coll. en 2006) d'un effet Hall quantique à un facteur de remplissage  $\pm 1$  suggère une physique au-delà de cette image d'électrons relativistes sans interactions. Deux théories cherchant à expliquer cette expérience ont été développées au LPS :

(a) En collaboration avec Moessner et Douçot, Goerbig a élaboré un modèle d'électrons en interactions dans un seul niveau de Landau relativiste [1]. Les interactions effectives sont symétriques SU(2) par rapport aux indices de vallées (K,K'), à l'ordre le plus bas dans le petit paramètre  $a/l_B$  0,01, où  $a$  est la distance entre atomes de carbone et  $l_B$  la longueur magnétique. En tenant compte du spin des électrons, les interactions sont donc symétriques SU(4), une hypothèse jusque-là non prouvée. L'effet Hall quantique observé par Zhang et coll. peut ainsi être vu comme un ferromagnétisme de vallée. Sur la base de ce modèle, des prédictions pour un éventuel effet Hall quantique fractionnaire ont pu être formulées.

(b) Fuchs et Lederer ont examiné l'interaction des atomes de carbone avec ceux du substrat (sur lequel repose le graphène) qui a pour effet une déformation de la feuille de graphène [2] : à fort champ magnétique, lorsque tous les électrons résident dans le niveau de Landau à énergie nulle, un atome de carbone sur deux sort du plan de la feuille en s'éloignant du substrat alors que l'autre s'en rapproche. Cette distorsion du cristal est de type Peierls mais ne se produit qu'en présence d'un champ magnétique. Dans un tel cristal gondolé, les électrons acquièrent une masse, ce qui explique la levée de dégénérescence de vallée dans le graphène aux facteurs de remplissage  $\pm 1$ .

**Références :**

[1] Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, K. S. Novoselov et al., Nature 438, 197 (2005) ; Experimental observation of quantum Hall effect and Berry's phase in graphene, Y. Zhang et al., Nature 438, 201 (2005).

[2] Landau-Level Splitting in Graphene in High Magnetic Fields, Y. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. 96, 136806 (2006).

[3] Electron interactions in graphene in a strong magnetic field, M.O. Goerbig, B. Douçot, and R. Moessner, Phys. Rev. B 74, 161407(R) (2006) ; selected by Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology 14, Issue 20 (Nov. 2006).

[4] Spontaneous parity breaking of graphene in the quantum Hall regime, J.-N. Fuchs and P. Lederer, Phys. Rev. Lett. 98, 016803 (2007) ; Editor's Suggestion, see editorial note, Phys. Rev. Lett. 98, 010001 (2007).

Source <http://www.lps.u-psud.fr/spip.php?article431>

## Trou d'électron - Introduction d'un article Wikipédia

En [physique du solide](#), un **trou d'électron** (habituellement appelé tout simplement **trou**) est l'absence d'un [électron](#) dans la [bande de valence](#), qui serait normalement remplie sans le trou. Une bande de valence remplie (ou presque remplie) est une caractéristique des isolants et des semi-conducteurs. Le concept de trou est essentiellement une façon simple d'analyser le mouvement d'un grand nombre d'électrons en traitant cette absence d'électron comme une [quasi-particule](#).

### Sommaire

- [1 Pourquoi des trous](#)
  - o [1.1 Concept physique](#)
  - o [1.2 Concept intuitif](#)
- [2 Charge électrique](#)
- [3 Masse effective](#)

Article complet à lire sur : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Trou\\_d%27%C3%A9lectron](http://fr.wikipedia.org/wiki/Trou_d%27%C3%A9lectron)

## Traduction, sélection d'articles en français, définitions et inclusion des liens donnant accès à des informations complémentaires

Jacques Hallard, Ing. CNAM, consultant indépendant.

Relecture et corrections : Christiane Hallard-Lauffenburger, professeur des écoles.

Adresse : 585 Chemin du Malpas 13940 Mollégès France

Courriel : [jacques.hallard921@orange.fr](mailto:jacques.hallard921@orange.fr)

Fichier : ISIS Graphène Physique Chimie **Why Graphene is Amazing** French version.3

---