

# La face cachée de la mine

*par Bouchra Ouatik*

Lorsqu'Andre Geim écrit avec un crayon à mine, puis balaie la poussière de graphite qui se dépose sur sa feuille, il sait une chose que la plupart d'entre nous ignorent. Dans cette fine poudre grise se trouvent des échantillons d'un des matériaux aux propriétés les plus étonnantes et aux applications les plus prometteuses qui soient: le graphène.

Andre Geim est professeur de physique et chercheur à l'université de Manchester, en Angleterre. En 2004, lui et son collègue, le chercheur Kostya Novoselov, furent les premiers à isoler du graphène. « C'était une surprise totale, ce matériau si remarquable, si intéressant, et d'un atome d'épaisseur! » s'émerveille encore Andre Geim. Le plus mince, le plus résistant, le meilleur conducteur d'électricité, les superlatifs ne manquent pas pour décrire ce matériau, d'apparence pourtant si banale...

La structure du graphène est d'une simplicité déconcertante : un seul élément, le carbone, dont les atomes sont disposés en hexagones, tel un nid d'abeilles. Empilées comme dans un paquet de cartes, ces feuilles d'un seul atome d'épaisseur forment le graphite, le matériau familier dont sont faites les mines de crayons. Les feuilles de graphène ne sont que faiblement retenues ensemble, par des forces de Van der Waals, les mêmes forces qui permettent aux geckos, ces petits lézards, de marcher sur les murs. Et c'est justement ce qui fait qu'un crayon écrit : aussi facilement que le gecko peut décoller ses pattes du mur, les feuilles de graphène se détachent avec le frottement de la mine sur le papier. Toutefois, elles se retrouvent agglomérées en paquets et retirer une seule et unique carte du jeu n'est pas une tâche facile...

## **Un peu de ruban adhésif et beaucoup de patience**

Pour dénicher du graphène, Andre Geim et Kostya Novoselov n'ont pas eu besoin d'équipement de haute technologie. Armés simplement d'un morceau de graphite, de ruban adhésif, d'un microscope et de beaucoup, beaucoup de patience, les deux chercheurs britanniques ont entrepris leurs expériences, sans trop savoir à quoi s'attendre. « Nous faisons, dans notre laboratoire, ce que nous appelons « les expériences du vendredi soir », où nous essayons quelque chose et si ça fonctionne, tant mieux, sinon, nous passons à autre chose » raconte Novoselov.

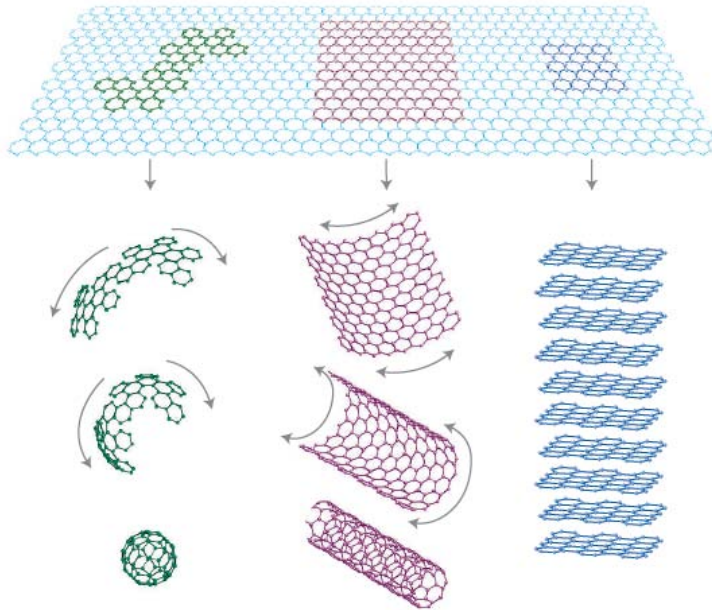
Avec leur ruban adhésif, les deux chercheurs ont graduellement séparé le graphite en couches de plus en plus minces, jusqu'à finalement obtenir une couche d'un seul atome d'épaisseur. « Au départ, ce n'était vraiment qu'une curiosité, se souvient Novoselov. Nous ne nous attendions pas à quelque chose de grandiose. » Car les propriétés physiques du graphite sont plutôt banales en comparaison à ce qu'ils ont observé dans le graphène. Qui aurait pu se douter qu'en passant de trois à deux dimensions, les propriétés physiques – mécaniques, électriques, magnétiques, optiques et bien d'autres – pouvaient changer si drastiquement?

« Personne ne pouvait s'y attendre, même avec du recul » affirme Geim, catégorique. Mais depuis que le duo a publié ses découvertes, c'est la « ruée vers le graphène » : des chercheurs de toutes les branches de la physique s'y intéressent, des compagnies, telles IBM et Intel, travaillent déjà à développer des applications commerciales, et dans les journaux scientifiques, de nouvelles découvertes surgissent presque tous les mois!

### Encadré – 3, 2, 1, 0 dimensions!

À partir du graphite, matériau en 3 dimensions, on peut extraire un plan de graphène, soit un matériau en 2 dimensions. En enroulant le graphène sur lui-même, tel un cylindre, on obtient les nanotubes de carbone, qui sont considérés comme étant en une dimension, car leur diamètre est négligeable face à leur longueur. Finalement, en formant une sphère à partir du graphène, on obtient un objet en zéro dimension : le fullerène. Cette molécule, dont la forme rappelle la Biosphère de Montréal, tire justement son nom de son célèbre architecte, Richard Buckminster Fuller!

Pour tous ces matériaux, la structure de base est la même, mais les propriétés physiques diffèrent.



**En haut : graphène, en bas à gauche : fullerène,  
en bas au centre : nanotube, en bas à droite : graphite**

Source : A. K. Geim et K. S. Novoselov, "The rise of graphene",  
*Nature Materials* 6, p. 184, (Mars 2007).

### Mine de crayon vs. mine de diamant : qui est le plus fort?

Quel est le matériau le plus résistant au monde? Le diamant, dites-vous? « Le graphène est le matériau le plus résistant de tous » affirme sans équivoque Novoselov. Graphène et diamant sont pourtant tous les deux composés uniquement de carbone, mais le type de liaisons entre les atomes diffère. Dans le graphène, les atomes sont plus rapprochés et sont retenus ensemble par les liens les plus forts qui puissent exister dans un matériau. Non seulement il est plus résistant que le diamant, mais le graphène est aussi plus flexible. Comme le roseau face au chêne, il plie mais ne rompt pas.

En 2008, les chercheurs Jeffrey Kysar et James Hone, de l'université Columbia, aux États-Unis, ont pris les grands moyens face au graphène: ils n'ont utilisé rien de

moins qu'une pointe en diamant pour tenter de percer une feuille du fameux matériau. Pour illustrer la force herculéenne qu'ils ont dû déployer pour y parvenir, les chercheurs ont expliqué que si une pellicule de plastique avait la même résistance que le graphène, il faudrait, pour la percer avec un crayon, exercer une force équivalente au poids d'une voiture!

Aussi mince qu'un dix-millième de l'épaisseur d'un cheveu, cent fois plus résistant que l'acier, tout en étant ultraléger – un kilomètre carré de graphène pèserait moins d'un demi-kilo! – des applications pratiques du graphène ont rapidement vu le jour. Par exemple, explique Andre Geim, en ajoutant de la poudre de graphène à du plastique, il est possible de le rendre plus solide. Des chercheurs ont mesuré qu'avec une proportion de graphène de seulement 1%, on pouvait presque doubler la résistance du plastique qui le contient! « En ce moment, seul du graphène de faible qualité est utilisé, mais même avec ça, certains plastiques montrent une augmentation de leur résistance » explique Andre Geim. De tels plastiques, souples, solides et légers, pourraient se retrouver dans une foule d'endroits : ailes d'avions, pales d'éoliennes, structures de bâtiments, et bien plus encore!

### **Vers une « Graphene Valley »?**

Depuis près de 70 ans, le silicium règne en maître dans le domaine de la microélectronique : composant principal des circuits intégrés, il se retrouve dans la majorité des appareils électroniques. Mais le graphène, avec ses propriétés hors du commun, se positionne désormais comme un concurrent féroce...

Dans un matériau comme le silicium, les électrons se déplacent en subissant des collisions avec des impuretés, comme une boule de billard qui s'entrechoquerait avec ses voisines. Ces collisions, en plus de ralentir le parcours des électrons, génèrent énormément de chaleur. Dans le graphène, dû à sa structure bidimensionnelle, les électrons se comportent comme s'ils n'avaient plus de masse, ce qui leur permet de se déplacer à des vitesses fulgurantes. Ne subissant plus de collisions, la boule se déplace comme si elle était seule sur sa table et peut atteindre des vitesses cent fois plus élevées

que dans le silicium! Résultat : des ordinateurs ultra-rapides et qui ne chauffent pas! En 2008, des chercheurs d'IBM ont conçu, à partir du graphène, un transistor (composant de base des circuits intégrés) capable d'effectuer 100 milliards d'opérations par seconde, soit dix fois plus que tout ce qui existe sur le marché!

De plus, en microélectronique, la devise du « toujours plus petit » est de mise, et cela pourrait signifier la fin de la glorieuse carrière du silicium. Dans un circuit, le silicium agit comme un interrupteur, pouvant laisser passer ou non le courant. Mais à de très petites dimensions, le silicium ne remplit plus correctement son rôle : le courant passe continuellement et le circuit ne fonctionne plus. Pour l'instant, le silicium demeure efficace, mais il s'approche rapidement de sa limite, au fur et à mesure que les circuits se miniaturisent. Avec le graphène, les deux chercheurs de Manchester ont conçu, en 2007, un transistor composé de seulement 10 atomes, mais qui demeurerait encore efficace, ce qui ouvre la porte à des ordinateurs plus petits que ce qu'il n'aurait été possible d'imaginer il y a seulement quelques années!

Il n'y a pas que le silicium qui pourrait être détrôné. Le graphène peut aussi s'unir à d'autres éléments pour jouer différents rôles, devenant tour à tour conducteur, isolant, ou entre les deux, semi-conducteur, selon les atomes qu'on ajoute à sa surface. « On utilise pratiquement tout le tableau périodique pour faire un circuit intégré! » s'exclame Novoselov. « Avec le graphène, on n'utilise qu'un matériau, puis on le modifie pour obtenir différentes propriétés. Par exemple, le graphène est un conducteur, mais pour le rendre isolant, on ajoute de l'hydrogène, pour le rendre semi-conducteur, on ajoute du fluor, et ainsi de suite. »

Mais les obstacles à surmonter, avant que le graphène ne s'installe dans les puces de nos ordinateurs, sont encore grands. Pour l'instant, il n'existe pas de méthode efficace pour produire du graphène de bonne qualité en grande quantité. Car ce n'est pas à coup de ruban adhésif qu'il pourra être produit en quantité industrielle! « Il faudra une amélioration à la fois dans la qualité et dans la conception du graphène avant d'être certain qu'il prendra le dessus » prévient Andre Geim.

Donc, pas encore de puce au graphène dans nos ordinateurs, mais sur nos écrans, par contre, il pourrait bientôt s'y poser! Les écrans plats, tels que l'on retrouve dans les ordinateurs, téléviseurs et téléphones cellulaires, contiennent tous une couche d'un matériau transparent et conducteur : l'oxyde d'indium-étain. Cependant, ce matériau est de plus en plus rare, donc coûteux, et est également toxique. Le graphène a tous les avantages de l'oxyde d'indium-étain, mais sans ses inconvénients. « Ce n'est que du carbone! » rappelle Geim. « Et vous savez la quantité de carbone qu'on rejette dans l'atmosphère! » lance-t-il, en expliquant que c'est loin d'être une ressource rare. Déjà, en 2008, des chercheurs coréens ont fabriqué, en déposant une fine couche de graphène sur du plastique, un écran tactile aussi flexible que du caoutchouc!

### **Le graphène ne manque pas d'énergie!**

Cependant, pour faire fonctionner tous ces appareils électroniques, il faut d'abord produire de l'électricité puis l'emmagasiner. C'est là qu'intervient, une fois de plus, le nid d'abeille de carbone. En ajoutant certaines molécules, appelées électrolytes, à la surface du graphène, des charges électriques viennent s'y greffer, le transformant alors en batterie de très haute capacité. Car comme il s'agit du matériau le plus mince qui soit, on peut en stocker une énorme quantité dans un tout petit volume!

Rodney Ruoff, professeur au département de génie mécanique de l'université du Texas, travaille à développer ce genre de super-batterie électrique. De tels dispositifs, appelés ultra-condensateurs, permettent non seulement de stocker une grande quantité d'énergie électrique, mais ils peuvent être déchargés et rechargés des millions de fois, soit bien plus qu'une batterie rechargeable traditionnelle! Dans un avenir peut-être pas si lointain, on pourrait donc voir sur nos routes des voitures électriques qui, non seulement auraient une coque ultra-souple et ultra-résistante (car faite en graphène!), mais qui seraient propulsées par des batteries à base de graphène!

« En termes d'énergies renouvelables, c'est en fait très intéressant à la fois pour le solaire et l'éolien » explique Ruoff, avec optimisme. « Ici, au Texas, les couloirs de vents sont extrêmement puissants. Nous sommes l'état numéro un en termes de production d'énergie éolienne. Toutefois, la production est la plus importante aux petites heures du matin, vers 2 ou 3 heures. » Un ultra-condensateur permettrait donc d'accumuler toute l'énergie produite durant la nuit, puis de l'utiliser durant le jour, lorsque la demande en électricité est plus élevée. Ainsi, avec la possibilité d'emmagasiner les énergies renouvelables à notre guise, il sera enfin possible de dire adieu aux énergies fossiles, comme le pétrole...

### **Le futur a bonne mine**

Après l'âge de pierre, l'âge du bronze et celui du fer, serions-nous rendus à l'âge du graphène? Rodney Ruoff est à la fois confiant et prudent : « Le graphène est très prometteur, mais il reste du travail à faire avant que l'on puisse dire qu'il peut supplanter les matériaux présents sur le marché. »

Toutefois, le graphène est encore jeune, rappelle Andre Geim : « Nous voyons déjà des applications après seulement cinq ans. C'est remarquable pour un matériau! » Son collègue, Kostya Novoselov est du même avis : « Il y a deux ans, j'étais extrêmement sceptique au sujet des applications. Nous nous amusions avec et c'était tout. Mais maintenant, on en parle vraiment plus sérieusement! » Pour l'instant, le duo de chercheurs britanniques poursuit ses travaux, comme des dizaines d'autres scientifiques aux quatre coins du globe. « C'est un domaine très vaste » conclut Geim, avec espoir. « Nous ne savons pas encore d'où viendra la prochaine découverte. »

Alors, le graphène : simple curiosité scientifique ou véritable révolution? Seul le temps le dira, mais une chose est certaine : il y a à peine 5 ans, personne ne se doutait que la pointe d'un crayon se retrouverait un jour à la fine pointe de la technologie.

### **Encadré – Un accélérateur de particules sur votre bureau**

En 2009 a été inauguré l'accélérateur de particules le plus puissant au monde : le « Grand collisionneur de hadrons », situé en Suisse. Ayant coûté des milliards de dollars et mesurant plus de quatre kilomètres de diamètre, ce mastodonte permet d'étudier les particules qui se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière. Est-ce qu'un petit morceau de graphène, de taille microscopique et de coût dérisoire, pourrait rivaliser avec ce géant?

Effectivement, les électrons se déplacent si vite dans le graphène – plus de 3 millions de km/h – qu'il faut faire

intervenir la théorie de la relativité pour décrire leur comportement. Car de telles vitesses ne sont observées, sur Terre, que dans les accélérateurs de particules, ou dans l'espace, dans des endroits exotiques comme à proximité des trous noirs!

« C'est une des seules structures 2D » souligne Pierre Lévesque, chercheur au département de chimie de l'université de Montréal, qui travaille depuis plusieurs années sur le graphène. « On peut étudier des phénomènes dans le graphène qu'on ne pourrait pas étudier dans d'autres systèmes. » À l'instar de plusieurs chercheurs, il croit que même si aucune application commerciale ne voit le jour, le graphène aura au moins eu le mérite de faire avancer la recherche théorique.