

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude  
De MASTER ACADIMIQUE**  
Spécialité : **Génie Microélectronique**

*Présenté par*  
**TERMOUL Mohamed**

**Thème**

**Etude théorique d'un transistor à canal  
en graphène**

Mémoire dirigé par M<sup>r</sup> **BERD Mourad**

*Première promotion 2014*

---

## *Remerciements*

Louange à DIEU qui ma comblé de faveurs, et apporté son aide a fin de réaliser le travail exposé tout le long de ce mémoire. Je tien à remercier vivement monsieur Arezki BENFDILA, responsable de la formation, je lui exprime aussi toute ma reconnaissance pour sa compréhension, aidé et conseillé dans les moments difficiles, ainsi son dynamisme et sa collaboration tout au long de ce mémoire. Je remercier mon promoteur, monsieur BERD. MOURAD, non seulement pour m'avoir assisté pleinement tout au long de ce mémoire, mais également pour m'avoir prouvé toute sa compétence et sa patience. Que cette espace le prenne à témoin tout en lui révélant l'expression de mon profonde gratitude.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur KANAN, monsieur DAOUI. M'hand et tous le groupe micro-électronique ainsi aux membres de jury qui ont accepté aimablement d'examiner et de juger mon travail, je leur fais honneur de respect. Je tien également à remercier tous ceux qui ont contribué de loin ou de prés à la réalisation de ce travail.

## . . . Je dédie ce travail à ...

Je dédie ce modeste travail comme fruit de toutes mes études :

-A ma très chère mère et mon très cher père, qui ont passé des nuits longues pour mon bonheur et qui se sont fatigués pour mon repos, qui m'ont encouragé à aller au bout de mes objectifs et qui m'ont accompagné durant toutes mes années d'études, et dans les moments difficiles, qui ont prié pour mon succès et mon bonheur. Jamais je ne pourrai vous remercier suffisamment pour tout ce que vous avez fait pour moi.....Que dieu le tout puissant vous préserve, vous donne la santé, le bonheur et une longue vie.

-A mes frères yazid, farid, hamid et hakim,

-A mes belle sœurs nouira, Fahima, et hakima,

-A ma grand-mère très chère à mes yeux,

-A mes confrères et consœurs,

-A Mon ange farida,

-A tous mes amis, avec lesquels j'ai passé d'agréable moment tout au long de mon cursus particulièrement : Slimane, mouloud, et hamza

# *Liste des symboles*

$V_{gs}$	Tension grille-source
$V_T$	Tension de seuil
$W$	Largeur des bandes N et P (cas de la Superjonction)
$q$	Charge électrique élémentaire
$R_{ch}$	Résistance de canal
$R_s$	Résistance de source
$S$	Surface active de la puce d'un transistor MOS de puissance
$T$	Température (en K)
$V_{ds}$	Tension drain-source
$V_{dsat}$	Tension de saturation
$C_{gs}$	Capacité grille-source
$C_{ds}$	Capacité drain-source
$C_{gd}$	Capacité grille-drain
$C_{ox}$	Capacité d'oxyde de grille par unité de surface
$e_{ox}$	Épaisseur de l'oxyde mince de canal
$I_{ds}$	Courant de drain
$L$	Longueur du canal
$C_{pg}, C_{pd}$	Capacité parasite
$L_g, L_d, L_s$	Inductance grille, drain, so



# *Introduction générale*

## INTRODUCTION GENERALE

Les appareils sont en constante progression de performances : plus de fonctions, plus performants, plus petits. Ces améliorations sont une conséquence directe du nombre de transistors présents dans les puces électroniques. Ainsi, pour obtenir des performances toujours meilleures sans augmenter la taille de nos téléphones mobiles ou ordinateurs portables, les transistors subissent une miniaturisation régulière de leurs dimensions. Cette miniaturisation suit une loi empirique, mise en évidence dès les années 1960 par Gordon Moore, sur la base de considérations non pas scientifiques mais économiques. Cette loi stipule que le nombre de transistors dans une puce double tous les dix-huit mois. Ce qui revient à dire que la taille du transistor doit être divisé par deux tous les dix-huit mois.

Si elle avait très bien commencé, la miniaturisation atteint maintenant ses limites. En effet, la dimension des transistors devient tellement petite que les effets parasites et les effets quantiques, jusque là relativement négligeables, jouent un rôle dominant. Arriver à cette limite les chercheurs se sont vu contraints de se tourner vers de nouveaux matériaux pour poursuivre la miniaturisation, l'un des premiers matériaux à avoir suscité de l'intérêt c'est le carbone sous la forme nanotube malgré ses caractéristiques électroniques exceptionnelles on a très vite vu sa limite (fabrication en masse impossible). En 2004 un nouveau arrivant dans la famille du carbone donne des perspectives nouvelles le graphène qui offre les mêmes caractéristiques que le nanotube de carbone, avec la possibilité d'une intégration sur de grandes surfaces.

Ce mémoire s'articule autour de 3 chapitres.

En premier lieu, on commence par une présentation générale du graphène. De façon à illustrer sa structure cristallographique, sa structure électronique et ses propriétés de base qui font de lui un matériau très remarquable.

En second lieu, nous présentons les difficultés rencontrées dans la fabrication et la configuration du transistor à base de graphène. ainsi que les solutions proposées pour parer à ces difficultés et son intégration rendue possible dans un transistor comme canal.

Enfin dans le troisième chapitre on présente les équations du courant qui circule dans le canal et aussi les graphes qui résultent de ces équations, on prend une longueur de canal de 50nm pour la quelle on obtient différentes courbes, on a introduit des courbes qui résultent d'une manipulation dans un laboratoire pour comparer nos résultats.

On termine par une conclusion générale et perspective.

# *Chapitre I le graphène*

# SOMMAIRE chapitre I

<b>I.1.Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Le carbone.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Les formes classiques du carbone .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1. Graphite.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2. Diamant.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Les nouvelles formes du carbone.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1. Le nano tube de carbone.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.2. Fullerènes.....</b>	<b>7</b>
<b>I.5. Le graphène.....</b>	<b>8</b>
<b>I.5.1. Structure atomique.....</b>	<b>8</b>
<b>I.5.2. Structure électronique.....</b>	<b>10</b>
<b>I.6. Graphène multi-feuillet.....</b>	<b>14</b>
<b>I.7. Mise en évidence expérimentale du graphène.....</b>	<b>15</b>
<b>I.7.1. Graphène exfolié.....</b>	<b>15</b>
<b>I.7.2. Graphène épitaxie sur le carbure de silicium.....</b>	<b>15</b>
<b>I.8. Quelques propriétés du graphène.....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.1. Propriétés mécaniques .....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.2. Propriétés électronique.....</b>	<b>17</b>
<b>I.8.3. Conductivité thermique.....</b>	<b>18</b>
<b>I.8.4. Propriétés optique.....</b>	<b>18</b>
<b>I.9. Conclusion.....</b>	<b>19</b>

## I.1. Introduction

Le graphène est le dernier arrivant dans la famille des composés carbonés. Celle-ci comporte le diamant, le graphite et le carbone amorphe puis, du côté des nano-objets, les fullerènes découverts en 1985 et les nanotubes en 1991.

Le graphène est une monocouche d'atomes de carbone organisés en structure hexagonale dite « nid d'abeille » comme le graphite. Il peut être vu comme une monocouche de graphite ou bien un nanotube de carbone déroulé. Le premier feuillet a été isolé en 2004 par l'équipe de Manchester par exfoliation mécanique de graphite, c'est-à-dire en pelant un morceau de graphite par l'utilisation de scotch jusqu'à obtenir une monocouche. C'est la première fois qu'un système en deux dimensions est réalisé. La prouesse n'a pas été de produire du graphène qui existe à l'état naturel dans le graphite mais plutôt d'isoler une seule feuille et d'en faire un objet de recherche manipulable et relativement facile à obtenir. Jusque là, le graphène était un objet théorique simplifié utilisé pour étudier le graphite. Finalement, le graphène n'est pas vraiment nouveau. Ce qui est nouveau, c'est de pouvoir mesurer ses propriétés de transport électrique. Ainsi, depuis 2004, le graphène suscite un extrême intérêt pour ses propriétés de transports exceptionnelles comme des grandes mobilités électroniques et un effet hall quantique à température ambiante.

## I.2. Le carbone

Le quatrième élément le plus abondant dans notre système solaire, après l'hydrogène, l'hélium et l'oxygène, le carbone possède la particularité d'exister sous différentes structures physique (polymorphisme) appelées allotropies.

Il fut accepté pendant une longue période que cette famille de composés de carbone ne comportait que deux membres, le diamant et le graphite, auxquels d'autres structures, plus exotiques et issues de l'intervention humaine, pouvaient être assimilées. Le carbone ( $Z=6$ ) possède quatre électrons de valence et présente une structure électronique  $1s^2 2s^2 2p^2$ .

Les liaisons chimiques que forme le carbone, tant dans ses allotropies que dans les molécules qu'il peut former avec d'autres éléments, ne peuvent être représentées, dans le modèle de l'électron localisé, que par l'incorporation du concept d'orbitales hybrides issues du mélange d'orbitales atomiques

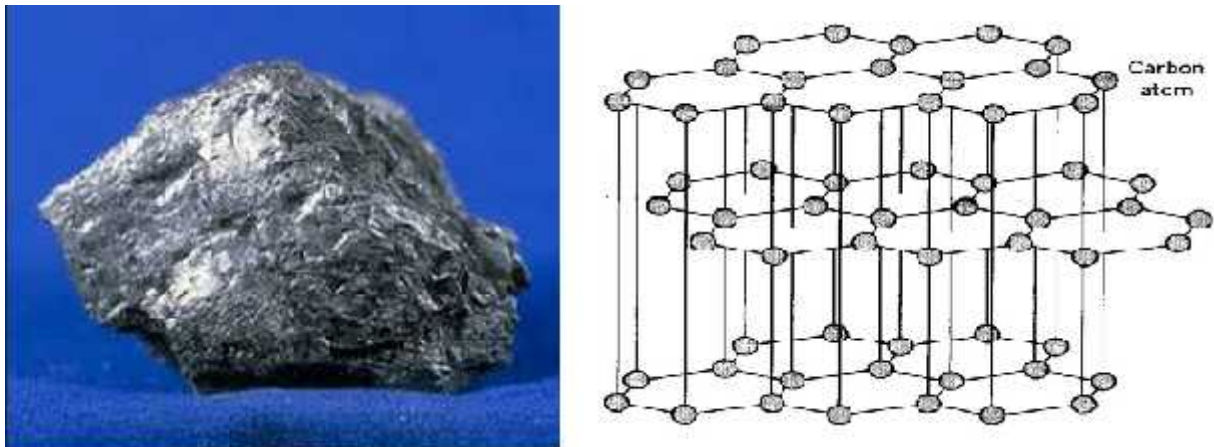
<b>Liaison</b>	<b>Hybridation</b>	<b>Energie de liaison (Kj/mol)</b>	<b>Longueur de liaison (nm)</b>
C-C	$Sp^3$	370	0.15
C=C	$Sp^2$	680	0.14
C≡C	$Sp$	890	0.12

**Tableau** : différents états d'hybridation du carbone.

## I.3. Les formes classiques du carbone

### I.3.1. Graphite

À pression atmosphérique et température ambiante, la forme la plus stable du carbone pur est le graphite. C'est donc la forme la plus courante, bien qu'elle soit en général trouvée sous une forme moins pure le charbon. Le graphite possède une structure lamellaire, dont chacun des plans, espacés de 0.334nm, est constitué d'un réseau hexagonal (en nid d'abeille) d'atomes de carbone figure I.1



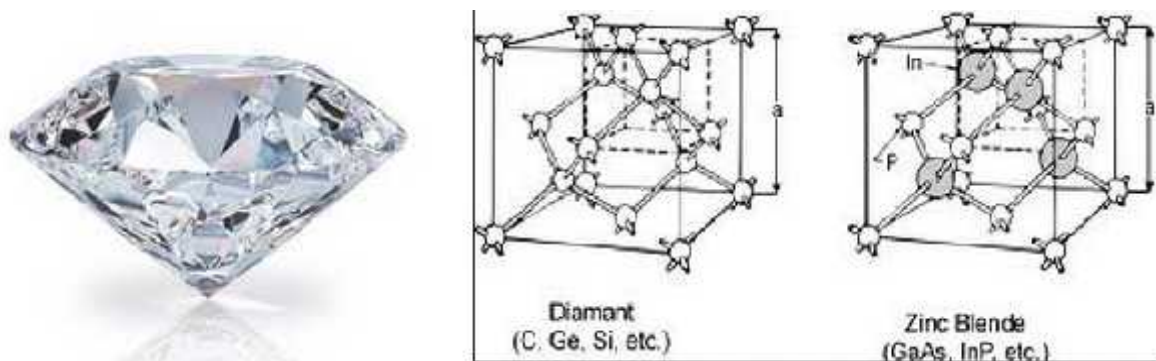
**Figure I.1** : structure du graphite hexagonal.

Les liaisons au sein des plans sont covalentes, tandis que les liaisons inter-planaires sont de type van der Waals, donc faibles. C'est pourquoi le graphite est à feuiller, et c'est le carbone tétravalent, les quatre électrons de valence se répartissant dans les orbitales  $s^2$  et  $p^2$ , dont les énergies sont assez proches. Dans sa structure hexagonale, il n'est pas lié de manière covalente qu'à trois voisins. Les orbitales moléculaires de ces liaisons sont de type  $sp^2$ , C'est-à-dire que chaque électron lié se trouve dans un état combinés une orbitale atomique  $s^2$  et deux orbitales  $p^2$ . Le quatrième électron de valence, initialement dans l'orbitale atomique  $p_z^2$  qui voisins du même plan. Ce dernier électron peut donc participes à la conduction électrique de graphite.

### I.3.2. Le diamant

Le diamant est la forme stable du carbone à haute pression et haute température. Il se forme à l'intérieur de la terre, généralement entre 150 et 200 m de profondeur, là où ses conditions de stabilité sont réunies (un millier de degrés Celsius et plusieurs giga pascals).

Le diamant est la forme la plus compacte du carbone. Il possède une structure cubique à faces centrées avec un paramètre de maille de  $a=0.357$  nm, et une distance interatomique de  $a_{c-c}=0.154$  nm. Figure I.2



**Figure I.2** : structure du diamant.

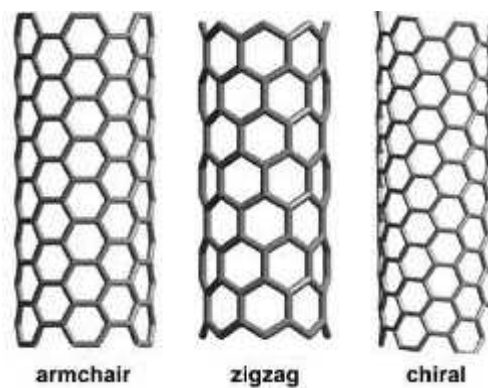
Chaque atome est lié à quatre voisins par des liaisons hybridées  $sp^3$ . Contrairement au cas du graphite, tous les électrons de valence sont impliqués dans des liaisons covalentes, donc le diamant est isolant électriquement. En revanche, c'est le meilleur conducteur thermique connu, avec une conductivité thermique cinq fois supérieure à celle du cuivre. Grâce à sa structure et à ce type de liaison chimique, le diamant est aussi le matériau le plus dur que l'on connaisse. C'est pourquoi il est utilisé dans de nombreuses applications comme le polissage ou le découpage.

## I.4. Les nouvelles formes du carbone

### I.4.1. Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont une forme allotropique du carbone appartenant à la famille des fullerènes. ce sont les matériaux les plus résistants et durs ; la théorie leur prédit une conductivité électrique et une conductivité thermique remarquablement élevées. Ce sont l'un des premiers produits industriels issus des nanotechnologies.

La structure d'un nanotube de carbone mono feuillet peut être représentée par un feuillet de graphène enroulé sur lui-même et fermé à ses deux extrémités par une demi-sphère. La façon dont le feuillet de graphène est replié sur lui-même définit un paramètre, appelé hélicité, qui fixe la structure du nanotube. L'hélicité permet de caractériser les différents types de nanotubes existants.



**Figure I.3 :** structure des nanotubes de carbone.

### I.4.2. Fullerènes

Il s'agit de petites molécules symétriques composées d'une à plusieurs dizaines d'atomes de carbones. Ces derniers sont agencés suivant un mélange d'hexagones (similaires à la structure des plans de graphite) et de pentagones, ces derniers générant la courbure de l'ensemble.

Le plus couramment étudié est le fullerène  $C_{60}$ , composé de plus de 60 atomes de carbone, 20 hexagones et 12 pentagones, tel un ballon de football (figure 1.4). Dans ces structures, chaque atome a trois voisins comme dans le cas du graphite, mais du fait de la courbure, les liaisons ne sont pas purement de type  $sp^2$ .

Elles sont en fait un mélange  $sp^2$  et  $sp^3$ . Grâce à leur symétrie, les fullerènes  $C_{60}$  ont un module d'incompressibilité supérieur à celui du diamant.

Avec les fullerènes, on entre dans le domaine des nanomatériaux, puisque leur taille est de l'ordre de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de nanomètres. C'est aussi la porte d'entrée du carbone dans la physique mésoscopique, puisqu'il s'agit d'un matériau de faible dimension.



**Figure I.4** : Structure fullerène.

Les fullerènes doivent tous obéir à la règle de stabilité d'Euler, mais des conditions de stabilité chimique supplémentaires font que toutes les structures géométriquement possibles n'existent pas. Les fullerènes les plus connus sont les  $C_{60}$  et  $C_{70}$ , mais il existe également les  $C_{76}$ ,  $C_{78}$ ,  $C_{82}$ ,  $C_{84}$ .....

## **I.5. Le graphène**

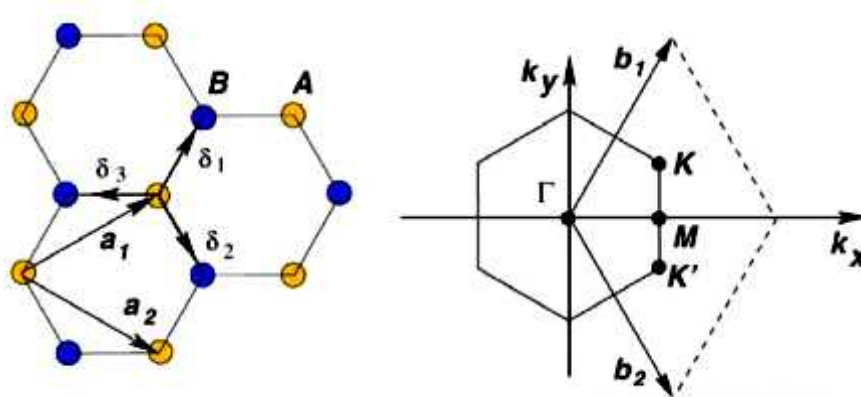
### **I.5.1. Structure atomique**

Dans le graphite, chaque atome de carbone est lié à trois autres atomes de carbone par des liaisons covalentes. La distance entre deux atomes de carbone voisins, appelée  $a$ , est approximativement de  $1,42 \text{ \AA}$ . Entre les plans, les liaisons sont plus faibles et donc la distance plus grande. Cette distance, fixée par les forces de Van Der Waals, est de  $3,35 \text{ \AA}$ .

Le réseau de Bravais du graphène est hexagonal avec un motif de deux atomes A et B par maille élémentaire.

Les deux vecteurs de base du réseau sont définis comme:

$$a_1 = \frac{a}{2}(\sqrt{3}, 3) \quad a_2 = \frac{a}{2}(-\sqrt{3}, 3)$$



**Figure I.5 :** Représentation du réseau direct et réciproque du graphène. Les vecteurs  $\vec{a}_1$  et  $\vec{a}_2$  et les atomes A et B définissent le réseau de Bravais. Les vecteurs  $\vec{b}_1$  et  $\vec{b}_2$  définissent la première zone de Brillouin.

Dans l'espace réciproque,  $\vec{a}_1$  définit les vecteurs  $\vec{b}_1$  base  $b_1$  et  $b_2$ , qui s'écrivent:

$$\vec{b}_1 = \left( \frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \right), \quad \vec{b}_2 = \left( \frac{2\pi}{3a}, -\frac{2\pi}{\sqrt{3}a} \right)$$

La présence de deux atomes par maille élémentaire, entraîne l'existence de deux points non équivalents K et K' situés aux extrémités de la zone de Brillouin. Leurs coordonnées dans l'espace réciproque sont

$$K = \left( \frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{3\sqrt{3}a} \right), \quad K' = \left( \frac{2\pi}{3a}, -\frac{2\pi}{3\sqrt{3}a} \right)$$

Ces points ont une grande importance sur les propriétés électroniques du graphène. Le transport est régi par les porteurs de charges dont l'énergie est voisine de l'énergie de Fermi. Ainsi, l'ensemble des résultats qui seront présentés ici seront discutés sur la base de la structure de bande au voisinage des points K et K'.

## I.5.2. Structure électronique

### I.5.2.1. Hybridation $sp^2$

Chaque atome de carbone possède six électrons autour du noyau. Ces électrons occupent les orbitales  $1s^2$ ,  $2s^2$ ,  $2p^2$ . Les deux électrons  $1s^2$  sont fortement liés au noyau, les quatre autres moins. Un électron d'orbitale  $2s$  et deux électrons d'orbitale  $2p$  forment l'hybridation  $sp^2$  responsable des liaisons dans le plan. En effet, une combinaison linéaire des trois orbitales de valence  $2s$ ,  $2p_x$  et  $2p_y$  va donner trois orbitales hybrides notées  $sp^2$  pointant dans les trois directions du triangle équilatéral. Ces trois orbitales hybrides vont ensuite former les trois liaisons par recouvrement axial avec les orbitales atomiques des trois atomes voisins. Ces liaisons sont dites fortes ce qui assure une bonne stabilité mécanique du graphène dans le plan. L'orbitale  $2p_z$  non utilisée pour former les orbitales  $sp^2$  assure la formation de la liaison supplémentaire. Cet orbital est perpendiculaire au plan des trois orbitales  $sp^2$  et est responsable de la conduction électrique dans le plan et des liaisons faibles entre plans. Pour chaque atome de carbone présent dans la feuille de graphène, il y a un électron libre impliqué dans la conduction.

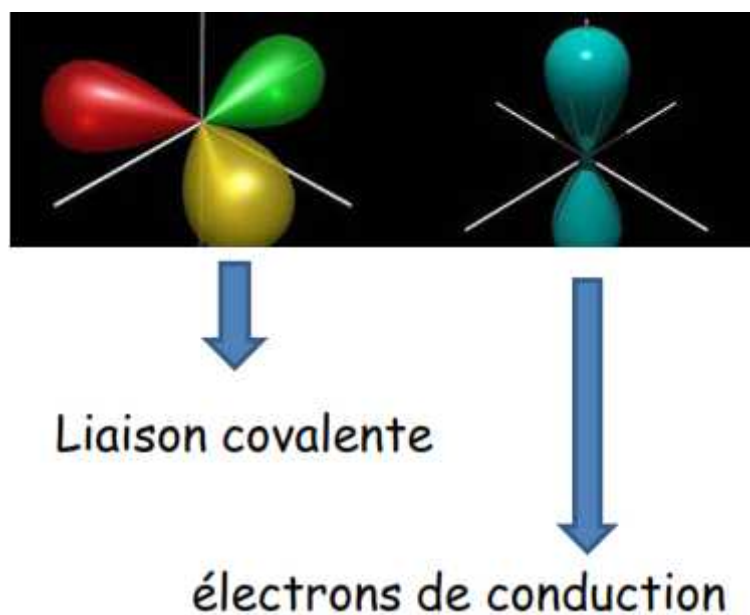


Figure I.6 : Orbitales atomique.

### I.5.2.2 Structure de bande

La spécificité du graphène vient de son diagramme d'énergie. La structure de bande calculée par Wallace en 1947 montre qu'il existe une bande de valence à énergie négative et une bande conduction à énergie positive.

Le graphène a des bandes de conduction et de valence qui se touchent à des points bien particuliers de la première zone de Brillouin. Ces points sont les points K et K'. Autrement dit la bande interdite entre bande de valence et bande de conduction est nulle. De plus, le niveau de Fermi tombe juste aux points de contact entre ces deux bandes à énergie nulle. Le graphène peut donc être pris pour un semi-conducteur (densité électronique nulle au niveau de Fermi) ou comme un semi métal (point de contact entre la bande de valence et la bande de conduction). En fait, le graphène est souvent nommé semi-conducteur à bande interdite nulle. De plus, au voisinage du point K (et K'), la relation de dispersion n'est pas quadratique comme pour le silicium mais linéaire : l'énergie est proportionnelle au vecteur d'onde  $k$ ,  $E = \hbar v_F k$ . La relation de dispersion dans le graphène ressemble donc à celle des particules relativistes comme les photons ou les neutrinos. C'est pourquoi on parle d'électrons relativistes dans le graphène. La relation de dispersion s'écrit de la façon suivante :

$$E = \pm \sqrt{(p^2 c^{*2} + m^{*2} c^{*2})} = \pm c^* p \quad (1)$$

Avec une masse effective nulle  $m^* = 0$  et une vitesse  $c^* = \sqrt{\frac{3\hbar a}{2m}} \approx 10^6$  m/s reliée au pas du réseau  $a$  et l'intégrale de saut  $t=3$  eV. Cette vitesse  $c^*$  n'est pas la vitesse de la lumière dans le vide ( $c=300\,000$  km/s) mais une vitesse de la lumière effective  $c^*$  ou vitesse de Fermi. Les électrons ne sont pas vraiment relativistes au sens où leurs vitesses  $c^*=1\,000$  km/s est 300 fois plus petite que celle de la lumière. La présence d'un signe  $\pm$  dans la relation de dispersion a une signification très importante. Comme les bandes de valence et de conduction se touchent à énergie nulle, les électrons appartiennent simultanément aux deux bandes.

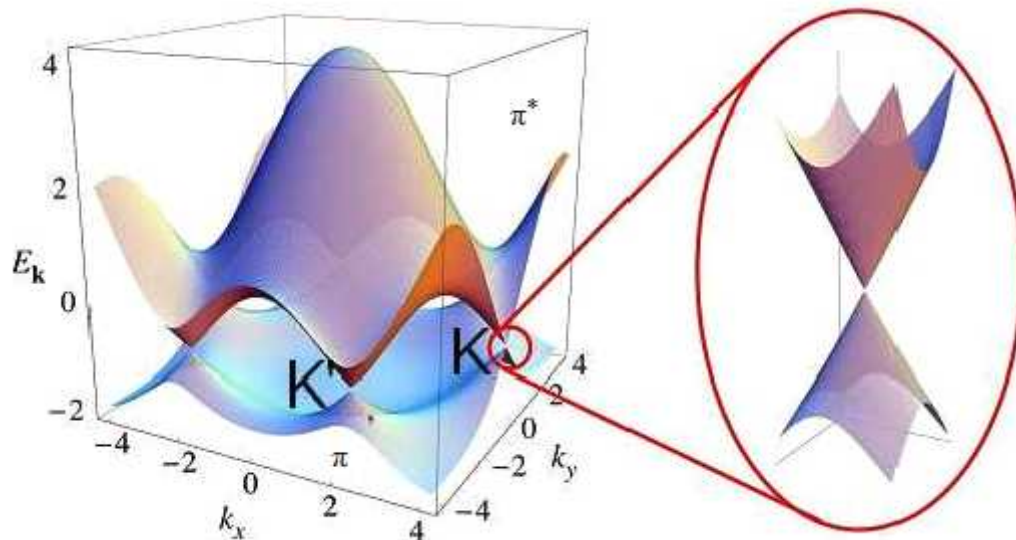


Figure I.7 : Diagramme des bandes d'énergie du graphène.

### I.5.2.3 Niveau de Landau

On rappelle ici quelques propriétés des électrons confinés dans un plan de surface  $S$  et soumis à un champ magnétique  $B$  perpendiculaire au plan. Classiquement, sous l'effet de la force de Lorentz magnétique, un électron suit une trajectoire circulaire appelée orbite cyclotron. Le rayon de cette orbite est quelconque et dépend continûment de l'énergie de l'électron. La mécanique quantique lève cet arbitraire en imposant des valeurs discrètes à ce rayon, comme c'est le cas pour les orbites fermées des électrons autour du noyau d'un atome. De même que pour ces derniers, les orbites cyclotrons quantifiées donnent lieu à des énergies discrètes, dites niveaux de Landau. Ces niveaux c'est une particularité du système sont hautement dégénérés, c'est-à-dire qu'ils peuvent abriter un très grand nombre d'électrons ( $N$ ) qui équivaut au flux magnétique total  $BS$  traversant l'échantillon occupant une surface  $S$ , compté en unités du « quantum de flux »  $h/e$ . Pour des électrons ayant une relation de dispersion parabolique (électrons massifs usuels), les énergies des niveaux de Landau sont proportionnelles au champ magnétique. Pour des fermions de Dirac de masse nulle, la relation de dispersion est linéaire et les niveaux de Landau varient comme la racine carrée du champ magnétique et de l'indice  $n$  du niveau. Ceci se traduit par une densité d'états montrant des pics qui ne sont pas équidistants, mais dont l'espacement varie comme la racine carrée de leur indice (voir la figure I.7).

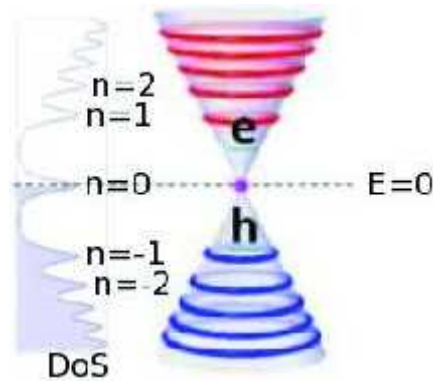


Figure I.7 : représentation du niveau de Landau

Une manifestation particulièrement spectaculaire de l'existence de niveaux de Landau est l'effet Hall quantique. L'effet Hall classique. Lorsqu'on fait passer un courant dans une plaque conductrice exposée à un champ magnétique perpendiculaire, on détecte une accumulation de charges électriques sur les bords latéraux de l'échantillon.

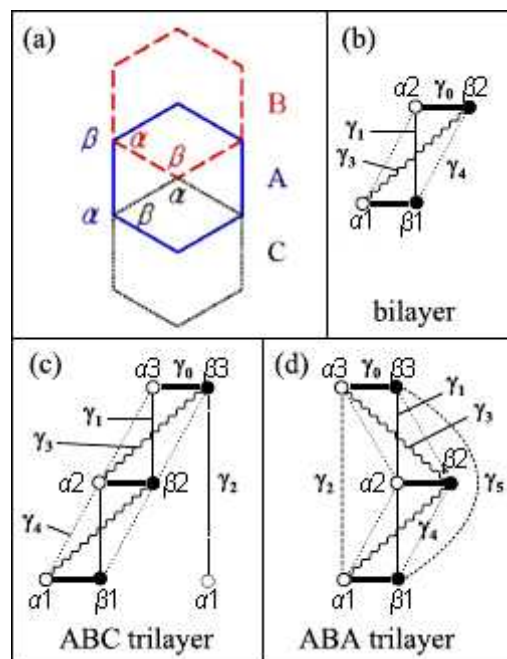
Expérimentalement, on mesure une tension transverse (dite de Hall), fonction du rapport entre le champ magnétique  $B$  et le nombre  $N$  de porteurs de charge (électrons ou trous) dans le système. Correctement normalisé, l'inverse de ce rapport donne le facteur de remplissage des bandes ( $1/\text{facteur de remplissage} = N/N \sim B$ ). Classiquement, la tension de Hall est proportionnelle à  $B$  : on mesure alors une droite qui passe par l'origine. Lorsqu'on place l'échantillon à très basse température (disons les 4 kelvins de l'hélium liquide) et sous un fort champ magnétique (quelques teslas), on peut voir un effet quantique dans l'expérience de Hall.

Des plateaux dans la tension de Hall peuvent apparaître en fonction du facteur de remplissage (inverse) : plutôt qu'une droite, on observe un escalier montant ( qui, en moyenne, reproduit la droite de l'effet Hall classique ). Les plateaux correspondent à des facteurs de remplissage entiers et à des tensions de Hall quantifiées. On parle d'effet Hall quantique.

## I.6. Graphène multi-feuillet

Le type d'empilement de deux couches de graphène l'une sur une autre, nécessite le décalage relatif de ces dernières afin de minimiser l'énergie de couplage. Les atomes d'une des couches vont être translatés le long des bords du réseau hexagonal. Suivant ces règles d'empilement, il existe trois positions possibles de la maille hexagonale : A, B, et C (voir figure 1.4 (a)). Il existe alors  $2^{N-2}$  configurations stables possibles lors de l'empilement de  $N$  couches de graphène. Les couches peuvent par exemple se comporter comme des feuillets de graphène indépendants, comme cela est le cas dans le graphène issu de SiC. Dans notre cas on considère que deux couches de graphène ne peuvent donc s'agencer de manière stable que dans une seule configuration : l'empilement de type Bernal (A-B) (voir figure 1.4 (b)). Pour le graphène tri-couche deux configurations peuvent être distinguées, l'une identique à celle déjà mentionnée pour le graphène bicouche, l'empilement Bernal (A-B-A).

L'autre empilement, de type rhomboédrique correspondant à une superposition A, B, C des couches de graphène (voir figure 1.4 (c) et (d)).



**Figure 1.8 :** (a) Empilement de couches de graphène énergétiquement favorables, les deux types d'atomes par maille sont notés par  $\alpha$  et  $\beta$ . (b) Schéma de la cellule unité pour le graphène bi-couche. (c) Schéma de la cellule unité pour du graphène tri couche de type ABC. (d) Schéma de la cellule unité pour du graphène tri-couche de type ABA. Les interactions pertinentes entre les différents atomes sont représentées par les termes de couplage de  $\gamma_0$  à  $\gamma_4$  D'après [Koshino 2010 b] et [min 2008b].

## **I.7. Mise en évidence expérimentale du graphène**

Depuis 2004 le graphène n'est plus seulement un objet purement théorique. Il existe à l'heure actuelle deux principales techniques pour obtenir expérimentalement du graphène. On trouve d'une part l'exfoliation du graphite par clivage micromécanique et d'autre part la graphitisation d'un cristal de carbure de silicium (SiC).

### **I.7.1. Graphène exfolié**

L'exfoliation et la méthode qui a permis d'isoler le premier feuillet de graphène en 2004 par l'équipe de Geim à l'université de Manchester. Elle consiste à séparer quelque plan de graphène à l'aide de scotch. En utilisant du HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite) ou du graphène naturel (sous forme de grains), vu que la force entre les plans de graphène est faible, quelques plans de graphite se retrouvent arrachés par le scotch. Avant 2004, le graphène était dit thermodynamiquement instable à température ambiante. Il semblerait que le déposer sur un substrat casserait sa symétrie et le rendrait stable. L'obtention de graphène par cette méthode est longue et ne permet pas de parvenir à de très grandes surfaces de graphène.

### **I.7.2. Graphène épitaxie sur le carbure de silicium**

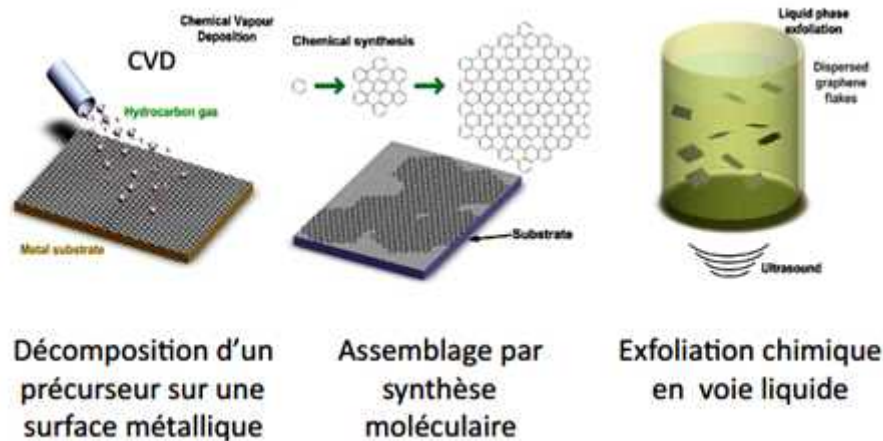
L'une des méthodes qui peut donner une suite dans la microélectronique c'est la sublimation du carbone de silicium. Cette méthode permet d'avoir de grande surface de graphène. Le principe est simple, au dessus de 1200°, les atomes de silicium en surface s'évaporent et les atomes de carbone se réorganisent en graphène. Ce procédé consomme du SiC pour former du graphène.

Ce procédé possède l'avantage de fabriquer de grandes zones de graphène, couvrant toute la surface du substrat de carbure de silicium.

Il existe d'autre technique de synthèse du graphène telle que

- 1- La CVD
- 2- Assemblage par synthèse moléculaire
- 3- Exfoliation chimique en voie liquide

Qui sont représenté dans la figure suivante



**Figure I.9 :** quelque technique d'obtention du graphène.

## I.8 Quelques Propriétés du graphène

### I.8.1 Propriétés mécaniques

La force de rupture d'une feuille unique de graphène présumée sans défaut a été mesurée 6 à 42  $\text{Nm}^{-1}$ , ce qui correspond à un module de Young de 1 TPa (cinq fois le module de Young de l'acier de 200 GPa). À une autre échelle, un film mince de 1 mm d'épaisseur, fait de 3000 feuillets de graphène (graphite sans défaut), supporterait le poids d'un véhicule de plusieurs tonnes. La force de rupture par unité de longueur est la même que celle d'un nanotube de carbone monocouche par unité de longueur de son périmètre.

Une autre propriété mécanique propre au graphène, à l'opposé de la précédente, est son élasticité plutôt molle pour des déformations de flexions transversales. Le graphène possède aussi « *l'effet membrane* » familier dans le cas du tambour ou de la corde tendue des instruments de musique dont les fréquences augmentent avec la tension.

### I.8.2. Propriétés électronique

Des mesures de conductivité électrique du graphène on révélé des mobilités des porteurs de charge supérieures à  $200.000 \text{ cm}^2/\text{V}$  à basses températures comparables a celles des nanotubes de carbones. Ces valeurs sont largement supérieures à celles des autres matériaux conducteurs, métalliques ou semi-conducteurs aux mêmes températures.

Les résultats observés indiquent un *transport balistique* des porteurs qui ne rencontrent pratiquement pas d'obstacle sur des longueurs de l'ordre du mm. Un tel mode de transport conférerait aux dispositifs électroniques en graphène, tels que transistors et autres, des vitesses de fonctionnement très supérieures à celles des transistors à semi-conducteurs.

Grâce à l'absence de gap aux points K, on obtient une énorme diminution de la résistivité, que ce soit en polarisation positive ou négative, par rapport à la résistivité en l'absence de bias, par suite de la population de la bande de conduction ou de la dépopulation de la bande de valence, respectivement. Les porteurs de charges sont des électrons en bias V positifs et des trous en bias négatifs et possèdent des mobilités similaires. Cette caractéristique et la mobilité élevée sont des propriétés très favorables pour la réalisation de transistors ultra rapides. Une autre conséquence pratique de la structure de bande spéciale du graphène est la facilité avec laquelle le feuillet peut être chargé, d'où son utilisation potentielle en tant que super-capacité.

L'absence de gap fait que des charges statiques (négatives ou positives) peuvent être facilement injectées dans des feuillets dès qu'ils sont portés à un potentiel si faible soit-il (du moins lorsque le gap est nul). Une configuration de multiples feuillets de graphène chiffonnés et développée à l'échelle macroscopique permettrait d'atteindre des surfaces spécifiques énormes et donc une capacité de charge géante. Ceci conduirait à l'obtention d'un condensateur dont la *densité d'énergie électrostatique* pourrait être comparable à la densité d'énergie chimique des hydrures de Nickel envisagés pour le stockage de l'hydrogène atomique, avec l'avantage supplémentaire d'une durée de charge ou de décharge fortement abrégée à quelques secondes plutôt qu'en des heures pour les hydrures.

### **I.8.3. Conductivité thermique**

La conductivité thermique du graphène, comme sa conductivité électrique, atteint des valeurs extraordinairement élevées comparées à celles des meilleurs conducteurs de chaleur tels que le cuivre, le diamant ou le graphite. Elle peut atteindre plusieurs milliers de W/m.K pour le graphène.

### **I.8.4. Propriétés optiques**

Nous mentionnerons seulement une des propriétés optiques spectaculaires du graphène. Elle concerne sa *transmission optique* dans le visible. Des mesures ont montré que le graphène atténue la lumière visible d'environ 2.3%. C'est une diminution substantielle pour une seule couche atomique de matériau.

La propriété de bonne transparence optique laisse entrevoir une *application électro-optique* importante. Il s'agit de la combiner avec la haute conductivité électrique de type métallique du graphène. On envisage en effet de remplacer le matériau semi-conducteur ITO (Indium Tin Oxyde), utilisé en film mince de moins bonne transparence (80%), par le graphène pour réaliser la fonction de transparence contrôlable électriquement dans les affichages par cristaux liquides.

## **I.9. Conclusion**

Le graphène, ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovation dans tout les domaines, des caractéristique à très faible dimensions font de ce matériau un successeur prometteur du silicium.

*Chapitre II transistor a canal  
en graphène*

# SOMMAIRE chapitre II

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2. Mobilité dans le graphène.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3. Obtention d'une bande interdite.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.1. Nano rubans de graphène.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.2. Bicouches de graphène.....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.3. Dopage de graphène.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.4. Graphène sur SiC.....</b>	<b>25</b>
<b>II.4. Intégration du graphène.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4.1. Intégration avec grille substrat.....</b>	<b>26</b>
<b>II.5. Intégration avec grille supérieure .....</b>	<b>28</b>
<b>II.6. Intégration avec double grille.....</b>	<b>31</b>
<b>II.7. sublimation du carbure de silicium.....</b>	<b>33</b>
<b>II.7.1. Graphitisation sur SiC.....</b>	<b>33</b>
<b>II.7.2. Le carbure de silicium.....</b>	<b>34</b>
<b>II.7.3. Description de la méthode.....</b>	<b>35</b>
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>37</b>

## I.1. INTRODUCTION

Le graphène est un matériau prometteur pour la nanoélectronique en raison de sa grande mobilité de porteur à la température ambiante et d'excellentes propriétés mécaniques. Cependant, le rapport  $I_{on}/I_{off}$  dans un transistor à canal en graphène est très faible en raison de l'absence d'une bande interdite. Par conséquent la monocouche de graphène n'est pas directement adaptée aux circuits numériques. Dans ce chapitre on parlera de quelques méthodes employer pour avoir une bande interdite. On verra aussi les différentes méthodes de conception d'un transistor graphène et on s'attardera sur la méthode qui convient le mieux pour notre domaine (micro-électronique) et ceci du point de vue technologique et économique.

## I.2. Mobilité dans le graphène

Comme on le sait, le graphène est un semi-conducteur à bande interdite nulle. Donc un transistor à canal en graphène pose des problèmes, il suffira juste d'une petite tension pour avoir un déplacement de charge entre le drain et la source, c'est pour quoi il est nécessaire d'ouvrir une bande interdite dans le graphène, en théorie, les porteurs dans le graphène ont une mobilité électronique exceptionnelle, c'est pourquoi le graphène semble être un candidat intéressant pour les futurs transistors. D'après ce tableau récapitulatif le graphène a une bien meilleure mobilité que le silicium et le germanium, les matériaux les plus utilisés en microélectronique.

Matériau	Mobilité en $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1}$ à $T=300\text{K}$
Silicium	1450
Germanium	3800
Graphène exfolié	15 000
InSb	77 000
GaAIAs/GaAs hétérojonction	100 000
Graphène suspendu	200 000

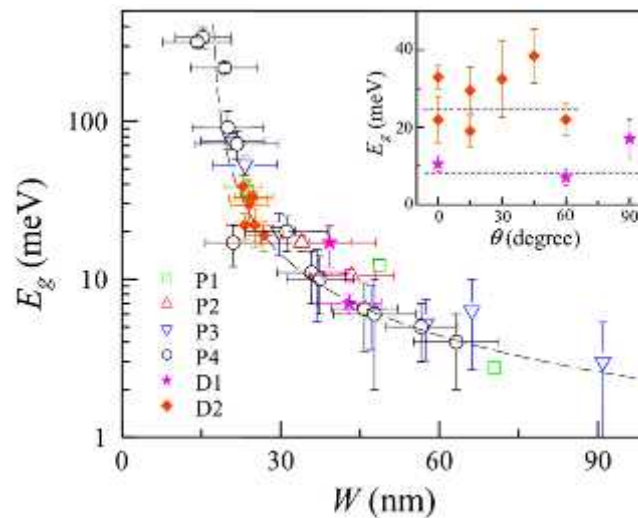
Il est difficile de concevoir un transistor à canal en graphène sans y créer une bande interdite. La bande interdite du semi-conducteur permet de séparer l'état bloqué de l'état passant d'un transistor. Pour cela il existe différentes techniques pour obtenir une bande interdite dans le graphène qui sont :

## II.3. Obtention d'une bande interdite

### II.3.1. Nano rubans de graphène

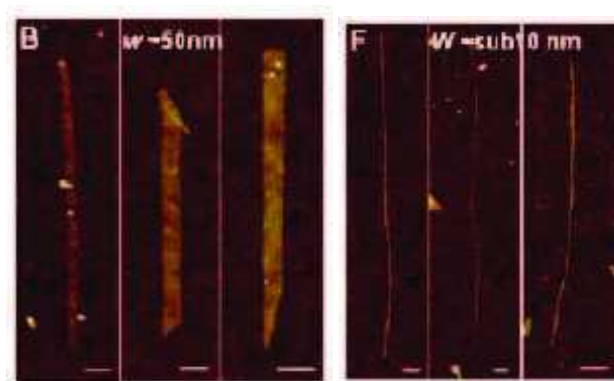
La bande interdite des nanotubes dépend de son diamètre (plus le diamètre est grand plus la bande est petite et plus le diamètre est petit plus la bande est grande) et comme les nanotubes la bande interdite d'un ruban de graphène est fonction de la largeur il se crée une quantification d'énergie dans le ruban de graphène, cette quantification n'est obtenue qu'à de très faible largeur, la difficulté réside dans la largeur, il faut descendre jusqu'à de très faibles largeurs de rubans pour ouvrir une bande interdite conséquente.

La lithographie électronique actuelle permet d'atteindre des largeurs de rubans de 10nm ce qui serait suffisant pour ouvrir une bande interdite raisonnable.



**Figure II.1 :** Valeur de la bande interdite mesurée sur des dispositifs à effet de champ sur graphène exfolié tracée en fonction de la largeur  $W$  du ruban de graphène. Des valeurs de bande interdite de 300 meV sont atteintes pour des rubans de 15 nm. D'après [Han07].

On peut avoir des largeurs de graphène inférieure à 10 nm en utilisant la sonification de graphène dans un polymère. Ces rubans montrent de bonnes propriétés semi conductrice et une bande interdite vraiment intéressante puisque des rapports  $I_{on}/I_{off}$  de  $10^7$  sont mesurés.



**Figure II.2 :** Image AFM de rubans de graphène.

### II.3.2. Bicouches de graphène

Il est aussi possible d'obtenir une bande interdite dans le graphène est cela on se servant d'un graphène bicouche empilement Bernal dopé par dopage électrostatique [25, 10, 27, 17].

En appliquant un champ électrique perpendiculairement au film de graphène, les atomes A1 et B2 présenté sur le schéma ci-dessous ne sont plus équivalents, la symétrie du biplan est brisée. Une différence de potentiel est alors observée entre les deux feuillets, une bande interdite est créée. Pour réaliser ce dopage électrostatique de la bicouche, il suffit de fabriquer des transistors avec grille avant et grille arrière, la grille arrière créant la bande interdite dans la bicouche de graphène. L'équipe d'IBM a mesuré une bande interdite autour de 130 meV dans leurs transistors à bicouche de graphène. Cette valeur est un peu juste pour des applications logiques.

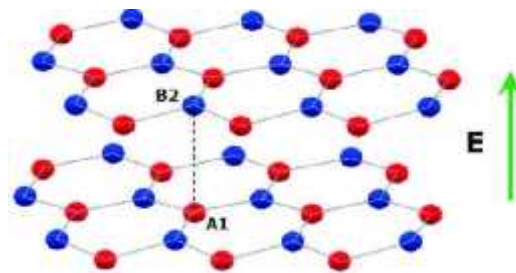


Figure II.3 : Empilement de deux couches de graphène.

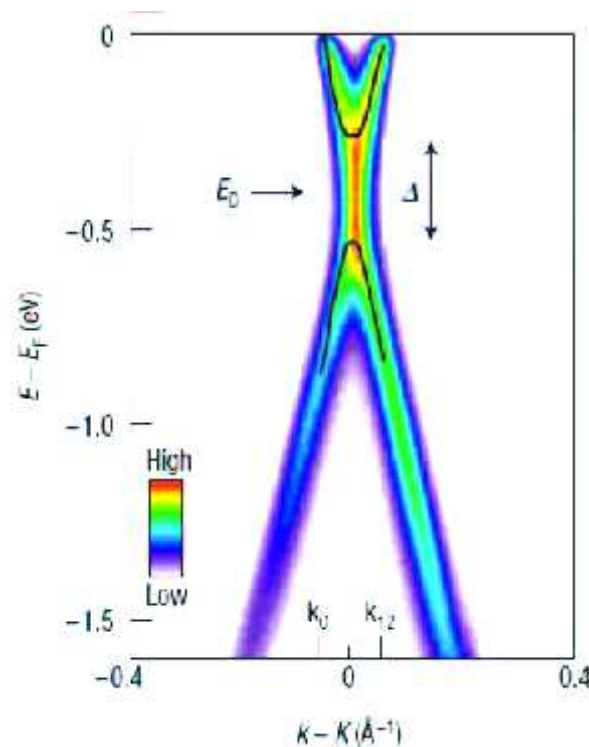
Cette technique est vraiment simple à mettre en place pour du graphène sur  $\text{SiO}_2$  comme le graphène exfolié ou le graphène CVD. Par contre pour le graphène obtenu sur  $\text{SiC}$ , la polarisation devrait être encore plus élevée dû au fait que le substrat entier est isolant.

### II.3.3. Dopage de graphène

L'ouverture d'une bande interdite est possible en greffant aux atomes de carbones des atomes d'hydrogène, d'oxygène ou de fluor [8]. Exemple une hydrogénation totale du graphène montre un comportement de type semi-conducteur grand gap [31]. Une demi-hydrogénation de graphène ouvre une bande interdite de 0.43 eV [9].

### II.3.4. Graphène sur SiC

Des études montrent que le graphène sur SiC présente naturellement une bande interdite due au substrat SiC. En effet, la rupture de symétrie entre le graphène et le substrat SiC crée une bande interdite observée en ARPES. Cette bande interdite varie en fonction du nombre de couches de graphène créées. Une bande interdite de 0,26 eV est mesurée pour une monocouche, cette bande interdite s'annule lorsque le nombre de couche dépasse quatre [29]. Ce résultat reste tout de même largement débattu [26, 30].



**Figure II.4 :** Cliché ARPES pris près du point de Dirac K. Les traits noirs indiquent une relation de dispersion parabolique au point K et une bande interdite ouverte. Image issue de [29].

## II.4. Intégration du graphène

### II.4.1. Intégration avec grille substrat

#### II.4.1.1. Graphène exfolié

Avec le graphène exfolié, il est possible d'extraire la mobilité électronique du film par deux moyens sans trop impacter le résultat. La mobilité peut être extraite par des mesures de Hall ou par mesure d'effet de champ en utilisant le substrat silicium comme grille arrière. Dans les deux cas, le graphène n'est pas recouvert et donc les performances ne sont affectées.

Le graphène exfolié sur une plaque de silicium oxydée permet d'avoir une structure type MOS et donc de doper par effet de champ le film de graphène. Les équipes de Manchester et de Columbia ont montré un effet de champ ambipolaire.

Ainsi, il est possible de moduler la densité de porteurs dans le graphène avec une tension de grille mais aussi de changer le type de porteurs selon le signe de la tension  $V_G$ . Dès 2004, les mesures de transport de Novoselov et Zhang montrent que l'on peut doper l'échantillon de graphène en électrons et en trous jusqu'à des densités de  $10^{13}$  cm et que la mobilité électronique du graphène exfolié peut atteindre  $15000 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$  [24, 28].

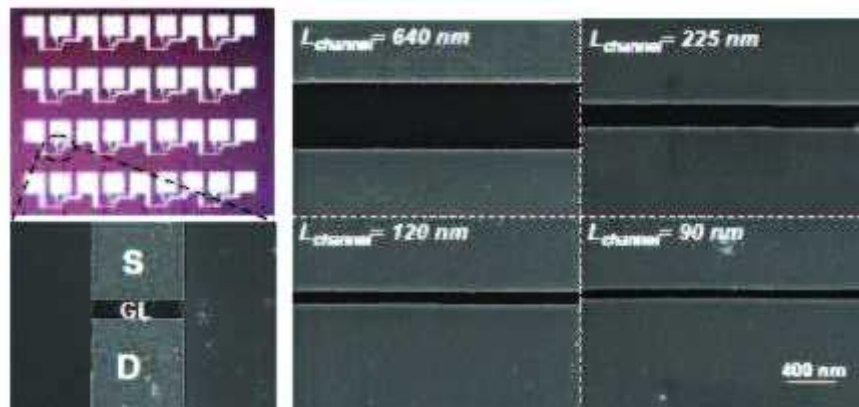
#### II.4.1.2. Graphène CVD

Comme pour le graphène exfolié, il est possible d'extraire la mobilité des porteurs dans le film de graphène avec une barre de Hall ou en utilisant la face arrière en silicium comme grille de transistor. Le graphène appelé graphène CVD est obtenu sur film métallique, de se fait aucune mesure n'est possible directement Il est nécessaire de reporter le graphène obtenu sur isolant. On se retrouve donc avec un morceau de graphène sur  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  comme c'est le cas pour le graphène exfolié. Le substrat silicium peut être utilisé comme grille de transistor.



**Figure II.5 :** Schéma d'une structure « pseudo MOS ». Le substrat silicium dopé sert de grille de transistor.

L'intégration du transistor dans les deux cas graphène exfolié/CVD est la même, des contacts métalliques sont dessinés par lithographie puis un empilement Titane/Or est déposé. La longueur de la grille est donc définie par l'espace laissée entre les deux contacts. La lithographie électronique permet de créer une grille aux dimensions agressives [14].



**Figure II.5 :** Transistor de type pseudo MOS avec canal en graphène CVD. Le graphène est obtenu ici sur feuille de cuivre puis transféré sur oxyde à l'aide de PMMA. Des longueurs de grille de 90 nm sont obtenues en utilisant la lithographie électronique. Photographies issues de [14].

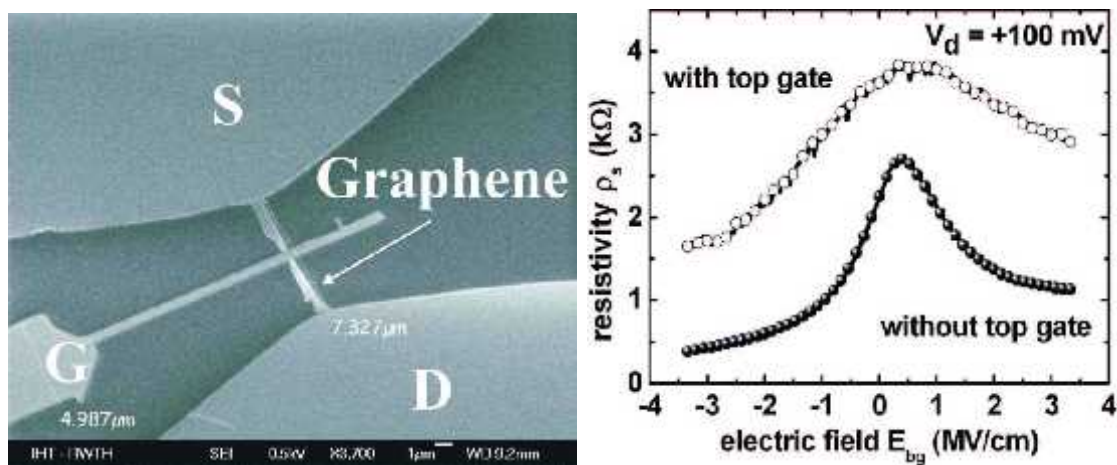
Dans cette étude, des mobilités électroniques de  $700 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , à température ambiante, ont été extraites pour les longueurs de grille les plus grandes ( $2 \mu\text{m}$ ). Pour les longueurs plus agressives (90 et 120 nm) la mobilité n'est plus que de  $100 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . La mobilité est ici bien inférieure aux valeurs de mobilité obtenues sur graphène exfolié, ce qui indique que le graphène n'a pas la même qualité. Cette différence de qualité peut venir de plusieurs facteurs : soit la méthode de croissance elle-même fabrique du graphène de qualité médiocre avec notamment des défauts, soit la qualité est détériorée lors du transfert qui nécessite gravure et nettoyage [14].

## II.5. L'intégration avec grille supérieure

La première fabrication de transistor en graphène avec une grille supérieure a été démontrée en 2007 par l'équipe d'AMO [18]. Habituellement, la grille avant est faite en utilisant le procédé *lift-off*. Une ouverture aux dimensions de la grille est d'abord dessinée dans la résine par lithographie électronique puis le diélectrique et le métal de grille sont déposés. Ensuite la résine est éliminée dans l'acétone laissant uniquement la grille. Les performances de ce type de transistor sont moins bonnes que celles obtenues avec grille arrière. Les mobilités sont autour de  $500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  [21, 18]. Ainsi, le fait de recouvrir le film de graphène semble impacter les performances des dispositifs.

Des travaux récents montrent que des améliorations peuvent être faites à ce sujet notamment en intercalant une couche de polymère entre le graphène et le diélectrique ou en se servant d'une couche d'aluminium pour initier le dépôt par ALD [21, 22].

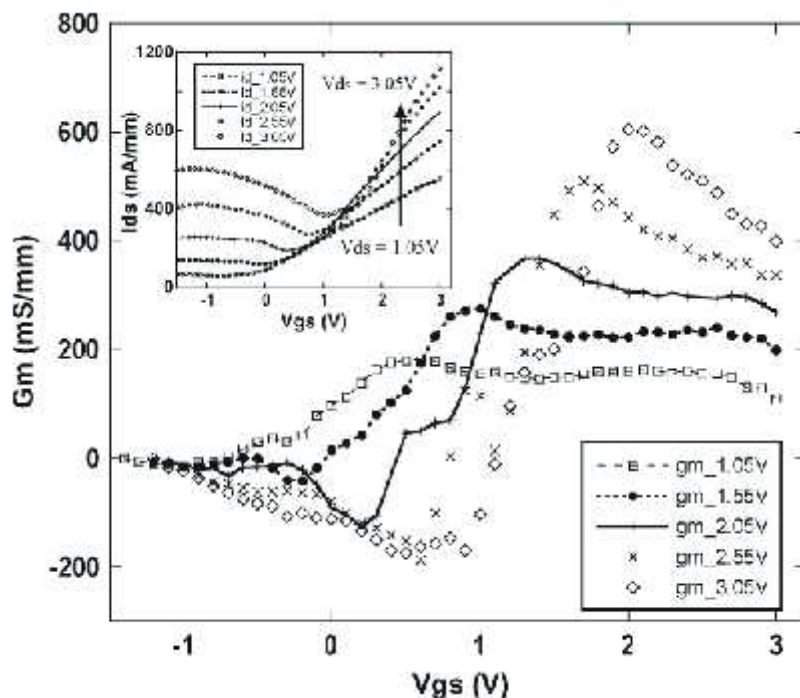
En 2009, Liao et al démontrent une mobilité de  $23\,000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  et Farmer et al obtiennent la même mobilité dans leur dispositif avant et après dépôt de la grille supérieure [20, 13].



**Figure II.6 :** (a) Photographie SEM d'un transistor avec graphène exfolié et grille supérieure. (b) Caractéristique  $I_D(V)$  d'un transistor avec et sans grille supérieure. La grille impacte les performances du dispositif. [18].

En 2004 l'équipe de Walt De Heer à Atlanta effectue les premières mesures de Hall pour un système composé de quelques plans de graphène (de 3 à 5 plans de graphène) obtenus sur la face silicium du substrat SiC [7].

Leurs travaux mettent en évidence un comportement de type « gaz d'électrons bidimensionnel » avec comme caractéristiques principales une mobilité électronique de  $1100 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$  et une densité de porteurs de charges de  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  mesurées avec une barre de Hall. Contrairement au graphène exfolié, l'absence de  $\text{SiO}_2$  en dessous du graphène empêche l'utilisation d'une grille arrière, pour moduler la densité de porteurs du système. Ainsi il est ici obligatoire de construire une grille supérieure. Les dispositifs sont réalisés directement sur le substrat SiC. Celui-ci est un semi-conducteur dit « grand gap » donc le transport dans le film de graphène peut être découplé du transport dans le SiC. Les auteurs démontrent la possibilité de doper le système 2D par effet de champ, ouvrant aussi la voie à de futurs dispositifs basés sur le graphène épitaxie. Dès 2004, les travaux de l'équipe de Georgia Tech montre qu'une modulation du courant par une grille supérieure est possible même sur du graphène multicouches. Cependant, la mobilité électronique observée en mesure de Hall ou effet de champ est bien plus basse que celle mesurée sur le graphène exfolié. Pour ce graphène aussi la modulation est très faible. A ce jour, la meilleure mobilité mesurée par Moon en 2010 est de  $6000 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$  [23].

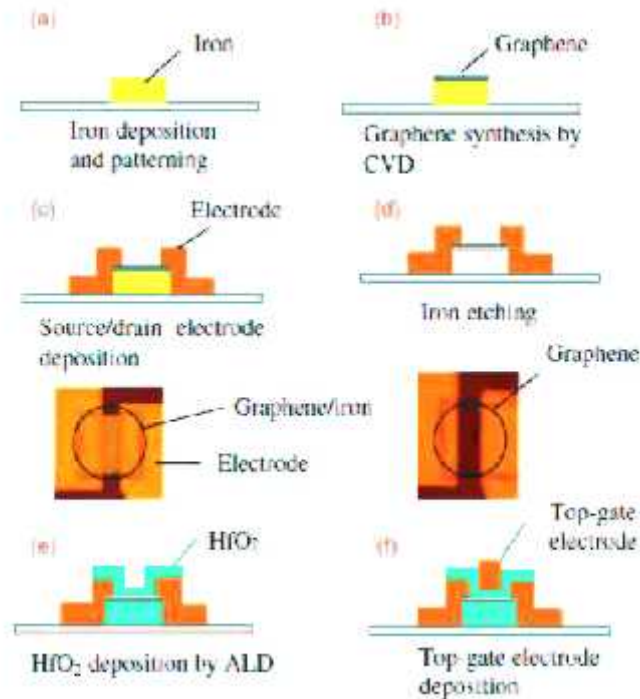


**Figure II.8 :**  $G_m(V_G)$  et  $I_D(V_G)$  mesurés pour différentes valeurs de  $V$ . La transconductance atteint une valeur de 600 mS/mm pour  $V_D=3,05V$ . Le ratio  $I_{on}/I_{off}$  est de 19 pour  $V=0,5V$ .

Courbe issue de [23].

Le graphène CVD avec grille supérieure peut être intégré de la même manière que le graphène exfolié.

La grille est généralement fabriquée via un procédé *lift-off*. De bonnes mobilités électroniques ont été obtenues sur cuivre ( $4\,000\text{ cm}^2/(\text{Vs})$ ) [19] et sur nickel ( $2000\text{ cm}^2/(\text{Vs})$ ) [15]. Une autre intégration intéressante a été publiée en 2010 [16]. Les auteurs utilisent une couche de fer préalablement structurée pour obtenir du graphène. Après le dépôt de graphène et la définition des contacts source/drain, cette couche de fer est gravée chimiquement. Ensuite une grille supérieure est dessinée et déposée. L'utilisation d'un dépôt de l'oxyde de grille par ALD encapsule totalement le film de graphène. Cette intégration a l'avantage de ne pas nécessiter d'étape de transfert ce qui pourrait améliorer les performances des transistors fabriqués. Pourtant ici la mobilité obtenue est basse, autour de  $200\text{ cm}^2/(\text{Vs})$ .

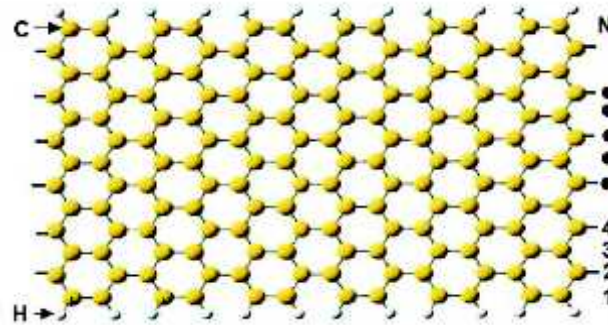


**Figure II.9 :** Schéma d'intégration du transistor. L'oxyde de grille encapsule totalement le Graphène ce qui permet de le protéger. Image issue de [16].

## II.6. L'intégration avec double grilles

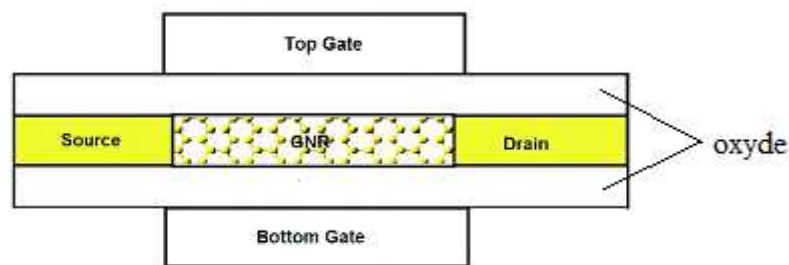
Comme on l'a vu précédemment le graphène issu de l'exfoliation et de la CVD sont les deux à pouvoir avoir une grille substrats et une grille supérieur. La double grille offre un contrôle total du canal.

Pour avoir une bande interdite on va se servir du (GNR) graphène nano ruban. La figure suivante représente un nano ruban de graphène pour lequel les bords sont passivés chimiquement avec de l'hydrogène.



**Figure II.10** : les atomes en jaune représente le carbone et les atomes en blanc représente l'hydrogène.

Les contacts du drain et de la source sont des régions fortement dopées avec une valeur de concentration de dopage de  $5 \cdot 10^{-3}$  dopants par atome de carbone.



**Figure II.10** : schéma de double gate GNR-FET.

Le GNR-FET modèle à structure double grille dans ce modèle l'oxyde est réalisé avec deux matériaux diélectriques ( $\text{SiO}_2$  /  $\text{HfO}_2$ ) le  $\text{HfO}_2$  est d'une épaisseur de  $t_{\text{ox}}=1\text{nm}$  ce high-k offre un excellent contrôle de la grille, cela permet d'éliminer le courant tunnel direct, l'utilisation de ce high-k génère la capacité de la grille celle-ci se retrouve minimisée par la capacité quantique.

De toutes ces différentes techniques d'intégration du graphène on trouve des transistors qui ont une mobilité très grande mobilité d'électron mais vu notre domaine (micro électronique) et aussi le facteur économique la sublimation de carbure de silicium est la méthode la plus adaptée pour nos critères.

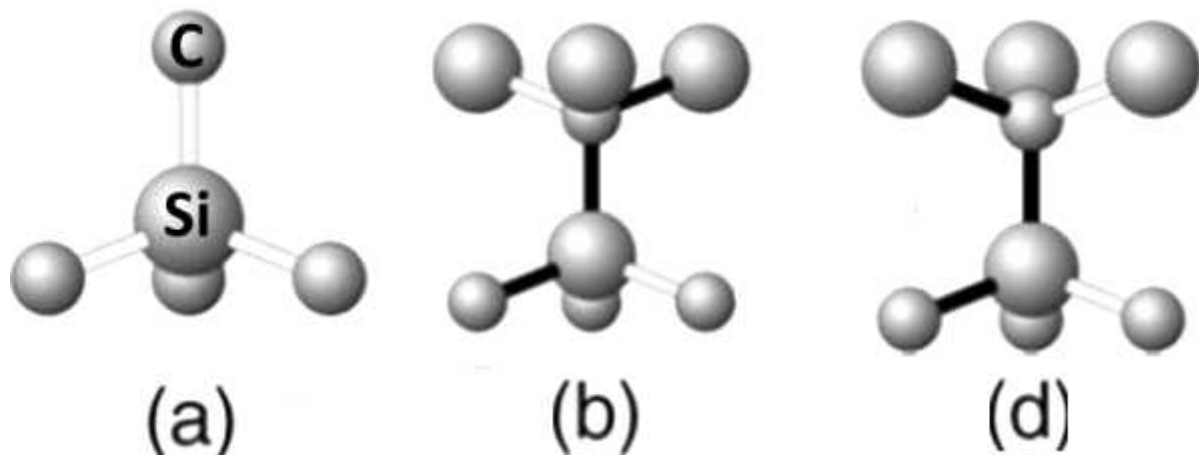
## II.7. Sublimation de carbure de Silicium

### II.7.1. Graphitisation sur SiC

L'intérêt de la graphitisation sur SiC est de pouvoir travailler directement avec les couches de graphène sur leur substrat de croissance semi-isolant de grande surface et compatible avec les procédés technologiques standards sur Si, contrairement à la CVD et à l'exfoliation qui nécessitent un report sur un substrat isolant. Quel que soit l'environnement de croissance (ultravide, sous Argon, Confinement Control Sublimation), le principe de la graphitisation repose sur la sublimation du silicium. L'énergie de sublimation du Si étant plus faible que celle du C, le silicium s'évapore et le carbone resté en surface se réorganise en graphène. Le processus de graphitisation diffère suivant la face utilisée (C ou Si), que ce soit en termes de cinétique ou de structure cristallographique du graphène.

### II.7.2. Le carbure de silicium

Le carbure de silicium de formule chimique SiC est composé d'atomes de silicium et de carbone. Le carbone et le silicium sont de la classe IV du tableau périodique. Il est très peu présent à l'état naturel, seulement dans certaines roches ou quelques météorites. Le SiC disponible aujourd'hui est donc entièrement de synthèse. Les fabricants de SiC (CREE, SiCrystal, Norstel, ...) commercialisent actuellement des substrats de 2 à 4 pouces de diamètre, d'un coût élevé (~3000 \$). L'arrangement atomique du carbure de silicium est similaire à celui du GaAs, formant des orbitales hybrides de type  $sp^3$ , où les atomes premiers voisins sont de nature chimique différente. Dans le SiC, chaque atome de Si (respectivement C) est entouré par quatre atomes de C (Si) formant ainsi un tétraèdre régulier. La distance interatomique C-Si est de 1.89 Å, elle se situe entre celles du silicium (Si-Si) de 2.35 Å et du graphite (C-C) de 1.42 Å.



**Figure II. 11 :** Structure atomique du SiC [2]: (a) tétraèdre avec un atome de Si relié à 4 atomes de C ( $C-Si = 1.89 \text{ \AA}$ ); (b) empilements de 2 tétraèdres en configuration décalée (c) et éclipsee (d).

### II.7.2.1. Historique

Le processus de graphitisation, conduisant à la croissance de graphène sur SiC, n'a pas été découvert en 2004. La première observation d'un film mince de graphite en surface fut publiée par Van Bommel et al en 1975 [10]. En recuisant un substrat de carbure de silicium à partir de  $800^\circ\text{C}$  sous ultraviolet, ils ont observé des « *monocrystalline graphite monolayer films* » à la surface du SiC, autrement dit du graphène. Cette étude a été reprise un peu plus tard par Muehloff et al [19], et en 1998 où il a été démontré que le film de graphène est faiblement couplé avec le SiC [26]. A cette époque, le SiC était utilisé comme matériau de base dans le développement de composants de puissance, permettant un fonctionnement à température élevée, et la graphitisation constituait plutôt un handicap à la réalisation de ces composants [13]. Ce n'est qu'en 2003 que de Heer et al ont pensé à exploiter ce défaut pour faire croître du graphène. De ce fait, les propriétés électroniques du graphène sur SiC n'ont été mises en évidence et publiées qu'à partir de 2004 par le groupe de Walt de Heer [11]. Depuis, le graphène sur SiC a suscité un fort engouement de la part de la communauté scientifique, tant d'un point de vue fondamental que pour des applications en microélectronique.

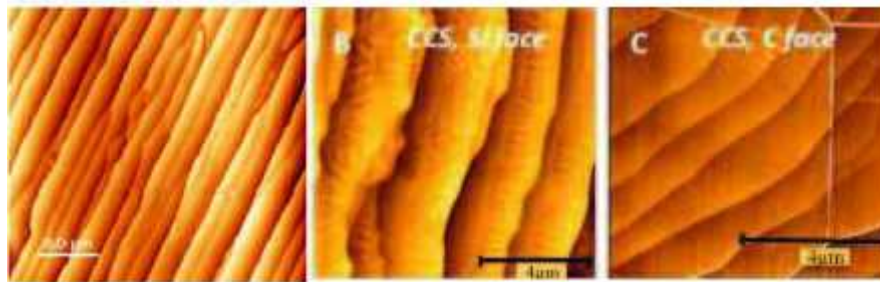
### II.7.3. Description de la méthode

La graphitisation du carbure de silicium consiste à ramener les atomes de carbone sur la surface est cela avec de haute températures.

#### II.7.3.1 La rétraction des marches

La formation du graphène se fait par un phénomène de rétractation de marche. En fait les marches naturellement présentes en surface du SiC se rétractent lorsque celui-ci est chauffé à haute température. Les marches bougent selon des vitesses différentes [Hupalo09]. Ceci a pour effet de changer totalement la morphologie de surface du SiC. La surface initialement plane devient rugueuse et très perturbée. Ainsi, après la graphitisation, les marches du SiC peuvent être trois à quatre fois plus larges et hautes. Ce phénomène est appelé « step bunching » dans la littérature.

Un recuit sous environnement argon permettrait d'obtenir des surfaces plus planes grâce à une sublimation du silicium plus lente [15]. En effet, à cause des atomes d'argon en saturation dans la chambre, les atomes de silicium s'évaporent difficilement. Ainsi, la rétractation des marches est plus lente ce qui a pour effet d'obtenir une surface beaucoup moins perturbée. L'équipe de Georgia Tech utilise une autre technique. Leur suscepteur est dessiné de façon à laisser échapper les atomes de silicium lentement (cette méthode est appelée CCS : *Confinement Controlled Sublimation*) [12]. Ceci permet de maintenir une haute pression d'atomes de silicium et a le même effet que l'argon, la réaction est plus lente et donc la surface moins perturbée.



**Figure II.12 :** A) Image AFM de la surface du graphène obtenu par sublimation de SiC face silicium sous argon. Des macro-terrasses de 3  $\mu\text{m}$  de largeur sont obtenues (image issue de [Emtsev09]) B et C) Images AFM de la surface du graphène obtenu par sublimation de SiC sur face silicium (B) et face carbone (C) en utilisant la méthode CCS développée par l'équipe de Georgia Tech (images issues de [DeHeer11]). La face silicium (B) et la face carbone (C) présentent des macro-terrasses identiques à celles visibles en A.

Un schéma simplifié du mécanisme de rétractation des marches selon les environnements est présenté ci-dessous



**Figure II.13 :** Schémas représentant un substrat de SiC (face Si) après gravure à l'hydrogène (a) et après graphitisation sous UHV (b) ou sous argon (c). Dans le dernier cas, la surface est non déstructurée, et le film de graphène est continu. [9].

Après l'étape de recuit sous argon on obtient des surface plus plane ce qui induit a un graphène de très bonne qualité.

## II.8. Conclusion

La sublimation de SiC est une des méthodes qui permettent d'obtenir de grandes surfaces de graphène (surface limitée par la taille des substrats de SiC). De plus, le graphène obtenu est de très bonne qualité et ne nécessite pas de transfert puisque le SiC est isolant. Cette méthode est très favorable pour le développement de la micro & nano électronique car elle offre des surfaces très grandes de graphène ce qui offre une intégration très large (nombre de transistors sur une surface et aussi du point de vue économique un coût raisonnable). Dans le prochain chapitre on parlera de la mobilité dans le graphène ainsi que les équations qui régissent le transistor à canal en graphène

*Chapitre III modélisation et  
simulation des résultats*

**Introduction :**

Plusieurs raisons ont fait que l'industrie se tourne vers de nouveaux matériaux parmi lesquelles la rapidité d'exécution. Et pour avoir cette rapidité dans un transistor deux paramètres sont indispensables :

- La longueur du canal
- La fréquence de fonctionnement pour laquelle il a été démontré que le graphène peut aller à une fréquence plus grande que 100 GHz [31].

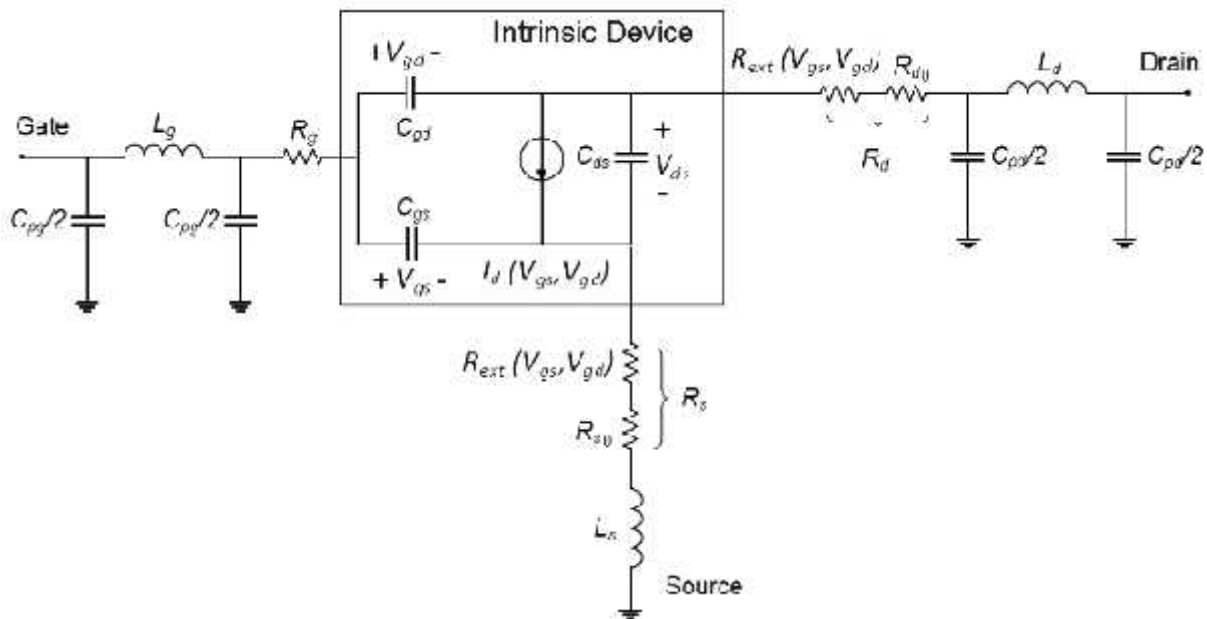
Dans les deux cas le graphène semble être le candidat idéal pour remplacer le silicium.

Pour mieux constater les caractéristiques de transport dans le « transistor à canal en graphène » on évoquera dans ce chapitre les différentes lois qui décrivent au mieux les caractéristiques électriques de ce transistor, les résultats obtenus seront présentés et analysés. On parlera des courbes résultantes de ces équations.

### Modèle électrique du transistor à graphène

Le modèle électrique du transistor à canal en graphène adopté est schématisé sur la figure suivante. Lors de sa conception, on remarque différentes résistances, inductances et capacités

Lors de la conception du transistor on remarque comme dans le schéma suivant différentes résistances, inductances et capacités que sa soit parasite ou voulu.



**Figure III.1 :** modèle G-FET.  $C_{pg}$ ,  $C_{pd}$ ,  $L_g$ ,  $L_d$ , et  $L_s$  sont des capacités et des inductances parasites.  $R_g$  résistances de la grille et  $R_s$  et  $R_d$  c'est les résistances source et drain avec les résistances de contacte inclus [32].

Les caractéristiques du GFET sont remarquables d'une part un fonctionnement à des fréquences bien plus supérieur que celles du transistor silicium et d'autre part la caractéristique surprenante qu'on remarque c'est la possibilité d'avoir une commutation entre électron et trou pour un seul transistor. Les équations suivantes décrivent ce phénomène qui se déroule dans ce transistor.

Le courant dans le canal peut être exprimé par l'équation suivante :

$$I_{ds} = q \frac{W}{L} \int_0^L n(x) v_{drift}(x) dx \quad (1)$$

$n(x)$ ,  $v_{drift}(x)$ ,  $W$  et  $L$  Sont respectivement la densité de porteurs, vitesse des porteurs, la largeur canal est sa longueur.

La densité de porteur  $n(x)$ , doit être égale au nombre de porteur thermique produit,  $n_{th}$  ( $8 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  à  $T=300 \text{ K}$ ) à une tension de grille nulle cependant, les données expérimentales prouvent que la concentration en porteurs pour une tension de grille nulle est plus grande que  $n_{th}$  [19] et c'est dû aux impuretés localisés entre le graphène/diélectrique ou bien aux charge qui se trouvent à l'intérieure du diélectrique qui génère des porteurs supplémentaires (électron ou trou) [35] et cet effet est modélisé par [34] .

$$n(x) = \sqrt{n_0^2 + (C \times V(x)/q)^2} \quad (2)$$

$n_0$  : densité résiduelle de porteurs due au désordre et à l'excitation thermique (c'est la concentration minimum de charge dans la couche de graphène) et  $C = (C_{gs} + C_{gd})/LW$  c'est la capacité de la grille par secteur.

La capacité totale de grille est représentée par la capacité de l'oxyde  $C_{ox}$  qui se trouve en série avec la capacité quantique du graphène. Dans ce modèle si  $C_q \gg C_{ox}$  alors l'effet de  $C_q$  est ignoré (c'est valide juste pour des grilles très fine) [37].

L'expression de la densité des porteurs se retrouve réduite à :

$$n(x) = C \times V(x)/q \quad (3)$$

Pour de la tension élevée et  $n = n_0$  pour une tension de grille nulle la vitesse des porteurs est approximer par la relation suivante :

$$v_{drift}(x) = \frac{\mu E(x)}{m \sqrt{1 + (\frac{\mu |E(x)|}{v_{sat}})^m}} \quad (4)$$

$V_{sat}$  : vitesse de saturation des porteurs

$\mu$  : la mobilité des porteurs

$m$  : paramètre d'ajustement

La vitesse de saturation  $V_{sat}$  dépend dans ce modèle de la concentration des porteurs

$$V_{sat}(n) = V_f \beta / \sqrt{n} \quad (5)$$

Avec :

$$V_f = 10^8 \text{ cm/s}$$

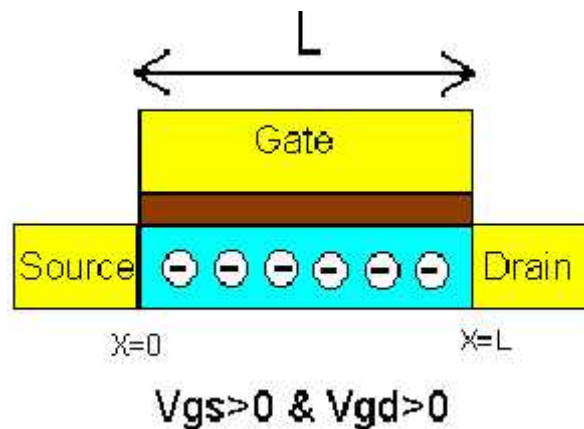
$= 4 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$  cette expression est valide pour  $n > 1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , la valeur minimal de  $n$  est  $n_0 = 2.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  [19], avec cette valeur  $V_{sat} < V_f$ , bien que la valeur de  $n$  est généralement bien plus supérieur a  $n_0$  on aura aussi besoin de la mobilité des électrons et des trous ( $\mu_e$  et  $\mu_h$ )

Le type de porteurs majoritaires dans le canal G-FET peut être déterminé selon  $V_{gs}$  et  $V_{gd}$

**Quatre configurations sont possibles** [32]

**La première :**  $V_{gs} > 0, V_{gd} > 0$

Dans la première configuration les tensions  $V_{gs}$  et  $V_{gd}$  sont tous les deux positifs ce qui favorise la circulation des électrons dans le canal



$$I_{ds} = q \frac{W}{L} \int_0^L n(x) \frac{\mu E(x)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu |E(x)|}{v_{sat}(n(x))}\right)^2}} dx \quad (6)$$

Sachant que  $dV = E(x)dx$

$$I_{ds} = q \frac{W}{L} \int_{V_{gd}}^{V_{gs}} \frac{\mu n(V)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu |E(V)|}{v_{sat}(V)}\right)^m}} dV \quad (7)$$

pour simplifier, la valeur de saturation moyenne est employée

$$\bar{v}_{sat} = v_f / \sqrt{n_0^2 + (C(V_{gs} + V_{gd})/2q)^2} \text{ et } E(v) \text{ est approximée par } |V_{gs} - V_{gd}|/L$$

On obtient alors :

$$I_{ds1} = \frac{\mu_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_e |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}}\right)^m}} \frac{W}{L} (V_{gs} \sqrt{Q_0^2 + (CV_{gs})^2} - V_{gd} \sqrt{Q_0^2 + (CV_{gd})^2} + q^2 / C \ln \frac{\sqrt{Q_0^2 + (CV_{gs})^2} + CV_{gs}}{\sqrt{Q_0^2 + (CV_{gd})^2} + CV_{gd}}) \quad (8)$$

$Q_0$  ( $q \times n_0$ ) Représente la densité des charges résiduelles.

Cette équation a la forme

$$f(x, y) = x\sqrt{1 + x^2} - y\sqrt{1 + y^2} + \ln \frac{\sqrt{1+x^2} + x}{\sqrt{1+y^2} + y} \quad (9)$$

Et pour simplifier les notations on utilise les notations suivantes

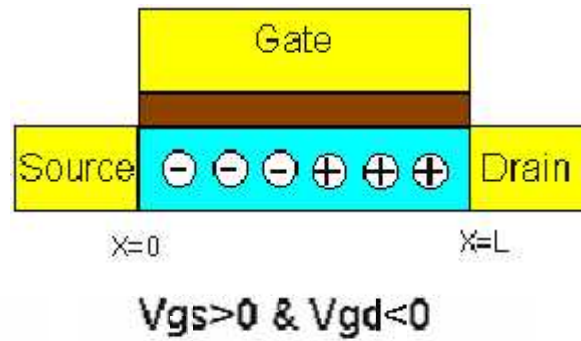
$$\bar{V}_{gs} = V_{gs}/V_0 \text{ Et } \bar{V}_{gd} = V_{gd}/V_0 \text{ et } V_0 = Q_0/C$$

On obtient alors

$$I_{ds1} = \frac{\mu_e V_0 Q_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_e |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}}\right)^m}} \frac{W}{L} f(\bar{V}_{gs}, \bar{V}_{gd}) \quad (10)$$

**La deuxième :**  $V_{gs} > 0, V_{gd} < 0$

Dans cette configuration, il existe un point ( $x=L_1$ ) où le potentiel est le même, en ce point les porteurs majoritaires changes. On passe alors des électrons vers les trous.

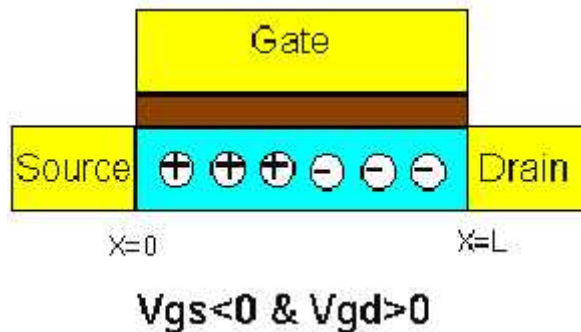


$$I_{ds} = \frac{W}{L} \left( \int_0^{L_1} e \times n(x) v_{drift,e} dx + \int_{L_1}^L e \times n(x) v_{drift,h} dx \right) \quad (11)$$

Après intégration on obtient :

$$I_{ds2} = \frac{\mu_e V_0 Q_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{\mu_e |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}} \right)^2}} \frac{W}{L} f(\bar{V}_{gs}, 0) + \frac{\mu_h V_0 Q_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{\mu_h |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}} \right)^2}} \frac{W}{L} f(0, \bar{V}_{gd}) \quad (12)$$

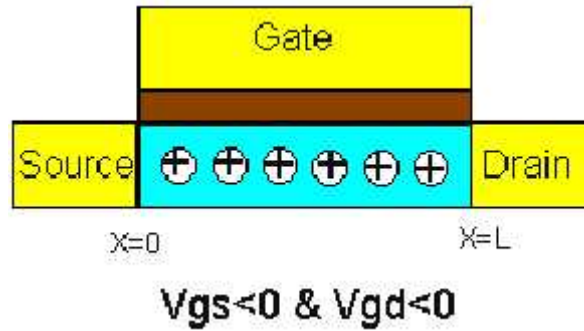
**La troisième :  $V_{gs} < 0, V_{gd} > 0$**



On obtient :

$$I_{ds3} = \frac{\mu_h V_0 Q_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{\mu_h |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}} \right)^2}} \frac{W}{L} f(\bar{V}_{gs}, 0) + \frac{\mu_e V_0 Q_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{\mu_e |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}} \right)^2}} \frac{W}{L} f(0, \bar{V}_{gd}) \quad (13)$$

**La dernière :  $V_{gs} < 0, V_{gd} < 0$**

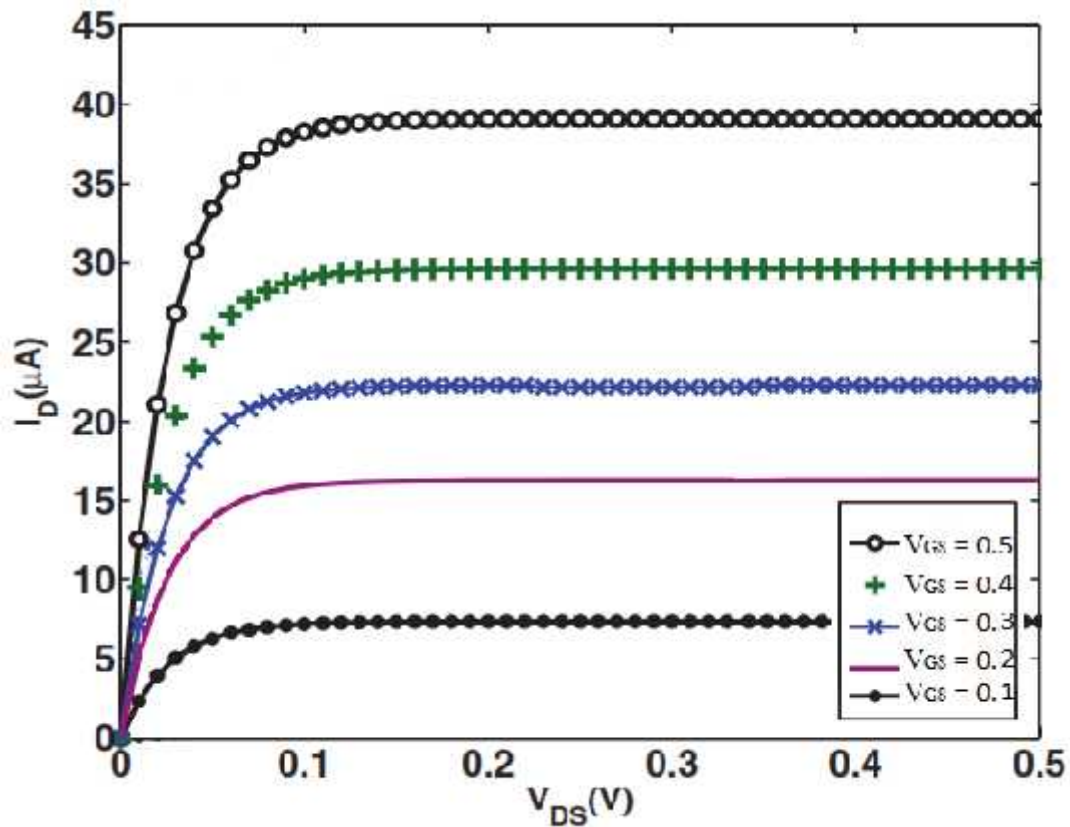


On a:

$$I_{ds4} = \frac{\mu_n V_D Q_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{\mu_n |V_{gs} - V_{gd}|}{L \bar{v}_{sat}} \right)^m}} \frac{W}{L} f(\bar{V}_{gs}, \bar{V}_{gd}) \quad (14)$$

Les équations qu'on a antérieurement évoquées nous ont permis de tracer les caractéristiques électriques d'un transistor au graphène double grille avec une longueur de canal 50 nm, le drain et la source sont dopés pour recevoir le canal en graphène.

La variation de  $V_{GS}$  &  $V_{GD}$  produit une variation des porteur dans le transistor est cette variation est mise en évidence dans le graphe suivant :



**Figure III.2 :** Représentation du courant  $I_D$  en fonction de  $V_{DS}$  pour une longueur de canal de 50 nm et des valeurs de  $V_{GS}$  variées

La figure III.2 montre l'évolution du courant  $I_D$  en fonction de  $V_{DS}$ . On peut voir que les courbes obtenues sont différentes suivant la valeur de  $V_{GS}$ . Pour toutes les valeurs de  $V_{GS}$  considérées et à partir d'une certaine valeur, on remarque une stabilisation de la courbe (droite) ce qui indique la saturation du transistor.

Pour démontrer les caractéristiques du transistor à 50 nm on prend une tension de  $V_{GS}=0,5V$  on suit l'évolution de la transconductance ainsi que la fréquence de travail du transistor.

Le comportement du GFET est similaire à celui du transistor classique comme on le voit sur la figure III.2 suivante. On obtient une courbe  $I_D(V_{DS})$  avec deux parties, une linéaire puis vient une autre dite de saturation.

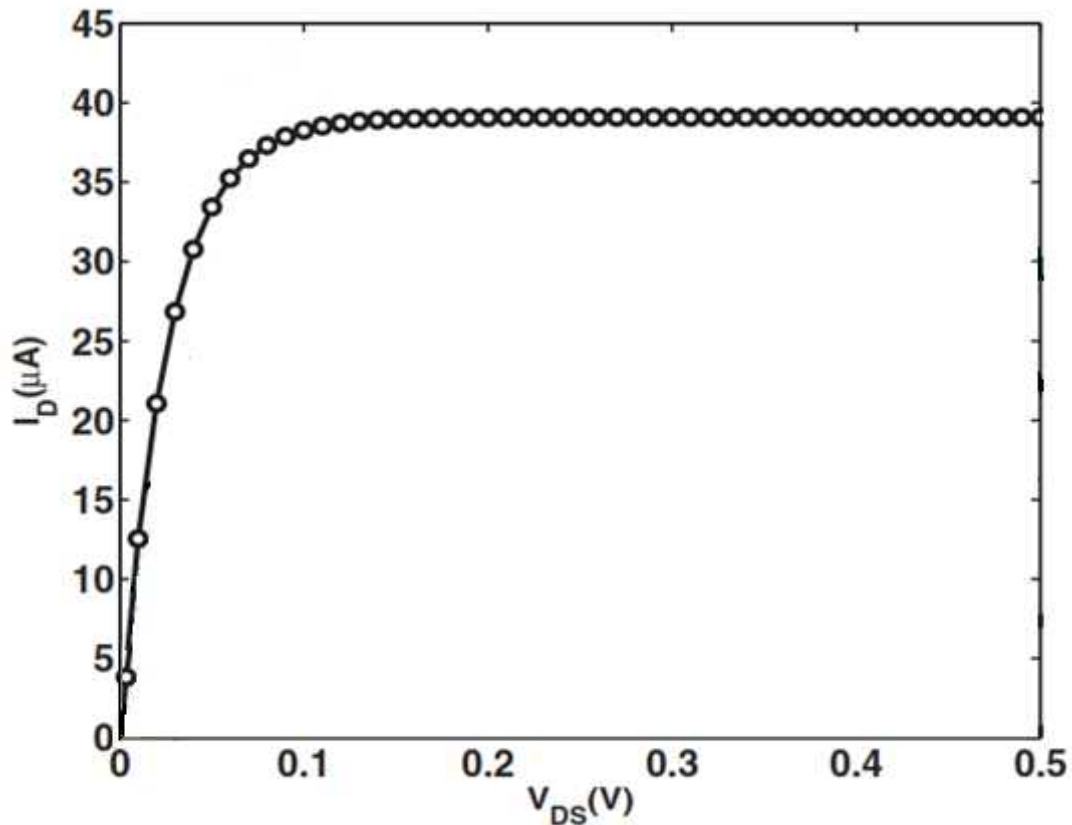


Figure III.2 : Id(Vds) pour une tension  $V_{GS}=0.5V$

Sur la courbe on remarque un fonctionnement idéal du transistor avec deux zones, la première linéaire puis la saturation.

La transconductance aussi appelée pente, pour un transistor bipolaire, un transistor à effet de champ, un tube à vide ou un amplificateur opérationnel, est le rapport entre la variation du courant de sortie et la variation de la tension d'entrée. Elle s'exprime en ampères/volt.

La valeur de la transconductance pour le GFET est approximée par les deux équations suivantes [32] :

$$g_{m1,4} = \frac{2 \mu_{e,h}}{m \sqrt{1 + \left( \frac{\mu_{e,h} |V_{ds}|}{L v_{sat}} \right)^m}} \frac{W}{L} C \left( \sqrt{V_0^2 + V_{gs}^2} - \sqrt{V_0^2 + (V_{gs} - V_{ds})^2} \right) \quad (15)$$

$$g_{m2,3} = \frac{2 \mu_{e,h}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_{e,h}|V_{ds}|}{L\bar{v}_{sat}}\right)^m}} \frac{W}{L} C \left( \sqrt{V_0^2 + V_{gs}^2} - \frac{2 \mu_{h,e}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_{e,h}|V_{ds}|}{L\bar{v}_{sat}}\right)^m}} \frac{W}{L} C \left( \sqrt{V_0^2 + (V_{gs} - V_{ds})^2} \right) \right) \quad (16)$$

A partir de ces deux équations on obtient la courbe suivante :

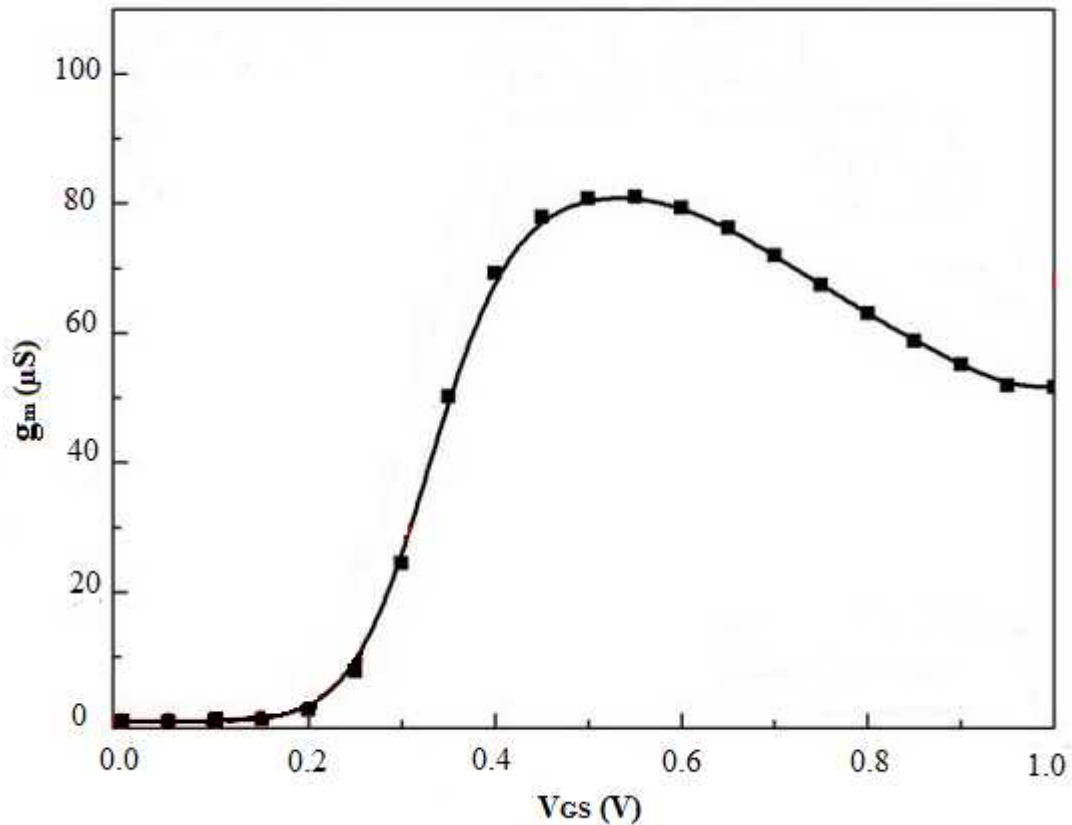


Figure III.5 : représentation de la transconductance en fonction de  $V_{GS}$ .

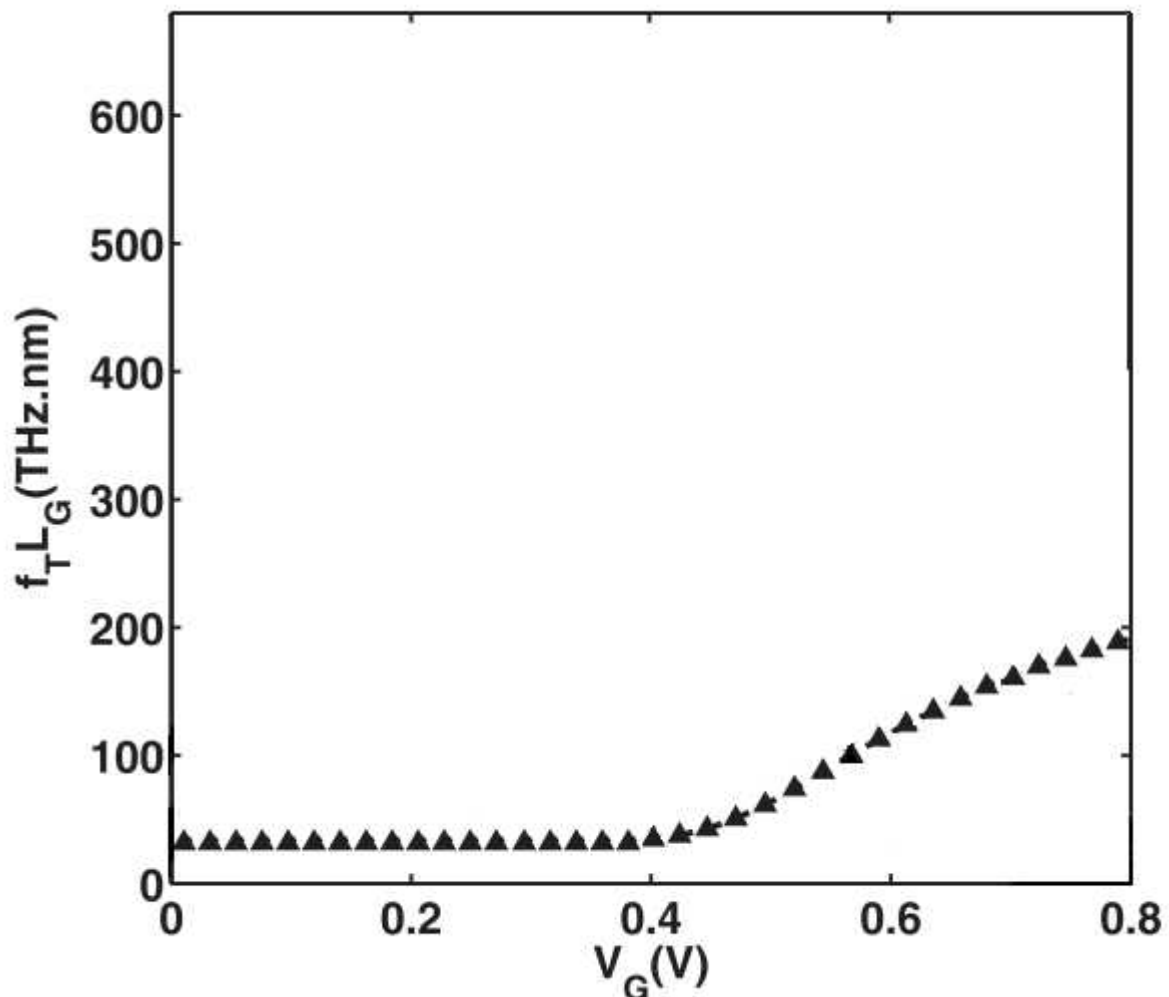
On voit bien que cette relation n'est pas linéaire, mais plutôt exponentielle. Ceci montre que le courant circulant dans le transistor ne sera pas directement proportionnel à la tension. Le fonctionnement du transistor est optimale pour des valeurs de  $V_{GS}$  comprise entre (0.4 et 0.6) V.

On arrive avec le GFET a des tensions de fonctionnement très basse, ce qui réduit considérablement sa consommation en énergie, en plus de la réduction d'énergie un autre paramètre est très important c'es la fréquence de coupure, dans le G-FET la fréquence est donnée par l'équation suivante :

$$f_T L_G = \frac{g_m}{2\pi C_g} \quad (17)$$

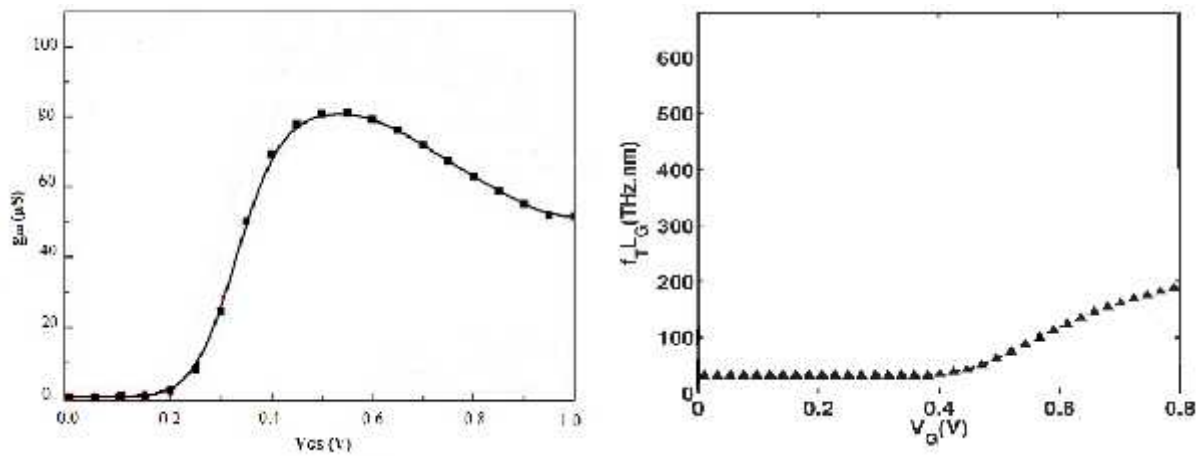
Pour démontrer un fonctionnement optimal dans le G-FET on doit aussi avoir la fréquence en fonction de  $V_G$ .

On peut aussi avoir la fréquence en fonction de la tension  $V_G$  comme on la voit sur la figure suivante :



**Figure.III.6** : représentation de la fréquence en fonction de  $V_G$ .

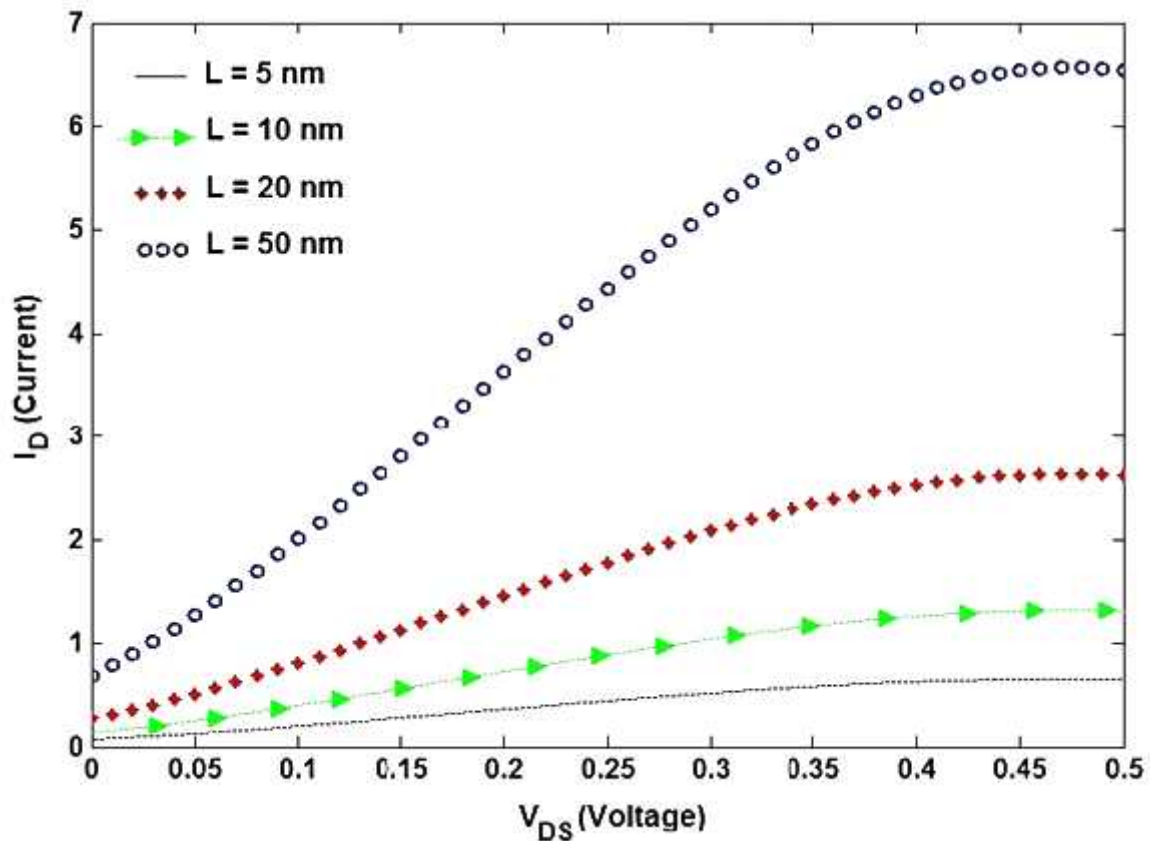
Cette courbe confirme bien que le fonctionnement du transistor on optimale a une tension  $V_G$  de 0.5 V



On constate des deux courbes que le fonctionnement du transistor est optimale a une tension  $V_{GS} = 0.5V$  et qu'a partir de cette tension malgré l'augmentation de la fréquence le gain diminue.

Le but de l'utilisation du graphène c'est de diminuer la longueur du canal tout en minimisant les problèmes rencontrés dans le silicium, avec le graphène on arrive à franchir sous la barre des 10 nm comme on le voit dans la figure suivante:

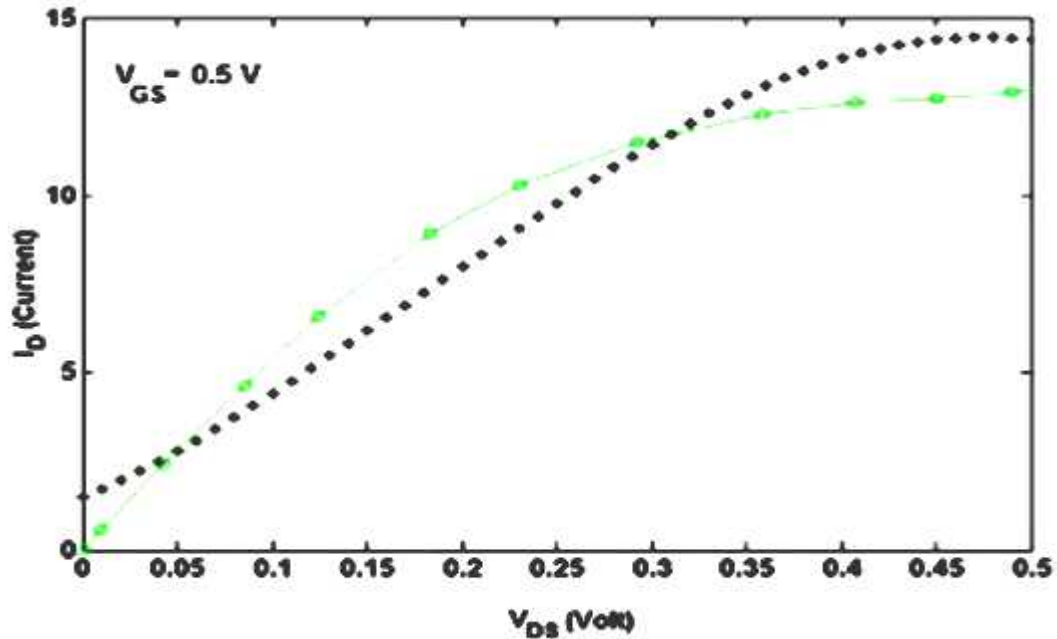
Les figures qui suivent sont des essais pratiques ainsi que des approximations tirées de ces essais le courant dans ces figures est en  $I_D$  ( $\mu A$ ) [41].



**Figure III.3** : variation du courant  $I_D$  en fonction de la longueur du canal [41].

Dans la figure suivante on remarque plusieurs courbes qui représente le courant  $I_D$  en fonction de  $V_{DS}$  la variation de ces courbes est du à la variation de la longueur du canal c.-à-d. Plus la longueur du canal est grande plus le courant qui passe est important.

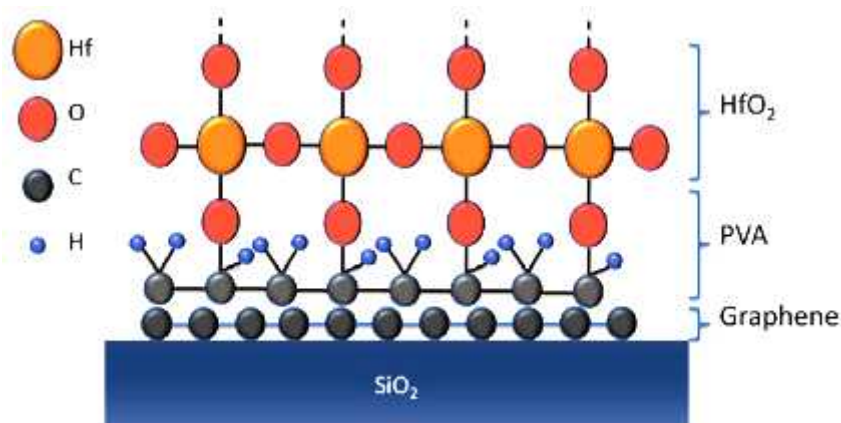
Toute fois même si les caractéristiques semblent bonne pour ce transistor le fait qu'on ne peut abandonner toute la technologie MOSFET et se lancer dans le graphène sans savoir si on peut le substituer au MOSFET de se fait des essais pour savoir si le graphène peut remplacer le silicium on été réaliser et on a obtenu la courbe suivante :



**Figure III.3** : comparaison entre la courbe du MOSFET et du GFET [41].

La figure suivante représente le courant  $I_D$  en fonction de  $V_{DS}$  pour deux transistors double grille l'un graphène et l'autre MOSFET, pour les deux transistors on remarque une croissance puis une stabilisation après  $V_{th}$ , de cette figure on peut dire que le G-FET peut se substituer au MOSFET.

Le fait de réduire les dimensions du transistor implique la réduction de son oxyde cela infecte sur le bon fonctionnement du transistor pour des démontions aussi réduite aux lieux d'utiliser l'oxyde de base ( $SiO_2$ ) en va intégrer un matériau high-k ( $HfO_2$ ) le choix de ce high-k est baser sur deux cratère son adhésion sur le carbone et aussi sa grande permittivité.



**Figure III.4** : représentation des deux oxydes  $HfO_2$  et  $SiO_2$ .

**Conclusion :**

Du point de vue théorique le graphène promet une avancé considérable pour les circuits intégrer, les graphes obtenu après simulation montre que le G-FET peut se substituer au MOSFET.

L'étude théorique porte sur un transistor à double grille l'une des grille en  $\text{SiO}_2$  et l'autre en  $\text{HfO}_2$ , l'utilisation de ce high-k à pour but d'augmenter la permittivité est cela pour réduire au maximum les perturbations qui nuise au bon fonctionnement du transistor.

D'après les équations des quatre cadres une fois que le G-FET arrive à  $V_{th}$  une inversion de porteur se produit ce qui fait du G-FET un transistor qui ne se sature pas, les courbes de  $I_D(V_{DS})$  qui sont dans ce chapitre représente uniquement une partie c'est pour cela quand obtient après  $V_{th}$  une droite, on remarque aussi sur les courbes que le transistor fonctionne à des tensions très faible et à des courant de l'ordre de ( $\mu\text{A}$ ) ce qui fait un gain d'énergie très important, et on remarque sur la figure III.3 quand arrive à des longueur de canal très faible ce qui fait un gain d'espace extraordinaire.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté la fabrication, les configurations, ainsi que quelque caractéristique du transistor à canal en graphène, de l'élaboration du matériau à l'obtention et la caractérisation électrique du dispositif. En complément, une étude sur un G-FET à une dimension du canal de 50 nm.

Au niveau du matériau, il a été démontré que les caractéristique du graphène vont permettre de faire évoluer le transistor, tout fois l'obtention de feuille de graphène reste compliqué, on a présenté plusieurs méthode qui permette l'obtention du graphène, la méthode qui attire notre attention c'est la graphitisation sur SIC, on obtient du graphène sur de grande surface se qui va nous permettre une conception à grande échelle de transistor.

Le bon fonctionnement du G-FET repose sur les caractéristique du canal (le graphène) on a remarqué que le graphène est un matériau a gap nul on à présenté quelque méthode qui permettre d'obtenir une bande interdite pour ce matériau.

Durant cette étude on a prit comme exemple un G-FET avec une longueur de canal de 50 nm les résultats obtenu sont très intéressants se qui donne au graphène un avenir très prometteur.

### *Perspectives*

Pour permettre de travailler sur une grande surface et ainsi faciliter l'intégration des transistors, il est nécessaire de développer le transfert de couche de graphène sur une plaque de silicium oxydée. Une surface de 1 mm<sup>2</sup> a été transférée sur BPSG, des études plus poussées doivent être menées. Le transfert en utilisant le graphène par dépôt catalytique et un polymère semble la voie la plus prometteuse.

*Référence bibliographique*

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE CHAPITRE I**

[1]poumirol jean-marie, thèse doctorat de l'université de Toulouse étude des propriétés électrique du graphène et des matériaux a base de graphène sous champs magnétique intense, 2011

[2]MIKHAIL I. KATSNELSON, GRAPHENE Carbon in Two Dimensions, cambridge university press, 2012

[3]Jian Ru Gong, GRAPHENE – SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, PROPERTIES AND APPLICATIONS, InTech 2011

[4]wonbong choi jo-won lee, graphène synthesis and applications, CRC Press Taylor & Francis Group 2012

[5]gilles montambaux, le graphène, Ecole polytechnique paris-saclay 2014

[6]Jean-Noël Fuchs LPS, Introduction au graphène, Université Paris-Sud

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE II

- [7]C. Berger et al, Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route toward Graphene-based Nanoelectronics, Journal Physics Chemistry B, 108, 19912, 2004
- [8]W.Bei, opening a bandgap in graphene by fluorination, American Physical Society, APS March Meeting, 2010
- [9]R. Balog, Bandgap opening in graphene induced by patterned hydrogen adsorption, Nature Materials 9, 2010
- [10]E. Castro, Biased bilayer graphene: semiconductor with a gap tunable by electric field effect, Physical Review Letters 99, 2007
- [11]M. Clavel, étude de l'intégration de transistor à canal en graphène épitaxié par une technologie compatible CMOS, 2011
- [12]W. De Heer, Large Area and Structured Epitaxial Graphene produced by Confinement Controlled Sublimation of Silicon Carbide, 2011
- [13]D. Farmer Utilization of a Buffered Dielectric to Achieve High Field-Effect Carrier Mobility in Graphene Transistors, Nano Letters, 2009
- [14]S. Han, study of channel length scaling in Large-Scale graphene FETs, VLSI 2010
- [15]J. Kedzierski, Graphene-on-Insulator Transistors Made Using C on Ni Chemical-Vapor Deposition Electron Device Letters 30, 2009
- [16]D. Kondo, Low-Temperature Synthesis of Graphene and Fabrication of Top-Gated Field Effect Transistors without Using Transfer Processes Applied Physics Express 3 025102, 2010
- [17]S. Lee, Wafer Scale Homogeneous Bilayer Graphene Films by Chemical Vapor Deposition, Nano Letters, 2010

- [18] Lemme, A Graphene Field-Effect Device, *Electron Device Letters*, Volume 28, Numero 4, 2007
- [19] X. Li, Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils, *science* 324, 2009
- [20] L. Liao, High- $\kappa$  oxide nanoribbons as gate dielectrics for high mobility top gated graphene transistors, *Proceedings of the National Academy of Science*, volume 107, 2010
- [21] Y. Lin, Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies, *Nano Letters* 9, 2009
- [22] N. Meng, Influence of Temperature on High Frequency Performance of Graphene Nano Ribbon Field Effect Transistor, *Device Research Conference*, 2010
- [23] J.S Moon, Top-Gated Epitaxial Graphene FETs on Si-Face SiC Wafers with a Peak Transconductance of 600 mS/mm, *IEEE Electron Device Letters* 31, 260, 2010
- [24] K.S. Novoselov et al, Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in Graphene, *Nature* 438, 197, 2005
- [25] T. Ohta, Controlling the Electronic Structure of Bilayer Graphene, *Science* 313, 951, 2006
- [26] E. Rotenberg, Origin of the energy bandgap in epitaxial graphene, *Nature Materials*. 7, 2008
- [27] G.M Rutter, Microscopic polarization in bilayer graphene, *Nature Physics*, 2011
- [28] Y. Zhang et al, Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene, *Nature* 438, 201, 2005
- [29] S.Y. Zhou Substrate induced bandgap opening in epitaxial graphene *nature materials* 6, 2007
- [30] Y. Zhou, Origin of the energy bandgap in epitaxial graphene\_reply. *Nature Materials* 7, 2008

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE CHAPITRE III**

- [31]Xinxin Yu, Jiahao Kang, Jinyu Zhang\*, Lilin Tian, and Zhiping Yu, Improving Channel Mobility in Graphene-FETs by Minimizing Surface Phonon Scattering - A Simulation Study, SISPAD, 2010
- [32]Kristen N. Parrish, Michael E. Ramón, Sanjay K. Banerjee, and Deji Akinwande, A Compact Model for Graphene FETs for Linear and Non-linear Circuits, SISPAD, 2012
- [33]Michael B. Henry and shamik Das spice-compatible compact model for graphene field-effect transistors, IEEE, 2012
- [34]Inanc Meric, Philip Kim, Cory R. Dean, Andrea F. Young, and Kenneth L. Shepard, Natalia Baklitskaya, Noah J. Tremblay, Colin Nuckolls, Channel Length Scaling in Graphene Field-Effect Transistors Studied with Pulsed Current-Voltage Measurements, Nano Letters, 2011
- [35]V. Ryzhii, M. Ryzhii, and A. Satou, Current-voltage characteristics of a graphene nanoribbon field-effect transistor, arxiv:0801, 2013
- [36]Zhihong Chen, Joerg Appenzeller, IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598, USA, School of Electrical and Computer Engineering and Birck Nanotechnology Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA
- [37]Xiying Ma, Weixia Gu, Jiaoyan Shen and Yunhai Tang, Investigation of electronic properties of graphene/Si field-effect transistor, Ma et al. Nanoscale Research Letters 2012
- [38]Omid Habibpour, Josip Vukusic, Jan Stake, A Large Signal Graphene FET Model, Chalmers Publication Library, 2010
- [39]Attia, John Okyere. "Transistor Circuits."Electronics and Circuit Analysis using MATLAB". Ed. John Okyere Attia Boca Raton: CRC Press LLC, 1999
- [40]Yudong Wu, Simulation of Graphene Electronic Devices Nanoscale Res Lett, 2011

[41]meisam rahmani, mohammad taghi ahmadi hedyeh karimi feiz abadi mehdi saeidmanesh, elnaz akbari and razali ismail, Analytical modeling of trilayer graphenenanoribbon Schottky-barrier FET for high-speed switching applications, Rahmani et al. Nanoscale Research Letters, 2013