

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Génie Microélectronique**

Présenté par
Toufik AKBAL

Thème

L'étude des nanotubes de carbone et des CNTFETs

Mémoire soutenu publiquement le 18 / 07 / 2016 Devant le jury composé de :

Mr Takfarinas CHELLI	MAA	UMMTO	Président
Mr Djegdjiga HATEM	MAA	UMMTO	Examineur
Mr Ahcène LAKHLEF	MCA	UMMTO	Examineur
Mr Arezki BENFDILA	Professeur	UMMTO	Promoteur

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon encadreur, responsable de la spécialité Génie Micro et nano Électronique, Mr Arezki.Benfdila, pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer ce projet de fin d'étude, pour l'aide et les conseils très précieux qu'ils m'ont apportés dans le domaine de la microélectronique.

Ensuite, un grand merci à Mr Ahcène Lakhlef et à Mr Goudjil, Mr Maidi, Mr Kanane et tout les enseignants qui m'ont encadré et qui ont su me pousser de l'avant. J'ai beaucoup profité de leur rigueur scientifique et de leur sérieux. Leur expérience dans le domaine de l'électronique, particulièrement dans le domaine de la microélectronique, m'a permis de m'investir avec détermination dans ce travail de thèse. Leurs compétences ont été indispensables à son bon déroulement.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collègues du laboratoire GRMNT microélectronique, Lounes Belhimer, Mohamed Kessi, Mohamed Djouder, pour toute aide de leur part et aussi le soutien moral incessant qui nous a motivés et a en pousser de l'avant. Mes remerciements vont aussi à mes deux meilleurs amis Mohamed Belmadi, Arib yacine(Belkacem) sans oublier Nardjes Oumerzouk.

Avant de conclure, j'aimerais réitérer ma gratitude à Mr Arezki Benfdila et Mr Ahcène Lakhlef, pour leur grande patience, leurs conseils et leur disponibilité à toute épreuve. Leurs remarquables compétences ont rendu ces travaux de recherche particulièrement enrichissants. Je les remercie également pour la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ces deux années.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents.
- Mon frère Mebarek.
- Mes sœurs.
- Toute ma famille.
- Tous mes collègues et mes amis.

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale-----	1
Liste des tableaux et des figures-----	i
Liste des abréviations -----	ii

CHAPITRE 1 _ Les nano tubes de carbone ‘CNT’

I.1. Introduction -----	2
I.2. Les différents types de nanotubes de carbone-----	4
I.3. Les méthodes de synthèses des nanotubes de carbone-----	6
I.3.1. Synthèse par arc électrique -----	7
I.3.2. Synthèses par ablation laser -----	7
I.3.3. Synthèse par CCVD (catalytic chemical vapour déposition) -----	8
I.4. Séparations et dispersion des nanotubes de carbone -----	9
I.4.1. La fonctionnalisation chimique selective -----	9
I.4.2. La destruction sélective -----	11
I.4.2. Le gradient de densité -----	11
I.5. Propriétés des nanotubes de carbone -----	13
I.5.1. Propriétés électriques -----	13
I.5.2. Propriétés mécaniques -----	16
I.5.3. Propriétés optiques -----	17
I.6. Conclusion -----	17

CHAPITRE II _ Les transistors à effet de champs à base de nanotubes de carbone

II.1. Introduction -----	19
II.2. Les transistor FET à base de nanotubes de carbone-----	19
II.3. Effet de champ dans les nanotubes de carbone -----	20
II.4. Différent types de CNFET -----	22
II.4.1. Le transistor a modulation de hauteur de barrière (C-CNFET)-----	22

II.4.2.	Transistor à effet de champ double grille (DG-CNFET)	23
II.4.3.	Transistor a barriere shottky(SB-CNFET)	24
II.4.4.	Transistor à effet de champ commandé optiquement	25
II.5.	Comparaison entre les dispositifs	26
II.6.	Geometrie de CNFET	27
II.6.1.	CNFET à grille arriere	27
II.6.2.	CNTFET à grille superieure	27
II.6.3.	CNTFET verticale	29
II.7.	Paramètres physique du CNT FET	30
II.7.1.	Capacite de grille	30
II.7.2.	Energie de bonde interdite (E_g)	31
II.7.3.	Transport ballistique	31
II.7.4.	Mobilité importante	32
II.8.	Comparaison entre le CNTFET et le MOSFET	33
II.9.	Conclusion	34

CHAPITRE III _ Modelisation d'un transistor SB-CNTFET.

III.1.	Introduction	35
III.2.	Mise en évidence des barrieres Schottky	35
III.3.	Réalité technologique de la formation des barrières Schottky	38
III.3.1.	Nature du metal	38
III.3.2.	Epaisseur d'oxyde effective EOT et permittivité diélectrique	39
III.3.3.	Longueur de grille	39
III.3.4.	Diamètre du nanotube de carbone	39
III.4.	Modélisation compact du transistor à barrière Schottky	40
III.4.1.	Calcul de densité de charge	40
III.4.2.	Calcul du courant	42
III.4.3.	Circuit électrique équivalent	43

III.5.	Etudes d'influence des paramètres du modèle -----	45
III.5.1.	Influence de la barrière Schottky -----	45
III.5.2.	Influence du diamètre de NTC -----	47
III.5.3.	Influence de la capacité d'oxyde -----	48
III.6.	Conclusion -----	49
CHAPITRE IV _ Applications des nanotubes de carbone et des CNTFET.		
IV.1.	Introduction -----	50
IV.2.	Les NEMs -----	50
IV.2.1.	Nano-interrupteur à base de NTC -----	50
IV.2.2.	Memoir non-volatile -----	52
IV.3.	Performances HF des CNTFET -----	54
IV.4.	Bio-capteurs -----	55
IV.4.1.	Fonctionnalisation -----	56
IV.4.2.	Types de fonctionnalisations -----	57
IV.4.2.1	Approche non-covalente -----	57
	Exemple/ non-covalente -----	58
IV.4.2.2	Approche covalente -----	58
	Exemple / covalente -----	59
IV.5.	Conclusion -----	59
Conclusion Générale -----		60

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX		PAGE
CHAPITRE I		
Table I.1	comparaison de la conductivité thermique des NTC avec celle des autres	15
Table I.2	matériaux Tableau comparatif entre la rigidité de l'acier et les nanotubes de carbone.	16
CHAPITRE II		
Table II.1	Comparaison des caractéristiques des différents types de CNTFET.	00
Table II.2	Comparaison entre CNTFET à grille arrière et à grille supérieure	00
Table II.3	Comparaison du V-CNTFET et du MOSFET (2016)	00
Table II.4	Comparaison entre CNTFET et MOSFET pour plusieurs longueurs de grilles.	00

LISTE DES FIGURES		
Chapitre I		
		PAGE
Figure I.1	Les structures de carbone	02
Figure I.2	Définition du vecteur chiral.	02
Figure I.3	Représentation d'un nanotube de carbone mono feuillet(SWCNT).	02
Figure I.4	Différentes structures des nanotubes identifiées par les indices de Hamada .	02
Figure I.5	structure schématique d'un nanotube multi-feuillet(MWCNT), ou l'on voit bien l'arrangement concentrique des feuilles de graphène.	02
Figure I.6	Schéma de principe de méthode de synthèse par arc électrique.	02
Figure I.7	Schéma de la technique de synthèse par l'ablation laser.	02
Figure I.8	Exemple de synthèse de nanotubes multicouches par CCVD.	02
Figure I.9	Illustration sélective entre deux molécules chirales et deux nanotubes de carbone chiraux (la molécule utilisée est une diporphyrine).	02
Figure I.10	Image d'un tube à essai contenant différents NTC après procédure d'ultracentrifugation en gradient de densité. Les s-SWNT et m-SWNT avec petit diamètre, les SWNT à grand diamètre, séparés dans des couches colorées différentes..	02
Figure I.11	schéma de bandes d'énergie d'une feuille de graphène avec la première zone de Brillouin (dessous). La bande de conduction et la bande de valence peuvent se croiser en six points correspondants à l'énergie de fermi dont deux ne sont pas	02

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

	équivalent (K et K').	
Figure I.12	(a) Profil de bande d'énergie d'un nanotube de carbone semi-conducteur de chiralité(19,0) résultant du calcul par méthode de liaison forte. (b) présentation de la première sous-bande.	02
Figure I.13	représentation des bandes gap pour les différents nanotubes.	02
Chapitre II		PAGE
Figure II.1	Schéma d'un transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone.	02
Figure II.2	Comportement de transistor à effet de champ en configuration grille arrière	02
Figure II.3	coupe transversale du transistor à modulation de hauteur de barrière (C-CNTFET) Et profile de la bande d'énergie, la bande de conduction	02
Figure II.4	Un DG-CNTFET avec l'effet de grille avant et arrière.	02
Figure II.5	Diagramme de bande d'énergie $V_{DS} < 0$ et a), sans polarisation de grille, b) avec polarisation de grille négative et c) positive.	02
Figure II.6	Schéma d'un OG-CNTFET montrant une polarisation positive de la grille : a) état bloqué ; b) état passant.	02
Figure II.7	Un exemple d'un CNTFET à grille arrière.	02
Figure II.8	Exemple de grille supérieure d'un CNTFET.	02
Figure II.9	Deux configuration du CNTFET : a) grille coaxial et b) grille plane.	02
Figure II.10	les capacités contribuent à définir le potentiel de surface du nanotube de carbone V_{CNT} .	02

Chapitre III		PAGE
Figure III.1	Mise en évidence des barrières Schottky : (a) images de microscopie de photo-courant à balayage laser (puissance du laser $900\mu W$), (b) variation de la hauteur de la barrière Schottky suivant l'axe du nanotube de carbone pour différentes polarisations de la grille V_G allant de 1V jusqu'à 4V par pas de 0.2V, (c) agrandissement du graphe précédent dans la zone de contact, (d) profile de bande d'énergie de la 1ère sousbande de conduction et de valence pour deux polarisations V_G	02
Figure III.2	courant I_{ON} et hauteur de la barrière Schottky en fonction du diamètre du nanotube pour 3 métaux : Palladium(PD), Titane (Ti), Aluminium (Al).	02
Figure III.3	Schéma équivalent grand signal d'un modèle du transistor C-CNTFET.	02
Figure III.4	Un DG-CNTFET avec l'effet de grille avant et arrière.	02
Figure III.5	Caractéristiques simulées I_D vs V_{GS} du modèle compact pour 9 valeurs de $V_{DS} = [0, 1 ; 0, 9]$ avec $\Phi_{SB} = E_G/2 = 0,275eV$, $\lambda_{Schottky} = 5nm$, $d_{tunnel} = 2nm$ et $V_{FB} = 0$.	02
Figure III.6	Caracteristiques simulées I_D vs V_{DS} du modèle compact pour 10 differentes valeurs de $V_{DS} = [0 ; 0,9]$.	02

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Figure III.7	Caractéristiques I_D vs. V_{GS} d'un SB-CNTFET formé par un nanotube zigzag (11, 0) et pour trois valeurs de la hauteur de la barrière Schottky ($\Phi_{SB}=0,3$; 0,5 et 0,6eV) en échelle logarithmique à $V_{DS}=0.1V$, $L=100nm$.	02
Figure III.8	Dépendance du courant I_{on} avec la hauteur de la barrière Schottky à $V_{DS}=400mV$.	02
Figure III.9	Influence du diamètre sur les caractéristiques I_D vs V_{GS} à $V_{DS}=0,1$ 0,4 et 0,6V et pour deux chiralités du nanotube de carbone (19, 0) en vert et (10, 0) en bleu. Les hauteurs de barrières sont choisies égales à la moitié de la bande interdite ; c'est-à-dire $\Phi_{SB}=0,275$	02
Figure III.10	Influence de la capacité d'oxyde C_{INS} sur la caractéristique I_D en fonction de. V_{GS} à $V_{DS}=0,2V$ ($C_{INS}=1nFm^{-1}$, 10 nFm^{-1} et 50 nFm^{-1}). La hauteur de la barrière Schottky est prise égale à la moitié de la bande interdite $\Phi_{SB}=0,275$ eV et la longueur de la grille $L=100nm$.	02
Figure III.11	Variation du rapport I_{on}/I_{off} avec EOT pour $V_{DS}=V_{GS}=0,3V$, $\Phi_{SB}=0,275$ eV et $L=100nm$.	02

Chapitre IV		PAGE
Figure IV.1	En haut à gauche, un nanotube horizontal en configuration poutre, à droite un nanotube horizontal en configuration pont. En bas un nanotube vertical en configuration poutre.	02
Figure IV.2	Schéma de fonctionnement des deux types de nano relais, a) le nano relais à contact, b) le nano relais à effet tunnel.	02
Figure IV.3	Schéma de principe d'une NRAM, les plots en orange représentent les connexions du réseau de NTC, Les plots verts représentent les ponts permettant de suspendre les nanotubes. Les deux états représentés à droite montre le fonctionnement de la cellule mémoire.	02
Figure IV.4	Évolution de la fréquence maximale de coupure des transistors CNTFETs en échelle logarithmique de 2001 à 2009. Ces performances fréquentielles sont obtenues dans le laboratoire de l'université de Delft , l'université de Stanford, la multinationale IBM , RF Nano Corporation (RFNC), la multinationale NEC , l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) [BET06, et l'université d'Illinois à Urbana-Champaign (UIUC).	02
Figure IV.5	Caractéristiques électriques mesurées d'un n-CNTFET ($L=120nm$ et $d_{CNT}=1,5nm$), évolution de la conductance G à $V_{DS}=100mV$ et de la transconductance gm à $V_{DS}=1V$ en fonction de V_{GS} .	02
Figure IV.6	Principe de fonctionnement d'un biocapteur.	02
Figure IV.7	illustration des différents types de fonctionnalisation des nanotubes de carbone : A) fonctionnalisation des défauts, B) fonctionnalisation covalente, C) interaction- p, D) fonctionnalisation non-covalente, E) encapsulation.	02
Figure IV.8	Représentation schématique de l'immunocapteur à base de SWCNT pour la détection du PSA (a) et Fonctionnalisation des CNTs par l'anticorps AB-PSA (b) .	02
Figure IV.9	Procédure de fonctionnalisation par la technique couche par couche selon Wang et al.	02

Liste des abréviations

NTC : NanoTube de Carbone.

SWNT : Single Walled NanoTube.

MWNT : Multi Walled NanoTube.

$\vec{C}_k$: Vecteur chiral.

ϕ : Angle d'hélicité.

CCVD : Catalytic Chemical Vapour Deposition.

DGU : Densité Gradient of Ultracentrifugation.

CNTFET : Carbon NanoTube Field Effect Transistor.

CMOS: Complementary MOS.

MOSFET: Metal-Oxyde-Semiconducteur.

C_G : Capacité de grille.

MIC: Metal-Isolateur-CNT.

ϵ_{OX} : Constante diélectrique.

t_{OX} : Epaisseur d'oxyde.

d_t : Diamètre du nanotube.

E_g : Energie de bande interdite.

C_D : Capacité du drain.

C_S : Capacité de la source.

C_Q : Capacité quantique.

C_T : Capacité totale.

MIGS : Metal-Induced-Gape-State.

EOT: Epaisseur d'oxyde équivalent (Equivalent Oxyde Thickness).

$\alpha_{[p]}$: Facteur de parabolicité.

m^* : Masse effective.

$S_{bbd}_{[p]}$: Bas de sous-bande correspondants.

$D(E)$: Densité d'état.

$f(E)$: Distribution de Fermi.

$T_T(E)$: Transmission totale.

ϕ_{SB}^{eff} : Barrière Schottky effective.

Liste des abréviations

I_{DS} : Courant de drain.

f_s, f_D : Fonction de distribution de source/drain.

h : Constante de planck.

NEMS : Nano Electro-Mecanical Systems.

NRAM : Non volatile Random Access Memory.

Introduction Générale

Introduction générale

La miniaturisation des transistors CMOS permet d'améliorer les performances, la densité d'intégration et le coût des circuits électroniques. La loi de Moore [Moore65] s'est imposée comme un modèle économique décrivant l'évolution technologique des circuits intégrés. Elle prévoit (impose) une multiplication par 2 tous les 18 mois du nombre de transistors par puce. Quelles sont les limites de la technologie silicium ? Telle semble être la question qui motive la recherche technologique en microélectronique depuis 30 ans.

La technologie silicium devrait faire face à un mur dans 15 ans environ : « no exponential is forever ». Fin de la miniaturisation ne signifie pas pour autant fin du progrès [1].

Poursuivre dans cette voie de miniaturisation nécessite donc la recherche de matériaux ou composites présentant les bonnes propriétés aux petites échelles et capables de remplacer les matériaux conventionnels.

Depuis leur découverte, ces nano objet unidimensionnels (1D) ne cessent de révéler des propriétés physiques remarquables. Parmi ces nano-objets on trouve les nanotubes de carbone (NTC), qui ont des propriétés exceptionnelles.

La découverte des nanotubes de carbone (NTC) au début des années 90, et de leur capacité à se comporter comme des métaux ou des semi-conducteurs selon leur structure, a ouvert la voie à une nouvelle façon d'aborder la miniaturisation. Les nanotubes semblent dotés de toutes les propriétés physiques requises (mécaniques, thermiques, électroniques) permettant des possibilités quasi-infinies. Plus spécifiquement, les nano-composites polymère/NTC peuvent jouer un rôle important pour l'électronique de demain. Notamment, de fortes potentialités reposent sur l'association des NTC avec des polymères semi-conducteurs, matériaux clefs à faible coût faisant l'objet d'un intérêt croissant.

Pour ce faire, la synthèse de ce travail est présentée dans quatre chapitres :

- *Chapitre I* présente une brève introduction sur l'historique des nanotubes de carbone. Les différents types de nanotubes de carbone, leurs méthodes de synthèse et de dispersion, différentes propriétés électrique, mécanique, optique. Une introduction sur la structure et cet élément cristallographique de base comme les vecteurs de chiralité C_h .

Introduction générale

- *Chapitre II* concerne l'application la plus importante du CNT comme transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone dit CNTFET, ou nous essayerons de comprendre le principe de fonctionnement de plusieurs types de CNTFET et leurs caractéristiques physique, ainsi que les différentes géométries possibles suivant la structure de grille. Nous terminons par une comparaison entre les CNTFET et MOSFET.
- *Chapitre III* concerne la modélisation compacte du transistor CNTFET à barrière Schottky, ou on a décrit le principe de fonctionnement d'un SB-CNTFET et on a essayé de développé un model compact et faire quelque études d'influence des paramètres.
- *Chapitre IV* concerne les applications perspective des nanotubes de carbone et du CNTFET, on va présentés quelque application électromécanique et électrique et en dernier on a essayé de définir les applications bioélectronique.

Chapitre I

Les nanotubes de carbone

« NTC »

I.1 Introduction

« Ils sont si beaux qu'ils doivent être utiles à quelque chose » : disait R. Smalley, prix Nobel de Chimie, au sujet des nanotubes de Carbone.

Parmi les nanostructures envisageables pour la construction d'une électronique moléculaire, Le nanotube de carbone se présente comme un candidat particulièrement prometteur. En effet, depuis les articles de référence de S.Iijima au début des années 90, les nanotubes de carbone ont été largement caractérisés et se sont avérés très intéressants pour le développement de la nanoélectronique.

Dans la nature, le carbone est présent sous trois formes cristallines : le diamant, le graphite et le fullerène. La troisième forme connue du carbone à laquelle appartient le nanotube est appelée fullerène. La molécule de C₆₀ fut le premier fullerène à être découvert, Il est composé, comme son nom l'indique, de 60 atomes de carbone arrangés en hexagones et pentagones de sorte à former la structure d'un ballon de foot.

Le nanotube de carbone fait partie de cette troisième catégorie et en est la version tubulaire. Plus précisément, il peut être vu comme un plan de graphène enroulé sur lui-même de manière à former un tube et dont on referme chaque extrémité par un demi-fullerène Sphérique tel que l'illustre la Figure I.1.

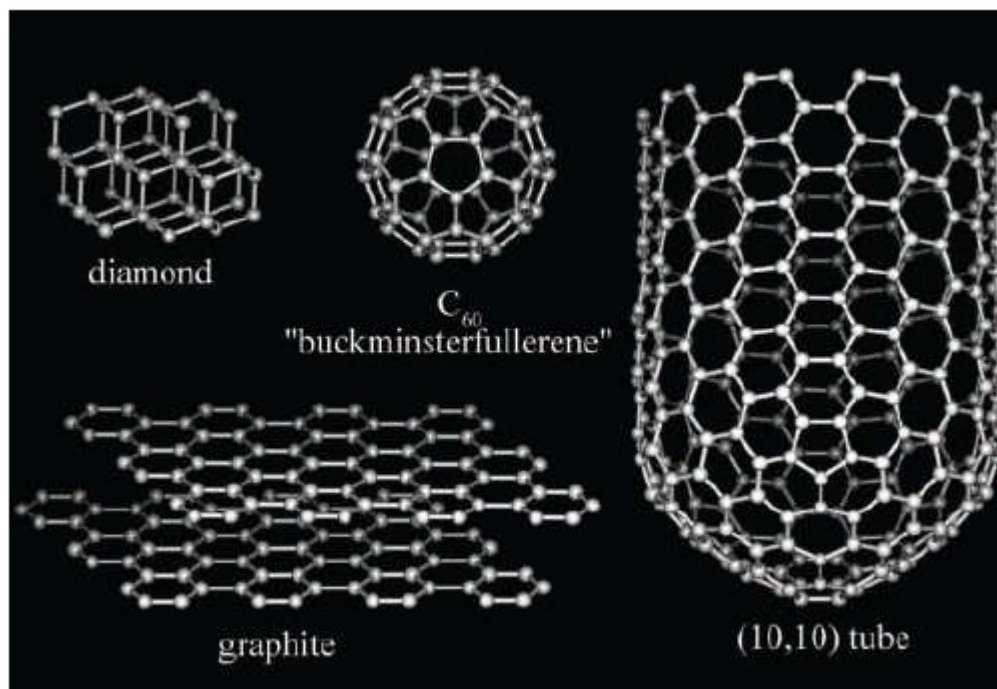


Figure I.1 Les structures de carbone [2].

Lorsque le japonais Sumio Iijima découvre, sur l'électrode de carbone utilisée pour la synthèse des fullerènes, des molécules composées uniquement de carbone et ayant une longue structure filiforme de quelques nanomètres de diamètre. Ils ont été identifiés, ces fibres à des enroulements coaxiaux de plans de graphène et les nomme nanotubes car elles ont un diamètre compris entre 4 et 30 nm tandis que leur longueur avoisine le micron [2].

Ces premiers nanotubes étaient de type multi feuillets (MWNTs), c'est-à-dire constitués de feuillets concentriques de graphène imbriqués les uns dans les autres de manière semblable à des poupées russes et de diamètres croissants compris entre un et plusieurs dizaines de Nanomètres, distants les uns des autres de la même distance que les mono feuillets de graphène au sein du graphite. Notons qu'ils existent également sous une seconde forme pour laquelle un seul feuillet est enroulé sur lui-même (SWNTs), semblable à un parchemin. Les nanotubes mono feuillets, que nous considérerons dans cette étude, ont été découverts 2 ans plus tard simultanément par Iijima.

Les nanotubes existent sous plusieurs formes, qui dépendent de la configuration de l'enroulement de la feuille de graphène autour de son axe. Elles sont définies par un vecteur de chiralité noté $\vec{C}_k$, exprimé dans la base définie par les vecteurs primitifs du réseau de la feuille de graphène ($\vec{a}_1$ et $\vec{a}_2$), et qui correspond au vecteur $\vec{AB}$ des deux nœuds qui se superposent par enroulement ou bien par un angle d'hélicité ϕ et un diamètre d (voir figure I.2).

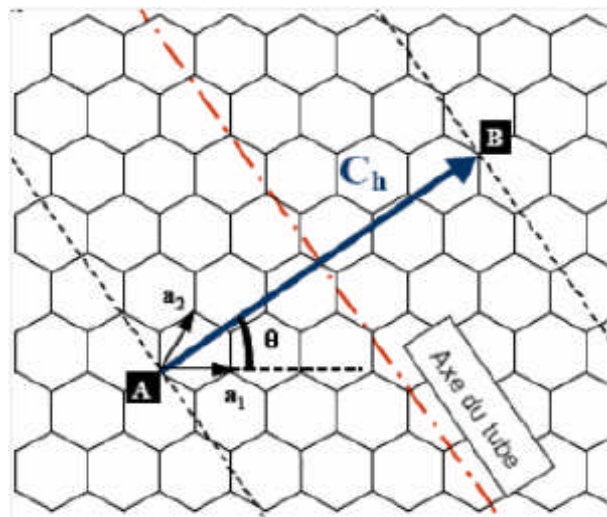


Figure I.2 Définition du vecteur chiral.

Le vecteur chiral peut se décomposer sous la forme :

$$\vec{C}_k = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad \text{Eq.I.1}$$

Les nombre entiers n et m définissent l'hélicité du nanotube et permettent d'identifier sa structure. A partir de ces paramètres entiers (n,m) on peut déterminer les caractéristiques du nanotube telles que l'angle d'hélicité ϕ qui définit l'enroulement du plan de graphène [1].

$$\theta = \arctan \left[\frac{\sqrt{3}m}{(m+2n)} \right] \quad \text{Eq.I.2}$$

Mais aussi le diamètre du nanotube :

$$d = \frac{a}{\pi} \sqrt{n^2 + m^2 + nm} \quad \text{Eq.I.3}$$

Ou $a = |a_i| \approx 0,25nm$ est la norme des vecteurs unitaires.

I.2 Les différents types de nanotube de carbone

On distingue principalement deux types de nanotubes de carbone :

- Les nanotubes mono parois ou mono feuillet (« single wall carbon nanotubes », SWCNT).
- Les nanotubes multi parois ou multi feuillets (« multi-wall carbon nanotubes », MWCNT).

Les nanotubes mono feuillet (SWCNT) se présentent sous la forme d'une feuille de graphène unique enroulée sur elle-même (Voir Figure I.3). Nous passons ainsi d'une structure 2D à une structure cylindrique unidimensionnelle. Le nanotube idéal ainsi formé présente deux extrémités qui peuvent être fermées par deux dômes constitués par exemple de demi-fullerènes, mais pouvant aussi comporter des défauts dans le cas d'un nanotube réel. L'enroulement de la feuille de graphène va définir les propriétés du nanotube formé [1].

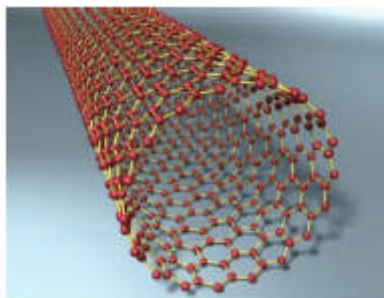


Figure II.3 *Représentation d'un nanotube de carbone mono feuillet(SWCNT).*

D'un point de vue technique, l'enroulement consiste à superposer deux hexagones du feuillet de graphène. Le choix des deux hexagones détermine le diamètre du nanotube et son hélicité ϕ . L'angle ϕ varie de 0 à 30° compte tenu de la symétrie du réseau hexagonal. On peut classer les nanotubes de carbone en 3 familles différentes selon leur hélicité, ces familles se répartissant soit dans la classe des nanotubes chiraux, soit dans la classe des nanotubes non-chiraux :

- $\phi = 0^\circ$ ($m=0$), le nanotube est non chirale, de type zigzag.
- $\phi = 30^\circ$ ($n=m$), le nanotube est non chirale, de type chaise.
- $0 < \phi < 30^\circ$, le nanotube est chirale.

Les deux types de nanotubes non chiraux tirent leur nom (chaise ou zigzag) de la forme suggérée par le dessin d'une couronne d'atomes du nanotube, comme le montre la (FigureI-4).

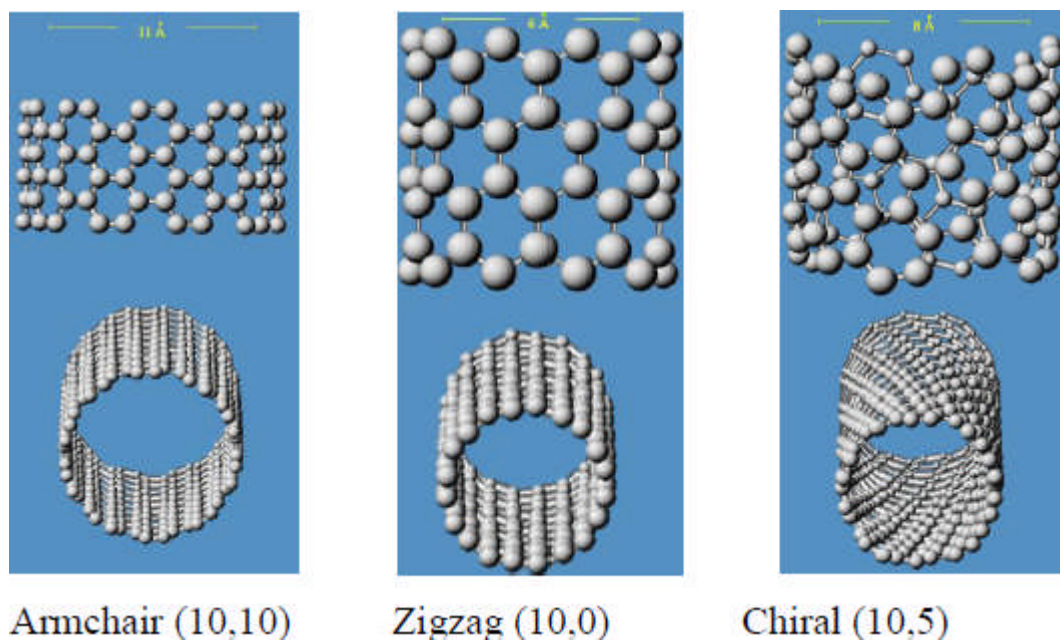


Figure I.4 *Différentes structures des nanotubes identifiées par les indices de Hamada.*

La deuxième classe de nanotubes est constituée par les nanotubes multi feuillets (MWCNT) qui sont formés de plusieurs nanotubes mono parois concentriques séparés par une distance d'environ 0.34 nanomètres (l'épaisseur de Van der Waals) (Figure I.5). Cette distance résulte de l'équilibre entre la force d'attraction et la force de répulsion des feuillets entre eux. Le diamètre du plus petit tube interne détermine la taille du canal central du nanotube. Le

diamètre interne d'un nanotube multi feuillet est de l'ordre de deux nanomètres, tandis que le diamètre externe est de l'ordre d'une vingtaine de nanomètres et peut aller jusqu'à la centaine de nanomètres. Du fait des différentes structures que nous venons de voir, ces nanotubes de carbone présentent des propriétés physiques différentes .

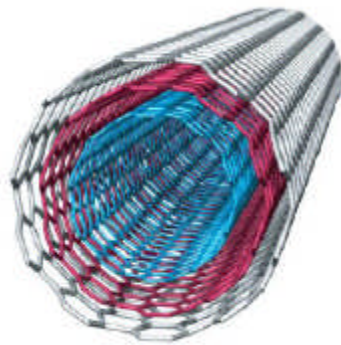


Figure I.5 *structure schématique d'un nanotube multi-feuillet(MWCNT), ou l'on voit bien l'arrangement concentrique des feuilles de graphene.*

I.3 Méthodes de synthèses des nanotubes de carbone

Les nanostructures de carbone telles que les nanotubes mono- et multicouches, les fullerènes peuvent être produits par de nombreuses méthodes. Beaucoup d'entre elles sont basées sur la sublimation de carbone sous atmosphère inerte telles que la synthèse par arc électrique, par voie solaire ou par ablation laser. Les méthodes chimiques sont aujourd'hui en pleine expansion et notamment la décomposition catalytique de précurseurs carbonés. Cette variété de méthodes semble aboutir à des systèmes très ressemblants, mais une inspection détaillée de leurs caractéristiques montre de subtiles différences, dont on ne connaît pas très bien l'origine, au niveau de la nature et la quantité des impuretés, de la distribution des longueurs et des diamètres des nanotubes, de la cristallinité des parois, etc. Malgré cette variété de méthodes, les recherches sur les nanotubes, visant des applications à grande échelle, sont encore limitées par l'étape de production et un objectif demeure : mettre au point une technique capable de produire en masse et à faible coût des nanotubes aux propriétés parfaitement contrôlées [3].

Parmi les méthodes de synthèse présentées ici, nous nous attarderons plus particulièrement sur la production des nanotubes monocouches utilisés lors de notre étude, à savoir :

- Synthèse par **arc électrique**.
- Synthèse par **ablation laser**.
- Synthèse par **ccvd**.

I.3.1 Synthèse par arc électrique

Son principe est basé sur la création d'une décharge entre deux électrodes de graphite sous atmosphère inerte. Les hautes températures engendrées entre ces électrodes durant le processus entraînent la sublimation du graphite. En creusant un trou dans l'anode en son centre, on peut y introduire un mélange de métaux finement divisés et de poudre de graphite. Un grand nombre de paramètres tels que la nature des catalyseurs et leurs concentrations, la pression et la nature de l'atmosphère inerte, le courant ou encore la géométrie du réacteur interviennent lors de la production [3].

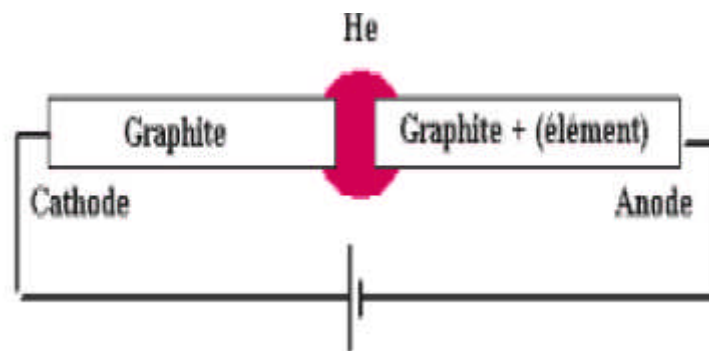


Figure I.6 Schéma de principe de méthode de synthèse par arc électrique.

I.3.2 Synthèse par ablation laser

Une seconde technique performante pour la synthèse de nanotubes monocouches est l'ablation laser. Rappelons que l'ablation laser fut historiquement la première méthode pour générer des fullerènes en phase gazeuse. La sublimation du carbone est provoquée par un laser pulsé et focalisé à la surface d'un disque de graphite sous un flux de gaz inerte. La cible de graphite est placée au centre d'un four permettant de contrôler la température autour de 1200°C. Les vapeurs de carbone sublimé sont entraînées jusqu'à un collecteur où elles se condensent [3].

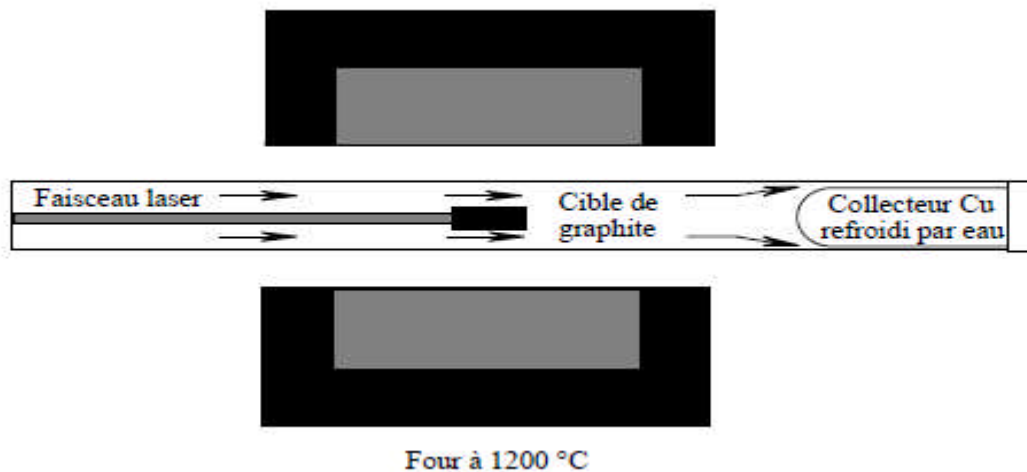


Figure I.7 *Schéma de la technique de synthèse par l'ablation laser.*

I.3.3 Synthèse par CCVD (Catalytic Chemical Vapor Deposition)

La décomposition chimique en phase vapeur (CVD) consiste à décomposer des précurseurs carbonés (hydrocarbures par exemple) sur des particules catalytiques, à des températures variant entre 800 et 1200°C. Ce procédé conduit à l'obtention de SWNTs et MWNTs. Selon les conditions expérimentales, il est toutefois possible de ne produire qu'un seul des deux types de nanotubes. Il est même également possible d'obtenir des nanotubes doubles ou triples parois. Un des avantages du procédé CVD réside dans la possibilité d'un apport continu en molécules précurseurs, ce qui autorise des productions de nanotubes à grande échelle. Une des variantes de ce genre de procédé de synthèse est le procédé HiPCO (High Pressure CO (carbon monoxide)). Il consiste à décomposer un précurseur carbonyle ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) dans un flux de monoxyde de carbone à des pressions pouvant atteindre 10atm et des températures comprises entre 800 et 1200°C. En se décomposant, le précurseur forme des particules de fer à partir desquelles des faisceaux de SWNTs croissent. Cette méthode a comme avantage de produire une suie exempte d'impuretés carbonées et dans laquelle les particules catalytiques (fer) peuvent être relativement facilement éliminées [4].

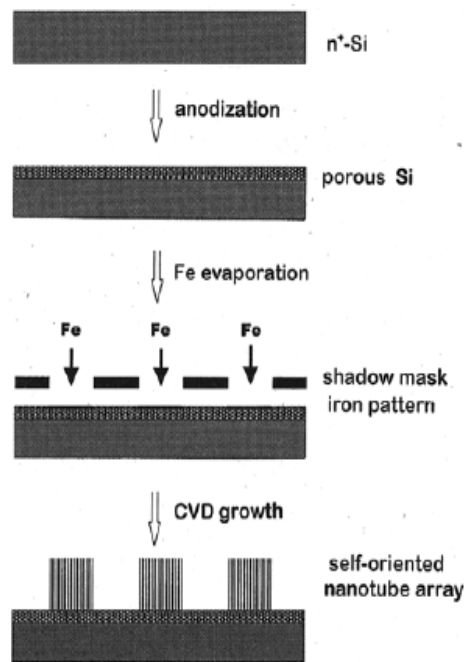


Figure I.8 *Exemple de synthèse de nanotubes multicouches par CCVD.*

I.4 Techniques de séparation des nanotubes de carbone

L'hétérogénéité des propriétés des nanotubes de carbone monoparois est un frein majeur pour leurs applications industrielles. En effet, pour améliorer les performances de dispositifs à nanotubes de carbone et cela quelle que soit l'application envisagée, les populations de nanotubes utilisées doivent être dispersées en diamètre, longueur, chiralité et type électronique. La communauté internationale s'est donc très vite intéressée à la recherche de techniques de séparation. Cette partie fait un état de l'art non exhaustif des techniques de séparation décrites dans la littérature. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories:

- la fonctionnalisation chimique sélective.
- la destruction sélective.
- la séparation par gradient de densité.

I.4.1 La fonctionnalisation chimique sélective

Pour amplifier les différences entre les diverses espèces de nanotubes de carbone dans un mélange polydispersé, les chercheurs ont exploré les réactions chimiques dont la réactivité était fonction du diamètre, de la chiralité et du type électronique des nanotubes [21]. Dans la

plupart des cas, la fonctionnalisation chimique spécifique est suivie d'une technique de séparation qui peut être l'électrophorèse, la chromatographie ou l'ultracentrifugation.

La qualité de la séparation est toujours limitée par la sélectivité de la réaction chimique utilisée. De toute la chimie des nanotubes, ce sont les réactions sur les parois qui ont montré une réelle sélectivité selon le diamètre et le type électronique. Par exemple, la fonctionnalisation sélective des NT métalliques a été réalisée avec un sel de diazonium en milieu aqueux. Un choix intelligent du diazonium utilisé permet par la suite d'effectuer une séparation comme Kim et al. qui en choisissant le 4 hydroxylbenzenediazonium ont pu enrichir une solution en nanotubes semiconducteurs par électrophorèse en milieu alcalin. A contrario, si le diazonium est muni d'une longue chaîne alkyle, il est alors possible de jouer sur la différence de solubilisation des nanotubes fonctionnalisés dans les solvants organiques tel que le tétrahydrofurane (THF). Une sélectivité similaire a été observée avec la réaction d'un dichlorocarbène sur les nanotubes. Cette réaction est particulièrement intéressante puisque, contrairement aux diazoniums, elle permet l'ouverture d'un gap au niveau de Fermi ce qui rend les NT métalliques, semiconducteurs [21]. En effet, dans le cas des diazoniums, il a été montré expérimentalement et à l'aide de calculs théoriques que la fonctionnalisation rend les nanotubes métalliques isolants. Mais récemment, une publication tend à dire que, selon le taux de fonctionnalisation avec le diazonium, il serait également possible d'ouvrir un gap au niveau de Fermi. La fonctionnalisation covalente provoquant des dommages irréversibles sur les propriétés des nanotubes de carbone, la communauté scientifique s'est donc intéressée à la chimie non-covalente. L'exemple le plus démonstratif (Fig I.9) est l'interaction d'une diporphyrine chirale avec un nanotube pour seulement une chiralité bien précise. Cette interaction sélective selon la chiralité peut ensuite être optimisée en contrôlant l'angle formé par les deux porphyrines dans la molécule.

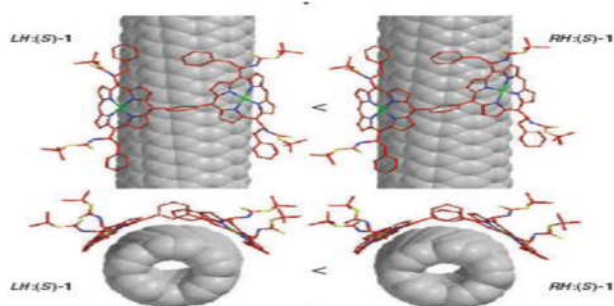


Figure I.9 *Illustration sélective entre deux molécules chirales et deux nanotubes de carbone chiraux (la molécule utilisée est une diporphyrine)[21].*

De plus, l'interaction non-covalente de certains polymères avec les nanotubes de carbone a montré une sélectivité en fonction du diamètre et du type électronique. En particulier, les polymères type fluorènes ont montré une sélectivité en diamètre alors que l'acide désoxyribonucléique (ADN) simple brin semble s'enrouler autour du nanotube en fonction de sa chiralité et a montré une forte affinité pour les nanotubes semiconducteurs. Il est important de noter que la sélectivité via des interactions non-covalentes ne fonctionne vraiment que pour des petits diamètres (< 1.2 nm).

En conclusion, les techniques utilisant la fonctionnalisation chimique covalente sélective sont facilement applicables pour des applications industrielles du fait de leur faible coût et de leur facilité d'utilisation mais souffrent cruellement de leur faible sélectivité comparée aux autres méthodes qui seront abordées dans la suite.

I.4.2 La destruction sélective

Pour de nombreuses applications, la présence de nanotubes de type électronique différent diminue grandement les performances par exemple, dans les transistors à effet de champ, les nanotubes métalliques limitent la modulation du transistor. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'effectuer une séparation des nanotubes puisqu'une destruction ou inactivation sélective des nanotubes non désirés est suffisante. Nous venons de voir que certaines réactions chimiques en solution permettaient déjà de le faire. D'autres études ont montré que des réactions en phase gazeuse (compatibles avec les procédés de micro-électronique actuels) selon les conditions utilisées peuvent détruire sélectivement certains nanotubes de carbone. En effet, il est possible par exemple d'oxyder sélectivement les nanotubes avec de petits diamètres et certaines chiralités puis par chauffage ($> 600^{\circ}\text{C}$) sous atmosphère riche en oxygène de détruire les nanotubes oxydés. Il a été également montré qu'une réaction en phase gazeuse avec du fluor gazeux suivie d'un chauffage à haute température sous vide permet de détruire sélectivement les nanotubes métalliques avec des diamètres inférieurs à 1.1 nm [61]. Un résultat identique a pu être obtenu pour des diamètres plus importants (1.4 à 2 nm) en utilisant un plasma de méthane. Récemment la destruction sélective de nanotubes de carbone de diamètre inférieur à 1 nm par des vapeurs de lithium a été montrée [21].

I.4.3 Le gradient de densité

La dernière méthode décrite est l'ultracentrifugation par gradient de densité. L'ultracentrifugation classique est effectuée dans un solvant dont la densité est constante et

sépare les nanotubes de carbone monoparois selon leur aptitude à la sédimentation. Cette méthode ne permet pas de séparer convenablement les nanotubes du fait de la multiplicité des paramètres structuraux. Le principal intérêt de cette méthode est sa capacité à séparer les nanotubes individuels des nanotubes en assemblée de cordes dissous à l'aide de surfactants. Récemment, une nouvelle approche a été développée, l'ultracentrifugation par gradient de densité (DGU). Cette méthode permet de séparer les nanotubes de carbone selon leur densité volumique. La DGU consiste à créer un gradient de densité dans le milieu où les nanotubes vont être injectés. Durant l'ultracentrifugation, les nanotubes sédimentent à travers le gradient de densité jusqu'à ce que la densité des nanotubes soient identiques à la densité de la solution. Ceci a pour effet de former des couches différentes de nanotubes en solution (Fig I.10). Initialement, la DGU a été utilisée pour trier des hybrides ADN-nanotubes selon leur diamètre [13]. Mais ces hybrides possédaient de nombreux désavantages tels que l'irréversibilité de l'interaction, le coût élevé et l'inefficacité de cette méthode sur les gros diamètres (> 1.2 nm). Par la suite, les travaux se sont plutôt concentrés sur les nanotubes encapsulés par un surfactant. Par exemple, l'utilisation du cholate de sodium permet de trier les nanotubes de carbone selon leur diamètre. Il a été également montré que l'on peut séparer les nanotubes de carbone selon leur type électronique en utilisant un mélange de deux surfactants : le cholate de sodium et le dodécylsulfate de sodium. Ce phénomène est dû au fait que la proportion des deux surfactants qui encapsulent le nanotube dépend de la polarisabilité du nanotube, ce qui induit alors des différences de densité.

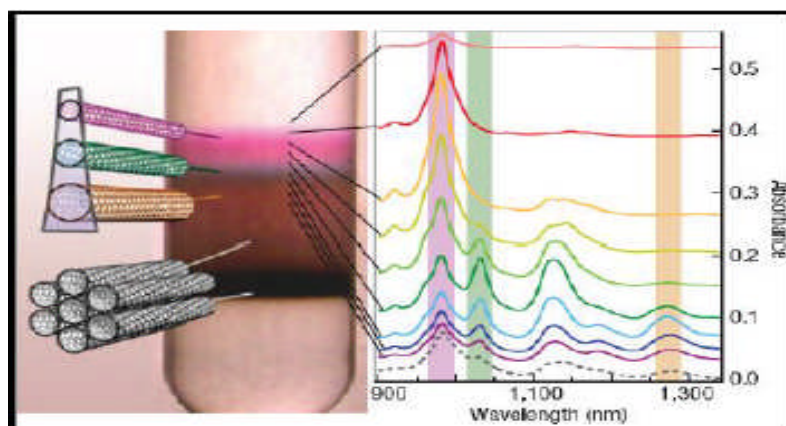
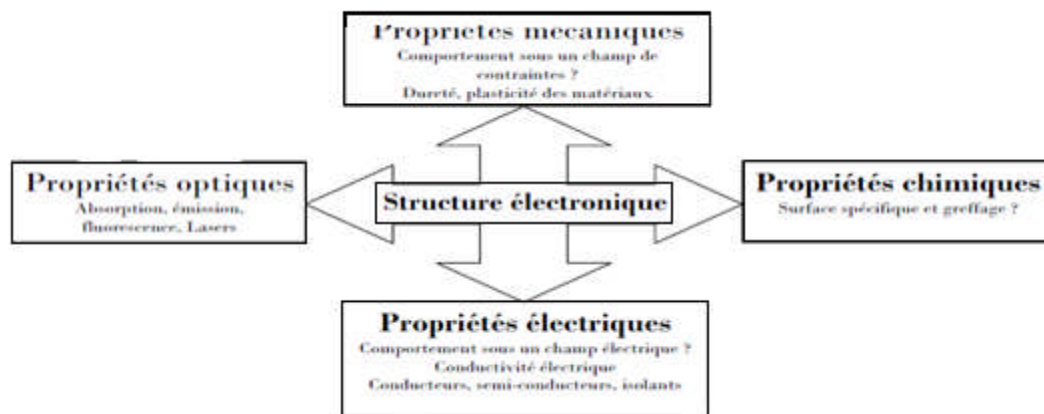


Figure I.10 *Image d'un tube à essai contenant différents NTC après procédure d'ultracentrifugation en gradient de densité. Les s-SWNT et m-SWNT avec petit diamètre, les SWNT à grand diamètre, séparés dans des couches colorées différentes.*

I.5 Propriétés des nanotubes de carbone

Depuis leur découvertes, les nanotubes ont révélés d'extraordinaires propriétés physique qui on motivé de très nombreuses études scientifiques. Un grand nombre d'application ont d'ores et déjà envisagées.



I.5.1 Propriétés électroniques

Les nanotubes de carbone présentent également des propriétés de conduction électrique particulières. Ces propriétés sont classées en fonction des indices de chiralité (n,m) des nanotubes de carbone, qui peuvent présenter un comportement métallique ou semi-conducteur. Les nanotubes de configuration dite « Armchair » ont des propriétés électroniques comparables à celles des conducteurs métalliques, alors qu'une configuration « Zigzag » ou « Chirale » engendre un comportement semi-conducteur avec des conductivités comprises entre 0,1 et 100 S/cm.

La structure de bande des nanotubes de carbone peut être obtenue à partir de celle du graphène, A partir de la structure de bande du graphène, le schéma de bande d'énergie du nanotube est montré sur la figure I.11 . On remarque que les bandes de conduction et de valence se rejoignent ou non en six points de la première zone de Brouillon. Deux de ces six points de Fermi ne sont pas équivalents ; le point K et K'. Si l'un des niveaux d'énergie qui correspondait à un état permis (lignes parallèles en rouges sur la figure I.11) passe par un point K ou K', le nanotube a un comportement métallique, sinon, le nanotube est semiconducteur à bande interdite directe [14].

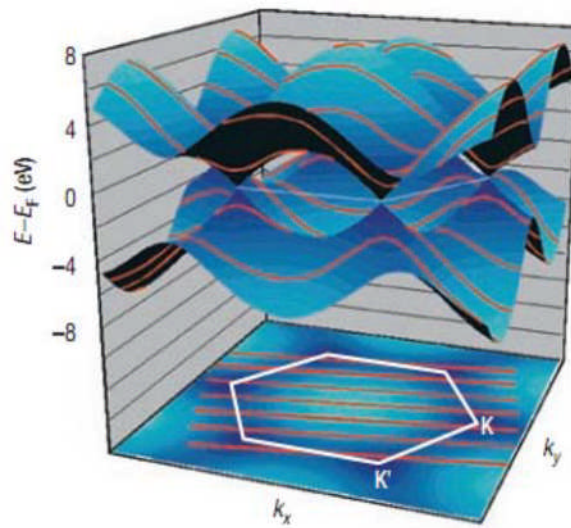


Figure I.11 *schéma de bandes d'énergie d'une feuille de graphène avec la première zone de Brillouin (dessous). La bande de conduction et la bande de valence peuvent se croiser en six points correspondants à l'énergie de Fermi dont deux ne sont pas équivalents (K et K').*

Le modèle de liaisons fortes permet de calculer les bandes d'énergie avec une bonne approximation et de prévoir ainsi la structure des bandes de conduction et de valence. La figure I.12.a montre la disposition des différents sous-bandes pour la bande de conduction et de valence associées à un nanotube de chiralité (19, 0). Cette chiralité permet de donner un nanotube semiconducteur de bande interdite égale à $\sim 0,55\text{eV}$ comme le montre la figure I.12.b pour les deux premières sous bandes de la bande de conduction et de valence qui résulte également du modèle de liaisons fortes.

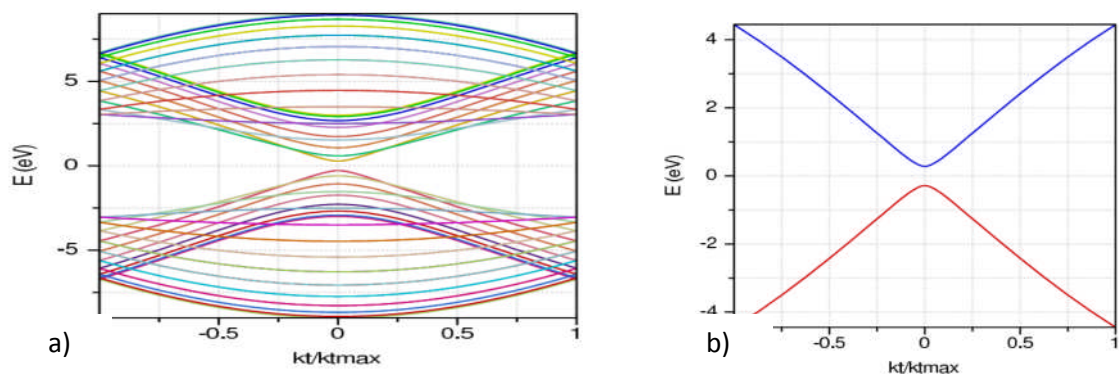


Figure I.12 *(a) Profil de bande d'énergie d'un nanotube de carbone semi-conducteur de chiralité(19,0) résultant du calcul par méthode de liaison forte. (b) présentation de la première sous-bande.*

Des études théoriques sur les propriétés électroniques des nanotubes montrent que tous les nanotubes en configuration <<armchair>> sont métalliques, ainsi que les nanotubes en configuration <<zigzag>> dont les valeurs de (m) et (n) sont des multiples de trois. Il est ainsi possible d'exprimer la condition de transport métallique pour ces structures par relation :

$$(2m+n)=3q \quad \text{ou } q \text{ est un nombre entier .}$$

Il est remarquable que les nanotubes de carbone mono parois présentent un caractère métallique ou semi-conducteur selon les valeurs des paramètres de structures m et n, alors que les liaisons chimiques entre les atomes de carbone sont identiques, les conditions sont résumées ci-après [15] :

- Si $n=m$, les nanotubes ont un comportement métallique.
- Si $n-m=3q$ (q entier), les nanotubes sont des semi-conducteurs à gap étroit.
- Si $n-m \neq 3q$, les nanotubes sont des semi-conducteurs à gap large ou sont isolants.

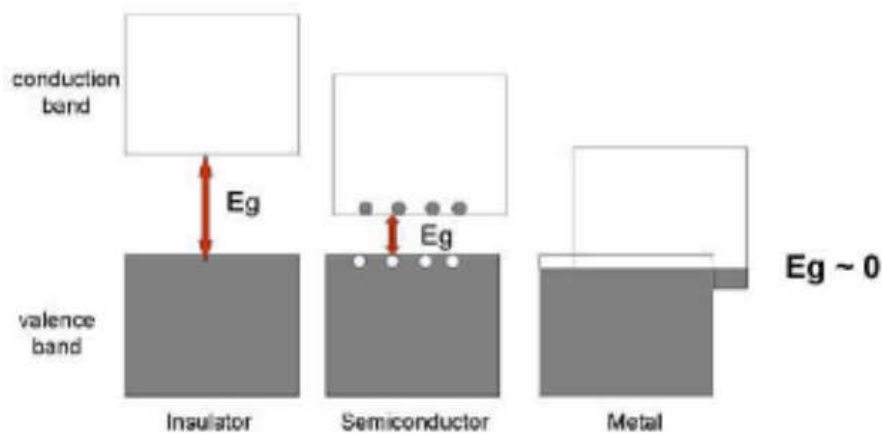


Figure I.13 *représentation des bandes gap pour les différents nanotubes.*

- La valeur de conductivité des nanotubes de carbone conducteur simple paroi est 70 fois supérieure à celle du cuivre.
- Pour les semi-conducteurs, des valeurs de la mobilité de charges supérieures à 100 000 $\text{cm}^2/\text{V.S}$ comparativement à 1500 $\text{cm}^2/\text{V.S}$ pour le silicium amorphe.
- Les nanotubes de carbone sont capables de transporter des densités de courant considérables de l'ordre $10^{10} \text{A}/\text{cm}^2$ soit 100 fois plus que les métaux [4].

Les nanotubes montrent des propriétés selon le traitement subi avant leur introduction dans des dispositifs électronique, ils peuvent agir soit comme matériaux de type P, soit comme matériaux de type N [5][6].

I.5.2 Propriétés mécaniques

Les NTCs possèdent des propriétés mécaniques exceptionnelles. Parmi les plus importantes, il y a :

I.5.2.1 La dureté

La dureté est une mesure de la capacité d'un matériau à résister à la pénétration.

La résistance des nanotubes devrait être environ 200 fois supérieure à celle de l'acier pour un poids 6 fois moins.

Les nanotubes de carbone multi parois sont beaucoup plus résistants que les nanotubes à une seule paroi [7].

I.5.2.2 Conductivité thermique

Les nanotubes de carbone possèdent une conductivité thermique fortement anisotrope, comprise entre 1800 et 6600 W.K⁻¹.m⁻¹. Ainsi les nanotubes de carbone sont cinq fois plus conducteurs que le cuivre et trente fois plus que le fer (Tableau 1), ce qui en fait de bons candidats pour la dissipation de chaleur dans les circuits électroniques [7].

	Conductivité thermique (W/m.K)	Echelle
MWCNT	1800-3000	Nanométrique
SWCNT	2500-6600	Nanométrique
Fer	80	Massif
Or	317	Massif
Cuivre	485	Massif
Diamant	1000	Massif

Tableau I.1 *comparaison de la conductivité thermique des NTC avec celle des autres matériaux.*

I.5.2.3 L'élasticité

Le module d'élasticité des nanotubes est dix fois celle de l'acier ($E > 1 \text{ TPa}$) et il présente une grande élasticité et une grande flexibilité [8].

	Force (MPa)	Densité (g/cm ³)	Force spécifique (kN·m/kg)
Acier	2000	7.86	254
NTC simple paroi	62000	1.34	46268

Tableau I.2 *Tableau comparatif entre la rigidité de l'acier et les nanotubes de carbone.*

I.5.3 Propriétés optique

Les nanotubes possèdent des propriétés de limitation optique dans une large gamme de longueurs d'onde, depuis le visible jusqu'au proche infrarouge. Des seuils faibles de non linéarité et de grandes densités optiques ont été obtenues lors de l'étude de dispersions aqueuses de nanotubes monocouches. Ces performances égalent ou surpassent celles d'autres bons limiteurs optiques, comme le C_{60} ou le noir de carbone, que ce soit dans le visible ou le proche infrarouge [9]. Les dispersions liquides de nanotubes monocouches apparaissent donc comme des systèmes prometteurs pour une limitation optique à bande large. L'origine de la limitation dans le cas des nanotubes est essentiellement une forte diffusion non linéaire engendrée par la formation de bulles de solvant à la surface des nanotubes et par une sublimation des tubes à plus forte fluence [10].

I.6 Conclusion

Ce chapitre, qui constitue une revue bibliographique sur les nanotubes de carbone a montré l'importance de ces nano_ objets dans le domaine des nanosciences que dans le coté application. À partir de la chiralité structurale du SWCNT, nous avons décrit les différents types de NTC (MWCNT, SWCNT).

Ensuite, nous nous sommes intéressés aux méthodes de synthèses des NTC les plus courantes, puis on a vu les méthodes de dispersion de ces derniers. En fin, d'après la chiralité des SWCNT on a vu les plusieurs propriétés remarquables (propriétés électrique, physique,...etc).

Après cette étude bibliographique, nous allons analyser plus en détail dans le chapitre suivant le composant électronique les plus importants à base de nanotube de carbone : le CNTFET (Carbon NanoTube Field Effect Transistor).

Chapitre II

Les transistors à nanotubes de carbone « CNTFET »

II.1 Introduction

La croissance de l'industrie des semi-conducteurs dépend pour l'instant de sa capacité à miniaturiser des transistors. L'objectif de la démarche est de délivrer de meilleure performance à moindre coût. Aujourd'hui, le niveau de performance atteint peut être favorablement comparé aux meilleurs transistors en silicium. En effet, leurs caractéristiques (la densité de courant atteignable, la fréquence de transition théorique et le rapport I_{ON}/I_{OFF}), ainsi que leur polyvalence et leur maturité, positionnent les CNTFET (Carbon Nanotube Field Effect Transistor) parmi les nano-composants les plus attractifs du point de vue de leur intégration dans les nano systèmes du futur. De nombreuses démonstrations de faisabilité ont prouvé que ces transistors à nanotubes peuvent servir de base à la fabrication de diverse fonction électronique de faible complexité (mémoires non volatiles, portes logique, etc.).

Dans ce chapitre on discutera en détail sur le transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone et nous essayerons ainsi de comprendre les caractéristiques physiques qui peuvent ouvrir des perspectives nouvelles, nous croyons fortement que des nanotubes de carbone offrent un FET avec de meilleures caractéristiques pour les dispositifs par rapport aux MOSFET conventionnels.

II.2 Les transistors FET à base de nanotubes de carbone (CNTFET)

Les NTC mono-parois (SWNT) présentent la particularité d'être soit métalliques soit semi-conducteurs, suivant leur structure. A condition de savoir les trier, ces NTC peuvent servir à la réalisation de nano-composants semi-conducteurs présentant de très bonnes performances, et avec une densité d'intégration potentiellement importante. Ainsi dans la littérature, les transistors à effet de champ ont été parmi les premiers dispositifs électroniques à être démontrés, et les plus étudiés. On parle de « CNTFET », pour « Carbon Nanotube Field Effect Transistor ». Les premières démonstrations ont été réalisées dès 1998, avec des résultats encourageants, et depuis, les performances de ces nano-transistors n'ont cessé de s'améliorer [16].

Un transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone (CNTFET (Carbone Nanotubes Field effect transistor)), se sont des dispositifs simple constitués d'un ou plusieurs nanotubes semi conducteurs déposés sur un substrat dopé, forment un canal entre deux électrodes métallique appelées source (S) et drain (D). Le principe d'un CNTFET est de contrôler le

courant passant à travers ce canal à l'aide d'une troisième électrode appelé grille (G) séparée des nanotubes de carbone par un diélectrique (oxyde de surface) d'épaisseur t_{ox} [2].

Les premiers transistors à nanotube de carbone ont été réalisés avec un seul nanotube de carbone déposé sur deux électrodes sur une couche d'oxyde de silicium (100-200nm) elle-même déposée sur un substrat de silicium dopé qui est utilisé comme grille arrière (Figure II-1) [3].

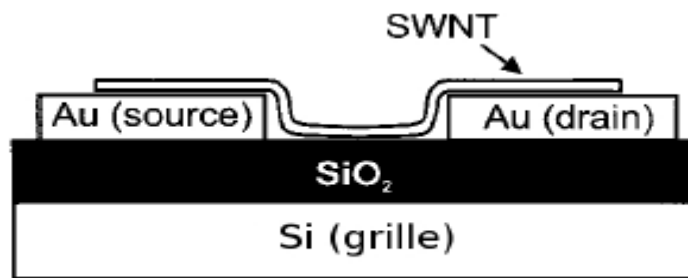


Figure II.1 *schéma d'un transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone.*

Les premiers transistors avaient de très mauvaises performances, principalement parce que le contact électrode/nanotubes était de résistance très élevée ($\geq 1 \text{ MW}$). Par la suite, ce contact a pu être amélioré par dépôt des électrodes au-dessus du nanotube et à l'aide d'un recuit. Cette approche a permis d'augmenter considérablement la densité de courant traversant le nanotube et d'obtenir des transistors modulant avec des ratios I_{on}/I_{off} de l'ordre de 10^6 [4].

Différents types de CNTFET ont été développés, des CNTFET au comportement similaire à celui des transistors CMOS, et de CNTFET qui possèdent un comportement totalement inaccessible aux transistors de technologie CMOS.

II.3 Effet de champ dans les transistors à nanotubes de carbone

Ce qui va suivre concerne le transistor à effet de champ à base de nanotubes de carbone à grille arrière, les résistances à 300 K varient de 50 k Ω au G Ω en fonction des densités de nanotubes connectés. En appliquant une tension sur la grille arrière, on observe une modification des caractéristiques du circuit. A température ambiante, la caractéristique courant-tension ($I_{ds}(V_{ds})$) est linéaire (Fig. 3.4 a) : la réponse du circuit est ohmique. La valeur de la résistance du circuit varie avec la tension appliquée sur la grille : elle diminue lorsque l'on applique une tension de grille négative. A 4,2 K, la caractéristique devient non

linéaire (Fig. II.2.b) : une zone de conductance nulle s'est ouverte, laquelle peut être complètement refermée en appliquant une tension de grille négative. On peut visualiser cette dépendance en grille de la résistance grâce à la caractéristique de transfert $I_{ds}(V_g)$ (Fig. II.2.c et d). Au voisinage de $V_g = 0$ V, aucun courant ne passe et le circuit est dit "bloqué". Pour des tensions appliquées sur la grille, le courant progressivement augmente dans le circuit qui est alors "débloqué". Ce contrôle du courant par la tension de grille est caractéristique d'un transistor à effet de champs. Le fait que ce déblocage ait lieu aussi bien pour des tensions de grille positive et négative indique que le transistor est ambipolaire.

Les caractéristiques courant-tension $I_{ds}(V_{ds})$ et de transfert $I_{ds}(V_g)$ permettent de déterminer certaines grandeurs caractéristiques de l'effet de champ telles que le rapport des courants passant et bloqué I_{ON}/I_{OFF} , le gain g_m et la pente sous le seuil S (définis dans le chapitre suivant). Pour les caractéristiques typiques en configuration de grille arrière présentées figure II.2, on obtient à température ambiante un rapport I_{ON}/I_{OFF} supérieur à 10^4 , une pente sous le seuil de 750 mV/dec et un gain de $2,24 \cdot 10^{-8}$ S ; à froid, ces valeurs deviennent de 10^6 pour le rapport I_{ON}/I_{OFF} , de 3,9 V/dec pour la pente sous le seuil et de $1,75 \cdot 10^{-8}$ S pour le gain.[17]

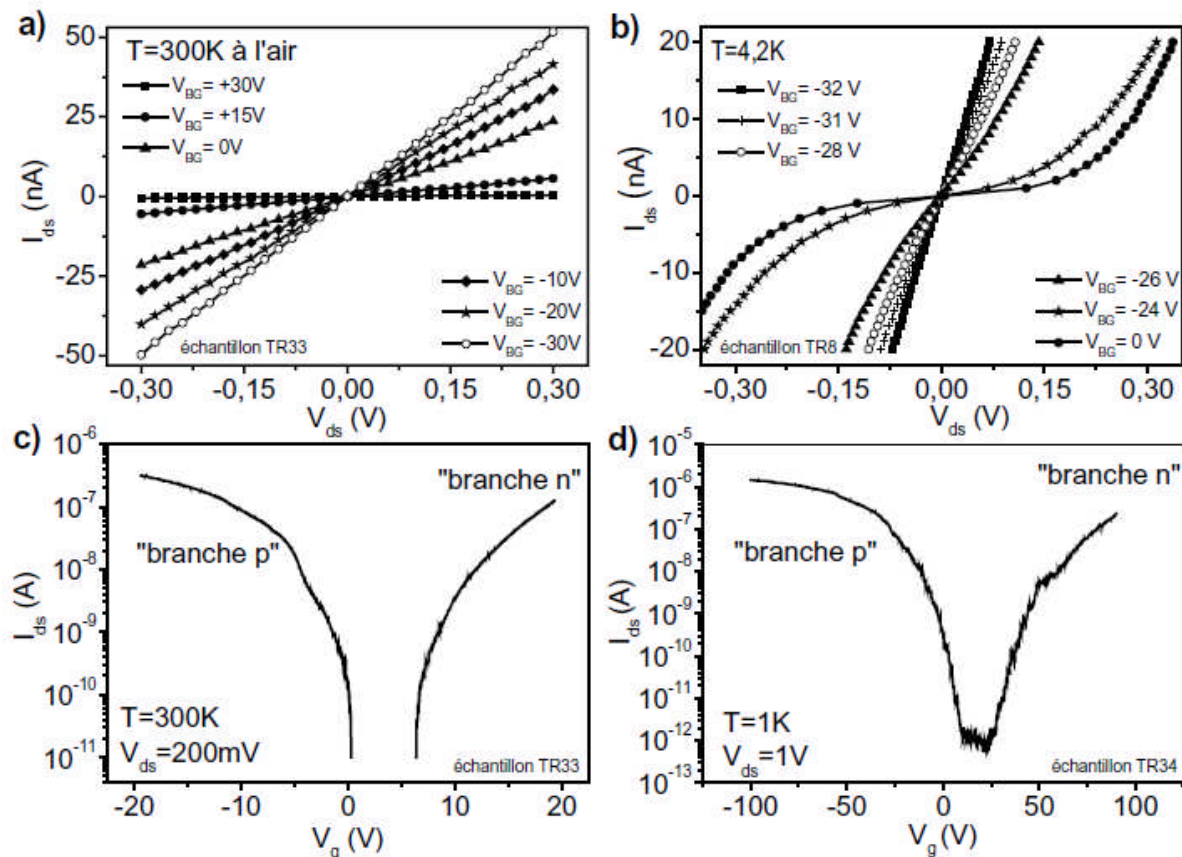


Figure II.2 *Comportement de transistor à effet de champ en configuration grille arrière [17].*

a), Caractéristique courant-tension à l'ambiante : la caractéristique est linéaire, ce qui est typique d'un comportement ohmique. On observe un effet de champ qui divise la résistance

par 100 quand on applique une tension de grille négative (la résistance passe de 746 MΩ à 6 MΩ).

b), Caractéristique courant-tension à 4,2 K pour différentes tensions de grille : la courbe est non linéaire et présente un gap qui peut être totalement supprimé en appliquant une tension de grille négative.

c), Dépendance en grille du courant drain-source à 300 K sous un vide de 10^{-6} mbar. La tension de grille varie de +20 V à -20 V à une vitesse de -20 mV.S⁻¹. La région moins conductrice entre 0 et +5V correspond à l'état "OFF" du CNFET (le signal sous le seuil de bruit de l'ampèremètre), l'état "ON" correspond à des courants de 10^{-7} A. Pour des tensions de grille négatives, le transport est assuré par les trous (branche de type p) et par les électrons pour des tensions de grille positives (branche de type n). La transition de l'état "OFF" vers "ON" est linéaire en échelle logarithmique et de pente égale à l'inverse de la pente sous le seuil S (ici, S=750 mV/dec).

d), Dépendance en grille du courant drain-source à 1 K. La tension de grille varie de +90V à -100 V à la vitesse de -50 mV.S⁻¹. L'état "OFF" du CNFET se situe à un courant de 10^{-12} A, l'état "ON" correspond à des courants de 10^{-6} A et S=3,9 V/dec.

II. 4 Différents types de CNTFET

Les différents types de CNTFET qui ont été signalés, sont quatre structures possibles :

- Le transistor à modulation de hauteur barrière (c-CNTFET).
- Le transistor à barrière Schottky ((SB) CNTFET).
- Le transistor à grille optique (OG-CNTFET).
- Le transistor à double grilles (DG-CNTFET).

Grossièrement, ces transistors fonctionnent à partir du même principe, il s'agit de faire circuler un courant entre le drain et la source à travers le nanotube.

La différence entre ces transistors réside dans la nature de contacte entre le nanotube semi-conducteur et les électrodes métallique de source et de drain [18].

II.4.1 C-CNTFET

Le transistor à modulation de hauteur de barrière ou aussi CNTFET conventionnel (C-CNTFET) est réalisé à partir d'un nanotube de carbone mono-parois ayant un dopage de type n/i/n ou p/i/p. Le principe de fonctionnement du transistor à effet de champ conventionnel à

base de nanotube de carbone en considérant le remplacement du matériaux de canal pour profiter du transport balistique dans les CNT .en effet, le contact est supposé ohmique ou avec une hauteur de barrière faible. La hauteur de potentiel de cette barrière est modulée par le potentiel de grille. Dès que l'énergie des porteur devient supérieur à cette barrière, le transistor devient passant et le courant de nature thermoïnique et unipolaire [14].

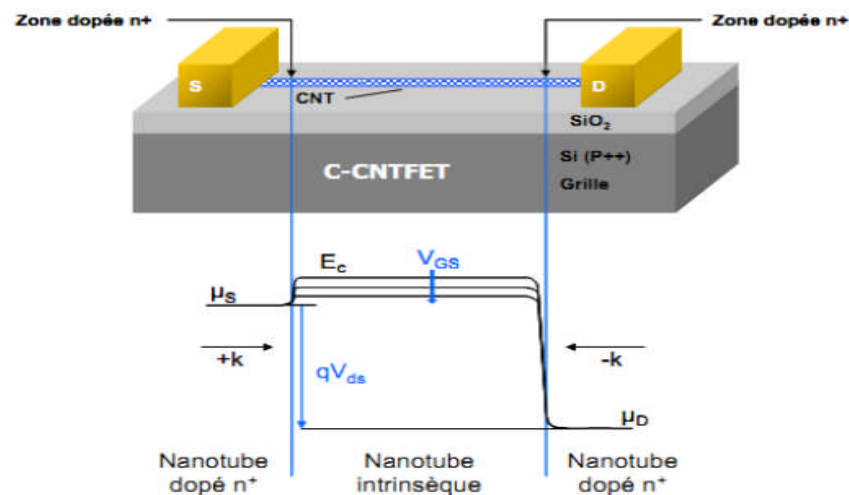


Figure II.3 *coupe transversale du transistor à modulation de hauteur de barrière (C-CNTFET) Et profile de la bonde d'énergie, la bonde de conduction [14].*

Dans le cas idéal, les performances d'un tel transistor sont très prometteuses avec une pente sous le seuil qui ne dépasse pas les 60mV/décade. Mais comme le dopage des zones d'accès n'est pas très bien maîtrisé des barrières Schottky peuvent se former à l'interface entre le métal des accès source, drain et le nanotube de carbone .ces barrières ont une influences de commutation et accroître la pente sous le seuil à des valeurs $> 60\text{Mv/}$ décade [16].

II.4.2 Transistor à effet de champ à base de nanotubes double grilles (DG-CNTFET)

Le CNTFET double grille décrit une amélioration du transistor à modulation de hauteur de barrière, au lieu d'avoir un dopant chimique et/ou un choix de métal spécifique pour obtenir des zones d'accès source et drain de type N ou P .ces zones d'accès sont dopées électrostatiquement en polarisant une grille supplémentaire (appelée grille arrière ou back gate) comme indiqué sur la figure, la grille avant ,située entre le nanotube et grille arrière, écranté l'effet de la grille arrière.

L'évolution de la quantité de charge dans le canal de nanotube de carbone selon la modulation des deux grilles. Le principe de fonctionnement du DG-MOSFET est d'utiliser la grille arrière

comme une pré-polarisation du transistor (figure II-3). Ensuite, la grille avant permet de bloquer ou laisser passer les porteurs désignés. Dans les CNTFET à double grille, le substrat en silicium joue un rôle important (celui de la grille arrière) en déterminant le type de porteur majoritaire ainsi que le courant ION du dispositif [16].

- Lorsque V_{gs-Si} est suffisamment négative (quelque centaine de mV), le dispositif fonctionne comme un FET de type P enrichi avec une tension de seuil négative et une pente sous le seuil.
- Lorsque V_{gs-Si} est positive (quelque centaines de mV), le dispositif fonctionne comme un FET de type N avec une tension de seuil positive.
- Lorsque la grille arrière est flottante (ou $V_{gs-Si}=0V$) le transistor est bloqué.

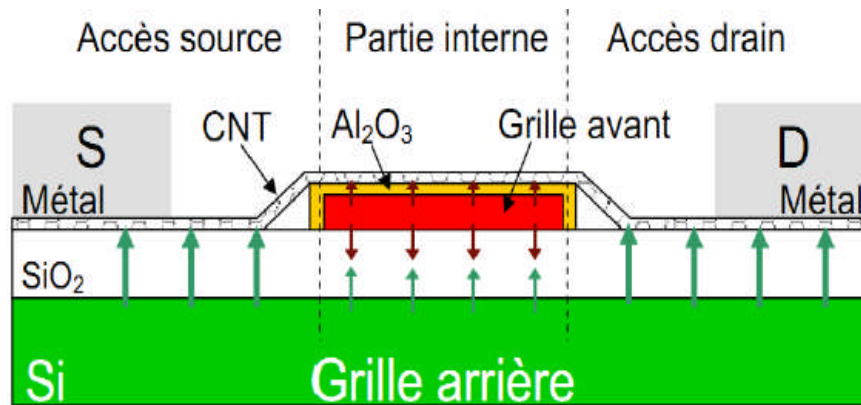


Figure II.4 Un DG-CNTFET avec l'effet de grille avant et arrière.

II.4.3 transistor à barrière Schottky (SB-CNTFET)

Le CNTFET à barrière Schottky (SB-CNTFET) est un transistor particulier, il présente une caractéristiques fortement ambipolaire par rapport au CNTFET conventionnel unipolaire ou faible ambipolaire. Il peuvent avoir des caractéristiques de type N ou P selon la tension de grille. Ceci limite l'utilisation de ce type de transistor dans le circuit logique conventionnel. De plus, le rapport I_{ON}/I_{OFF} est plutôt faible.

Ces barrières sont rendue rendues plus ou moins passantes aux porteurs selon la polarisation de grille [16].

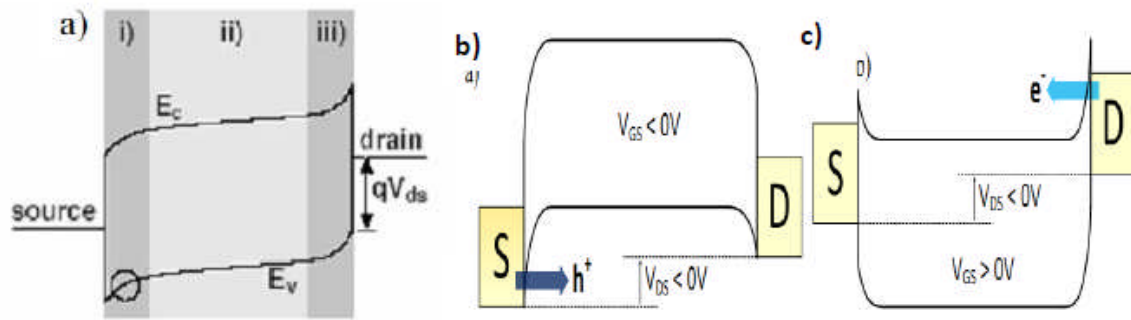


Figure II.5 **Diagramme de bande d'énergie $V_{DS} < 0$ et a), sans polarisation de grille, b) avec polarisation de grille négative et c) positive.**

Le principe de fonctionnement du SB-CNTFET est donc lorsque la grille n'est pas polarisée $V_{GS} = 0V$, les électrons ou les trous doivent franchir une barrière de potentiel pour passer, bien que les bandes d'énergie soient courbées par la présence d'une tension V_{DS} non nulle (figure II.5.a).

Lorsque $V_{GS} < 0V$, les bandes de conducteur et de valence du nanotube (partie ii de la figure II-4-a) sont alors suffisamment remontées, les trous peuvent alors passer à travers la barrière Schottky affiné :

Un courant par effet tunnel apparaît (figure II.5.b). De la même manière avec $V_{GS} > 0V$, le schéma de bande d'énergie de la partie interne du canal est abaissée et affine les barrières Schottky qui laissent alors passer les électrons par effet tunnel (figure II.5.c)

Des réalisations ont été démontrées à partir de ce transistor (SB-CNTFET), des conceptions de cellule de mémoire SRAM (Static Random Access Memory) en prenant quatre au six SB-CNTFET (4T ou 6T SRAM) ont été proposées [16].

II.4.4 Transistor à grille commandée optiquement (OG-CNTFET)

Un transistor à nanotube à commande optique (OG-CNTFET pour Optically Gated CNTFET) est basé sur le CNTFET conventionnel de type P avec un oxyde de grille en SiO_2 et une grille arrière. Il est couvert par un film mince de polymère photosensible induit un état modifié de la conductance du canal en nanotube (figure II.5). Le principe de fonctionnement de ce transistor est proche de celui des précédents :

Faire passer le courant entre les électrodes de source et de drain à travers un nanotube selon la quantité de lumière éclairant le nanotube et y générant des paires électrons-trous. Il est possible de choisir la longueur d'onde à laquelle le dispositif sera sensible en choisissant le polymère

photosensible adéquat. Sur ce type de transistor des caractérisation ont été proposé pour plusieurs application en nanoélectronique et nano photonique [16].

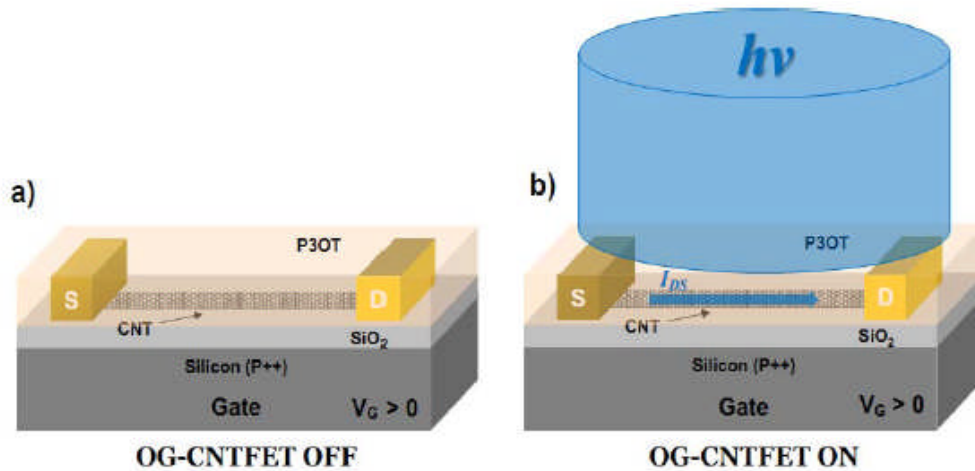


Figure II.6 Schéma d'un OG-CNTFET montrant une polarisation positive de la grille : a) état bloqué ; b) état passant.

II.5 Comparaison entre les dispositifs

Le tableau II-1 ci-dessous compare les 4 types de CNTFET présentés ci-dessus. Toutes les données présentées ont pour des dispositifs avec un seul nanotube. les longueur sont normaliser avec une longueur inferieur à 300nm, le transport est balistique.

Propriété	SB- CNTFET	PG-CNTFET	CNTFET-DG	C-CNTFET
Diamètre	1,4nm	1,4nm	1,4nm	1,6nm
t_{ox} (nm)	15	4	10	8
Matériau diélectrique	ZnO ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	HfO ₂
Metal S/D	Ti	Ti	Ti	Pd
Longueur du NT	260nm	600nm	600nm	80nm
V_{ds} (V)	0.5	0.5	0.6	0.5
I_{ON} (uA/um)	335	71	7	2500
I_{ON}/I_{OFF}	10^4	10^4	10^4	10^6
Pente sous le seuil S(mV/dec)	n-type 312 p-type 130	p-type 63	100lorsque V_{gsAl}	N type :80 P type :70
Transconductance A d'état passant	P type :1160	-	-	N type :6250 P type :3125
Tension de seuil	N type :0.3 P type :-0.5	P type :-0.5	N type :0.3 P type :-1	N type :-0.6 P type :0.5

Tableau II.1 comparaison des caractéristiques des différents types de CNTFET [16].

II.6 Géométries de grille du CNTFET

II.6.1 CNTFET à grille arrière

Le premier CNTFET à grille arrière a été fabriqué sur une plaquette de silicium oxydé avec épaisseur d'oxyde de silicium SiO_2 atteignant plusieurs dizaine de nanomètres (de 100 à 150nm). Un nanotube de carbone sera déposé entre deux métaux nobles qui présentent les électrodes préfabriquées par lithographie. En comparaison avec le MOSFET silicium, la plaquette de silicium qui fortement dopée, se comporte comme une grille arrière. Cette grille, dans le cas d'un substrat dopé permet d'appliquer un potentiel électrostatique sur l'ensemble de l'échantillon [14].

Avec cette structure on trouve quelque limitation comme la résistance élevée de contact en ($\geq 1\text{M ohm}$), transductance ($g_m=1\text{nS}$) et conduit de faible courant. Un autre inconvénient de la géométrie ouverte est que l'exposition des nanotubes de carbone à l'aire conduit à des caractéristiques de type P.

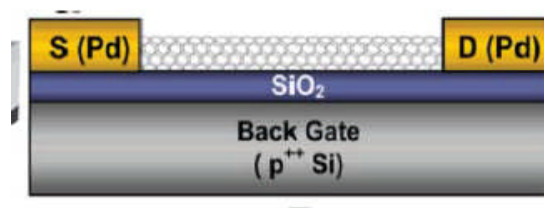


Figure II.7 Un exemple d'un CNTFET à grille arrière.

II.6.2 CNTFET à grille supérieure

Le dispositif de transistor CNT à grille supérieure technologiquement le plus compétents fabriqué à ce jour, il permet une comparaison plus directe avec les principales caractéristiques du FET à base de silicium (MOSFET). Figure II-7 montre la structure du transistor CNTFET à grille supérieurs avec ses caractéristiques [19].

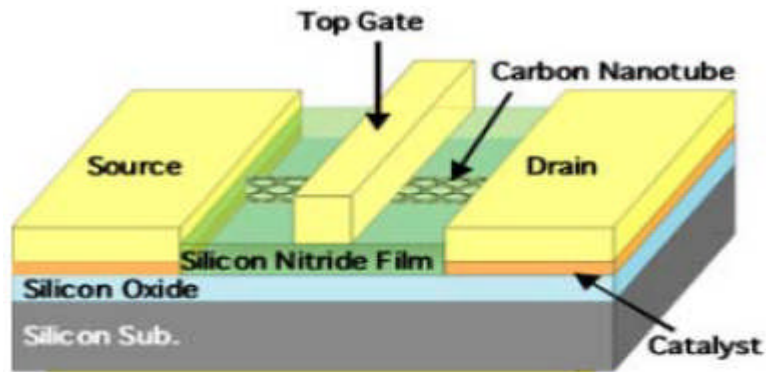


Figure II.8 *Exemple de grille supérieure d'un CNTFET.*

Les performances de cette conception se révèle être beaucoup mieux que le CNTFET à grille arrière. En raison de la géométrie du dispositif, le champ électrique augmente et la résistance de contact a été considérablement réduite en raison d'un choix différent de matériaux.

Cette structure grille supérieure permet la fabrication à la fois des dispositifs de type « N » ainsi que des dispositifs de type « P ». La tension de seuil a été abaissée par rapport à la grille arrière ce qui implique une augmentation de passage de courant dans le CNTFET. Le tableau II.2 présente une comparaison entre les deux structures :

Paramètres	CNTFET à grille arrière	CNTFET à grille supérieures
Tension de seuil V_{th}	-12V	-0.5
Courant de drain I_{DS}	Dans l'ordre de nano ampère	Dans l'ordre de microampère
Transductance	$\approx 1\text{Ns}$	$3.3\mu\text{S}$
I_{on}/I_{off}	10^5	10^6

Tableau II.2 *comparaison entre CNTFET à grille arrière et à grille supérieure [16].*

II.6.3 CNTFET Vertical (V-CNTFET)

Ce nanotube de carbone FET à grille verticale a été proposé par les chercheurs IBM technologie. Ils présentent un CNTFET alignés verticalement dans laquelle la source et le drain sont empilés verticalement. Par rapport aux transistors planaires, il a deux avantages évidents. Tout d'abord, le canal est posé à la surface du substrat, et la longueur de la couche diélectrique entre les électrodes source et drain.

De cette façon, il est plus facile de fabriquer des CNTFET avec des canaux courts et une longueur de canal inférieure à 20nm en utilisant la lithographie ordinaire [13].

Le concept de ce transistor vertical permet également d'avoir des densités plus élevées, car les zones de sources et de drain peuvent être disposées l'une au dessus de l'autre. La comparaison des transistors à base de CNT se limite pas aux dispositifs simulés pour 2016, mais peut être faite avec des modèles plus avancés dans les années avenir qui croient profondément que le V-CNTFET est un dispositif comparable à Si-MOSFET.

La comparaison entre un V-CNTFET et un MOSFET de l'année 2016 est donnée dans le tableau II.3 :

Caractéristique	V-CNTFET	MOSFET (2016)
V_{dd} (V)	0.4	0.4
Courant de conduction ($\mu A/\mu m$)	2500	1500
g_m ($\mu S/\mu m$)	15000	1000
t ($C_{grille} * V_{dd} / I_{dd}$)	0.08	0.15
S (mV/dec)	65	70
Fuite (Leakage) ($\mu A/\mu m$)	2.5	10
Effective t_{ox} (nm)	1	0.4-0.5

Tableau II.3 Comparaison du V-CNTFET et du MOSFET (2016) [16].

II.7 Paramètres physiques du CNTFET

Pour un transistor CNTFET les paramètres principaux sont celle du canal du transistor CNTFET. En fait ce sont les dimensions du nanotube (diamètre, longueur) et la capacité de la grille qui est déterminée aussi par l'épaisseur d'oxyde.

II.7.1 Capacité de grille

Les nanotubes étant similaire dans la plupart des dispositifs, la valeur de la capacité de grille dépend essentiellement de l'épaisseur de l'oxyde, de longueur de la grille et du type d'oxyde utilisé. Par contre quelque soit le type de grille les valeurs de capacités restent très petites et leurs mesure reste difficile [19].

La capacité de la grille (C_G) MIC (Métal-Isolateur-CNT) dépend de deux géométries différentes- planaire ou coaxial. Le CNTFET avec la grille planaire constitue la majorité des transistors à base de nanotube fabriqué jusqu'à aujourd'hui, en raison de leur simplicité et de leur compatibilité avec les technologies existantes. Dans le cas de la capacité MIC planaire (figure II.9) , le C_G est ainsi :

$$C_G = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ox}}{\ln((t_{ox})/d_t)} \quad \text{Eq.II.1}$$

Ou d_t est le rayon du nanotube, t_{ox} est la constante diélectrique.

Le CNTFET avec la grille coaxiale une forme idéal , il est spécialement intéressant parce que son homologue planaire [14]. Dans le cas de la capacité MIC coaxiale (Figure II.8.b) , le C_G (capacité de grille) est calculée comme suit :

$$C_G = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ox}}{\ln((t_{ox}+d_t)/d_t)} \quad \text{Eq.II.2}$$

Ou d_t est le rayon du nanotube, t_{ox} est l'épaisseur d'oxyde, ϵ_{ox} est la constante diélectrique, l est la longueur de la grille [16].

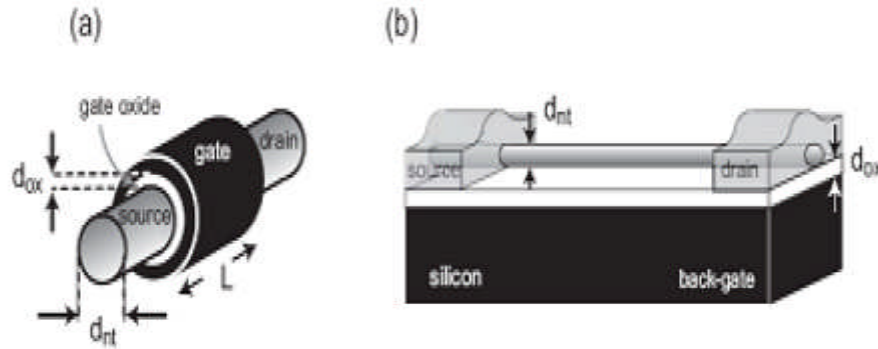


Figure II.9 Deux configuration du CNTFET : a) grille coaxial et b) grille plane.

II.7.2 Energie de la bande interdite (E_g)

Pour le CNTFET, il est possible de contrôler le gap énergétique par le diamètre. En effet pour les nanotubes semi-conducteurs, plus le diamètre est faible, plus les niveaux d'énergie autorisés sont éloignés des points « K » ce qui engendre une bande interdite E_g plus grande. Plus le diamètre du nanotube est petit, plus cet effet est marqué des calculs analytiques montrent que E_g est inversement proportionnelle au diamètre.

La tension de seuil des transistors étant dépendante du gap d'énergie du canal, on peut créer des CNTFET avec des tensions de seuils différentes, qui pourraient notamment être utilisés pour des circuits se composent avec des réseaux de CNTFET et des résistances [19].

II.7.3 Transport balistique

Le diamètre du nanotube est de l'ordre du nanomètre et de quelque centaine de nanomètres à quelque dizaine de micromètres de longueur. D'après le rapport de ses dimensions, le nanotube est considéré comme un élément monodimensionnel (1D). Ce confinement monodimensionnel n'autorise le déplacement des électrons que dans deux directions opposées. Pour des nanotubes dont la longueur du canal ne dépasse pas les 300nm. Il n'y a pas de dispersion des porteurs. La distance entre deux électrodes étant plus courte que la distance moyenne parcourue par l'électron entre deux collisions, le transport est dit balistique. Pour s'assurer que le CNTFET fonctionne en régime balistique, il faut satisfaire les hypothèses suivante [16] :

Les dispersions des porteurs sont supprimées dans le nanotube intrinsèque jouant le rôle du canal du transistor. les porteurs qui traversent le canal du drain à la source ne reviennent donc pas en arrière vers la source (cela signifie que la réflexion des porteurs au drain est négligée).

Le courant du drain devant rester constant le long du canal, il est calculé au début du canal avec le potentiel V_{CNT} (potentiel de surface de nanotube de carbone). Au début du canal, les électrons venant de la source remplissent des états « +K » et les électrons venant du drain remplissent des états « -K » (voir figure II.9). le courant I_{ON} est limité par la somme des charges introduite dans le canal par la grille. De plus, le courant du drain est exprimé par les paramètres physique du CNTFET (par exemple, la longueur et le diamètre du nanotube, correspondant à la longueur et à la largeur du canal du transistor traditionnel). le courant du drain n'est pas dépendant de la mobilité des porteurs [16].

Le potentiel V_{CNT} est défini par quatre capacités C_D , C_S , C_Q (capacité quantique) et en particulier C_G . Car la capacité totale de la grille du CNTFET (C_T) se compose de deux C_Q et C_G intrinsèque en série, ce C_T est donc calculé :

$$1/C_T = 1/C_G + 1/C_Q \quad \text{Eq.II.3}$$

En effet, C_G étant beaucoup plus grande que les trois autres capacités, la capacité totale C_T du CNTFET est inférieure à (ou limitée supérieurement à) la capacité quantique C_Q particulièrement en cas d'utilisation d'un matériau diélectrique de grille élevée « high-k » [20].

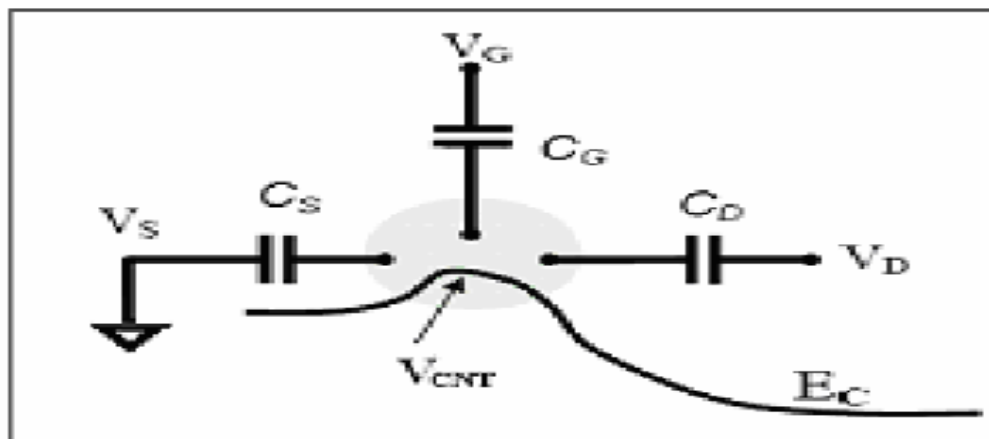


Figure II.10 les capacités contribuent à définir le potentiel de surface du nanotube de carbone V_{CNT} .

II.7.4 Mobilité

La mobilité est la conductance par charge élémentaire. Elle détermine la vitesse de déplacement des porteurs dans le semi-conducteur. Pour atteindre de meilleures performances

(essentiellement en termes de vitesse de transport et de commutation), un canal court et une grande mobilité sont nécessaires. Les nanotubes de carbone présentent généralement de très petits diamètres (permettant un excellent contrôle électrostatique du canal) sans subir de dégradation de la mobilité : ceux-ci constituent donc des candidats très prometteurs pour dépasser les limites des dispositifs conventionnels à l'échelle nanométrique.

Des nanotubes de carbone semi-conducteur avec une longueur d'environ des dizaines de micromètres, des contacts électrique ohmiques pour assurer que la mesure de résistance correspond à la résistance du nanotube. Dans ces longs transistors, le transport des porteurs s'effectue par diffusion, ce qui permet la mesure de la mobilité intrinsèque du nanotube semi-conducteur. La mobilité intrinsèque à température ambiante a été mesurée à $79\,000\text{cm}^2/\text{VS}$ [19].

Cette valeur dépasse toutes les valeurs de mobilité connues des semi-conducteurs et ouvre une voie prometteuse pour l'utilisation des nanotubes les transistors à haute fréquence. Dans les capteurs chimiques et biologiques.

II.8 Comparaison entre le CNTFET et le MOSFET

Nous allons donner une brève comparaison entre la performance du CNTFET et MOSFET.

- En cas de MOSFET la commutation se produit par modification de la résistivité de canal, mais pour le CNTFET la commutation se produit par modulation de la résistance de contact.
- CNTFET est capable de délivrer des courants d'entraînement trois à quatre fois plus élevé que le MOSFET à une surmultiplication de 1V.
- CNTFET a une transconductance environ quatre fois plus élevée par rapport au MOSFET
- La vitesse moyenne du porteur dans le CNTFET est presque le double de celle du MOSFET.

L'avantage de performance courant I_{ON} du CNTFET est soit en raison de la capacité de grille élevée ou en raison de l'amélioration de transport dans le canal. L'amélioration de la vitesse dans le canal pour le CNTFET est due à l'accroissement de la mobilité et de la structure de bande de CNTFET [14] [16]. Le tableau II.4 présente quelques propriétés des transistors CNTFET et MOSFET :

	CNT-FET 1 μ m	CNT-FET 1.4 μ m	CNT-FET 3 μ m	MOSFET 100nm	MOSFET 1.4nm
Longueur de grille (nm)	1030	1400	2000	130	14
Courant I_{ON} (mA/ μ m)	0.7	3	3.5	1.4	0.4
Courant I_{off} (nA/ μ m)	7	7	1	3	100
Transductance (mS/ μ m)	200	6700	6000	1000	360
Pente sous le seuil (mV/decade)	700	80	70	90	70
Resistance "ON" (Ω / μ m)	1400	360	340	2600	4200

Tableau II.4 *Comparaison entre CNTFET et MOSFET pour plusieurs longueurs de grilles.*

II.9 Conclusion

Nous avons présenté et d'écrit brièvement le CNTFET avec les différentes polarisations de type P ou N, puis nous avons cité quelques types de transistors CNTFET tel que le SB-CNTFET et C-CNTFET avec un résumé sur le principe de fonctionnement de chaque composant.

Nous avons aussi présenté les principes géométriques qui dépendent du CNTFET, basé sur la description de grille, qui sera utilisé pour mettre en œuvre des moyens d'évaluation des circuits à base de CNTFET.

En particulier, dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés physique et caractéristique particulières du CNTFET qui ouvrent des perspectives nouvelles.

Chapitre III

**Modélisation compact
du transistor à
nanotubes de
carbone « CNTFET »**

III.1 Introduction

Avec l'avancée actuelle de l'outil informatique aussi bien sur le plan de la rapidité de traitement de l'information que sur le plan de la capacité de stockage des données, la simulation numérique basée sur la modélisation physique peut être utilisée pour prévoir et assurer une meilleure compréhension d'un phénomène physique. Cette approche devient plus souhaitable pour comprendre les phénomènes physiques résultant de la diminution des dimensions du dispositif.

Les propriétés électroniques atypiques des nanotubes promettent de nombreuses applications en nanoélectronique. Dans ce but, il est important de comprendre les régimes de conduction pilotant le transport électronique au sein de ce nano-objet. Lorsque les dimensions du composant diminuent, l'ensemble des propriétés physiques du système se discrétisent. Les niveaux d'énergie propres de la structure se quantifient et une connaissance précise de la structure électronique devient indispensable. Ces dernières années de nouvelles méthodes sont apparues liées à des développements théoriques et analytiques [16].

Dans ce chapitre est décrite la modélisation compacte physique et électrique du transistor à nanotube de carbone à barrière Schottky aussi appelé SB-CNFET pour (Schottky Barrier CNTFET). La modélisation décrite ci-après est compacte, dans l'objectif de simuler des circuits utilisant de nombreux transistors (jusqu'à plusieurs centaines) en un temps « raisonnable » (10-20 minutes pour de gros circuits). Afin de pouvoir s'adapter aux dispersions technologiques de ce transistor, la modélisation est basée sur la physique. Enfin, un schéma électrique équivalent du modèle est donné [14].

Avant de décrire les équations de la charge et du courant, le fonctionnement global de ce transistor est présenté.

III.2 Mise en évidence des barrières Schottky

Un transistor à nanotube de carbone est formé de deux contacts de type métal/nanotube côté source et drain. La nature du métal peut être soit en aluminium (Al), titane (Ti), palladium (Pd), ou scandium (Sc). Le platine (Pt) est plus rarement utilisé puisqu'il présente une mauvaise mouillabilité avec les nanotubes de carbone, c'est-à-dire il présente une faible énergie d'adhésion.

Au niveau des interfaces formées par le contact métal et le nanotube semiconducteur, des barrières de potentiel Schottky sont formées et s'opposent à la transition des porteurs entre source et drain via le canal nanotube. Ainsi, ces barrières ont un rôle important dans la détermination du courant puisqu'elles déterminent le nombre des porteurs présents côté métal et transmis dans le canal.

Ainsi, pour mettre en évidence la présence de ces barrières Schottky dans les transistors à nanotube de carbone, Freitag et al. ont observé ces barrières en employant deux différents procédés de microscopie : la microscopie à grille ajustable (ou en anglais : (Scanning Gate Microscopy comme SGM) et la microscopie de photo-courant à balayage laser (ou en anglais : Scanning PhotoCurrent Microscopy comme SPCM). Dans ces expériences de microscopie, les nanotubes de carbone utilisés ont un diamètre de 1–2nm et ils sont synthétisés par CVD du substrat en silicium avec une couche de sur 100–200nm d'oxyde. Selon Freitag et al.[7], pour assurer une bonne mouillabilité du métal de type Palladium (Pd) des accès source et drain aux nanotubes de carbone, une fine couche ($\sim 7\text{\AA}$) de Titane (Ti) a été ajoutée. Sur la figure III.1, à fur et à mesure que la polarisation sur la grille V_G augmente (de 1V jusqu'à 4V), les séquences d'images issues de la microscopie de photo-courant à balayage laser montrent la formation d'une barrière Schottky au niveau de l'interface métal du contact/nanotube de carbone. Pour $V_G=1\text{V}$, une barrière de potentiel égale à l'énergie de la bande interdite s'oppose au passage des électrons dans le nanotube et on remarque également la formation d'une barrière de potentiel pour les trous (couleur bleue foncée) dont l'épaisseur est inférieure à la limite de la résolution optique de l'appareil ($\sim 400\text{nm}$). En augmentant V_G jusqu'à 2,6V, les images montrent la formation d'une barrière Schottky vue pour les électrons (couleur jaunâtre) et s'étendant dans la zone du canal. Le transport de charge s'effectue donc majoritairement par des trous (transport de type P) [14].

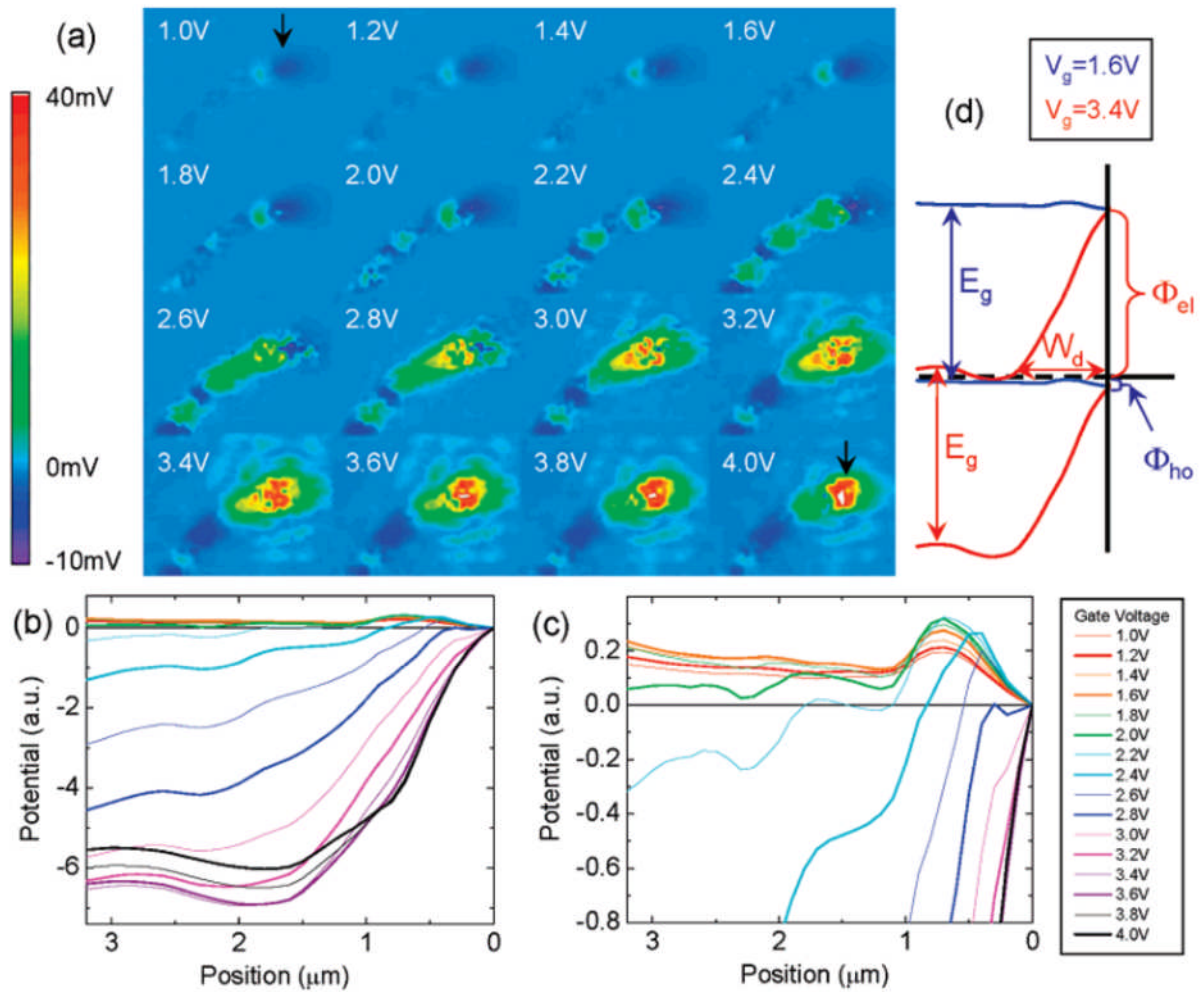


Figure III.1 *Mise en évidence des barrières Schottky : (a) images de microscopie de photocourant à balayage laser (puissance du laser 900μW), (b) variation de la hauteur de la barrière Schottky suivant l'axe du nanotube de carbone pour différentes polarisations de la grille VG allant de 1V jusqu'à 4V par pas de 0.2V, (c) agrandissement du graphe précédent dans la zone de contact, (d) profil de bande d'énergie de la 1ère sousbande de conduction et de valence pour deux polarisations VG, 1.6V et 3.4V. La bande interdite E_g a été fixée de telle manière que le niveau de Fermi métal s'aligne avec le haut de la 1ère sous-bande de valence pour $V_G=1.6V$ et le bas de la 1ère sous-bande de conduction pour $V_G=3.4V$.*

Pour des V_G supérieures à 3V et jusqu'à 3,2V, une tension de 40mV est mesurée (couleur rouge) et correspond à la hauteur maximale de la barrière Schottky qui s'affine et permet ainsi la transition des électrons dans le canal. Ce faisant, le canal nanotube conduit (bloque) de plus en plus d'électron (de trous) ce qui donne lieu à un transport de type N (P). Ce comportement est caractéristique des transistors à barrières Schottky et se manifeste lorsque le niveau de Fermi atteint le haut (bas) de la bande de valence (conduction). Dans le cas présent, cela correspond aux tensions comprises entre $V_G=1,6V$ et $V_G=3,4V$.

La différence entre ces deux tensions de seuil est égale à 4 fois l'énergie de la bande interdite ce qui correspond à un facteur d'efficacité de la grille d'environ 0,25. Sur la figure III.1.b, présentation l'évolution du potentiel au niveau de l'interface métal/nanotube semiconducteur par rapport au potentiel de la grille V_G . On remarque que la hauteur de la barrière Schottky augmente en valeur absolue avec le potentiel V_G . La figure III.1.c est l'agrandissement de l'échelle du potentiel de la figure précédente III.1.b. elle détaille les courbures de potentiel positif dans la zone comprise entre 300nm–1.1µm du nanotube pour des polarisations V_G allant de 1V jusqu'à 2,6V. Ce mécanisme résulte de l'existence des états localisés dans la bande interdite, à proximité de l'interface métal semiconducteur (ou en anglais Metal-Induced Gap States comme MIGS) qui créent des dipôles à l'interface. Récemment, des travaux ont montré que ces MIGS n'influence pas énormément sur les hauteurs des barrières Schottky. A cet effet, on montrent que pour un nanotube de chiralité (13, 0) mis en contact avec un métal en Pd ce qui résulte en une hauteur de barrière Schottky de 0,28eV pour les trous (transport de type P), les MIGS font diminuer cette barrière de seulement 0.06eV.

Dans le cas semi-conducteurs classiques, la hauteur de la barrière Schottky est quasi indépendante du travail de sortie du métal et qui dépende plutôt du phénomène de la courbure du niveau de Fermi (ou en anglais : Fermi-level pinning). Ce phénomène résulte dans la présence des MIGS. Dans le cas des nanotubes de carbone, ces MIGS sont très faibles et la hauteur de barrière dépend du travail de sortie du métal. De ce fait, il est nécessaire d'utiliser des métaux dont le travail de sortie est élevé (faible) pour diminuer la hauteur de la barrière Schottky vue par les trous (électrons) et obtenir des transistors unipolaire de type P (N) [14].

III.3 Réalité technologique de la formation des barrières Schottky

III.3.1 Nature du métal

Les hauteurs des barrières Schottky sont faiblement contrôlées par le phénomène de "pinning" du niveau de Fermi en surface du contact et dépendent fortement de la différence de travail de sortie entre le nanotube de carbone semi-conducteur et le métal. Ainsi, des contacts réalisés avec des métaux dont le travail de sortie est élevé (par exemple le Pd avec un travail d'extraction 5,22eV–5,6eV) donnent lieu à un transport de type P, alors que des contacts avec des métaux de très faible travail de sortie (comme le Gd avec un travail d'extraction 2,9eV) conduisent à un transport de type n. Pour les métaux dont le travail de sortie est intermédiaire (comme le Al avec un travail d'extraction 4,06eV–4,26eV), on obtient un régime de transport ambipolaire incluant à la fois les deux types n et p.

III.3.2 Epaisseur d'oxyde effective EOT et permittivité diélectrique

La largeur maximale de la barrière Schottky aux contacts, ne dépend pas seulement de la permittivité de l'oxyde de la grille ϵ_{OX} mais dépend plutôt de l'épaisseur d'oxyde de grille EOT (comme Equivalent Oxide Thickness). Cette hypothèse est fausse puisque l'épaisseur de la barrière dépend à la fois de l'EOT et de ϵ_{OX} . D'ailleurs, ce sont ces deux paramètres technologiques qui déterminent le contrôle électrostatique du transistor et conditionnent ainsi la position des bandes d'énergies dans le canal, via l'efficacité de la commande électrostatique par la grille : la barrière Schottky est d'autant plus fine que la permittivité est forte ou que l'épaisseur de l'oxyde est fine ($\epsilon_{SrTiO3}=175$).

À cette fin, et en essayant toujours d'optimiser les performances des CNTFETs, de nombreux travaux ont fait appel à des oxydes de forte permittivité et de faible épaisseur tel le cas de avec un diélectrique en ZrO_2 de permittivité égale à 25 ou bien avec un diélectrique en HfO_2 de permittivité égale à 11. En général, l'utilisation d'un isolant de forte permittivité vise à améliorer la transconductance des CNTFETs, d'une part par un contrôle électrostatique plus efficace du potentiel dans le canal et, d'autre part, à tension de grille constante, par diminution de l'épaisseur maximale de la barrière [14].

III.3.3 Longueur de grille

Du fait de la nature fortement balistique du transport électronique dans le canal, une longueur de grille inférieure à 150nm – 200nm n'influence pas sur les performances électriques du SB-CNTFET et ne modifie pas les dimensions des barrières Schottky. De ce fait, dans le cas où la longueur de la grille est inférieure à ~15nm, l'effet tunnel résonant entre les deux barrières Schottky favorise l'augmentation du courant.

III.3.4 Diamètre du nanotube de carbone

Il a été montré que la hauteur de la barrière Schottky dépend du diamètre du nanotube de carbone semi-conducteur. En effet, cette barrière est réduite dans le cas des grands diamètres de nanotube, c'est-à-dire à faible bande interdite.

La figure III.2, représente la variation du courant Ion et de la hauteur de la barrière Schottky en fonction du diamètre du nanotube selon trois types de métaux pour les contacts source et drain. Les traits représentent des courbes de tendance pour les valeurs mesurées (en symboles).

Sur cette courbe on remarque qu'un contact formé entre un métal en Pd et un nanotube de carbone de diamètre supérieure à $\sim 1,2\text{nm}$ (cercle en noir) aboutisse à une très faible barrière Schottky et à un bon niveau du courant I_{ON} .

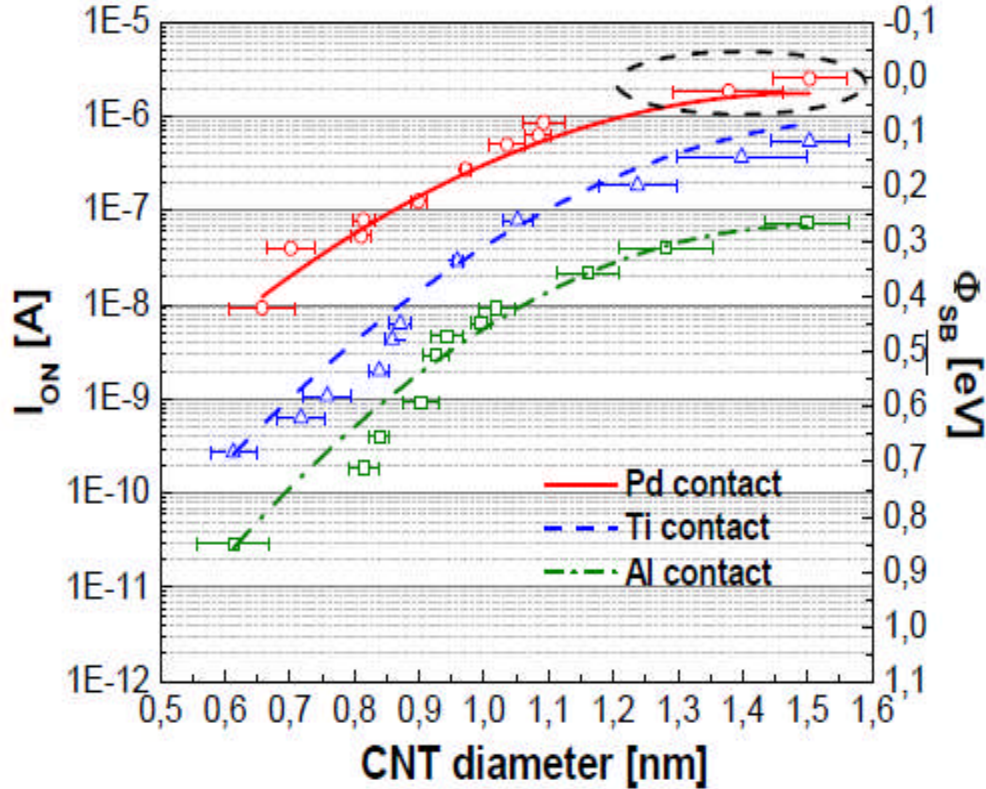


Figure III.2 *courant I_{ON} et hauteur de la barrière Schottky en fonction du diamètre du nanotube pour 3 métaux : Palladium(PD), Titane (Ti), Aluminium (Al).*

III.4 Modélisation compact du transistor à contacte Schottky

III.4.1 Calcul de densité de charge

Pour décrire la densité de charge dans le SB-CNTFET, la relation de dispersion $E(k)$ non parabolique a été utilisée [7] :

$$(E - sbbd_{[p]})(1 + \alpha_{[p]}(E - sbbd_{[p]})) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{[p]}^*} \quad \text{Eq.III.1}$$

Les facteurs de non parabolicité $\alpha_{[p]}$, les masses effectives $m_{[p]}^*$ ainsi que les bas de sousbandes correspondants $sbbd_{[p]}$ sont calculés en utilisant la méthode de "zone folding" à partir du modèle numérique détaillé dans le tableau III.1 suivant :

$sbbd_{[1]}(n) = \frac{\pi\gamma}{\sqrt{3n}},$ $m_{[1]}^*(n) = \frac{3m_e}{n\gamma} \left(1 - 0,0044n + \frac{gcd(n+1;3) - gcd(n-1;3)}{n} \right),$ $\alpha_{[1]}(n) = \frac{3}{2\gamma} (0,3n - 1).$
Sous-bande 2
$sbbd_{[2]}(n) = 2sbbd_{[1]}(n) \left(1 + \frac{gcd(n+1;3) - gcd(n-1;3)}{3n} \right),$ $m_{[2]}^*(n) = m_{[1]}^*(n) \left(\frac{m_{[2]}^*(n)}{m_{[1]}^*(n)} + \frac{5}{n} \left[\frac{m_{[2]}^*(n)}{m_{[1]}^*(n)} [gcd(n-1;3) - 1] - [gcd(n+1;3) - 1] \right] \right),$ $\alpha_{[2]}(n) = \frac{3}{2\gamma} (0,3n - 1).$
Sous-bande 3
$sbbd_{[3]}(n) = 4sbbd_{[1]}(n) \left(1 + \frac{2gcd(n+1;3) - 3gcd(n-1;3)}{4n} \right),$ $m_{[3]}^*(n) = m_{[1]}^*(n) \left(\frac{m_{[3]}^*(n)}{m_{[1]}^*(n)} + \frac{5}{n} \left[\frac{m_{[3]}^*(n)}{m_{[1]}^*(n)} [gcd(n-1;3) - 1] - [gcd(n+1;3) - 1] \right] \right),$ $\alpha_{[3]}(n) = \frac{3n^2}{300\gamma}.$

Tableau III.1 *Modèle numérique de calcul des facteurs de non-parabolicité $\alpha[p]$, des masses effectives $m^*[p]$ pour les 3 premiers bas de sous-bandes correspondants $sbbd[p]$ en fonction de la chiralité pour des nanotubes zig-zag $(n, 0)$. γ correspond à la l'énergie de liaison entre deux atomes de carbone (interaction du plus proche voisin) varie de 2,4 à 3,14eV selon les paramètre trouvés dans la littérature.*

A partir de la relation de dispersion de l'équation III.1, la densité d'état peut être calculée pour chaque sous-bande comme suit :

$$D(E, [p]) = \frac{1}{\pi\hbar} \frac{\sqrt{m_{[p]}^*} (1 + 2\alpha_{[p]}(E - sbbd_{[p]}))}{\sqrt{2(E - sbbd_{[p]}) (1 + \alpha_{[p]}(E - sbbd_{[p]}))}} \quad \text{Eq.III.2}$$

D'autre part, on rappelle que la densité de charge dans le SB-CNTFET résulte du produit de la densité d'état $D(E, [p])$ avec la distribution de Fermi $f(E)$ et la fonction de transmission totale $T_T(E)$. En utilisant l'approche basée sur la notion de la hauteur de la barrière Schottky effective Φ_{SB}^{eff} , l'équation III.3 de la densité de charge [14] :

$$Q_{S,D} = \frac{2M\hbar}{q} \sum_p \int_{E_0}^{\infty} D(E) T_T(E) f(E - qV_{S,D}) dE \quad \text{Eq.III.3}$$

Devient :

$$Q_{S,D}(V_{S,D}, sbbd_{[p]}, \phi_{SB-S,D}^{eff}) = \frac{2Mh}{q} \sum_p \int_{V_{BL}}^{V_{BH}} D(E) f(E - qV_{S,D}) dE \quad \text{Eq.III.4}$$

Où V_{BL} et V_{BH} sont les bornes d'intégration basse et haute définies comme :

$$V_{BL} = \max(\phi_{SB-S,D}^{eff} - V_{S,D}, sbbd_{[p]}) \text{ et } V_{BH} \rightarrow \infty \quad \text{Eq.III.5}$$

III.4.2 Calcul du courant

Le courant de drain dans un SB-CNTFET est calculé en ayant recours à l'équation de Landauer [21] qui est :

$$I_{DS} = \frac{2e}{2\pi} M \left[\int_0^\infty v(k) f_s(k) T_s(E) dk - \int_{-\infty}^0 v(k) f_D(k) T_D(E) dk \right] \quad \text{Eq.III.6}$$

Avec :

- $2/2 \pi$ est la densité d'états en 1D dans l'espace réciproque (2 pour le spin et 2π pour le "volume" de la case quantique en 1D).
- M est le nombre de modes transverses occupés (générés par la présence d'un potentiel transverse au déplacement des électrons).
- $v(k)$ est la vitesse des porteurs.
- f_s et f_D sont les fonctions de distribution de la source et du drain respectivement.
- $T_s(E)$ est la fonction de transmission d'un porteur de la source vers le nanotube.
- $T_D(E)$ la fonction de transmission d'un porteur du drain vers le nanotube.

En supposant un canal monodimensionnel en "1D" et qui est caractérisé par un transport balistique entre source et drain.

Ainsi en utilisant la formulation de la barrière de Schottky effective, on écrit :

$$I_{DS} = \frac{2e}{h} M \sum_{p=1}^{nb-bands} \left[\int_{\phi_{SB}^{eff}}^\infty f_s(E) dE - \int_{\phi_{SB}^{eff}}^\infty f_D(E) dE \right] \quad \text{Eq.III.7}$$

$$I_{DS} = \frac{4e}{h} \sum_{p=1}^{nb-sbbd} \left[\int_{\phi_{SB}^{eff}}^{\infty} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - e(V_{CNT} - V_S)}{k_B T}\right)} dE - \int_{\phi_{SB}^{eff}}^{\infty} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - e(V_{CNT} - V_D)}{k_B T}\right)} dE \right] \quad \text{Eq.III.8}$$

Cette équation du courant est intégrable via la formule :

$$\int \frac{dE}{1 + b \exp \frac{E}{k_B T}} = k_B T \left[\frac{E}{k_B T} - \ln(1 + b \exp \frac{E}{k_B T}) \right] = k_B T \left[-\ln(\exp \frac{-E}{k_B T} + b) \right] \quad \text{Eq.III.9}$$

Ce qui permet d'avoir, après simplification, un résultat analytique pour le courant de drain dans le SB-CNTFET :

$$I = \frac{4ek_B T}{h} \sum_{p=1}^{nb-sbbd} \left[\ln \left(1 + \exp \frac{eV_s + \phi_{SB-S}^{eff} - sbbd_{[p]}}{k_B T} \right) - \ln \left(1 + \exp \frac{eV_D + \phi_{SB-D}^{eff} - sbbd_{[p]}}{k_B T} \right) \right] \quad \text{Eq.III.10}$$

Avec Φ_{SB-S}^{eff} et Φ_{SB-D}^{eff} les hauteurs de barrières effectives de la source et du drain respectivement.

III.4.3 Circuit électrique équivalent

Le circuit électrique équivalent pour le SB-CNTFET de la figure III.3 ci-dessous découle des équations de la densité de charge source Q_{QS} et drain Q_{QD} et du courant de drain.

- C_{INS} : capacité de l'oxyde de grille C_{INS} , dépendante de la géométrie et de la constante diélectrique de l'isolant
- V_{FB} : tension de bandes plates V_{FB} qui prend en compte la différence entre le travail d'extraction du métal et l'affinité électronique du nanotube,
- R_G : résistance d'accès de grille,
- R_S et R_D : résistance d'accès de source et drain,
- C_{SE} et C_{DE} : capacités électrostatiques qui représentent la variation de charge aux interfaces nanotubes dopé/nanotube intrinsèque,

Le régime AC est obtenu du circuit équivalent de [18] et l'influence de la barrière Schottky est introduite dans le calcul du courant I_{DS} et des densités de charge Q_{QS} et Q_{QD} .

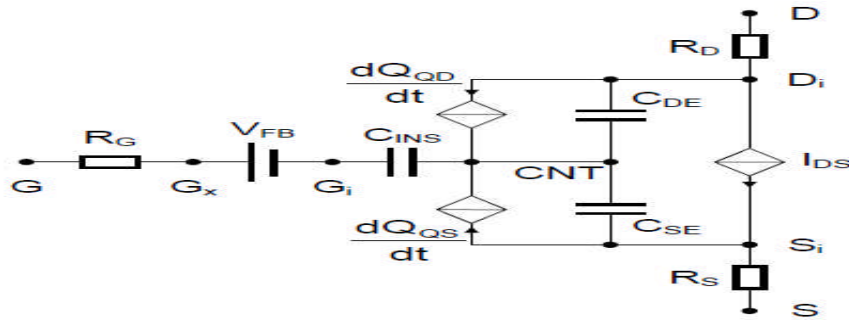


Figure III.3 Schéma équivalent grand signal d'un modèle du transistor C-CNTFET.

Les figures III.4 et III.5 montrent le résultat final du courant analytique du modèle compact pour un SB-CNTFET avec un nanotube de carbone de chiralité (19, 0) (band gap $E_g=0,55\text{eV}$) et une hauteur de barrière Schottky Φ_{SB} égale à la moitié de la bande interdite ($\Phi_{SB}=0,275\text{eV}$) avec $V_{fb}=0\text{V}$. Les dimensions de la barrière Schottky ont été fixées comme suit : $\lambda_{Schottky}=5\text{nm}$ et $d_{tunnel}=2\text{nm}$.

Plus précisément, la figure 2.23 montre un réseau de caractéristiques I_D vs. V_{GS} en échelle linéaire (a) et en échelle logarithmique (b) pour V_{DS} de 0,1 à 0,9V par pas de 0,1V. On remarque que la caractéristique est ambipolaire (courant d'électrons et de trous) avec un minimum de courant à $V_{GS}=V_{DS}/2$.

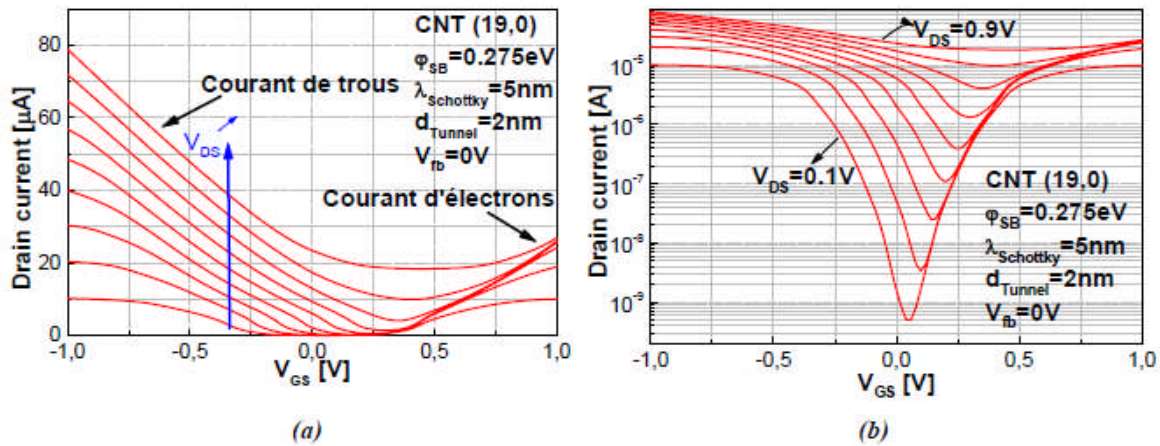


Figure III.4 Caractéristiques simulées I_D vs V_{GS} du modèle compact pour 9 valeurs de $V_{DS}=[0,1 ; 0,9]$ avec $\Phi_{SB}=E_G/2=0,275\text{eV}$, $\lambda_{Schottky}=5\text{nm}$, $d_{tunnel}=2\text{nm}$ et $V_{FB}=0$.

Ceci est parfaitement cohérent avec le fait qu'à cette polarisation, le transistor a une structure de bande d'énergie symétrique entre bande de conduction et bande de valence ce qui implique des contributions à part égale des porteurs électrons et des porteurs trous dans le courant circulant entre drain et source.

La figure III.5 présente un réseau de caractéristiques I_D vs. V_{DS} en fonction de V_{GS} (de 0 à 0,9V par pas de 0,1V). Sur cette figure, un courant de trous se manifeste après saturation du

courant pour des polarisations en V_{DS} supérieures à V_{GS} . Dans ces conditions, une barrière Schottky se crée dans la bande de valence du côté du drain et un courant de trou commence à se rétablir empêchant ainsi la saturation du transistor.

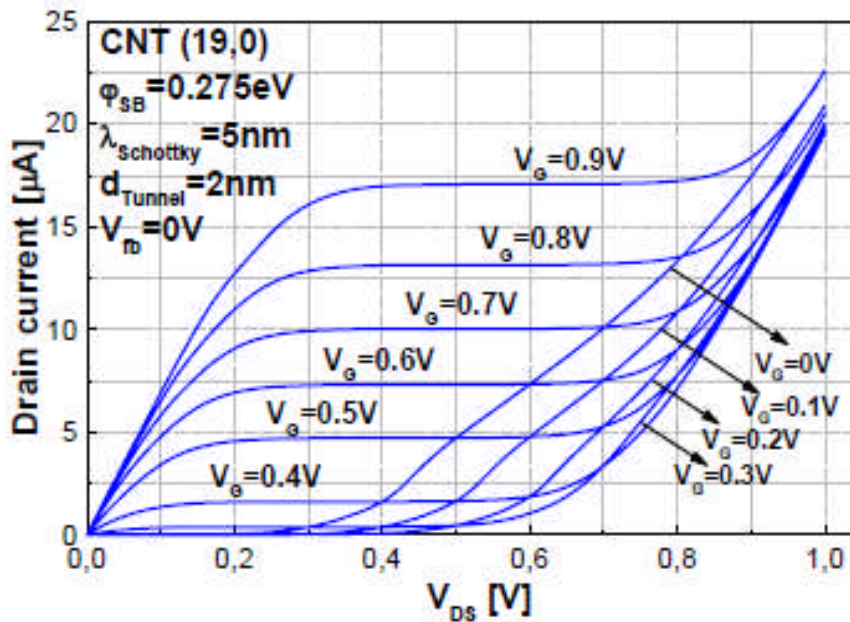


Figure III.5 Caractéristiques simulées I_D vs V_{DS} du modèle compact pour 10 différentes valeurs de $V_{DS} = [0 ; 0,9]$.

III.5 Etudes d'influence des paramètres du modèle

III.5.1 Influence de la barrière Schottky

La hauteur de la barrière Schottky dépend essentiellement de la différence de travail de sortie entre le métal et le nanotube de carbone puisque le phénomène de blocage de niveau de Fermi en surface a peu d'impact. De ce fait, des contacts formés par des métaux dont le travail de sortie est élevé (comme le Pd ou le Ti) donnent lieu à des barrières Schottky du côté de la bande de valence et donnant naissance à un transport de type p. A l'inverse, des contacts formés par des métaux dont le travail de sortie est faible donnent lieu à des barrières Schottky du côté de la bande de conduction et donne naissance en un transport de type n. Ainsi un contact est formé par un métal dont le travail de sortie conduit à un régime de transport ambipolaire [14].

La figure III.6 montre l'influence de la hauteur de la barrière Schottky sur la caractéristique I_D vs V_{GS} pour trois valeurs de Φ_{SB} ; 300meV, 500meV et 600meV à $V_{DS}=0,1V$. En effet, en augmentant la hauteur de la barrière, la pente sous le seuil se dégrade et passe de 135mV/décade pour $\Phi_{SB}=300meV$ à 233mV/décade pour $\Phi_{SB}=600meV$.

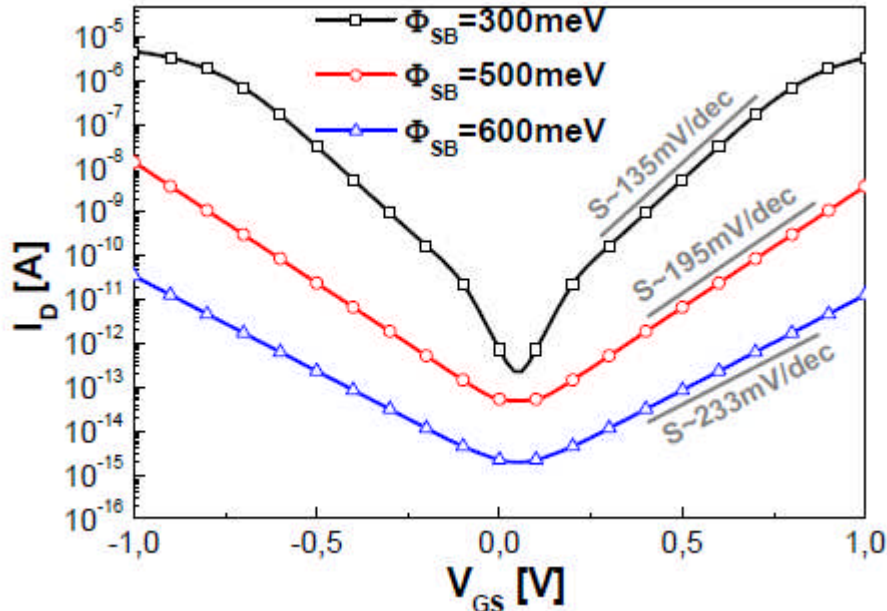


Figure III.7 *Caractéristiques I_D vs. V_{GS} d'un SB-CNTFET formé par un nanotube zigzag (11, 0) et pour trois valeurs de la hauteur de la barrière Schottky ($\Phi_{SB}=0,3$; 0,5 et 0,6 eV) en échelle logarithmique à $V_{DS}=0,1V$, $L=100nm$.*

D'autre part, le courant I_{on} se dégrade aussi de 6 décades en passant d'une hauteur de barrière nulle à une hauteur de barrière égale à 0,6 eV comme le montre la figure III.8.

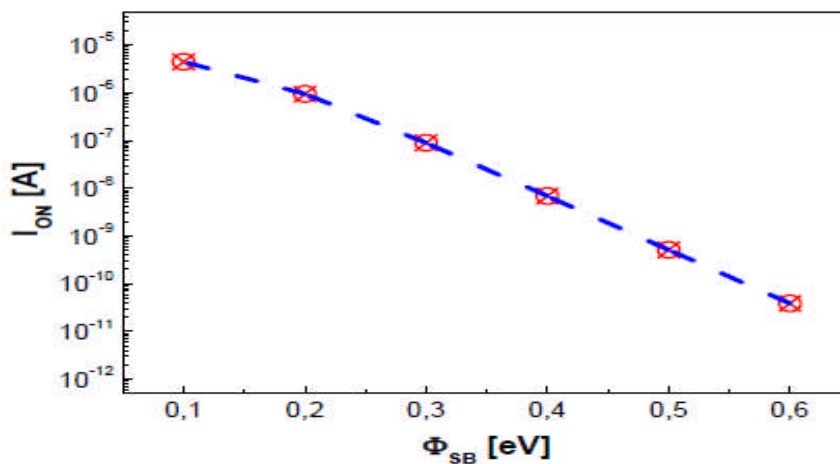


Figure III.8 *Dépendance du courant I_{on} avec la hauteur de la barrière Schottky à $V_{DS}=400mV$.*

III.5.2 Influence du diamètre du nanotube

Comme il est déjà établi précédemment, des nanotubes de carbone de grands diamètres (faible bande interdite) donnent lieu à de faible hauteur de barrière Schottky et vis-versa.

Pour vérifier la cohérence de notre modèle avec cette hypothèse, on a simulé des caractéristiques électriques I_D vs. V_{GS} pour trois différentes polarisations en V_{DS} (100, 400 et 600mV) et ce pour deux chiralité de nanotube (19, 0) et (10, 0). La figure III.9 montre le résultat de ces simulations pour deux hauteurs de barrières Schottky mi-gap, c'est-à-dire $\Phi_{SB}=0,275$ eV pour (19, 0) et $\Phi_{SB}=0,55$ eV pour (10, 0).

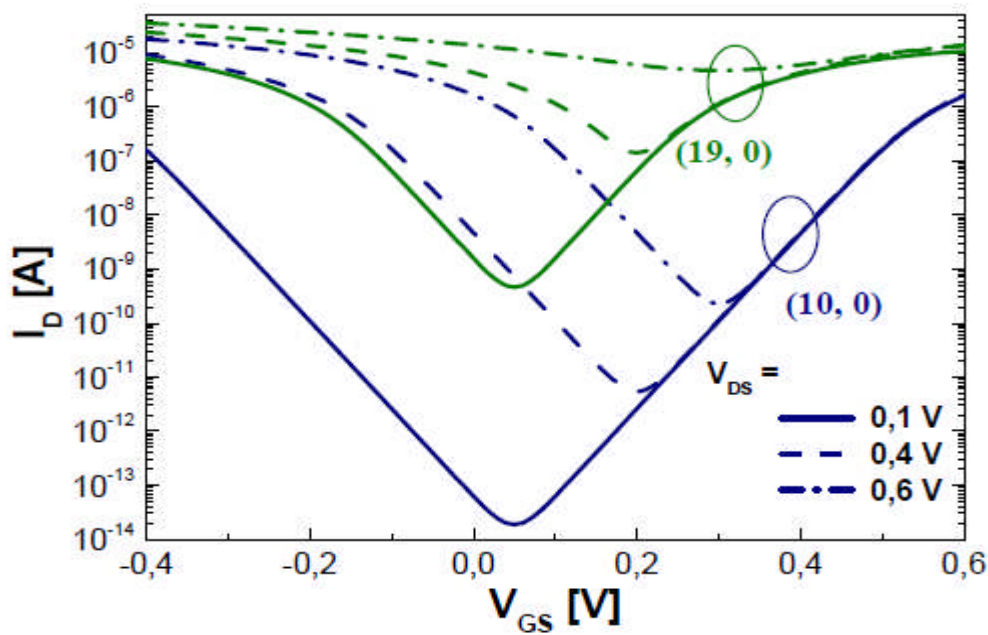


Figure III.9 *Influence du diamètre sur les caractéristiques I_D vs V_{GS} à $V_{DS}=0,1$ 0,4 et 0,6V pour deux chiralités du nanotube de carbone (19, 0) en vert et (10, 0) en bleu. Les hauteurs de barrières sont choisies égales à la moitié de la bande interdite ; c'est-à-dire $\Phi_{SB}=0,275$*

On remarque sur cette figure III.9 que le courant I_{OFF} qui correspond à la chiralité (19, 0) est plus fort que celui de la chiralité (10, 0). Ceci est bien cohérent et s'explique en analysant le profil de bande d'énergie correspondant :

La bande interdite est d'autant plus étroite que le diamètre du nanotube est grand ainsi la bande interdite du (19, 0) est plus haute pour celle du (10, 0). Ceci se traduit par une augmentation dans le courant des trous et augmente en conséquence le courant I_{OFF} .

De même, le rapport I_{ON}/I_{OFF} est plus faible pour les plus grands diamètres des nanotubes.

III.5.3 Influence de la capacité d'oxyde

D'après plusieurs travaux, l'utilisation d'un oxyde de grille de faible épaisseur et de forte permittivité diélectrique comme le ZrO_2 ou le HfO_2 permet d'améliorer les performances des transistors CNTFETs. Ils ont présenté des caractéristiques électriques mesurées pour des transistors à nanotube avec différents épaisseurs d'oxyde SiO_2 et une longueur de grille de 300nm. Ils ont démontré par la suite que la pente sous le seuil augmente d'un facteur de 2,5 fois pour un oxyde 10 fois plus épais (de 2nm à 20nm). Ainsi, pour vérifier la cohérence du comportement de notre modèle vis-à-vis ces variations des propriétés de l'oxyde (EOT et permittivité diélectrique), nous avons réalisé des simulations des caractéristiques I_D vs. V_{GS} pour trois capacités d'oxyde $C_{INS}=594 \text{ pFm}^{-1}$, 264 pFm^{-1} et 158 pFm^{-1} qui correspondent à des EOT de 1nm, 10nm et 100nm respectivement avec un diélectrique de haute permittivité $\epsilon_r=16$. On prend $V_{DS}=0,2\text{V}$ et $\Phi_{SB}=0,275 \text{ eV}$ [19].

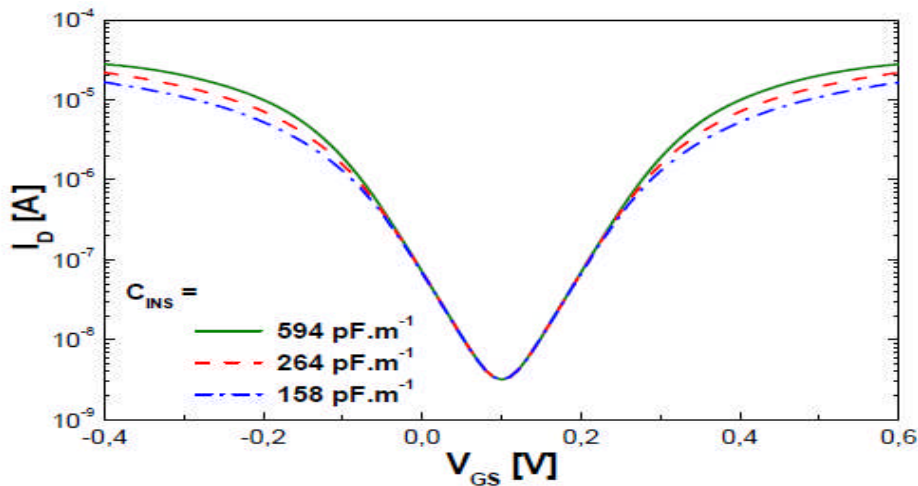


Figure III.10 *Influence de la capacité d'oxyde C_{INS} sur la caractéristique I_D en fonction de V_{GS} à $V_{DS}=0,2\text{V}$ ($C_{INS}=1\text{nFm}^{-1}$, 10 nFm^{-1} et 50 nFm^{-1}). La hauteur de la barrière Schottky est prise égale à la moitié de la bande interdite $\Phi_{SB}=0,275 \text{ eV}$ et la longueur de la grille $L=100\text{nm}$.*

Les résultats présentés sur la figure III.10 montrent que lorsque C_{INS} passe de 158 pFm^{-1} à 594 pFm^{-1} , le courant I_{on} et la pente sous le seuil sont nettement améliorés ce qui montre le meilleur contrôle électrostatique de la grille.

La figure 2.32 montre la variation du rapport I_{on}/I_{off} en fonction de EOT de 1nm à 100nm et pour $V_{DS}=V_{GS}=0,3\text{V}$, $\Phi_{SB}=0,275\text{eV}$. Une amélioration de la commande de la grille est observée sur cette figure pour les plus faibles EOT.

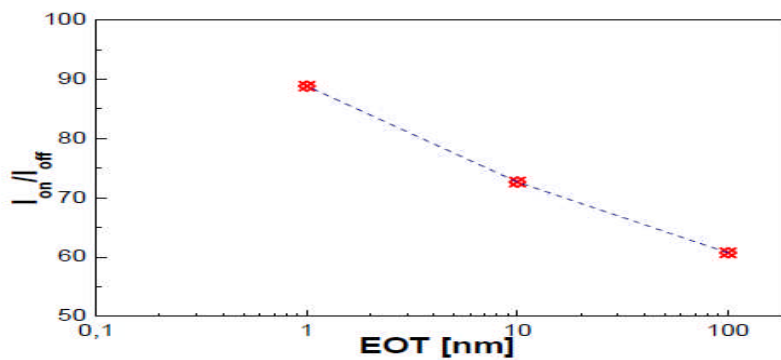


Figure III.11 Variation du rapport I_{on}/I_{off} avec EOT pour $V_{DS}=V_{GS}=0,3V$, $\Phi_{SB}=0,275 eV$ et $L=100nm$.

III.6 Conclusion

L'étude menée au début de ce deuxième chapitre concernant la mise évidence des barrières Schottky et leur principe de fonctionnement, nous a permis de développer un modèle compact pour le transistor SB-CNTFET en utilisant une approche qui est basée sur la notion de barrière Schottky effective.

Une étude d'influence des paramètres du modèle (hauteur de la barrière Schottky, capacité de l'oxyde et diamètre du nanotube) a été réalisée afin de montrer leur impact sur les performances statiques du transistor SB-CNTFET.

Chapitre IV

**Applications des
nanotubes de carbone
et des CNTFET**

IV.1 Introduction

Du fait de leurs propriétés exceptionnelles, les CNT sont adaptés pour des applications multifonctionnelles couvrant une gamme variée de matériaux pour des usages biologiques ou électroniques. Par exemple, s'agissant de la conductivité (tableau IV.1), les SWNT (surtout les métalliques) sont en passe d'être efficacement utilisés comme interconnexions entre les niveaux métalliques dans la fabrication des circuits intégrés. En comparaison avec le cuivre, les nanotubes permettent une meilleure conductivité électrique et thermique. Par ailleurs, les nanotubes réagissent facilement avec beaucoup de produit.

En se basant sur les propriétés optoélectroniques ou photoniques non linéaires des filtres, des interrupteurs et des guides optiques qui peuvent être réalisés avec des nanotubes mono-parois pour les communications optiques.

IV.2 Les NEMS

Les NEMS (**N**ano **E**lectro-**M**echanical **S**ystem) sont, des nano-systèmes électromécaniques, c'est-à-dire des systèmes dont les éléments, libres de se mouvoir, sont de taille nanométrique. On peut y inclure les oscillateurs discutés en première section. Toutefois ici nous nous intéresserons à deux applications, que nous pensons intéressantes, actuellement étudiées et même utilisées, les NRAM et les nanoswitch, tous les deux formés par des nanotubes de carbone électrostatiquement actionnés [22].

IV.2.1 nano-interrupteur à nanotube de carbone

Les nanoswitch sont constitués de nanotubes actionnés par divers moyens, électriques, mécaniques, magnétiques... qui réalisent la fonction « interrupteur » (à noter que les NRAM sont en fait des nanoswitch, mais leurs applications étant spécifiques, nous avons préféré les différencier en leur consacrant un paragraphe spécifique). On peut les placer dans trois catégories suivant que les nanotubes mobiles soient horizontaux en configuration poutre ou pont, ou verticaux en position poutre. La figure IV.1 montre les trois diverses configurations pour une activation électrostatique du nanotube [22].

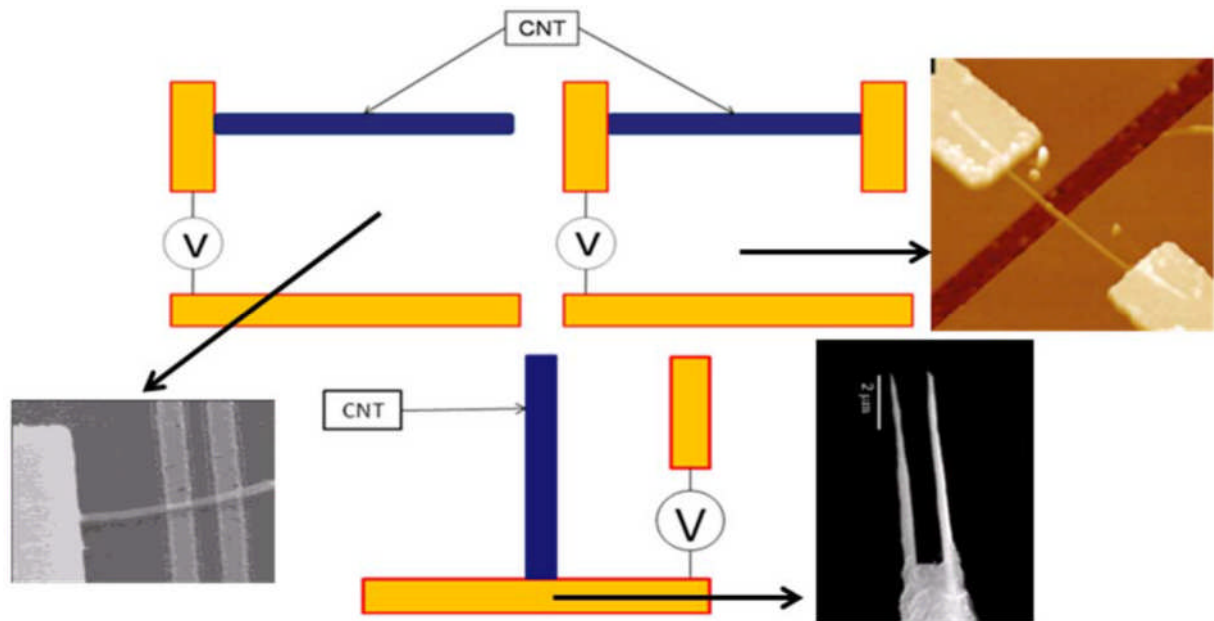


Figure IV.1 *En haut à gauche, un nanotube horizontal en configuration poutre, à droite un nanotube horizontal en configuration pont. En bas un nanotube vertical en configuration poutre.*

Le principe est, de créer une différence de potentiel entre le nanotube de carbone et le plan (ou plot) de masse afin de créer une force électrostatique d'attraction. En fonction de la configuration du système, c'est-à-dire soit libre d'un côté et fixe de l'autre soit fixe des deux côtés, une force élastique de rappel plus ou moins élevée vient « concurrencer » la force d'attraction.

Beaucoup d'études ont été réalisées sur le comportement des nanotubes dans ce type de système, dont les nanotubes peuvent aussi bien être horizontaux que verticaux, afin de pouvoir prédire quelle est la tension d'actionnement permettant d'obtenir un contact entre le plan attractif et le nanotube.

Les fonctions que peuvent réaliser de tels systèmes sont diverses et variées ; on peut citer, entre autres, les fonctions de détecteurs de masse de particule, celles d'interrupteur (nano switch) ou de relais.

Au niveau du relais, ceux à trois terminaux ont été étudiés ,avec deux configurations possibles :

- Les nano relais à contact.
- Les nano relais à effet tunnel.

La figure IV.2 montre la schématisation de ces deux configurations.

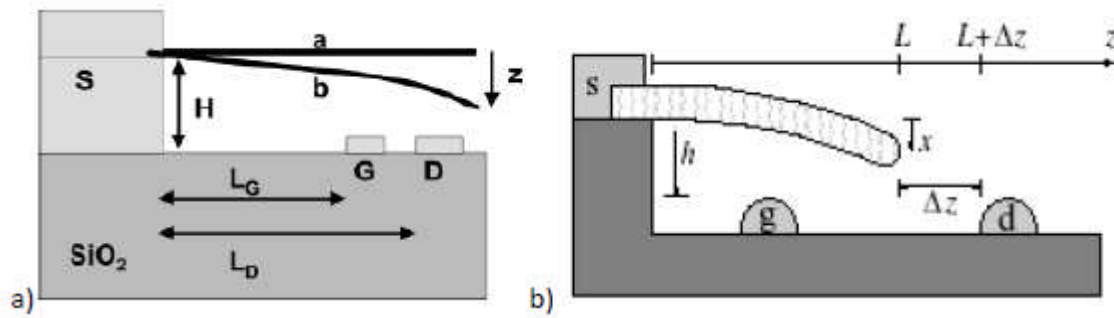


Figure IV.2 Schéma de fonctionnement des deux types de nano relais, a) le nano relais à contact, b) le nano relais à effet tunnel.

Le principe des nano relais est d'utiliser la grille, ou gate (g), afin de créer une différence de potentiel entre cette grille et le nanotube suspendu générant ainsi une force électrostatique de flexion. Conséquence de l'ancrage du nanotube, une force de rappel élastique dépendant des paramètres géométriques du nanotube tend à empêcher cette déflexion. Toutefois lorsqu'une certaine tension est atteinte au niveau de la grille, la force électrostatique devient prédominante par rapport à la force élastique. On appelle cette tension : la tension de pull-in. Il suffit alors de dépasser de peu cette tension afin de faire basculer totalement le nanotube entraînant alors son contact avec le drain dans le cas du relai à contact, ce qui enclenchera l'état « on » d'un tel circuit (fermeture du circuit). Dans le cas du relai à effet tunnel, le drain et le nanotube ne peuvent se contacter directement (pas de contact dis ohmique) et l'état « on » résultant est la conséquence de l'effet tunnel conduisant à un courant au niveau du drain. L'avantage du dispositif à tunnel est que l'on parvient ainsi à éviter d'avoir une résistance de contact très élevée (6 à 100 kOhm) qui a tendance à créer de grosse perte entraînant ainsi un fonctionnement médiocre du relai [21] [22].

Ces relais doivent être encore améliorés, en particulier au niveau de la tension de pull-in qui excède, sur certaines expériences, celles des MEMS. De plus bien que les NTCs possèdent un facteur de qualité Q (qui représente le rapport entre l'énergie emmagasinée sur l'énergie perdue) prédit énorme (estimé à 170-500 à 2GHz) le facteur de qualité mesuré de ces composants sont encore bien faibles ($Q < 50$) par rapport aux prévisions. Toutefois les premiers résultats démontrent un potentiel futur très intéressant. Une façon notable et incontournable d'améliorer et d'optimiser ces relais est de prévoir, de manière efficace, le comportement électromécanique et électromagnétique de ces systèmes à base de nanotubes.

IV.2.2 Mémoire non volatile

Les NRAM (Nonvolatile Random Access Memory) sont une nouvelle famille de mémoire informatique qui a pu apparaître grâce aux nanotubes de carbone, le principe étant d'utiliser

des réseaux croisés de nanotubes activés électrostatiquement afin de former ou non un contact entre eux. Lorsque deux nanotubes sont en contact on forme l'état binaire 1 et dans l'autre cas le 0, chacune des lignes du réseau étant connectée à un plot. Une description d'un tel circuit est donnée en figure IV.3 [22].

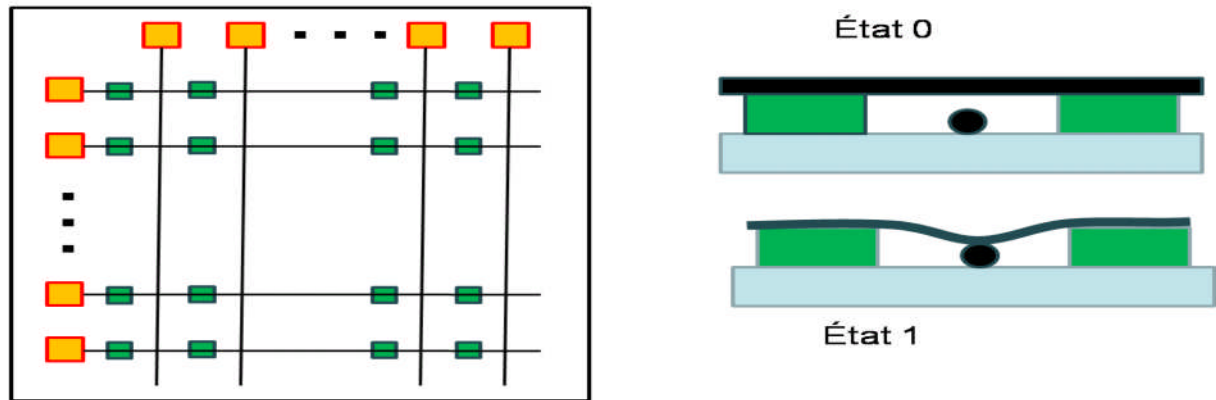


Figure IV.3 *Schéma de principe d'une NRAM, les plots en orange représentent les connexions du réseau de NTC, Les plots verts représentent les ponts permettant de suspendre les nanotubes. Les deux états représentés à droite montre le fonctionnement de la cellule mémoire.*

Le principe est donc de créer au niveau des pads une différence de potentiel suffisamment élevée afin de créer une capacité dont va résulter une force électrostatique qui fera fléchir le nanotube de carbone. L'intérêt d'utiliser les nanotubes réside dans leur haute rigidité conduisant à des temps d'actionnement d'un tel système très faible. La lecture d'un état entre deux nanotubes est réalisée en mesurant la résistance à la jonction. En effet celle-ci change en fonction du contact ou non entre les nanotubes. Ce contact est réalisé dans la femto seconde et permet ainsi d'obtenir une rapidité de fonctionnement très importante. Notons, de plus, que les dimensions à l'échelle du nanomètre se traduisent par des tensions d'actionnement faible, compatibles avec des applications de mémoire rapide à faible consommation et permet de plus d'augmenter de manière importante la densité d'intégration de ces éléments.

Enfin l'un des derniers avantages de cette configuration est la présence de la force de Van der Waals, une force attractive (dans ce cas) qui permet à un nanotube en contact avec un autre de rester dans cette configuration créant ainsi une mémoire dite non volatile. Cette force est négligeable au niveau microscopique car elle correspond à une force interatomique. Toutefois on ne peut plus la négliger au niveau nanométrique et elle prend alors une place importante dans tous systèmes dont les dimensions critiques ne dépassent pas les dizaines de nm [22].

IV.3 Performances HF des CNTFET

Durant ces dernières années, les performances fréquentielles des transistors à nanotube de carbone n'ont pas cessé d'être améliorées. Une fréquence approchant les 52MHz a été mesurée pour un oscillateur en anneau comportant des CNTFET à un seul nanotube, durant ces dernières années, les performances fréquentielles des transistors à nanotube de carbone n'ont pas cessé d'être améliorées. Une fréquence approchant les 52MHz a été mesurée pour un oscillateur en anneau comportant des CNTFET à un seul nanotube.

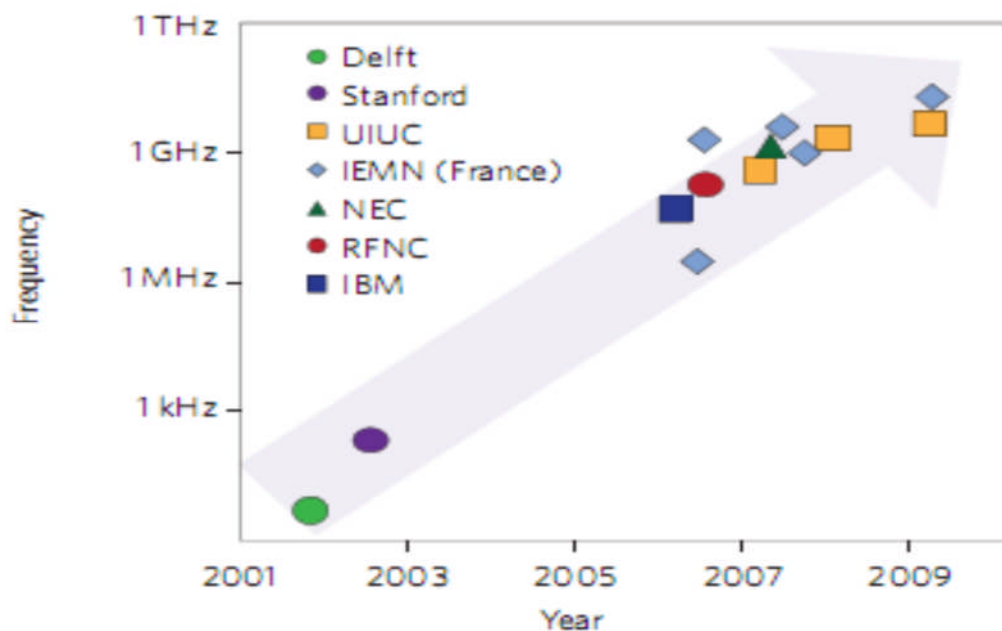


Figure IV.4 *Évolution de la fréquence maximale de coupure des transistors CNTFETs en échelle logarithmique de 2001 à 2009. Ces performances fréquentielles sont obtenues dans le laboratoire de l'université de Delft, l'université de Stanford, la multinationale IBM, RF Nano Corporation (RFNC), la multinationale NEC, l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) [BET06, et l'université d'Illinois à Urbana-Champaign (UIUC).*

Dans les années 2001-2003, des transistors opérant à des fréquences de quelques centaines de Hertz (~220Hz) ont été démontrées dans les universités de Delft et de Stanford. Ces premières mesures fréquentielles ont été prélevées sur une plaquette de 20 transistors formés avec des films synthétisés par CVD et contenant 33% de nanotubes de carbone semi conducteurs, monoparoï et dont 60-70% sont de type "p". Le diamètre des nanotubes présents dans l'échantillon varie entre 1–4 nm ce qui se traduit par des transconductances variables entre 100 et 300kΩ [14] [21].

Huit ans après, l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) ont présenté un CNTFET opérant à une fréquence intrinsèque record de 80 GHz.

Pour ce faire, une solution très dense en nanotube de carbone semi-conducteur mono-paroi ($\sim 99\%$) a été réalisée par centrifugation (ou *density gradient ultracentrifugation*) avant d'être dispersée sur un substrat de très haute résistivité pour former le canal du transistor. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour les applications électroniques nécessitant des fréquences de fonctionnement élevées, par exemple, la figure IV.5, montre la variation de la conductance G et de la transconductance g_m vis-à-vis de la polarisation sur la grille V_{GS} . Un pic de transconductance g_m approchant les $25\mu S$ est distingué pour $V_{GS} = -0,5V$ ce qui laisse prédire une tension de seuil $V_{th} \sim -0,67V$. Aussi, une conductance $G_{on} \sim 0,32 \times 4e^2/h$ est observée pour $V_{GS} > 2V$.

Ces remarquables performances sont dues au parfait couplage du canal par la grille et s'avèrent bien convenables à des applications en hautes fréquences tant que transistor présente une constante de délai intrinsèque $\tau = C_{ox}V_{dd}/I_{on} \sim 0,86ps$ ce qui correspond une fréquence intrinsèque approchant $1THz$ [14].

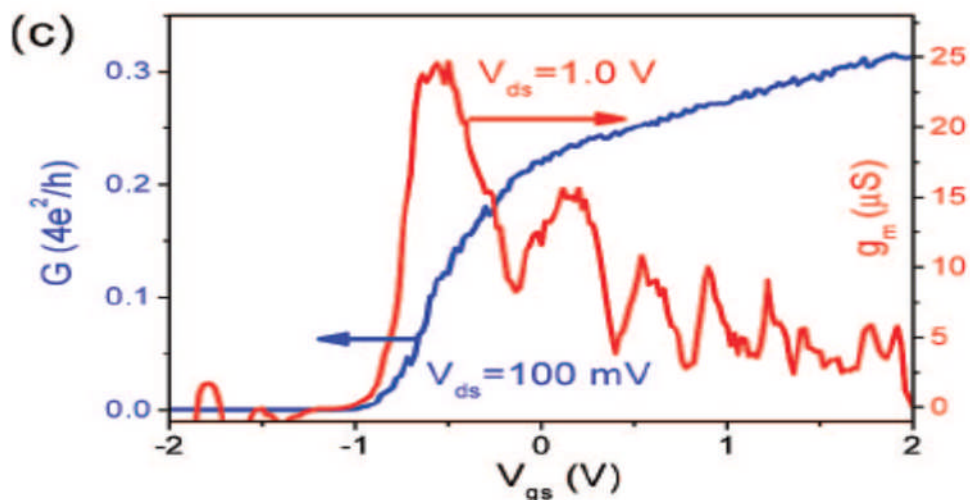


Figure IV.5 *Caractéristiques électriques mesurées d'un n-CNTFET ($L=120nm$ et $d_{CNT}=1,5nm$), évolution de la conductance G à $V_{DS}=100mV$ et de la transconductance g_m à $V_{DS}=1V$ en fonction de V_{GS} .*

IV.4 Bio-Capteurs

La construction de biocapteurs nécessitent une combinaison de plusieurs technologies à savoir la biologie moléculaire, la microélectronique, la physique, la chimie... Ils associent un élément de reconnaissance moléculaire, ou bio récepteur, qui est le premier maillon du biocapteur et qui est constitué par un matériau biologique (enzymes, anticorps, antigènes,

cellules, ADN...) chargé de reconnaître l'espèce à analyser, et une composante physique, le transducteur, qui convertit les interactions et les reconnaissances physico-chimiques entre le bio-récepteur et la substance à analyser (Figure IV.6) en un signal électrique, optique, conductimétrique, spectrophotométrique, calorimétrique, piézoélectrique [24].

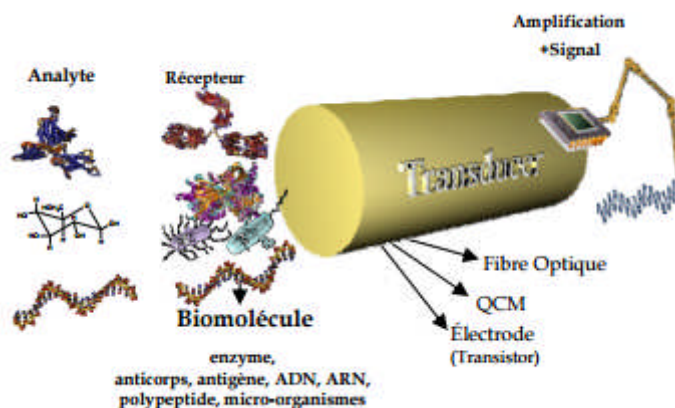


Figure IV.6 *Principe de fonctionnement d'un biocapteur.*

IV.4.1 Fonctionnalisation

La fonctionnalisation des nanotubes de carbone consiste à attacher des groupements moléculaires à la paroi du nanotube de manière à modifier leurs propriétés, en particulier leur affinité avec différents milieux et espèces chimiques ou biologiques. En choisissant adéquatement les groupes fonctionnels, il est possible d'améliorer la dispersion en solution, la séparation et l'assemblage des nanotubes, ainsi que leur biocompatibilité. La fonctionnalisation permet également d'ajouter des propriétés de reconnaissance à la surface des nanotubes, ce qui est un atout majeur pour la fabrication de nano capteurs ou de nano-sondes. Des travaux récents ont d'ailleurs démontré le fonctionnement de nano capteurs électroniques à base de nanotubes fonctionnalisés, par exemple avec des brins d'ADN, pour en faire un détecteur d'odeurs, ou encore avec une enzyme, pour mesurer en temps réel l'activité biologique de celle-ci [23].

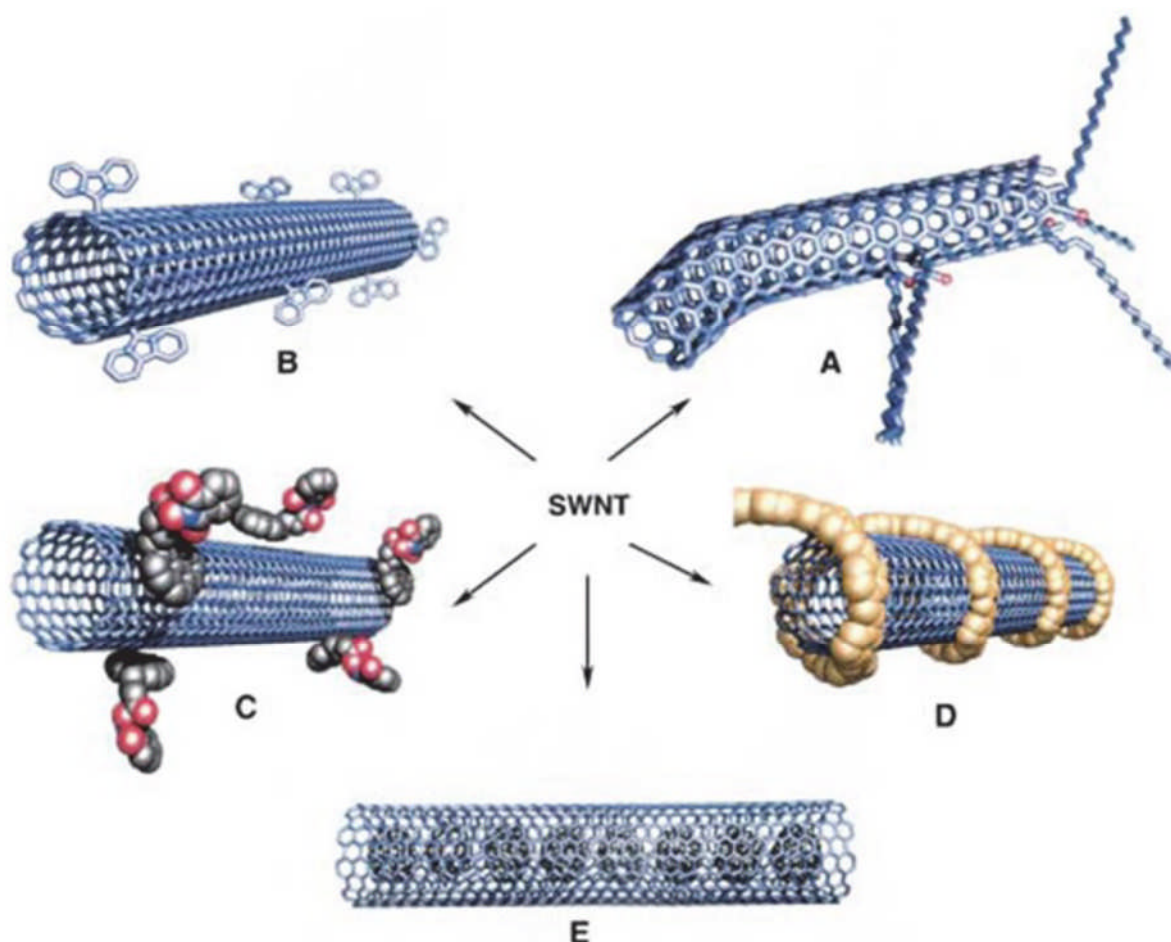


Figure IV.7 *illustration des différents types de fonctionnalisation des nanotubes de carbone : A) fonctionnalisation des défauts, B) fonctionnalisation covalente, C) interaction- p, D) fonctionnalisation non-covalente, E) encapsulation.*

IV.4.2 Types de fonctionnalisation

Au cours des quinze dernières années, les approches pour la fonctionnalisation des nanotubes de carbone ont été grandement développées, permettant aujourd'hui d'attacher une impressionnante variété de groupements moléculaires par le biais de différents types de liaisons chimiques. La Figure IV.7, illustre différentes catégories de fonctionnalisation. Dans cet éventail d'approches, on distingue notamment les voies non-covalentes et covalentes [23].

IV.4.2.1 Approches non-covalentes

Basée sur des interactions de type van der Waals ou des interactions p, la voie non-covalente consiste à former un assemblage supramoléculaire de groupements chimiques autour des nanotubes de carbone, tel qu'illustré aux panneaux C et D (Figure IV.7). Ce type d'approche

permet notamment de lier l'ADN, les polymères et les surfactants avec les nanotubes. On retrouve aussi dans cette catégorie l'endo-fonctionnalisation (panneau E, Figure IV.7), c'est-à-dire l'encapsulation de petites molécules à l'intérieur du nanotube.

La voie non-covalente a l'avantage de peu perturber la structure du nanotube, ce qui est intéressant pour préserver ses propriétés électroniques, mais le compromis est que la liaison est peu robuste et dépend d'un fragile équilibre avec le milieu environnant. Ces approches sont donc bien adaptées pour les traitements en solution, et sont utilisées par exemple pour isoler les nanotubes ou séparer les espèces. Cependant, ces assemblages supramoléculaires sont généralement difficiles à maintenir de façon stable et reproductible dans toutes les étapes d'assemblage des dispositifs à l'état solide, notamment afin d'en tirer profit lors de l'opération des dispositifs.

IV.4.2.1.1 Exemple d'un capteur avec une fonctionnalisation non-covalente

Chao Li et al. ont réalisé des capteurs pour la détection d'un marqueur du cancer de la prostate l'antigène PSA (Prostate-Specific-Antigen) en utilisant un système à effet de champs d'immobilisation. Les groupement acide 1-pyrenebutanoïque se trouvant à la surface des nanotubes de carbone sont convertis en ester carboxylate succinimidyl par incubation dans le N,N'-dicyclohexylcarbodiimie (DCC) et le N-hydroxysuccinimide. Les anticorps sont attachés à la surface de l'électrode par formation de liaison amide (Figure IV.8).[24]

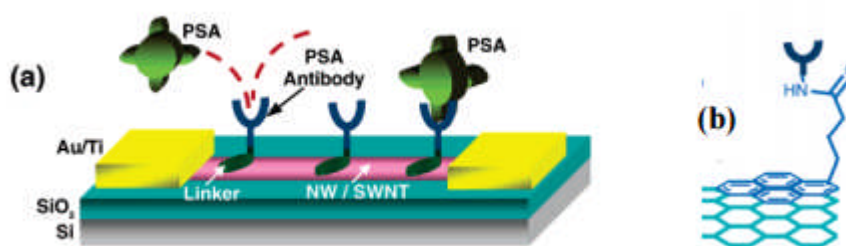


Figure IV.8 *Représentation schématique de l'immunocapteur à base de SWCNT pour la détection du PSA (a) et Fonctionnalisation des CNTs par l'anticorps AB-PSA (b).*

IV.4.2.2 Approches covalentes

Comme son nom l'indique, la voie covalente implique quant à elle l'addition de groupes moléculaires par des liens covalents avec les atomes de carbone formant la paroi du nanotube. Ce type de fonctionnalisation n'est a priori pas aisé à réaliser, car la paroi du nanotube est peu réactive en raison de sa structure entièrement conjuguée. Parmi les différentes réactions

d'addition, beaucoup se limitent à attaquer les sites déjà vulnérables dans la structure du nanotube, comme les défauts et les extrémités, tel qu'illustré au panneau B(Figure IV.7). C'est le cas par exemple des méthodes de purification à l'acide qui reposent sur l'addition de groupes -COOH aux sites les plus réactifs de la paroi [23].

IV.4.2.2.1 Exemple d'un capteur avec une fonctionnalisation covalente

Wang et al. ont présenté en 2006, une procédure originale d'élaboration de biocapteur à glucose en se basant sur la même technique en utilisant des nanotubes de carbone chargés négativement. La surface de l'électrode d'or est fonctionnalisée par des charges négatives suite à un traitement à l'acide 11-mercaptopundécanoïque (MUA), puis incubée dans une solution de polymère rédox chargé positivement, le poly [(vinylpyridine)Os(bipyridyl)2Cl2+/3+] (PVP-Os). La fixation de l'enzyme est effectuée par piégeage dans une matrice de nanotubes de carbone (figure IV.9) [24].

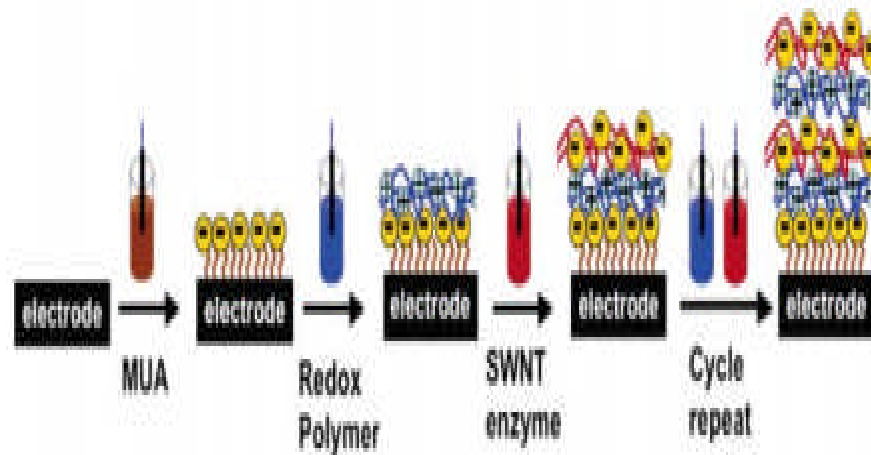


Figure IV.9 *Procédure de fonctionnalisation par la technique couche par couche selon Wang et al.*

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés quelques applications prometteuses des nanotubes de carbone et CNTFET. En premier lieux, on a présenté les NEMS (Nano-Electro-Mechanical Systems) exemple les nanoswitch et les RAM. Ensuite, nous avons présentés les performances d'un CNTFET en hautes fréquences. En fin, nous avons définis les biocapteurs et la fonctionnalisation des nanotubes de carbone pour la détection biologique et on a illustré un exemple pour chaque type.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La recherche des nouveaux matériaux semi-conducteurs et des nouveaux dispositifs (pour remplacer le silicium et le MOSFET) doit conduire à une nouvelle révolution au sein des industries électroniques. Les nanotechnologies sont un secteur innovant et prometteur qui présente de nombreuses perspectives d'applications. Afin que les attentes à leur égard deviennent des réalités, un important effort de recherche fondamentale et appliquée est au préalable nécessaire. Le nanotube de carbone (CNT) est à ce jour l'un des candidats les plus prometteurs pour faire passer le transistor à effet de champ (FET) à l'échelle nanométrique. Les transistors à effet de champ à base de nanotubes de carbone (carbone NanoTube Field Effect Transistor, CNTFET) figurent aujourd'hui parmi les dispositifs susceptibles de remplacer la technologie CMOS. Des recherches intensives sont en cours afin de déterminer les caractéristiques des transistors à nanotube de carbone (CNTFET).

L'importance de ces nano-objet dans le domaine des nanosciences que dans leur côté applicatif. Nous avons décrit les différentes structures et les types de nanotubes de carbone. Par la suite, les procédés de fabrications et quelques méthodes de séparations et de dispersions et ainsi leurs propriétés électriques.

On conclue l'application la plus importante du CNT est le CNTFET avec les différentes polarisations de P ou N, en particulier celle du CNTFET qui ouvrent des perspectives nouvelles et la possibilité de réaliser des nouvelles fonctions, inaccessibles à d'autres composants, plus conventionnels.

La mise en évidence de l'influence des barrières Schottky et des fonctions de transmissions associées. L'importance de ces barrières à l'interface nanotube/métal est argumenté selon les réalités technologiques telles que la nature du métal, l'épaisseur d'oxyde effective EOT, la longueur de la grille et le diamètre du nanotube de carbone.

Après avoir quantifié l'importance des barrières Schottky selon les paramètres technologiques, nous avons proposé une approche de modélisation retenue basé sur l'équation de poisson et méthode potentiel de surface. Enfin, une étude d'influence des paramètres du modèle (hauteur de la barrière Schottky, capacité de l'oxyde et diamètre du nanotube) a été réalisée afin de montrer leurs impacts sur les performances statiques.

Conclusion générale

Comme perspectives d'application des nanotubes de carbone et des CNTFET. Nous avons montrés leurs utilisations dans les NEMs (Nano Electro-Mechanical systems) le cas des nanoswitch et les mémoires non-volatiles, en suite on a présenté la performance des CNTFET dans le domaine des hautes fréquences. Enfin, leurs application perspective comme biocapteurs dans différents domaines.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Marzouk Jouad, « Développement de couches planaires à base de carbone pour des applications en optoélectronique », Thèse Doctorat, université LIMOGES, 2013.
- [2] Hugues Cazin d'Honincthun, « Des propriétés de transport des nanotubes aux transistors, Etude par simulation monté carlo », Thèse Doctorat, Univ. Paris-Sud, 2008.
- [3] Romain Maurand « Squid à nanotube de carbone : jonction Josephson à boîte quantique, jonction –A, effet Kondo et détection magnétique d'une molécule aimant», Thèse doctorat. Univ Grenoble, 2008.
- [4] Jean-Pierre Cleuziou, « Propriétés de transport électronique des nanotubes de carbone : nanotubes hybrides au nano- SQUID », Thèse Doctorat, Univ. Toulouse III .P.S, 2007.
- [5] Nano- sciences et nanotechnologie- OHM-4202, cours Mr A. Benfdila.
- [6] Henry Mathieux, « Physique des semiconducteurs et des composant électroniques », livre, Edition 6, (P 70).
- [7] Mahroug Rabiaa, « Modélisation et simulation des propriétés physiques et électroniques des nanotubes de carbone 'Application au CNTFET' », Mémoire Magister, Univ.Hassiba Benbouali Chlef (2009).
- [8] Chapitre 1 «les nanotubes de carbone », cours Mr A. Benfdila.
- [9] Zhao Wang, « Propriétés électromécanique des nanotubes de carbone », Thèse Doctorat, Inst.UTINAM , Univ. De Franche-Comté, (2008).
- [10] Charlotte Bernard, « Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone au tant que nano-sondes et leur fonctionnalisation par bio-nano-particules », Thèse Doctorat, Univ.Borbeaux 1. (2007)
- [11] Nicolas Izard, « Une nouvelle photonique à base de nanotube de carbone », article, Inst. d'Electronique fondamentale, Univ.Paris-sud.Orsay,(2010).
- [12] Chapitre 6 « les nanotubes de carbone », cours Mr A. Benfdila.

Bibliographie

- [13] Schmidt Gregory, « De la réalisation de transistor à effet de champ à nanotubes de carbone par fonctionnalisation d'un bio-hybride nanotube/Protéines photosynthétique », Thèse Doctorat, Univ. Paris-sud 11, (2009).
- [14] Montassar Najari, « Modélisation compact des transistors à nanotubes de carbone à contact Schottky et application aux circuits numérique », Thèse Doctorat, Univ.Bordeaux1, (2010).
- [15] Pirre Miaudet , « Structure et propriétés de fibre de nanotube de carbone », Thèse Doctorat, Univ.Bordeaux1,(2007).
- [16] Mouatsi Abdelmalek, « Composants à hétérostructure et application en nanoélectronique et nano photonique », Thèse Doctorat, Univ. Conctantine1, (2013).
- [17] Laetitia Marty, « Effet de champ et électronique à un électron dans des nanotubes de carbone auto-assemblés par CVD assisté d'un filament chaud », Thèse Doctorat, Univ.J.Fourrier.Grenoble1, (2004).
- [18] D.T.Trinh, « Portes logiques à base de CNTFET : Dispersion des caractéristiques et tolérance aux défauts », Thèse Doctorat, Univ. Polytechnique. Grenoble, (2008).
- [19] Rasmita Saahoo,R.R.Mishra, « Carbon nanotube field effect transistor, basic caracterisation and effect of hight dielectric material», international journal, vol2, No 7,(2009).
- [20] Sandra Rizk, « Elaboration et caractérisation de nanostructures carbonées par procédé CVD assisté par plasma microonde », Thèse Doctorat, Univ.H .P.Nancy1, (2009).
- [21] Goguet Johny, « Contribution à la modélisation physique et électrique compacte du transistor à nanotube », Thèse Doctorat, Univ Bordeaux1, (2009).
- [22] Ricart Thilbault, « Etudes de nano systèmes électromécaniques (NEMS) à base de nanotubes de carbone pour application hyperfréquences », Thèse Doctorat, Univ.Toulouse III, (2008).
- [23] Bouilly Delphine, «Transport électrique dans les nanotubes de carbones et leurs dérivés fonctionnalisés », Thèse Doctorat, Uni.Montreal, (2013).

Bibliographie

[24] Raoudh Haddad, « Fonctionnalisation de nanotubes de carbone pour le développement de bio architecture affines : application aux biocapteurs », Thèse Doctorat, Inst.Polytech, Univ.Grenoble, (2010).