

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE

THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **Doctorat**

En : Microélectronique

Par : LARIBI Asma

Sujet

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERFORMANCES DES
COMPOSANTS AUX NANOTUBES DE CARBONE : APPLICATION AUX
TRANSISTORS CNTFET**

Soutenue publiquement, le 18 /10/ 2020 , devant le jury composé de :

Mr. BENDIMERAD Tarik	Professeur	UNIV. TLEMCEN	Président
Mme. GUEN-BOUAZZA Ahlam	Professeur	UNIV. Tlemcen	Directrice de thèse
Mme .SAYAH Choukria	Professeur	UNIV. Ain Temouchent	Examineur 1
Mr. MERAD Lotfi	Professeur	ESSAT Tlemcen	Examineur 2
Mr. HAMDOUNE Abdelkader	Professeur	UNIV. Tlemcen	Examineur 3
Mr. BOUAZZA Benyounes	Professeur	UNIV. Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2019-2020

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu le tout puissant qui m'a donné durant toutes ces années d'études la santé, le courage, la confiance et la foi en moi même ce qui m'a permis de progresser et d'arriver jusqu'à ce jour.

Je ne saurais réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite mon encadreur Madame **BOUAZZA née Guen Ahlam** Professeur à l'université Abou-Bekr Belkaid, pour sa grande patience, ses conseils et sa compétence qui a rendu ce travail particulièrement intéressant. Je lui exprime mes vifs remerciements pour l'aide constante durant la préparation de ce mémoire, ses conseils précieux , et ses compétences scientifiques et humaines m'ont permis d'accomplir mon travail dans de bonnes conditions. J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir cette modeste contribution.

De ce fait, Je remercie cordialement, Monsieur **BENDIMERAD Fethi Tarik** Professeur à l'Université AbouBekr Belkaid d'avoir accepté de présider ce jury de thèse.

Je remercie Madame **SAYAH Choukria** Professeur à L'université d'Ain Temouchent d'avoir participé à cette thèse en qualité de première examinatrice.

Je tiens à remercier aussi Monsieur **MERAD Lotfi** Professeur à l'ESSAT Tlemcen d'avoir accepté de participer à cette thèse en qualité de deuxième examinateur.

Je tiens également à remercier Monsieur **HAMDOUNE Abdelkader** Professeur à l'université Abou-Bekr Belkaid d'avoir accepté de participer à cette thèse en qualité de troisième examinateur.

Je remercie enfin Monsieur **BOUAZZA Benyounes** Professeur à l'Université Abou- Bekr Belkaid d'avoir accepté mon invitation.

J'exprime mes remerciements à tous ceux qui m'ont apporté leurs soutiens, de près ou de loin, et contribuer d'une manière ou d'une autre à mon épanouissement dans un climat studieux et plein de sérénité ce qui m'a beaucoup aidé dans l'accomplissement de ma tâche et l'heureux aboutissement de ce travail.

Dédicace

A ma très chère mère

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. Puisse Dieu le tout puissant, te préserver et t'accorder la santé, une longue vie pleine de Bonheur.

A mon très cher père

Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme, d'encouragement et de prières. Pourriez-vous trouver dans ce travail le fruit de toutes vos peines et de tous vos efforts. En ce jour, j'espère réaliser l'un de tes rêves. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance. Puisse Dieu le tout puissant, te préserver et t'accorder la santé, une longue vie pleine de Bonheur.

A mon cher époux

*Depuis que je t'ai connu, tu n'as cessé de me soutenir et de m'épauler.
Tu me voulais toujours le meilleur. Tu as partagé avec moi les meilleurs moments de
ma vie, et les plus difficiles, tu as été toujours à mes côtés,
Je te remercie de ne m'avoir jamais déçu.
Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude et mon respect.
Que le bon Dieu nous procure santé et une longue vie.*

A mes chers enfants Anis et Amira

Que Dieu les garde inchallah et leurs donnent santé et une longue vie pleine de bonheur.

A mes chers frères Hamza, Khalid et Madjid

Pour toute l'affection que j'ai pour vous, je n'oublierai jamais les merveilleux moments passés ensemble qu'Allah vous réserve un avenir meilleur.

A ma chère sœur et amie Djamila

J'espère n'en oublier réellement personne.

Votre humble et dévouée Asma LARIBI qui vous sera toujours reconnaissante de tout ce que vous avez pu m'apporter comme soutiens et précieux conseils.

“These nanotubes are so beautiful that they must be useful for something. . .” Richard Smalley, Nobel Price of Chemistry (2005)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GENERALE	19
-----------------------------	----

CHAPITRE I : LES NANOTUBES DE CARBONE

I.1. Introduction.....	27
I.2. Le carbone.....	27
I.3. Les différentes formes allotropiques du carbone	28
I.3.1. Le diamant.....	28
I.3.2 .Le graphite.....	29
I.3.3 Les fullerènes.....	30
I.3.4. Le graphène	31
I.3 .5. Les nanotubes de carbone	32
I .3 .5 .1. La découverte des nanotubes de carbone.....	32
I .3 .5 .2. Les travaux de recherche réalisés sur les nanotubes de carbone	34
I .3 .5 .3 Les différents types de nanotubes de carbone	35
I .3 .5 .4 .Structure de bande d'énergie électronique des nanotubes de carbone	41
I .3 . 6. Méthodes de synthèse des nanotubes de carbone.....	45
I .3 .6.1 Méthode de l'Arc électrique	46
I .3 .6.2. Méthode de l'ablation laser	48
I .3 .6.3 .Dépôt chimique en phase vapeur.....	49
I.3 .6.4. Comparaison, limites et potentiel des différentes méthodes de synthèse.....	53
I .3 .7 Méthodes de purification des nanotubes de carbone.....	54
I .3.7.1 Purification chimique.....	55
I.3.7.2 Purification physique	56
I .3 .7.3. Purification en plusieurs étapes	56
I .3 .8 . Propriétés des nanotubes de carbones	56
I .3 .8 .1 La conductivité électrique.....	56
I .3 .8 .2 Force et élasticité	56
I .3 .8 .3. Conductivité thermique et expansion	57
I .3 .8 .4. Émission de champ.....	58
I .3 .8 .5.facteur de forme.....	58
I .3 .8 .6. Absorption	58
I .3 .9. Application des nanotubes de carbone	59
I.4. Conclusion	65

CHAPITRE II : APERÇU SUR LES DISPOSITIFS MOSFET ET NANOELECTRONIQUES

II.1 Introduction	70
II.2. MOSFET : passage vers les dispositifs nanoélectroniques	70
II.3. Limitations de la mise à l'échelle du MOSFET	73
II.3.1. Les effets de canaux courts	74
II.3.2. Effet tunnel.....	75
II.3.3. Le transport balistique.....	76
II.3.4. La Tension de seuil	77
II.3.5. L'épaisseur de l'oxyde de grille.....	78
II.3.6. Résistance de contact	80
II.4. Introduction aux dispositifs nanoélectroniques	81
II.4.1 Transistors à un électron "SET"	81
II.4.2 Dispositifs à tunnel résonants	83
II.4.3. MOSFET inférieur à 10 nm	86
II.4.4 Transistor à effet de champ à nanotubes de carbone (CNFET)	88
II.5. Conclusion	89

CHAPITRE III : ETUDE THEORIQUE SUR LES TRANSISTORS A EFFET DE CHAMP A BASE DE NANOTUBE DE CARBONE "CNTFETS" TRANSISTORS EMERGENTS POUR LA NANOELECTRONIQUE

III.1 Introduction	92
III.2 Transistor à effet de champ à base de Nanotube de Carbone.....	93
III.3. Différentes configuration du CNTFET	98
III.3.1 Transistor à nanotube de carbone à grille arrière" Bottom-gated CNTFET".	99
III.3.2 Transistor à nanotube de carbone à grille supérieure ou grille avant : "Top-gated CNTFET" :	101
III.3.3. Le CNTFET vertical	106
III.3.4. Transistor à barrière Schottky (SB-CNTFET).....	108
III.3.5 .CNTFET a grille partielle (PG) :	109
III.3.6.CNTFET source ou drain (S / D) :	109
III.3.7. CNFET de type MOSFET "MOSFET-like CNTFET :	110
III.3.8. Planar-gated CNTFET	111

III.3.9. Electrolyte-gate CNTFET.....	112
III.4. Les caractéristiques spécifiques de CNTFET	112
III.4.1. Vecteur de chiralité.....	112
III.4.2. Comportement des nanotubes de carbone (Nanotubes de carbone métalliques et semi-conducteur)	113
III.4.3. Nanotubes de carbone métalliques:	114
III.4.4. Nanotubes de carbone semi-conducteurs :	115
III.4.5. Le Gap énergétique des CNTFETs.....	116
III.4.6. La Mobilité	116
III.4.8. Le transport balistique dans les carbone nanotubes et dans les transistors CNTFETs	117
III.4.8.1. Le transport balistique dans les CNT	117
III.4.8.2. L'Ambipolarité	120
III.5. Fabrication des CNTFET (Exploration expérimentale)	122
III.6. Paramètres physiques du CNTFET	123
III.6.1. Tension de seuil (V_{th}) du CNFET.....	124
III.6.2. Rapport du courant ON / OFF	125
III.7 Conclusion.....	126

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction.....	133
IV.2. Modèle mathématique utilisé	133
IV. 3 Résultats de simulation et interprétations	137
IV. 3 .1. Caractéristique de transfert du transistor CNTFET.....	139
IV. 3.2 Effet des paramètres physiques sur les performances du dispositif	141
IV. 3.2 .1 Effet du diamètre du nanotube de carbone	142
IV. 3.2 .2 L'Effet de l'épaisseur de l'oxyde sur la caractéristique électrique du CNTFET	152
IV. 3.3. Effet de la chiralité sur la caractéristique électrique du CNTFET.....	162
IV .3.4. Effet de la nature de l'oxyde de grille sur la caractéristique électrique du CNTFET	171
IV .3.5. Effet de la température sur la caractéristique électrique du CNTFET.....	180
IV .3.6. L'étude de l'effet de l'abaissement de la barrière induite par le drain (DIBL) en fonction de Température.	192
IV .3.7. L'étude de l'effet du rapport du courant I_{on}/I_{off} en fonction de la température..	193

IV. 4 Conclusion	194
CONCLUSION GENERALE	196
Conclusion Générale	197
LISTE DES PUBLICATIONS.....	200
Résumé	201
Résumé	204

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 :Atome du carbone [3].....	28
Figure I. 2 : formes allotropiques du carbone [4].	28
Figure I. 3 :(a) structure du diamant [6] (b) Maille cubique faces centrées du diamant [7] ...	29
Figure I. 4 :(a) structure lamellaire du graphite [6] (b) Maille hexagonale [8].....	29
Figure I. 5 :a) Structure du Buckminsterfulleren C 60 similaire à un ballon de football b) La structure du C60 [9].....	30
Figure I. 6 : Fullerène C60, C70, et C80 [10].	30
Figure I. 7 : Le graphène, modèle de base des autres matériaux du carbone : mis en boule en fullerène, enroulé en nanotubes ou empilé en graphite. [12]	32
Figure I. 8 : Image obtenue par microscope électronique a transmission par les russes Radushkevich et Lukyanovich lors de test sur du carbone. [14].....	32
Figure I. 9 :a) Feuille de graphène b) nanotubes monoparoi c) nanotubes multiparoi [16]...	33
Figure I. 10 :Nombre d'articles sur les nanotubes de carbone publiés chaque année, de 2000 à 2007. Données d'ISI Web of Knowledge.	34
Figure I. 11 :Structure parchemin et poupée russe du MWNT [17]	36
Figure I. 12 : Nanotubes multi parois, où l'on voit bien l'arrangement concentrique des feuilles de graphène. [18].....	37
Figure I. 13 :Présentation schématique des trois configurations du nanotube mono paroi selon le type de l'enroulement. [19].	38
Figure I. 14 : Représentation du vecteur de chiralité ainsi que l'enroulement du nanotube de carbone (n,m). [15].....	39
Figure I. 15 :a) Représentations réelle et b) représentation spatiales réciproques d'un réseau de graphène.	42
Figure I. 16 : Dispersion d'énergie du graphène le long des points de symétrie élevée, comme indiqué à la figure I.15 b.	45
Figure I. 17 :Tracé en surface et tracé en contour b) de la dispersion d'énergie dans le graphène, donnée par l'équation. (I.15). Notez qu'il y a six points K où la bande interdite devient nulle. Parmi les six points K, seuls deux sont non équivalents notés K1 et K2.	45
Figure I. 18 : Schéma de principe de Production de nanotubes par la méthode de l'arc électrique. [23]	47

Figure I. 19 : Schéma de principe de Production de nanotubes par ablation laser d'une cible de graphite. [25]	49
Figure I. 20 : Schéma de principe de Production de nanotubes par dépôt chimique en phase vapeur.	49
Figure I. 21 : Schéma de croissance « tip-growth » et « base-growth » de NTC.	50
Figure I. 22 : Coupe schématique du réacteur du flux de CO à haute pression (HiPco). [27] 51	
Figure I. 23 : Illustration d'un réacteur à lit fluidisé capable d'augmenter la production de SWNT à l'aide du procédé CoMoCAT [29]	53
Figure I. 24 : Détecteur de gaz fabriqué.....	62
Figure I. 25 : Transistor basé sur un nanotube de carbone.....	65
Figure II. 1 : Structure d'un MOSFET.	71
Figure II. 2 : (a)MOSFET à l'état OFF, (b) MOSFET à l'état ON.....	71
Figure II. 3 : Caractéristiques de la technologie des semi-conducteurs.....	72
Figure II. 4 : Croissance au cours du temps du nombre de transistors par puce" processeur. 73	
Figure II. 5 :Mécanismes de courant de fuite de transistor à canal court : fuite de jonction pn à polarisation inverse (I ₁), inversion faible (I ₂), abaissement de la barrière induite par le drain (I ₃), fuite au drain induit par la grille (I ₄), perforation (I ₅), effet de largeur étroite (I ₆), tunnel à oxyde de grille (I ₇) et injection de porteurs chauds (I ₈).....	75
Figure II. 6 : Barrière de potentiel entre deux transistors.	76
Figure II. 7 :Transport balistique dans le canal d'un transistor nanométrique.....	77
Figure II. 8 :Mesure et calcul du courant à effet tunnel de l'oxyde en fonction de la tension de grille pour différentes épaisseurs d'oxyde.	78
Figure II. 9 : Schéma de principe d'une jonction du tunnel.	82
Figure II. 10 : La représentation schématique d'un transistor à un électron.	82
Figure II. 11 : Circuit pour transistor à un électron (SET).....	83
Figure II. 12 : Structure de la diode à tunnel résonant (RTD).....	84
Figure II. 13 : (a) schéma de principe de la structure de la sonde à résistance, (b) sonde à l'état bloqué, (c) la sonde est à l'état passant.	85
Figure II. 14 : Caractéristique I-V du RTD.....	86
Figure II. 15 : Double grille SBFET.	87
Figure II. 16 : Coupe transversale du CNFET.	88
Figure II. 17 : Structure du CNT.....	88
Figure III. 1 : Diagrammes d'énergie d'un CNTFET MOS-like type N montrant l'état passant V _{DS} >0, V _{GS} est fortement positif (a) Diagrammes d'énergie d'un CNTFET MOS-like type N montrant l'état bloqué (b) V _{DS} >0 V _{GS} est faiblement positif.....	93
Figure III. 2 : Première génération du CNTFET [13].....	95
Figure III. 3 : Structure de base d'un CNTFET [14].....	96
Figure III. 4 : schéma d'un transistor à nanotube de carbone polarisé [16].....	98
Figure III. 5 :(a).image du CNTFET à grille arrière. [21]	99
Figure III. 6 :(b).Coupe transversale du CNTFET à grille arrière. [15]	100
Figure III. 7 :(a) schéma de bande d'énergie du CNTFET. [13].....	100

Figure III. 8 : Vue schématique d'un CNTFET à grille avant avec un oxyde de grille mince.[15]	102
Figure III. 9 : Structure à grille supérieure du CNTFET. [24]	103
Figure III. 10 : (a) .Coupe schématique de la grille supérieure du CNTFET(b) Caractéristiques de sortie du même CNTFET avec une grille en Ti et une épaisseur d'oxyde de grille de 15 nm, Encadré : la Caractéristiques de transfert du CNTFET pour $V_{ds} = -0,6V$.	104
Figure III. 11 : CNTFET vertical (présenté par Infineon Technology en novembre 2003).	107
Figure III. 12 : Processus de fabrication d'un CNTFET vertical.	107
Figure III. 13 : Différents types de CNTFET : (a) CNTFET à barrière de Schottky (SB), (b) CNTFET à grille partielle (PG) (c) CNTFET S / D dopé [22].....	108
Figure III. 14 : CNTFET à barrière de Schottky (SB-CNTFET). [26].....	109
Figure III. 15 : CNTFET de type MOSFET. [28].....	111
Figure III. 16 : Structure en bandes de (a) un CNT métallique (5, 5) et (b) d'un nanotube semi-conducteur (10, 0).....	113
Figure III. 17: Schéma de (a) un MOSFET au silicium et (b) un FET à nanotube de carbone. Le canal dans le cas du MOSFET est une couche d'inversion de type n dans le substrat de type p proche de l'interface avec l'oxyde de silicium. Dans le FET nanotube la couche d'inversion de type n dans le substrat de type p proche de l'interface avec l'oxyde de silicium. Dans le FET nanotube la couche d'inversion est remplacée par le nanotube de carbone.	116
Figure III. 18 : (a) Conception du transport balistique dans un nanotube de carbone métallique où l'énergie est tracée en fonction de la position. Les porteurs d'énergie allant jusqu'à μ_1 sont injectés dans le CNT à partir du contact 1 et ceux d'énergies jusqu'à μ_2 sont injectés à partir du contact 2. Il n'y a pas de dispersion dans le CNT, et les porteurs injectés avec une certaine énergie E traversent le tube sans aucune perte d'énergie. [42]	118
Figure III. 19 : Schéma d'un SB-CNTFET.	121
Figure III. 20 : Diagramme des bandes d'énergie pour (a) $V_{gs} < 0$ et (b) $V_{gs} > 0$. [43]	121
Figure III. 21 : Le processus de fabrication d'un CNTFET à porte supérieure. [44].....	123
Figure IV. 1 : Modèle de circuit bidimensionnel pour un transistor CNTFET.....	135
Figure IV. 2: Structure typique d'un CNTFET cylindrique "FETTOY"	138
Figure IV. 3 : La structure du CNFET utilisé pour nos simulations.	139
Figure IV. 4 : La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour une température de 300°K.	139
Figure IV. 5 : La Caractéristiques $I_{ds} - V_{gs}$ pour une température 300°K à l'échelle linéaire.	140
Figure IV. 6 : la caractéristiques $I_{ds} - V_{gs}$ pour une température de 300°K à l'échelle logarithmique.	140
Figure IV. 7 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour calculer le courant I_{on} et I_{off}	141
Figure IV. 8 : La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour un diamètre de NTC de 1 nm.	142
Figure IV. 9 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 1 nm.	143
Figure IV. 10 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour un diamètre de NTC de 1 nm.	143

Figure IV. 11 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 1 nm pour calculer	144
Figure IV. 12 : La caractéristique I_{ds} – V_{ds} pour un diamètre de NTC de 1.5 nm.	144
Figure IV. 13 : La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 1.5 nm.	145
Figure IV. 14 : La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle logarithmique pour un diamètre de NTC de 1.5 nm.	145
Figure IV. 15 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 1.5 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}	146
Figure IV. 16 : La caractéristique I_{ds} – V_{ds} pour un diamètre de NTC de 2 nm.	146
Figure IV. 17 : La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 2 nm.	147
Figure IV. 18 : La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle logarithmique pour un diamètre de NTC de 2 nm.	147
Figure IV. 19 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 2 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}	148
Figure IV. 20: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 2.5 nm.	148
Figure IV. 21: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 2.5 nm.	149
Figure IV. 22. Caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle logarithmique diamètre de NTC de 2.5 nm	149
Figure IV. 23. La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 2.5 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}	150
Figure IV. 24. La caractéristique I_{ds} – V_{ds} pour différents diamètres de NTC	150
Figure IV. 25: La caractéristique I_{ds} – V_{ds} pour une épaisseur d'oxyde de 1 nm	152
Figure IV. 26: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 1nm.	153
Figure IV. 27: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 1 nm	153
Figure IV. 28: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 1nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}	154
Figure IV. 29: La caractéristique I_{ds} – V_{ds} pour une épaisseur d'oxyde de 2 nm	154
Figure IV. 30: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 2nm	155
Figure IV. 31: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 2nm	155
Figure IV. 32: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 2nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}	156
Figure IV. 33: La caractéristique I_{ds} – V_{ds} pour une épaisseur d'oxyde de 3 nm	156
Figure IV. 34: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 3 nm	157
Figure IV. 35: La caractéristique I_{ds} – V_{gs} à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 3nm	157

Figure IV. 36: La caractéristique Ids-Vgs à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 2nm pour calculer le courant Ion et Ioff	158
Figure IV. 37: La caractéristique Ids –Vds pour une épaisseur d'oxyde de 5 nm.....	158
Figure IV. 38: La caractéristique Ids –Vgs à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 5 nm	159
Figure IV. 39: La caractéristique Ids –Vgs a l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 5nm.....	159
Figure IV. 40: La caractéristique Ids-Vgs à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 5nm pour calculer le courant Ion et Ioff	160
Figure IV. 41: Caractéristiques Ids –Vds pour différentes épaisseurs de l'oxyde de grille ..	160
Figure IV. 42: Caractéristiques Ids –Vds pour différentes épaisseurs d'oxydes, simulation réalisés par Devi Dass, Rakesh Prasher, Rakesh Vaid. [4]	162
Figure IV. 43: La caractéristiques Ids-Vds pour la chiralité (5-0) à l'échelle linéaire.....	164
Figure IV. 44: La caractéristique Ids –Vgs à l'échelle linéaire pour la chiralité (5-0).....	164
Figure IV. 45: Caractéristiques Ids-Vgs pour la chiralité (5-0) à l'échelle logarithmique....	165
Figure IV. 46: La caractéristique Ids-Vgs à 0 et 1 V pour une chiralité de (5-0)	165
Figure IV. 47: La caractéristiques Ids-Vds pour la chiralité (10-0) à l'échelle linéaire.....	166
Figure IV. 48: La caractéristique Ids –Vgs à l'échelle linéaire pour la chiralité (10-0).....	166
Figure IV. 49: Caractéristiques Ids-Vgs pour la chiralité (10-0) à l'échelle logarithmique..	167
Figure IV. 50: La caractéristique Ids-Vgs à 0 et 1 V pour une chiralité de (10-0)	167
Figure IV. 51: La caractéristiques Ids-Vds pour la chiralité (19-0) à l'échelle linéaire.....	168
Figure IV. 52: La caractéristique Ids –Vgs à l'échelle linéaire pour la chiralité (19-0).....	168
Figure IV. 53: Caractéristiques Ids-Vgs pour la chiralité (19-0) à l'échelle logarithmique..	169
Figure IV. 54: La caractéristique Ids-Vgs à 0 et 1 V pour une chiralité de (19-0)	169
Figure IV. 55: Caractéristiques Ids-Vds du CNTFET présentant des chiralités de (5, 0). ...	170
Figure IV. 56: Caractéristiques Ids –Vds pour différents Vg du matériau diélectrique l'Al ₂ O ₃	173
Figure IV. 57: Caractéristiques Ids-Vgs pour différents Vd du matériau diélectrique.....	174
Figure IV. 58: Caractéristiques Ids-Vgs du matériau diélectrique Al ₂ O ₃ à l'échelle logarithmique	174
Figure IV. 59: La caractéristique Ids-Vgs du matériau diélectrique Al ₂ O ₃ à 0 et 1 V.....	175
Figure IV. 60: La Caractéristiques Ids –Vds pour différents Vd du HfO ₂	175
Figure IV. 61: La caractéristique Ids-Vgs pour différents Vd du HfO ₂	176
Figure IV. 62: Caractéristiques Ids-Vgs du matériau diélectrique HfO ₂ à l'échelle logarithmique	176
Figure IV. 63: La caractéristique Ids-Vgs du matériau diélectrique HfO ₂ à 0 et 1 V.....	177
Figure IV. 64: La Caractéristiques Id Vds pour différents Vg de SrTiO ₃	177
Figure IV. 65: Les caractéristiques Ids-Vgs pour différents Vd du SrTiO ₃	178
Figure IV. 66: Caractéristiques Ids-Vgs du matériau diélectrique SrTiO ₃ à l'échelle logarithmique	178
Figure IV. 67: La caractéristique Ids-Vgs du matériau diélectrique SrTiO ₃ à 0 et 1 V	179
Figure IV. 68: La comparaison entre les différents isolants de grille	179
Figure IV. 69: La caractéristique Ids –Vds pour la température 250K.....	181
Figure IV. 70: La caractéristique Ids-Vgs pour la température 250K à l'échelle linéaire....	181

Figure IV. 71: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 250K à l'échelle logarithmique	182
Figure IV. 72: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 250°K.....	182
Figure IV. 73: La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour la température 350K.....	183
Figure IV. 74: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 350K	183
Figure IV. 75: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 350K à l'échelle logarithmique	184
Figure IV. 76: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 350°K.....	184
Figure IV. 77: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 400K	185
Figure IV. 78: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 400K.	185
Figure IV. 79: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 400K à l'échelle logarithmique	186
Figure IV. 80: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 400°K.....	186
Figure IV. 81: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 450K	187
Figure IV. 82: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 450K.....	187
Figure IV. 83: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 450K à l'échelle logarithmique	188
Figure IV. 84: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 450°K.....	188
Figure IV. 85: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 500K	189
Figure IV. 86 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 500K	189
Figure IV. 87: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 500K à l'échelle logarithmique	190
Figure IV. 88: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 500°K.....	190
Figure IV. 89: Comparaison des caractéristiques de sortie ($I_D - V_{DS}$) pour différentes températures a une tension de grille de 0,6 V.....	191
Figure IV. 90: Abaissement de la barrière induite par le drain (DIBL) en fonction de la température.....	193
Figure IV. 91: Le rapport du courant I_{on}/I_{off} en fonction de la température.....	193

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Caractéristiques structurales d'un nanotube de carbones monofeuillets en fonction de sa symétrie. [20]	40
Tableau I. 2 : Résumé des trois méthodes les plus utilisées actuellement pour la fabrication de NTC [15]	54
Tableau II. 1 : Mise en évidence de l'amélioration des performances des MOSFETs au cours du temps [9].....	79
Tableau III. 1: Comparaison des paramètres de performance clés entre le CNTFET et les MOSFET [15].	105

Tableau IV. 1: récapitulatif des paramètres DC du transistor CNTFET	141
Tableau IV. 2: Tableau récapitulatif des différents diamètres de nanotube de carbone et les paramètres DC.....	151
Tableau IV. 3: valeurs des courants Ion et Ioff pour différentes épaisseurs d'oxydes.....	161
Tableau IV. 4: Chiralité, diamètre et énergie de bande interdite	163
Tableau IV. 5: Donne les valeurs des courants Ion et Ioff le rapport Ion/Ioff et V_{th}	170
Tableau IV. 6: classification des différents matériaux utilisés comme isolant de grille	172
Tableau IV. 7: Liste des oxydes considérés comme isolant de grille avec leurs constantes diélectriques et leurs bandes interdites.....	173
Tableau IV. 8: Les paramètres DC pour différents dioxydes de grille.....	180
Tableau IV. 9: Les paramètres DC pour différentes températures	191

Liste des constantes, symboles et abréviations

Significations	Constantes	Unités
<i>La longueur des liaisons entre les atomes C-C</i>	$acc = 1,42$	Å
<i>charge électrique</i>	$q = 1.6 * 10^{-19}$	C
<i>Température</i>	$T = 300$	K
<i>Constante de Boltzmann</i>	$Kb = 1.3 * 10^{-23}$	J/k
<i>Constante de Plank</i>	$h = 6.63 * 10^{-34}$	
<i>Constante de plank réduite</i>	$h (hbar) = 1.05 * 10^{-34}$	J-s
<i>Paramètre de contrôle du drain</i>	$ad = 0,035$	
<i>Paramètre de contrôle de la grille</i>	$ag = 0,88$	

<i>isolant de grille</i>	$k = 3,9$
<i>Permittivité libre</i>	$\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12}$

Significations	Symboles	Unités
<i>Niveau d'énergie de la bande de conduction</i>	E_c	<i>EV</i>
<i>Niveau d'énergie de la bande de valence</i>	E_v	<i>EV</i>
<i>Indice de chiralité</i>	(n,m)	
<i>Angle de chiralité</i>	θ	
<i>Vecteur de chiralité</i>	\vec{C}_h	
<i>Diamètre nanotube de carbone</i>	d	

Paramètres géométriques et technologiques du transistor CNTFET

<i>Epaisseur de l'oxyde de grille</i>	$t_{ox} = 10$	<i>Nm</i>
<i>Diamètre du nanotube</i>	$d = 2$	<i>Nm</i>
<i>Chiralité</i>	$(26,0)$	
<i>Température</i>	$T = 300$	$\bullet K$

Paramètres électriques du transistor CNTFET

<i>Tension de grille</i>	V_G	V
<i>Tension de seuil</i>	V_{th}	V
<i>Tension du drain</i>	V_D	V
<i>Tension de la source</i>	V_S	V
<i>Niveau de fermi de la source</i>	E_{F1}	
<i>Niveau de fermi du drain</i>	E_{F2}	
<i>Probabilité de Dirac</i>	$F(E)$	
<i>Densité d'état local</i>	$D(E)$	
<i>Potentiel de Laplace</i>	V_L	
<i>Potentiel de la charge mobile</i>	V_p	
<i>Courant de drain</i>	I_D	

Abréviations Significations

<i>CNT</i>	<i>Nanotube de carbone</i>
<i>CNTFET</i>	<i>Transistor a nanotube de carbone</i>

<i>MOSFET</i>	<i>« MOS Field Effect Transistor » : Transistor à effet de champ MOS</i>
<i>MWNT</i>	<i>« Multi Wall Carbon Nanotubes » : nanotube de carbone multiparois</i>
<i>SWNT</i>	<i>« Single Wall Carbon Nanotubes » : nanotube de carbones monoparois</i>
<i>DIBL</i>	<i>« Drain Induced Barrier Lowering » : Abaissement de la barrière de potentiel induit par le drain</i>
<i>RTD</i>	<i>Dispositifs à tunnel résonnant</i>
<i>SB-CNTFET</i>	<i>CNTFET à barrière de Schottky</i>
<i>CMOS</i>	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor,</i>
<i>MOS</i>	<i>Métal-Oxyde-Semi-conducteur</i>

Introduction Générale

Introduction Générale

Les progrès de la technologie à base de silicium continuent de dépasser le rythme historique de la loi de Moore, par conséquent il est extrêmement intéressant de trouver de nouveaux dispositifs à l'échelle moléculaire qui pourraient remplacer cette technologie, la microélectronique conventionnelle à presque atteint ses limites à l'échelle nanométrique et de nombreux problèmes ont accompagné cette miniaturisation.

Le domaine de la nanoélectronique dans l'industrie des semi-conducteurs se développe sans cesse, et de nombreux efforts sont réalisés pour proposer de nouvelles architectures de composants pour explorer les propriétés des nouveaux matériaux.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à une nouvelle famille de transistor à effet de champ qui maintient les principes de fonctionnement des dispositifs à effet de champ qui sont actuellement utilisés, cependant le canal de conduction est remplacé par le nanotube de carbone unidimensionnel (1D). Ce nouveau dispositif s'est avéré être très adapté à l'échelle nanométrique.

Depuis la découverte des nanotubes de carbone (CNT) par Iijima en 1991 [1], ce nouveau type de matériau continue de susciter un grand intérêt pour son grand potentiel lui permettant d'être utilisé en tant que nanofils métalliques et dans les dispositifs semi-conducteurs actifs représentant les circuits intégrés des prochaines générations.

Des progrès significatifs ont été réalisés en termes de compréhension des propriétés électroniques fondamentales ainsi que l'exploration des Nanotubes de carbone "NTC" dans des applications techniques [2]. Les dispositifs nanoélectroniques ont été largement explorés depuis la démonstration du premier transistor à effet de champ à base de nanotubes de carbone (CNTFET) [3], qui sont actuellement considérés comme d'important dispositifs pouvant concurrencer et même remplacer le transistor au silicium.

Des transistors à base de CNT ont été étudiés à la fois théoriquement et expérimentalement, les caractéristiques de transport des NTC ont été jugées d'une importance significative et donc font l'objet de plusieurs travaux. L'idéal pour un nanotube de carbone est que sa longueur de canal soit beaucoup plus courte que le libre parcours moyen des électrons de conduction, on s'intéresse alors au transport balistique dans ce type de dispositifs à base de nanotube de carbone [4].

La modélisation des dispositifs à base de nanotubes de carbone, en particulier les transistors CNT, a été considérablement développée au cours des dernières années, un certain nombre de modèles de transistors à base de CNT ont été proposés et des progrès significatifs ont été accomplis dans la compréhension des mécanismes de transport à base de CNT.

Afin de conserver la fonctionnalité du transistor à base de silicium et maintenir aussi de bonnes performances, différents efforts furent réalisés pour concevoir de nouvelles architectures de composants et explorer les propriétés de nouveaux matériaux.

Des recherches sur de nouveaux dispositifs tels que les MOSFETs à grilles multiples telle que le DGFET, le FINFET, le GAA furent entrepris pour améliorer les performances des MOSFETs à l'échelle nanométrique, par ailleurs des recherches sur de nouveaux matériaux furent aussi conduites pour améliorer la mobilité dans le silicium et ceci à partir de couches contraintes, on a ainsi pu concevoir des MOSFETs à canaux contraints tels que les MOSFET uniaxial ou biaxial contraints. Des recherches ont pu aussi être faites sur les isolants pour obtenir un meilleur compromis entre leur épaisseur et leur courant de fuite. D'un autre côté, une solution de remplacement pouvant s'adapter à la réduction de la taille des composants conventionnels, fut proposée grâce au développement de nouveaux dispositifs tels que, les transistors moléculaires, les Single Electron Transistors, les Spin FET ou encore les transistors auxquels nous nous sommes intéressés et qui sont les MOSFETs à nanotube de carbone.

Les premières recherches sur les CNTFETs ont démontré qu'ils fonctionnent comme des transistors à barrière de Schottky (SB) [7-8]. Néanmoins, de nouvelles caractéristiques électroniques des dispositifs CNT ont été révélées, des modèles de comportement et de niveau de circuit ont récemment émergé et ont été appliqués à la simulation de circuits logiques du CNT [9- 11].

Les premiers modèles de transistors à CNT n'ont pu décrire que les propriétés de transport balistique idéales et ne sont pas suffisants pour une utilisation pratique. Récemment, de nouvelles techniques utilisant l'approximation symbolique des densités de charge mobiles [11] et comptant dans les effets de sous-bande des NTC [13-14] ont été développés pour améliorer l'efficacité et la disponibilité des modèles. Bien que de gros efforts ont été faits, des modèles de transistors à CNT sont encore en cours d'élaboration. Comme pour le développement de la plupart des modèles de dispositifs électroniques, la simulation est nécessaire pour traiter des questions scientifiques et technologiques dans ce domaine qui est en rapide évolution.

Actuellement, la plupart des modèles des CNTFET décrivent la caractéristique du transport en courant continu dans le canal de ce type de transistors. D'autre part, la simulation permet d'identifier numériquement les relations entre les différents paramètres et le flux des porteurs dans le canal de nanotubes de carbone, ce qui aidera à déterminer les performances des modèles proposées et à les optimiser [9- 11]. Un certain nombre de modèles théoriques de transistors CNT [12], [15] ont été développés permettant d'obtenir des résultats balistiques idéaux en simulation mais consomment beaucoup de ressources de calcul et ne sont donc pas assez efficaces pour une utilisation pratiques, de nouvelles techniques de modélisation numérique sont nécessaires pour raccourcir le temps de simulation sans perte de précision, en particulier lorsque ces techniques sont appliquées à des circuits.

De nos jours le transistor à effet de champ à nanotube de carbone balistique (CNFET) est considéré comme l'un des dispositifs nanoélectroniques offrant un potentiel de commutation élevé.

Ce travail est une simple contribution à l'étude des CNTFETs. Nous présentons ainsi un transistor MOSFET où le canal est à base de nanotube de carbone, et pour lequel nous présentons ses performances en mode DC. Les effets de la variation de certains paramètres tel que la chiralité, l'épaisseur de l'oxyde de grille, la nature du diélectrique de grille sur les caractéristiques du transistor visé par cette étude furent examinés.

Ce travail nous a permis de :

- Comprendre les bases de la physique des nanotubes ainsi que d'examiner leurs différentes propriétés.
- Présenter les limites du MOSFET en Si menant finalement à la conception de nouvelles structures telles que les transistors CNTFETs.
- Faire une étude théorique comparative et voir la différence majeure entre les MOSFET à base de nanotubes de carbone et les MOSFET à base de silicium.
- Présenter les caractéristiques en mode DC du CNTFET en faisant varier différents paramètres et effectuer une comparaison avec d'autres travaux de recherche réalisés dans le même sens.

Ce travail a été organisé comme suit :

Le premier chapitre a été consacré à l'étude théorique sur les nanotubes de carbones, leurs différents types ainsi que leurs méthodes de synthèse. Nous présentons à la fin de ce chapitre leurs propriétés électriques, mécaniques, optiques et chimiques.

Au second chapitre nous présentons brièvement les dispositifs MOSFET nanoélectroniques

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude théorique du transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone dit CNTFET.

Dans le quatrième et dernier chapitre nous présentons les résultats obtenus par le biais de FETTOY [16] et qui ont permis de mettre en évidence les caractéristiques DC de ce type de dispositif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Iijima. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348):56–58, November 1991.
- [2] Ray H. Baughman, Anvar A. Zakhidov, and Wait A. De Heer. Carbon nanotubes- the route toward applications. *Science*, 297(5582):787–792, August 2002.
- [3] R. Martel, T. Schmidt, H.R. Shea, T. Hertel, and Ph. Avouris. Single- and multiwall carbon nanotube field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 73(17):2447–2449, October 1998.
- [4] M.A. Grado-Caffaro and M. Grado-Caffaro. On ballistic transport in carbon nanotubes. *Optik*, 119(12):601–602, 15 September 2008.
- [5] Jing Guo, Supriyo Datta, and Mark Lundstrom. A numerical study of scaling issues for schottky-barrier carbon nanotube transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 51(2):172–177, February 2004.
- [6] M. Radosavljevic, S. Heinze, J. Tersoff, and Ph. Avouris. Drain voltage scaling in carbon nanotube transistors. *Applied Physics Letters*, 83(12):2435–2437, September 2003.
- [7] J. Appenzeller, J. Knoch, V. Derycke, R. Martel, S. Wind, and P. Avouris. Fieldmodulated carrier transport in carbon nanotube transistors. *Physical Review Letters*, 89(12):126801/1–126801/4, September 2002.
- [8] S. Heinze, J. Tersoff, R. Martel, V. Derycke, J. Appenzeller, and P. Avouris. Carbon nanotubes as schottky barrier transistors. *Physical Review Letters*, 89(10):106801/1–106801/4, September 2002.144

- [9] J. Deng and H.-S.P. Wong. A circuit-compatible SPICE model for enhancement mode carbon nanotube field effect transistors. In 2006 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, Monterey, CA, USA, September 2006.
- [10] P. Avouris, R. Martel, V. Derycke, and J. Appenzeller. Carbon nanotube transistors and logic circuits. In Physica B, Tsukuba, Japan, 3-5 October 2001.
- [11] Hamidreza Hashempour and Fabrizio Lombardi. Efficient and symbolic model for charge densities in ballistic carbon nanotube FETs. IEEE-NANO, 1:17–20, 2006.
- [12] A. Rahman, Jing Guo, S. Datta, and M.S. Lundstrom. Theory of ballistic nanotransistors. Electron Devices, IEEE, 50(9):1853–1864, September 2003.
- [13] Jie Deng and H.-S.Philip Wong. A compact spice model for carbon-nanotube fieldeffect transistors including nonidealities and its application - part i: model of theintrinsic channel region. IEEE Transactions on Electron Devices, 54:3186–3194, 2007.
- [14] Jie Deng and H.-S.Philip Wong. A compact spice model for carbon-nanotube fieldeffect transistors including nonidealities and its application - part ii: full devicemodel and circuit performance benchmarking. IEEE Transactions on ElectronDevices, 54:3195–3205, 2007.
- [15] J. Guo, S. Datta, M. Lundstrom, and M. P. Anantam. Towards multi-scale modeling of carbon nanotube transistors. ArXiv Condensed Matter e-prints, December 2003
- [16]Anisur Rahman, Jing Guo, Supriyo Datta, and Mark S. Lundstrom, " Theory of Ballistic Nanotransistors" IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 50, NO. 9, SEPTEMBER 2003

Chapitre I

Les nanotubes de carbone

I.1. Introduction

Depuis la découverte du nanotube de carbone " NTC" en 1991 par le chercheur japonais Sumio Iijima spécialiste en microscopie chez NEC [1], leur popularité n'a cessé d'augmenter. Les nanotubes de carbone présentent un grand intérêt technologique ceci étant principalement dû à leurs remarquables propriétés, ils possèdent des propriétés spécifiques, telles qu'une conductivité électrique élevée, une transmission optique, une absorption de gaz ou une résistance à la traction extrêmement élevée, À cet égard les nanotubes de carbone (CNT) sont des candidats prometteurs pour des applications dans des dispositifs futurs de la nanoélectroniques.

Ce premier chapitre est consacré à un rappel bibliographique des nanotubes de carbone ainsi qu'à l'étude de leurs formes classiques et leurs nouvelles formes, leurs méthodes de synthèses, et à la fin leurs applications potentiels.

I.2. Le carbone

Le carbone est un élément chimique non métallique de numéro atomique 6 et de symbole C, sa configuration électronique est donc $1s^2 2s^2 2p^2$ (Figure I.1), le carbone est l'un des éléments les plus abondants sur terre, essentiel à la vie on le retrouve à l'état naturel dans de nombreux composés chimiques (hydrocarbures, carbonates, molécules organiques ...) [2].

Le carbone existe sous différentes formes (polymorphisme) appelées allotropies. Ses deux principales formes cristallines sont le graphite et le diamant.

Tout au long du XXème siècle, ses formes allotropiques du carbone ont été largement étudiées. Mais c'est en 1985 avec la découverte d'une troisième forme allotropique appelé fullerènes que le carbone a connu un vrai intérêt. Depuis, de nombreuses autres formes de structure du carbone ont été observées telles que les nanotubes ou les feuilles de graphène (Figure I.2). Nous allons présenter dans cette partie le carbone et ses différentes formes.

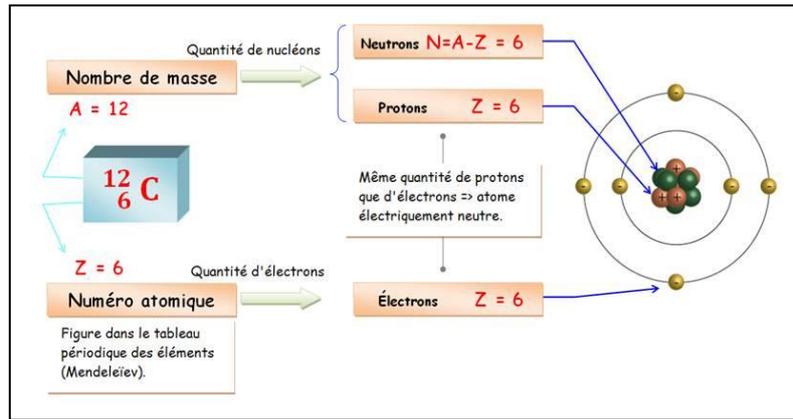


Figure I. 1 : Atome du carbone [3]

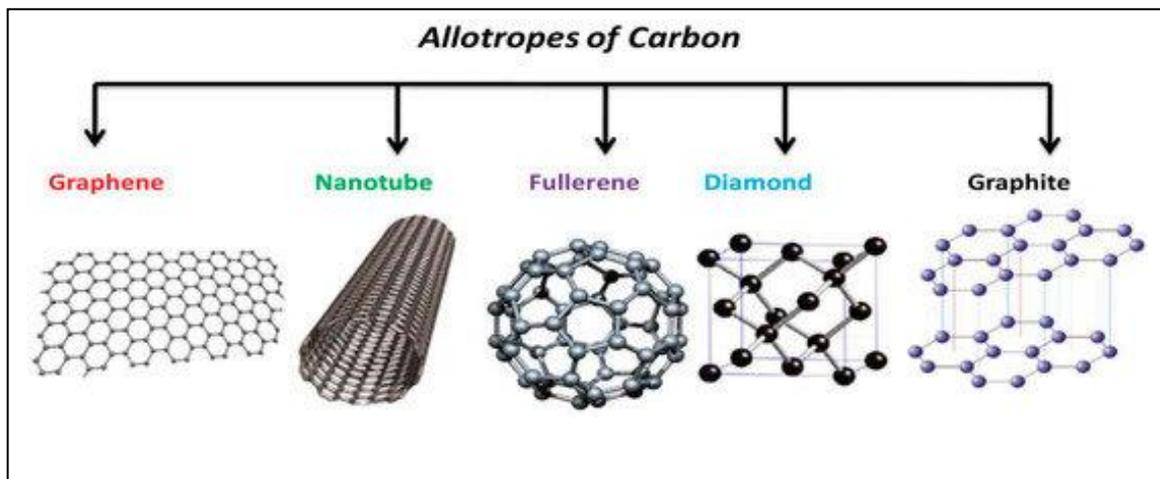


Figure I. 2 : formes allotropiques du carbone [4].

I.3. Les différentes formes allotropiques du carbone

I.3.1. Le diamant

Le diamant est un allotrope bien connu du carbone il possède une structure rigide et il ne se forme qu'à haute température et haute pression ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ et plusieurs giga pascals) [5], chaque atome de carbone dans un diamant est lié par une liaison de covalence à quatre autres atomes de carbone dans un tétraèdre. Ces tétraèdres forment ensemble un réseau tridimensionnel de cycles carbonés, il possède une structure cubique à faces centrées. Ce réseau stable de liaisons covalentes et d'anneaux hexagonaux est la raison pour laquelle le diamant est si compact. Bien

que le graphite soit l'allotrope du carbone le plus stable dans des conditions de laboratoire standard (273 ou 298 K, 1 atm), une étude récente a montré que dans des conditions idéalisées ($T = 0$, $p = 0$), le diamant est l'allotrope le plus stable de 1,1 kJ / mol, comparé au graphite.

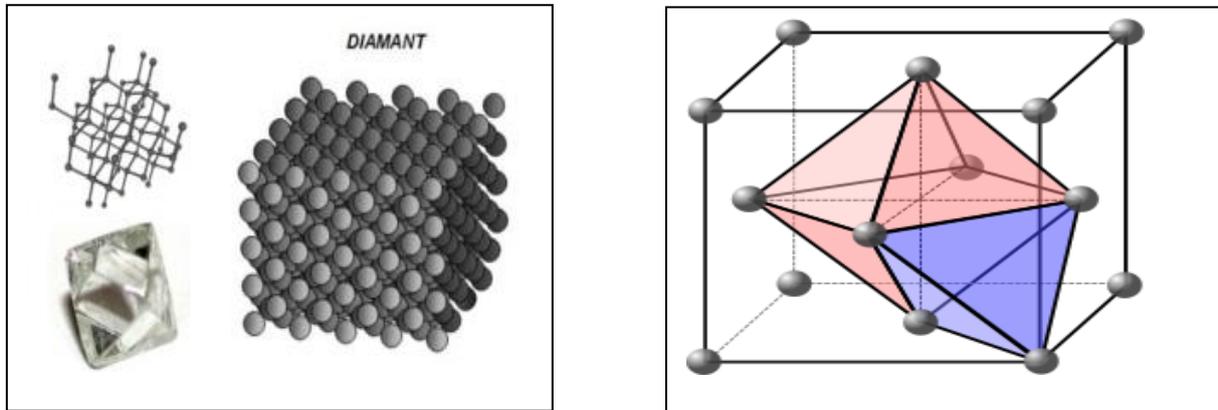


Figure I. 3 :(a) structure du diamant [6] (b) Maille cubique faces centrées du diamant [7]

I.3.2 .Le graphite

Le graphite est composé d'atomes de carbone, c'est en fait la forme la plus stable du carbone. On le trouve généralement sous la forme de charbon. Il possède une structure lamellaire. Il est constitué d'anneaux hexagonaux (nid d'abeilles) voir (figure 1.4) formant une fines couches faiblement liée entre elles. Le graphite est facile à feuiller et cela est dû à la liaison au sein des plans qui sont covalentes alors que les liaisons inter planaires sont de liaisons de Van der Waals qui sont faibles.

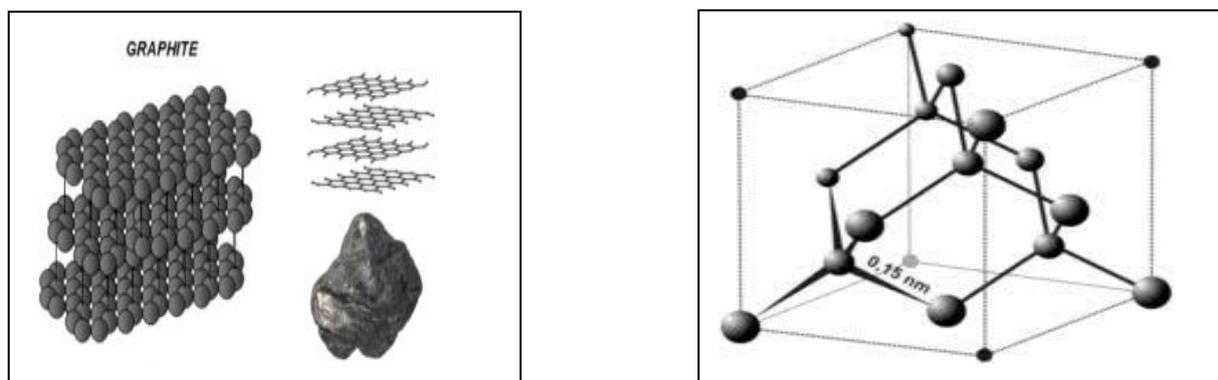


Figure I. 4 :(a) structure lamellaire du graphite [6] (b) Maille hexagonale [8].

1.3.3 Les fullerènes

Le fullerène est un allotrope du carbone, sa forme géométrique ressemble à celle d'une sphère d'un tube, d'un ellipsoïde, il est sous de nombreuses tailles et formes. Les fullerènes sphériques ressemblent à un ballon de football (figure 1.5 a). En 1985 les fullerènes ont été découverts par H. Kroto, R.F. Curl et R.E. Smalley, ce qui leur valut le prix Nobel en chimie.

La structure stable qu'ils ont découverte est le fullerène C₆₀ composée de 60 atomes de carbone, 12 pentagones et 20 hexagones. (figure 1.5.b)

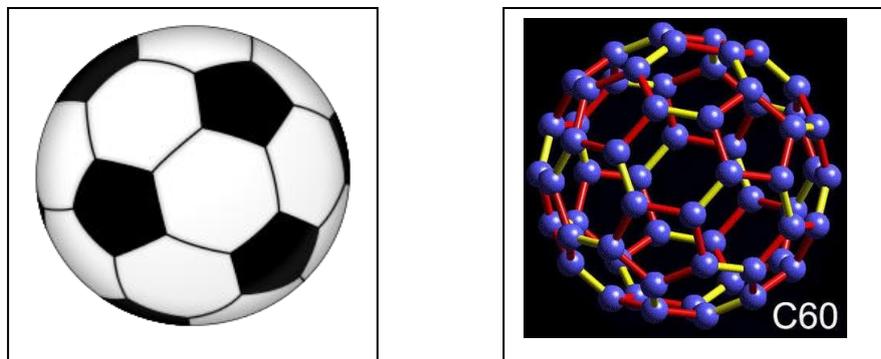


Figure I. 5 : a) Structure du Buckminsterfulleren C₆₀ similaire à un ballon de football b) La structure du C₆₀ [9].

D'autres formes de fullerènes peuvent être obtenus en ajoutant des atomes de carbone au C₆₀ voir (figure 1.6)

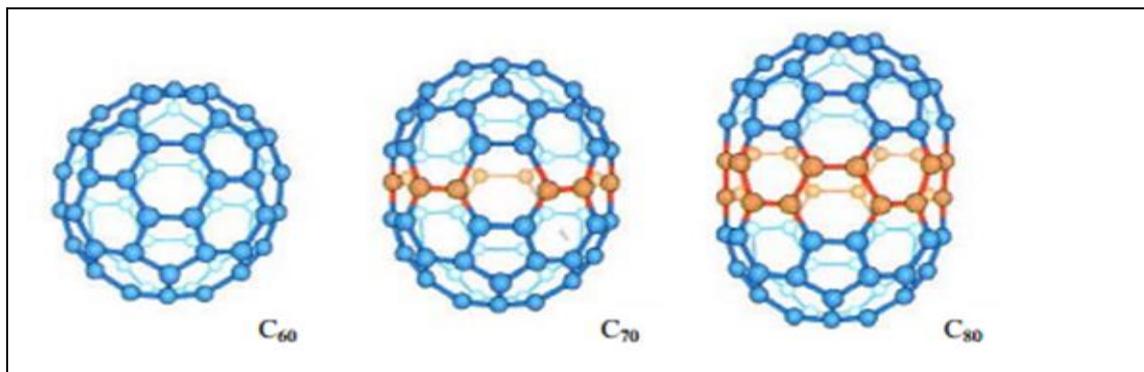


Figure I. 6 : Fullerène C₆₀, C₇₀, et C₈₀ [10].

I.3.4. Le graphène

Le graphène est une autre forme de carbone constituée d'une seule couche d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal. C'est un semi-métal avec peu de chevauchement entre la bande de valence et la bande de conduction (matériau à bande interdite nulle). Il est assemblé en 2 dimensions (2D) c'est l'élément structurel de base de nombreux autres allotropes du carbone, tels que le graphite (3 D), les nanotubes de carbone (1 D) et les fullerènes (0D) [11]. Voir figure 1.7. Le graphène a fait l'objet de différentes études vu son potentiel pour la nanoélectronique. C'est un matériau aux propriétés fascinantes qui constitue le graphite sous forme de feuillets d'atomes de carbone, ces derniers sont organisés en une seule couche d'épaisseur monoatomique. Le graphène a beaucoup de propriétés peu communes. C'est le matériau le plus résistant qui n'a jamais été testé, il transmet efficacement la chaleur et l'électricité.

Pendant des années, les scientifiques ont fait des recherches théoriques sur le graphène. En 1962, graphène fut observé à l'origine grâce au microscope électronique, mais n'a pu être étudié que lorsqu'il fut supporté par des surfaces métalliques. Le matériau a ensuite été redécouvert, isolé et caractérisé en 2004 par Andre Geim et Konstantin Novoselov de l'université de Manchester. La recherche s'est appuyée sur les descriptions théoriques existantes de sa composition, de sa structure et de ses propriétés. Ces travaux ont été couronnés par un prix Nobel de physique en 2010 grâce aux expériences novatrices concernant le graphène considéré alors comme matériau à deux dimensions.

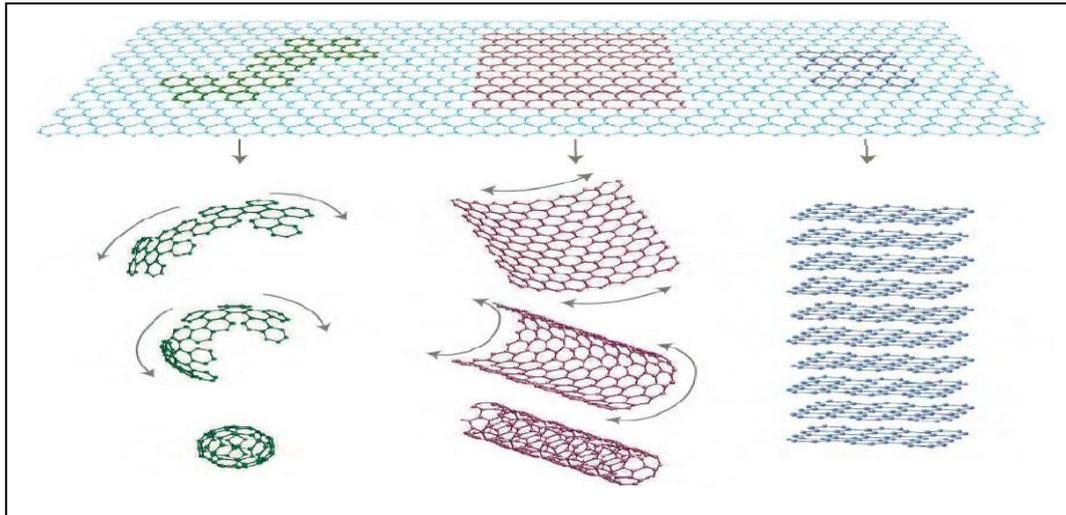


Figure I. 7: Le graphène, modèle de base des autres matériaux du carbone : mis en boule en fullerène, enroulé en nanotubes ou empilé en graphite. [12]

I.3 .5. Les nanotubes de carbone

I .3 .5 .1. La découverte des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbones ont été découverts pour la première fois par le chercheur Sumio Iijima en 1991 qui a inspiré le monde avec la découverte du nouveau matériau à base de nanotube de carbone, néanmoins ils existent des articles faisant apparaitre ces nanotubes en 1952. Les chercheurs russes Radushkevich et Lukyanovich ont publié des images obtenue par MET (microscopie électronique à transmission) de nanotubes de carbone de 50 nanomètres de diamètre dans le Journal of Physical Chemistry [13] (figure 1.8)

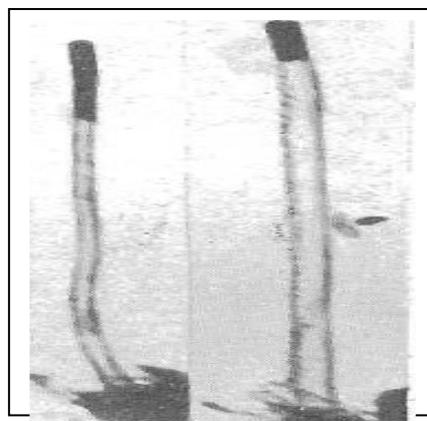


Figure I. 8: Image obtenue par microscope électronique a transmission par les russes Radushkevich et Lukyanovich lors de test sur du carbone. [14]

Les nanotubes de carbone sont des structures de type tube. Ce sont des feuilles de graphène enroulées sur elles-mêmes et fermées à leurs extrémités par des demi-sphères, Leurs diamètres (d) est autour de 1nm et la longueur (l) peuvent atteindre quelques micromètres [15].

Les nanotubes ont une très large gamme de propriétés électroniques, thermiques et structurales qui changent en fonction des différents types de nanotubes (définis par leurs diamètres, leurs longueurs et leurs chiralités), selon leurs structures, ils peuvent être soit des semi-conducteurs ou des métaux. Ils ont également d'autres caractéristiques telles qu'être plus résistant que l'acier.

On peut séparer les nanotubes de carbone en deux grandes catégories : les nanotubes multi-parois (avec en général des diamètres d , de 10 nm) (en anglais *Multi Wall Carbon Nanotubes*, *MWNT*) constitués de plusieurs feuillets de graphène imbriqués les uns dans les autres de manière à former des poupées russes et les nanotubes mono-parois ($d \approx 1-2$ nm) en anglais *Single Wall Carbon Nanotubes*, *SWNT*) constitués d'une seule feuille de graphène. Ces deux grandes sortes de nanotubes sont présentées sur la figure 1.9 b-c.

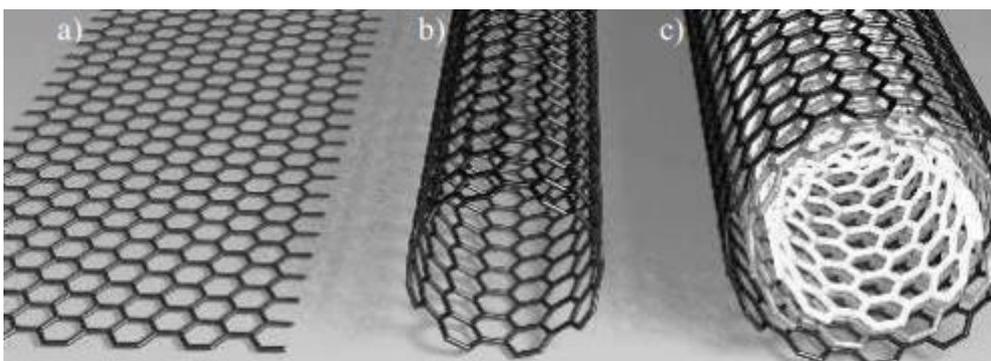


Figure 1. 9:a) Feuille de graphène b) nanotubes monoparoi c) nanotubes multiparoi [16].

Les premiers transistors conçus à base de nanotubes de carbone ont été fabriqués en 1998 à l'université de Technologie de Delft puis par l'équipe d'IBM.

I.3.5.2. Les travaux de recherche réalisés sur les nanotubes de carbone

L'intérêt pour les nanotubes de carbone qui a pris son envol après la publication du document d'Iijima en 1991 continue de croître. Cela se constate par la hausse du nombre total d'articles publiés chaque année sur les nanotubes qui a évolué de 886 publications en 2000 à 5406 en 2007 (figure. 1.10). Au cours de la même période, le nombre d'articles publiés sur les fullerènes est resté relativement stable et d'environ 700 articles par an. Le contraste entre le nombre de communications sur les nanotubes de carbone et le nombre de fullerènes reflète le plus grand potentiel des applications pratiques des nanotubes.

Les États-Unis sont en tête des articles publiés sur les nanotubes de carbone, avec 27% du total des documents sur les nanotubes de carbone publiés en 2007, suivi de près par la Chine, avec 26%, démontrant leur grand investissement dans la science du carbone et la nanotechnologie. Environ 10% des articles concernant les nanotubes se sont apparus au Japon et 7% de la Corée du Sud. Parmi les pays européens, l'Allemagne représentait environ 6% du total, le Royaume-Uni environ 5% et la France 4%. Toute la recherche concernant ces nanotubes a été consacrée à la détermination de leurs propriétés électroniques.

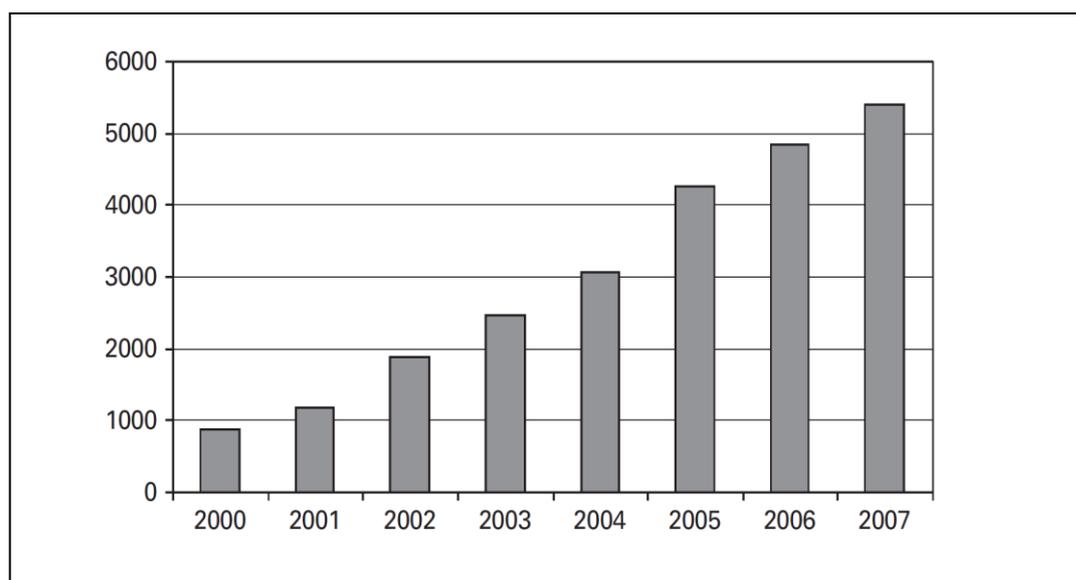


Figure I. 10: Nombre d'articles sur les nanotubes de carbone publiés chaque année, de 2000 à 2007. Données d'ISI Web of Knowledge.

Peu de temps après la publication de l'article d'Iijima de 1991 dans le journal "Nature", des études théoriques ont montré que les propriétés électroniques des nanotubes dépendaient de la structure et du diamètre du tube. Ces prédictions remarquables ont suscité un énorme intérêt, cependant déterminer expérimentalement les propriétés électroniques des nanotubes présentait de grandes difficultés. À la fin des années 90, les premiers dispositifs électroniques à base de nanotubes ont commencé à être produits. Dekker de l'Université de Technologie de Delft et ses collègues ont publié un article de 2001 sur les circuits logiques à base de nanotubes. Le deuxième grand domaine de recherche sur les nanotubes de carbone concerne leurs propriétés mécaniques. Précédés d'études théoriques, des mesures ingénieuses utilisant la microscopie électronique et la microscopie à sonde à balayage ont rapidement déterminé les propriétés mécaniques des CNT : les nanotubes de carbone sont les fibres les plus rigides et les plus résistantes connues. Ces propriétés associées à leur faible densité signifient que les nanotubes de carbone sont les seules fibres appropriées pour produire un "ascenseur spatial" ceci fut proposé par Arthur C. Clarke. Plus concrètement, les propriétés mécaniques exceptionnelles des nanotubes de carbone commencent à trouver des applications dans de nombreux domaines tels que les équipements sportifs ou automobiles. Différents chercheurs s'intéressant aux CNT et à leurs propriétés ont été captivé par le nombreux d'aspects plus qu'intéressants concernant les nanotubes de carbone.

I. 3 .5 .3 Les différents types de nanotubes de carbone

Le nanotube de carbone résulte de l'enroulement d'une ou plusieurs feuilles de graphène sur elles-mêmes. Dans le cas où il existe une feuille unique de graphène, on obtient un nanotube mono-feuillet .Si par contre plusieurs feuilles de graphène sont enroulées sur elles-mêmes permettant l'obtention d'un tube composé de plusieurs tubes imbriqués concentriquement les uns dans les autres on obtient un nanotube multi-feuillets. Ces deux structures sont présentées dans ce qui suit.

I.3.5.3.1 Nanotubes multi-feuillets (ou multi-parois)

Les nanotubes de carbones multi-feuillets sont constitués de différentes feuilles de graphène. La distance entre ces feuilles est d'environ $3,4\text{\AA}$, leurs diamètres est variable selon le nombre de feuillets. Il existe deux modèles structurels de nanotubes à parois multiples.

Dans le modèle de la poupée russe, un nanotube de carbone contient un autre nanotube et le nanotube interne a ainsi un diamètre inférieur à celui du nanotube externe figure (1.11).

Dans le modèle Parchemin, une seule feuille de graphène sera enroulée sur elle-même plusieurs fois, lui donnant un aspect semblable à celui d'un rouleau de papier enroulé sur lui-même. Les nanotubes de carbone à parois multiples ont des propriétés identiques à celles des nanotubes à paroi unique, mais les parois extérieures des nanotubes à parois multiples peuvent protéger les nanotubes de carbone internes des interactions chimiques avec les matériaux extérieurs. Les nanotubes à parois multiples ont l'avantage de présenter une résistance à la traction supérieure à celle des nanotubes à paroi unique.

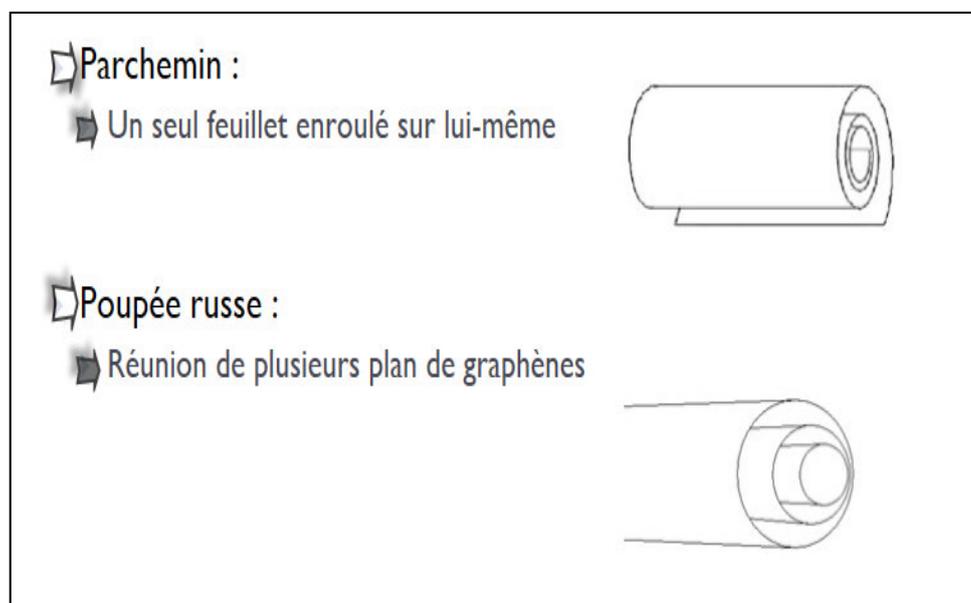


Figure I. 11 : Structure parchemin et poupée russe du MWNT [17].

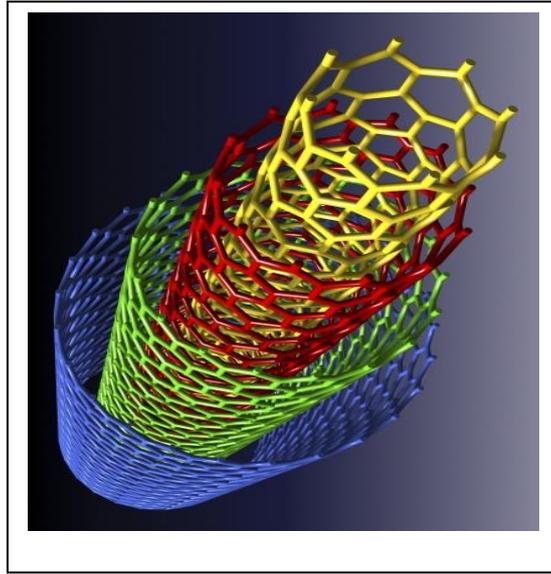


Figure I. 12: Nanotubes multi parois, où l'on voit bien l'arrangement concentrique des feuilles de graphène. [18].

I .3 .5 .2 .2 Nanotubes mono-feuillets (ou mono-parois)

Les nanotubes de carbones mono parois ont été découverts simultanément par deux équipes de recherche : celle du centre de recherche d'IBM Béthune et celle d'Iijima en 1993.

La Structure de nanotube de carbone à paroi unique est constituée d'une seule feuille de graphène voir figure 1.14, Nous pouvons voir les trois conceptions différentes du SWNT : la feuille de graphène possède trois types de bords armchair, zigzag et chiral, où la conception dépend du sens dont le graphène est enroulé, et a un effet direct sur les propriétés électriques du nanotube.

Notons aussi qu'il existe différents types d'enroulement autre que le SWNT (single wall) ou MWNT (multi- wall) carbon nanotube field-effect transistors que l'on peut décrire avec un vecteur appelé vecteur de chiralité. En fait, tout plan de graphène possède une structure appelée structure de type "nid d'abeille ", qui est donc formée par une succession périodique d'hexagones de carbone de vecteurs de base a_1 et a_2 , ces deux vecteurs sont les vecteurs unitaires du maillage hexagonal, Le vecteur de chiralité est alors défini comme étant le vecteur d'enroulement du nanotube.

Ce vecteur va donc démarrer d'un atome de carbone et faire le tour du nanotube de carbone pour se positionner finalement sur le même atome, ainsi il connecte deux sites cristallographiquement équivalents de la feuille de graphène 2-D. Ce vecteur de chiralité est dépend des deux vecteurs a_1 et a_2 formant la base du graphène. Ainsi en introduisant un couple d'entiers (m, n) , on définit le vecteur de chiralité selon la relation (1)

Ces différents types de configurations du SWNT (zigzag, armchair, chiral) sont en fait représentés par une paire d'indices (n, m) , de chiralité.

Lorsque $n - m$ est un multiple de 3, soit $n - m = 3 \cdot k$, où k est un entier, le nanotube est décrit comme "métallique" (hautement conducteur), sinon le nanotube est un semi-conducteur. La configuration armchair est toujours métallique, alors que d'autres conceptions peuvent transformer le nanotube en semi-conducteur. Voir figure 1.13.

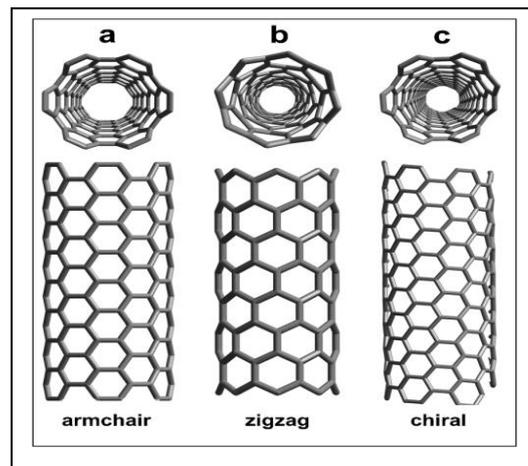


Figure I. 13: Présentation schématique des trois configurations du nanotube mono paroi selon le type de l'enroulement. [19].

Autrement dit, si on prend dans le plan de graphène les deux points équivalents du réseau hexagonal O et M et qu'on découpe la bande perpendiculaire à OM, ensuite qu'on effectue un enroulement en faisant coïncider O et M (axe \perp OM) on va obtenir le vecteur de chiralité \vec{C}_h dans la base $(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)$.

Le vecteur chiral est présenté en figure 1.14.

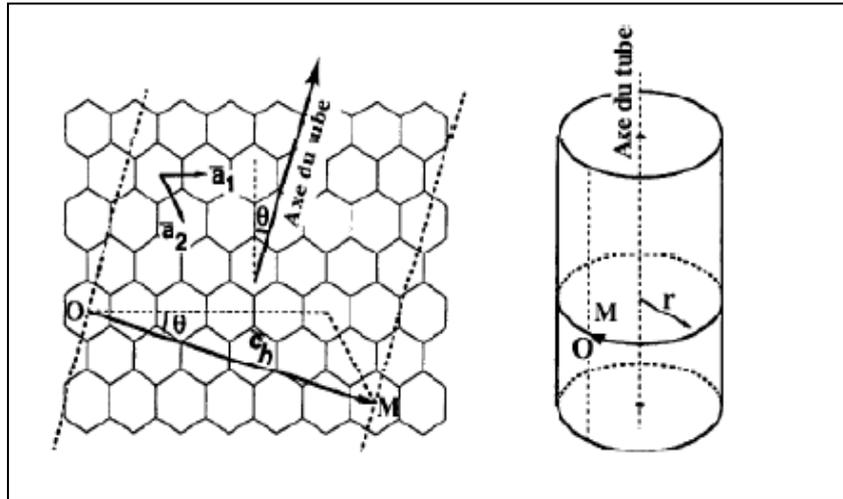


Figure I. 14: Représentation du vecteur de chiralité ainsi que l'enroulement du nanotube de carbone (n,m) . [15]

Ainsi ce vecteur s'exprime par:

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

n et m sont des entiers. Ainsi, connaissant l'amplitude des deux vecteurs, on peut déduire la circonférence du tube et son diamètre. Le diamètre du nanotube de carbone est décrit dans l'équation suivante :

$$d = \frac{L}{\pi} \sqrt{n^2 + nm + m^2} \quad \text{(I.2)}$$

Θ est l'angle de chiralité, cet angle est compris entre 0 et 30° :

- ✓ $\theta = 0^\circ$: $n=0$ ou $m=0$ donc nous avons un nanotube zigzag
- ✓ $\theta = 30^\circ$: $n=m$ donc nous avons un nanotube armchair
- ✓ $0 < \theta < 30^\circ$: nanotube chiral
- ✓ La longueur des liaisons entre les atomes C-C (a_{cc} est de $1,42\text{\AA}$)

On montre aussi que le type du CNT peut être déterminé à partir des indices n et m :

Lorsque $n-m=3i, i \in \mathbb{N}$ alors le CNT est de type métallique.

Lorsque $n-m \neq 3i$ le CNT est de type semi-conducteur.

Pour les CNT semi-conducteurs, la largeur de la bande interdite E_g est inversement proportionnelle au diamètre d du tube. Cette largeur peut être calculée par :

$$E_g = 2 a_{C-C} V_{pp\pi} / d \quad \text{I.3}$$

a_{C-C} représente la distance entre 2 atomes de carbone et $V_{pp\pi}$ est l'énergie de liaison entre 2 atomes de carbone.

Nous allons récapituler dans le tableau qui suit les différentes caractéristiques des CNT selon leurs symétries.

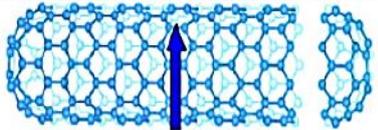
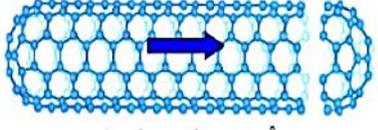
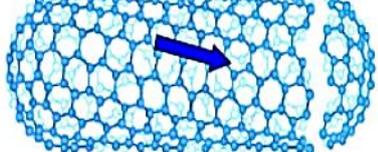
Symétrie	Indices	Angle de chiralité	Diamètre	Exemple
zigzag	$(n,0)$ $n = 0$ ou $m = 0$	$\theta = 0^\circ$	$d = a_{cc} \frac{\sqrt{3}m}{\pi}$	 $(9,0) \Rightarrow d = 7,0 \text{ \AA}$
armchair	(n,n) $n = m$	$\theta = 30^\circ$	$d = a_{cc} \frac{3n}{\pi}$	 $(5,5) \Rightarrow d = 6,8 \text{ \AA}$
chirale	(n,m) $n \neq m$	$0 < \theta < 30^\circ$ $\theta = \text{Arctan} \left(\frac{m\sqrt{3}}{2n+m} \right)$	$d = a_{cc} \frac{\sqrt{3(n^2 + nm + m^2)}}{\pi}$	 $(10,5) \Rightarrow d = 10,4 \text{ \AA} ; \theta = 11^\circ$

Tableau I. 1: Caractéristiques structurales d'un nanotube de carbones mono-feuillets en fonction de sa symétrie. [20].

I.3.5.4 .Structure de bande d'énergie électronique des nanotubes de carbone

Afin d'expliquer la structure de bande des nanotubes de carbone, il est essentiel de comprendre la structure de bande du graphène. En général les propriétés de transport électronique dans le graphène sont déterminées par les électrons et les trous les plus proches du niveau de Fermi. En effet les électrons proches du niveau de Fermi ont facilement accès à la bande de conduction laissant derrière eux les trous dans la bande de valence.

Dans le graphène, les orbitales π sont responsables des propriétés de transport électronique car elles se situent près du niveau de Fermi, la structure de bandes du graphène peut être obtenue par la méthode des «approximations de liaison strictes». La figure I.15a montre une unité de graphène avec deux atomes de carbone non équivalents A et B, ainsi qu'une combinaison appropriée des deux vecteurs unitaires a_1 et a_2 , tous les autres atomes peuvent être reconvertis en A ou en B. Le réseau réciproque de graphène avec les vecteurs unitaires, b_1 et b_2 , est présenté sur la figure I.15 b. Pour obtenir la structure de bande du graphène dans les orbitales π , il faut résoudre l'équation de Schrödinger :

$$H\Psi = E\Psi \quad \text{I.4}$$

Où H est l'hamiltonien, Ψ est la fonction d'onde totale et E l'énergie des électrons dans les orbitales π du graphène. En raison de la structure périodique du graphène, la fonction d'onde totale peut être construite à partir d'une combinaison linéaire de fonctions de Bloch u_i ayant une périodicité du réseau.

Dans l'approximation de liaison étroite, une fonction d'onde atomique est utilisée pour représenter la fonction de Bloch u_i . L'interface utilisateur de chaque atome peut être construite à partir d'orbitales $2p_z$ des atomes A et B . On peut ainsi écrire :

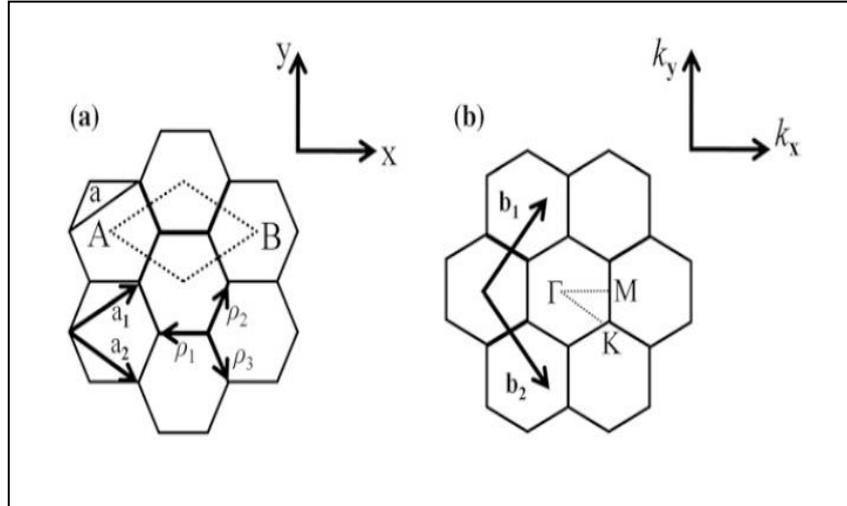


Figure 1.15: a) Représentations réelle et b) représentation spatiales réciproques d'un réseau de graphène.

$$u_{A(B)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{A(B)} e^{ik \cdot r_{A(B)}} X(r - r_{A(B)}) \quad \text{I.5}$$

Où $X(r)$ représente la fonction d'onde orbitale $2p_z$ pour un atome de carbone isolé.

Ainsi, Ψ dans (1.5) peut être exprimé par :

$$\psi = CAu_A + CBu_B \quad \text{I.6}$$

En utilisant les équations (1.6) et (1.4), l'équation de Schrödinger peut être résolue sous forme de matrice pouvant être exprimée sous la forme :

$$\begin{pmatrix} H_{AA} & H_{AB} \\ H_{BA} & H_{BB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_A \\ C_B \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} S_{AA} & S_{AB} \\ S_{BA} & S_{BB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_A \\ C_B \end{pmatrix} \quad \text{I.7}$$

Ici,

$$H_{ij} = \langle u_i | H | u_j \rangle, \quad S_{ij} = \langle u_i | u_j \rangle \quad \text{I.8}$$

Il est plus facile de négliger le chevauchement entre les fonctions d'onde $2p_z$ de différents atomes, c'est-à-dire, $S_{AB} = S_{BA} = 0$. Dans le cas normalisé, les valeurs peuvent être supposées être $S_{AA} = S_{BB} = 1$; alors, Eq. (1.7) est simplifié :

$$\begin{pmatrix} H_{AA} & -EH_{AB} \\ H_{BA} & H_{BB} - E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_A \\ C_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{I.9}$$

Cette matrice a une solution non triviale uniquement lorsque :

$$\begin{vmatrix} H_{AA} & -EH_{AB} \\ H_{BA} & H_{BB} - E \end{vmatrix} = 0 \quad \text{I.10}$$

De plus, par symétrie du réseau de graphène (les atomes A et B ne sont pas distinguables), on observe que $H_{AA} = H_{BB}$ et $H_{AB} = H_{BA}$. Par conséquent, Eq. (1.10) mène à la solution

$$E = H_{AA} \mp |H_{AB}| \quad \text{I.11}$$

H_{AA} (= H_{BB}) peut être obtenu en insérant des équations. (1.5) en (1.8) par la formule suivante :

$$H_{AA} = \frac{1}{N} \sum_{A^*} \sum_{A^*} e^{ik \cdot (r_A - r_A^*)} \int X^*(r - r_A) H X(r - r_A^*) d\tau \quad \text{I.12}$$

Si les effets des voisins les plus proches sont pris en compte, le paramètre Eq. (1.12) pour chaque atome A (B) avec les trois atomes B (A) les plus proches voisins peut être obtenu sous la forme :

$$H_{AA} = \int X^*(r - r_A) H X(r - r_A^*) d\tau = E_0 \quad \text{I.13}$$

Alors que :

$$\begin{aligned} H_{AB} &= \frac{1}{N} \sum_A \sum_B e^{ik \cdot (r_A - r_B)} \int X^*(r - r_A) H X(r - r_A^*) d\tau \\ &= \frac{1}{N} \sum_i e^{ik \cdot \rho_i} \int X^*(r) H X(r - \rho_i) d\tau \end{aligned} \quad \text{I.14}$$

Où:

ρ_i est un vecteur reliant l'atome A à ses trois atomes B voisins les plus proches (comme dans la Figure I.16 a. En se référant au système de coordonnées du graphène de la figure I.16 on peut écrire :

$$H_{AB} = (e^{ik \cdot \rho_1} + e^{ik \cdot \rho_2} + e^{ik \cdot \rho_3}) \int X^*(r) H X(r - \rho_i) d\tau$$

$$= \gamma_0 \left(e^{\frac{-ik_x a}{\sqrt{3}}} + 2e^{\frac{ik_x a}{2\sqrt{3}}} \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) \right)$$
I.15

γ_0 représente la force de l'interaction d'échange entre les atomes les plus proches voisins, appelée intégrale de liaison étroite ou intégrale de transfert. Par conséquent, à partir des équations. (1.13) et (1.15), l'équation de dispersion peut s'écrire (1.11) :

$$E = E_0 \pm \gamma_0 \left(1 + 4 \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2} k_x a\right) \cos\left(\frac{k_y a}{2}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{k_y a}{2}\right) \right)^{\frac{1}{2}}$$
I.16

Dans l'équation (1.13), le signe négatif représente la bande de valence du graphène produite par la liaison des orbitales π , tandis que le signe positif désigne la bande de conduction formée par les orbitales π^* . La relations de dispersion dans Eq. (1.16) est représenté sur la figure I.16 le long de points de symétrie élevée dans l'espace réciproque avec $E_0 = 0$. Les figures I.17 a,b représentent respectivement les courbes de surface et de contour de la dispersion d'énergie.

Les six points K situés aux coins de la zone de Brillouin sont la principale caractéristique de la dispersion énergétique du graphène. À ces points, les bandes de conduction et de valence se rencontrent, ce qui donne une bande interdite nulle dans le graphène. On peut également noter que les deux points K (K1 et K2) ne sont pas équivalents en raison de la symétrie. Le contour circulaire autour de chaque point K sur la figure I.17 b indique la forme conique de la dispersion près de chaque point K. [21]

1.3.5.5 Structure de bande des nanotubes de carbone à partir du graphène

Les CNT peuvent être définis par le vecteur chiral $= n_1 a_1 + n_2 a_2$, où n_1 et n_2 sont des entiers et a_1 et a_2 sont des vecteurs unitaires du réseau de graphène.

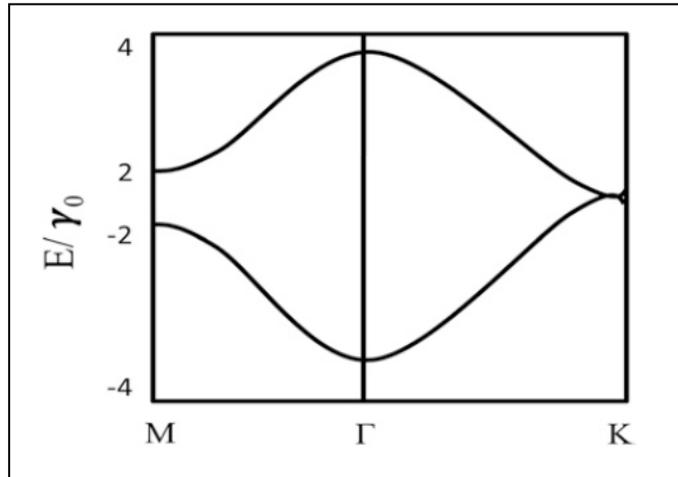


Figure I. 16 : Dispersion d'énergie du graphène le long des points de symétrie élevée, comme indiqué à la figure I.15 b.

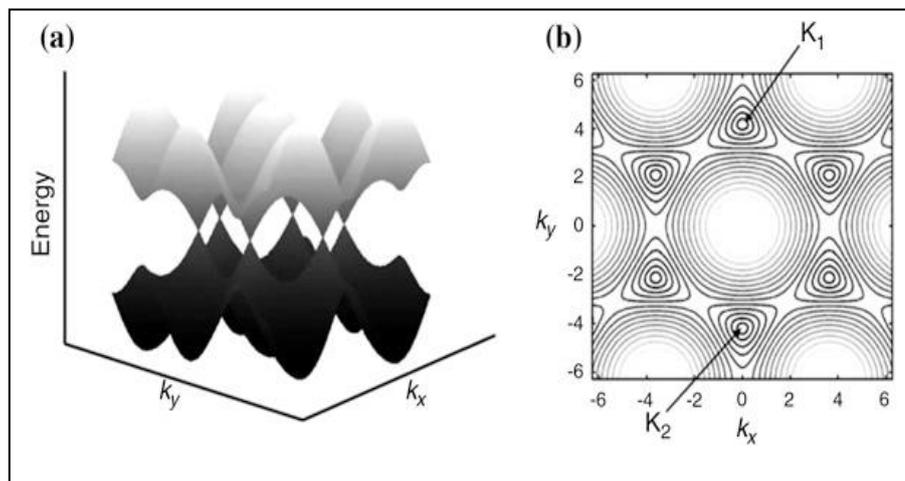


Figure I. 17: Tracé en surface et tracé en contour b) de la dispersion d'énergie dans le graphène, donnée par l'équation. (I.15). Notez qu'il y a six points K où la bande interdite devient nulle. Parmi les six points K , seuls deux sont non équivalents notés K_1 et K_2 .

I.3.6. Méthodes de synthèse des nanotubes de carbone

Plusieurs techniques ont été développées pour produire les CNT en grande quantité et d'autres pour la production de CNT spécifiques de haute qualité. Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et l'arc électrique sont les méthodes les plus fréquemment utilisées, alors que

l'ablation au laser peut être utilisée pour des CNT de haute pureté. La plupart des processus de synthèse se font sous vide avec des gaz de procédé contrôlés, mais la croissance des NTC par décharge d'arc de carbone et par CVD peut être réalisée à la fois sous vide et à pression atmosphérique. Des cadences de production élevées peuvent être atteintes par CVD et par arc électrique. Les progrès de ces méthodes de synthèse continuent et ils sont en cours de développement pour permettre une production en masse à moindre coût et avec des propriétés élevées. Les développements en cours dans les techniques de fabrication pourraient même déboucher sur de nouvelles techniques de fabrication de nanotubes de carbone à grande échelle pour les années à venir. Ils existent principalement trois méthodes de production des CNT : celle de l'évaporation par arcs électriques, l'ablation laser et le dépôt chimique en phase vapeur CVD (Chemical Vapor Deposition). Ces méthodes de production des nanotubes de carbone sont présentées ci-dessous :

I.3 .6.1 Méthode de l'Arc électrique

La méthode de l'arc électrique est un procédé effectué à haute température qui était à l'origine utilisée pour la production en masse de fullerène. Cette méthode consiste à créer un plasma via un arc électrique entre 2 électrodes en graphite. La température du plasma entre les électrodes est au moins supérieure à 3000 °C et peut atteindre 6000 °C. L'anode est couramment enrichie en catalyseur (Fe, Ni, Co, Y, Gd) pour l'obtention de CNT mono-parois en cas d'absence de catalyseur on fait alors la synthèse de CNT multi-parois. L'anode va alors se consumer tandis que la cathode se recouvre de composés carbonés tels que le carbone amorphe, des particules de carbone et des nanotubes (30 à 70 %), suite à quoi une étape de purification est utilisée pour extraire les nanotubes.

Notons que l'utilisation du Fer comme catalyseur nécessite du H₂ dans l'atmosphère du réacteur, ou des alliages de type Rh ou Pt.

Cette méthode est une méthode relativement simple et peu coûteuse pour une production à grande échelle, mais sa pureté est faible en raison de la formation de plusieurs allotropes de carbone. Le noir de carbone, la suie et le fullerène sont les principaux sous-produits. Pour le SWCNT, le produit brut contient également une teneur élevée en particules de catalyseur. Par conséquent, plusieurs étapes de purification sont nécessaires pour obtenir un produit riche en NTC.

Nous allons dans ce qui suit expliquer brièvement ce type de synthèse des NTC : les deux électrodes en graphite sont séparées d'environ 1 mm dans une chambre de réaction (figure 2-8a). Ensuite, une atmosphère basse pression (typiquement un mélange Ar / H₂) est établie dans le réacteur et un courant de 50 à 100 A avec une différence de potentiel d'environ 20 V est appliqué sur les électrodes. Cela crée une décharge à haute température au cours de laquelle la surface de l'anode est vaporisée, et se condense sur la cathode (Figure I.18). Un rendement élevé en NTC dépend de l'uniformité de l'arc de plasma et de la température du dépôt se formant sur l'électrode de carbone. [22]

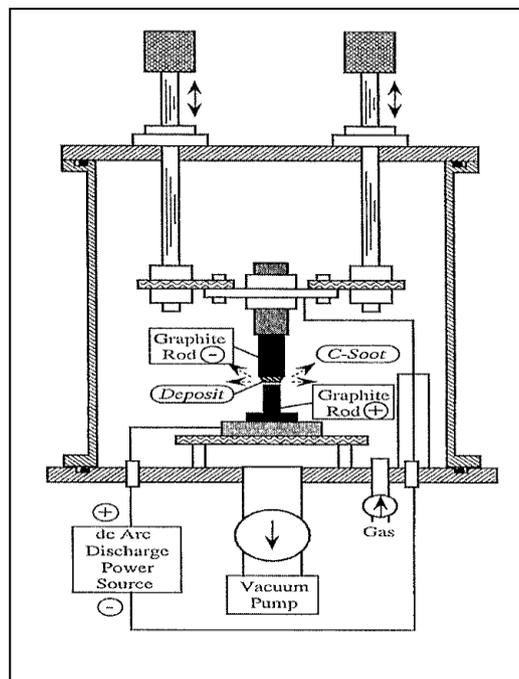


Figure I. 18 : Schéma de principe de Production de nanotubes par la méthode de l'arc électrique. [23]

I.3.6.2. Méthode de l'ablation laser

Ce procédé d'ablation laser consiste à supprimer avec un laser pulsé ou continu une cible en graphite qui est généralement enrichi de catalyseurs métalliques pour obtenir des CNT mono-parois. On peut alors utiliser des laser pulsés ou continus. En 1996, un laser à double impulsion (Nd:YAG) était utilisé dans les techniques de synthèse pour produire les CNT d'une pureté de 70% à 90%. Actuellement, le processus de vaporisation au laser est utilisé pour produire des NTC, dans ce processus une tige de graphite avec des mélanges catalytiques 50:50 de cobalt et de nickel à 1200°C est utilisée pour préparer l'échantillon. La vaporisation uniforme de la cible peut être obtenue en utilisant l'impulsion de vaporisation laser initiale suivie d'une seconde impulsion. La quantité de carbone déposée sous forme de suie est essentiellement réduite par l'utilisation de ces deux impulsions laser successives. Les plus grosses particules sont cassées en appliquant la deuxième impulsion laser. Les NTC produits au cours de ce processus ont un diamètre de 10 à 20 nm et une longueur de 100 µm ou plus. Le diamètre moyen des nanotubes et la distribution de taille peuvent varier pour différentes températures de croissance, de la composition du catalyseur et d'autres paramètres de processus.

La méthode de l'ablation laser est plus coûteuse que celle par arcs électriques mais utilise cependant un nombre réduit de paramètres de contrôle rendant possible l'étude des conditions de synthèse des CNT.

Au cours des dernières années, Les méthodes de vaporisation de la décharge en arc et le laser sont utilisées pour obtenir des NTC de haute qualité en petite quantité. Cependant, les deux méthodes souffrent des deux inconvénients : premièrement les méthodes utilisent l'évaporation de la source de carbone ce qui implique une diminution de la production, la seconde est que les NTC produits par la méthode de vaporisation sont mélangés avec des résidus de carbone. Par conséquent, il est assez difficile de procéder à une purification, de

manipuler et d'assembler les CNT pour la construction d'architectures de dispositifs à nanotubes pour des applications pratiques [24].

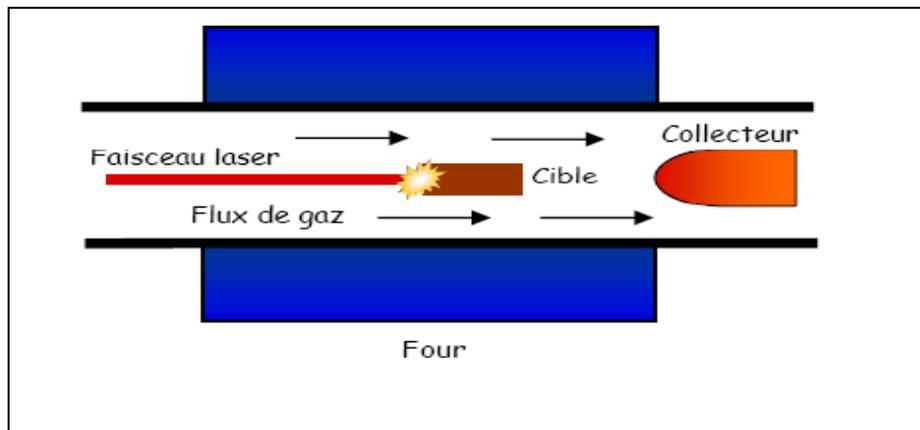


Figure I. 19 : Schéma de principe de Production de nanotubes par ablation laser d'une cible de graphite. [25]

I.3 .6.3 .Dépôt chimique en phase vapeur

La technique CVD est la technique la plus utilisée pour la production à grande échelle de NTC. Cette méthode implique la croissance de NTC à partir de précurseurs carbonés volatils tels que l'acétylène, éthylène, éthanol ou méthane à une température comprise entre 350 et 1150 ° C, en utilisant une nanoparticule comme catalyseur. Généralement, le choix du catalyseur détermine le type de NTC et la température ainsi que le temps de réaction qui peuvent être utilisés pour le contrôle de la qualité et de la longueur des tubes des NTC.

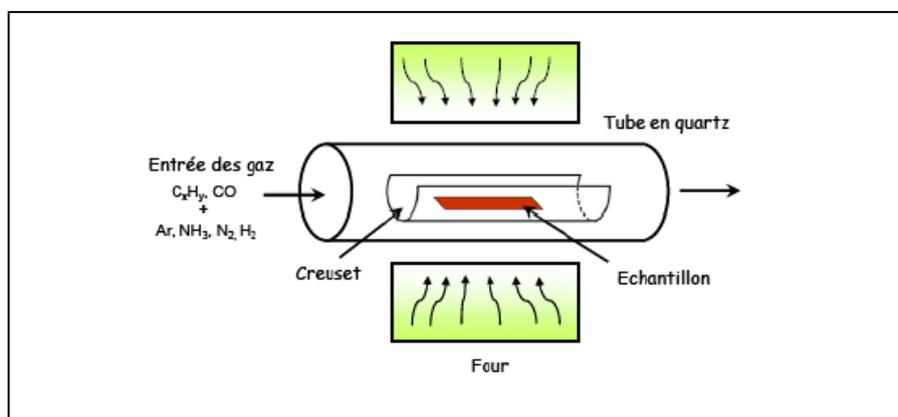


Figure I. 20 : Schéma de principe de Production de nanotubes par dépôt chimique en phase vapeur.

Ils existent deux types de mécanismes de croissance :

Croissance par tête voir figure I.21 (a) et croissance par pied voir figure I.21 (b) en fonction de l'interaction entre le catalyseur et le substrat. [26]

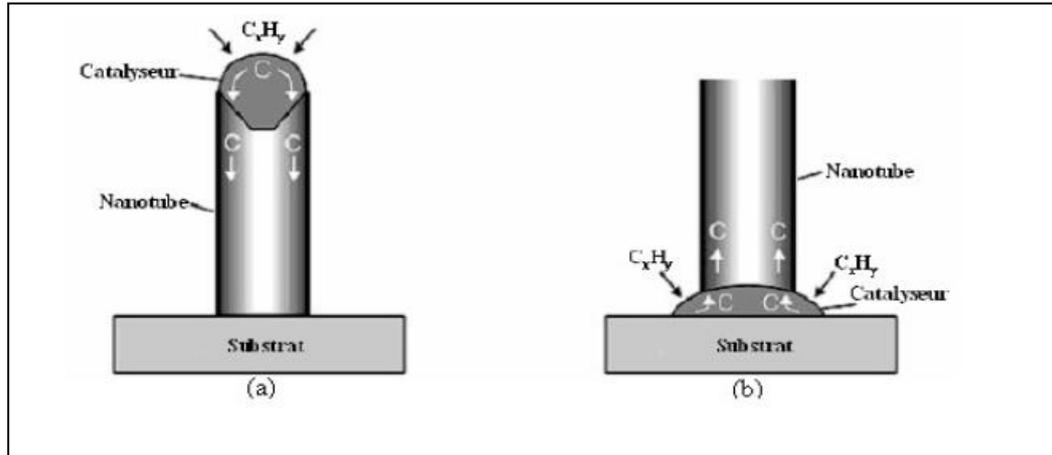


Figure I. 21 : Schéma de croissance « tip-growth » et « base-growth » de NTC.

Ces dernières années, différentes techniques ont été mise au point pour la synthèse de CNT par dépôt chimique en phase vapeur tel que la décomposition catalytique de CO (CVD HiPco) et par l'utilisation d'un catalyseur spécifique (CoMoCat) pour augmenter le rendement.

➤ **Cas particulier du HiPCo (High-Pressure carbon monoxide)**

Dans le procédé HiPCO, le SWCNT est synthétisé par une réaction en phase gazeuse à haute pression de CO avec typiquement du fer $Fe(CO)_5$ comme catalyseur. En général, le choix du catalyseur détermine le type de NTC et la température et le temps de réaction peuvent être utilisé pour contrôler la qualité et la longueur des tubes, l'évolution récente de cette méthode a permis un taux de croissance plus rapide et une qualité améliorée des NTC.

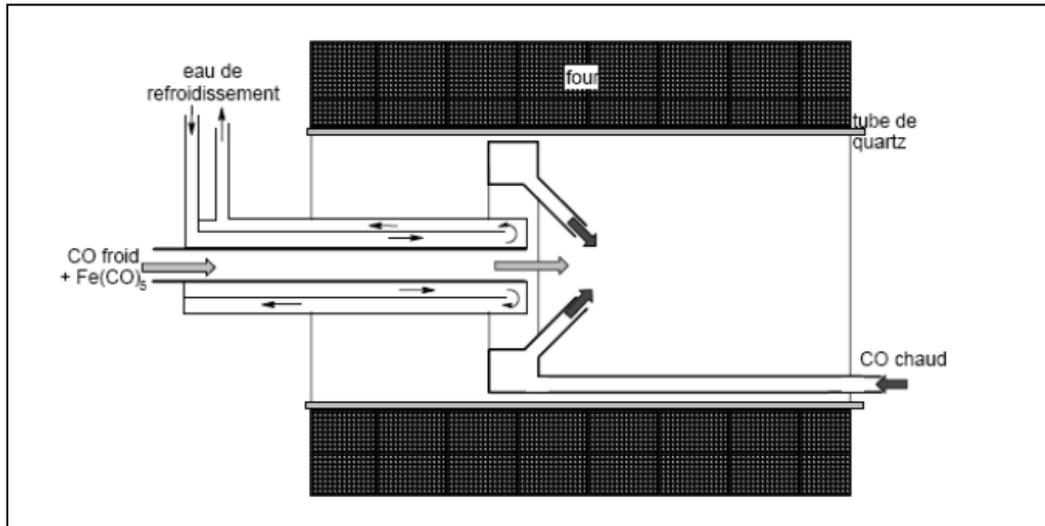


Figure I. 22 : Coupe schématique du réacteur du flux de CO à haute pression (HiPco). [27]

On peut obtenir avec la méthode Hipco des nanotubes de carbone d'environ 1 nm de diamètre avec une pureté de 97% à peu près.

➤ Cas particulier du catalyseur CoMoCAT

La Synthèse de SWNT à structures contrôlées utilisant le procédé CoMoCAT Pour la production de nanotubes à grande échelle, l'utilisation d'un catalyseur particulière de grande surface est très avantageuse. Dans un catalyseur supporté typique, l'espèce active (par exemple un groupe de métaux) est stabilisée dans un état de dispersion élevé sur la surface d'un support réfractaire tel que l'alumine, la silice ou la magnésie. Ce type de catalyseur est similaire à celui utilisé dans l'industrie chimique et pétrochimique pour la production de polymères, de combustibles, de solvants, etc. L'un des principaux avantages de l'utilisation de catalyseurs sur support réside dans le fait que les aspects techniques de la conception des réacteurs possibles (lit fluidisé, lit, lit de transport, four rotatif, etc.) sont bien connus dans l'industrie et la mise à l'échelle est une technologie mature [28].

Dans un état non restreint comme par exemple lors d'une ablation au laser, le taux de croissance des nanotubes de carbone à paroi unique est au moins supérieur à plusieurs

microns par seconde. En revanche, lorsque la croissance se produit par décomposition catalytique de molécules contenant du carbone sur des catalyseurs de grande surface, le processus de croissance global se poursuit sur une échelle de quelques minutes à quelques heures. Dans le cas où la quantité de dépôts de carbone augmente lentement avec le temps cela ne signifie pas nécessairement que la croissance d'un nanotube donné est aussi lente. En d'autres termes, le lent taux observé pour le taux global de dépôt de carbone comprend une période d'induction suivie d'un taux de croissance rapide des nanotubes. Par conséquent, de nouveaux sites de nucléation apparaîtront sur un matériau de grande surface et chacun donnera lieu à un nanotube à croissance relativement rapide. Les nanotubes qui croissent plus tard seront gênés par la présence de ceux qui ont poussé plus tôt. Pour avoir une sélectivité élevée vis-à-vis des SWCNT, la nucléation de l'embryon du nanotube doit avoir lieu avant le frittage des particules métalliques. Plusieurs approches ont été suivies pour éviter un frittage rapide. La stratégie utilisée dans la méthode CoMoCAT consiste à maintenir l'espèce active de Cobalt (Co) stabilisée dans un état non métallique par interaction avec l'oxyde de molybdène (MoO_3) avant qu'elle ne soit réduite par le composé carboné (CO). Lorsqu'il est exposé au monoxyde de carbone, le double oxyde de Co-Mo est carburé, produisant du carbure de molybdène et de petits agrégats de Co métalliques, qui restent dans un état de dispersion élevé entraînant une grande sélectivité envers le SWNT de très petit diamètre. Les synthèses à basse température et la stabilisation de petites grappes métalliques donnent un produit à base de nanotubes CoMoCAT avec un diamètre moyen plus petit et une distribution plus étroite des structures par rapport aux autres méthodes de synthèse. Le procédé CoMoCAT utilise des réacteurs à lit fluidisé, comme illustré sur la figure I.23, pour maintenir un contrôle précis de la température et des débits, ce qui se traduit par une sélectivité élevée (n, m). [29]

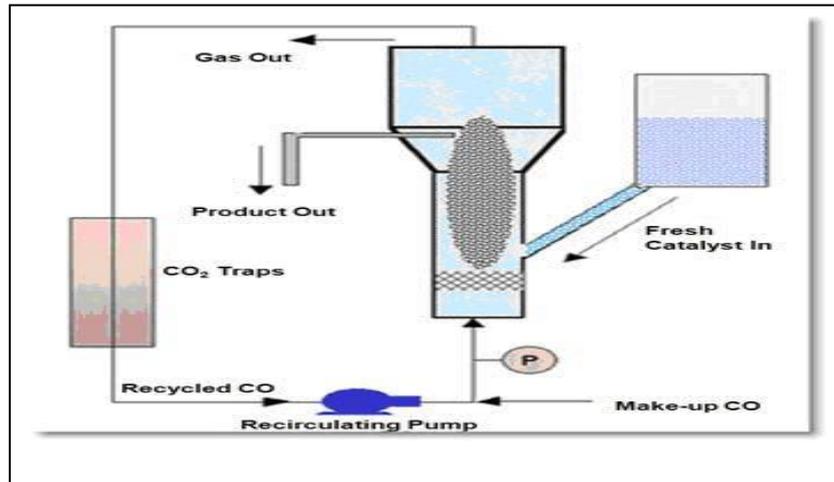


Figure I. 23 : Illustration d'un réacteur à lit fluidisé capable d'augmenter la production de SWNT à l'aide du procédé CoMoCAT [29]

I.3 .6.4. Comparaison, limites et potentiel des différentes méthodes de synthèse.

L'extrême sensibilité des relations structure-propriété du nanotube constitue un défi majeur pour la synthèse de NTC avec un diamètre, une longueur et une chiralité contrôlés [26,31]. Les techniques en phase gazeuse telles que les MCV possèdent le plus grand potentiel d'augmentation de la production de NTC [27-28]. On peut conclure que, selon les propriétés des NTC, différentes méthodes doivent être comparées selon les avantages et d'inconvénients de chacune , car aucune stratégie de synthèse optimale n'existe pour tous les types de NTC. [30]

Méthodes	Arc électrique	Ablation laser	CVD
Qui ?	Ebben et Ajayan, Nec , Japen	Smalley, Rice ,1995	Endo, Shinshu
Température	4000°C-2000°C	1200°C-2000°C	750°C-1000°C
Rendement ?	30 à 90%	>70%	20 à 100%
SNTC	Nanotube très court Diamètre ~0.6-1.4 nm	Long paquet de nanotube 5 à 10µ Diamètre ~1-2nm	Long nanotube Diamètre ~0.6-4nm
MNTC	Nanotube très court Diamètre interieur<1-3nm Diamètre exterieur~10nm	Pas vraiment d'intérêt pour cette technique car couteuse, mais la synthèse de M NTC est possible	Longueur variable des nanotubes Diamètre ~10-240nm
Avantages	-Production SNTCs et MNTCs -Forte Qualité des NTCs -Technique peu couteuse -Croissance a l'air libre	-Production SNTCs -Diamètre contrôlable -Peu de défauts	Faible température de fabrication ; Diamètre contrôlable des NTCs ; Longueur contrôlable des NTCs ; Croissance localisée sur substrat ; NTCs de grande qualité
Inconvénients	-Forte température de fabrication -Longueur des NTCs non contrôlable -Fabrication de NTCs en poudre -Besoin d'un traitement chimique (purification des NTCs)	-Température de fabrication élevée -Technique couteuse -Alimentation électrique élevée	Fabrication de MNTCs principalement Quelque défauts structuraux des NTCs

Tableau I. 2 : Résumé des trois méthodes les plus utilisées actuellement pour la fabrication de NTC [15]

I .3 .7 Méthodes de purification des nanotubes de carbone

Après la synthèse, la purification des NTC se fait en les séparant d'autres entités en général tous les matériaux à base de NTC préparés selon les méthodes mentionnées ci-dessus nécessitent une purification. La purification des matériaux CNT est cruciale pour l'acceptation de cette nouvelle classe de matériaux. Les impuretés typiques sont constituées de particules de

catalyseur et de carbone dans différentes modifications telles que le carbone amorphe et fullerènes tubulaires. Les méthodes de purification peuvent être divisées en trois catégories, à savoir physique, chimique, ou une combinaison des deux. Un aperçu des différentes méthodes de purification sont discutés ci-dessous :

I .3.7.1 Purification chimique

Les procédés de purification chimique sont axés sur l'élimination des impuretés de carbone ou de métaux et d'oxydes métalliques. Les techniques d'élimination du carbone reposent sur l'oxydation chimique par oxydation thermique ou par plasma en phase gazeuse, l'oxydation en phase liquide ou l'oxydation électrochimique reposent sur le fait que des impuretés telles que la suie, les fullerènes, de carbones amorphes présentent habituellement une résistance à l'oxydation inférieure à celle des NTC. Pour une élimination efficace des impuretés, ces techniques d'oxydation peuvent être accompagnées d'une perte considérable de NTC et d'une ouverture oxydante des bouchons d'extrémité de NTC. En particulier lors de l'oxydation liquide, des groupes fonctionnels peuvent être créés ou des débris oxydés peuvent se fixer aux NTC [31], ce qui peut affecter la réactivité chimique et la pertinence toxicologique des NTC purifiés [32]. La conversion chimique par voie humide des impuretés métalliques en sels hydrosolubles par les acides minéraux, qui est la technique la plus importante pour éliminer les métaux et les oxydes métalliques des catalyseurs et de leur support, peut bénéficier d'un traitement d'oxydation précédent permettant d'ouvrir l'enveloppe de métal recouverte de carbone en éliminant les particules qui peuvent empêcher leur dissolution. Étant donné que les impuretés métalliques, telles que Co ou Y, posent un problème de toxicité important, des procédés de purification efficaces sont essentielles pour exclure les effets possibles de ces métaux.

I.3.7.2 Purification physique

Les méthodes de purification physique reposent sur la séparation des NTC des impuretés au moyen de différences de propriétés physiques entre les NTC et ces impuretés, c'est-à-dire le rapport de longueur, la taille, la solubilité, la gravité, le magnétisme, la température d'évaporation, etc., chromatographie, centrifugation, fractionnement en flux de champ, électrophorèse, ainsi que le recuit à haute température. Les méthodes de purification physique peuvent permettre de préserver la structure intrinsèque des NTC. Malheureusement, la plupart des techniques, à l'exception du recuit à haute température ne sont pas très efficaces et nécessitent que les NTC se présentent sous une forme bien dispersée ce qui modifie leur enchevêtrement et peut les raccourcir lors du démêlage mécanique.

I .3 .7.3. Purification en plusieurs étapes

Seule une combinaison de méthodes chimiques et physiques permet d'optimiser la purification de manière à obtenir un échantillon de CNT de grande pureté et essentiellement non endommagé dans des conditions douces. La morphologie, le contenu et la structure des impuretés étant fortement liés à la technique de synthèse, il n'existe aucune méthode standardisée. En fonction de la structure et de la pureté du matériau une optimisation spécifique de l'échantillon est nécessaire pour une purification efficace [33-34].

I .3 .8 . Propriétés des nanotubes de carbones

Les arrangements atomiques des atomes de carbone sont responsables de leurs uniques propriétés électriques, thermiques et mécaniques des NTC. Ces propriétés sont discutées ci-dessous :

I .3 .8 .1 La conductivité électrique

Un nanotube de carbone métallique peut être considéré comme un matériau hautement conducteur. La chiralité et le degré de torsion de la feuille de graphène détermine la conductivité des interconnexions des CNT.

I .3 .8 .2 Force et élasticité

Chaque atome de carbone dans une seule feuille de graphite est relié par une liaison chimique forte à trois atomes voisins. Ainsi, les NTC peuvent présenter le module d'élasticité dans le plan basal le plus puissant et devraient donc constituer une fibre à haute résistance. Le module d'élasticité des SWNT est beaucoup plus élevé que l'acier, ce qui les rend très résistants. Bien qu'une pression sur l'extrémité du nanotube provoque sa courbure, le nanotube reprend son état initial dès que la force est annulée. Cette propriété rend les NTC très utiles comme pointes de sonde pour la microscopie à sonde à balayage haute résolution. Bien que le module de Young actuel du SWNT soit au environ de 1 TPa, une valeur beaucoup plus élevée de 1,8 TPa a été rapportée pour différentes techniques de mesure expérimentale, les valeurs du module de Young varient de 1,22 TPa à 1,26 TPa en fonction de la taille et de la chiralité des SWNT.

Il a été observé que le module d'élasticité des MWNT n'est pas fortement dépendant du diamètre. Principalement les modules de MWNT sont corrélés à la quantité de désordre dans les parois des nanotubes de carbones.

I .3 .8 .3. Conductivité thermique

Les NTC peuvent présenter une supraconductivité inférieure à 20 K (environ -253 °C) en raison des fortes liaisons C – C dans le plan du graphène. La forte liaison C-C offre une résistance et une rigidité exceptionnelles contre les contraintes axiales. De plus, la plus grande dilatation inter planaire et la dilatation thermique nulle dans le plan des SWNT offrent une grande flexibilité contre les contraintes non axiales. En raison de leur conductivité thermique élevée et de leur grande expansion dans le plan, les NTC offrent des perspectives intéressantes dans les domaines de l'électronique moléculaire à l'échelle nanométrique, des dispositifs de détection et d'actionnement, du renforcement des fibres additives dans les matériaux

composites fonctionnels, etc. Des mesures expérimentales récentes suggèrent que les matrices intégrées aux CNT sont plus solides que les matrices polymères nues. Par conséquent, il est prévu que le nanotube puisse également améliorer de manière significative les propriétés thermomécaniques et thermiques des matériaux composites.

I.3.8.4. Emission sous champ des nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone se sont récemment avérés être d'excellents systèmes pour l'émission de champ. Leur bas seuil de champ électrique pour l'émission et leur forte densité de courant d'émission les rendent intéressants pour des applications technologiques [35].

I.3.8.5. facteur de forme

L'une des propriétés intéressantes des CNT est le facteur de forme élevé, qui en déduit qu'une charge plus faible en NTC est nécessaire par rapport aux autres additifs conducteurs pour obtenir une conductivité électrique similaire. Le facteur de forme élevé des NTC présente une conductivité électrique unique par rapport aux additifs classiques tels que la fibre de carbone hachée, le noir de carbone ou la fibre d'acier inoxydable.

I.3.8.6. Absorption

Les nanotubes de carbone et les composites de CNT sont devenus des matériaux absorbant et cela est dû à leurs poids léger et leurs flexibilité accrue ainsi que leurs résistance mécanique élevée et de leurs propriétés électriques supérieures. Les NTC apparaissent donc comme le candidat idéal pour la filtration des gaz de l'air et de l'eau. La gamme de fréquences d'absorption des composites SWNT-polyuréthane s'étend de 6,4 à 8,2 (1,8 GHz) à 7,5 à 10,1 (2,6 GHz) et à 12,0 à 15,1 GHz (3,1 GHz) (Wang et al. 2013). De nombreuses recherches ont déjà été menées pour remplacer le charbon actif par des NTC pour certaines applications de très haute pureté.

I.3.9. Application des nanotubes de carbone

Les applications des NTC dans différents domaines sont énumérées ci-dessous.

Domaine d'application des CNT

Les propriétés électroniques et opto-électroniques des nanotubes de carbone sont à la base d'un vaste domaine d'applications. Les NTC possèdent des propriétés et des qualités remarquables en tant que matériaux de structure, leurs applications potentielles incluent :

- ✚ Les textiles : Les CNT peuvent produire des tissus imperméables et résistants à la déchirure.
- ✚ Les armures corporelles : Les fibres de CNT sont utilisées comme gilet de combat. Les vestes servent à surveiller l'état du porteur et à protéger des balles.
- ✚ Le béton : Les CNT dans le béton augmentent sa résistance à la traction et arrêtent la propagation de la fissure.
- ✚ Le polyéthylène : Les fibres de CNT peuvent être utilisées comme polyéthylène. Le polyéthylène à base de CNT peut augmenter le module d'élasticité des polymères de 30%.
- ✚ Le matériel de sport : balle de golf, bâtons de golf, raquettes de tennis plus fortes et plus légères, pièces de bicyclettes et bâtons de baseball.
- ✚ Les ponts : Les CNT peuvent être en mesure de remplacer l'acier dans les suspensions et les ponts.
- ✚ Volants d'inertie : Les rapports force / poids élevés des CNT permettent des vitesses de rotation très élevées.
- ✚ Protection contre l'incendie : De fines couches de papier mâché peuvent potentiellement protéger l'objet du feu. La couche dense et compacte de fibres de

CNT ou de carbone sous forme de papier-collecteur peut efficacement refléter la chaleur.

➤ Domaines électromagnétique

Les NTC peuvent être fabriqués en tant que conducteurs électriques, semi-conducteurs et isolants.

Ces applications incluent :

- ✚ Bucky paper : Les feuilles minces de nanotubes sont 250 fois plus résistantes et 10 fois plus légères que l'acier. Ils peuvent être utilisés comme dissipateur de chaleur pour les panneaux de particules, le rétroéclairage pour les écrans LCD ou la cage de Faraday pour protéger les appareils électriques dans les avions.
- ✚ Filament d'ampoule : Les NTC peuvent être utilisés comme alternative aux filaments de tungstène dans les lampes à incandescence.
- ✚ Aimants : Un champ magnétique puissant peut être généré à l'aide de CNT à parois multiples revêtues de magnétite.
- ✚ Cellules solaires : La diode Germanium CNT exploite l'effet photovoltaïque. Dans certaines cellules solaires, les nanotubes remplacent l'ITO (oxyde d'étain-indium) pour permettre à la lumière de passer aux couches actives et de générer un photocourant.
- ✚ Les antennes électromagnétiques : Les CNT peuvent servir d'antenne pour la radio et d'autres dispositifs électromagnétiques en raison de leur durabilité, de leur légèreté et de leurs propriétés conductrices. L'effet de peau dans les NTC est négligeable aux hautes fréquences en raison de l'inductance cinétique supplémentaire. Cela se traduit par une faible dissipation de puissance, d'où une efficacité d'antenne élevée.

➤ Domaine électro-acoustique

L'application de CNT dans le domaine de l'électro-acoustique est citée ci-dessous :

- ✚ Les haut-parleurs : Les haut-parleurs peuvent être fabriqués à partir de feuilles de CNT parallèles. Un tel haut-parleur peut générer un son similaire au son d'un éclair produisant un tonnerre.

➤ **Domaine de la chimie**

Les CNT trouvent également d'énormes applications dans le domaine de la chimie, dont quelques-unes sont les suivantes :

- ✚ Filtre antipollution :- Les NTC sont l'un des meilleurs matériaux pour les filtres antipollution, car ils possèdent une grande capacité d'absorption et une grande surface spécifique. La conductance des NTC change lorsque du gaz pollué entre en contact avec lui. Cela aide à détecter et à filtrer l'air pollué .Les membranes de CNT peuvent filtrer avec succès le dioxyde de carbone des émissions des centrales.
- ✚ Filtre à eau : Les membranes en CNT peuvent faciliter la filtration. Il peut réduire les coûts de distillation de 75%. Ces tubes sont si minces que de petites particules (telles que des molécules d'eau) peuvent les traverser tout en bloquant les plus grosses particules (telles que les ions chlorure dans le sel).
- ✚ Les nanofils chimiques : Les CNT trouvent leurs applications dans la fabrication de nanofils en utilisant des matériaux tels que l'or, l'oxyde de zinc, l'arséniure de gallium, etc. Les nanofils de CNT à base d'or sont très sélectifs et sensibles à la détection de sulfure d'hydrogène (H₂S).

Les nanofils de CNT à base d'oxyde de zinc (ZnO) peuvent être utilisés dans des applications pour des dispositifs émettant de la lumière et des collecteurs d'énergie vibratoire.

- ✚ Capteurs : Les capteurs à base de CNT peuvent détecter la température, la pression atmosphérique, les gaz chimiques (tels que le monoxyde de carbone, l'ammoniac), la pression moléculaire, les contraintes, etc.

Le fonctionnement d'un capteur à base de CNT dépend principalement de la génération de courant / tension. Le courant électrique est généré par le flux de porteur chargé libre induit dans n'importe quel matériau. Cette charge est généralement modulée par l'adsorption d'une cible à la surface des NTC.

Un dispositif de détection de gaz fabriqué à base de CNT est illustré sur la figure I.24.

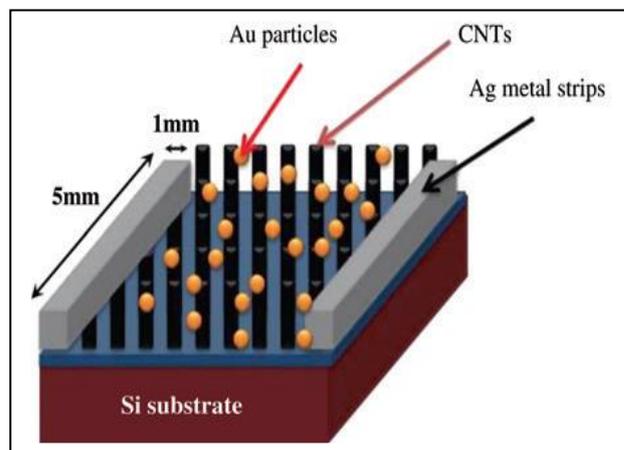


Figure I. 24 : Détecteur de gaz fabriqué.

➤ **Domaine de la mécanique**

Les applications potentielles des NTC se retrouvent également dans les domaines suivants du génie mécanique :

- ✚ Oscillateur : Les oscillateurs basés sur les CNT ont atteint des vitesses supérieures à celles des autres technologies (> 50 GHz) .Les chercheurs ont rapporté un oscillateur moléculaire avec des fréquences allant jusqu'à plusieurs gigahertz.

Le fonctionnement de cet oscillateur repose principalement sur les propriétés de palier à faible frottement et d'usure d'un CNT à parois multiples d'un diamètre compris entre 1 nm et quelques dizaines de nanomètres.

✚ Imperméable : Des NTC peuvent être utilisés pour préparer un tissu de coton super hydrophobe par enduction et par immersion. Cette approche est uniquement basée sur les réactions chimiques provoquées par une solution de nitrène activée par UV. La solution est utilisée pour transformer la surface en coton hydrophile en super hydrophobe avec un angle apparent de contact avec l'eau de 154°. Étant donné que les NTC sont fixés de manière covalente sur la surface du tissu en coton, la super-hydrophobie possède une grande stabilité et durabilité.

➤ **Domaine optique**

Les nanotubes de carbone sont cultivés comme un champ d'herbe, où chaque nanotube est séparé comme par un brin d'herbe. Ainsi, une particule de lumière rebondit entre les nanotubes. Dans ce processus, la lumière est complètement absorbée et convertie en chaleur.

Par conséquent, l'absorbance des NTC est extrêmement élevée dans de larges gammes allant du FUV au FIR [FUV (Ultraviolet Lointain) : 100-200 nm ; FIR (infrarouge lointain) : 50-1000 μm].

➤ **Circuits électriques**

Les NTC sont des matériaux attrayants en sciences fondamentales et en technologie. Ils ont démontré des propriétés électriques uniques pour la construction de dispositifs électroniques, tels que les transistors à effet de champ CNT (CNTFET) et les diodes CNT. Les NTC peuvent être utilisés pour former une diode à jonction p – n par dopage chimique et revêtement polymère. Ces types de diodes peuvent être utilisés pour former une puce

informatique. Les diodes CNT peuvent potentiellement dissiper la chaleur des puces d'ordinateur en raison de leurs propriétés de transmission thermique uniques.

➤ **Interconnexions**

Dû à leur la conductivité les SWNTs et plus précisément les métalliques sont utilisé de manière efficace comme interconnexions entre les niveaux métalliques dans la fabrication des CI. Les nanotubes permettent une meilleure conductivité électrique et thermique en comparaison du cuivre, d'autre part vu qu'ils ne sont pas des métaux massifs ils sont peu sensibles à l'effet de peau qui sanctionne les transmissions haute fréquence [36]. Les nanotubes de carbone (NTC) sont devenus l'une des solutions matériels d'interconnexion les plus potentielles du régime actuel à l'échelle nanométrique. La densité de courant plus élevée de 1000 MA / cm² d'un CNT isolé peut éliminer les problèmes de fiabilité affectent les interconnexions de cuivre à l'échelle nanométrique actuelle par conséquent, les interconnexions peuvent potentiellement offrir d'immenses avantages par rapport au cuivre en termes de diaphonie, de retard et de dissipation de puissance.

➤ **Les transistors**

Les NTC peuvent former des canaux conducteurs dans des configurations de transistors, comme illustré sur la figure I.25, Deux architectures du transistor ont été développées. Dans les deux cas les CNT connectent les électrodes de source et de drain et montrent un comportement excellent dans le domaine de la conception de mémoire, des amplificateurs, des capteurs, des détecteurs, etc. Dans une architecture de dispositif la source et le drain sont connectés par un seul nanotube. Dans une autre architecture de dispositif un réseau aléatoire de nanotubes fonctionne comme un canal conducteur.

Les avantages du CNTFET sur le Si-MOSFET sont les suivants :

1. CNTFET présente un courant de commande plus élevé que Si-MOSFET.

2. Les CNTFETs présentent une transconductance d'environ quatre fois supérieure à celle du Si-MOSFET
3. La vitesse moyenne des porteurs du CNTFET est presque le double de celle du Si-MOSFET.

Le transistor CNTFET auquel nous nous intéressons dans ce travail fera l'objet du second chapitre.

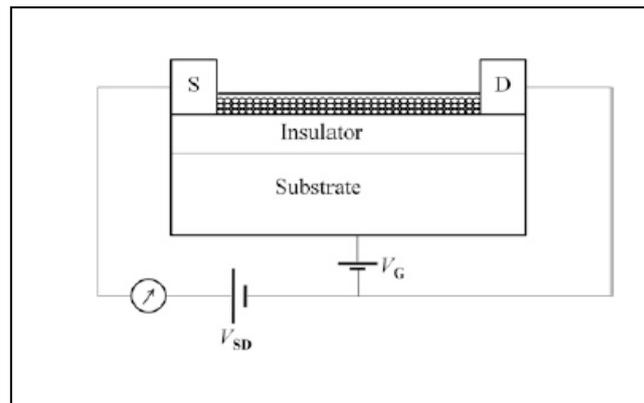


Figure I. 25 : Transistor basé sur un nanotube de carbone.

I.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les structures atomiques, les propriétés et les applications uniques des nanotubes de carbone. Nous avons ensuite abordé leurs propriétés électriques, mécaniques et thermiques des NTC qui dépendent principalement de leurs diamètres et de leurs chiralités. Nous avons aussi pu résumer différentes méthodes de production et de purification des nanotubes de carbone pour finir nous avons pu énumérer les différentes applications des CNT.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. MBITSI, « Synthèse de nanotubes de carbone pour l'obtention de vias d'interconnexions électriques et de drains thermiques », Thèse doctorat université d'Orléans, 2010
- [2] A. BENYOUNES, « Synthèse de nanotubes de carbone dopés à l'azote et leur application catalytique », thèse doctorat université de Toulouse, 2016
- [3] <http://villemin.gerard.free.fr/aScience/PhyNucle/NbMasse.html>
- [4] Sensors Kaveh Movlaee, Mohammad Reza Ganjali, Parviz Norouzi and Giovanni Neri « Iron-Based Nanomaterials/Graphene Composites for Advanced Electrochemical », Nonomaterials, Department of Engineering, University of Messina,, Italy
- [5] E. GARRIDO, « fonctionnalisation de nanotubes de carbone pour leur incorporation dans des matrices métalliques » thèse doctorat, université de bordeaux, 2010
- [6] <http://Intra-science.com>
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cubique_%C3%A0_faces_centr%C3%A9es
- [8] <https://mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2015-11/Graphite.asp>
- [9] <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-fullerenes-sont-ils-dangereux-environnement-16752/>
- [10] <http://nanotubesdecarbone.e-monsite.com>
- [11] C. Ducati, K. Koziol, S. Friedrichs, T.J.V. Yates, M.S. Shaffer, P.A. Midgley, A.H. Windle, « Crystallographic Order in Multi-Walled Carbon Nanotubes Synthesized in the Presence of Nitrogen, Small », (2006) 774-784.
- [12] Geim, A. K.; Novoselov, K. S.; Nature Materials **2007**, 6, 183–191.
- [13] L. V. Radushkevich and V. M. Lukyanovich, Zh. Fiz. Khim. 26, 88 1952.
- [14] R.Thibault, « Etude de nano-systèmes électro-mécaniques (NEMS) à base de nanotubes de carbone pour applications hyperfréquences ». these doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, décembre 2008.
- [15] S. PACCHINI, « Etude des potentialités des nanotubes de carbone dans le domaine hyperfréquence : Application à l'élaboration de matériaux nanocomposites et contribution à la

miniaturisation de composants électromécaniques (NEMS) », thèse doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, décembre 2008.

[16] R. V. Seidel, A. P. Graham, G. S. Duesberg, M. Liebau, E. Unger, F. Kreupl et W. Hoenlein, « Faster and smaller with carbon nanotubes », Conference proceedings of GAAS 2004, Amsterdam, Pays-Bas, 10-15 Octobre 2004, pp. 5-8, 2004.

[17] W. ADDA BEDIA, « contribution à l'étude des propriétés physiques et optiques des nanowires et nanotubes », thèse de doctorat en sciences, Université Djillali Liabes Sidi bel Abbes, 2015.

[18] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Nanotubes/1313232>

[19] Nanotubes.ppt.

[20] R .MAHROUG, « modélisation et simulation des propriétés physiques et électroniques des nanotubes de carbone : application au cntfet», mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali Chlef ,2008/2009.

[21] Kaushik, Brajesh Kumar, Majumder, Manoj Kumar, Carbon nanotubes based VLSI interconnects analysis and design, M.K, 2015 XI, 86, p75

[22] Carbon nanotubes Types, products, arket, and provi-sional assessment of the associated risks to man and the environment project No. 1805, 2015.

[23] Yoshinori Ando and Xinluo Zhao, Synthesis of Carbon Nanotubes by Arc-Discharge Method , New Diamond and Frontier Carbon Technology, Vol. 16, No. 3 2006, MYU Tokyo

[24] B.K. Kaushik and M.K. Majumder, *Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects*, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-81-322-2047-3_2, 2015.

[25]Carbon Nanotube Scienc, Synthesis, Properties and Applications,PETER J. F. HARRIS,University of Reading, UK, 2009.

[26] R. Roshanak, Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones, these doctorat, Universite de LIMOGES, décembre 2008.

[27] P. Nikolaev, M.J. Bronikowski, R.K. Bradley, F. Rohmund, D.T. Colbert, K.A. Smith, R. E. Smalley, Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide, Chem. Phys. Lett., 313, (1999), 91-97.

- [28] B. Kitiyanan, W. E. Alvarez, J. H. Harwell, and D. E. Resasco ‘‘Controlled production of single-wall carbon nanotubes by catalytic decomposition of CO on bimetallic Co-Mo catalysts’’ *Chem. Phys. Lett.*, 317:497–503, 2000.
- [29] CoMoCAT Single walled Carbon Nanotubes from Aldrich Materials Science and Southwest Nanotechnologies, Jul 182011(<https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2917>)
- [30] Florian F Schweinberger and Asmus Meyer-Plath, Status of characterization techniques for carbon nanotubes and suggestions towards standards suitable for toxicological assessment, *J. Phys.*
- [31] Wang Z, Korobeinyk A, Whitby RLD, Meikle ST, Mikhalovsky SV, Acquah SFA and Kroto HW 2010 *Carbon* 48 916.
- [32] Ajayan P and Ebbesen T 1997 *Rep. Prog. Phys.* **60** 1025.
- [33] Hou PX, Liu C, Liu HM and Cheng HM 2008 *Carbon* 46 2003
- [34] Hou P, Bai S, Yang H, Liu C and Cheng HM 2002 *Carbon* 40 81
- [35] Y. L. Kim et al., ‘‘Highly Aligned Scalable Platinum-Decorated Single-Wall Carbon Nanotube Arrays for Nanoscale Electrical Interconnects,’’ *ACS Nano*, vol. 3, no. 9, pp. 2818-2826, 2009.
- [36] Yuan Cheng, Otto Zhou *, Electron field emission from carbon nanotubes, *C. R. Physique* 4 (2003) 1021–1033.

Chapitre II

Aperçu sur les dispositifs mosfet et nanoelectroniques

II.1 Introduction

Ce chapitre donne un aperçu général sur tous les dispositifs nanoélectroniques destinés à remplacer le MOSFET au silicium dans les applications futures. Le MOSFET est au cœur des applications numériques depuis des décennies et le processus de mise à l'échelle du MOSFET est le principal facteur pour pousser ce dispositif tout près de sa limite. Cependant, cela ne signifie pas que le MOSFET sera toujours utilisé dans des systèmes numériques car il va nécessairement atteindre sa limite, et plusieurs nouveaux dispositifs ont donc été conçus afin de remplacer le MOSFET dans l'avenir.

II.2. MOSFET : passage vers les dispositifs nanoélectroniques

L'histoire du transistor à effet de champ métal-oxyde-semi-conducteur (MOSFET) remonte à l'année 1964, année de l'invention du premier MOSFET. Depuis, ce dispositif a dominé les applications numériques, en particulier celles des ordinateurs modernes. Le MOSFET offre une grande fiabilité et une faible consommation d'énergie. De plus il peut également être intégré en grand nombre dans un seul circuit intégré en raison de sa taille relativement petite. Le transistor à effet de champ à grille isolée dit MOSFET est un dispositif à trois électrodes : grille, source et drain. L'électrode de grille est une électrode métallique qui contrôle le flux de courant de la source vers le drain [1]. Pour un MOSFET à canal N et à enrichissement de canal la tension de grille doit être supérieure à la tension de seuil afin de permettre la circulation du courant dans le MOSFET. La source est généralement mise à la terre et il y a une très petite tension de drain appliquée [2]. Lorsque la tension de grille est supérieure à la tension de seuil un canal d'inversion est créé, ainsi les électrons vont circuler de la source vers le drain. L'application d'une tension drain source positive permettra le passage du courant dans le sens inverse du sens de déplacement des électrons. La figure II.1

montre la structure d'un MOSFET .Les figures II.2a et II.2b, illustrent un transistor à l'état bloqué, et à l'état passant.

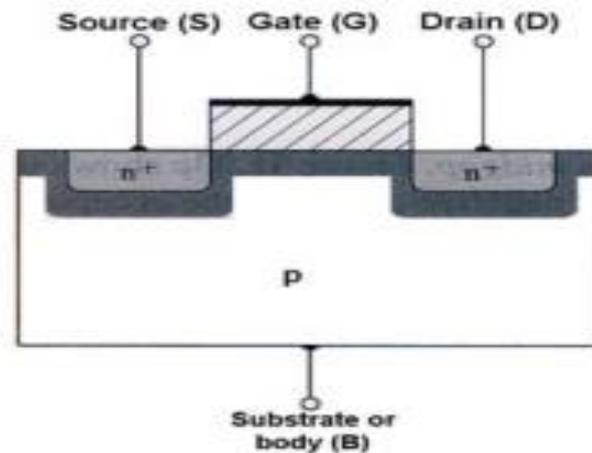


Figure II. 1 : Structure d'un MOSFET.

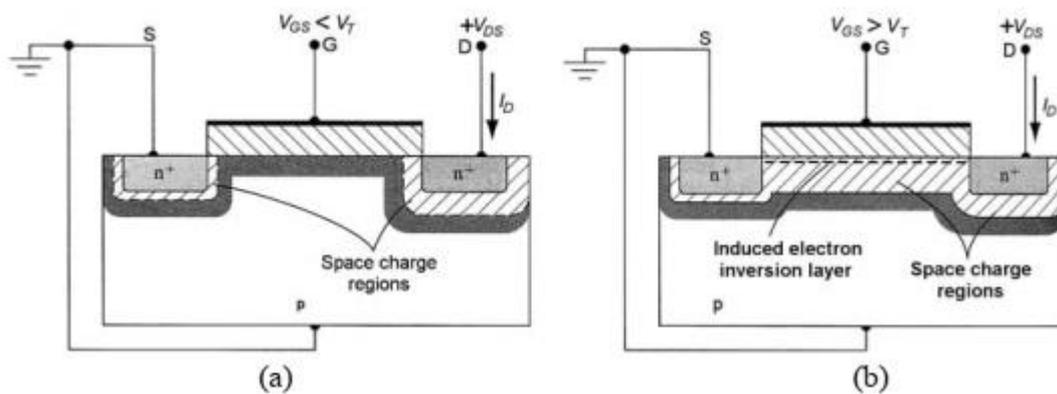


Figure II. 2 : (a) MOSFET à l'état OFF, (b) MOSFET à l'état ON.

Avec les progrès technologiques les transistors MOSFETs ont des tailles de plus en plus réduites d'où la nécessité d'une mise à l'échelle. La mise à l'échelle est un processus qui réduit la taille du MOSFET et améliore en même temps ses performances. La première méthode de mise à l'échelle a été introduite en 1974 dans laquelle, on a pu réduire la taille du transistor, et sa vitesse de commutation. Dans une mise à l'échelle idéale [3] étant donné que la dimension et la tension de fonctionnement sont réduites d'un facteur 0,7 , de nombreuses

améliorations apparaissent telles que le fait que la densité de la surface est doublée, le délai de commutation est réduit d'un facteur 0,7 et l'énergie de commutation est réduite de la moitié. La vitesse de commutation peut être déterminée lorsque la capacité de la grille, les tensions de polarisation et le courant de commande sont connus. L'énergie de commutation est réduite grâce à une capacité parasite de combinaison totale inférieure en raison de la taille réduite du MOSFET.

La réduction de l'énergie de commutation est très importante car la puissance globale du circuit est essentielle et en particulier si le système est utilisé de manière continue pendant une longue période. Le développement du processus de mise à l'échelle a entraîné une réduction de la taille du MOSFET depuis 1970 et a également amélioré la vitesse de commutation et de l'énergie. Le résultat est visible sur la figure II.3 ci-dessous dans laquelle la taille du MOSFET a diminué de 3 μm à 0,13 μm . En conséquence, la densité d'intégration des CI a également considérablement augmenté au cours des 30 dernières années comme le montre la figure II.4.

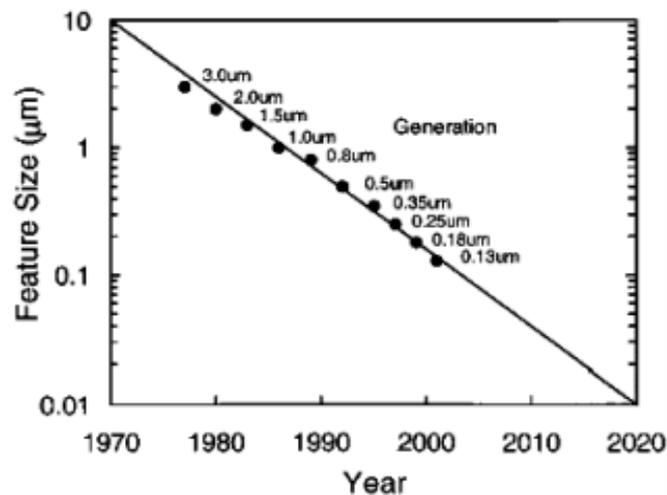


Figure II. 3 : Caractéristiques de la technologie des semi-conducteurs.

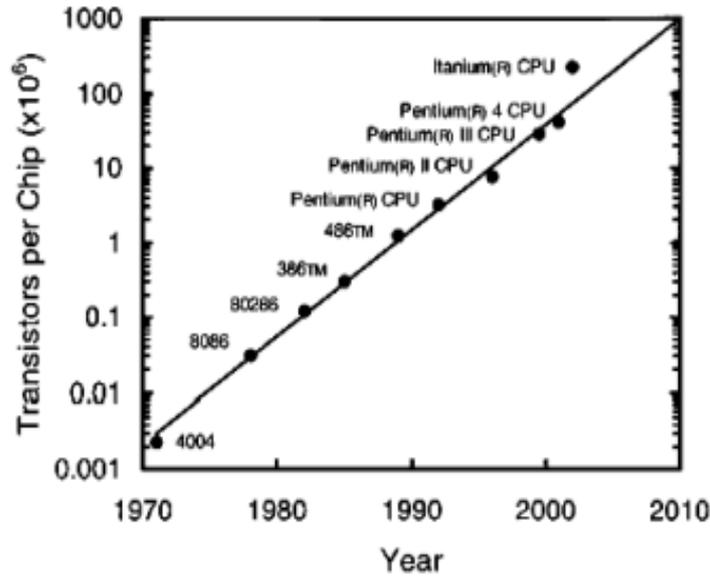


Figure II. 4 : Croissance au cours du temps du nombre de transistors par puce" processeur.

Cette croissance est liée à la «loi de Moore, cofondateur de la société Intel, Gordon Moore avait affirmé dès le début de l'année 1965 que le nombre de transistors par circuit de même taille allait doubler, à prix constants, tous les ans. Par la suite Il rectifia sa théorie en portant à dix-huit mois le rythme de doublement des transistors par puce. Il en déduisit que la puissance des ordinateurs allait croître de manière exponentielle.

Cependant puisque la taille du MOSFET continue de diminuer, la mise à l'échelle ne pourra pas répondre à la demande d'attente sur les applications futures. En effet, la croissance des performances des puces se heurterait au fil du temps avec la miniaturisation à une limite physique : celle de la taille des atomes. Plusieurs effets néfastes peuvent affecter les performances du MOSFET lorsque sa taille devient trop petite.

II.3. Limitations de la mise à l'échelle du MOSFET

Plusieurs effets apparaissent lorsque la taille du MOSFET atteint une échelle nanométrique, la réduction de la taille de ces transistors devient le facteur limitant affectant leurs performances. Ces facteurs limitatifs sont les suivants :

- ❖ les Effets canaux courts ;
- ❖ l'effet tunnel ;
- ❖ le Transport balistique ;
- ❖ l'Épaisseur d'oxyde
- ❖ la tension de seuil
- ❖ résistance de contacte

II.3.1. Les effets de canaux courts

Les effets canaux courts sont des effets qui se produisent lorsque la taille du MOSFET est réduite [4]. L'effet canal court introduit plusieurs mécanismes de courant de fuite dans le MOSFET, tels que le courant de jonction p-n à polarisation inverse, le courant d'inversion faible et le courant d'abaissement de la barrière de potentiel induite par le drain (DIBL) [5]. Une jonction p-n à polarisation inverse existe en raison de la diffusion des porteurs minoritaires près de la région d'appauvrissement et de la génération de paires électron-trou dans la région d'appauvrissement de la jonction à polarisation inverse. Un courant d'inversion faible se produit lorsque la tension de grille est inférieure à la tension de seuil. Le courant d'abaissement de la barrière induite par le drain (DIBL) existe lorsque la barrière potentielle de la source est réduite du fait que la région d'épuisement du drain interagit avec la source. L'existence de DIBL abaissera la tension de seuil.

Un courant d'abaissement du drain induit par la grille (GIDL) se produit dans un champ électrique est élevé entre la grille et le drain, ainsi que le long de la largeur du canal entre la grille et le drain.

Un autre mécanisme de courant de fuite, " Pinch off" se produit lorsque les régions d'épuisement de drain et de source se touchent profondément dans le canal. Un courant de largeur réduite apparaît lorsque la longueur du canal est réduite à moins de 0,5 μm . Le courant tunnel de grille-oxyde se produit lorsque la couche d'oxyde est très mince et provoque

également un courant de fuite à la grille, à travers la bande d'oxydes. Enfin, l'injection de porteurs chauds survient lorsque les porteurs sont injectés dans l'oxyde. La figure II.5 ci-dessous montre les mécanismes de courant de fuite existants en raison d'un effet de canal court [6].

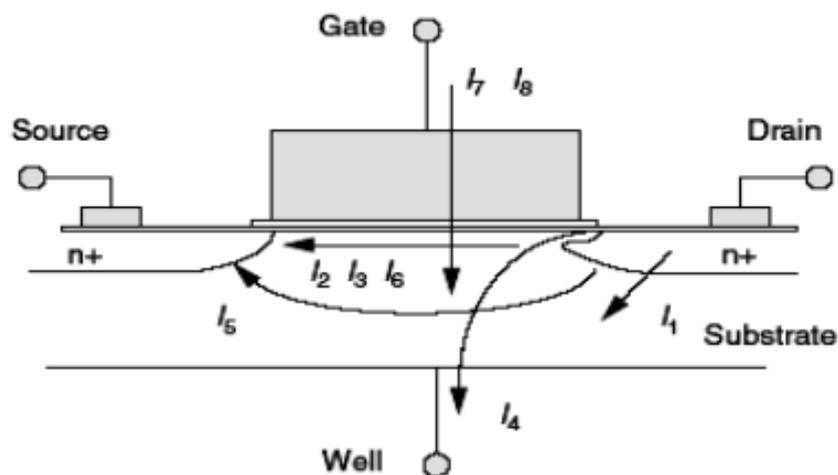


Figure II. 5: Mécanismes de courant de fuite de transistor à canal court : fuite de jonction pn à polarisation inverse (I_1), inversion faible (I_2), abaissement de la barrière induite par le drain (I_3), fuite au drain induit par la grille (I_4), perforation (I_5), effet de largeur étroite (I_6), tunnel à oxyde de grille (I_7) et injection de porteurs chauds (I_8).

II.3.2. Effet tunnel

Un autre effet appelé effet tunnel se produit lorsque le MOSFET est de petites dimensions. Normalement les transistors sont suffisamment séparés pour que le fonctionnement d'un transistor n'affecte pas les autres. La séparation est réalisée en insérant un matériau qui sert de barrière entre deux transistors voisins. Cependant, comme la taille du MOSFET est très petite et la distance de barrière est également petite, il est possible que les porteurs d'un MOSFET traversent la barrière. L'effet tunnel augmente de manière exponentielle lorsque la distance entre les barrières diminue. La figure II.6 ci-dessous montre la barrière potentielle entre deux transistors.

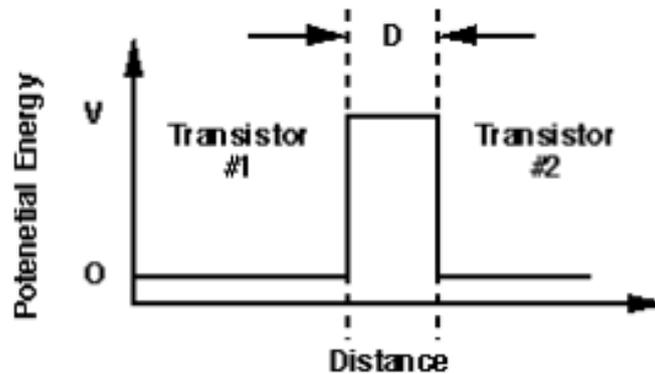


Figure II. 6 : Barrière de potentiel entre deux transistors.

II.3.3. Le transport balistique

Le transport balistique est un autre effet qui existe lorsque le MOSFET est de taille réduite. Le transport balistique est une déviation du mécanisme de transport de porteurs dans un MOSFET [7]. Normalement, lorsqu'un électron se déplace de la source vers le drain, il subit un effet de dispersion qui provoque la diminution de son énergie. Cependant, comme la taille du périphérique est très réduite, ce mécanisme commence à changer et les électrons qui se déplacent de la source directement vers le drain ne font face à aucun effet de diffusion car la distance parcourue est très petite. L'effet de transport balistique a provoqué une amélioration du courant I_{on-off} , du fait que moins de dispersion se produit dans le dispositif et qu'il est donc considéré comme un effet souhaité plutôt que comme un effet limitant les performances du MOSFET. La figure II.7 montre comment s'effectue le transport balistique dans un MOSFET nanométrique.

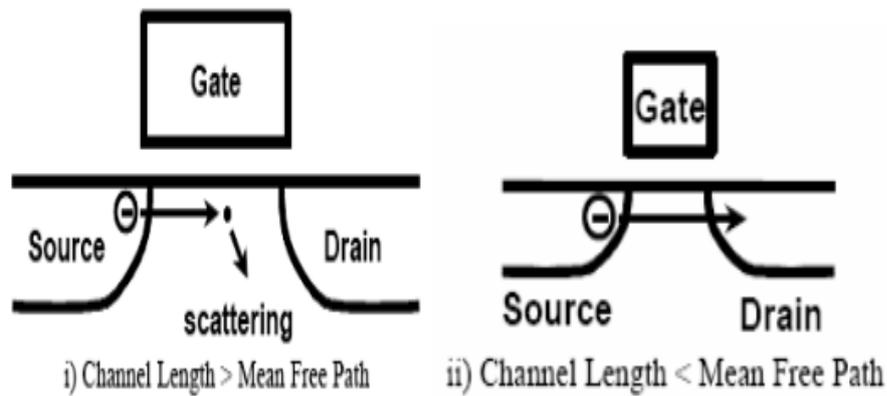


Figure II. 7 : *Transport balistique dans le canal d'un transistor nanométrique.*

D'autre part comme nous nous intéressons aux CNTFET à base de CNT , différentes études expérimentales et de simulations ont pu montrer que le transport des porteurs qui traversent le nanotube du CNTFET de courte dimension peut être considéré comme balistique, pour une polarisation drain-source faible et une longueur du nanotube plus faible que 150 nm ce phénomène signifie que les dispersions de porteurs de charges sont quasi-supprimées dans le nanotube intrinsèque.

II.3.4. La tension de seuil

Une autre limitation de la mise à l'échelle du MOSFET, est la tension de seuil qui ne diminue pas proportionnellement à la longueur du canal. La tension de seuil est définie comme étant la tension de grille à laquelle le courant commence à circuler dans le canal. La tension de seuil est presque maintenue constante lorsque la longueur du canal est comprise entre $1\ \mu\text{m}$ - $0,1\ \mu\text{m}$ et que la tension de seuil s'écarte encore davantage lorsque la longueur du canal est inférieure à $0,1\ \mu\text{m}$ comme le montre la figure II.8 [8]. Lorsque le transistor est mis à une échelle en dessous de $0,1\ \mu\text{m}$ c'est à dire en dessous du seuil où le courant ne diminue pas directement à zéro, mais il diminue de manière exponentielle inversement proportionnelle à l'énergie thermique. C'est parce qu'il y a des électrons distribués thermiquement à la source qui ont assez d'énergie pour surmonter la barrière de potentiel commandée par la tension de grille et ce comportement est déterminé par la thermodynamique

et indépendant de la tension d'alimentation et de la longueur du canal. Une tension de seuil plus élevée donne un courant de fuite plus élevé dans le transistor puisque le courant de fuite, I_{off} , est donné par :

$$I_{off} = I_0 \left(-\frac{qV_t}{mkT} \right) \quad \text{II.1}$$

Où I_0 est le courant extrapolé par largeur à la tension de seuil, m est le facteur d'idéalité sans dimension (généralement $\sim 1,2$) et V_t est la tension de seuil. Étant donné qu'un courant de fuite plus faible est souhaité pour un transistor, le seuil doit donc être aussi le plus bas possible. Le courant de fuite est réduit dix fois pour chaque réduction de 0,1 V de la tension de seuil. Ainsi, que lorsque la taille du MOSFET est réduite la tension de seuil doit être sérieusement envisagée afin d'avoir de bonnes performances.

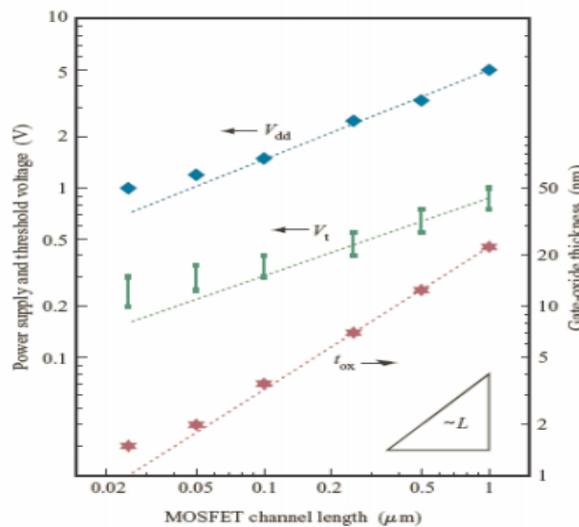


Figure II. 8: Mesure et calcul du courant à effet tunnel de l'oxyde en fonction de la tension de grille pour différentes épaisseurs d'oxyde.

II.3.5. L'épaisseur de l'oxyde de grille

L'isolant de la grille (T_{ox}) dans un MOSFET doit être mince par rapport à la longueur du canal pour que la grille domine et exerce un contrôle sur le potentiel du canal et cela pour

éviter les " effets des canaux courts", qui sont en grande partie le résultat du champ électrique de drain pénétrant dans tout le canal et cela en influençant le potentiel [9].

L'épaisseur de l'oxyde entraîne deux types de limitations. Tout d'abord, une fine couche d'oxyde augmente le courant de fuite, cet effet est également lié à l'effet quantique qui domine le MOSFET lorsque l'épaisseur d'oxyde est réduite. Le courant tunnel dû à une épaisse couche d'oxyde peut sembler négligeable par rapport au courant à l'état On. D'autre part, en raison de l'épaisseur de l'oxyde, il y a une perte d'inversion de charge et également la transconductance à la suite de la quantification par couche d'inversion du poly silicium c'est l'effet déplétion de la grille [10].

Year of 1st DRAM Shipment	1997	1999	2002	2005	2008	2011	2014
Minimum Feature Size	250 nm	180 nm	130 nm	100 nm	70 nm	50 nm	35 nm
Isolated Gate Length	-	100 nm	70 nm	50 nm	35 nm	25 nm	18 nm
DRAM Bits/Chip	256M	1G	(3G)	8G	(24G)	64G	(192G)
DRAM Chip Size (mm ²)	280	400	460	530	630	710	860
Equivalent Physical Gate Oxide Thickness (nm)	3-5	1.9-2.5	1.5-1.9	1.0-1.5	0.8-1.2	0.6-0.8	0.5-0.6
Dielectric Constant of DRAM Capacitor		22	50	250	700	1500	1500
Max Gate Electrode Resistivity (μΩ cm)		60	43	33	23	16	11
Max Silicide/Si Contact Resistivity ρ _c (Ω cm ²)		30x10 ⁻⁸	17x10 ⁻⁸	10x10⁻⁸	5x10⁻⁸	2.5x10⁻⁸	1.5x10⁻⁸
S/D Extension Sheet Resistance (Ω/sq)		350-800	250-700	200-625	150-525	120-450	100-400
S/D Extension x _j (nm)	50-100	42-70	25-43	20-33	16-26	11-19	8-13
S/D Extension Lateral Abruptness (nm/decade)		14	8.5	6.5	4.5	3.2	2.2
Minimum Supply Voltage (volts)	1.8-2.5	1.5-1.8	1.2-1.5	0.9-1.2	0.6-0.9	0.5-0.6	0.5

Tableau II. 1 : Mise en évidence de l'amélioration des performances des MOSFETs au cours du temps [9].

II.3.6. Résistance de contact

Les contacts sont généralement réalisés par des siliciures auto-alignés qui sont en contact avec du silicium fortement dopé. Ce processus fournit un contact ohmique qui couvre complètement la surface des diffusions source / drain, ce qui conduit à la minimisation ou à la réduction de la résistance de contact. Le courant circule de manière distribuée de la source / drain au contact. Les lignes de flux exactes dépendent du profil de dopage dans le silicium et de sa géométrie. La résistance de contact dépend de la surface effective du contact.

L'encombrement actuel sur le bord du contact peut avoir un effet significatif, la résistance de contact peut être calculée par

$$\sqrt{(\rho R_{sd})} / \left(W * \coth \left(\frac{L_c}{L_t} \right) \right) \sim \rho_c / (W L_c) \quad \text{II.2}$$

ρ_c = résistivité de contact spécifique du contact siliciure / semi-conducteur ($\Omega \text{ cm}^{-2}$)

R_{sd} = résistance en couche de la diffusion source / drain ($\Omega / \text{carré}$) ;

W = largeur de contact ;

L_c = longueur de contact

$L_t = \sqrt{(\rho_c R_{sd})}$ est appelée la longueur du transfert et correspond à la distance moyenne parcourue par les porteurs de diffusion avant d'entrer dans le contact.

Pour les valeurs typiques de ρ_c , R_{sd} , L_t , est supérieure à la longueur de contact physique L_c , ce qui donne l'approximation indiquée ci-dessus. Dans ce cas, le courant circule dans toute la longueur du contact et les effets de surpopulation actuels sont minimes. Ainsi, la résistance de contact varie inversement avec la surface de contact si ρ_c est constant. Le processus de formation de siliciure lui-même consomme souvent du silicium car le composant métallique

(Ti, par exemple) est habituellement déposé puis mis à réagir pour former le siliciure. Cela a plusieurs conséquences importantes. Tout d'abord, une partie du volume des régions source / drain fortement dopées est perdue ou consommé par la formation de siliciure. La partie de la région source / drain qui est «perdue» est la partie supérieure qui est normalement la plus fortement dopée et donc la plus conductrice [9].

II.4. Introduction aux dispositifs nanoélectroniques

Avec la réduction de la taille des MOSFETs et par conséquent des dispositifs le MOSFET conventionnel ne pourra plus accomplir sa tâche par conséquent d'autres structures sont étudié pour remplacer le MOSFET conventionnel. Ces différents candidats destinés à remplacer le MOSFET sont :

- a) Le Transistors à un électron
- b) les Dispositifs a effet tunnel résonants
- c) le MOSFET inférieur à 10 nm
- d) Le Transistor à effet de champ à nanotubes de carbone (CNFET)

II.4.1 Transistors à un électron "SET"

Des chercheurs japonais du Nist ont pu réaliser dernièrement des circuits logiques avec des transistors commandés par un unique électron, ce sont des tubes de silicium d'une longueur de 360 nm sur lesquels ils ont pu connecter perpendiculairement trois "portes" isolantes. Grâce à une tension de commande, elles servent d'interrupteurs électroniques.

Le transistor à un électron contrôle une charge électron par électron. Il est formé d'un îlot central conducteur, séparé de deux électrodes source et drain par des barrières tunnel, et où le

potentiel peut être réglé par une grille de contrôle. Dans ce type de dispositif, les dimensions géométriques sont suffisamment faibles rendant les capacités inter-électrodes très petites.

Les transistors à un seul électron appelé "SET" sont des dispositifs de commutation qui utilisent un tunnel électronique contrôlé pour amplifier le courant. La partie de la base du SET, présenté en figure II.9, est constituée de deux jonctions tunnel connectées en série qui se partagent une électrode commune [10]. La jonction du tunnel se compose de deux pièces de métal séparées par un isolant très fin et possède naturellement une capacité électrique basée sur sa géométrie. Les électrons se déplacent d'une électrode métallique à une autre à travers l'isolant au moyen d'un tunnel.

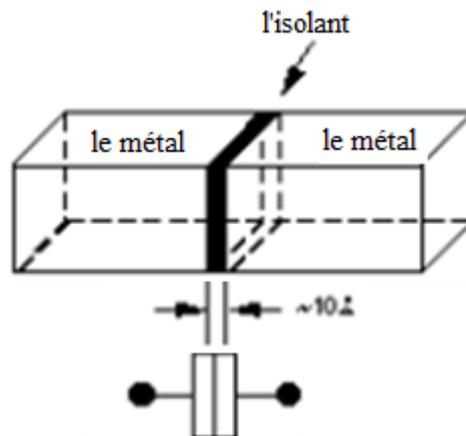


Figure II. 9 : Schéma de principe d'une jonction de tunnel.

La représentation schématique d'un transistor à un électron ayant un îlot de coulomb dans l'oxyde est donné en figure II.10.

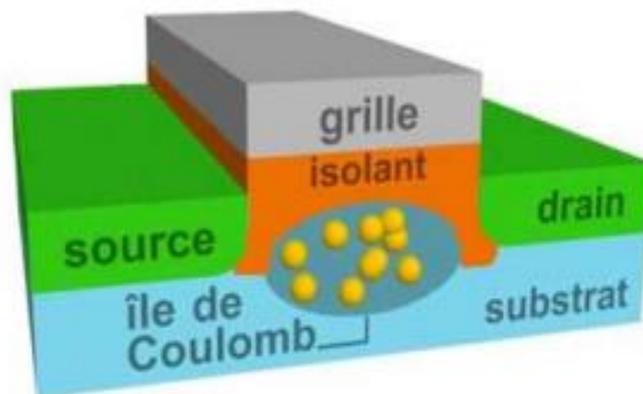


Figure II. 10 : La représentation schématique d'un transistor à un électron.

Le bloc constitutif de base de dispositifs et circuits à un seul électron consiste à placer deux jonctions tunnel en série formant un SET (Figure II.11). L'îlot est formé par un couplage capacitif entre C_g et le nœud situé entre les deux jonctions [11]. Le circuit ressemble beaucoup à un transistor à effet de champ de trois bornes, l'îlot servant de borne de grille, les bornes de drain étant le nœud connecté à l'alimentation et le nœud mis à la terre étant la borne source. Chacune des jonctions tunnel est caractérisée par sa capacité, C_1 et C_2 , et sa résistance tunnel, R_1 et R_2 .

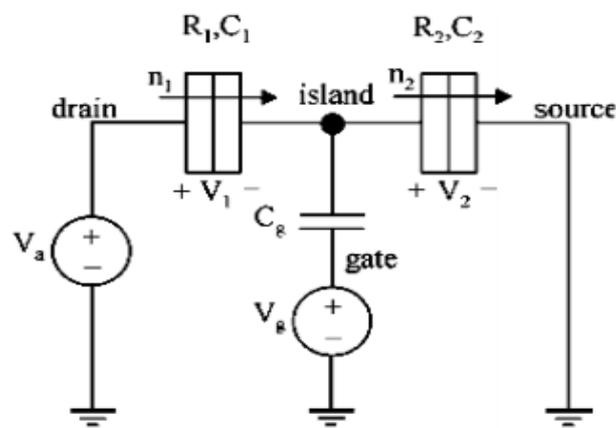


Figure II. 11 : Circuit pour transistor à un électron (SET).

Le blocage de Coulomb est un phénomène présent dans les SET, il supprime le processus de l'effet tunnel dû à l'énergie de barrière de charge. L'énergie de charge de Coulomb ouvre en réalité un vide dans le spectre énergétique qui interdit le passage jusqu'à ce que la barrière soit surmontée par l'application d'une tension suffisante. Une fois qu'un électron entre dans l'îlot, un nouveau blocage de Coulomb existe jusqu'à ce que les électrons se détachent de l'îlot.

II.4.2 Dispositifs à tunnel résonants

Les dispositifs de tunnel résonant sont des dispositifs qui utilisent l'effet quantique sous sa forme la plus simple. Le type le plus simple de dispositif à tunnel résonant est la diode résonante à tunnel (RTD). La structure du RTD est constituée de couches de deux

alliages de semi-conducteurs III / IV différents, tels que GaAs et AlAs. La figure II.12 ci-dessous montre la structure de la RDT.

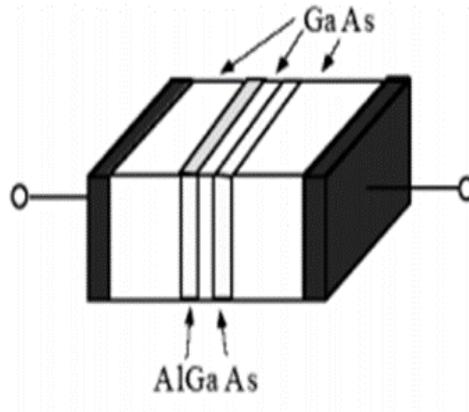


Figure II. 12 : Structure de la diode à tunnel résonant (RTD).

La figure II.12 montre que le fonctionnement de la RTD avec un îlot ou un puits de potentiel est créé entre deux isolants. Lorsqu'un électron réside dans un îlot espacé de 10 nm, la mécanique quantique limite son énergie à l'un ou l'autre des niveaux d'énergie quantifiés discrets finis. C'est la base du fonctionnement de la RDT. Le flux d'électrons est rendu possible au moyen d'un tunnel mécanique quantique à travers deux barrières. L'électron est dans le tunnel que si son niveau d'énergie est le même que le niveau d'énergie dans l'îlot, Sinon, le courant ne circule pas et le dispositif est à l'état bloqué. Chaque fois que l'énergie de l'électron entrant est au même niveau que celle de l'îlot, seul le courant peut alors circuler et le dispositif est maintenu à l'état actif.

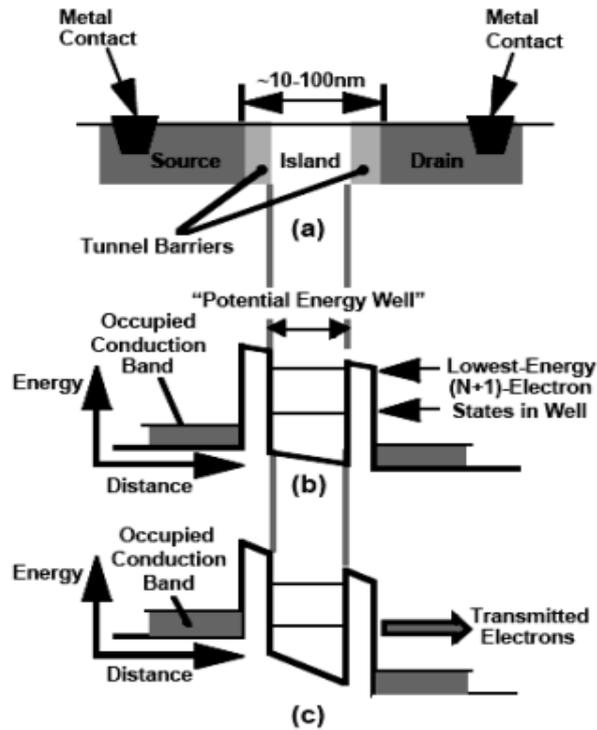


Figure II. 13 : (a) schéma de principe de la structure de la sonde à résistance, (b) sonde à l'état bloqué, (c) la sonde est à l'état passant.

La figure II.13 montre les caractéristiques courant-tension du RTD. Tout d'abord, à cause de l'effet tunnel des électrons, le courant augmente à travers la RTD avec l'augmentation de V_D . Ensuite, lorsque V_D continue d'augmenter à un moment donné (I_{ON}), aucun électron de gauche ne peut creuser de tunnel dans le puits et le courant va commencer à diminuer. Si V_D continue d'augmenter le courant recommence à augmenter à cause des mécanismes thermiques.

I_{ON} est le courant de "pointe" généré par le tunnel des électrons. I_{VALLEY} est le courant de vallée dû à la diminution du tunnel des électrons. Un rapport I_{ON} / I_{VALLEY} élevé est souhaitable car un rapport plus élevé signifie un gain plus élevé. En outre, un rapport plus élevé implique souvent un courant I_{VALLEY} plus petit. I_{VALLEY} conduisant à une dissipation plus faible de puissance puisque I_{VALLEY} est généralement considéré comme étant le courant de fuite.

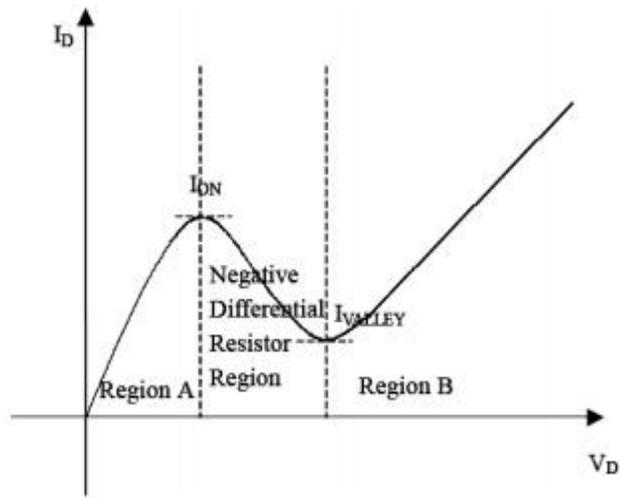


Figure II. 14 : Caractéristique I-V du RTD.

II.4.3. MOSFET inférieur à 10 nm

Le MOSFET inférieur à 10 nm est une catégorie de dispositifs nanoélectroniques qui présente une bonne compatibilité avec le processus de fabrication actuel et l'approche de conception. Ce dispositif a fait l'objet de nombreuses recherches par simulation, comme l'ont démontré plusieurs recherches.

Plusieurs équipes de recherche se sont intéressés au MOSFET balistique, ce transistor utilise un modèle à double grille, est similaire à la structure du MOSFET classique mais la région source / drain est constituée de silicide ou de métal plutôt qu'un semi-conducteur fortement dopé [10]. La structure de SBFET (FET à barrière de Schottky) est présentée en figure II.15.

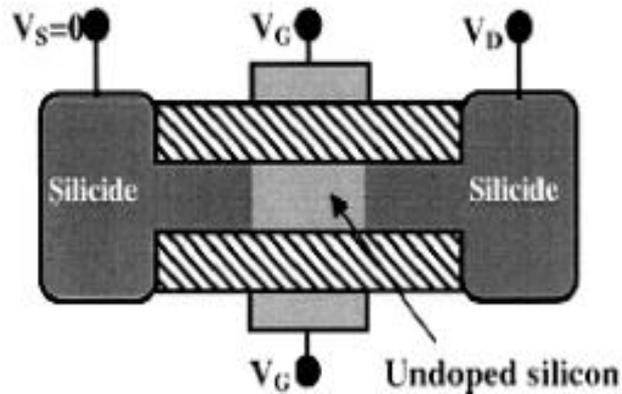


Figure II. 15 : Double grille SBFET.

Le SBFET présente des avantages en termes de procédé de fabrication et de performances. Concernant le processus de fabrication, le SBFET élimine le besoin d'avoir un dopage extrêmement élevé dans la région source-drain, ce qui est très difficile à réaliser à l'échelle nanométrique. L'une des performances des SBFET, est qu'ils fournissent plus de courant, les courants de fuite sont aussi beaucoup plus faibles. Les conceptions par simulations [11], ont permis de constater que l'activation du SBFET correspond presque à celle de MOSFET lorsque la barrière de Schottky est réduite. On peut conclure qu'une barrière de Schottky négative est nécessaire pour atteindre une valeur de surintensité dans le SBFET. Une autre approche pour réaliser une simulation sur le SBMOSFET consiste à utiliser des filtres métalliques. Un matériau pour les régions de source et de drain avec substrat intrinsèque est utilisé pour isoler les électrodes voisines [12]. On peut donc dire en conclusion que le MOSFET à effet tunnel n'est pas affecté par l'effet de canal court et qu'il promet donc que la mise à l'échelle sera inférieure à 10 nm. Le MOSFET à effet tunnel doit être supporté par un substrat totalement intrinsèque car le dopage ne peut pas contrôler les caractéristiques du transistor à l'échelle nanométrique.

II.4.4 Transistor à effet de champ à nanotubes de carbone (CNFET)

L'un des dispositifs nanoélectroniques les plus prometteurs en nanotechnologie est le transistor à effet de champ à base de nanotubes de carbone (CNFET) en raison de ses caractéristiques électriques supérieures. La structure de CNFET est presque identique à celle de MOSFET, mais le canal de silicium est remplacé par un nanotube de carbone semi-conducteur. La section transversale de La structure CNFET est présentée en figure II.16.

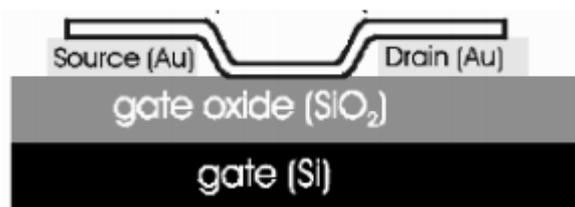


Figure II. 16 : Coupe transversale du CNFET.

Le nanotube de carbone (CNT) est la structure la plus intéressante des nanostructures de carbone présentant un grand potentiel d'application. Le CNT est un cylindre creux composé d'une ou de plusieurs couches concentriques d'atomes de carbone disposés en réseau en nid d'abeille [13]. La structure du CNT peut être pensée comme une feuille de graphite laminée pour former un tube fermé à ses extrémités comme illustré en figure II.17.

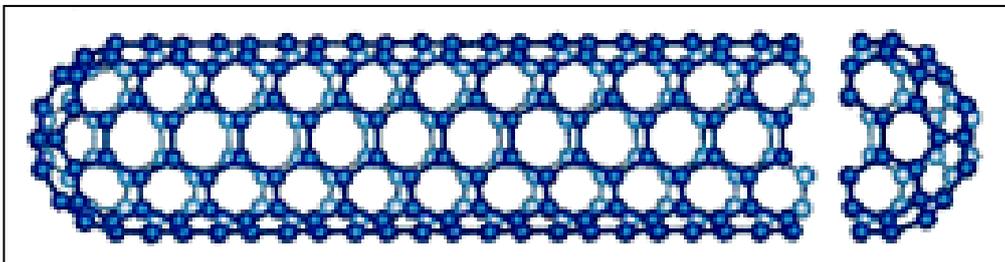


Figure II. 17 : Structure du CNT.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre le développement du processus de dimensionnement de MOSFET au cours des 30 dernières années a été passé en revue. Il montre qu'en raison d'une approche agressive du processus de mise à l'échelle, la taille du MOSFET a été largement réduite par rapport à sa taille d'origine. Néanmoins le processus de mise à l'échelle est maintenant proche de sa limite en raison de plusieurs facteurs susceptibles de nuire aux performances du MOSFET. Et il est à prévoir que le processus de mise à l'échelle ne puisse plus être en mesure de fournir les améliorations espérées.

Ainsi, plusieurs solutions de remplacement du MOSFET au silicium ont été proposées, il s'agit de dispositifs nanoélectroniques, qui peuvent remplacer les MOSFET lorsque ces derniers sont supposés être conçus avec des petites dimensions où des puissances de dissipation sont supposées être plus faibles pour prendre en charge les applications à forte demande dans le futur. Parmi les dispositifs nanoélectroniques solution de remplacement des MOSFETs à l'échelle nanométrique, on trouve les transistors à grilles multiples, les transistors contraints, les dispositifs à un seul électron (SET), la création de tunnels par résonance (RTD) et le transistor à effet de champ à nanotubes de carbone (CNFET). Chaque dispositif possède ses propres caractéristiques qui peuvent être appliquées dans une application numérique comme indiqué dans les sections précédentes.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation des nanotubes de carbone, leurs propriétés et leur croissance vu que cette étude est consacrée à l'étude des performances des transistors à base de CNT.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Goldhaber-Gordon, D. et. Al. Overview of Nanoelectronic Devices. 1997. *Proceedings of the IEEE*. 85(4): 521-540.
- [2] Neamen, D. A. *Semiconductor Physics and Devices*, Third Edition. Avenue of Americas, NY: McGraw-Hill. 2003.
- [3] Bohr, M. T. Nanotechnology Goals and Challenges for Electronic Applications. 2002. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 1(1): 56-62.
- [4] Keshavarzi, A., Roy, K. and Hawkins, C. F. Intrinsic Leakage in DeepSubmicron CMOS ICs - Measurement-Based Test Solutions. 2000. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 8(6): 717-723.
- [5]. Chen, Z. et. al. IDDQ Testing for Deep- Submicron ICs: Challenges and Solutions. 2002. *IEEE Design and Test of Computers*. 24-33.
- [6] Chang, L. *Ballistic Transport in Silicon MOSFET's*. 2000.
- [7] Taur, Y. CMOS design near the limit of scaling. 2002. *IBM J. Res. & Dev*, 46(2): 213-220.
- [8] Hadley, P., Lientschnig, G., and Lai, M. J. *Single-Electron Transistors*. 2003. *Institute Of Physics Conference Series*. 174: 125-132.
- [9] James D. Plummer, Peter B. Griffin (2001). "Material and Process Limits in Silicon VLSI Technology," PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 89, NO. 3, march 2001.
- [10] Goodnick S. M. and Bird, J. Quantum Effect and Single Electron Devices. 2003. *IEEE Transaction on Nanotechnology*. 2(4): 368-383.
- [11] Guo, J. and Lundstrom, M. S. A Computational Study of Thin-Body, DoubleGate Schottky Barrier MOSFETs. 2002. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 49(11): 1897-1902.
- [12] Huang, C. K., Zhang, Z. E. and Yang, C. H. Two-Dimensional Numerical Simulation of Schottky Barrier MOSFET with Channel Length to 10nm. 1998. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 45(4): 842-847.
- [13] Avouris, P. ET. Al. Carbon Nanotube Electronics. 2003. *Proceedings of the IEEE*. 91(11): 1772-1784.

Chapitre III

Etude théorique sur les transistors à effet de champ à base de nanotube de carbone "CNTFETs" transistors émergents pour la nanoélectronique.

III.1 Introduction

Les progrès de la technologie silicium continuent de dépasser le rythme historique de la loi de Moore, la fin de la mise à l'échelle des dispositifs MOSFET semble atteindre ses limites d'ici 10 à 15 ans [1], ainsi une nouvelle alternative semble surmonter toutes ces limitations. L'un des domaines de recherche les plus encourageants et permettant l'amélioration des performances des transistors est l'utilisation des nanotubes de carbone (NTC) considérés actuellement comme de nouveaux matériaux dotés d'excellentes propriétés [2] au-delà du nœud technologique de 11 nm en raison de ses propriétés. On cite dans ce cas les propriétés électriques des NTC [3] et la possibilité d'utiliser les CNT pour construire des transistors FET avec un excellent contrôle électrostatique sur le canal de conduction des transistors CNTFETs.

Les progrès de la technologie CNTFET et la compréhension de la physique de ses dispositifs ont été très largement abordés au cours de cette dernière décennie.

Les nanotubes de carbone ont été découverts pour la première fois en 1991 et sont rapidement devenus le centre de nombreuses activités de recherche en raison de leurs propriétés électriques, mécaniques et thermiques exceptionnelles ainsi que leur taille [4].

Ces NTC idéaux éléments permettant la réalisation de nano-dispositifs, ont la possibilité de pouvoir être semi-conducteurs ou métalliques. Cette propriété consubstantiel des NTC fait du nanotube de carbone un candidat intéressant pour la fabrication d'un nouveau composant électronique tel que le transistor à effet de champ à base de nanotube de carbone appelé CNTFET [5]. La technologie CNTFET peut être associée à la technologie CMOS sur une seule puce et utilise la même infrastructure, ce qui permet d'améliorer l'électrostatique par rapport à la technologie CMOS.

Les transistors CNTFET permettent le maintien de la loi de Moore pour assurer une amélioration des performances du MOSFET [6].

III.2 Transistor à effet de champ à base de Nanotube de Carbone

Dans les CNTFETs le canal du transistor est remplacé par un matériau à base de CNT pour profiter du transport balistique dans le CNT.

Les CNTFET ont été conçus pour la première fois en 1998 par Dekker et al, et le principe de fonctionnement du CNFET est identique à celui du MOSFET, les électrons sont fournis par la source et le drain collecte les électrons donc le courant circule du drain à la source et la grille contrôle le courant dans le canal du transistor, le transistor sera à l'état bloqué si aucune tension de grille n'est appliquée.

Une représentation schématique du transport électronique présentant le vecteur d'onde dans un N- CNTFET est donné en figure III.1.

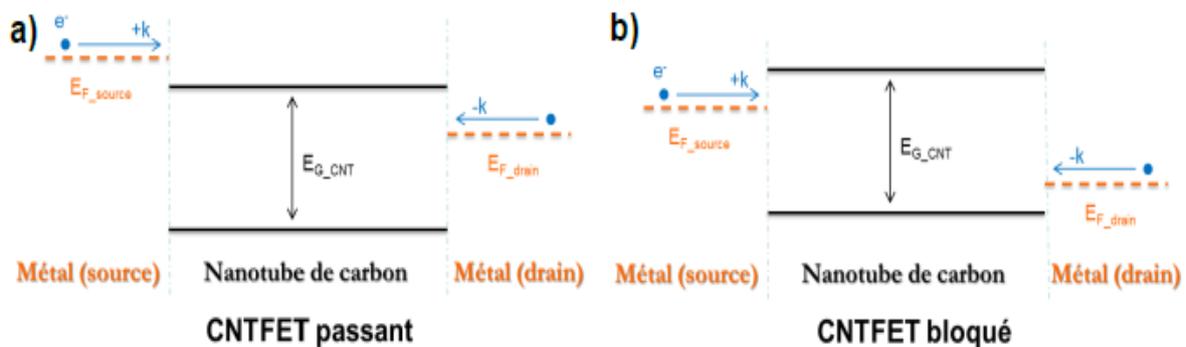


Figure III. 1 : Diagrammes d'énergie d'un CNTFET MOS-like type N montrant l'état passant $V_{DS}>0$, V_{GS} est fortement positif (a) Diagrammes d'énergie d'un CNTFET MOS-like type N montrant l'état bloqué (b) $V_{DS}>0$ V_{GS} est faiblement positif.

Le drain et la source sont supposés être des contacts ohmiques avec le canal du CNT. La tension V_{GS} module le potentiel électrique du canal permettant ou pas le transport des porteurs de charge. Ce transistor est aussi nommé CNTFET à modulation de hauteur de

barrière ou MOS-like CNTFET. Les phénomènes de transport dans les CNTFETs sont différents de ceux des MOSFETs car quand la longueur du canal des CNTFETs est inférieure au libre parcours moyen des électrons, le transport des électrons se caractérise par un fort taux de balisticité supérieur à 80% [7-8].

Dans le cas des transistors N-CNTFETs, les électrons injectés côté drain ou source contribuent au courant balistique suivant la direction du vecteur d'onde longitudinal, $-k$ ou $+k$, respectivement. Dans les P-CNTFETs le transport se fait par trous dans la bande de valence.

La raison principale qui a conduit les chercheurs à s'intéresser aux CNTFET est leur canal à haute mobilité. Un transistor à effet de champ à nanotubes de carbone (CNTFET) fait référence à un transistor à effet de champ qui utilise un seul nanotube de carbone ou une matrice de nanotubes de carbone comme matériau de canal au lieu du silicium qui est utilisé dans le MOSFET. Ces CNTFETs sont au départ de type p cependant ces derniers présentent un inconvénient concernant la composition de la grille du transistor qui est constituée d'une couche d'oxyde de silicium épaisse. Bachtold et al [9] ont remplacé la couche de l'oxyde utilisé et qui est le SiO_2 par une mince couche d' Al_2O_3 qui a été déposée sur une grille métallique en aluminium ce qui a eu pour conséquence une augmentation de la transconductance du transistor, une seconde amélioration fut obtenue par l'utilisation d'une grille en surface. Ce travail fut accompli et présenté par Wind et al [10] ce qui a eu pour conséquence l'augmentation du champ électrique du nanotube. Une autre amélioration des performances de ce type de dispositif peut être obtenue en choisissant de manière adéquate le matériau de contact pour diminuer sa résistance.

En figure. III.1. est présenté un transistor CNTFET de première génération ces dispositifs affichaient une résistance à l'état passant élevée, une faible transconductance et aucune saturation de courant et nécessitaient de hautes tensions de grille (plusieurs volts) pour

être activés. La raison la plus importante derrière le choix des FET à nanotubes de carbone est leurs caractéristiques à une dimension, les supports sont confinés sur le cylindre du tube ce qui donne lieu à une forte quantification des états d'électrons et des trous et le transport de charge dans la sous-bande 1D devient réalisable même à température ambiante. La forte liaison covalente confère aux CNT une stabilité mécanique et thermique élevée. Leur dimension clé et leur diamètre sont contrôlés chimiquement, les dispositifs actifs (transistors) et les interconnexions peuvent être constitués de semi-conducteurs et nanotubes métalliques respectivement [11]. En utilisant un CNT à paroi unique comme canal entre deux électrodes comme les contacts de source et de drain d'un FET, un CNTFET coaxial peut être fabriqué.

En raison de leur géométrie les dispositifs coaxiaux permettent une meilleure électrostatique puisque le contact de la grille enveloppe tout le long du canal (CNT) et permet un très bon contrôle du transport des porteurs. Le type de contact métal-CNT joue un rôle crucial dans les caractéristiques de sortie du transistor. Les semi-conducteurs fortement dopés en raison de leur capacité formant des contacts ohmiques peuvent être utilisés comme électrodes idéales mais ils souffrent d'une résistance parasite élevée [12].

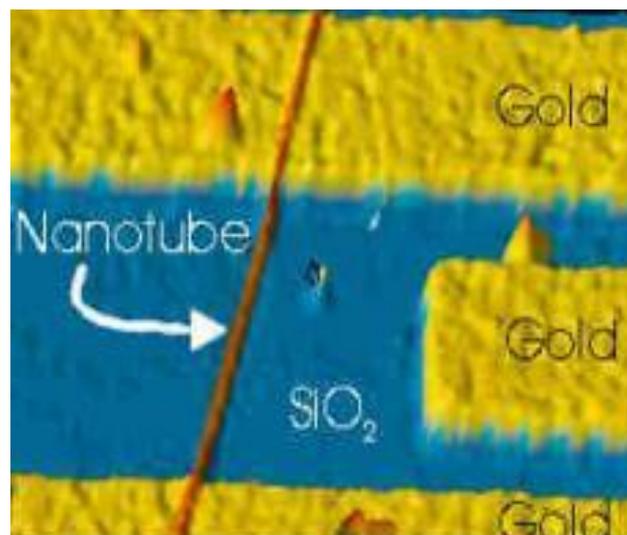


Figure III. 2 : Première génération du CNTFET [13]

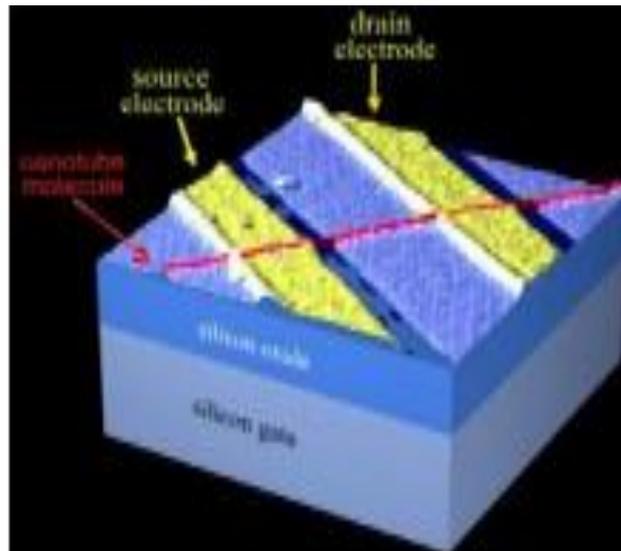


Figure III. 3 : Structure de base d'un CNTFET [14]

Suite aux premiers résultats obtenus sur les CNTFETs de première génération CNTFET, les progrès sur ce type de dispositif et particulièrement sur leur structure ont permis d'améliorer leurs caractéristiques électriques. Ainsi, plutôt que de déposer le nanotube sur les électrodes de source et de drain en s'appuyant sur de faibles forces de van der Waals pour le contact des électrodes, ces derniers ont été configurés sur le dessus du nanotube de carbone préalablement établis. En plus de l'Au, du Ti et du CO ont été utilisés avec une étape de recuit thermique pour améliorer le contact métal / nanotube. Dans le cas du Ti, le traitement thermique conduit à la formation de TiC à l'interface métal / nanotube entraînant une réduction significative de la résistance de contact de plusieurs M Ω à 30 k Ω .

Nous avons précisé auparavant que tous les CNTFET étaient de type p, c'est-à-dire des conducteurs de trous. Au départ, on ne savait pas si cela était dû au dopage de contact ou à l'adsorption d'oxygène de l'atmosphère. La conduction de type N a été réalisée par dopage à partir d'un gaz alcalin (donneur d'électrons) et par recuit thermique sous vide. Le dopage par exposition à un gaz alcalin implique un transfert de charge dans la majeure partie du nanotube.

D'autre part, le recuit d'un CNTFET sous vide favorise les phénomènes de transport par un mécanisme complètement différent vu que la présence d'oxygène atmosphérique à proximité des contacts métal / nanotube va affecter la flexion locale des bandes de conduction et de valence dans le nanotube par transfert de charge, le niveau de Fermi se situe alors près de la bande de valence, ce qui facilitera ainsi l'injection de trous. Lorsque l'oxygène est dissous à haute température le niveau de Fermi va pouvoir s'aligner plus près de la bande de conduction, permettant ainsi l'injection d'électrons. Contrairement au cas du dopage en masse, la tension de seuil notée V_{TH} ne sera pas décalée lors du passage du type p vers le type n par recuit thermique. En outre il est possible d'obtenir une valeur intermédiaire selon l'état dans lequel l'injection d'électrons et de trous est autorisée, ce qui entraîne une conduction ambipolaire.

La possibilité de fabriquer des CNTFET de type p et de type n, a permis la création des premiers circuits CMOS à nanotubes de carbone. Ceci a été démontré par Derycke et al qui ont pu concevoir de simples portes logiques CMOS, puis un onduleur dans lequel les deux types de CNTFET (p-CNTFETs et n-CNTFETs) ont été fabriqués à l'aide d'un seul nanotube de carbone. Par la suite, des circuits plus complexes basés sur les nanotubes de carbone ont également été inventés [15].

Le transistor à effet de champ à nanotubes de carbone (CNTFET) utilise un nanotube de carbone semi-conducteur comme canal de conduction. Les dispositifs à canal p et à canal n peuvent être fabriqués à partir de nanotubes. La structure physique des CNTFET est donc similaire à celle des MOSFET leurs caractéristiques I-V de sortie et de transfert sont également très prometteuses et suggèrent que les CNTFET pourraient potentiellement remplacer efficacement les MOSFET dans l'électronique à l'échelle nanométrique. Bien sûr, il existe certaines propriétés qu'on ne retrouve que pour les transistors CNTFET, en effet :

- le nanotube de carbone est unidimensionnel, conséquence le dispositif peut fonctionner en régime balistique.
- Le nanotube conduit essentiellement sur sa surface où toutes les liaisons chimiques sont saturées et stables.
- La barrière Schottky au contact métal-nanotube est l'élément de commutation actif dans un dispositif nanotube intrinsèque ce qui veut dire que la commutation pour ce type de composant est assurée par la modulation des barrières Schottky source et drain.

Avec ses caractéristiques uniques, le CNTFET peut être vu comme un dispositif d'intérêt particulier.

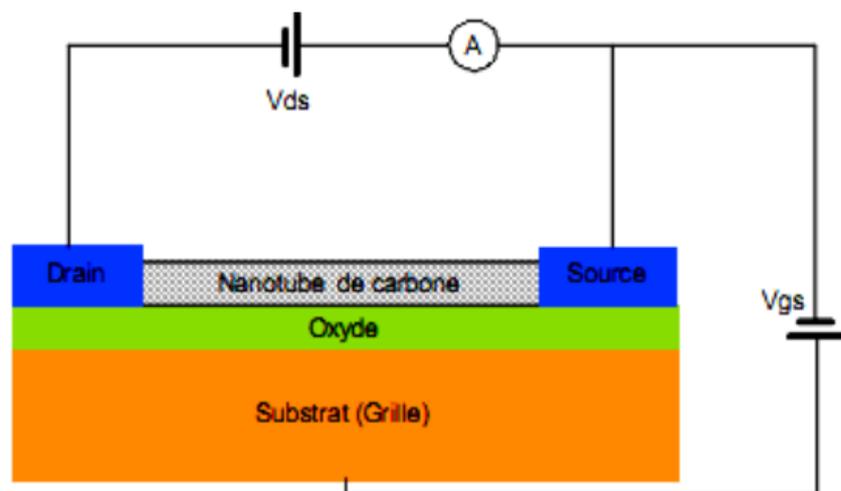


Figure III. 4 : schéma d'un transistor à nanotube de carbone polarisé [16].

III.3. Différentes configuration du CNTFET

Dans les CNTFETs, le nanotube joue le rôle du canal. L'électrode de grille du transistor est séparée du canal par un isolant de faible épaisseur. Deux types de CNTFET peuvent être conçus en fonction de la position de la grille on peut concevoir le bottom-gated CNTFET (à grille arrière), le top-gated CNTFET (à grille supérieure). Outre ces 2 grandes classes, certaines sociétés de semi-conducteurs ont proposé leur propre FET à base de

nanotubes de carbone, cette nouvelle génération a été introduite par Infineon en 2003, et ce transistor est appelé VCNTFET pour les transistors à nanotubes de carbone vertical.

III.3.1 Transistor à nanotube de carbone à grille arrière" Bottom-gated CNTFET".

Les CNFET ont été présentés pour la première fois en 1998 par Tans et. Al [17-18]. Les travaux de Tans et Al ont marqué le début des progrès de la recherche sur ce type de dispositifs. Au départ, la majorité dispositifs à CNFET étaient dotés d'isolants de grille en oxyde de silicium très épais où l'épaisseur était de l'ordre de 100 à 150 nm [19].

Les CNTFETS à grilles arrière, sont conçues par une grille arrière non locale, le nanotube de carbone utilisé pour la conception du canal de conduction est lié à des électrodes en métal noble comme l'or ou le platine [20] qui résiste à l'attaque des acides et des autres réactifs et ne se corrode pas. Dans ce cas, une couche de nanotube de carbone joue le rôle de canal et les deux électrodes métalliques fonctionnent comme source et drain. Le substrat en silicium fortement dopé est utilisé comme grille arrière.

Dans les figures III.5(a) et 5(b) nous présentons l'image d'un CNFET à grille arrière et sa coupe transversale.

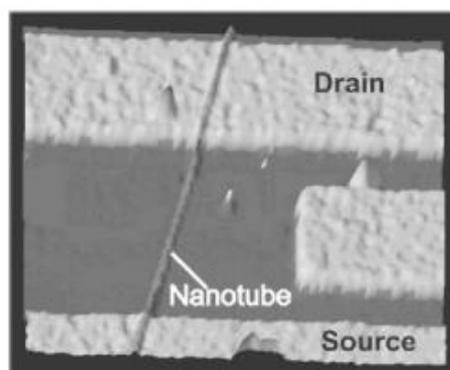


Figure III. 5 :(a).image du CNTFET à grille arrière. [21]

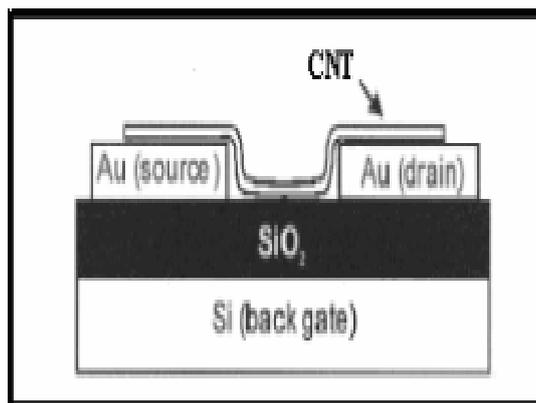


Figure III. 6 :(b). Coupe transversale du CNTFET à grille arrière. [15]

Les diagrammes d'énergie du transistor à effet de champ à grille arrière à nanotube de carbone à parois unique sont donnés en figure III.7. Pour ce type de transistors, les porteurs de charge traversent la partie du tube située au-dessus de la source (A), sur la surface du SiO₂ (B) et sur l'électrode de drain (C).

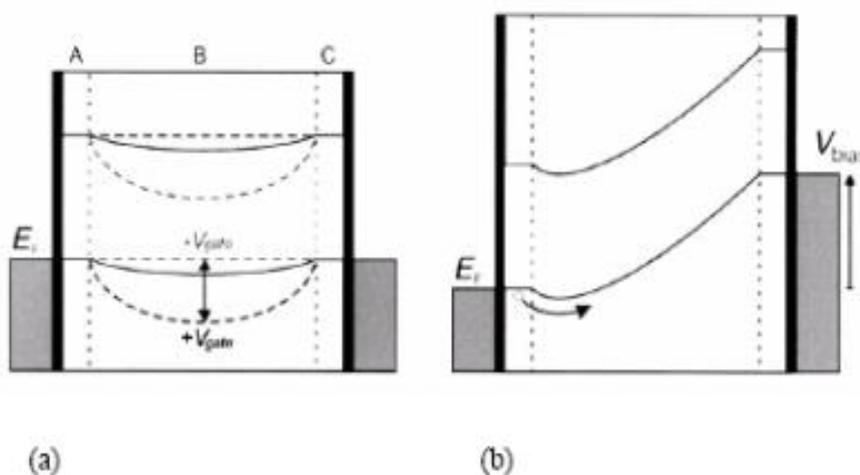


Figure III. 7 :(a) schéma de bande d'énergie du CNTFET. [13]

L'application d'une tension de polarisation va entraîner la suppression de la barrière. Cette formation prématurée se traduit par de mauvaises caractéristiques telles qu'un faible courant, une faible transconductance (10^{-9} S) et des résistances de contact élevées ($> 1 \text{ M}\Omega$). Ces mauvaises caractéristiques obtenues pour les CNTFETs à grille arrière sont dues aux mauvais contacts puisque le nanotube de carbone est simplement posé sur les électrodes en or

et est faiblement maintenu par la force de van der Waals [20]. Les performances de ces dispositifs pourraient être améliorées en augmentant la capacité de grille par la réduction de l'épaisseur de l'isolant ou par l'augmentation de la constante diélectrique. Cependant, le calcul de la capacité de grille des CNFETs est différent de celui des MOSFETs. L'introduction d'une couche d' Al_2O_3 au-dessus de la grille en Aluminium permet la diminution de la tension de la grille du transistor et l'augmentation de sa transconductance. Une seconde amélioration des caractéristiques du transistor peut être obtenue par une deuxième structure appelée CNTFET à grille supérieure.

III.3.2 Transistor à nanotube de carbone à grille supérieure ou grille avant : "Top-gated CNTFET" :

Pour de meilleures performances Wind et al ont proposé pour la première fois en 2003 le CNTFET à grille supérieure (top gate) [20]. Dans la première étape des nanotubes de carbone à paroi unique sont déposés en solution sur un substrat en oxyde de silicium. Ensuite, en utilisant un microscope à force atomique ou un microscope électronique à balayage les nanotubes individuels sont localisés. Puis les contacts de source et de drain sont définis et configurés à l'aide d'une lithographie par faisceau d'électrons à haute résolution. Le recuit à haute température réduit la résistance de contact et augmente également l'union entre les contacts et le CNT. Un mince diélectrique à grille supérieure est ensuite déposé sur le nanotube par évaporation ou par dépôt de couche atomique. Enfin, le contact de grille supérieur est déposé sur le diélectrique de grille. Des réseaux de CNTFET à grille supérieure peuvent être fabriqués sur la même plaquette de silicium, car les contacts de grille sont isolés électriquement entre eux, contrairement au cas de la grille l'arrière. De plus, en raison de la finesse du diélectrique de grille un champ électrique plus important peut être généré par rapport au nanotube en utilisant une tension de grille inférieure.

Ces avantages signifient que les dispositifs à grille supérieure sont généralement préférés aux CNTFET à grille arrière, malgré leur processus de fabrication plus complexe.

Les CNTFET que nous avons présenté utilisent un substrat conducteur comme électrode à grille arrière, généralement avec des diélectriques de grille d'épaisseur importante (~ 100 nm ou plus). Pour ces dispositifs, des tensions de grille élevées permettent leur fonctionnement. De plus, l'utilisation du substrat comme grille du transistor implique que tous les dispositifs conçus sur ce substrat sont alimentés simultanément.

Bachtold et al. ont rapporté une structure CNTFET à grille avant avec un diélectrique de grille très mince (~ 2–5 nm) et un déclenchement par transistor à effet de champ (FET) individuel (Fig III.8). Ce type de dispositif a montré un faible fonctionnement en tension de grille avec une commutation individuelle.

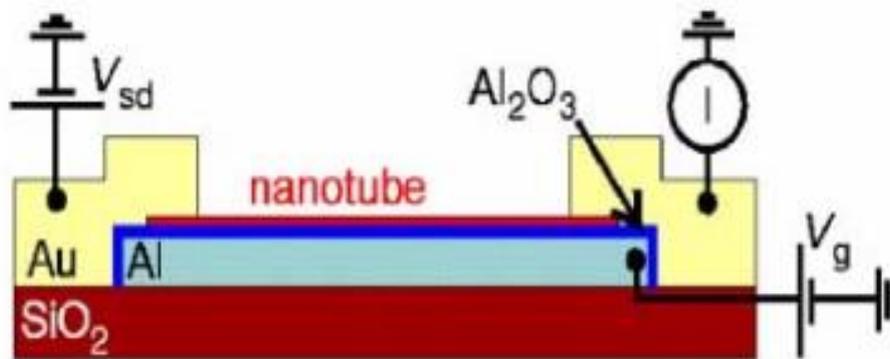


Figure III. 8 : Vue schématique d'un CNTFET à grille avant avec un oxyde de grille mince. [15]

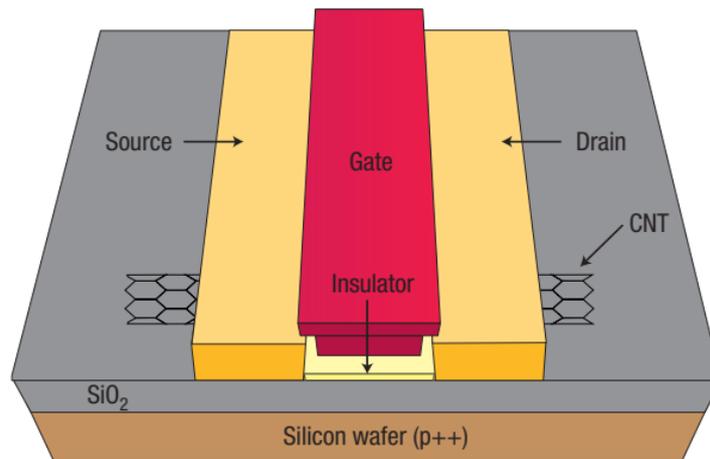


Figure III. 9 : Structure à grille supérieure du CNTFET. [24]

Par ailleurs, dans la géométrie de grille supérieure comme indiqué par Wind et al. Le CNT est complètement intégrée à l'isolant de grille offrant ainsi tous les avantages du diélectrique de grille. L'inconvénient de ce type de géométrie des CNTFETs, c'est l'exposition des NTC à l'air qui conduit à des caractéristiques de type p.

En revanche, cette structure de grille supérieure permet la fabrication de dispositif de type n et de type p. L'avantage apporté par ces dispositifs est qu'il peut être adapté au fonctionnement à haute fréquence avec de légères modifications, ce qui n'est pas possible avec les dispositifs à grille arrière en raison de la grande capacité de recouvrement entre la grille avec la source et le drain.

en 2004, Shengdong Li et al [21] de l'université de Californie de BERKLEY ont développé, un procédé de fabrication du CNTFET à grille supérieure où le Si_3N_4 a été utilisé comme oxyde de grille. Des CNT de diamètres variant de 1 à 4nm ont été obtenues par CVD. Pour réaliser les contacts source-CNT et drain-CNT une microscopie par balayage électronique a été effectuée pour la localisation des CNT. Les électrodes source et drain en Ti/Au, ont été réalisées par une lithographie optique conventionnelle et par une évaporation du faisceau d'électrons.

Les caractéristiques obtenues pour ces dispositifs font qu'ils sont considérés comme étant les plus pertinents fabriqués à ce jour sur le plan technologique et permettent une comparaison plus directe avec les MOSFET classiques à base de silicium. La figure III.10 (b) montre la structure de grille supérieure du CNTFET avec ses caractéristiques de sortie I_{DS} - V_{DS} .

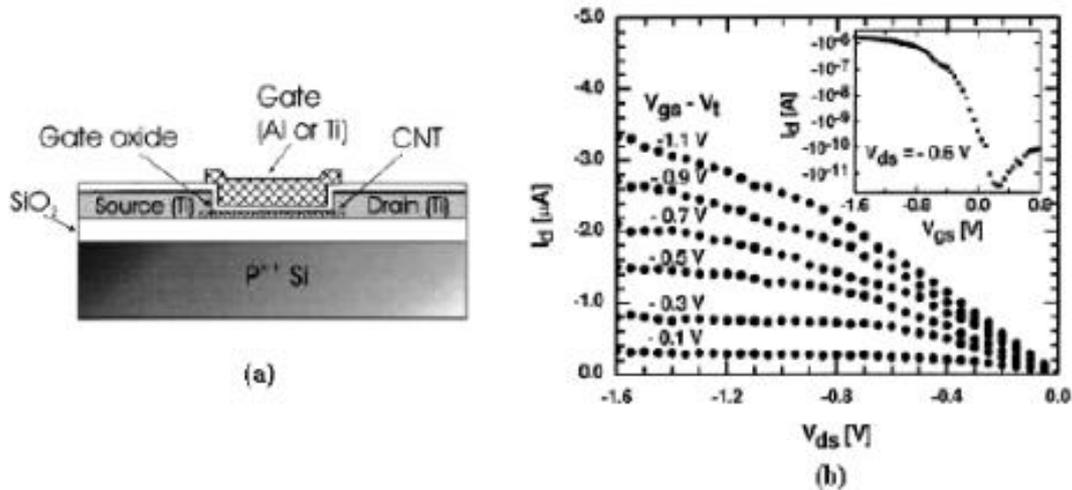


Figure III. 10 :(a) .Coupe schématique de la grille supérieure du CNTFET(b) Caractéristiques de sortie du même CNTFET avec une grille en Ti et une épaisseur d'oxyde de grille de 15 nm, Encadré : la Caractéristiques de transfert du CNTFET pour $V_{ds} = -0,6V$.

Le dispositif présenté à la figure III.10 montre un excellent courant de saturation aux tensions de grille approchant $\sim 1V$. La transconductance maximale est de $3,25 \mu S$, ce qui est une valeur très élevée pour un dispositif CNTFET par rapport aux CNTFET précédent. La figure 10 (b) montre la caractéristique de transfert pour le même dispositif. La tension de seuil linéairement extrapolée est de $-0,5V$. Comme ces résultats électriques sont inhabituels pour les dispositifs à base de nanotubes de carbone, il convient de comparer leurs performances par rapport aux caractéristiques en courant continu des MOSFET au silicium. Une étude comparative en termes de performances DC entre trois transistors à canal P nanométriques soit un P-MOSFET, un P-MOSFET sur SOI et un CNTFET à canal P a permis d'obtenir les résultats que nous avons regroupé au tableau III.1.

Le P-MOSFET considéré par cette étude et présenté par Bin Yu et al. À une longueur de grille égale à 15 nm et construit sur du silicium présente une transconductance très élevée.

Le second P-MOSFET avec une longueur de grille de 50 nm sur un substrat SOI, est présenté par Robert Chau et al. Ce dispositif permet une comparaison logique avec les CNTFETs de même dimensions pour le canal de nanotubes unidimensionnel. dans cette comparaison, nous nous concentrons sur les capacités de transport de courant du CNTFET en normalisant le courant par unité de largeur, en utilisant le diamètre du CNT (1,4 nm), qui est la seule échelle de longueur apparente. Les résultats obtenus par cette comparaison sont regroupés au tableau III.1.

	CNTFET A GRILLE SUPERIEUR TYPE P	MOSFET BULK SI TYPE P	MOSFET SOI TYPE P
Longueur de la grille (nm)	260	15	50
Epaisseur de l'oxyde (nm)	15	1.4	1.5
Tension de seuil V_{th} (v)	-0.5	-0.1	-0.2
I_{on} [$\mu A/\mu m$]	2100	265	650
I_{off} [$\mu A/\mu m$]	150	500	9
Transconductance [$\mu S/\mu m$]	2321	975	650

Tableau III. 1: Comparaison des paramètres de performance clés entre le CNTFET et les MOSFET [15].

Cette étude comparative permet de conclure que le courant I_{on} pour un P-CNTFET est important ainsi que la transconductance. Ces résultats sont très prometteurs même pour des transistors avec une longueur de grille importante. Pour finir cette partie le Top-gated CNTFET peut être considéré comme un candidat prometteur pour les circuits logiques d'intégration parce que ce dispositif a une grille locale et possède de bonnes performances : tension de grille, possibilité de commutation à grande vitesse, et une importante densité

d'intégration. La tension de seuil de ces dispositifs est très basse et est estimée à -0.5V. [21]

Depuis la découverte des transistors à nanotube de carbone, différents type de transistor ont été développé, parmi les différentes architectures développées on peut citer le CNTFET vertical, le CNTFET à barrière Schottky (SB-CNTFET) et le CNTFET à double grille.

III.3.3. Le CNTFET vertical

Le progrès le plus récent du CNFET pourrait être l'initiation du CNFET verticale. Cette structure à grille a été introduite par Choi et. Al. en 2004 [24] après qu'il se soit inspiré du modèle des transistors verticaux d'IBM. Le concept de CNTFETs verticaux a rendu faisable les circuits à trois dimensions. Dans ce cas la taille du CNTFET peut être aussi petite que le diamètre du nanotube de carbone, ce qui correspond à une densité d'intégration de 10^{12} éléments par cm^{-2} .

Le CNFET vertical est élaboré comme suit : formation de nano-pores par anodisation suivi de la synthèse du nanotube de carbone, de la formation d'électrodes métalliques, du dépôt et de la structuration d'oxydes et enfin de la formation de l'électrode de grille. L'oxyde de silicium est déposé au sommet d'un nanotube de carbone aligné par évaporation au moyen d'un canon à électrons suivi de la formation de trous par faisceau d'électrons et d'une attaque chimique. Le processus de dépôt de l'oxyde est ensuite suivi du dépôt de l'électrode supérieure de la grille. La structure du CNFET vertical est donnée dans la figure III.11.

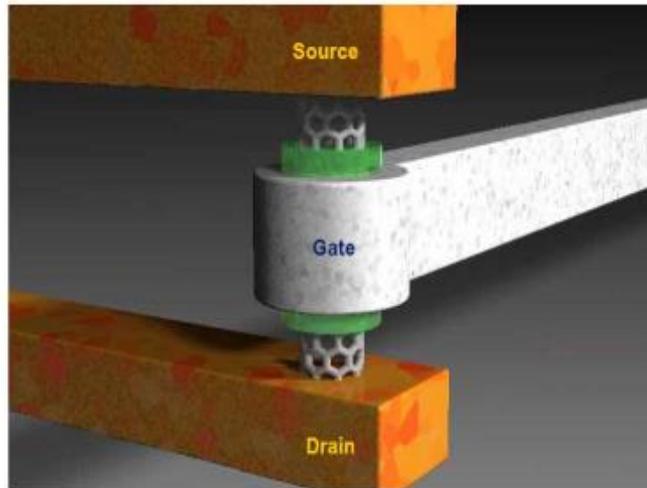


Figure III. 11 : CNTFET vertical (présenté par Infineon Technology en novembre 2003).

Les processus permettant de fabriquer un CNTFET vertical sont présentés au niveau de la figure III.12. [25]. Dans cette structure chaque nanotube de carbone est électriquement attaché à l'électrode inférieure (la source), et l'électrode supérieure (drain) et à l'électrode de grille qui est placée autour du nanotube de carbone. Chaque point de croisement des électrodes de source et de drain correspond à un élément de transistor avec un seul nanotube de carbone vertical.

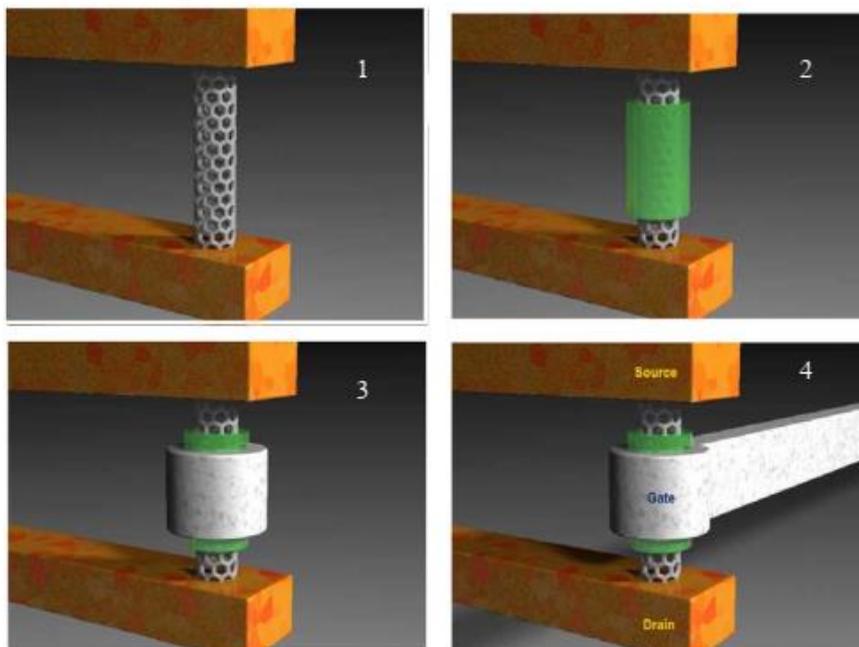


Figure III. 12 : Processus de fabrication d'un CNTFET vertical.

En fonction du type d'électrodes utilisées le CNTFET est classé en trois catégories. [26]

(a) CNTFET de barrière Schottky (SB)

(b) CNTFET à grille partielle (PG)

(c) CNTFET dopé-S / D.

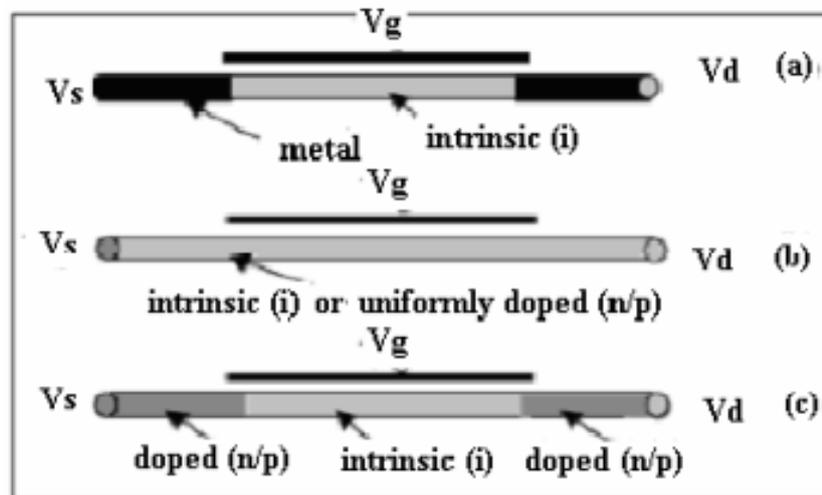


Figure III. 13 : Différents types de CNTFET : (a) CNTFET à barrière de Schottky (SB), (b) CNTFET à grille partielle (PG) (c) CNTFET S / D dopé [22].

III.3.4. Transistor à barrière Schottky (SB-CNTFET)

Le transistor à barrière Schottky (SB-CNTFET) présente une particularité d'avoir une barrière de potentiel appelée barrière de Schottky (SB) existante à chaque contact entre le métal et le semi-conducteur. La hauteur de la barrière est déterminée par le remplissage des espaces d'états induits par le métal. Ces états deviennent disponibles dans l'espace énergétique du semi-conducteur en raison de l'interface formée avec le métal. Le SB est contrôlé par la différence des fonctions de travail locales du métal et du nanotube de carbone

La barrière Schottky est également extrêmement sensible aux changements d'environnement local au niveau du contact [28]. Le SB-CNFET est présenté à la figure

III.14. Il présente une caractéristique fortement ambipolaire par rapport au CNTFET conventionnel unipolaire ou faible ambipolaire [12].

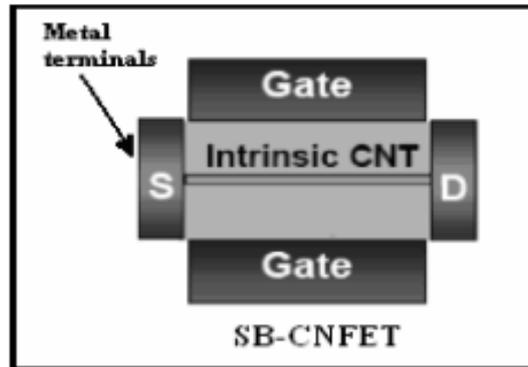


Figure III. 14 : CNTFET à barrière de Schottky (SB-CNTFET). [26]

III.3.5 .CNTFET a grille partielle (PG) :

PG-CNTFET, est représenté à la figure III.13(b) est un CNTFET qui fonctionne en mode épuisement dans lequel le nanotube est uniformément dopé, les PG CNTFET peuvent être de type n ou de type p possédant des contacts ohmiques dans ces dispositifs la grille épaisse localement les porteurs dans le nanotube [29].

III.3.6.CNTFET source ou drain (S / D) :

Les CNTFET en S / D dopé présentés à la figure III.13 (c) sont composés de trois régions. La région située en dessous de la grille est de nature intrinsèque et les deux régions non bloquées sont dopées type p ou type n. Le courant ON est limité par la quantité de charges pouvant être induites dans le canal par la grille et non par le dopage de la source. Ils fonctionnent en mode accumulation pure de type p ou de type n ou en mode de déplétion selon le principe de la modulation de la hauteur de barrière lors de l'application d'un potentiel de grille. Sur ces trois types, les CNTFET S / D dopés sont prometteurs car ils présentent des caractéristiques unipolaires contrairement aux SB-CNTFET. L'absence de SB réduit le courant de fuite OFF en état ON, la jonction source-canal à un courant ON nettement plus

élevé. En fonction du profil de dopage, les CNTFET de source ou de drain dopés peuvent à nouveau être classés en deux groupes.

- CNTFET conventionnel (C-CNTFET) : comprend les CNTFET avec méthode de dopage p / i / p ou n / i / n où la source ou le drain sont dopés avec un matériau de type p ou de type n.
- Tunneling CNTFET (T-CNTFET) : les CNTFET à schéma de dopage n / i / p (la source et le drain sont dopés de façon opposée) appartiennent à ce groupe [22].

D'autres types de CNTFET ont été signalés en littérature parmi eux :

III.3.7. CNFET de type MOSFET "MOSFET-like CNTFET :

Le fait d'être doté des trois électrodes drain, grille et source et voir la création d'une charge sous la grille par augmentation de la tension de polarisation grille-source V_{GS} sont les seuls points communs avec les dispositifs MOSFET. Lorsqu'on dépose sur le nanotube intrinsèque les deux électrodes source et drain on obtient un transistor avec deux barrières Schottky qui seront situées l'une du côté source et l'autre du côté drain. Pour obtenir un CNTFET qui fonctionnera comme un MOSFET à modulation de hauteur de barrière il faut procéder à un dopage P^+/N^+ de part et d'autre du corps du nanotube et avant les deux électrodes de source et de drain ces parties des nanotubes dopées ressemblent aux zones dopées P^+/N^+ sous les électrodes de source et de drain d'un MOSFET au silicium. La structure de ce type de dispositif est comme nous le voyons légèrement différente de celle du SB-CNFET car ils utilisent des bornes fortement dopées au lieu du métal. Le dispositif est nettement conçu pour résoudre les problèmes de SB-CNFET en fonctionnant comme un MOSFET normal. À la différence du SB-CNFET, les terminaux de source et de drain sont fortement dopés comme le MOSFET.

Comme le montre la figure III.15, ce dispositif fonctionne donc sur le principe de la modulation de la hauteur de la barrière par application de tension de grille. Le drain le courant est contrôlé par le nombre de charges induites dans le canal par la grille.

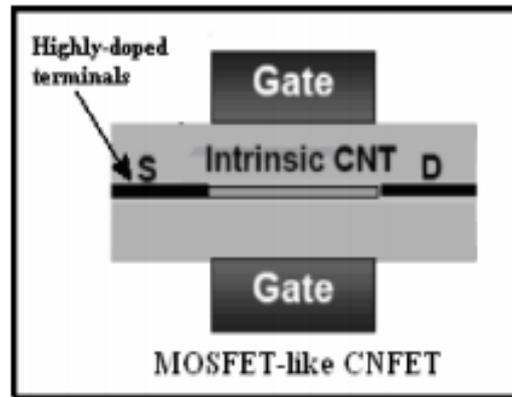


Figure III. 15 : CNTFET de type MOSFET. [28]

Ce type de transistor présente plusieurs avantages par rapport au SB-CNFET. Ce dispositif est capable de supprimer la conduction ambipolaire dans SB-CNFET. Il fournit également une limite de longueur de canal car la densité des états de gap induit par le métal est considérablement réduite. La capacité parasite entre grille et la source est fortement réduite et permet ainsi un fonctionnement plus rapide du transistor.

On note donc que les CNTFETs à modulation de la hauteur de barrière par application de la tension de polarisation de grille ont pour avantage comparés aux CNTFETs à barrière Schottky d'avoir des caractéristiques unipolaires, un courant à l'état passant I_{on} plus important, un plus faible courant de fuite I_{off} et une pente sous le seuil inverse plus faible. Les transistors à nanotube avec modulation de hauteur de barrière sont certainement plus prometteurs par rapport aux CNTFETs à barrière Schottky.

III.3.8. Planar-gated CNTFET

Ce transistor possède une grille locale isolée du nanotube par une couche d'oxyde Al_2O_3 de quelques nanomètres d'épaisseur. Le CNT semi-conducteur est électriquement

connectée à deux électrodes en or. Les planar-gated transistors possèdent des grilles locales qui permettent l'intégration de multiples CNTFET sur une même puce.

III.3.9. Electrolyte-gate CNTFET

En 2002, S. Rosenblatt et al. De l'université Cornell ont pu concevoir un CNTFET avec une grille électrolyte. Pour ce transistor le nanotube de carbone est produit par CVD et un électrolyte qui est une solution de chlorure de sodium agissant comme une grille. Ce dispositif a montré une mobilité importante, une transconductance élevée et une faible résistance de contact [21].

III.4. Les caractéristiques spécifiques de CNTFET

Les CNTFETs sont des dispositifs très prometteurs pour compléter ou succéder à la technologie CMOS dans les circuits actuels. Nous allons dans ce qui suit présenter les caractéristiques spécifiques du CNTFET.

III.4.1. Vecteur de chiralité

Nous avons expliqué auparavant que le caractère semi-conducteur ou métallique du nanotube est principalement déterminé par l'orientation du maillage qui est de type hexagonal par rapport à l'axe du nanotube. Pour formuler l'enroulement de la feuille de graphène, on fait appel au vecteur de chiralité "C" qui a pour rôle la connexion de deux sites cristallographiquement équivalents de la feuille de graphène 2D.

Soit a_1 et a_2 les vecteurs unitaires du maillage hexagonal, on peut alors exprimer ce vecteur de chiralité par :

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad \text{III.1}$$

Le vecteur de chiralité est normalement défini par le couple d'entiers n et m.

- ❖ Lorsque $n = m$, le nanotube est dit *Armchair*
- ❖ lorsque m est nul, on parle de nanotube **Zigzag**.

Le type de nanotube peut être déterminé à partir des indices n et m :

- ❖ Quand $n - m = 3i$, $i \in \mathbf{N}$, le nanotube est métallique,
- ❖ Quand $n - m \neq 3i$, le nanotube est semi-conducteur.

III.4.2. Comportement des nanotubes de carbone (Nanotubes de carbone métalliques et semi-conducteur)

Les nanotubes de carbone peuvent être métalliques ou semi-conducteurs. Cela dépend précisément de la façon dont ils sont enroulés, comme illustré aux figures III.16 (a) et (b). Dans les nanotubes de carbone métalliques le transport est balistique sur une plage de longueur pouvant atteindre les micromètres. Ce phénomène est possible car la diffusion acoustique des phonons est extrêmement faible dans ce conducteur unidimensionnel et seuls quelques défauts faisant office de centres de diffusion résonants sont présents. Néanmoins, à forte polarisation les électrons excitent fortement les phonons optiques ce qui entraîne une dissipation d'énergie dans le tube et une saturation du courant.

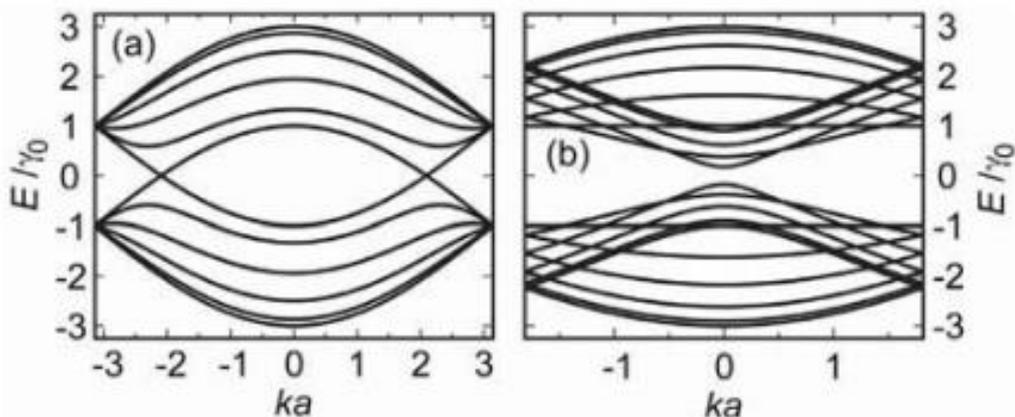


Figure III. 16 : Structure en bandes de (a) un CNT métallique (5, 5) et (b) d'un nanotube semi-conducteur (10, 0).

Le vecteur d'onde k est tracé en unités de $1/a$, où $a = 0,249$ nm est la constante du réseau de graphène. La structure en bandes à faible énergie des CNT métalliques consiste en

deux paires de bandes se croisant juste au niveau de Fermi. Dans les nanotubes semi-conducteurs une bande interdite de l'ordre de 1 eV s'ouvre à $k = 0$.

III.4.3. Nanotubes de carbone métalliques:

Le fait d'observer un comportement métallique dans les tubes des CNT de 1 nm est significatif, la plupart des matériaux unidimensionnels montrent une instabilité de Peierls qui conduit à l'ouverture d'un intervalle d'énergie ce qui provoque une transition métal-isolant [30]. L'instabilité de Peierls se produit parce que l'énergie totale d'une chaîne unidimensionnelle peut souvent être réduite en doublant la cellule unitaire. Par exemple deux atomes voisins se rapprochent, tandis que la paire suivante se sépare. Le problème avec les nanotubes de carbone est qu'il ne montre pas l'instabilité de Peierls même aux plus basses températures et cela est dû à la résistance massive de la liaison carbone-carbone dans les matériaux à base de graphène. Il est possible de démontrer par des calculs que tous les nanotubes de carbone chiraux ($m = n$) sont métalliques comme le montre la figure III.16 (a). Leurs structures de bande se compose de deux ensembles de bandes linéaires. Parmi les tubes chiraux environ 2/3 sont semi-conducteurs, tandis que les autres présentent une petite bande interdite de l'ordre de quelques meV.

Les semi-conducteurs à faible bande interdite sont inclus dans cette section des nanotubes de carbone métalliques car à la température ambiante ($k_B T = 26$ meV), les effets liés aux petites bandes interdites ne sont pas très marqués.

La structure de bande à basse énergie d'un nanotube de carbone métallique comprend quatre bandes linéaires qui se croisent à deux points K distincts (Figure III.16 (a)). [31] Dans chaque point K, une bande porte les électrons se déplaçant vers l'avant tandis que l'autre porte les électrons se déplaçant vers l'arrière. De plus, chaque bande dégénère en spin de sorte que dans un nanotube de carbone métallique, il existe au total quatre canaux de conduction se déplaçant vers l'avant. La limite théorique de la conductance pour un nanotube de carbone à

paroi unique est $G = 4 \times e^2 / h$, ce qui équivaut à une résistance de 6,5 k Ω . Expérimentalement, la faible résistance de polarisation du nanotube de carbone est située dans une plage allant de 10 k Ω à plusieurs 100 K Ω [32], Les contacts en palladium sur les tubes obtenus par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) établissent les meilleurs contacts avec une transmission proche de l'unité [33], [34].

III.4.4.Nanotubes de carbone semi-conducteurs :

Les nanotubes de carbone semi-conducteurs ont une bande interdite qui a une relation inverse avec le diamètre 'd' du tube et une bande interdite égale à $E_g = 0,84 \text{ eV} / d$.

La conduction à travers des tubes semi-conducteurs dépend de la position exacte du niveau de Fermi par rapport aux bords de la bande, un dopage chimique ou électrostatique peut être utilisé pour modifier de manière significative la conductivité. Les CNTs fortement dopé ont un niveau de Fermi dans la bande de valence, ils conduisent comme des tubes métalliques car ils ont aussi quatre canaux disponibles : deux bandes de valence quasi-dégénérées chacune pouvant supporter la rotation vers le haut ou vers le bas. La conduction à faible polarisation est balistique sur des échelles de 100 nm de longueur et les courants maximaux pouvant être atteints avec des contacts optimisés sont d'environ 20 μA similaires à ceux observés dans les tubes métalliques. La forte dépendance de la conductivité sur le potentiel électrochimique dans le nanotube de carbone peut être utilisée pour fabriquer un dispositif agissant comme un commutateur il conduit le courant agissant comme un métal lorsque le potentiel sur une grille à couplage capacitif déplace le niveau de Fermi dans la bande de valence ou de conduction et agit comme un isolant lorsque le niveau de Fermi est dans la bande interdite. Ce type de dispositif est connu au niveau des semi-conducteurs et appelé transistor à effet de champ (FET).

Le transistor à effet de champ à semi-conducteur (MOSFET) [35- 36] révèle une importance technologique considérable. Naturellement, toutes les puces informatiques

modernes sont basées sur la logique MOS. Heureusement, le MOSFET est le plus simple à reproduire avec un nanotube de carbone semi-conducteur dans le canal en tant que couche d'inversion au lieu du silicium (Figure III.17) [37-38].

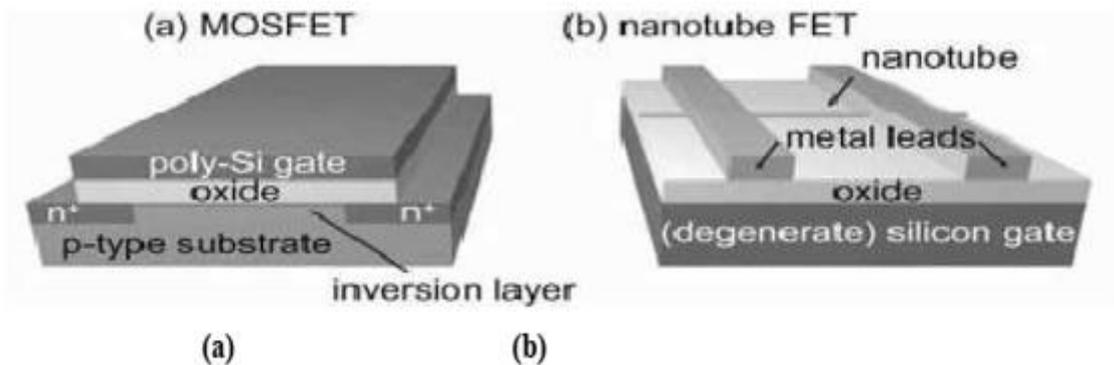


Figure III. 17: Schéma de (a) un MOSFET au silicium et (b) un FET à nanotube de carbone. Le canal dans le cas du MOSFET est une couche d'inversion de type n dans le substrat de type p proche de l'interface avec l'oxyde de silicium. Dans le FET nanotube la couche d'inversion de type n dans le substrat de type p proche de l'interface avec l'oxyde de silicium. Dans le FET nanotube la couche d'inversion est remplacée par le nanotube de carbone [37], [38].

les nanotubes de carbone semi-conducteurs sont balistiques à faible polarisation et pour des longueurs inférieures à des centaines de nanomètres

III.4.5.Le Gap énergétique des CNTFETs

La seconde caractéristique des nanotubes de carbone est leur gap énergétique, le gap pour les CNTFETs est contrôlé par le diamètre du transistor. Concernant les nanotubes semi-conducteurs plus le diamètre est faible plus la bande interdite E_g est grande. La largeur du gap est inversement proportionnelle au diamètre du nanotube.

III.4.6.La Mobilité

La mobilité est aussi importante, elle est l'une des principales caractéristiques des transistors CNTFETs. Dans les transistors CNTFETs à canal long, le transport des porteurs s'effectue par diffusion. Ainsi, la mobilité intrinsèque qu'on mesure pour ces nanotubes semi-conducteurs à $T=300^{\circ}k$ est de l'ordre de $79\ 000\text{cm}^2 /\text{Vs}$. Cette mobilité a une valeur très

importante comparée aux valeurs des mobilités des semi-conducteurs. Ainsi il serait intéressant d'utiliser ces CNT à haute mobilité pour la conception de transistors à haute fréquence par exemple.

III.4.7. Classification électrique des CNTFETs

Elles sont basées soit sur le transport balistique, soit sur l'effet tunnel ou des phénomènes électrostatiques, leurs fonctionnements est déterminé par le mouvement des électrons.

III.4.8. Le transport balistique dans les carbone nanotubes et dans les transistors CNTFETs

III.4.8.1. Le transport balistique dans les CNT

La résistance des conducteurs unidimensionnels ne dépend pas de la composition ni de la longueur du conducteur elle dépend seulement d'une fonction du nombre de canaux de conduction disponibles, par exemple des sous-bandes unidimensionnelles, et de la transmission au niveau des contacts [40]. Pour un seul canal de conduction avec 100% de contacts transparents, la résistance quantique est une constante universelle donnée par la relation suivante :

$$R_Q = h/e^2 \sim 26K\Omega \quad \text{III.2}$$

Cette activité est connue sous le nom de la conduction balistique car les électrons se déplacent avec un effet de diffusion nulle entre deux bornes (figure III.18 a). Bien qu'il n'y ait pas de diffusion dans le canal de conduction ni de rétrodiffusion des électrons, la résistance d'un conducteur balistique n'est pas nul. La résistance quantique est également appelée résistance de contact et découle de la différence entre le grand nombre de modes des contacts

macroscopiques sur lesquels le courant est distribué et quelques modes électroniques (première sous bandes) disponibles dans le conducteur unidimensionnel [41].

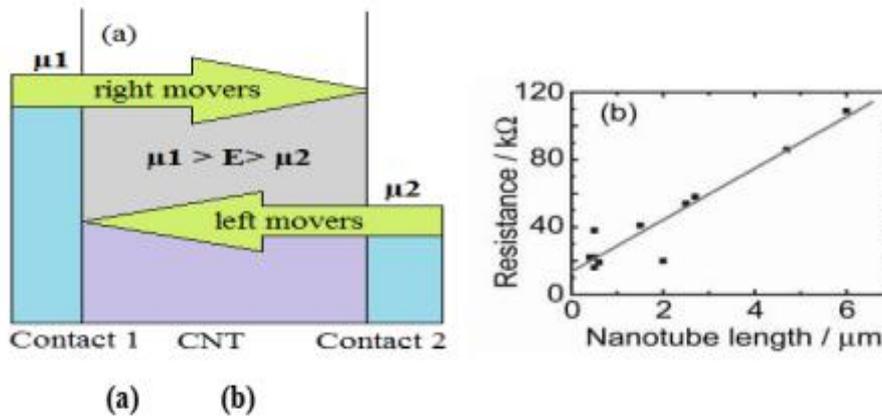


Figure III. 18 : (a) Conception du transport balistique dans un nanotube de carbone métallique où l'énergie est tracée en fonction de la position. Les porteurs d'énergie allant jusqu'à μ_1 sont injectés dans le CNT à partir du contact 1 et ceux d'énergies jusqu'à μ_2 sont injectés à partir du contact 2. Il n'y a pas de dispersion dans le CNT, et les porteurs injectés avec une certaine énergie E traversent le tube sans aucune perte d'énergie. [42]

(b) Faible résistance en biais en fonction de la longueur des nanotubes pour 11 tubes de dépôt chimique en phase vapeur (CVD) après 10. La ligne en trait continu correspond à un ajustement linéaire des données avec une pente de $15 \text{ k}\Omega / \mu\text{m}$ et une intersection d'axe des y de $14 \text{ k}\Omega$. L'axe des y suggère des coefficients de transmission de $t_i = 0,5$ et la pente d'un libre parcours d'électrons de $0,4 \mu\text{m}$. [42]

L'équation III.3. peut être généralisée pour inclure M canaux de conduction et contacts avec un coefficient de transmission autre que l'unité t_i :

$$G = \frac{e^2}{h} \cdot \sum_{i=1}^M t_i (E_f) \quad \text{III.3}$$

Où,

- $G = 1 / RQ$ est la conductance quantique,
- E_F est l'énergie de Fermi.

L'équation III.3. Est la formule de Landauer pour un conducteur balistique. Pour les contacts 100% transparents, la conductance est simplement $M \times e^2 / h$. La résistance

quantique (ou résistance de contact) passe à zéro lorsqu'il existe un grand nombre de canaux de conduction tels qu'un système macroscopique.

La formule de Landauer peut être encore généralisée pour inclure la diffusion dans le canal de conduction en introduisant un trajet sans moyenne d'électrons (longueur de diffusion en impulsions l_m) :

$$R = RQ \cdot L / l_m \quad \text{III.4}$$

- L est la longueur du conducteur,
- $RQ = 1 / G$ est la résistance quantique.

Le fonctionnement du CNTFET est basé sur le transport balistique, dans les CNTs, le transport balistique a été prouvé de manière expérimentale pour des basses polarisations ainsi que pour des températures basses. Le diamètre du nanotube de carbone est généralement de l'ordre du nanomètre sa longueur à la particularité de varier de quelques centaines de nm à quelques dizaines de μm , le nanotube est donc un élément à une dimension. Le confinement donc monodimensionnel n'autorisera le déplacement des porteurs de charge soit donc des électrons que dans deux directions opposées. Pour des nanotubes de carbone ayant une longueur de canal n'excédant pas quelques centaines de nm on peut considérer qu'il n'y a aucune dispersion des porteurs. La distance entre deux électrodes est plus courte que la distance moyenne traversée par l'électron entre deux collisions. Le transport est ainsi dit balistique dans ce cas les électrons ne subissent donc plus de collision pas de chocs inélastiques, par conséquent aucune chaleur ne sera donc dissipée.

❖ Effet tunnel :

L'opération fondamentale des CNTFET à effet tunnel est due à la pénétration d'électrons à travers une barrière. Le nombre d'électrons est proportionnel à la tension de polarisation V à travers le dispositif. En effet, plus la tension de polarisation V est élevée, plus

le nombre d'électrons "n" est important augmentant la probabilité qu'un tunnel passe à travers la barrière afin qu'un courant plus élevé puisse circuler.

❖ **Phénomènes électrostatiques**

Les nano dispositifs à base d'électrostatique agissent en forçant les électrons à interagir les uns avec les autres en présences de champ électrique. Ces forces sont décrites dans la loi de Coulomb. Essentiellement lorsque les particules (si les deux sont des électrons ou des protons) sont très proches et ont tendance à se repousser. D'autre part, les particules opposées s'attirent.

III.4.8.2.L'Ambipolarité

Les SB-CNTFETs ainsi que les DG-CNTFET ont une caractéristique singulière appelée l'ambipolarité et peuvent donc changer d'état. Cette propriété va rendre leur exploitation très délicate.

Considérons pour expliquer l'ambipolarité le cas des DG-CNTFETs qui possède une électrode supplémentaire en aluminium placée sous le nanotube entre les contacts du drain et de la source comparé au CNTFET à barrière Schottky. Dans ce type de dispositif CNTFETs à double grille, le substrat en silicium joue le rôle de la grille arrière en déterminant le type du porteur majoritaire ainsi que le courant Ion du dispositif :

Quand $V_{gs} \ll 0$, le dispositif fonctionne comme un P-FET enrichi avec une tension de seuil négative.

Quand $V_{gs} \gg 0$, le dispositif fonctionne comme un N-FET présentant une tension de seuil positive.

Pour ce CNTFET de type SB-CNTFET, le changement d'état de ce dispositif est gouverné par la variation de la barrière de Schottky qui se forme à l'interface du nanotube de carbone et le contact métallique.

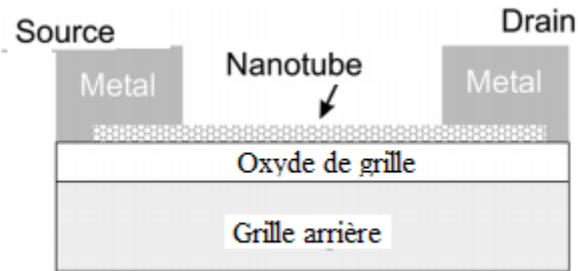


Figure III. 19 : Schéma d'un SB-CNTFET.

Le comportement ambivalent du SB-CNTFET peut s'expliquer à l'aide du schéma des bandes d'énergie de la figure III.120 qui suit

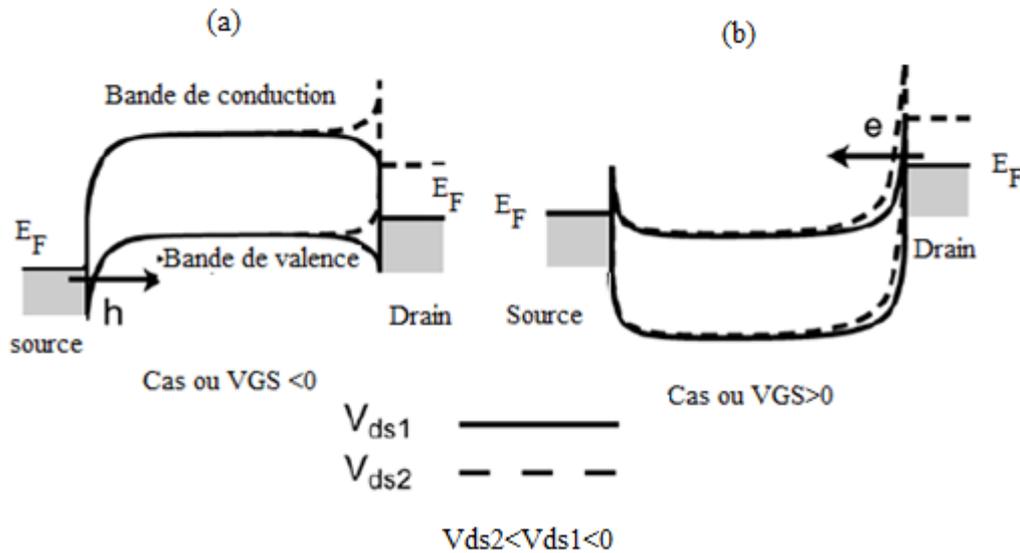


Figure III. 20 : Diagramme des bandes d'énergie pour (a) $V_{gs} < 0$ et (b) $V_{gs} > 0$. [43]

Pour une tension V_{GS} négative comme illustré sur la figure III.20 (a), la barrière Schottky sera raisonnablement étroite et permettra le passage de trous dans le nanotube depuis la source.

De la même manière, Pour une tension V_{GS} positive comme illustré sur la figure (b), la barrière Schottky sera raisonnablement étroite et permettra le passage des électrons dans le nanotube depuis le drain.

III.5. Fabrication des CNTFET (exploration expérimentale)

Les transistors à effet de champ à base de nanotubes de carbone (CNTFET) peuvent être fabriqués avec des dimensions de l'ordre de la longueur d'onde quantique des électrons. Ainsi, les propriétés de transport sont influencées par des considérations quantiques et le transport balistique. Étant donné que les NTC peuvent être dopés avec des impuretés de type n ou p, La structure d'un CNTFET est similaire à celle d'un MOSFET dans lequel un SWNT forme le canal entre deux électrodes qui fonctionnent comme source et drain du transistor. La structure est construite sur une couche isolante et un substrat de silicium qui fait office de grille arrière. Au cours de la dernière décennie, des travaux importants sur la fabrication de CNTFET ont été signalés.

Il a été mentionné ci-dessus, que la fabrication de CNTFET de type n et p ont été effectués avec succès. Lorsque les premiers CNTFET ont été fabriqués, leurs caractéristiques I-V ont montré un comportement de type p (Tanet al 1998) impliquant un nanotube de carbone dopé de type P. La raison du comportement de type p a été expliquée plus tard par l'absorption d'oxygène (Collins et al 2000, Sumanaskera et al 2000), qui modifie le diagramme de niveau de bande d'énergie à l'interface CNT-électrode en favorisant la conduction des trous (Martelet al2001, Derycke et al 2002). En conséquence, des CNTFETs de type n ont été fabriqués. (Javey et al 2005, Derycke et al 2002, Derycke et al 2001 ont montré que des CNTFET de type n, ont pu être conçus par recuit sous vide pendant plusieurs minutes.

Top-gated CNTFETs

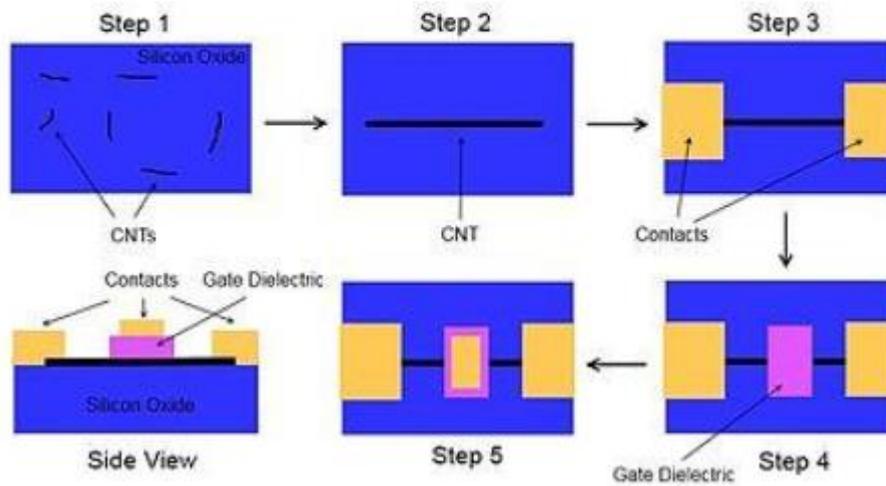


Figure III. 21 : Le processus de fabrication d'un CNTFET à grille supérieure. [44]

Les contacts de source et de drain des CNTFETs sont définis et configurés à l'aide d'une lithographie par faisceau d'électrons à haute résolution. Une étape de recuit à haute température réduit la résistance de contact en améliorant l'adhésion entre les contacts et le CNT. Un mince diélectrique à grille supérieure est ensuite déposé sur le nanotube par évaporation ou par dépôt de couche atomique. Enfin, le contact de grille supérieure est déposé sur le diélectrique de grille.

III.6. Paramètres physiques du CNTFET

Les paramètres physiques du transistor à base de nanotube de carbones sont listés dans ce qui suit :

- Les dimensions du nanotube soit son diamètre et sa longueur qui représentent les dimensions du canal du transistor.
- La capacité C_{GS} de la grille. L'expression de cette capacité varie selon que cette grille soit plane ou plutôt coaxiale.

Pour une grille plane cette capacité a pour expression :

$$C_G = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r / \cosh^{-1}(t_{ox}/r) \quad \text{III.5}$$

Où r représente le rayon du nanotube de carbone et t_{ox} l'épaisseur de l'oxyde de grille, et ϵ_r la constante diélectrique.

Pour un CNTFET à grille coaxiale cette capacité s'exprimera par :

$$C_G = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r L_G / \ln[2(t_{ox} + r)/r] \quad \text{III.6}$$

L_G représente ici la longueur de la grille

Le CNTFET à grille coaxiale permet un meilleur contrôle du canal comparé au CNTFET planaire.

III.6.1. Tension de seuil (V_{th}) du CNFET

Concevoir un circuit offrant les meilleures performances sur la base d'une vitesse et d'une puissance moyenne est très important, ceci permet de déterminer la tension de seuil car elle affecte la vitesse de commutation et le courant de fuite. La tension de seuil active le dispositif de manière électrostatique à travers la grille. L'un des avantages du CNFET est que sa tension de seuil peut être ajustée par la modification de son diamètre, cette caractéristique pratique rend le CNFET plus flexible que le MOSFET pour la conception de circuits numériques et le rend très approprié pour la conception de circuits à plusieurs seuils. La tension de seuil d'un CNFET est presque considérée comme la demi-bande interdite et peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{th} = \frac{E_g}{2 * e} = \frac{\sqrt{3} a * V_{\pi}}{3 e * D_{CNT}} = \frac{0.43}{D_{CNT(nm)}} \quad \text{III.7}$$

Où $a = 2,49 \text{ \AA}$ est la constante du réseau. La tension de seuil des CNTFETs où les NTC du canal semi-conducteurs sont proportionnels au diamètre, peut être approchée au premier ordre

à la demi-bande interdite (inversement proportionnelle au diamètre). Où $V\pi$ (3,033eV) est l'énergie de liaison carbone.

III.6.2. Rapport du courant I_{ON} / I_{OFF}

Le rapport de courant ON-OFF (I_{on} / I_{off}) est un paramètres important .Il détermine principalement la dissipation de puissance du dispositif. I_{off} est le courant de fuite sous $V_{GS} = 0V$ et $V_{DS} = V_{DD}$. Pour de meilleures performances, un rapport adéquat de l'ION/IOFF est recherché.

III.6.3. Transconductance (g_m)

La transconductance (g_m) est définie comme la variation du courant de drain-source par rapport à la variation correspondante de la tension grille-source, cette transconductance dépend de la géométrie du dispositif, de la mobilité des porteurs et de la tension de seuil.

$$g_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \quad \text{III.8}$$

III.6.4. Pente sous le seuil (SS)

La pente du sous-seuil (SS) est un autre paramètre important du CNTFET, il détermine la relation entre le courant de fuite inférieur au seuil et la tension de grille. Il est défini comme la quantité de V_{gs} requise pour modifier le courant du sous-seuil par un ordre de grandeur. Une valeur adéquate de la pente SS doit permettre d'obtenir un courant I_{ON} plus élevé pour une valeur de courant I_{OFF} donnée. La pente inverse du sous-seuil, s'exprime par :

$$S = \left(\frac{d(\log_{10} I_{sub})}{dV_{GS}} \right)^{-1} \quad \text{III.9}$$

La valeur de S, doit être aussi faible que possible .On utilise généralement l'inverse de la pente sous seuil des caractéristiques $I_D.V_G$, car elle permet de décrire la qualité de control entre les deux régimes du transistor soit le régime passant et le régime bloqué. Plus cette

valeur est faible, plus le rapport I_{ON}/I_{OFF} est meilleur et plus les performances du transistor sont meilleures.

Le meilleur P-CNTFET a présenté une valeur de l'inverse de la pente sous le seuil de l'ordre de 85 mV/décade. L'inverse de la pente enregistré pour un n-CNTFET fut de 100 mV/décade sans dopage et avec des contacts Sc. [45].

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu présenter brièvement les transistors CNTFETs, leurs principes de fonctionnement. Nous avons également présenté les différents types de structure CNFET, Il ressort de ce chapitre que les CNFET sont des candidats très prometteurs à cause de leur grande densité d'intégration, de leur ressemblance aux dispositifs MOSFETs en ce qui concerne les caractéristiques I-V, leur important courant I_{on} , leur négligeable courant I_{off} ainsi que leur faible consommation de puissance. Ces dispositifs présentent aussi des inconvénients tel que leur probabilités de défautuosité lors de leur fabrication qui restent élevées, en plus des différents défauts de fabrication ces dispositifs présente une grande dispersion de caractéristiques car ils présentent une grande sensibilité aux contraintes extérieurs tel que le bruit etc. C'est pour ces différents inconvénients que leur utilisation dans la conception des portes logiques par exemple est actuellement assez contestable néanmoins il a tout de même été prouvé expérimentalement que les CNTFETs peuvent être utilisés pour concevoir différentes fonctions électroniques, telles que les portes logiques, les mémoires non volatiles et les oscillateurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] W. Ahmad and A. Anzer, "Modeling and simulation of ballistic carbon nanotube field effect transistors (cntfets) with quantum transport concept and its application in nanoelectronics," VSRD International Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering, vol/issue: 3(7), 2013.
- [2] L. Wei, et al., "Non iterative Compact Modelling for Intrinsic Carbon-Nanotube FETs: Quantum Capacitance and Ballistic Transport," IEEE Transactions on Electron Devices, vol/issue: 58(8), 2011.
- [3] R. Sahoo and R. R. Mishra, "Simulations of Carbon Nanotube Field Effect Transistors," International Journal of Electronic Engineering Research, vol/issue: 1(2), pp. 117–125, 2009.
- [4] L. S. Nasrat, et al., "Carbon Nanotubes Effect for Polymer Materials on Break down Voltage," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol/issue: 7(4), pp. 1770-1778, 2017.
- [5] H. S. Philipwong and D. Akinwande, "Carbon Nanotube and Graphene Device Physics," Cambridge University Press, New York, 2011.
- [6] A. Laribi, A. Guen Bouazza "Effect of Chirality and Oxide Thickness on the Performance of a Ballistic CNTFET," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 8, No. 6, pp. 4941~4950, Unit of Research Materials and Renewable Energies, Department of Electronics, Faculty of Technology, University Abou-Bakr Belkaid, Algeria, 2018 .
- [7] H. Cazin d'Honinethun, S. Galdin-Retailleau, A. Bournel, P. Dollfus, and J. Bourgoïn, "Monte Carlo study of coaxially gated CNTFETs: capacitive effects and dynamic performance," Comptes Rendus Physique, vol. 9, no. 1, pp. 67-77, Jan. 2008.

- [8] H. Cazin d'Honincthun, H. Nguyen, S. Galdin-Retailleau, A. Bournel, P. Dollfus, and J. Bourgoïn, "Influence of capacitive effects on the dynamic of a CNTFET by Monte Carlo method," *Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 40, no. 7, pp. 2294-2298, May. 2008.
- [9] Wind et al : A. Jalabert, Architecture de memoire haute densite a base d'electronique moleculaire tolerante a un tres grand nombre de defauts , these de doctorat, ENS paris, 2006.
- [10] L. Anghel, Conception robuste dans les technologies CMOS avancees et post-CMOS, these de doctorat, universite de Bordeaux, 2007.
- [11] Phaedon Avouris et al., "Carbon Nanotube Electronics" *Proceedings of the IEEE*, Vol 91, No. 11, November 2003
- [12] Zoheir Kordrostami and Mohammad Hossein Sheikhi (2010). "Fundamental Physical Aspects of Carbon Nanotube Transistors," *Carbon Nanotubes*, Jose Mauricio Marulanda (Ed.), ISBN: 978-953-307-054-4, InTech, Available from
- [13] Nanotube field-effect transistor. <http://www.research.ibm.com/nanoscience/fet.html>
- [14] P. J. F. Harris, "Carbon nanotubes and related structures new materials for the twentyfirst century," Cambridge University Press, New York, 2004.
- [15] Heng Chin Chuan, "Modeling and Analysis of Ballistic Carbon Nanotube Field Effect Transistor (CNTFET) with Quantum Transport Concept" Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia These de Master, 2007
- [16] A. Mouatsi., "Composants a heterostructures Application en nanoelectronique et nanophotonique," These de doctorat, Université de constantine 1, 2013.
- [17] Tans, S. J. ET. Al. Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires. 1997. *Nature*. 386(3): 474-477

- [18] Forro, L. and Schoenberger, C. Physical Properties of Multi-wall Nanotubes. In: Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. and Avouris, P. eds. Carbon Nanotubes: Synthesis, Structures, Properties and Applications. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 329-390; 2001
- [19] Avouris, P. et. Al. Carbon Nanotube Electronics. 2003. Proceedings of the IEEE. 91(11): 1772-1784
- [20] Takahashi, Y. ET. Al. Silicon Single-Electron Devices and Their Applications. 2000. Proceedings of 30th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic. 411-420
- [21] Rahmat bin sanudin, characterisation of ballistic carbon nanotube field-effect transistor, Master of Engineering, UNIVERSITY TEKNOLOGY MALAYSIA, 2005.
- [22] S. A. Khan and M. Hasan, "Characterization of Carbon. Nanotube Field Effect Transistor," Bachelor of Science, Bangladesh, 2012.
- [23] Avouris et al., "Vertical scaling of carbon nanotube field-effect transistors using top gate electrodes," Applied Physics Letters, 2002.
- [24] Lageweg, C., Cotofanã, S. and Vassiliadis, S. Single Electron Encoded Latches and Flip Flops. 2004. IEEE Transactions on Nanotechnology, 3(2): 37-248.
- [25] P. Avouris, Z. Chen, et V. Perebeinos, "Carbon-based electronics," Nat Nano, vol. 2, Oct. 2007, p. 605-615.
- [26] Dang T., Anghel L., Leveugle R. "CNTFET Basics and Simulation," International Conference on Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology, IEEE Explore 2006.

- [27] Choi, W. B. ET. Al. Aligned carbon nanotubes for nanoelectronics. 2004. Institute of Physics Publishing. 15: 512-516
- [28] Wolfgang Hoenlein, Franz Kreupl, Georg Stefan Duesberg, Andrew Peter Graham, Maik Liebau, Robert Viktor Seidel, and Eugen Unger, "Carbon Nanotube Applications in Microelectronics", IEEE transactions on components and packaging technologies , Vol. 27, No. 4, (2004), 629-634.
- [29] Dang T., Anghel L., Leveugle R. "CNTFET Basics and Simulation," International Conference on Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology, IEEE Explore 2006.
- [30] R.F. Peierl, "Quantum Theory of Solids, Clarendon, Oxford," p. 108 (1955)
- [31] R. Saito, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus, Physical Properties of Carbon Nanotubes, Imperial College Press, London (1998).
- [32] S.J. Tans, M.H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R.E. Smalley, L.J. Geerlings, and C. Dekker, Nature 386, 474 (1997)
- [33] A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom, and H. Dai, Nature 424, 654 (2003).
- [34] D. Mann, A. Javey, J. Kong, et al., Nano Lett. 3, 1541 (2003).
- [35]W. Shockley and G.L. Pearson, Phys. Rev. 74, 232 (1948).
- [36]D. Kahng and M.M. Atalla, Silicon-Silicon Dioxide Field Induced Surface Devices, IRE Solid-State Device Research Conference, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA (1960).
- [37] S.J. Tans, A.R.M. Verschueren, and C. Dekker, Nature 393, 49 (1998).
- [38] R. Martel, T. Schmidt, H.R. Shea, et al., Appl. Phys. Lett. 73, 2447 (1998).
- [39] J. Tersoff, M. Freitag, J.C. Tsang, and Ph. Avouris, cond-mat/0411537 (2004).

- [40] R. Landauer, IBM J. Res. Dev. 1, 223 (1957); R. Landauer, IBM J. Res. Dev. 32, 306 (1988); D.S. Fisher and P.A. Lee, Phys. Rev. B 23, 6851 (1981); M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, and S. Pinhas, Phys. Rev. B 31, 6207 (1985); M. Büttiker, Phys. Rev. Lett. 57, 1761 (1986); Y. Imry, Physics of mesoscopic systems, in Directions in Condensed Matter Physics, edited by G. Grinstein and G. Mazenko, World Scientific Press, Singapore (1986); M. Büttiker, IBM J. Res. Dev. 32, 317 (1988); R. Landauer, Physica Scripta T42, 110 (1992).
- [41] S. Datta, Electronic Transport in Mesoscopic Systems, Cambridge University 111 Press, Cambridge, U.K. (1995).
- [42] Nirjhor Tahmidur Rouf, Ashfaquul Haq Deep, Rusafa Binte Hassan, “Current-Voltage Characteristics of Carbon Nanotube Field Effect Transistor Considering Non-Ballistic Conduction”, Bachelor of Science in Electrical and Electronic Engineering ,september, 2013.
- [43] Z. Chen, J. Appenzeller, J. Knoch, and A.P.A. Yu-ming Lin, “The Role of Metal-Nanotube Contact in the Performance of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors,” Nano Lett., vol. 5 (7), pp. 1497- 502, 2005
- [44] RESHMA M, “carbon nanotube fet device fabrication, design, modeling,and simulation of cntfet for reconfigurable logic gate design”, Asia Pacific Journal of Research, Vol: I Issue XVII, September 2014.
- [45]. Z. Zhang et al., “Self-Aligned Ballistic n-Type Single-Walled Carbon Nanotube Field-Effect Transistors with Adjustable Threshold Voltage,” Nano Letters, vol. 8, no. 11, pp. 3696-3701, Nov. 2008.

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulation que nous avons obtenus et permettant d'étudier un N-CNTFETs et de présenter ses caractéristiques électriques en mode DC. Pour cela nous présentons tout d'abord le modèle de simulation que nous avons utilisé pour simuler les caractéristiques électriques du CNTFET étudié et d'observer l'effet de la variation de certains paramètres de ce dispositif sur ses caractéristique électriques en mode DC. On mettra alors en évidence l'importance de ces paramètres telle que l'épaisseur de l'oxyde, le diamètre du CNT, la chiralité, et la température, ainsi que l'effet de la constante diélectrique, sur le bon fonctionnement du transistor a nanotube de carbone. Afin de valider nos résultats une étude comparative sera effectuée avec d'autres résultats de recherches obtenues dans d'autres travaux de recherches que nous avons retrouvés lors de nos recherches bibliographiques. A la fin de ce chapitre une analyse et une discussion de nos résultats obtenus sera présentée.

IV.2. Modèle mathématique utilisé

Les différentes simulations que nous avons réalisées se basent sur le modèle de potentiel de surface décrit par Rahman et Al. [1] et cela en utilisant l'outil FETToy.

FETTOY, que nous avons utilisé, est un outil de modélisation créé par des chercheurs à l'Université de Purdue, FETToy 2.0 a été utilisé comme algorithme qui introduit une théorie du MOSFET balistique par comparaison au MOSFET conventionnel. Ainsi, FETToy permet de calculer les caractéristiques balistiques I-V pour des MOSFET conventionnels, des MOSFET à Nanofil et des MOSFET à Nanotube de carbone. Pour les MOSFET conventionnels, FETToy suppose une géométrie simple grille ou double grille et pour un MOSFET à nanofils et nanotubes FETTOY suppose cette fois ci une géométrie cylindrique.

Seule la sous-bande la plus basse est considérée, mais elle est facilement modifiable pour inclure plusieurs sous-bandes.

On rappelle que la structure du CNTFET étudié est presque similaire à celle du MOSFET, cependant le canal de conduction a été remplacé par un nanotube de carbone permettant ainsi d'étudier cette nouvelle structure de transistor à base de nanotubes de carbone. Il a été prouvé expérimentalement que les CNTFETs pouvaient donner de résultats comparables aux résultats obtenus sur des transistors conventionnels.

Dans ce travail nous considérons un CNTFET avec un transport balistique. Pour s'en assurer, il faut que les dispersions des porteurs soient supprimées dans le nanotube intrinsèque jouant le rôle du canal du CNTFET, par ailleurs, les porteurs de charge traversant le canal du drain à la source ne reviennent pas en arrière vers la source. Le courant du drain doit rester constant le long du canal, il est calculé au début du canal.

Quelle que soit la tension de drain ou de grille, le courant de drain est calculé sur la charge totale occupée par la première sous-bande du nanotube. Le processus est répété pour toutes les tensions drain / grille dans la plage spécifiée avant que toutes les valeurs du courant de drain ne soient tracées dans un seul graphe. Ce modèle de transistor CNFET comprend trois condensateurs qui représentent trois bornes de potentiel du transistor au sommet de la barrière. La région colorée de la Figure. IV. 1 permet d'identifier tout d'abord la charge mobile située en haut de la barrière et qui est déterminée par la densité locale d'états au sommet de la barrière l'emplacement des niveaux de source et de drain, E_{F1} et E_{F2} , et V_{sc} .

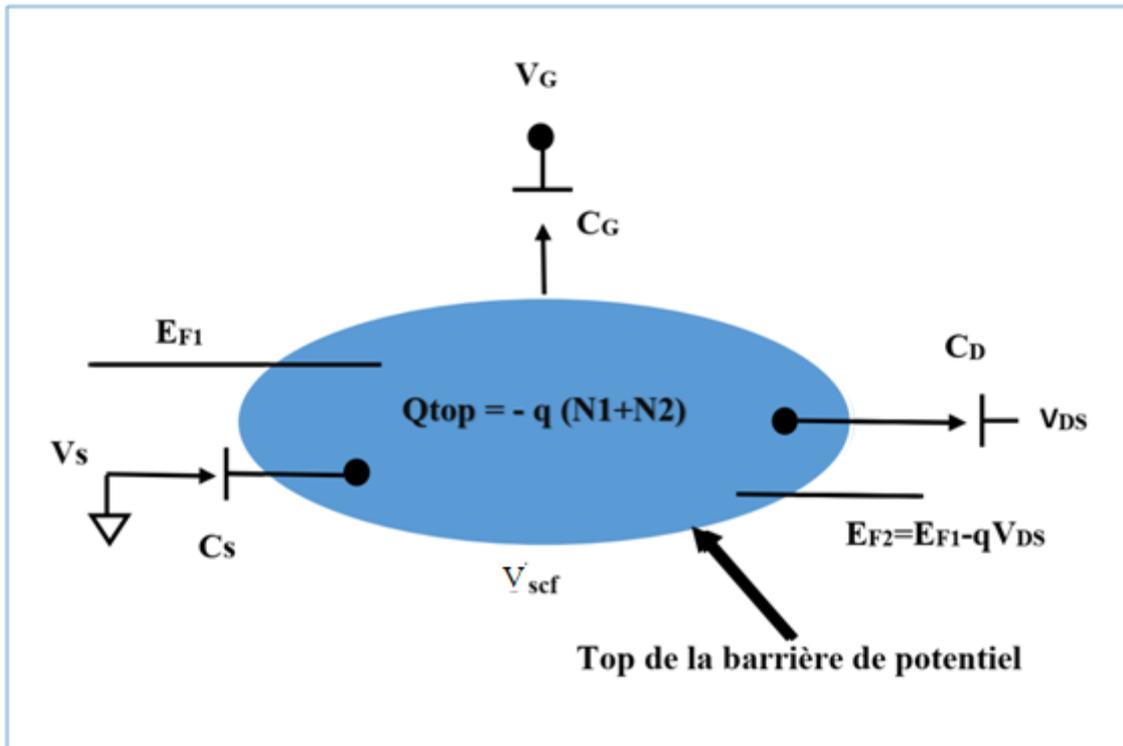


Figure IV. 1 : Modèle de circuit bidimensionnel pour un transistor CNTFET.

Le potentiel au sommet de la barrière V_{scf} est alors dans ce cas contrôlé par les potentiels de la grille et du drain et de la source à travers les trois condensateurs C_s, C_G et C_D mis en évidence en figure IV.1. La charge mobile au sommet de la barrière est déterminée par la densité locale des états au sommet de la barrière de potentiel, par la localisation de la source et du drain aux deux niveaux de Fermi E_{F1} et E_{F2} respectivement et par V_{scf} représentant le potentiel cohérent au sommet de la barrière

Le courant de drain est alors calculé par les équations données ci-dessous, pour simplifier, le potentiel de la source qui est V_{source} noté V_s est mis à la masse, soit $V_s=0$ Volts, et est considéré ici comme potentiel de référence. La charge totale du canal du nanotube et la charge au sommet de la barrière de potentiel de la source et du drain sont donnés comme par :

$$N_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} D(E)f(E - E_F)dE \quad \text{IV.1}$$

Où $F(E)$ représente la probabilité qu'un état d'énergie E soit occupé (Probabilité de Fermi Dirac), $D(E)$ est la densité d'état locale du nanotube au sommet de la barrière ;

$f(E-E_F)$ représente la fonction de distribution de Fermi à l'équilibre ;

Quand les terminaux sont à zéro, la densité d'électrons d'équilibre au sommet de la barrière est N_0 , cette barrière est égale à N_1 si les états positifs de vitesse sont effectués par la source est égale à N_2 si les états négatifs de vitesse sont effectués par le drain N_1 et N_2 et sont telles que :

$$N_1 = \frac{D(E)}{2} \int_{+\infty}^{-\infty} f(E + V_{scf} - E_{F1}) dE \quad \text{IV.2}$$

$$N_2 = \frac{D(E)}{2} \int_{+\infty}^{-\infty} f(E + V - E_{F2}) dE \quad \text{IV.3}$$

Le potentiel au sommet de la barrière, ignorant la charge mobile est V_L . Dans cette modélisation, on suppose que $E_{F1} = 0$ et $E_{F2} = -qV_d$. Et q représente la charge électrique. Le potentiel V_{scf} doit être calculé afin de déterminer la densité de charge au sommet de la barrière de potentiel.

Le potentiel de Laplace sera calculé par l'équation qui suit :

$$V_L = -q \left(\frac{C_G}{C_T} V_G + \frac{C_D}{C_T} V_D + \frac{C_S}{C_T} V_S \right) \quad \text{IV.4}$$

C_T est la combinaison parallèle de trois condensateurs C_G, C_D, C_S ,

Le potentiel dû à la charge mobile V_p peut être exprimé par :

$$V_p = \frac{q^2}{C_T} (N_1 + N_2) - N_0 \quad \text{IV.5}$$

Le potentiel V_{scf} peut finalement être déterminé par la somme de V_L et V_P et s'exprime par

$$[18] : \quad V_{scf} = -q \left(\frac{C_G}{C_T} V_G + \frac{C_D}{C_T} V_D + \frac{C_S}{C_T} V_S \right) + \frac{q^2}{C_T} (N_1 + N_2) - N_0 \quad \text{IV.6}$$

Ce modèle basé sur un modèle analytique proposé par Rahman et Al [1-2] permet de considérer le transport balistique du CNTFET, dans ce cas le courant du drain aura pour expression :

$$I_D = \frac{4qk_B T}{h} \left[\ln \left(1 + \exp \left(E_{F1} - -q \left(\frac{C_G}{C_T} V_G + \frac{C_D}{C_T} V_D + \frac{C_S}{C_T} V_S \right) + \frac{q^2}{C_T} (N_1 + N_2) - N_0 \right) \right) \right. \\ \left. - \ln \left(1 + \exp \left(E_{F2} - -q \left(\frac{C_G}{C_T} V_G + \frac{C_D}{C_T} V_D + \frac{C_S}{C_T} V_S \right) + \frac{q^2}{C_T} (N_1 + N_2) - N_0 \right) \right) \right] \quad \text{IV.7}$$

Où :

k_B représente la constant de Boltzmann, T : température de fonctionnement, E_F : l'énergie de Fermi, V_{scf} : est potentiel de surface, et q est charge électrique,

IV. 3 Résultats de simulation et interprétations

Pour étudier les performances du transistor à nanotube de carbone nous avons simulé les caractéristiques d'un transistor CNTFET avec un canal CNT. Ici le transport est bien entendu balistique. Nous avons utilisé le FETToy librement disponible en ligne. FETTOY calcule les caractéristiques balistiques I-V pour les MOSFET conventionnels et les MOSFET à nanofils ainsi que les MOSFET à Nanotube de carbone. Pour les MOSFET conventionnels, FETToy suppose une géométrie de grille simple ou double et pour un MOSFET à nanofils et nanotubes, il suppose une géométrie cylindrique (voir la figure IV. 3).

Seule la sous-bande la plus basse est considérée, mais elle est facilement modifiable pour inclure plusieurs sous-bandes.

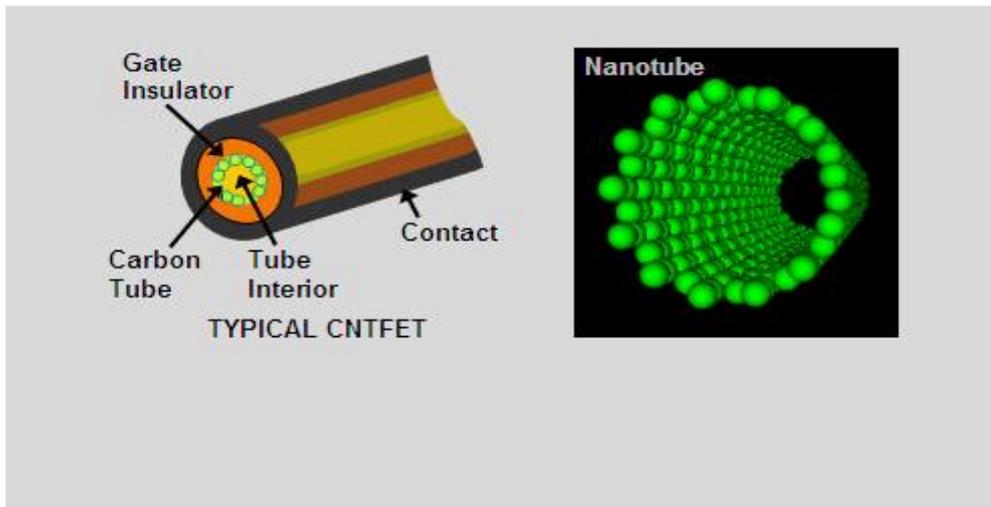


Figure IV. 2: Structure typique d'un CNTFET cylindrique "FETTOY"

Pour étudier les performances du transistor à nanotube de carbone nous avons simulé les caractéristiques d'un transistor CNTFET avec un canal CNT par l'outil FETTOY. Nos simulations sont d'abord effectuées à température ambiante ($T=300K$). Nos diverses simulations nous ont permis de déterminer les performances de notre dispositif en mode DC.

Afin d'examiner les performances du dispositif considéré, nous avons examiné l'effet de plusieurs paramètres sur les caractéristiques DC du CNTFET. Les différents paramètres du transistor ayant une influence sur les caractéristiques de notre dispositif et auxquels nous nous sommes intéressés dans ce travail sont l'épaisseur de l'oxyde de grille est de t_{ox} la permittivité de l'oxyde de grille notée k le diamètre du nanotube de carbone noté 'd' la chiralité (n,m). La structure schématique du CNTFET que nous avons considérée pour nos simulation est représentée en figure IV.3.

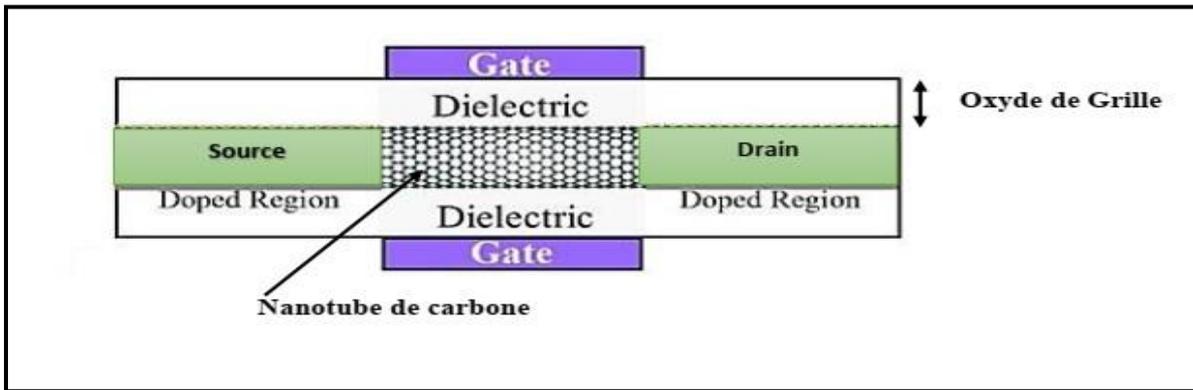


Figure IV. 3 : La structure du CNFET utilisé pour nos simulations.

IV. 3 .1.Caractéristique de transfert du transistor CNTFET

Pour déterminer les caractéristiques de sortie et de transfert de notre N-CNTFET, nous avons choisi une épaisseur de l'oxyde de grille $t_{ox}=10$ nm, la permittivité de l'oxyde de grille SiO_2 est $k = 3,9$, le diamètre du nanotube de carbone est de 2 nm, la chiralité est de (26, 0).

Les caractéristiques de sorties $I_{DS}-V_{DS}$ du dispositif étudié sont données en figure IV.4 pour cela V_{DS} varie de 0 à 1 volt alors que la tension V_{GS} varie de 0 à 1 volt avec un pas de 0.2 Volt.

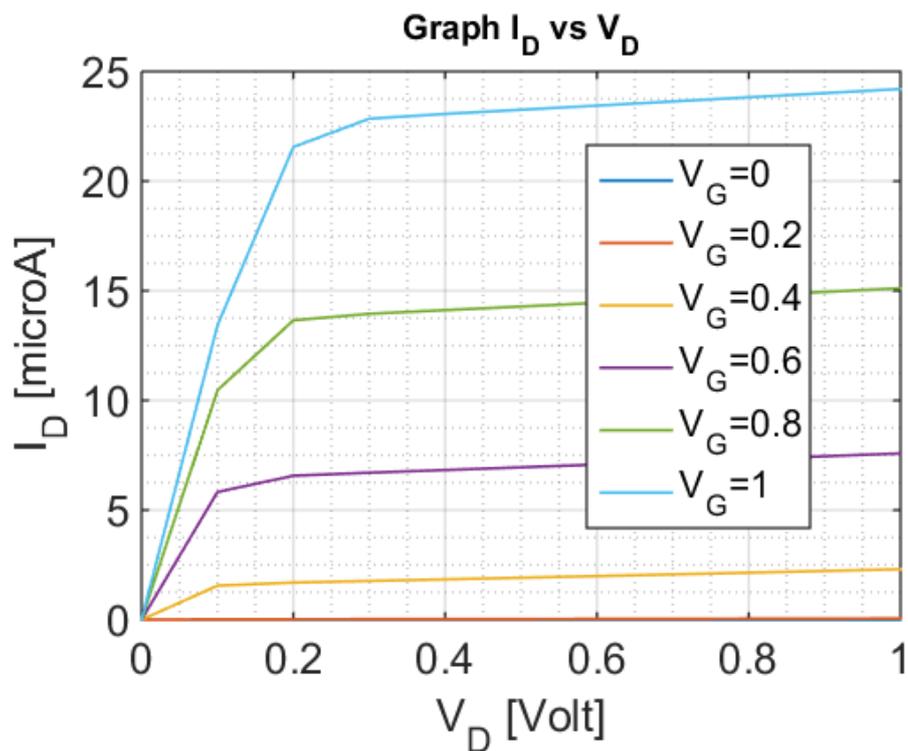


Figure IV. 4 : La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour une température de 300°K.

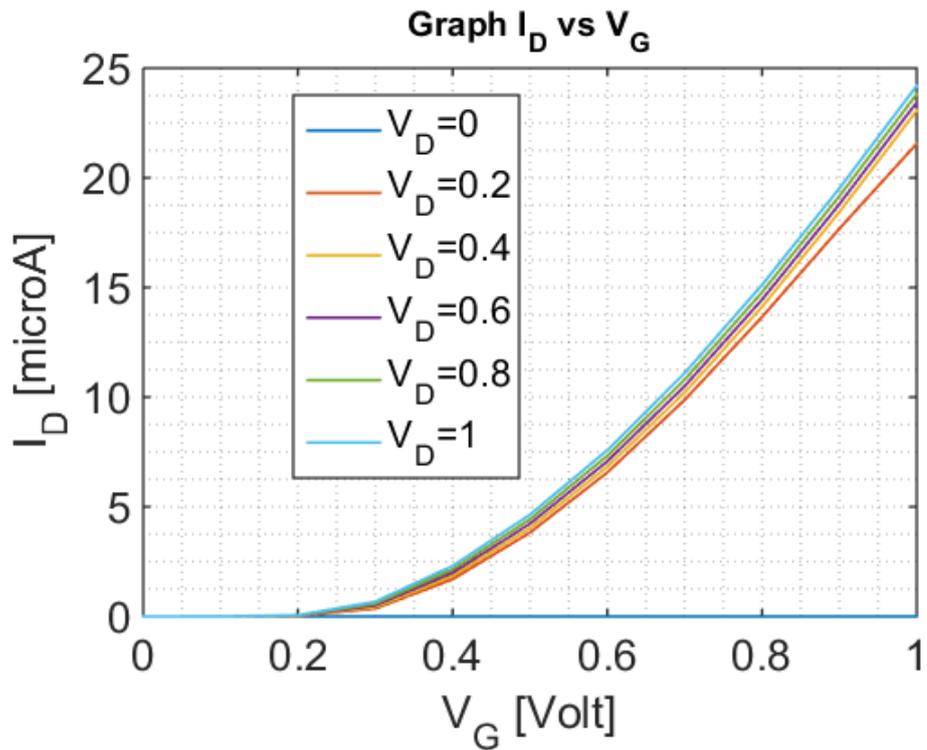


Figure IV. 5 : La Caractéristiques Ids-Vgs pour une température 300°K à l'échelle linéaire.

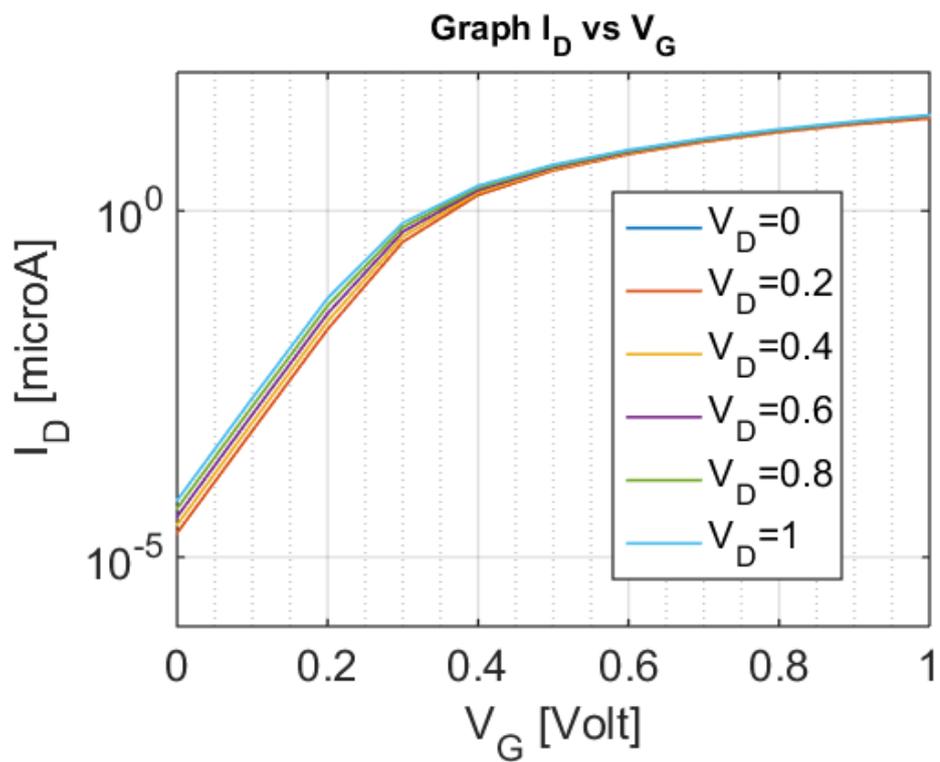


Figure IV. 6 : la caractéristiques Ids-Vgs pour une température de 300°K à l'échelle logarithmique.

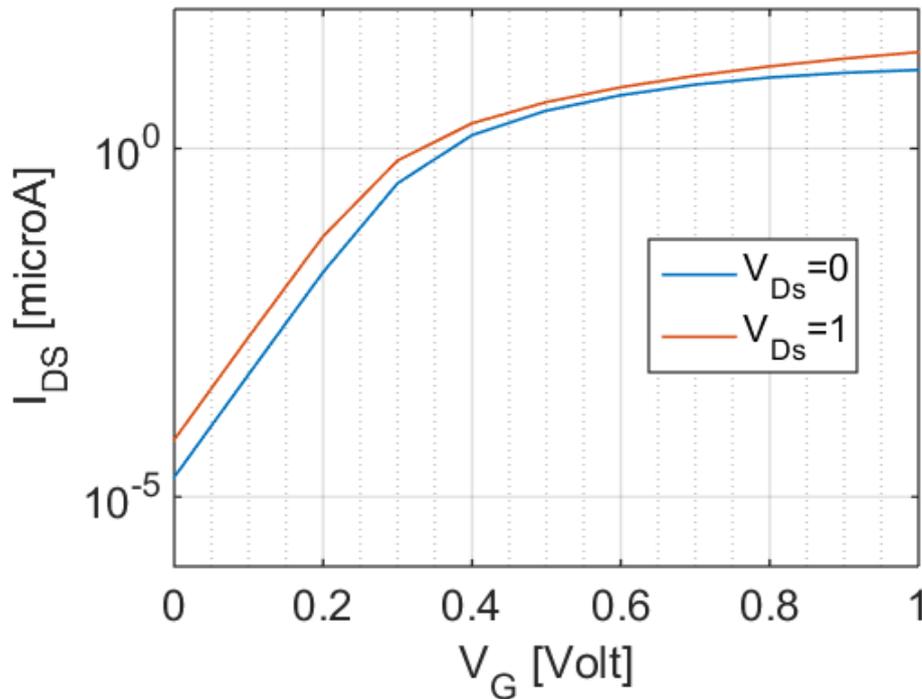


Figure IV. 7 : La caractéristique I_{DS} - V_{GS} à 0 et 1 V pour calculer le courant I_{ON} et I_{OFF} .

Les résultats de simulations que nous avons obtenu à température ambiante et représenté par les caractéristiques de sortie et de transfert, Le courant I_{ON}, I_{OFF} , la pente sous seuil SS, le DIBL, la transconductance g_m et la conductance g_D sont résumés sur tableau 1.

	V_{th}	I_{ON} (μA)	I_{OFF} (μA)	I_{ON}/I_{OFF}	DIBL	SS (mV/dec)	g_D	g_m
T=300°K	0.3V	24.2	1.9110^{-5}	12.6710^5	40.17	67.45	1.9	46.78

Tableau IV. 1: récapitulatif des paramètres DC du transistor CNTFET

IV. 3.2 Effet des paramètres physiques sur les performances du dispositif

Les performances du CNTFET dépendent directement de ses paramètres physiques, par conséquent la mise à l'échelle de ces paramètres affecte grandement son fonctionnement. Il existe divers paramètres physiques importants parmi eux le diamètre du nanotube de carbone et l'épaisseur de l'oxyde sont les paramètres principaux. Dans cette partie, nous étudierons l'effet de ces paramètres sur les performances du dispositif.

IV. 3.2 .1 Effet du diamètre du nanotube de carbone

Pour cette simulation, la structure CNTFET de la figure IV.3 est utilisée. Pour toutes les simulations l'épaisseur d'oxyde de grille est maintenue à 10 nm et le diamètre du NTC varie de 1 nm à 2.5 nm. La plage de tension prise pour la polarisation de grille et de drain est de 0 V-1 V. Les caractéristiques I(V) du transistor CNTFET pour un diamètre de nanotube de carbone d=1 nm sont présentées ci-dessous :

IV. 3.2 .1.1 Effet du diamètre du nanotube de carbone d=1nm

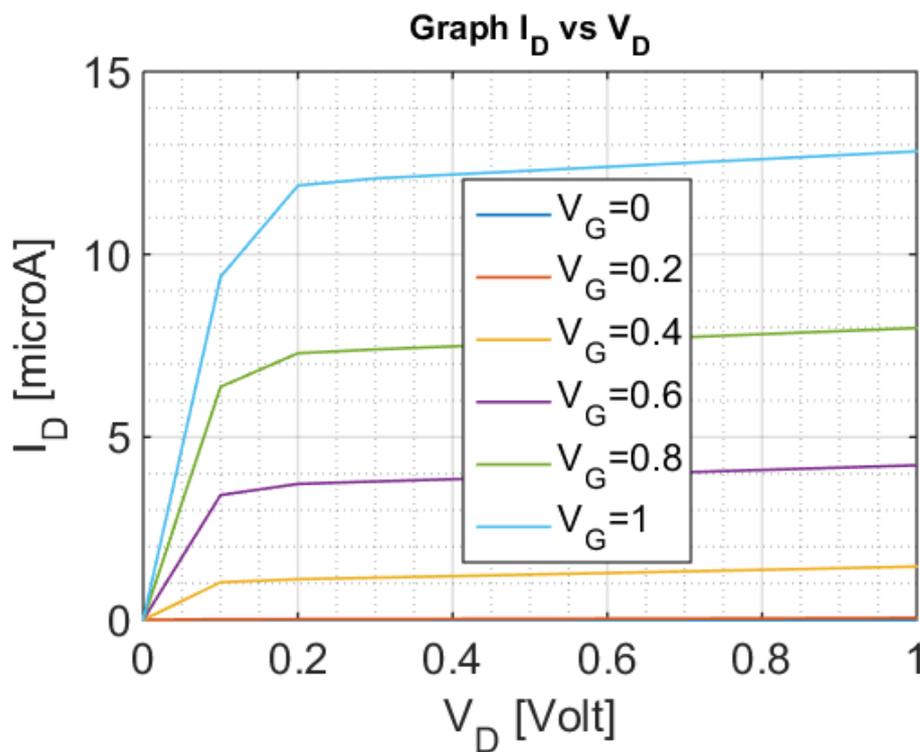


Figure IV. 8 : La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour un diamètre de NTC de 1 nm.

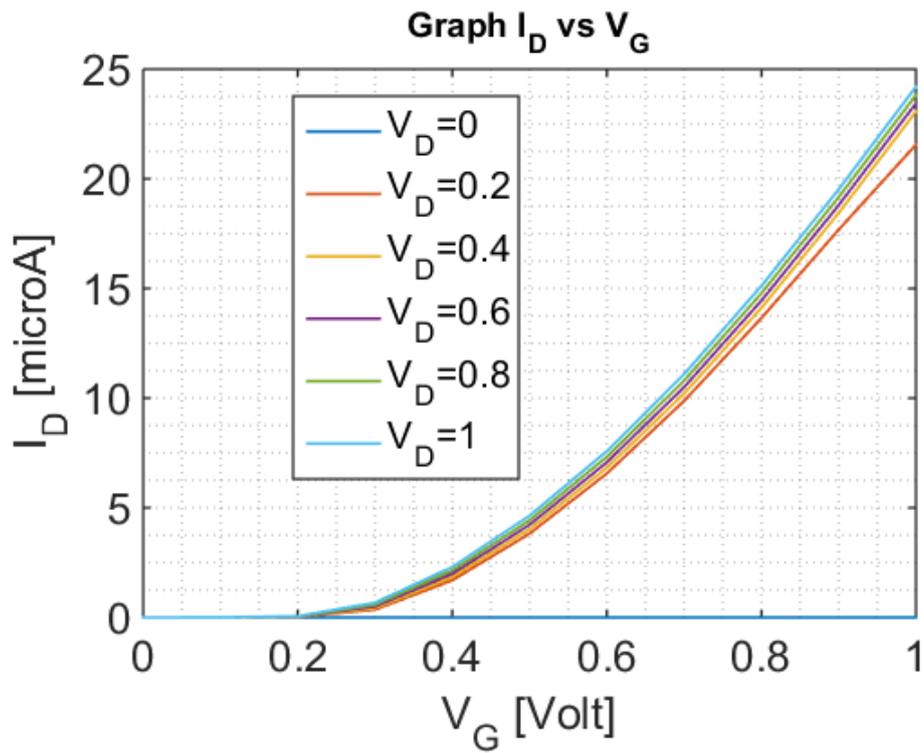


Figure IV. 9 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 1 nm.

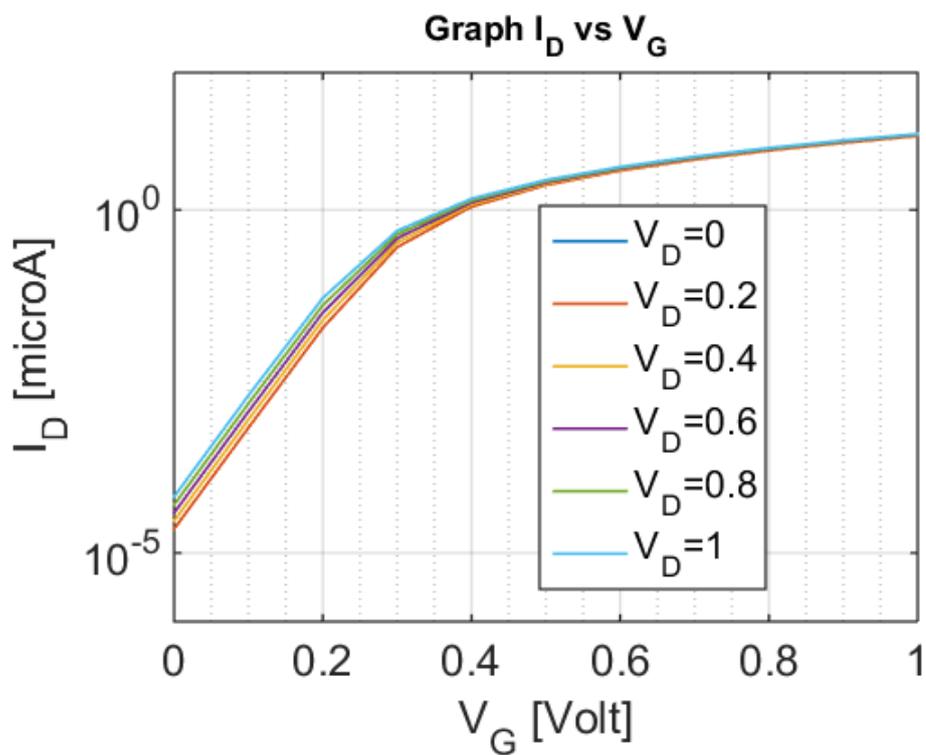


Figure IV. 10 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour un diamètre de NTC de 1 nm.

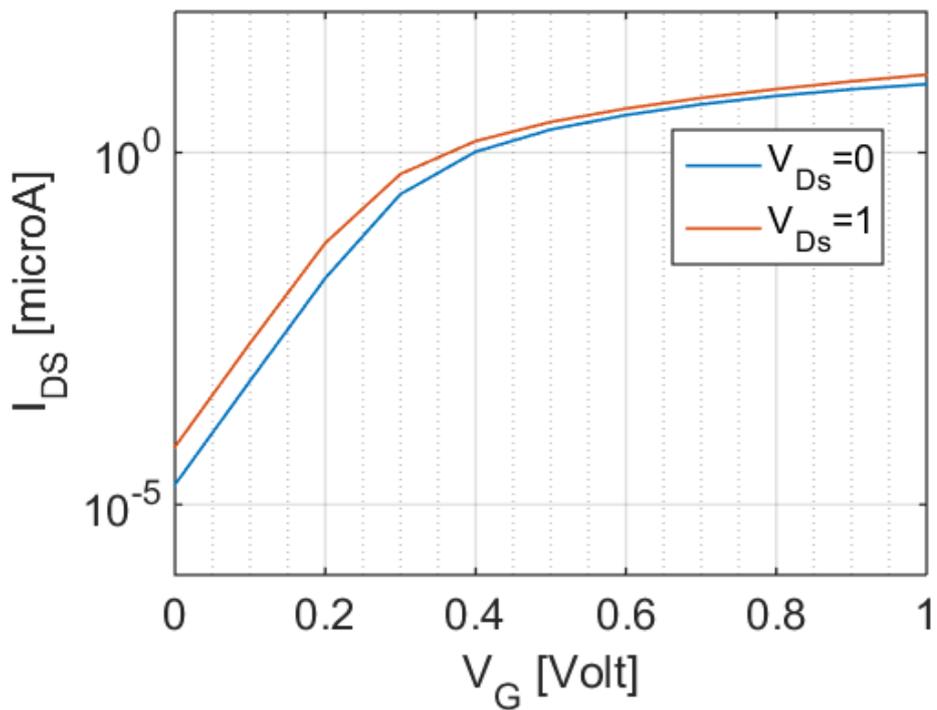


Figure IV. 11 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 1 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off} .

IV. 3.2 .1.2 Effet du diamètre du nanotube de carbone $d=1.5$ nm

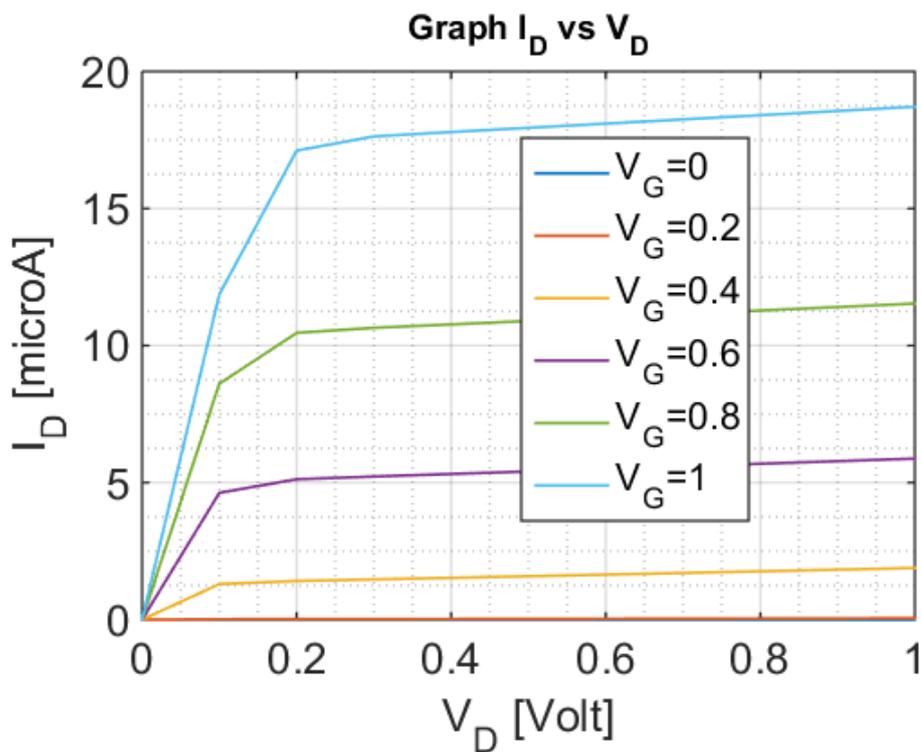


Figure IV. 12 : La caractéristique I_{ds} - V_{ds} pour un diamètre de NTC de 1.5 nm.

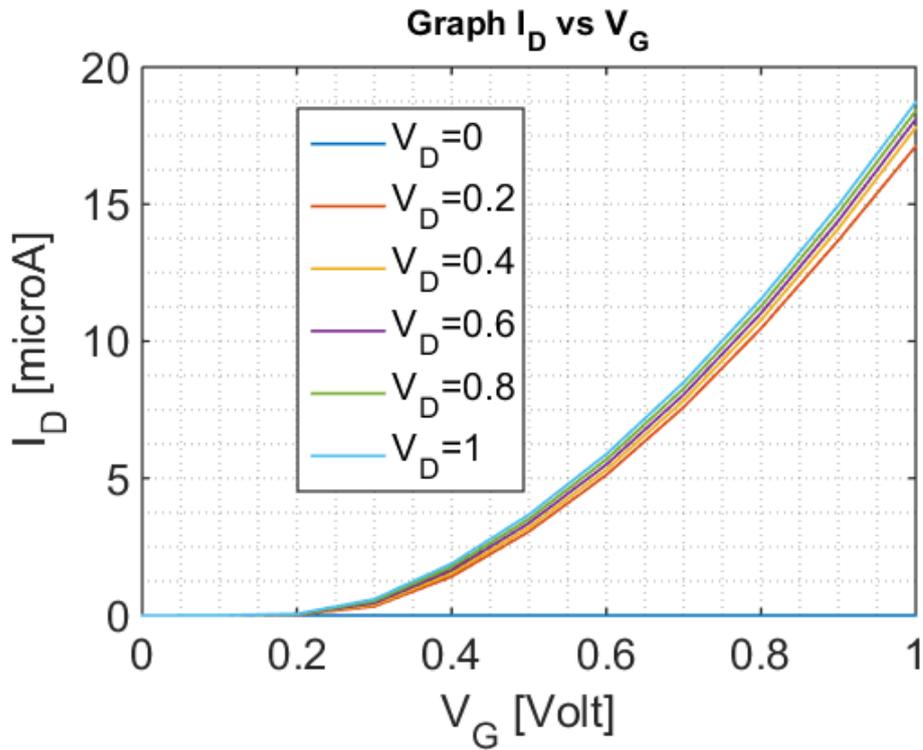


Figure IV. 13 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 1.5 nm.

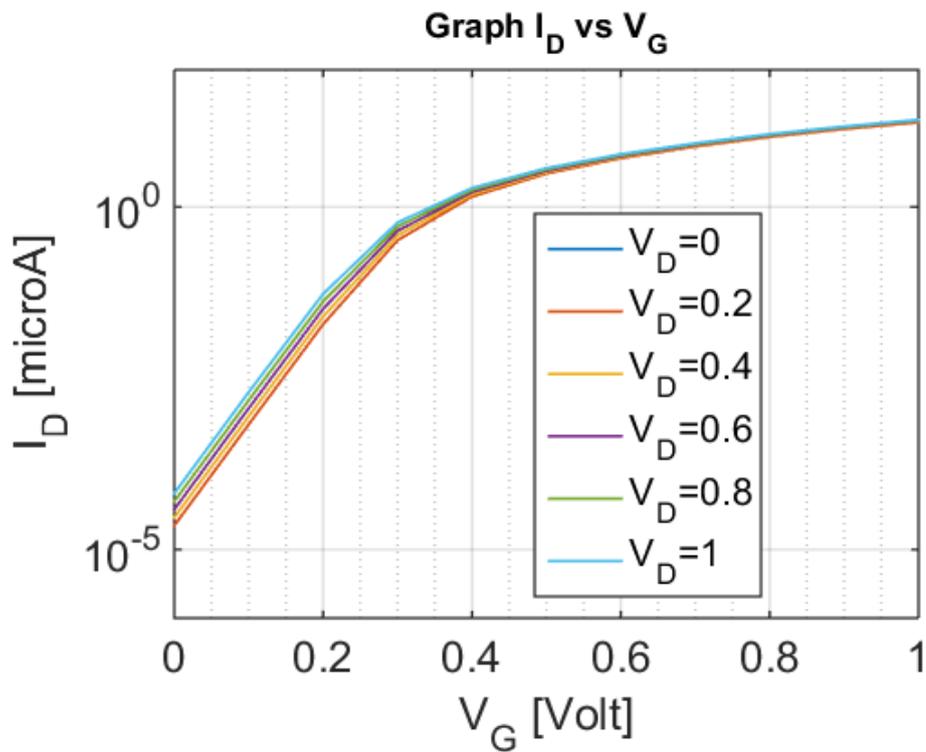


Figure IV. 14 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour un diamètre de NTC de 1.5 nm.

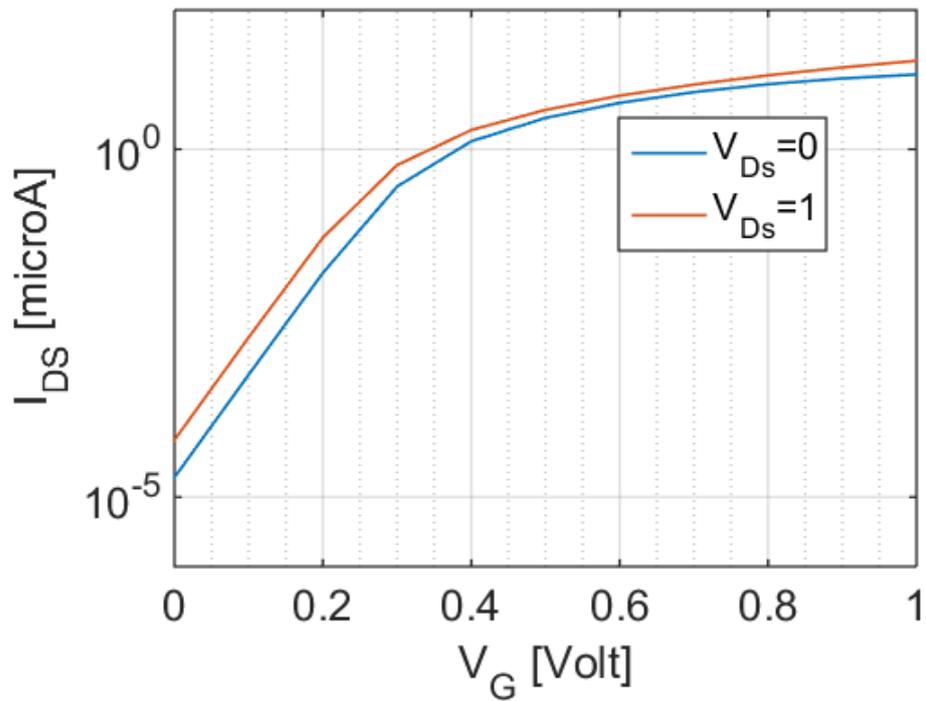


Figure IV. 15 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 1.5 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off} .

IV. 3.2 .1.2 Effet du diamètre du nanotube de carbone $d=2$ nm

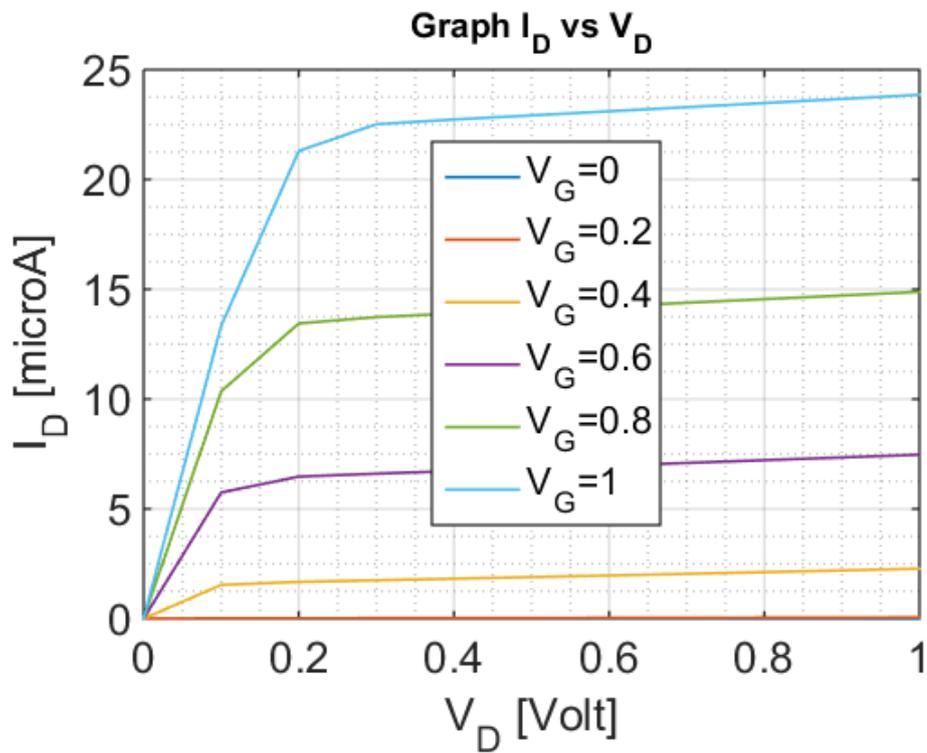


Figure IV. 16 : La caractéristique I_{ds} - V_{ds} pour un diamètre de NTC de 2 nm.

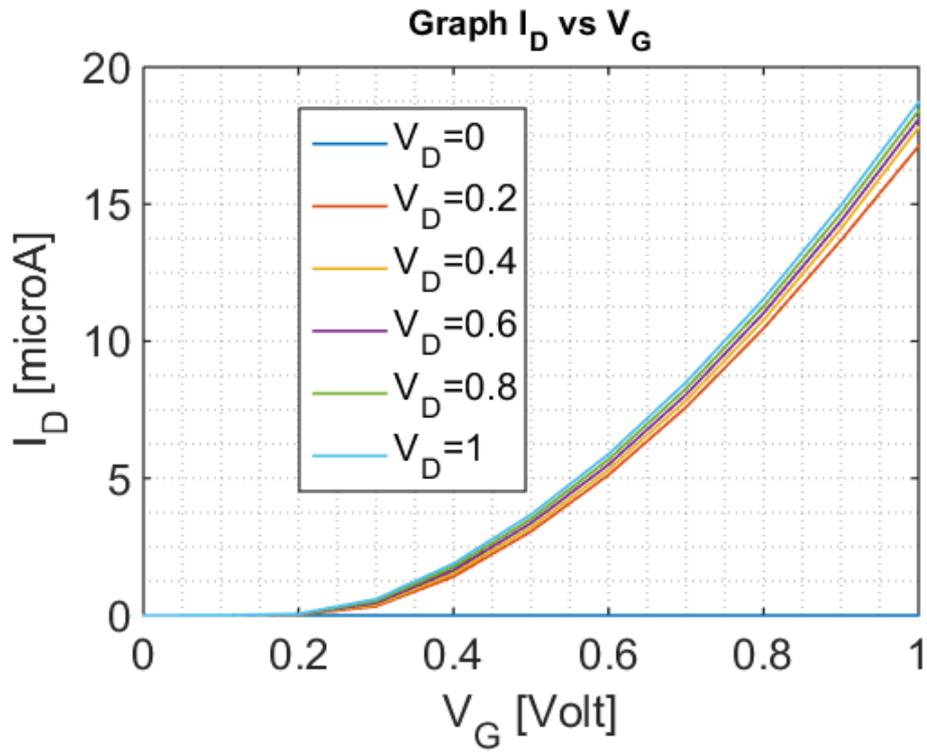


Figure IV. 17 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 2 nm.

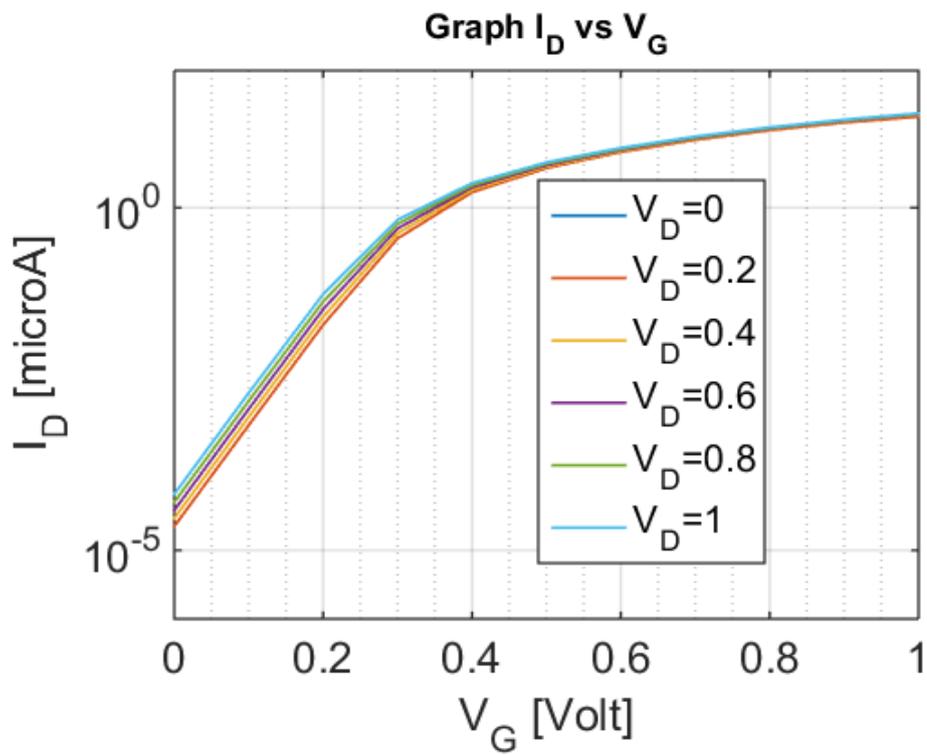


Figure IV. 18 : La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour un diamètre de NTC de 2 nm.

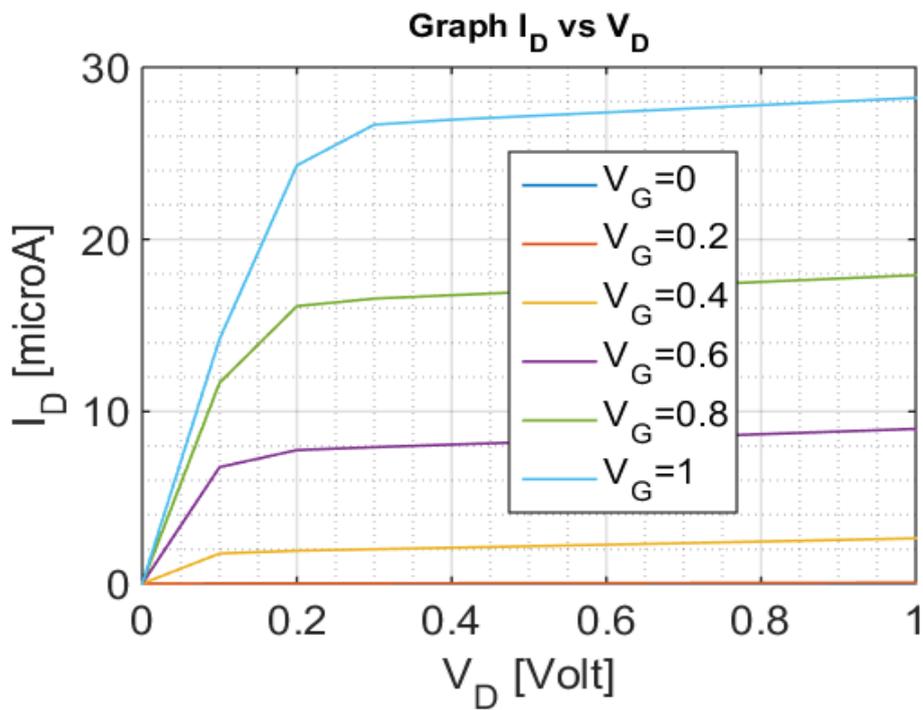


Figure IV. 19 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 2 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}

IV. 3.2 .1.3. Effet du diamètre du nanotube de carbone $d=2.5$ nm

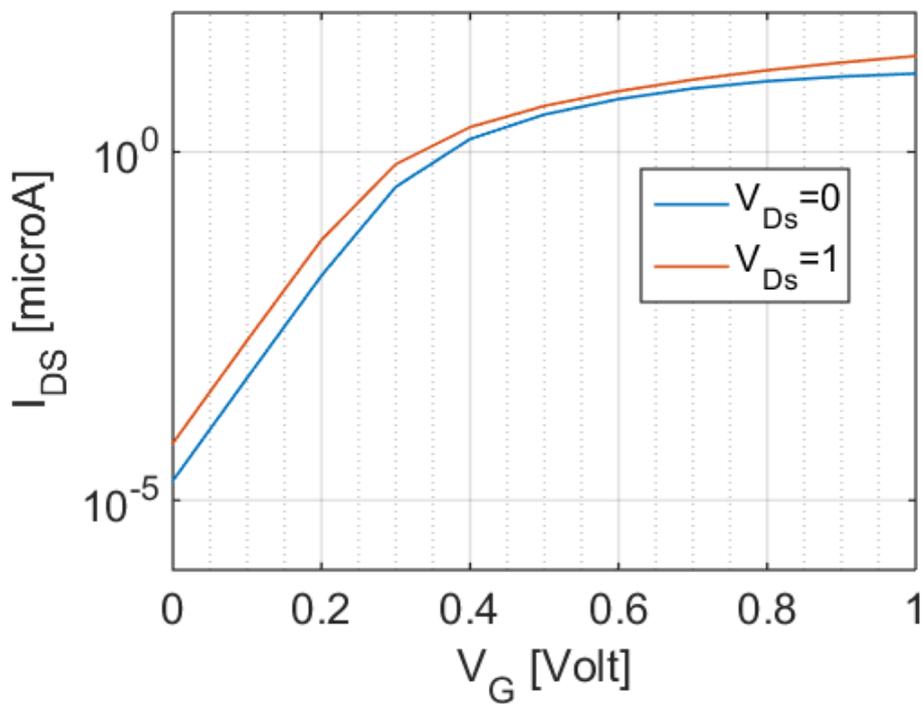


Figure IV. 20: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 2.5 nm

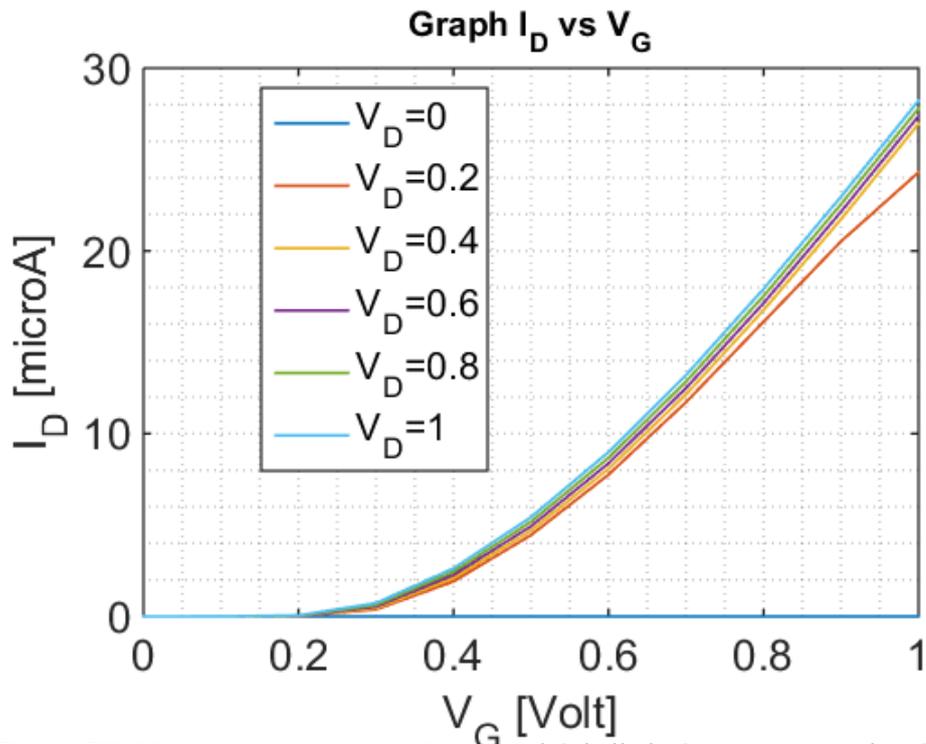


Figure IV. 21: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour un diamètre de NTC de 2.5 nm.

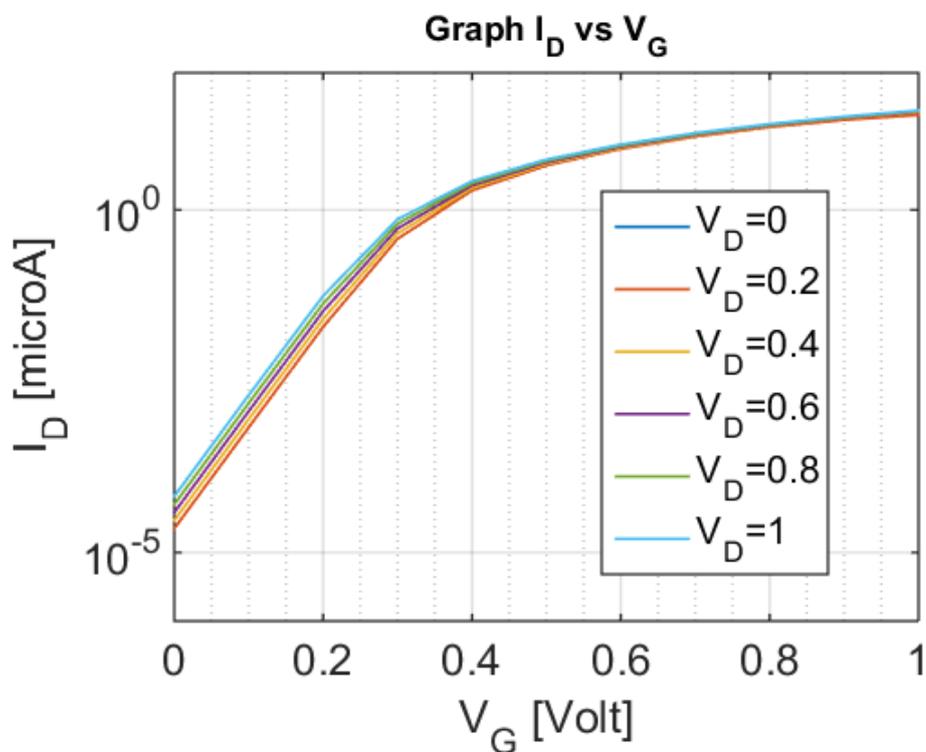


Figure IV. 22. Caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique diamètre de NTC de 2.5 nm

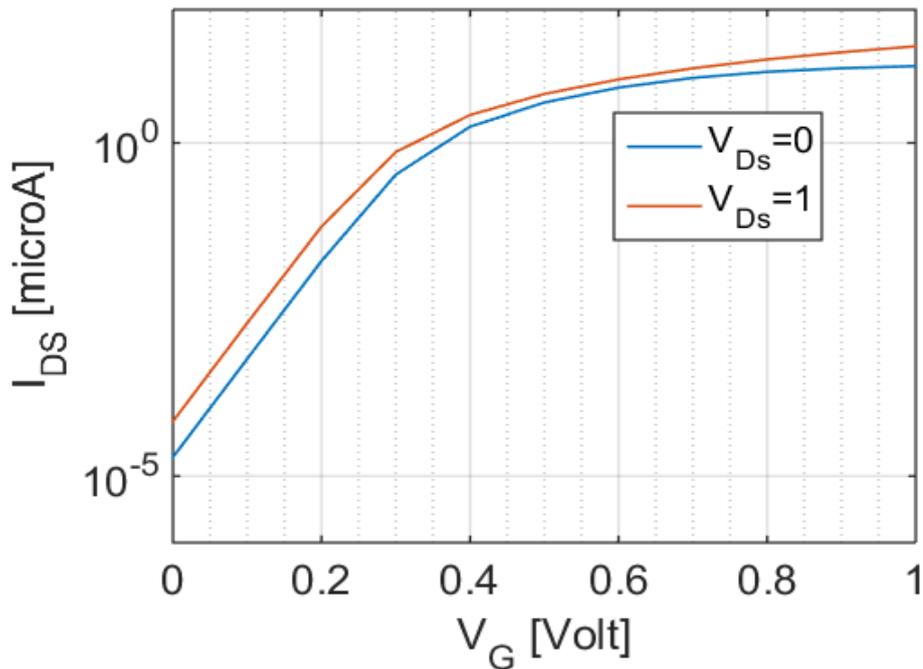


Figure IV. 23. La caractéristique I_{DS} - V_G à 0 et 1 V pour un diamètre de NTC de 2.5 nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}

La figure IV.24 montre le réseau de caractéristiques de sortie I_D - V_D pour différentes valeurs de différents diamètres du CNT. La tension d'alimentation de la grille est de 1 Volt.

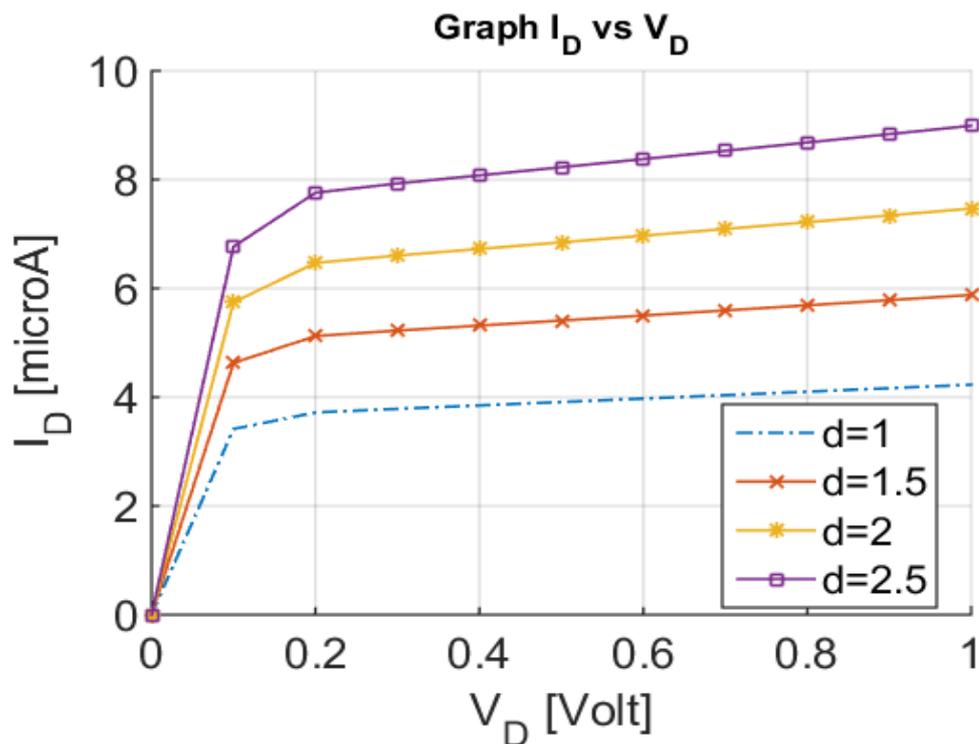


Figure IV. 24. La caractéristique I_{DS} - V_{DS} pour différents diamètres de NTC

Diamètres du NTC (nm)	I_{ON} (μA)	I_{OFF} (μA)	I_{ON}/I_{OFF}	V_{th} (V)	E_g (eV)
<i>d=1</i>	<i>12.81</i>	<i>1.92x10⁻⁵</i>	<i>6,67 x10⁵</i>	<i>0.68</i>	<i>0.85</i>
<i>d=1.5</i>	<i>18</i>	<i>1.9x10⁻⁵</i>	<i>9,47 x10⁵</i>	<i>0.45</i>	<i>0.56</i>
<i>d=2</i>	<i>23.8</i>	<i>1.9x10⁻⁵</i>	<i>12,52 x10⁵</i>	<i>0.34</i>	<i>0.42</i>
<i>d=2.5</i>	<i>28.2</i>	<i>1.9x10⁻⁵</i>	<i>14,84 x10⁵</i>	<i>0.27</i>	<i>0.34</i>

Tableau IV. 2: Tableau récapitulatif des différents diamètres de nanotube de carbone et les paramètres DC.

D'après nos résultats de simulation et nos résultats regroupés sur le tableau III.2. Les figures $I_d(V_{ds})$ on remarque qu'avec l'augmentation du diamètre du nanotube de carbone, le courant de sortie I_{DS} du transistor augmente et cela est dû aux passages d'électrons, car le gap dépend directement du diamètre du NTC.

Le courant de sortie dépend aussi du diamètre du CNT servant de canal au transistor.

On remarque ainsi que I_{ON} augmente quand le diamètre du CNT augmente, par contre le courant I_{OFF} ne semble pas être particulièrement affecté par la variation du diamètre du CNT, on peut donc voir que quand le diamètre augmente I_{ON} augmente, I_{OFF} reste constant par conséquent le rapport I_{ON}/I_{OFF} qui est un paramètre de qualité du transistor augmente.

On sait qu'un transistor très performant devrait avoir un courant à l'état bloqué raisonnablement faible et un courant à l'état passant élevé, donc automatiquement son rapport I_{on} / I_{off} devient assez grand ceci est bien le cas du dispositif étudié. Par conséquent, la grille contrôle mieux le canal lorsqu'on a un nanotube de carbone avec un diamètre petit. Nos résultats de simulation nous permettent de remarquer que le courant le plus élevé est obtenu avec le plus grand diamètre du nanotube ceci pouvant être dû à l'effet du confinement quantique. Au fur et à mesure que le diamètre du CNT diminue il se produira un confinement mécanique quantique des états et c'est pour cela que le courant à l'état passant diminue.

Dans le tableau on peut remarquer que le diamètre du CNT affectera la bande interdite c'est parce que le courant de drain du CNTFET dépend de la charge totale ayant rempli la première sous-bande on constate aussi que la tension de seuil diminue lorsqu'on augmente le diamètre du nanotube de carbone.

IV. 3.2 .2 L'Effet de l'épaisseur de l'oxyde sur la caractéristique électrique du CNTFET

Dans cette partie, nous mettons en évidence l'effet de l'épaisseur de l'oxyde de grille sur les performances DC du CNTFET, le diamètre du nanotube sera fixé à 2 nm et l'épaisseur de l'oxyde t_{ox} variera de 1 à 10 nm.

Les caractéristiques $I(V)$ du transistor CNTFET pour une épaisseur d'oxyde de grille $t_{ox}=1 \text{ nm}$ sont présentées ci-dessous :

IV. 3.2 .2 .1. Caractéristiques du courant du CNTFET pour $t_{ox} = 1 \text{ nm}$

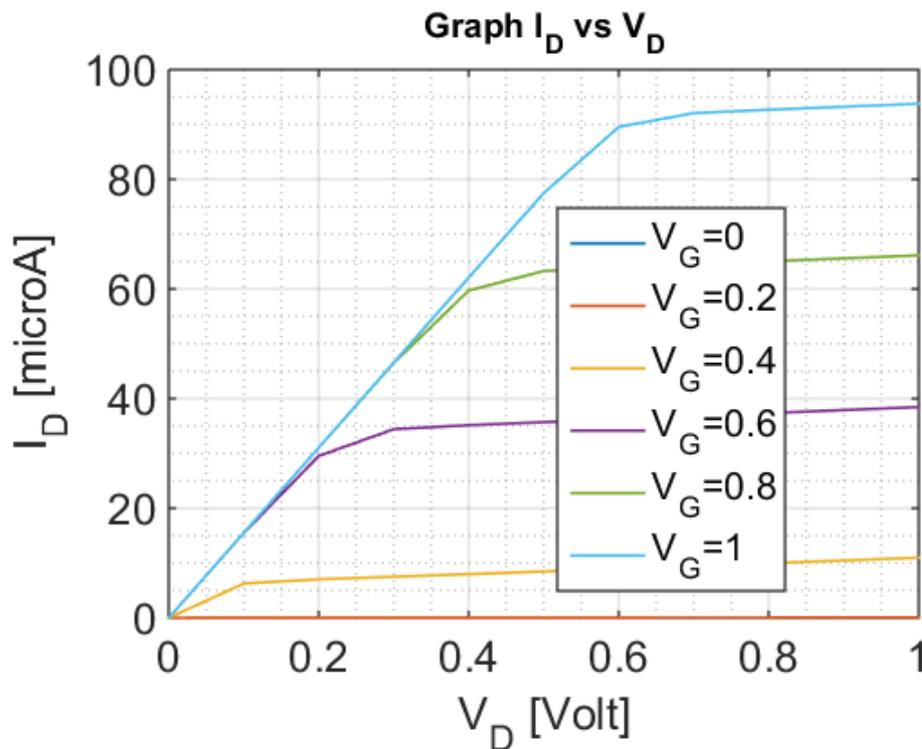


Figure IV. 25: La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour une épaisseur d'oxyde de 1 nm

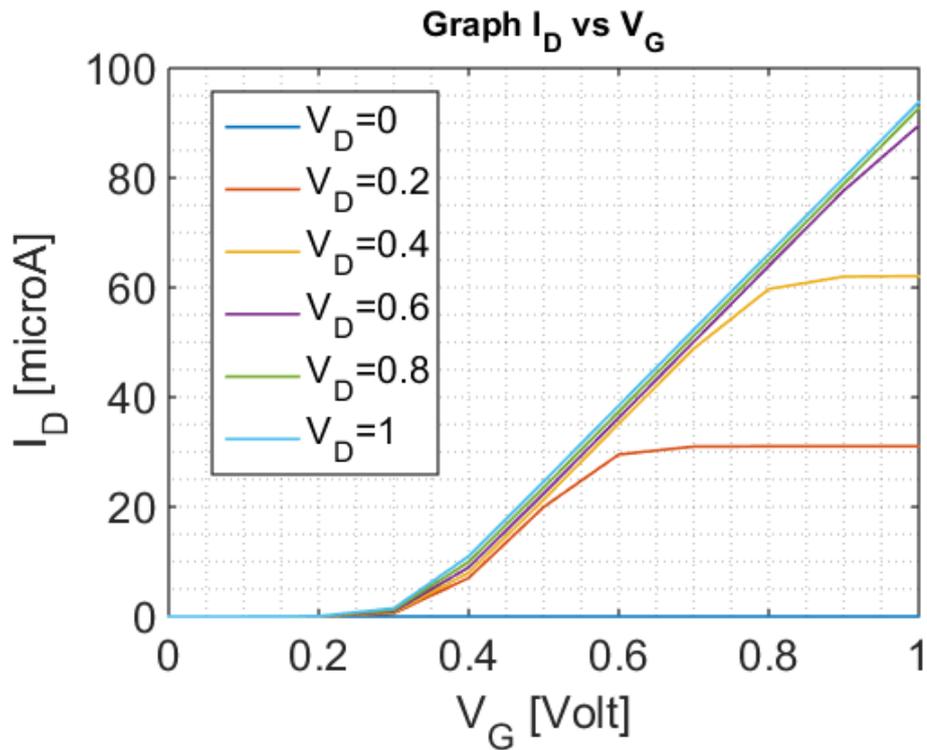


Figure IV. 26: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 1nm.

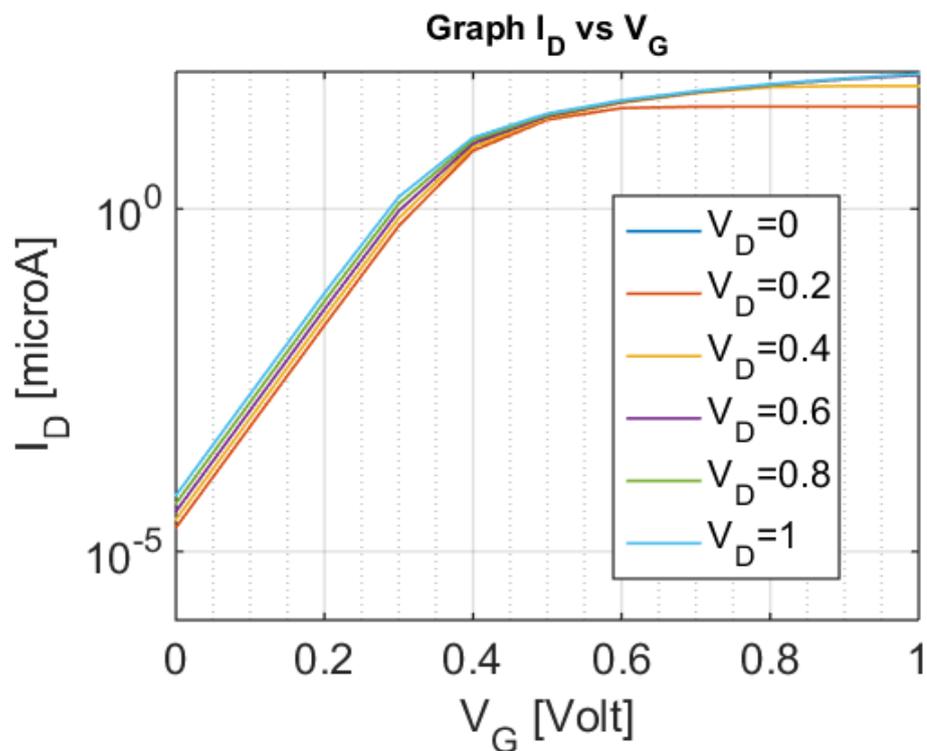


Figure IV. 27: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 1 nm

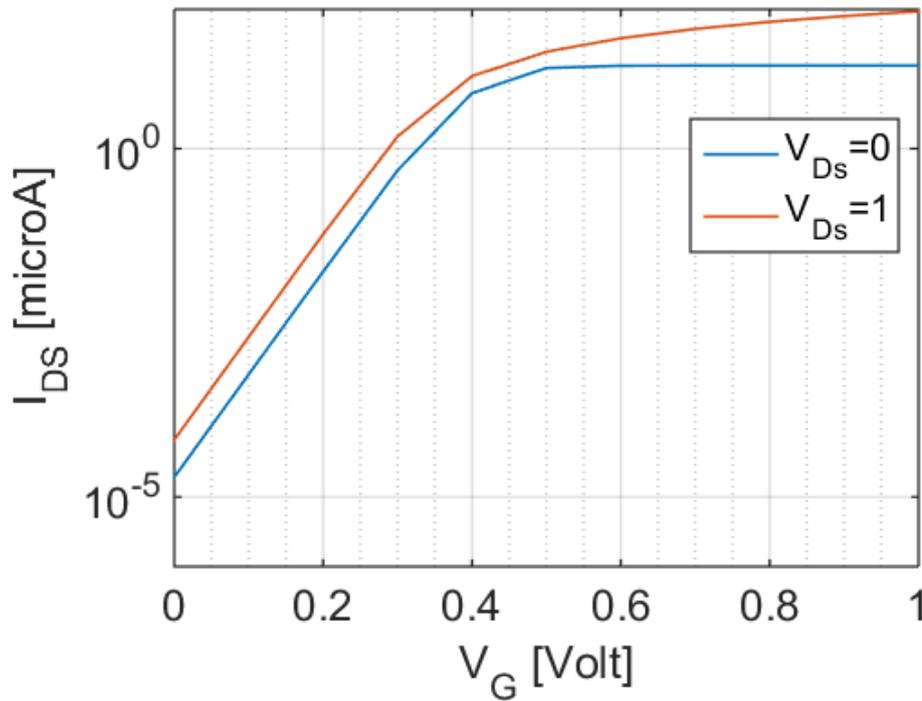


Figure IV. 28: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 1nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}

IV. 3.2 .2.2. Caractéristiques du courant du CNTFET pour $t_{ox} = 2$ nm

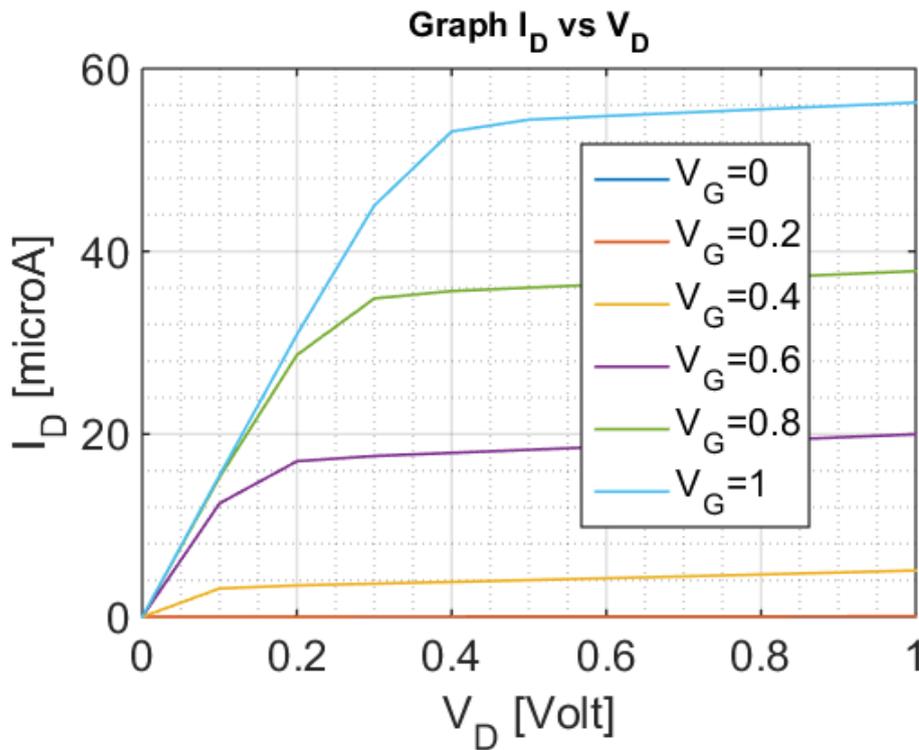


Figure IV. 29: La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour une épaisseur d'oxyde de 2 nm

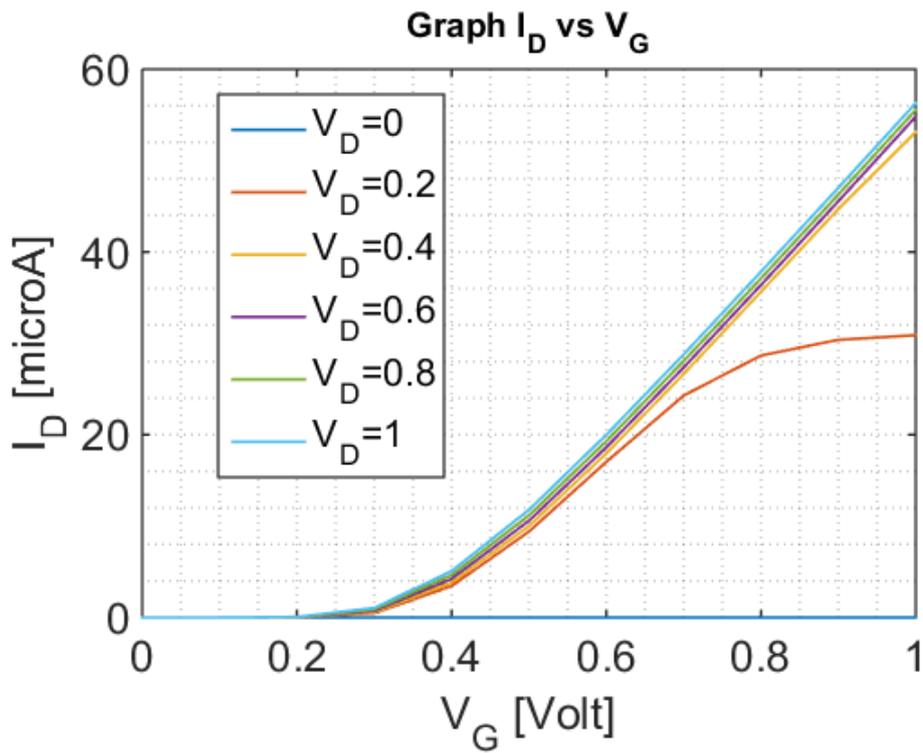


Figure IV. 30: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 2nm

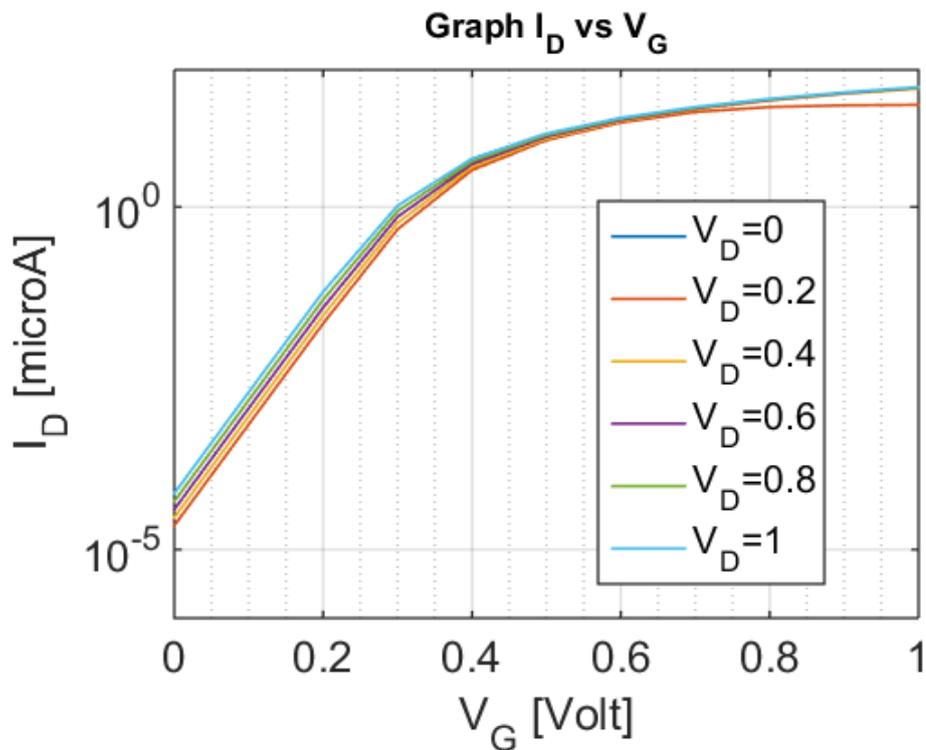


Figure IV. 31: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 2nm

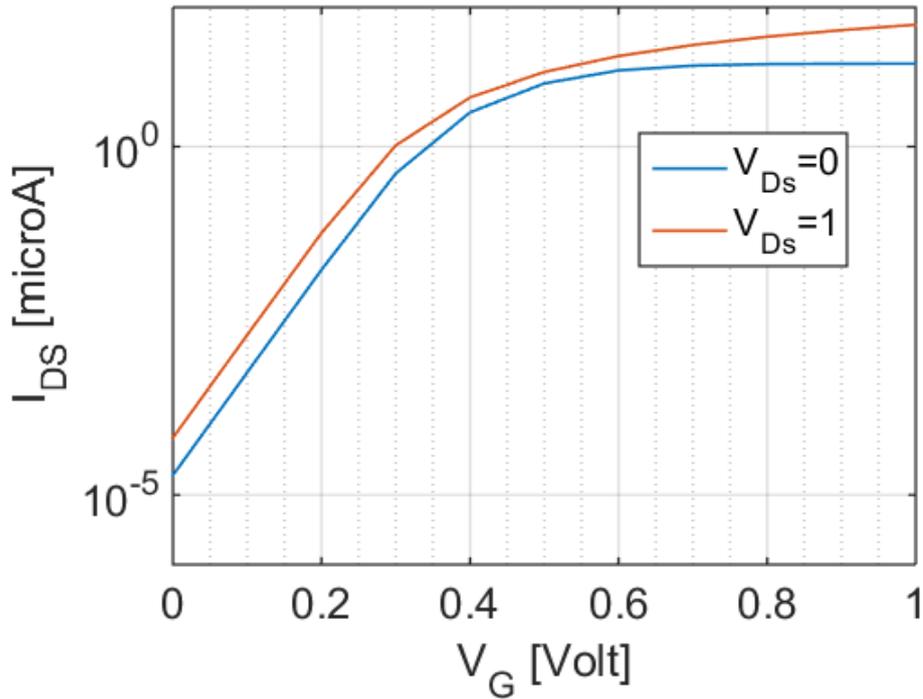


Figure IV. 32: La caractéristique $I_{ds}-V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 2nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}

IV. 3.2 .2.2. Caractéristiques du courant du CNTFET pour $t_{ox}=3\text{ nm}$

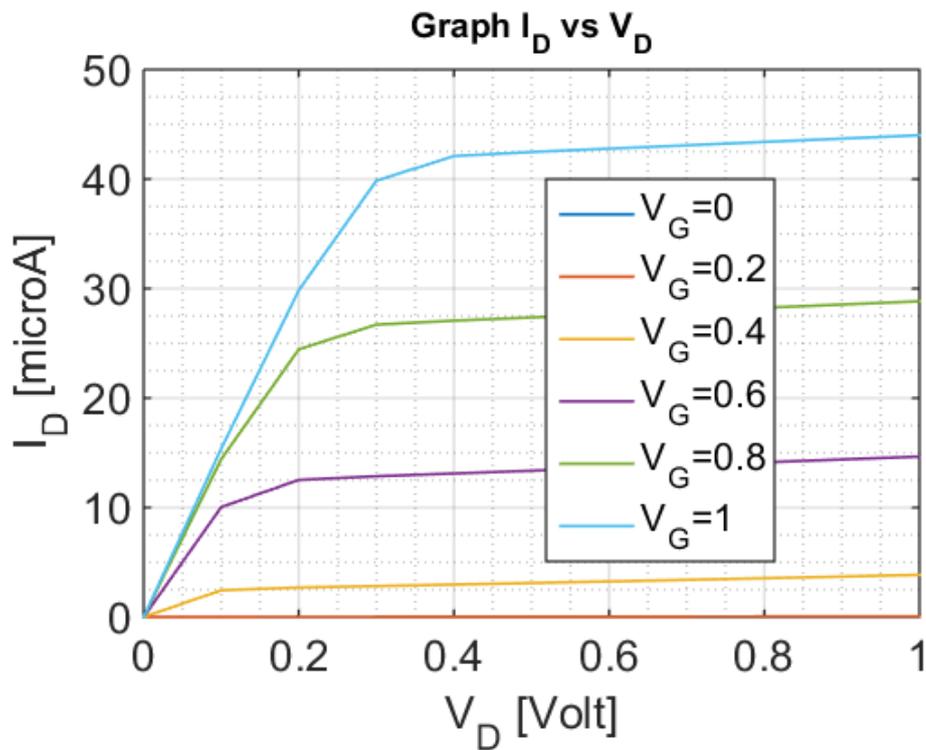


Figure IV. 33: La caractéristique $I_{ds}-V_{ds}$ pour une épaisseur d'oxyde de 3 nm

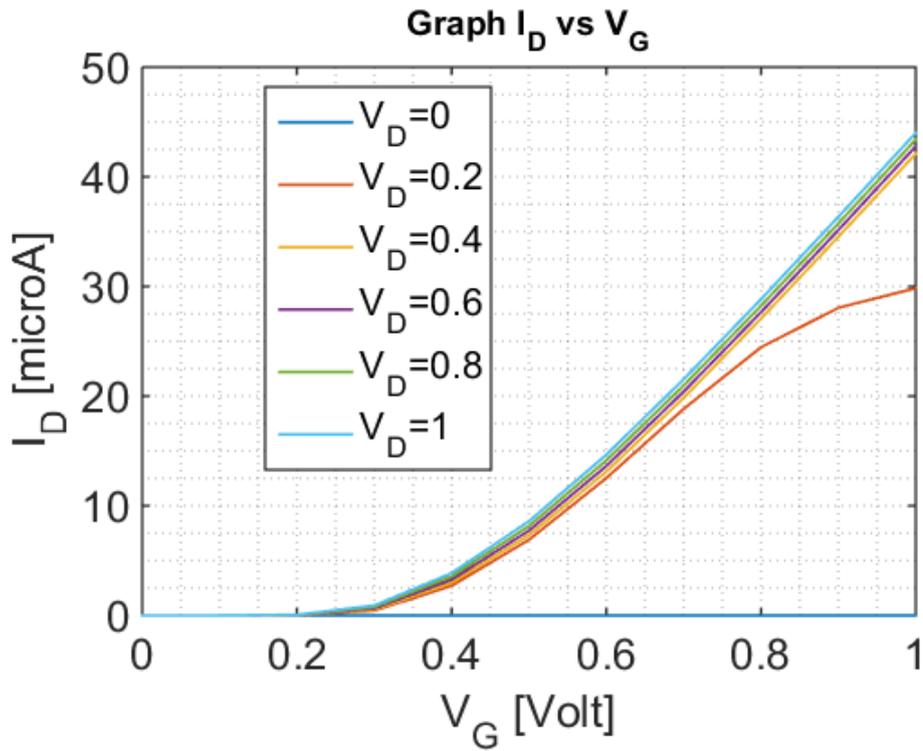


Figure IV. 34: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 3 nm

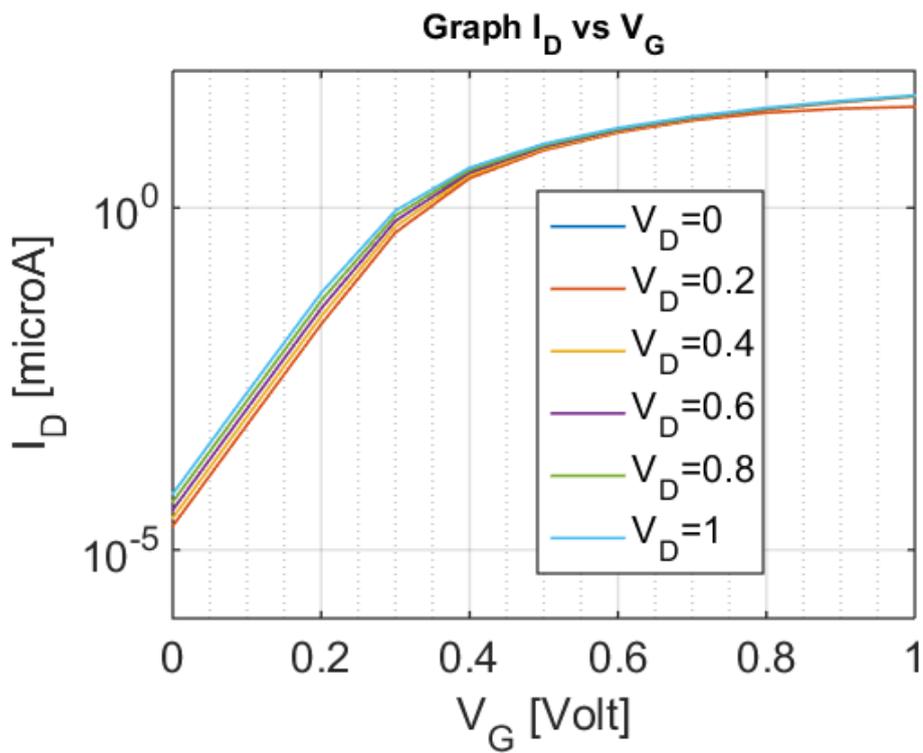


Figure IV. 35: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 3nm

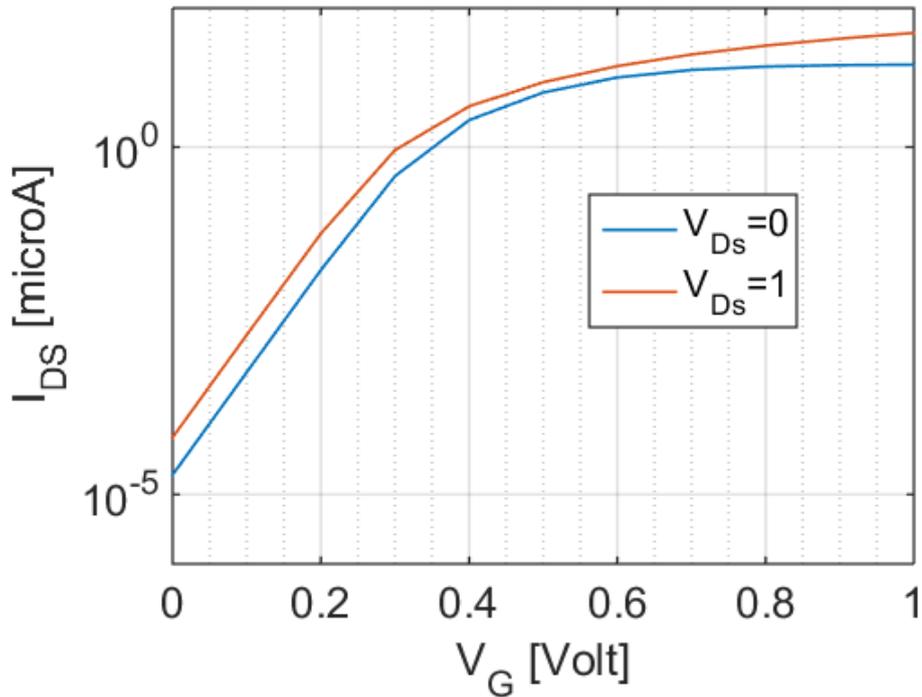


Figure IV. 36: La caractéristique I_{DS} - V_G à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 2nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}

IV. 3.2 .2 .2. Caractéristiques du courant du CNTFET pour $t_{ox} = 5$ nm

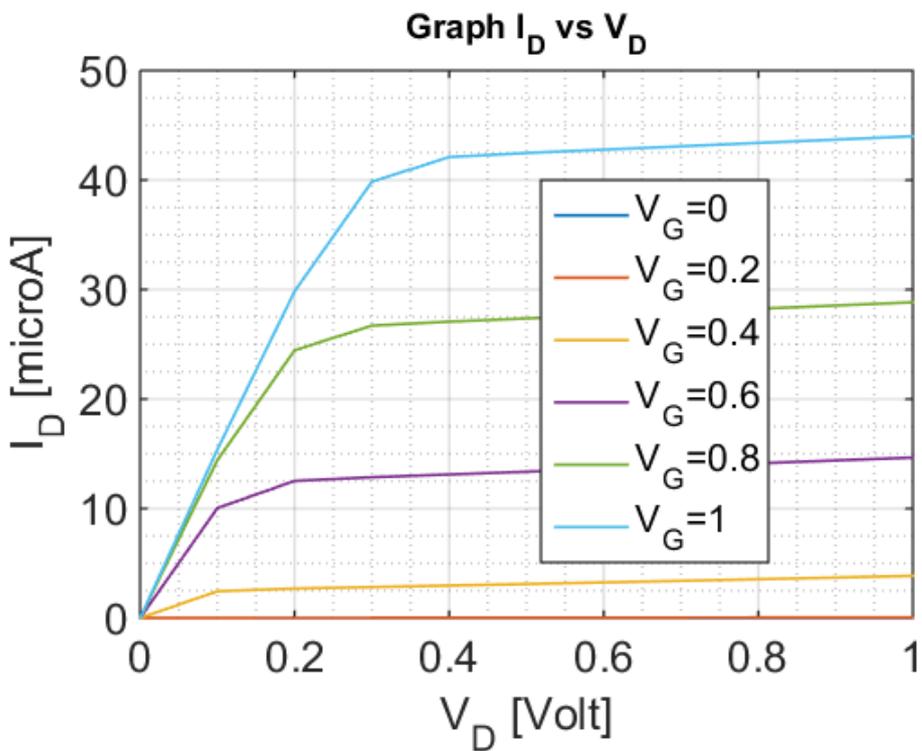


Figure IV. 37: La caractéristique I_{DS} - V_{DS} pour une épaisseur d'oxyde de 5 nm

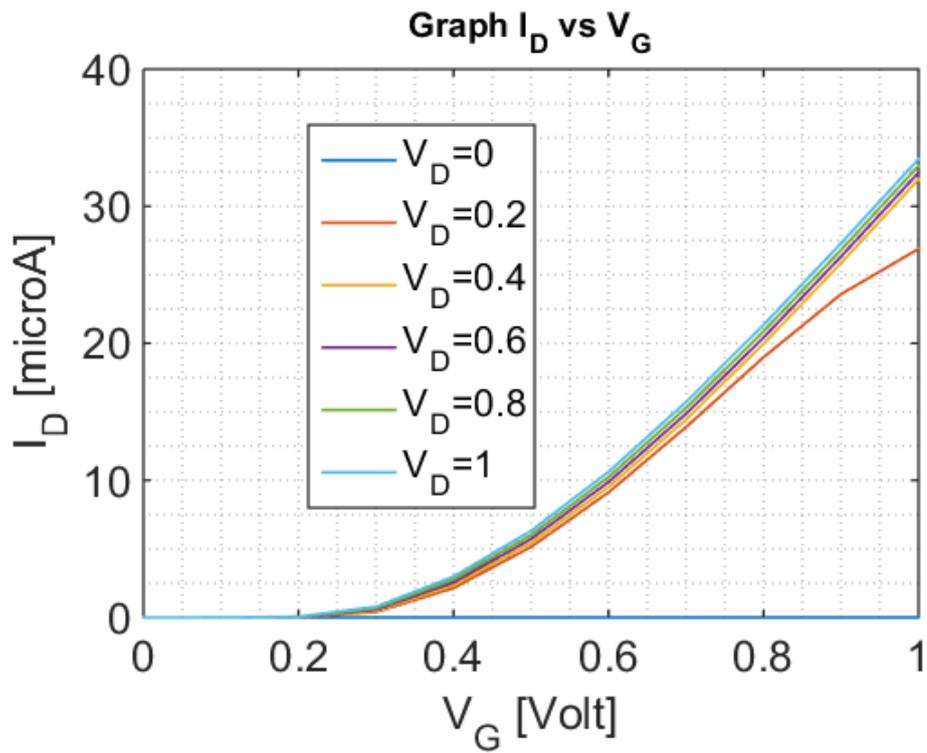


Figure IV. 38: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour une épaisseur d'oxyde de 5 nm

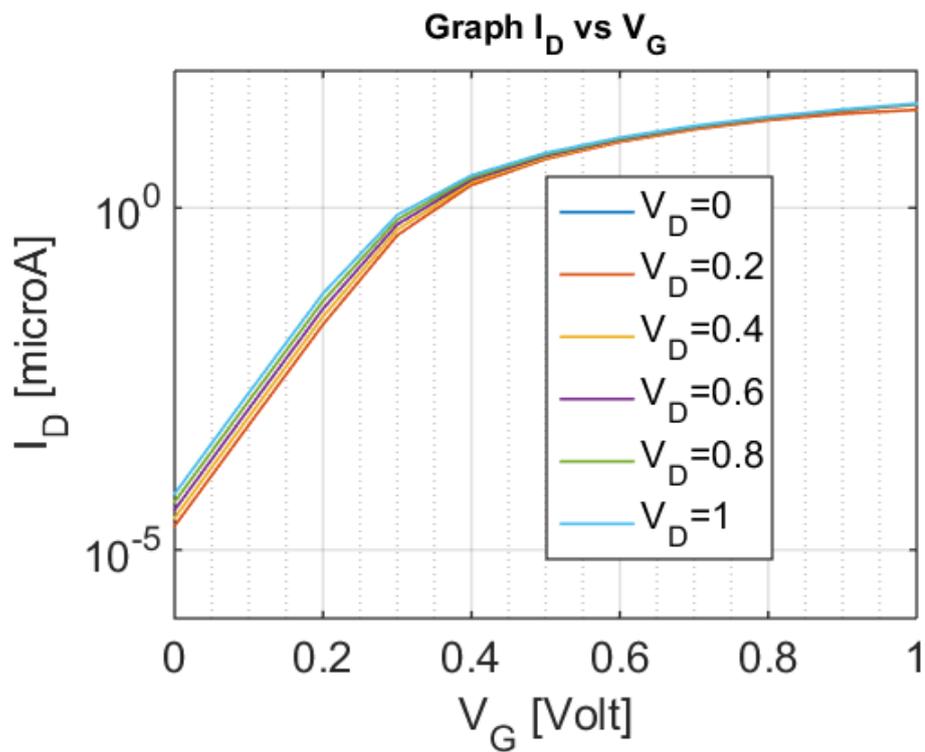


Figure IV. 39: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle logarithmique pour une épaisseur d'oxyde de 5nm

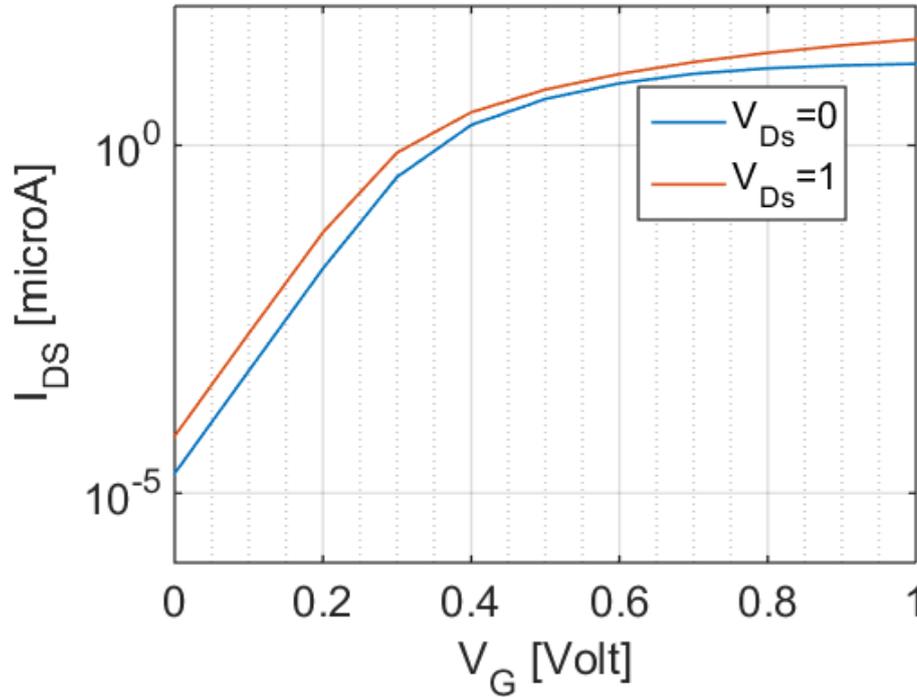


Figure IV. 40: La caractéristique I_{DS} - V_G à 0 et 1 V pour une épaisseur d'oxyde de 5nm pour calculer le courant I_{on} et I_{off}

Pour la caractéristiques $I(V)$ du transistor CNTFET pour une épaisseur d'oxyde de grille $t=10$ nm sont présentées ci-dessus dans la première parti de l'étude DC vu que notre transistor son épaisseur d'oxyde est prédéfini à 10 nm.

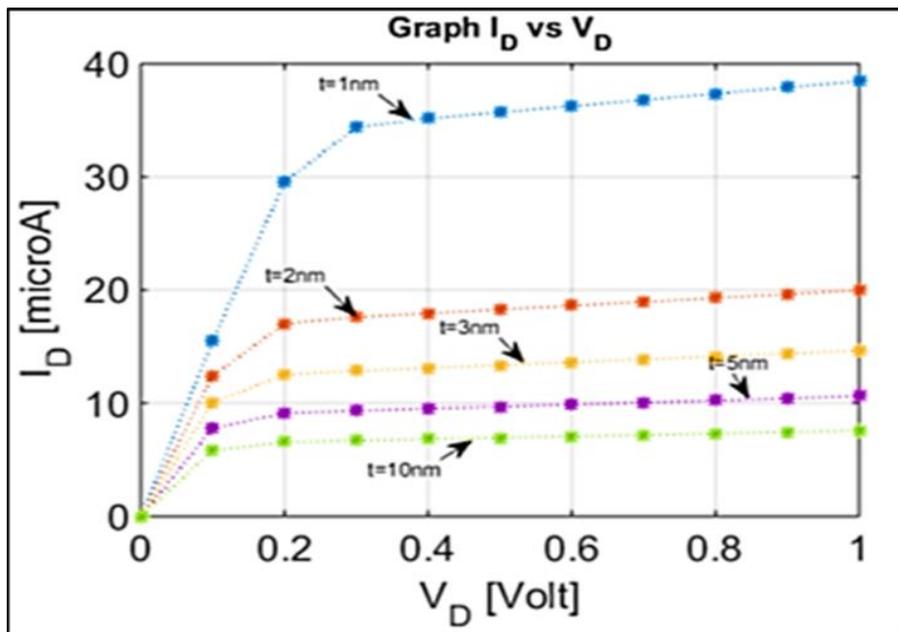


Figure IV. 41: Caractéristiques I_{DS} - V_{DS} pour différentes épaisseurs de l'oxyde de grille. [4]

La figures IV.26, IV.30, IV.34, IV.38 montrent le courant de drain pour différentes épaisseurs de l'oxydes de grille à l'échelle linéaire. Nous constatons que lorsque l'épaisseur de l'oxyde de grille diminue, la conductance et par conséquent le courant I_{DS} augmente, le courant de fuite ne semble pas être affecté par cette modification. Pour une épaisseur importante de l'isolant, la hauteur de la barrière de potentiel devient plus importantes .Les figures IV. 26, IV.30, IV.34, IV. 38 montrent respectivement le courant de drain pour différents isolants à l'échelle logarithmique, nous observons l'influence de la variation des différents épaisseurs d'oxydes sur le courant I_{off} , I_{ds} (I_{off}) étant changés, nous concluons que lorsque l'épaisseur de l'oxyde est réduite le rapport I_{on} / I_{off} augmente.

Epaisseur de l'oxyde (nm)	$I_{on}(\mu A)$	$I_{off}(\mu A)$	I_{on}/I_{off}
$t_{ox}=1$	93.7	1.9×10^{-5}	$49,31 \times 10^5$
$t_{ox}=2$	56.2	1.9×10^{-5}	$29,57 \times 10^5$
$t_{ox}=3$	43.9	1.9×10^{-5}	23.10×10^5
$t_{ox}=5$	33	1.9×10^{-5}	17.36×10^5
$t_{ox}=10$	24.1	1.9×10^{-5}	12.68×10^5

Tableau IV. 3: valeurs des courants I_{on} et I_{off} pour différentes épaisseurs d'oxydes

Ces résultats de simulation regroupés dans le tableau IV.3 permettent de remarquer que le courant I_{on} est inversement proportionnel à l'épaisseur de l'oxyde et que le courant de fuite n'est pas affecté par la valeur de t_{ox} , la valeur du courant I_{off} s'avère être la même pour toutes les valeurs d'épaisseur d'oxyde prises. La figure IV. 39 nous montre l'augmentation de la valeur du courant I_{on} avec l'épaisseur d'oxyde. Cela est dû à l'effet de confinement quantique pour les plus petites épaisseurs d'oxydes, le rapport I_{on} / I_{off} augmente lorsque la

valeur de l'oxyde de grille diminue. Afin de valider nos résultats de simulation nous présentons différents résultats de simulation que nous avons retrouvée en bibliographie et qui mettent en évidence l'effet de la variation de l'épaisseur de l'oxyde sur les caractéristiques électrique en mode DC du CNTFET.

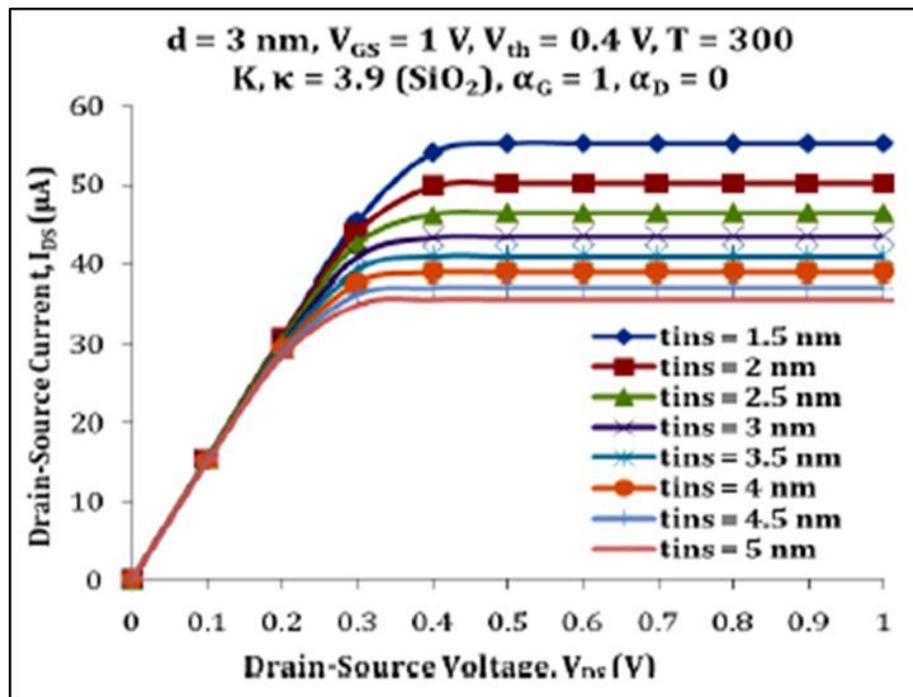


Figure IV. 42: Caractéristiques Ids –Vds pour différentes épaisseurs d’oxydes, simulation réalisés par Devi Dass, Rakesh Prasher, Rakesh Vaid. [5]

Sur la Figure IV.42. Nous présentons donc les résultats de simulation obtenus par le Devi Dass, Rakesh Prasher, Rakesh Vaid. [4], Nous pouvons remarquer que nos résultats s'accordent à ceux obtenus par Devi Dass, Rakesh Prasher, Rakesh Vaid.

IV. 3.3.Effet de la chiralité sur la caractéristique électrique du CNTFET

Nous allons dans ce qui suit présenter les résultats de simulation que nous avons obtenus et expliquant l'effet de la variation de la chiralité sur les caractéristiques DC de notre dispositif sachant que la chiralité (n, m) des SWNT détermine le diamètre du CNT et le déficit d'énergie de ce dernier. Dans ce travail le SiO₂ est choisit comme isolant de grille (k = 3,9) avec une épaisseur de 10 nm, la température de fonctionnement est de 300 ° K. La propriété

du nanotube de carbone peut être métallique ou semi-conducteur, et cela dépend du vecteur de chiralité des NTC. Le vecteur chiral du CNT est représenté par la paire d'entiers (n, m).

Si le vecteur chiral est $n = m$ ou $n-m = 3i$ (i appartenant à \mathbb{Z}), alors la propriété de CNT sera métallique sinon semi-conducteur et le diamètre du CNT dépend également de la chiralité.

L'angle de chiralité et le diamètre du nanotube sont des paramètres très importants. Nous avons considéré quatre combinaisons de vecteur chiral, les indices de chiralités (n, m) sont donnés dans le tableau suivant :

Chiralité (n,m)	Diamètre (nm)	Energie de la bande interdite (eV)
(5,0)	$3.9e^{-10}$	2.17
(10,0)	$7.8e^{-10}$	1.0
(19,0)	$1.5e^{-09}$	0.5
(26,0)	$2.0e^{-09}$	0.4

Tableau IV. 4: Chiralité, diamètre et énergie de bande interdite.

Nous représentons dans ce qui suit les résultats de la simulation permettant d'observer l'influence de la chiralité sur le courant de drain de notre dispositif.

IV. 3.3.1. Caractéristiques courant-tension pour une chiralité (5,0)

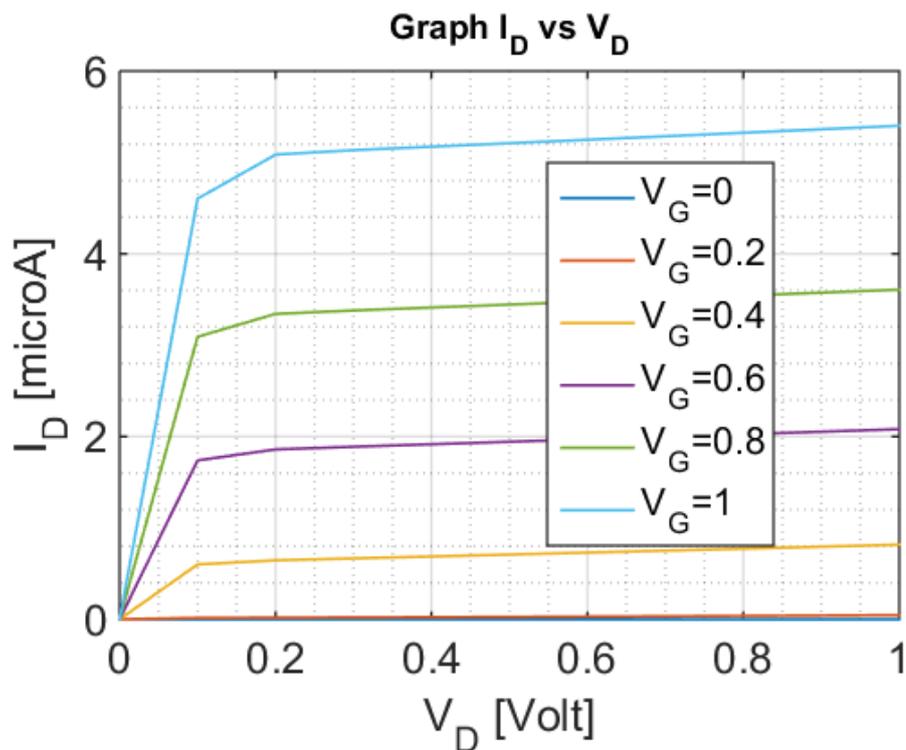


Figure IV. 43: La caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour la chiralité (5-0) à l'échelle linéaire

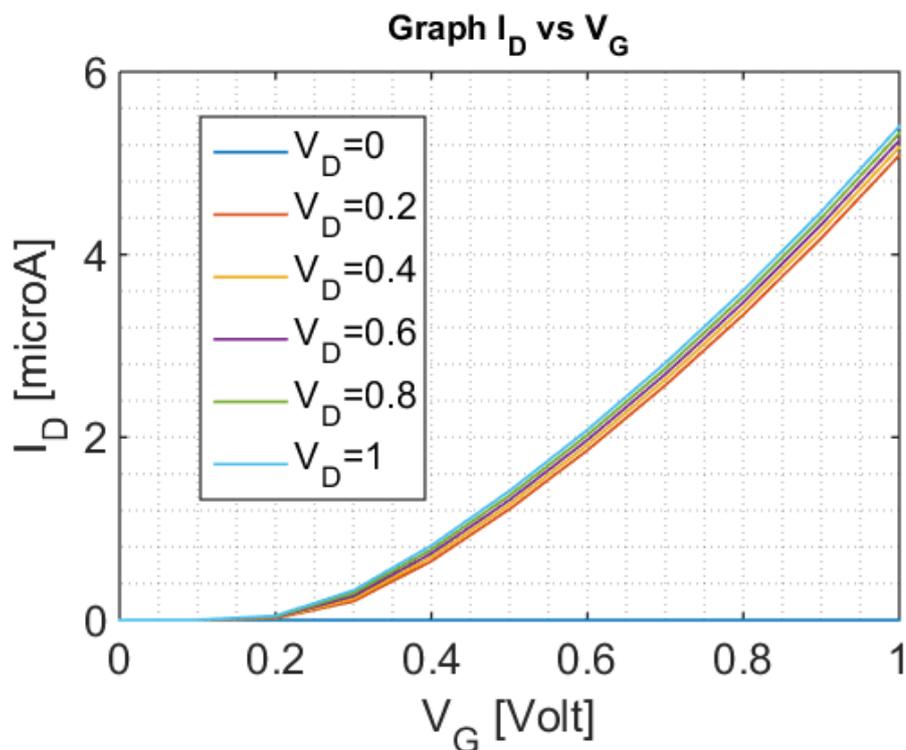


Figure IV. 44: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à l'échelle linéaire pour la chiralité (5-0)

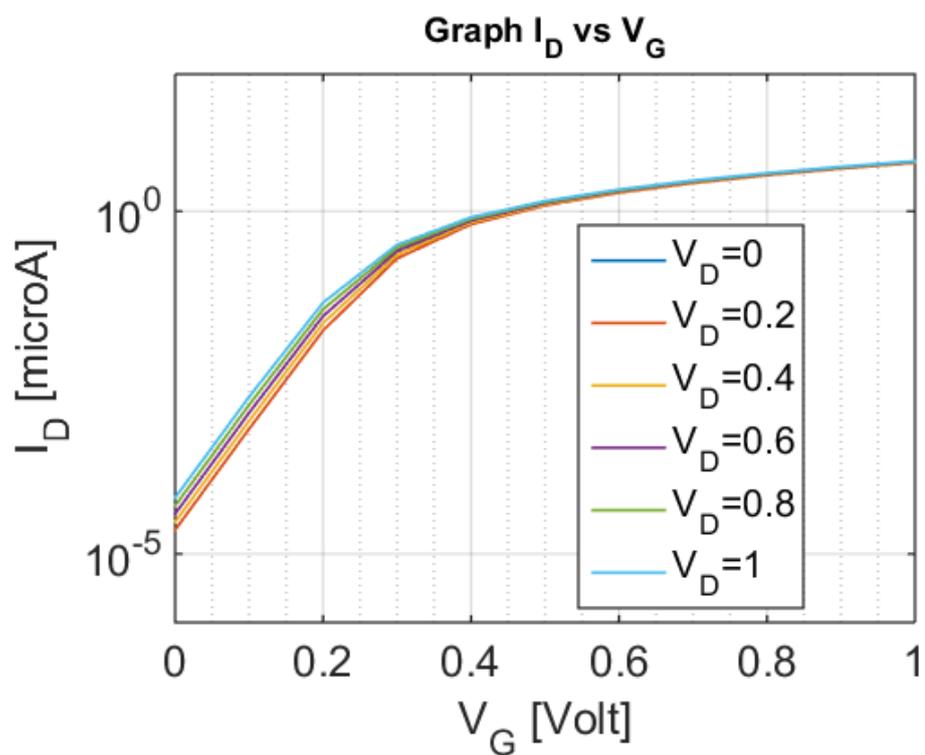


Figure IV. 45: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} pour la chiralité (5-0) à l'échelle logarithmique

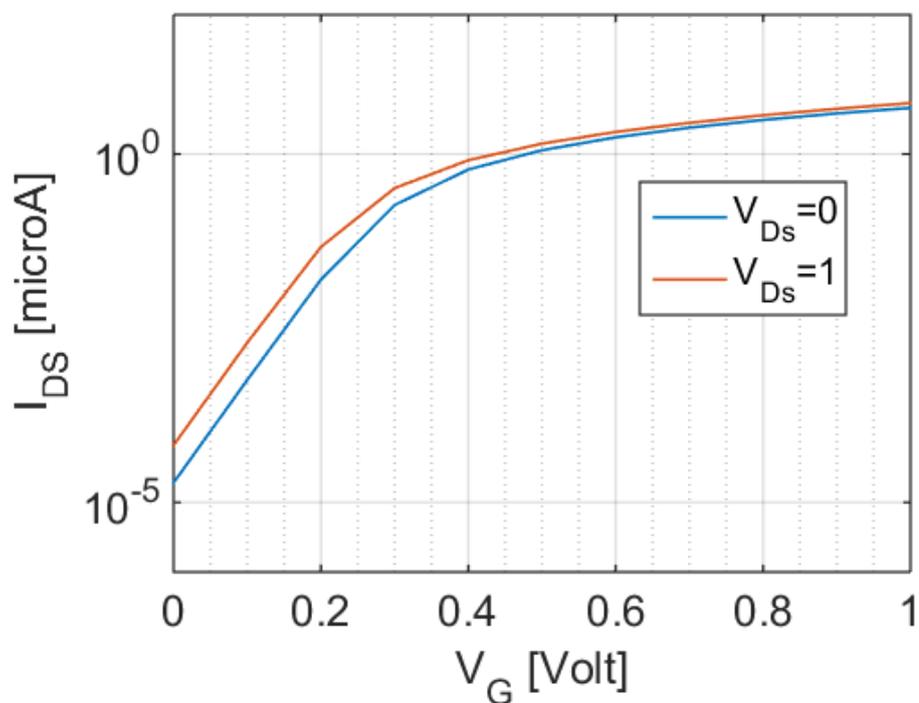


Figure IV. 46: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour une chiralité de (5-0)

IV. 3.3.2. Caractéristiques courant-tension pour une chiralité (10,0)

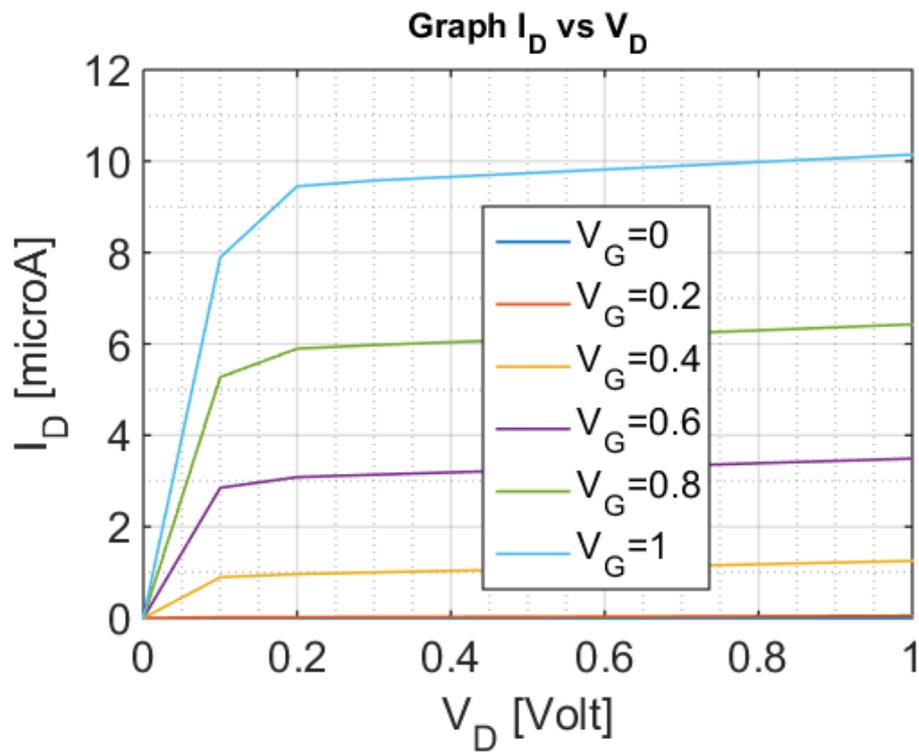


Figure IV. 47: La caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour la chiralité (10-0) à l'échelle linéaire

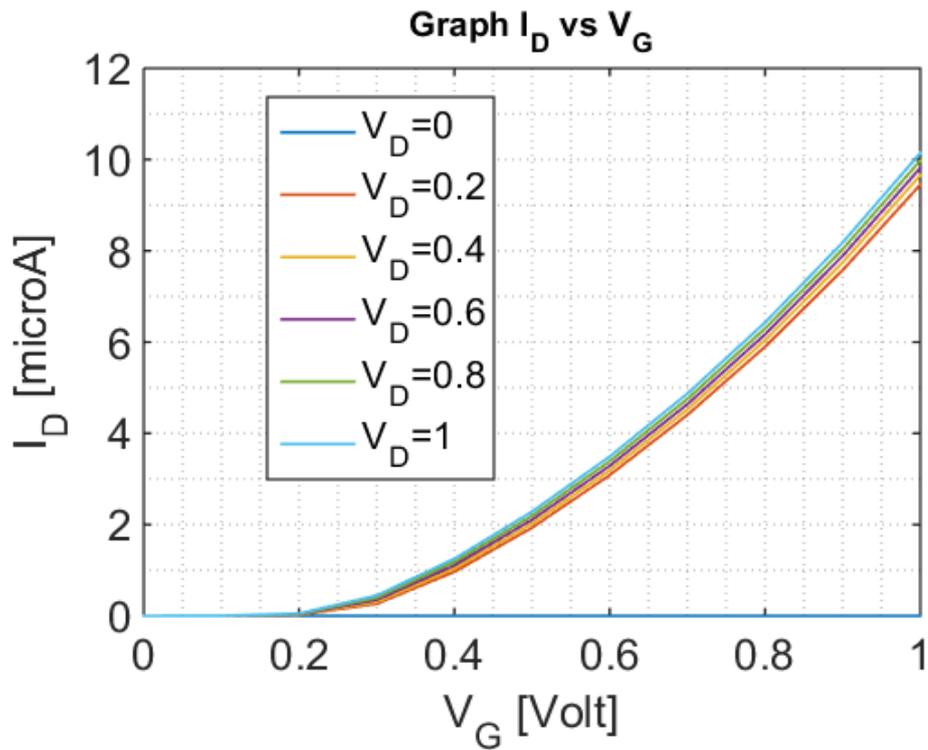


Figure IV. 48: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à l'échelle linéaire pour la chiralité (10-0)

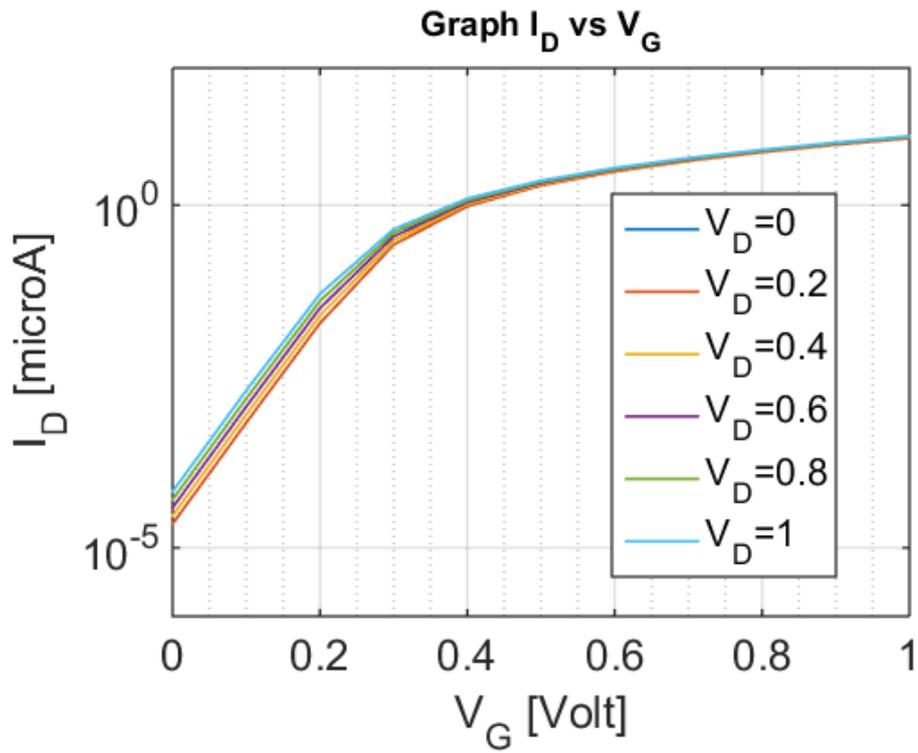


Figure IV. 49: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} pour la chiralité (10-0) à l'échelle logarithmique

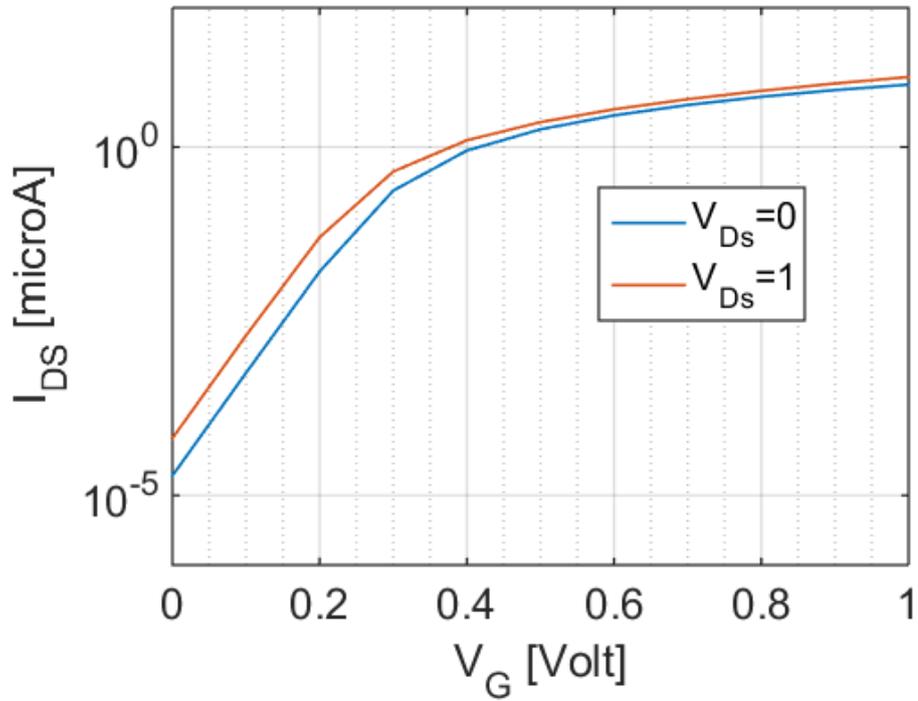


Figure IV. 50: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour une chiralité de (10-0)

IV. 3.3.3. Caractéristiques courant-tension pour une chiralité (19,0)

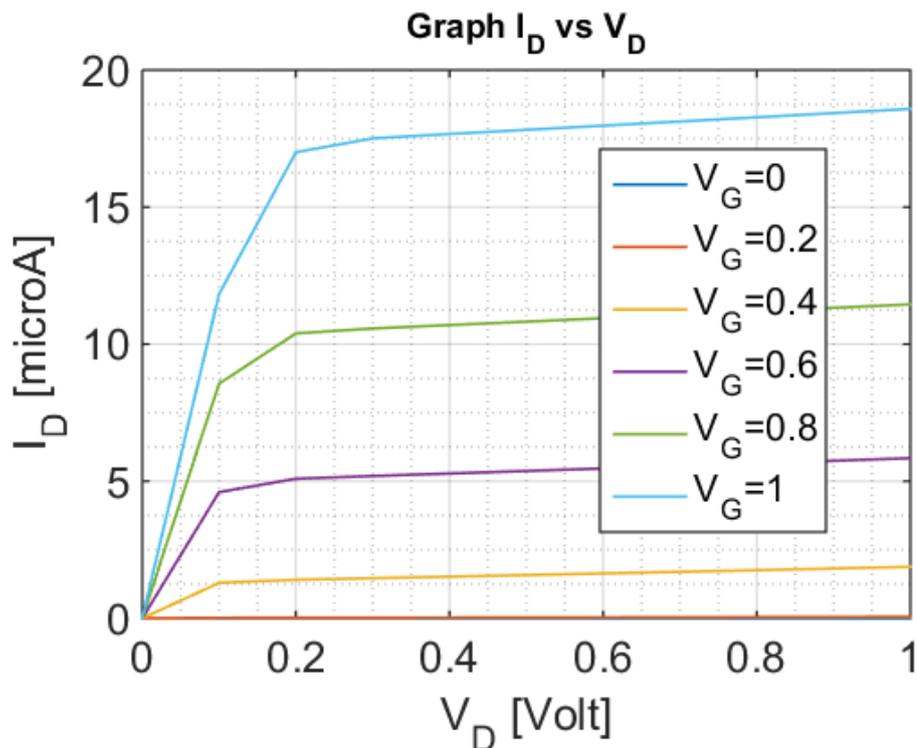


Figure IV. 51: La caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour la chiralité (19-0) à l'échelle linéaire

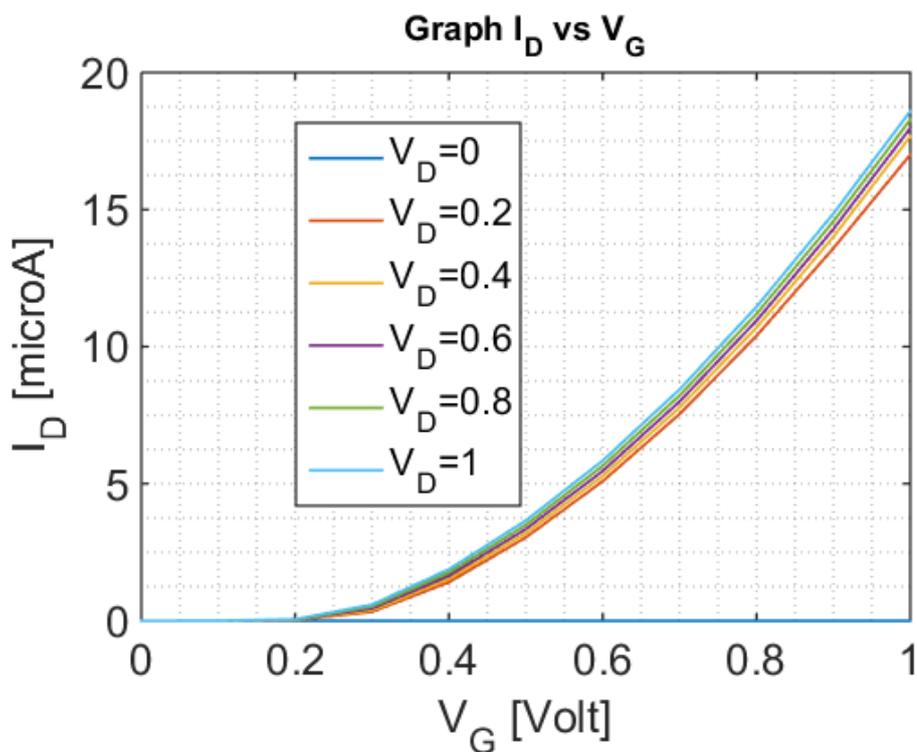


Figure IV. 52: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à l'échelle linéaire pour la chiralité (19-0)

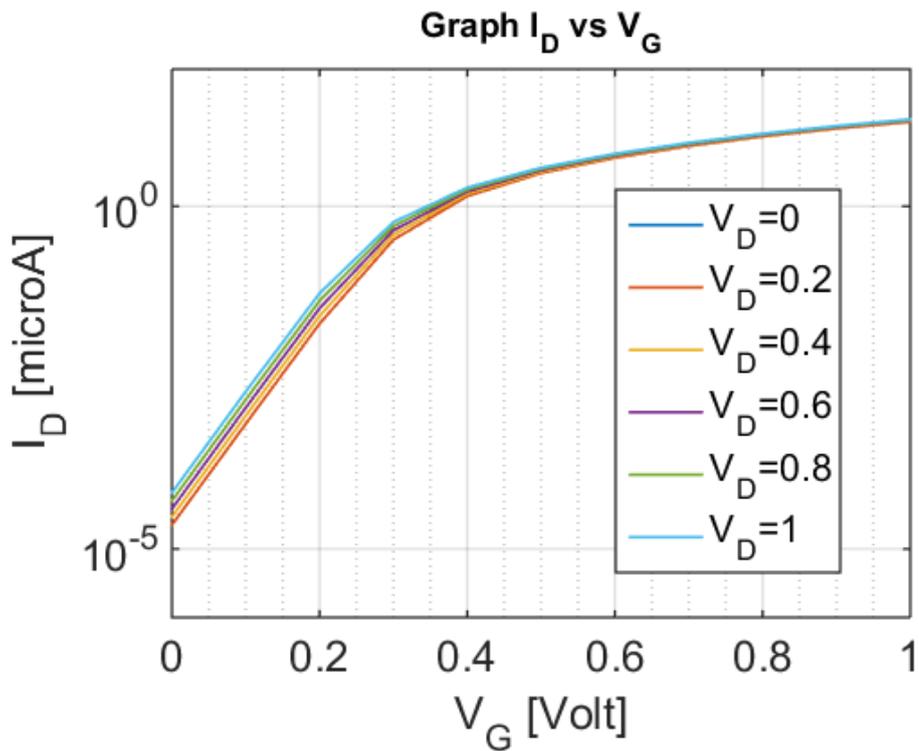


Figure IV. 53: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} pour la chiralité (19-0) à l'échelle logarithmique

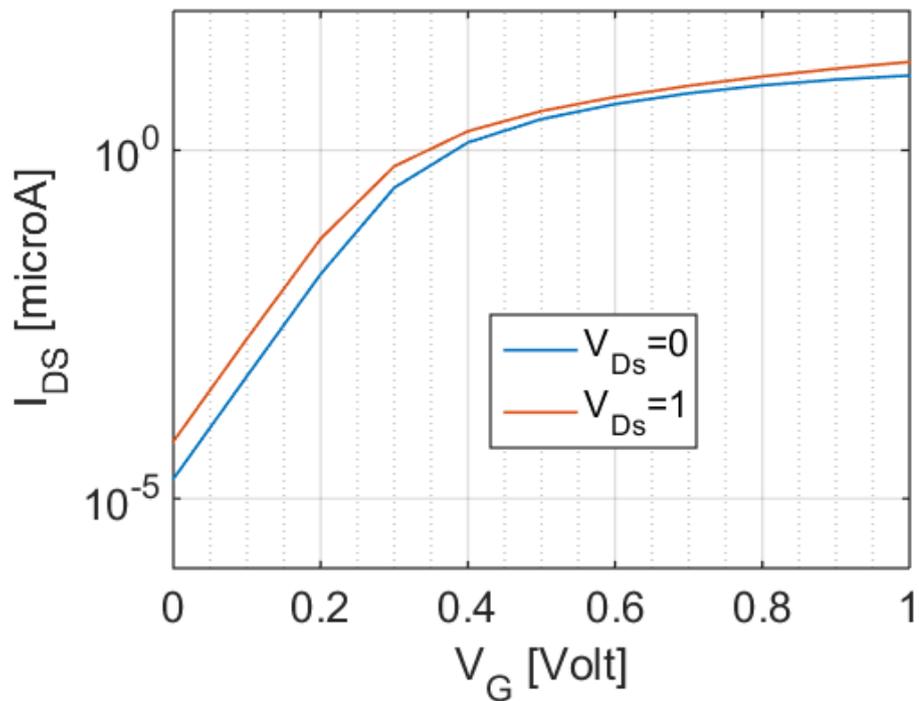


Figure IV. 54: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} à 0 et 1 V pour une chiralité de (19-0)

Nous regroupons sur la figure IV.56 les différents résultats que nous avons obtenus et relatifs à la variation de la chiralité.

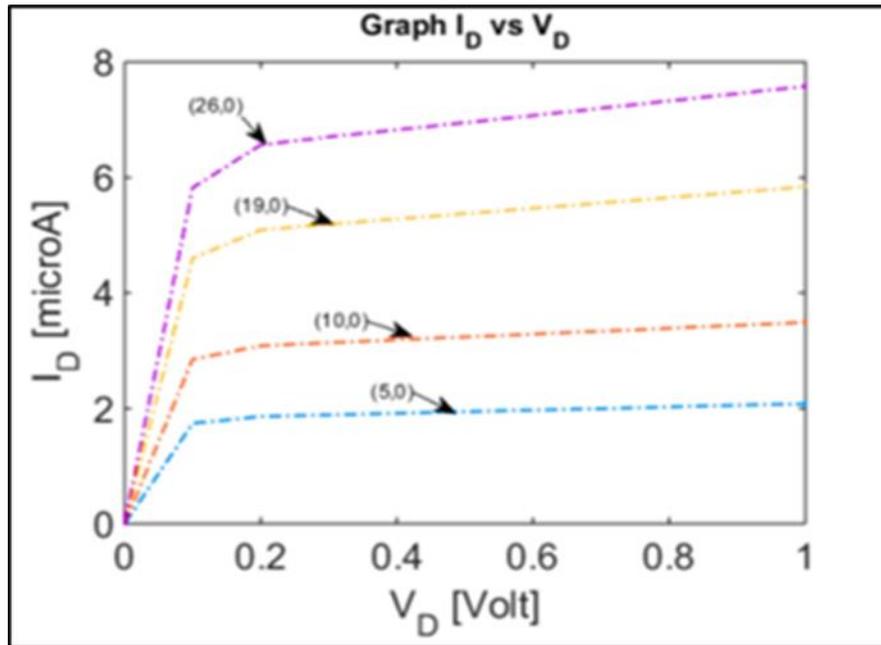


Figure IV. 55: Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} du CNTFET présentant des chiralités de (5, 0), (10, 0) et (19, 0), (26, 0).

Chiralité (n,m)	$I_{on}(\mu A)$	$I_{off}(\mu A)$	I_{on}/I_{off}	$V_{th}(V)$
(5,0)	5.3	1.9×10^{-5}	2.789×10^5	1.74
(10,0)	10.1	1.9×10^{-5}	5.31×10^5	0.87
(19,0)	18.5	1.9×10^{-5}	9.73×10^5	0.45
(26,0)	24.2	1.9×10^{-5}	12.73×10^5	0.33

Tableau IV. 5: Donne les valeurs des courants I_{on} et I_{off} le rapport I_{on}/I_{off} et V_{th}

La figure IV.55 .Montre que le diamètre augmente lorsque la chiralité augmente aussi, la tension de seuil de (V_{th}) du CNTFET dépend du vecteur de chiralité.

la tension de seuil diminue lorsque la vecteur de chiralité augmente, la raison de la diminution de la tension de seuil par rapport au vecteur chiral peut être expliqué en considérant l'équation qui suit et mettant en évidence le lien entre la tension de seuil et le diamètre autrement dit entre la tension de seuil et le couple (n,m)

$$V_{th} = a (V_{\pi}) / \sqrt{3} (qD_{CNT})$$

IV.8

Le diamètre du nanotube de carbone a un effet important sur le courant de drain (courant continu), automatiquement le rapport I_{on}/I_{off} pour la chiralité (26,0) augmente aussi.

Les figures IV.44, IV.48, IV.52, montrent que la chiralité est directement proportionnelle au diamètre du CNT, elle a un impact sur le courant de sortie du dispositif. En effet, lorsque la chiralité augmente le courant de drain augmente dans la figure IV.44, pour $(n, m) = (5, 0)$ à $V_G = 1V$, un courant de drain de $5\mu A$ a été obtenu et pour $(n, m) = (26, 0)$, un courant de drain de $24\mu A$ a été obtenu.

IV .3.4. Effet de la nature de l'oxyde de grille sur la caractéristique électrique du CNTFET

Le SiO_2 a été utilisé comme matériau diélectrique de grille depuis la découverte du MOSFET en 1960 en raison de sa stabilité électrique et thermique. Si l'épaisseur du diélectrique est mince (inférieur à 1,5 nm), la dissipation de la puissance augmente. La solution possible pour surmonter ce problème est d'utiliser un oxyde de grille de type High-K. Dans cette partie nous allons voir comment le dioxyde de grille influence les caractéristiques électriques des CNTFETs. Nous pouvons regrouper les matériaux HIGH K en trois classes : ceux à moyenne permittivité, ceux à haute permittivité et ceux à très haute permittivité, ces matériaux sont regroupés au niveau du tableau IV.6.

CLASSES	MATÉRIAUX
medium κ (5-10)	Si_3N_4 , Al_2O_3
high- κ (10-50)	ZrO_2 , HfO_2 , ZrSiO_4 , HfSiO_4 , Y_2O_3 , La_2O_3 , Gd_2O_3 , Ta_2O_5
Very high- κ (>50)	TiO_2 , SrTiO_3 , $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$

Tableau IV. 6: classification des différents matériaux utilisés comme isolant de grille

Parmi les matériaux les plus utilisés comme oxyde de grille, l' Al_2O_3 (permittivité moyenne- κ), HfO_2 (permittivité élevée - κ) et SrTiO_3 (très haute permittivité- κ) sont parmi les matériaux les plus prometteurs.

Dans cette partie, nous avons simulé un CNTFET avec toujours les mêmes caractéristiques sauf en ce qui concerne l'oxyde de grille. Les paramètres utilisés pour cette simulation sont : chiralité des nanotubes (26,0), diamètre des CNT $d = 2\text{nm}$, épaisseur de l'isolant de grille ($t_{\text{ox}} = 10\text{ nm}$), la température est de 300 K, les constantes diélectriques (k) sont répertoriées dans le tableau IV.7.

Nom	La formule chimique	La constante dielectriques (K)	Bande interdite(eV)
Le Dioxyde de silicium	SiO ₂	3.9	9
L'oxide d'aluminium	Al ₂ O ₃ (medium K)	10	8.8
L'oxide Hafnium	HfO ₂ (high K)	20	5.7
Titanate de strontium	SrTiO ₃ (very high K)	200	3.2

Tableau IV. 7: Liste des oxydes considérés comme isolant de grille avec leurs constantes diélectriques et leurs bandes interdites.

IV .3.4. 1. Caractéristiques de courant avec L'oxide d'aluminium comme oxyde de grille

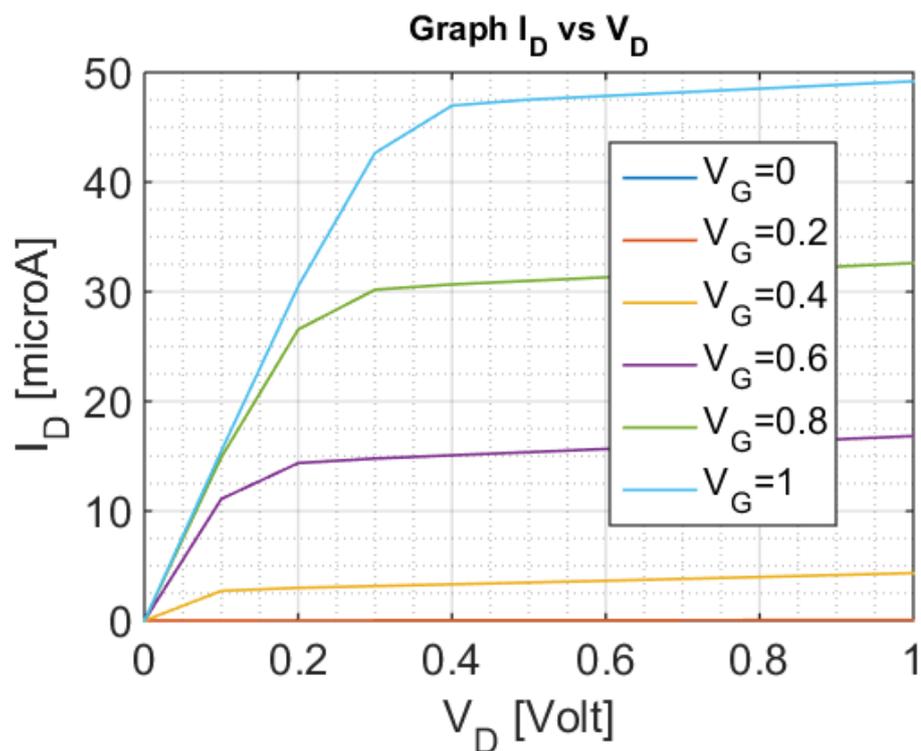


Figure IV. 56: Caractéristiques $I_{ds} - V_{ds}$ pour différents V_g du matériau diélectrique l'Al₂O₃

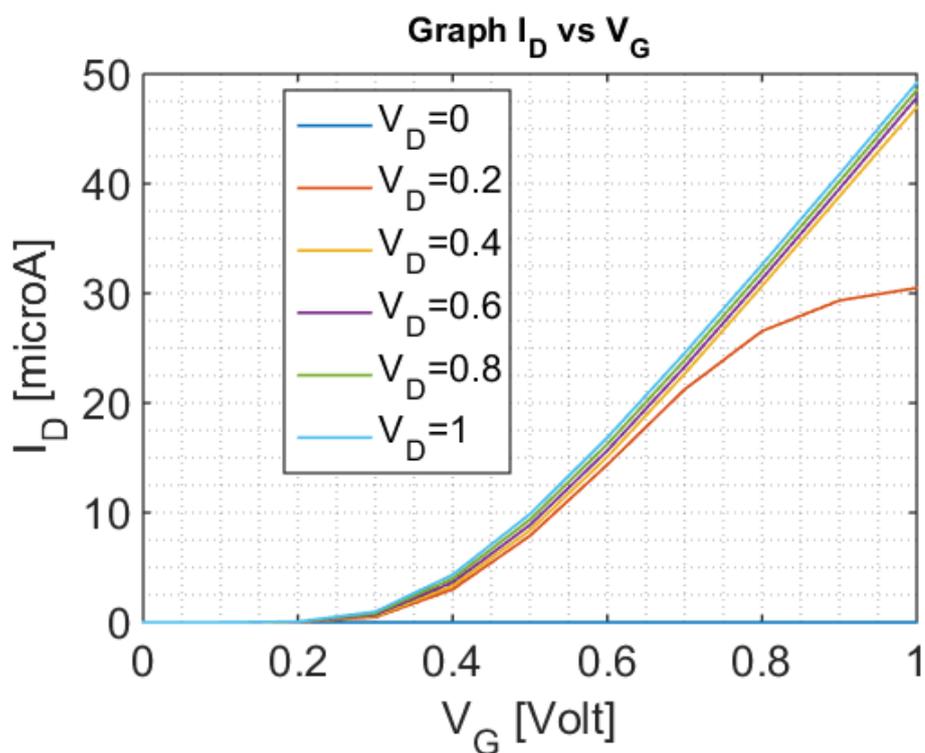


Figure IV. 57: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} pour différents V_d du matériau diélectrique

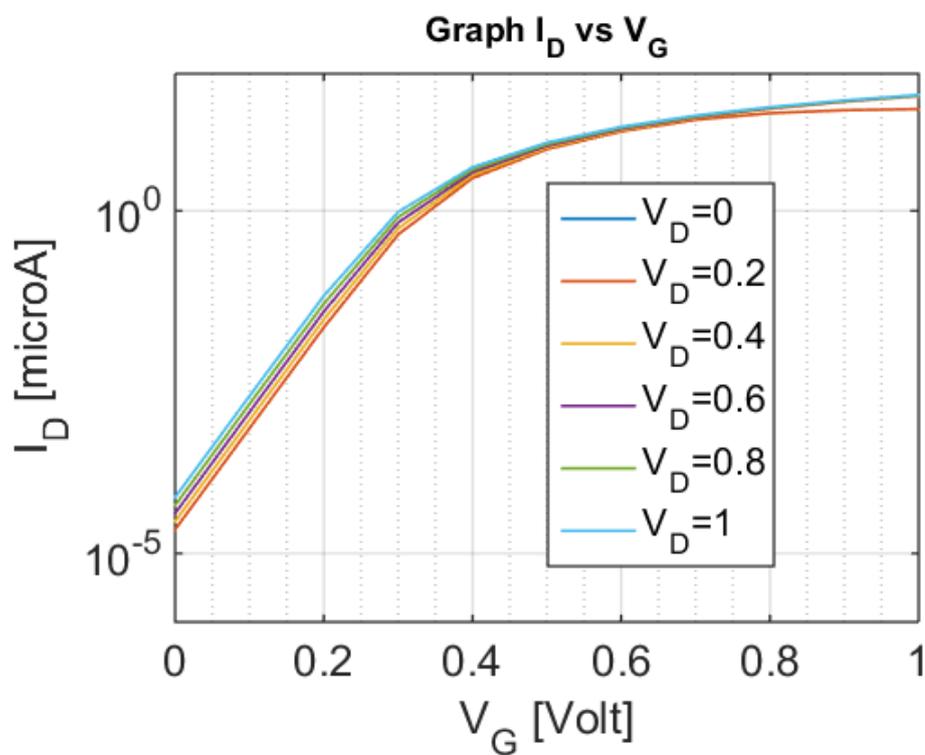


Figure IV. 58: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} du matériau diélectrique Al_2O_3 à l'échelle logarithmique

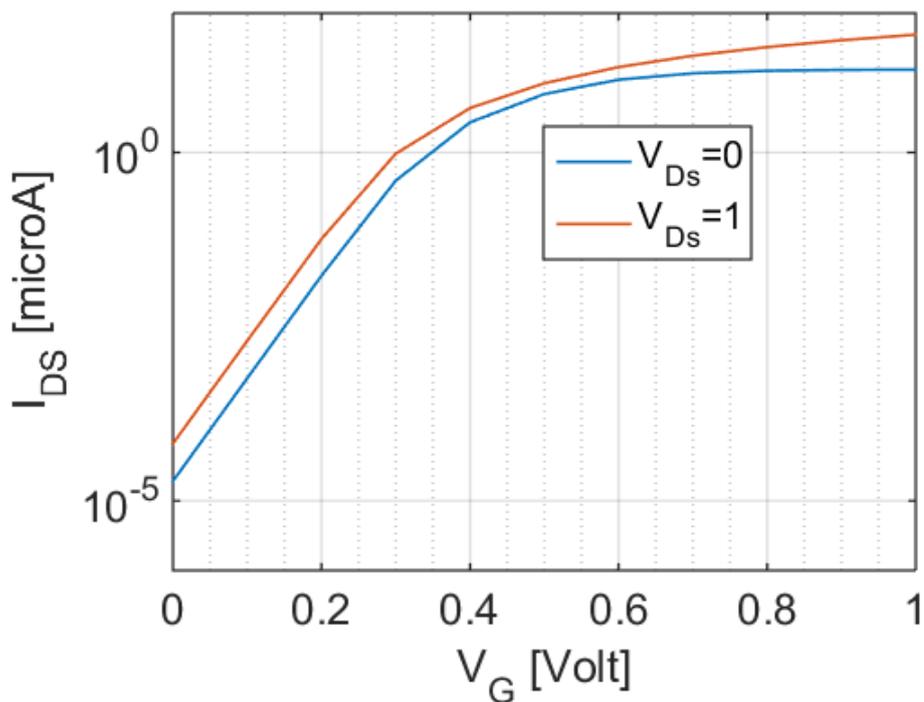


Figure IV. 59: La caractéristique I_{DS} - V_{GS} du matériau diélectrique Al_2O_3 à 0 et 1 V

IV .3.4. 2. Caractéristiques courant-tension avec l'oxyde de Hafnium comme dioxyde de grille

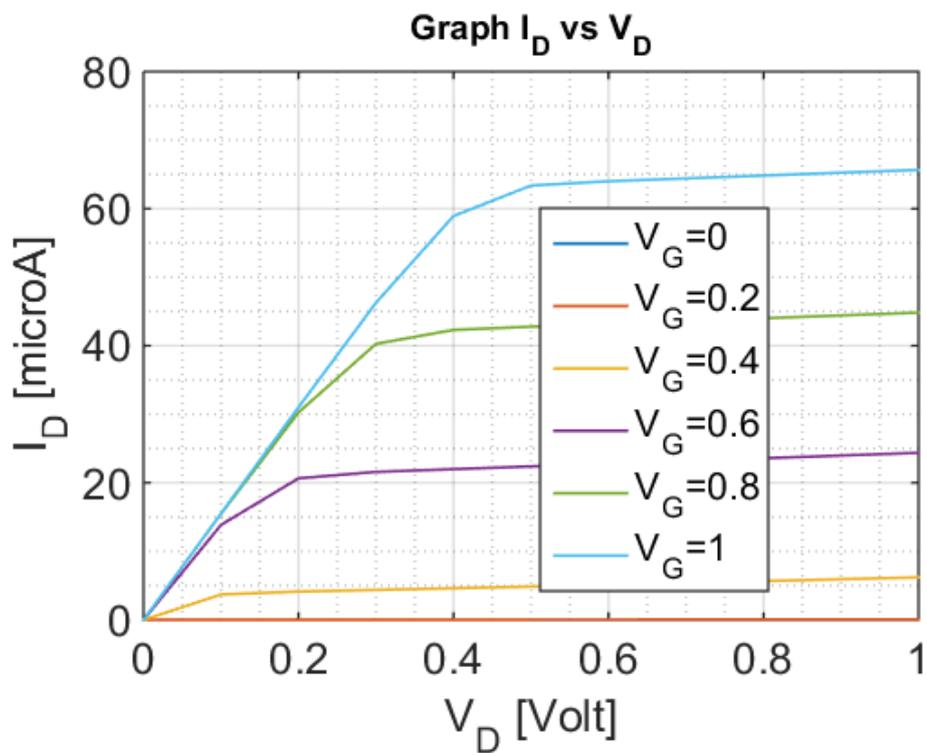


Figure IV. 60: La Caractéristiques I_{DS} - V_{DS} pour différents V_G du HfO_2

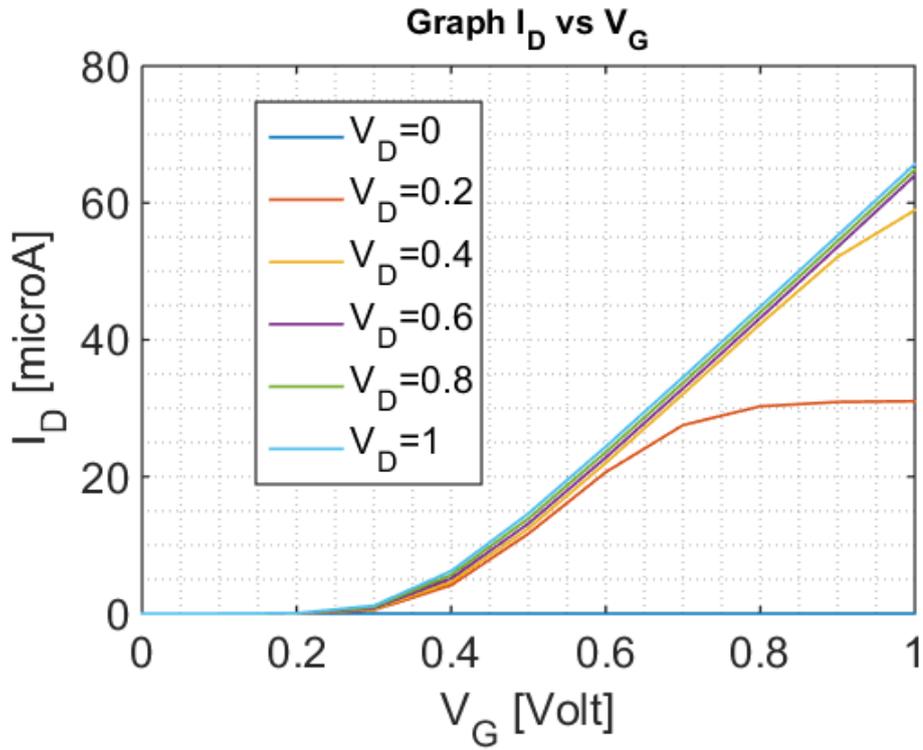


Figure IV. 61: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour différents V_d du HfO_2

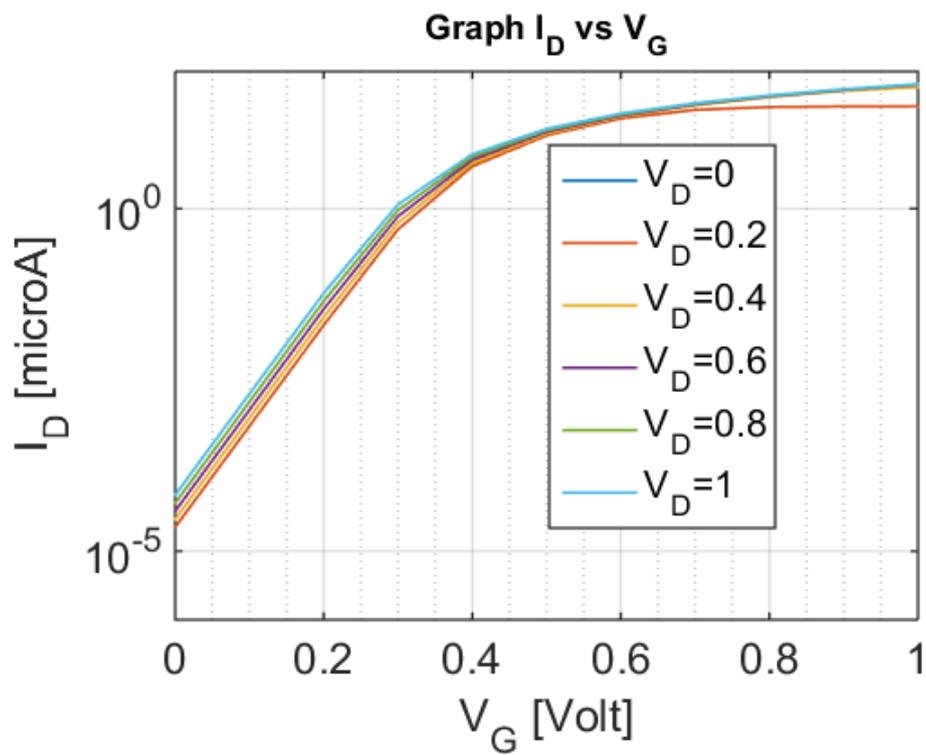


Figure IV. 62: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} du matériau diélectrique HfO_2 à l'échelle logarithmique

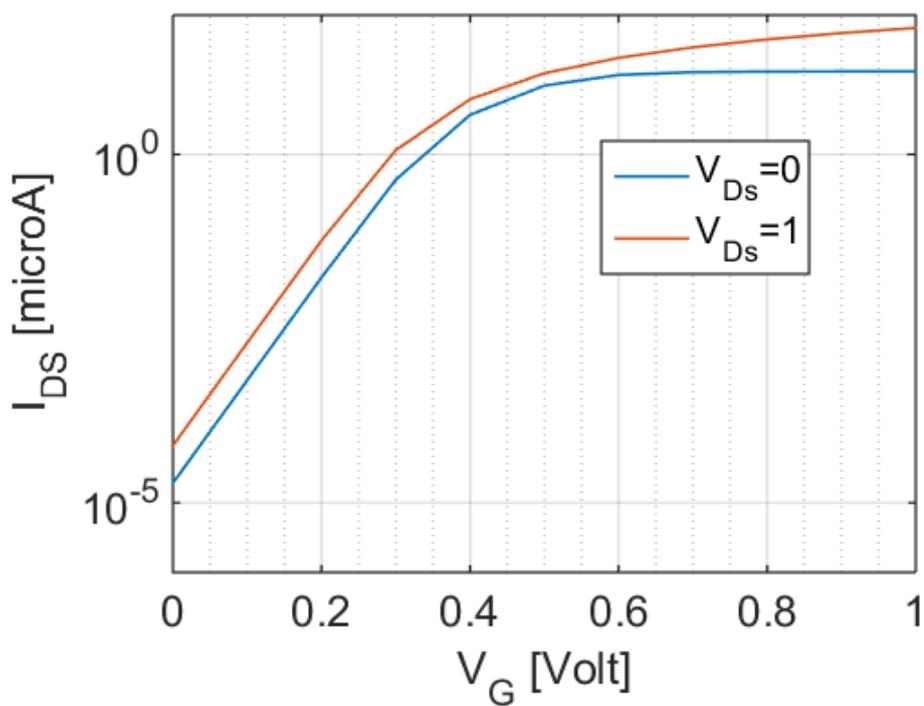


Figure IV. 63: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} du matériau diélectrique HfO_2 à 0 et 1 V

IV .3.4. 3. Caractéristiques courant-tension avec l'oxyde de Titanate de strontium Comme dioxyde de grille

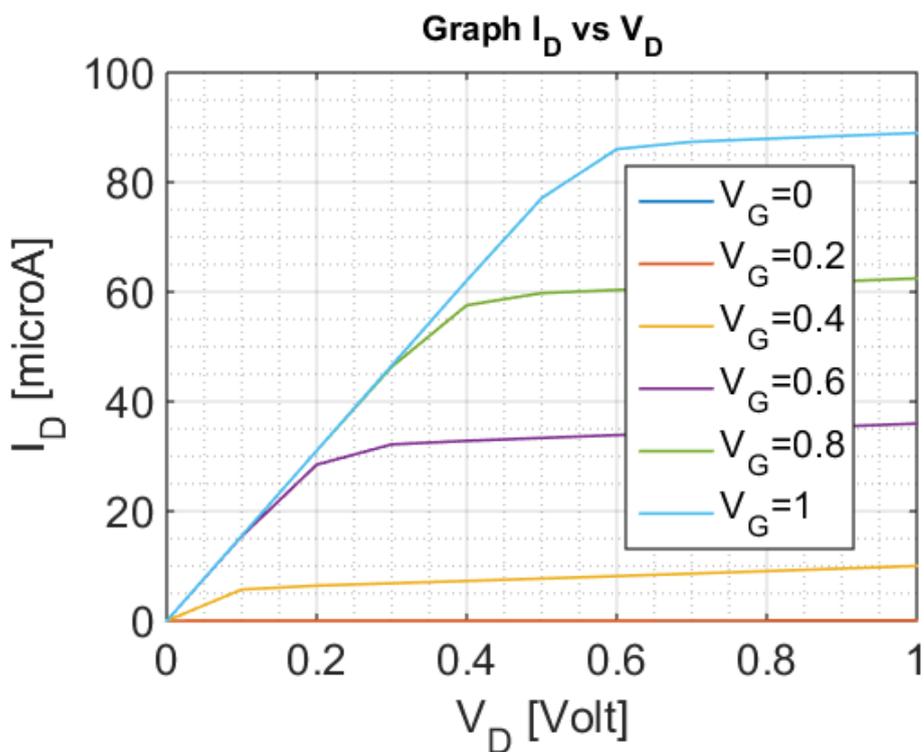


Figure IV. 64: La Caractéristiques I_d V_{ds} pour différents V_g de $SrTiO_3$

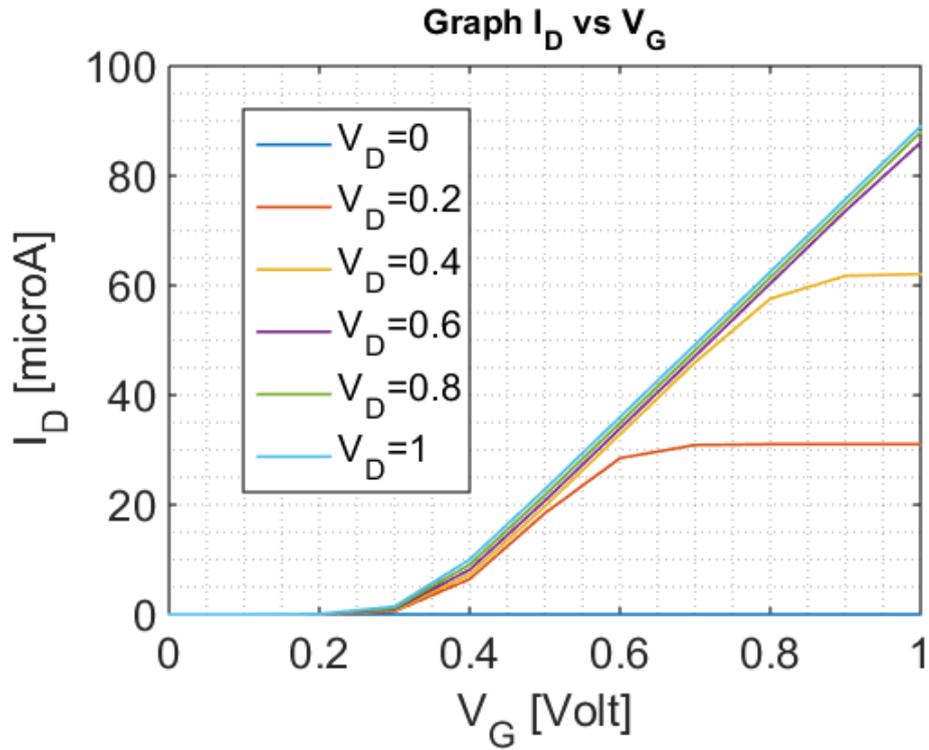


Figure IV. 65: Les caractéristiques I_{ds} - V_{gs} pour différents V_d du $SrTiO_3$

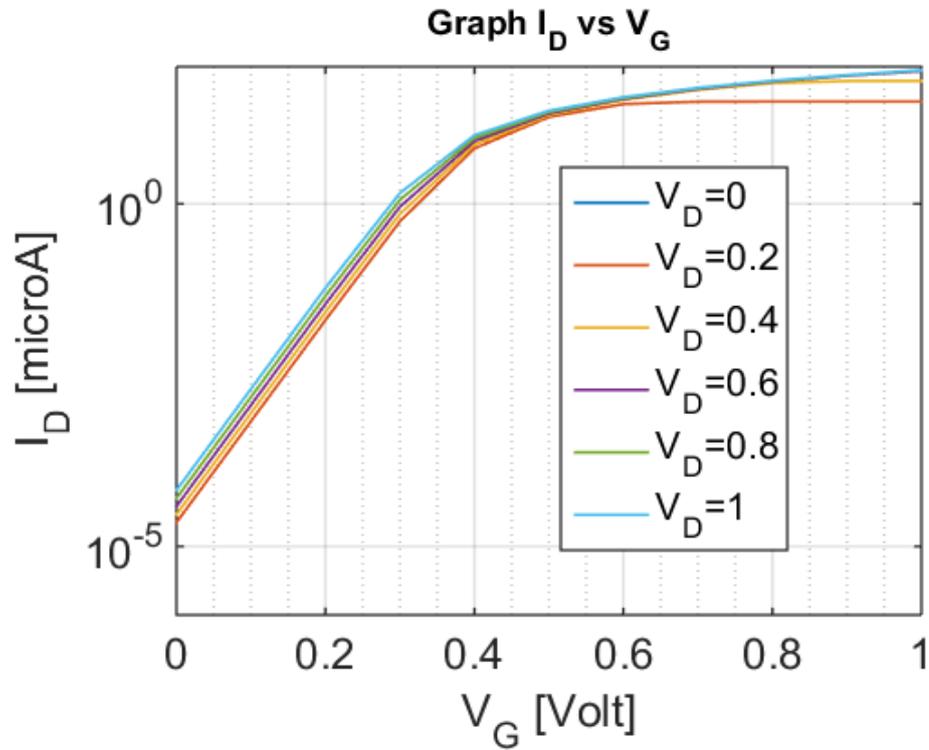


Figure IV. 66: Caractéristiques I_{ds} - V_{gs} du matériau diélectrique $SrTiO_3$ à l'échelle logarithmique

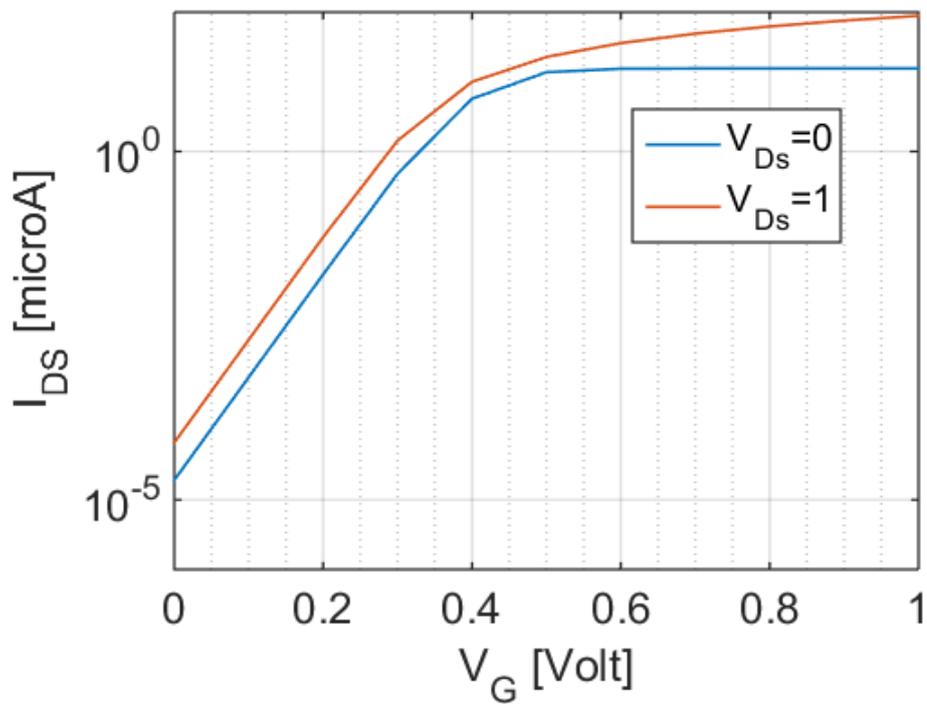


Figure IV. 67: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} du matériau diélectrique SrTiO3 à 0 et 1 V

Nous regroupons sur la figure IV.68 les différents résultats que nous avons obtenus et relatifs à la variation des différents dioxydes de grilles.

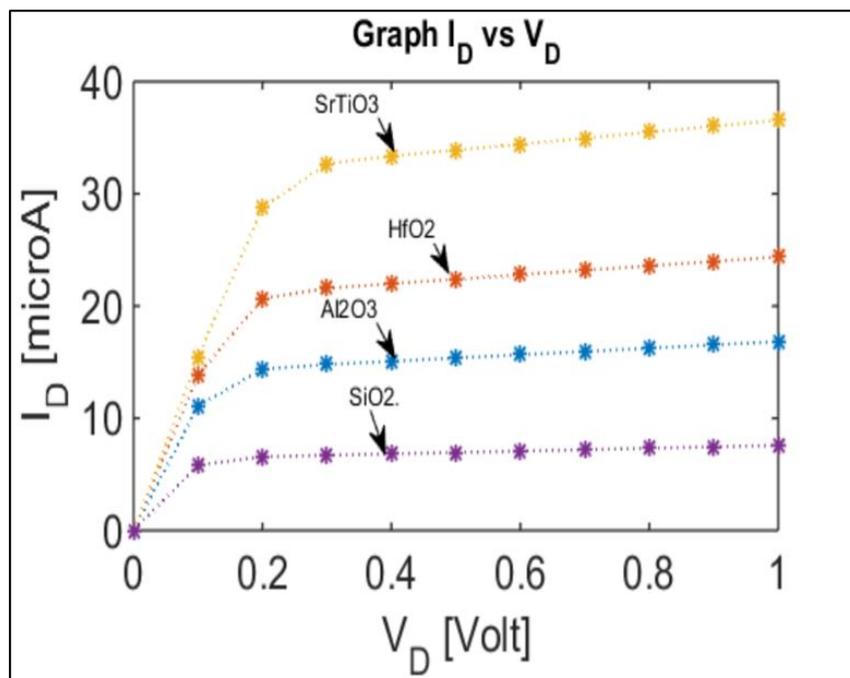


Figure IV. 68: La comparaison entre les différents isolants de grille

La figure IV.68 montre clairement que le changement de la constante diélectrique a un effet vital sur le courant de sortie.

Il ressort clairement de nos résultats que lorsque la constante diélectrique augmente le courant de saturation augmente aussi. Ainsi que lors de l'utilisation d'un matériau à haute permittivité électrique le courant de drain est plus élevé, mais lorsque nous utilisons un matériau (K) à très haute permittivité électrique (SrTiO₃) la valeur du courant de saturation diminue. En conséquence, l'impact des nouveaux matériaux diélectriques sur les caractéristiques de sortie du dispositif a été démontré.

La nature de l'oxyde	I _{ON}	I _{OFF}	I _{ON} /I _{OFF}
SiO₂	24.2μA	1.92x10 ⁻⁵	12,73 x10 ⁵
Al₂O₃	49.1	1.92x10 ⁻⁵	25.84x10 ⁵
HfO₂	65.5	1.92x10 ⁻⁵	34.11x10 ⁵
SrTiO₃	88	1.92x10 ⁻⁵	64.31x10 ⁵

Tableau IV. 8: Les paramètres DC pour différents dioxydes de grille

IV .3.5. Effet de la température sur la caractéristique électrique du CNTFET

Les caractéristiques et le comportement de circuit des MOSFET changent avec l'augmentation de la température. La température maximale tolérable pour les dispositifs à base de silicium est de 150 degrés et cela est dû à la forte liaison covalente carbone-carbone en sp². Grâce à l'hybridation, les nanotubes de carbone sont inertes chimiquement et peuvent transporter une grande quantité de courant électrique. Les nanotubes de carbone sont capables de conduire la chaleur comme le diamant.

Pour étudier l'influence de la température sur le CNTFET nous faisons varier la température de 250 K à 500K.

IV .3.5 .1.Caractéristiques courant-tension pour T=250K

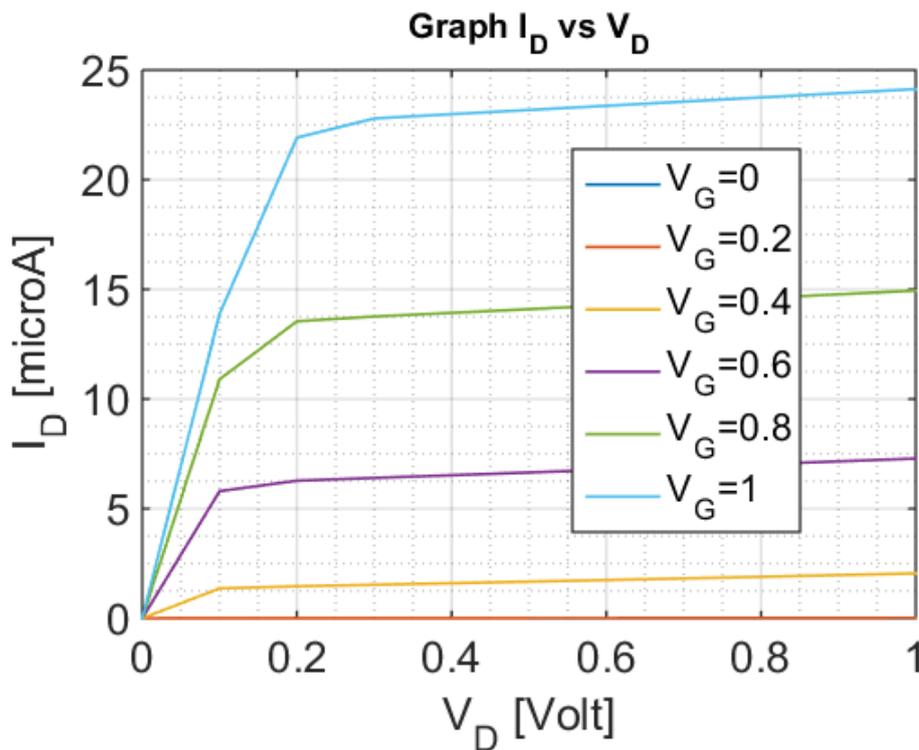


Figure IV. 69: La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour la température 250K

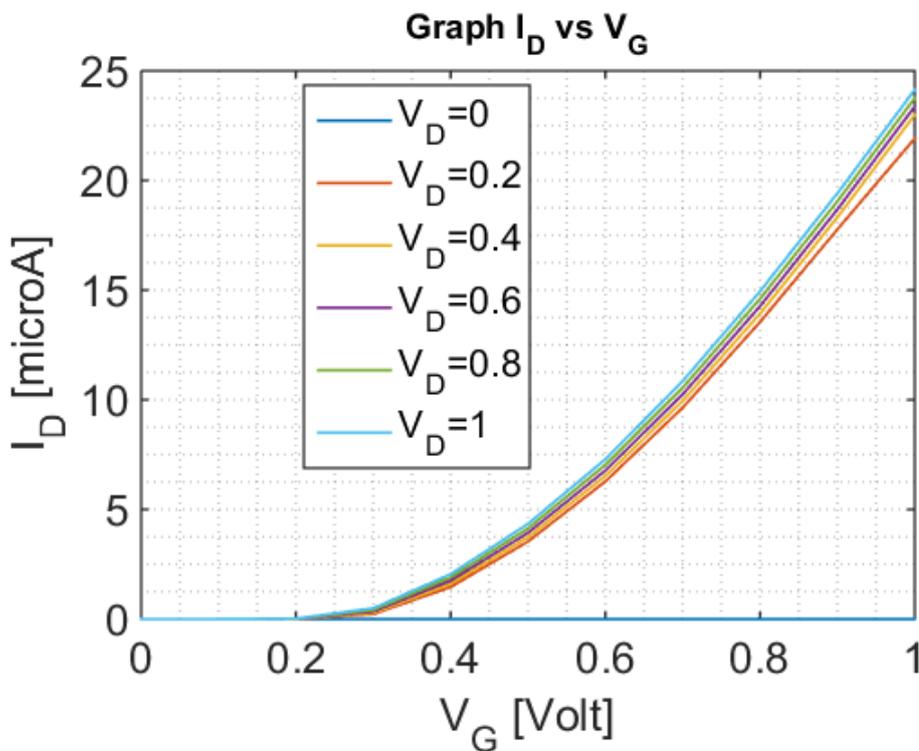


Figure IV. 70: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 250K à l'échelle linéaire.

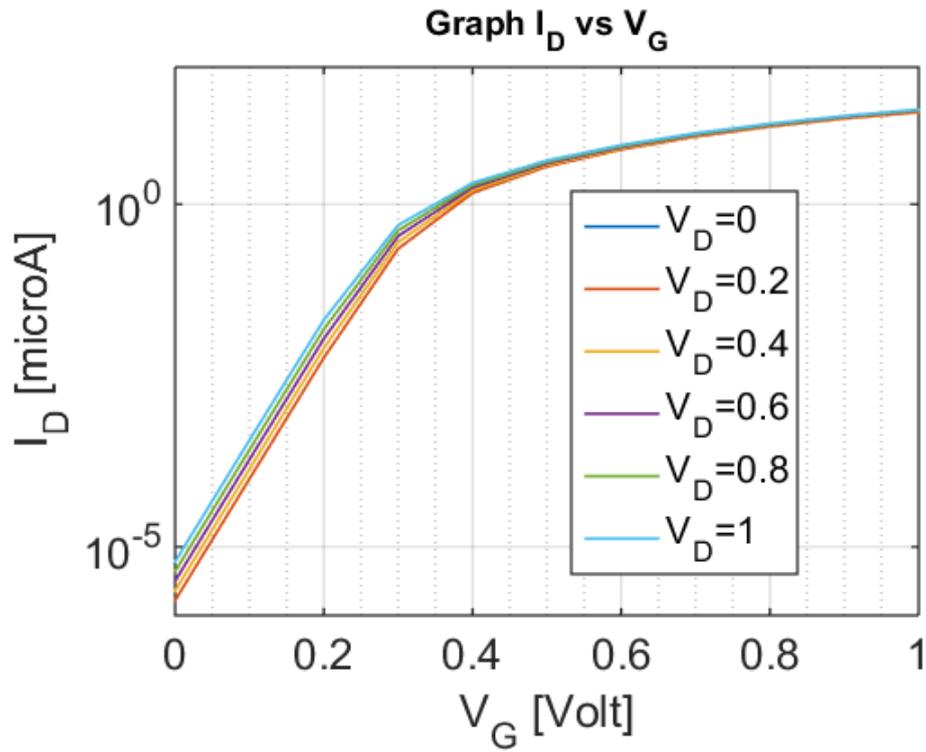


Figure IV. 71: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 250K à l'échelle logarithmique

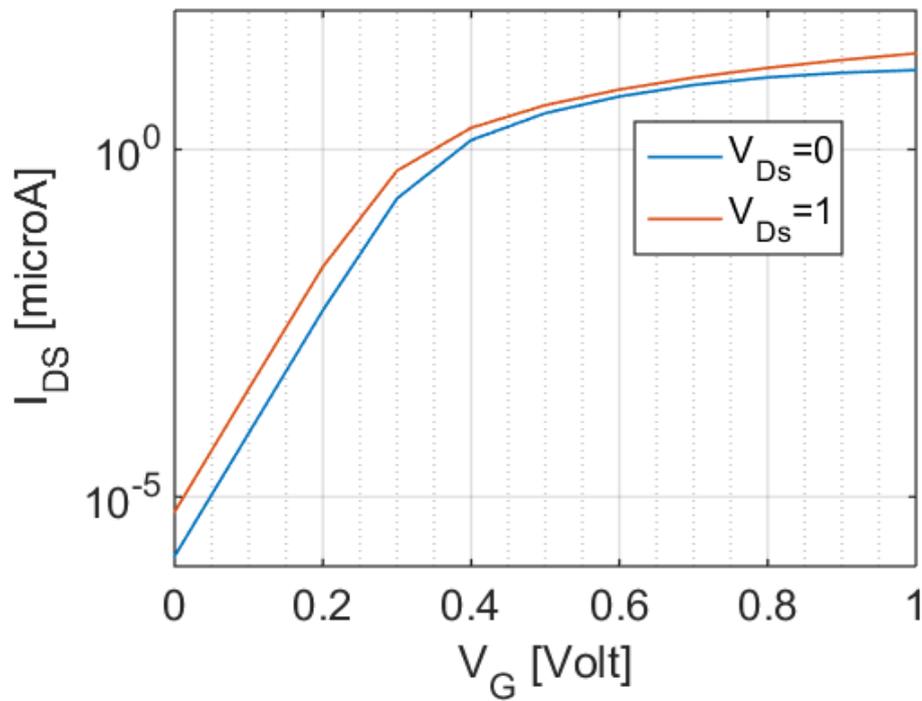


Figure IV. 72: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 250°K

IV .3.5 .1.Caractéristiques courant-tension pour T=350K

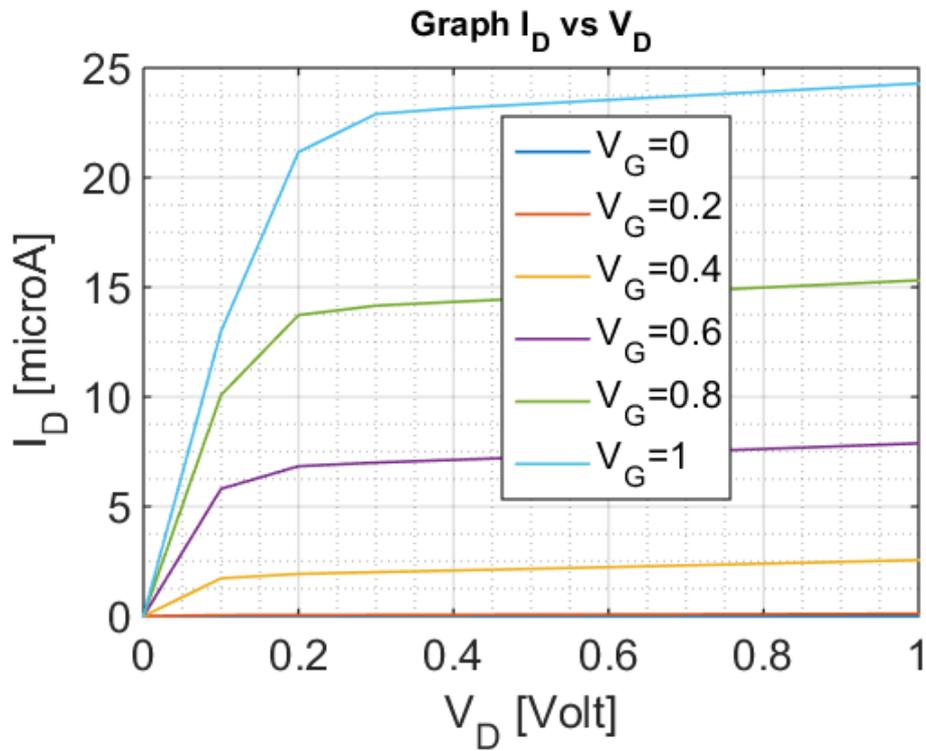


Figure IV. 73: La caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ pour la température 350K

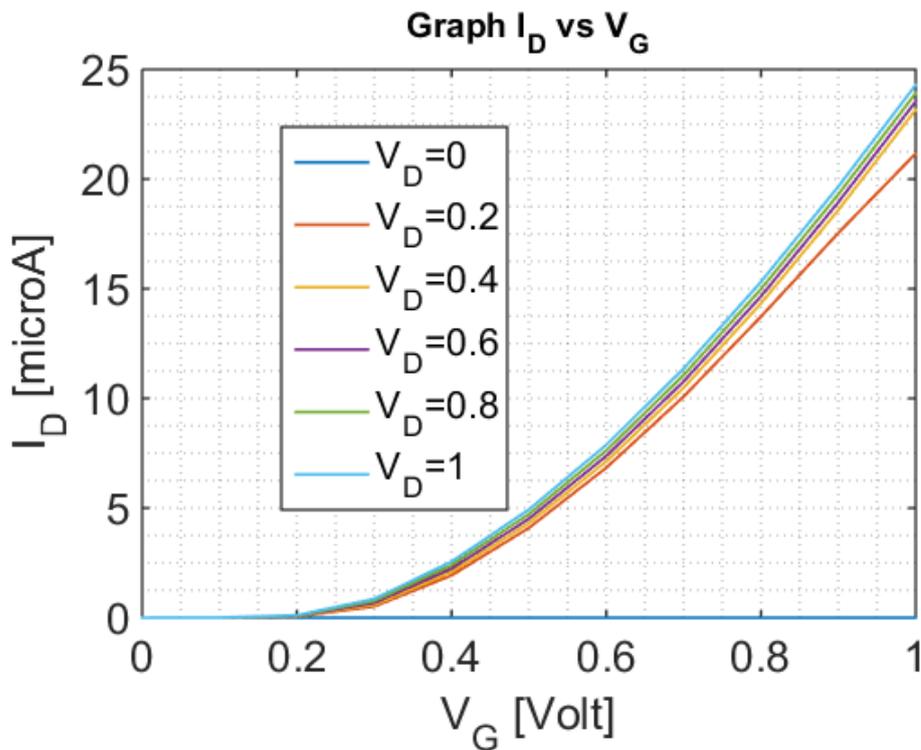


Figure IV. 74: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 350K

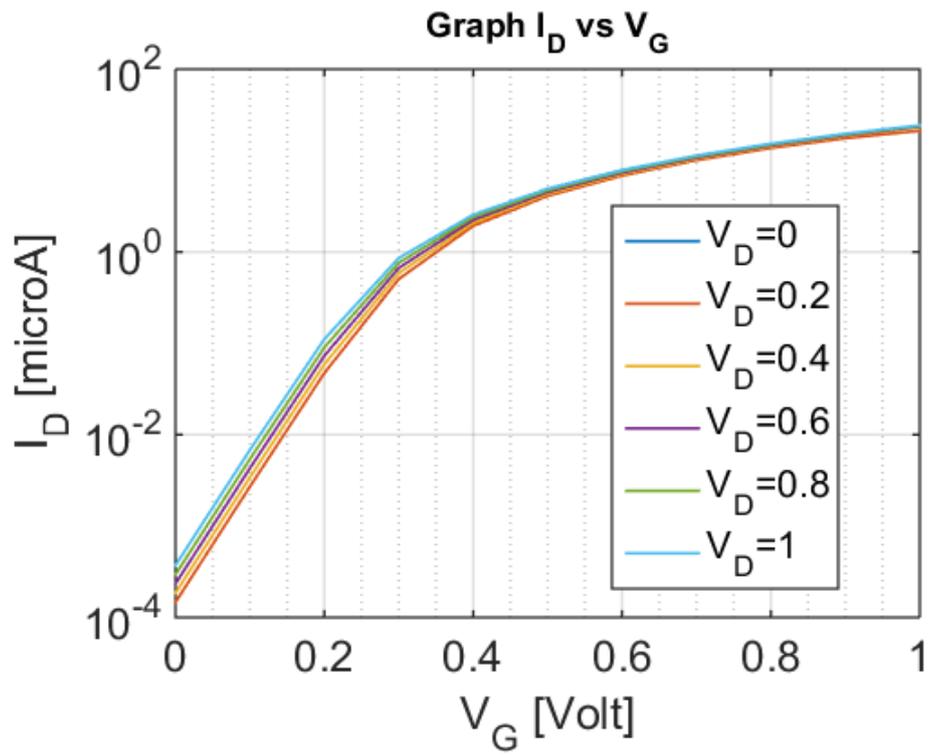


Figure IV. 75: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 350K à l'échelle logarithmique

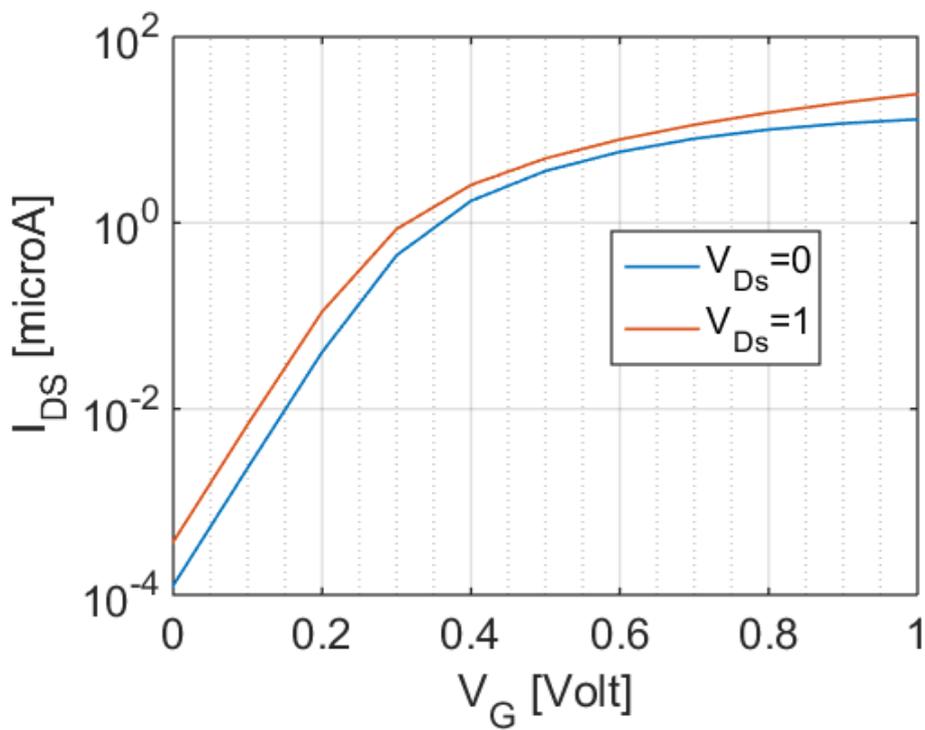


Figure IV. 76: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 350°K

IV .3.5 .1. Caractéristiques courant-tension pour T=400K

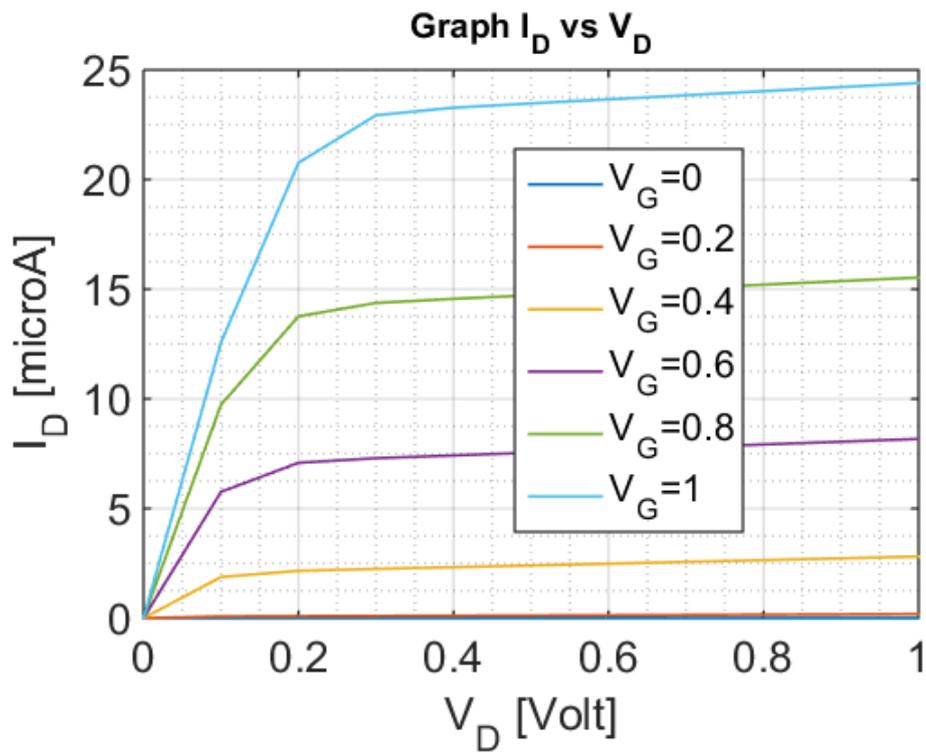


Figure IV. 77: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour la température 400K

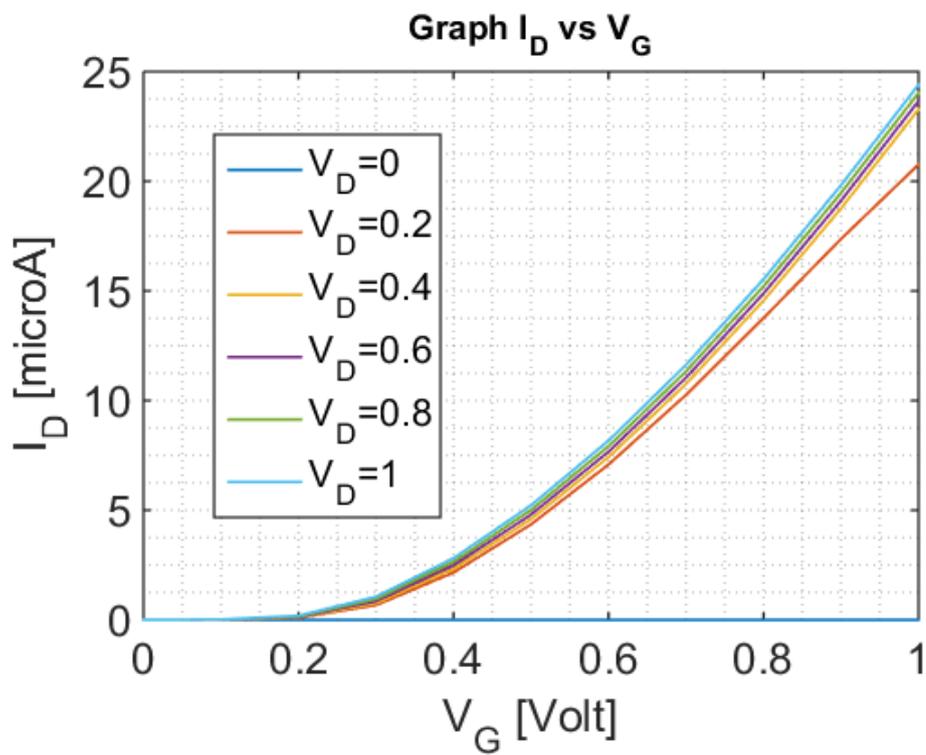


Figure IV. 78: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour la température 400K.

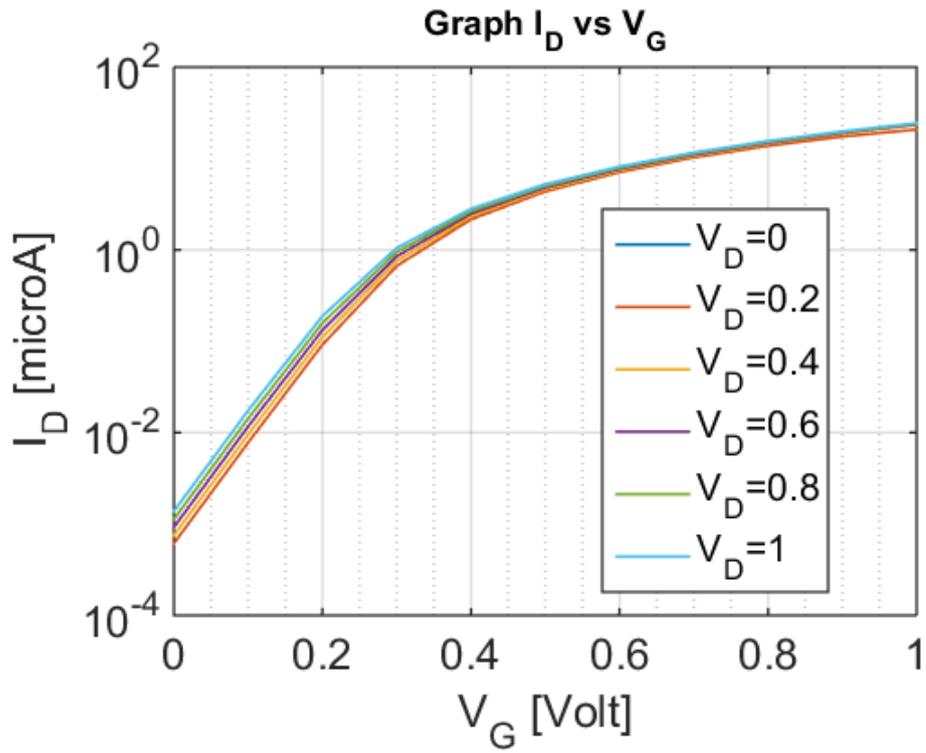


Figure IV. 79: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 400K à l'échelle logarithmique

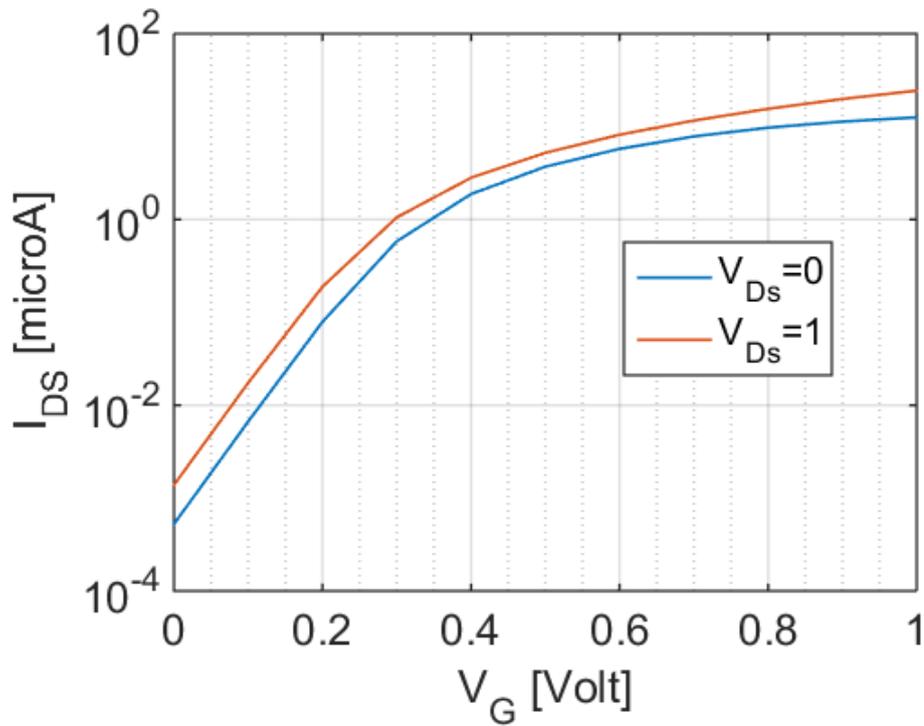


Figure IV. 80: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 400°K

IV .3.5 .1.Caractéristiques courant-tension pour T=450K

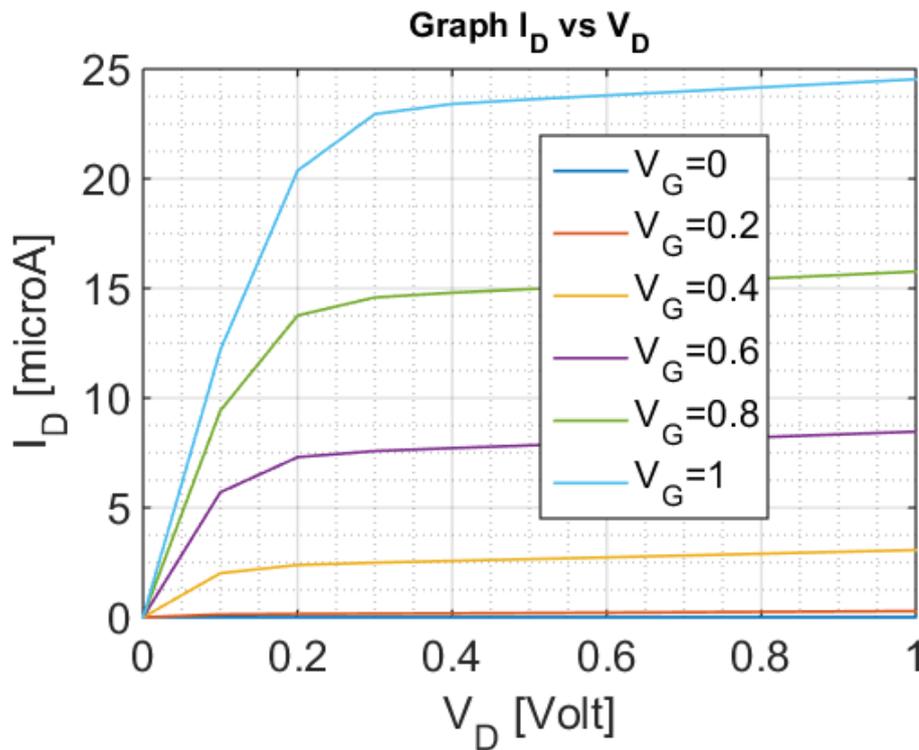


Figure IV. 81: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour la température 450K

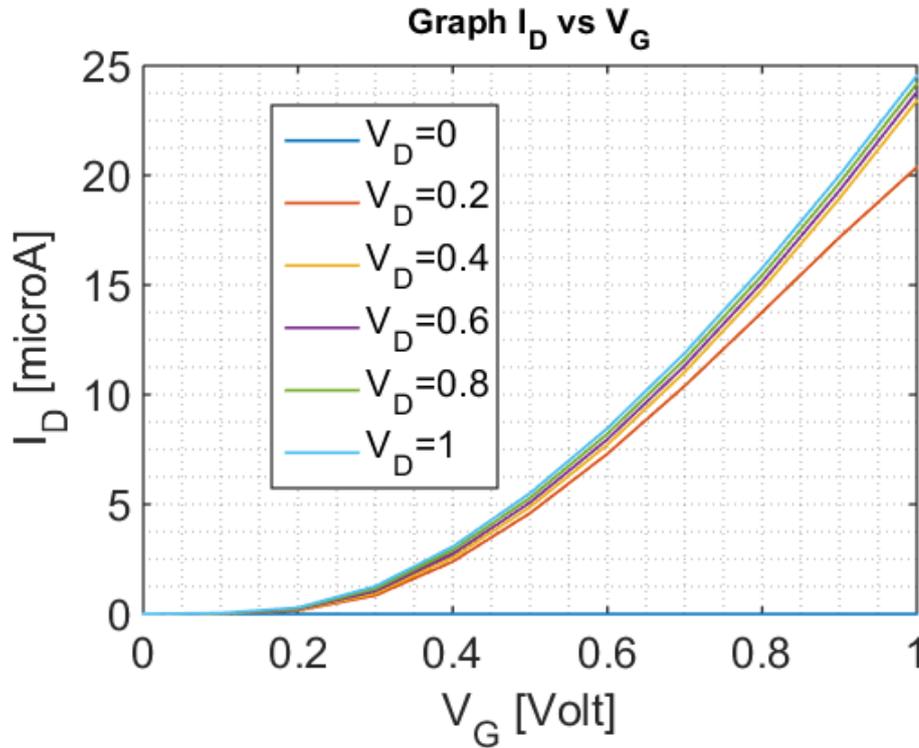


Figure IV. 82: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour la température 450K.

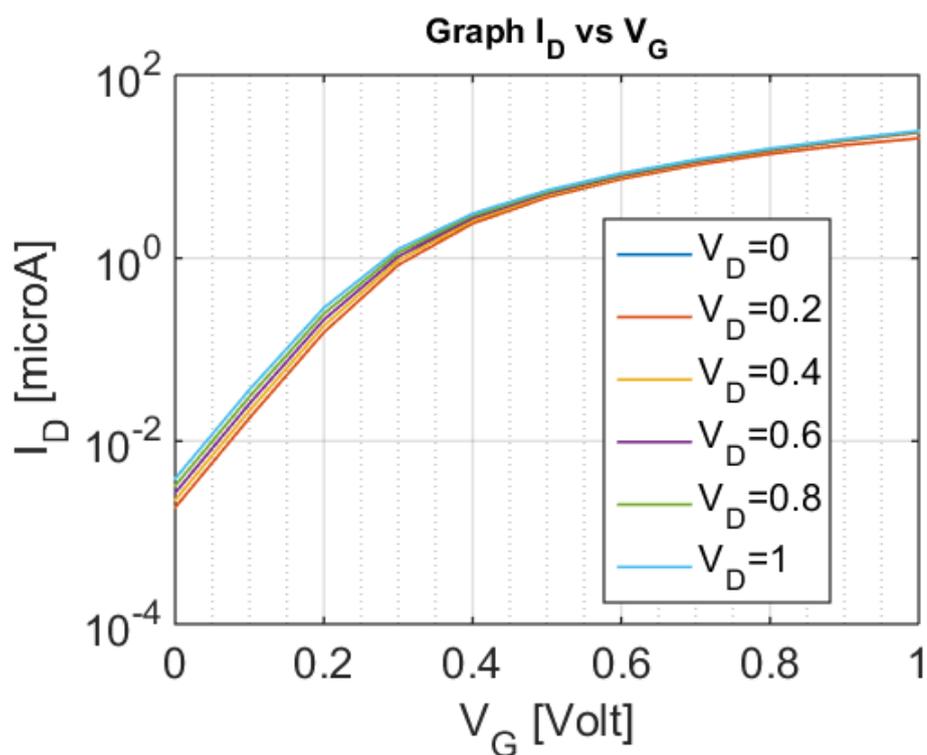


Figure IV. 83: La caractéristique $I_{Ds} - V_{gs}$ pour la température 450K à l'échelle logarithmique

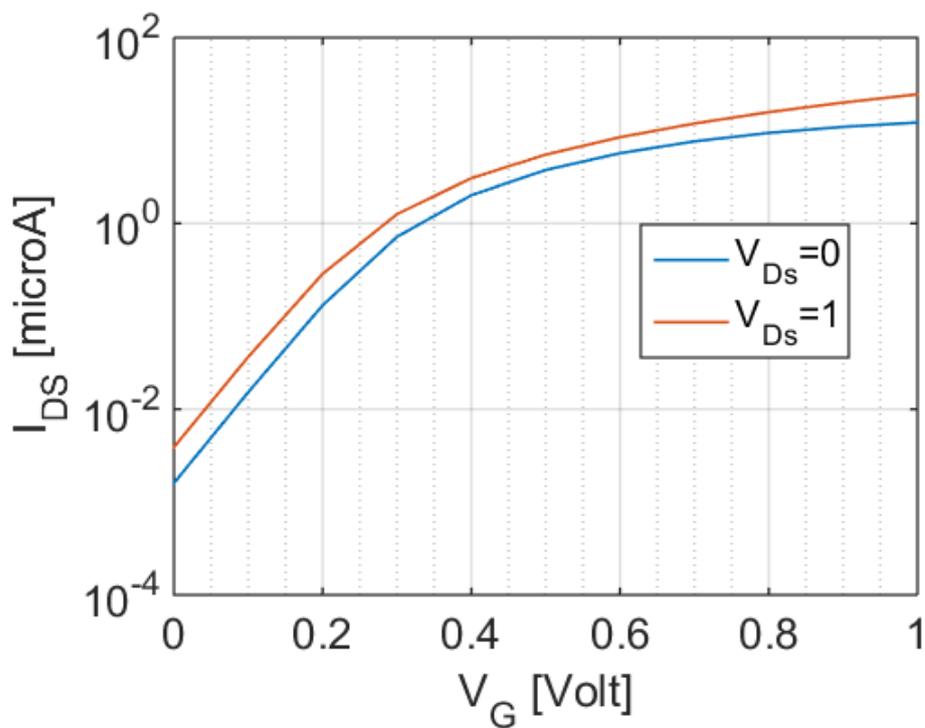


Figure IV. 84: La caractéristique $I_{Ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 450°K

IV .3.5 .1. Caractéristiques courant-tension pour T=500K

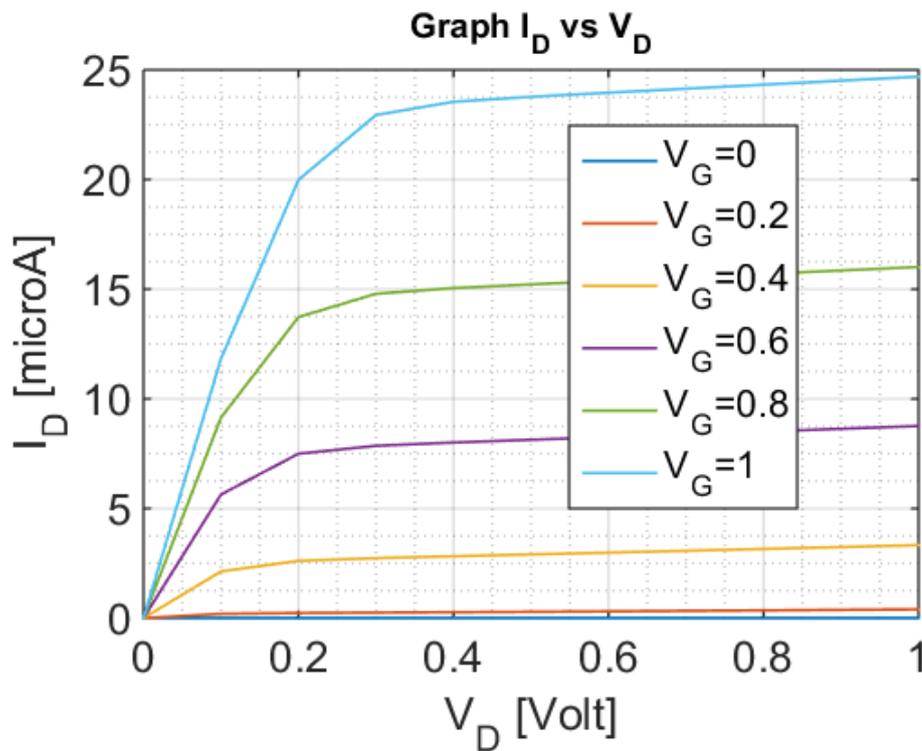


Figure IV. 85: La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour la température 500K

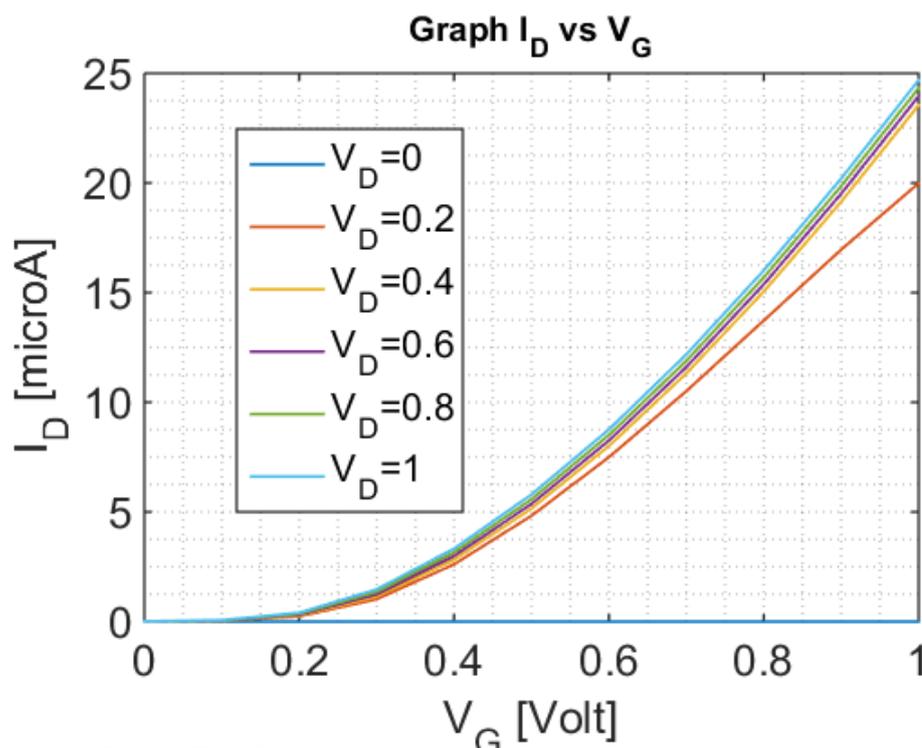


Figure IV. 86 : La caractéristique I_{ds} - V_{gs} pour la température 500K

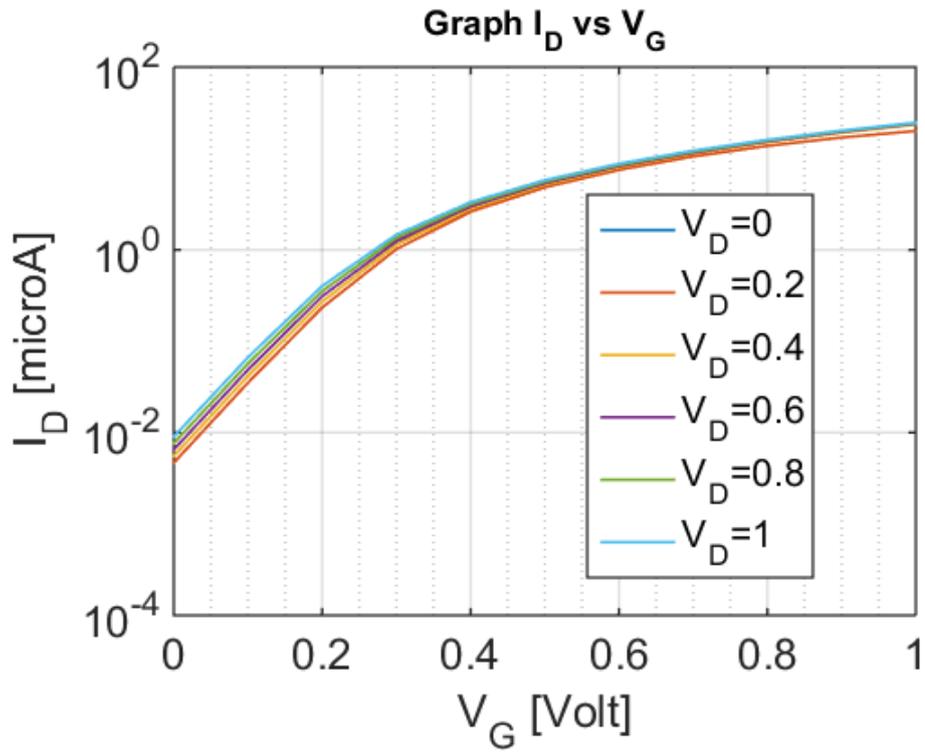


Figure IV. 87: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ pour la température 500K à l'échelle logarithmique

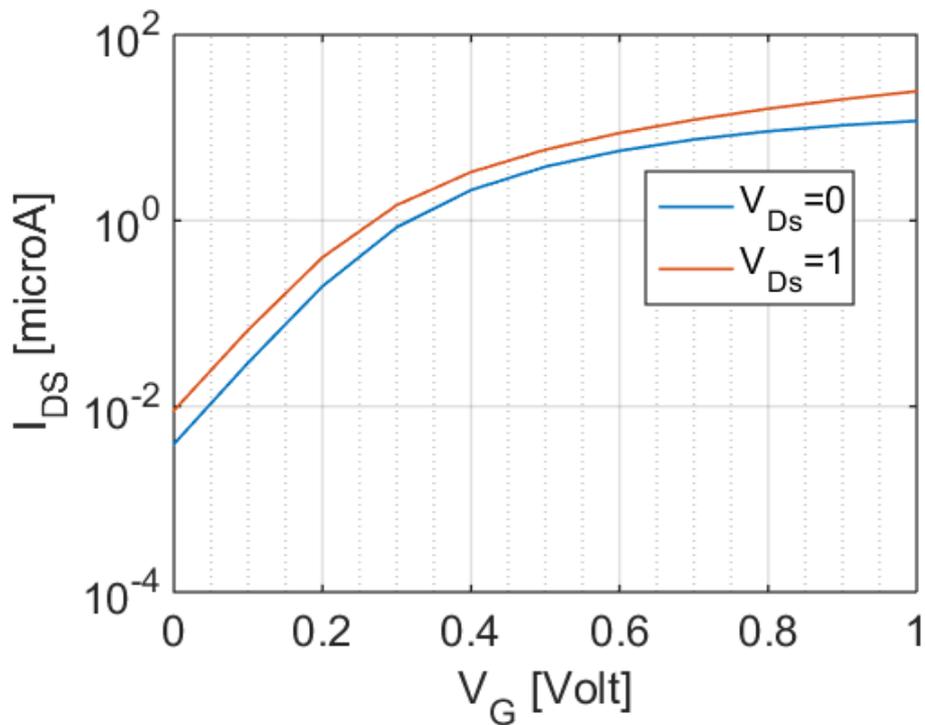


Figure IV. 88: La caractéristique $I_{ds} - V_{gs}$ à 0 et 1 V pour une température de 500°K

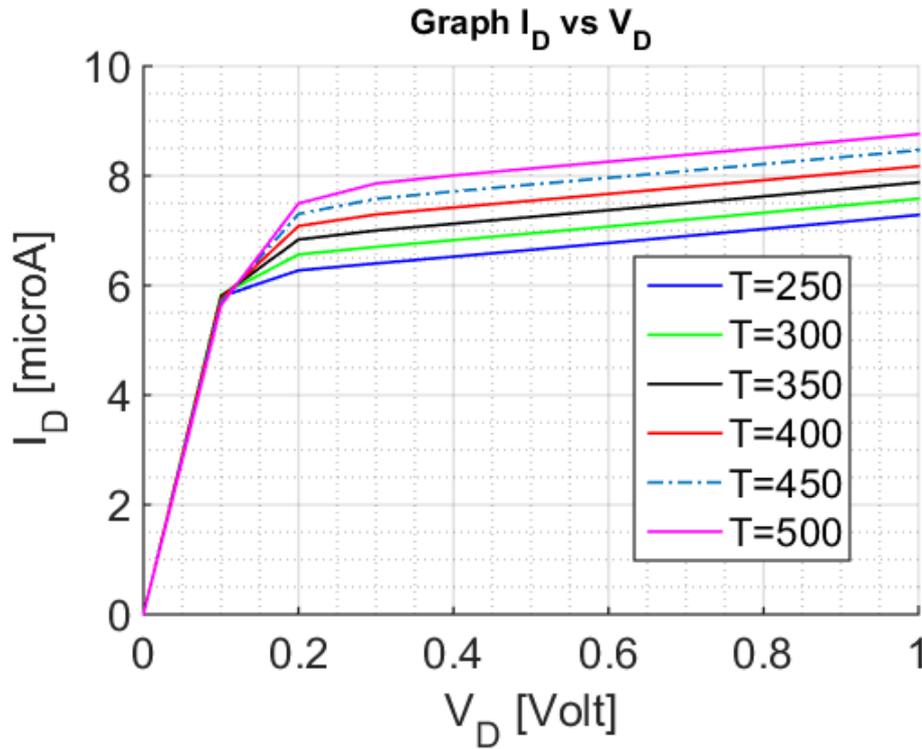


Figure IV. 889: Comparaison des caractéristiques de sortie (I_D - V_{DS}) pour différentes température a une tension de grille de 0,6 V.

	I_{on} (μA)	$I_{off}(\mu A)$	I_{on}/I_{off}	$DIBL$ (mV/V)	gm (S/m)	SS ($mV/decade$)	$Gd(S)$	V_{th} (V)
$T=250$	24.1	1.4×10^{-6}	17.26×10^6	39.62	47.20	54.37	1.9	0.3
$T=300$	24.2	1.91×10^{-5}	12.67×10^5	40.17	46.78	67.45	1.9	0.3
$T=350$	24.3	1.26×10^{-4}	19.28×10^4	41.17	46.31	80.43	1.88	0.3
$T=400$	24.4	5.2×10^{-4}	4.69×10^4	42.25	45.82	93.05	1.86	0.3
$T=450$	24.5	1.6×10^{-3}	15.31×10^3	44.18	45.33	105.34	1.85	0.3
$T=500$	24.6	3.9×10^{-3}	6.30×10^3	46.16	44.87	117.47	1.83	0.3

Tableau IV. 9: Les paramètres DC pour différentes températures

L'analyse montre que l'effet de la température n'affecte pas la tension de seuil du CNTFET, ce qui n'est pas possible dans le cas d'un MOSFET conventionnel, la température

affecte de manière négligeable les caractéristiques du dispositif CNTFET. Les figures IV.69, IV.73, IV.77, IV.81, IV.85, et les figures IV.70, IV.74, IV.78, IV.82, IV.86 montrent respectivement deux caractéristiques $I_{DS}=f(V_{DS})$ et $I_{DS}=f(V_{GS})$ du CNTFET étudié. Nous remarquons que le courant de drain varie linéairement avec V_{DS} jusqu'à une valeur dite tension de saturation V_{DSsat} ou la variation de I_{DS} devient faible (presque constante). Il se crée donc deux régions correspondant aux deux régimes de fonctionnement (l'une linéaire, l'autre saturée). Le courant de saturation I_{Dsat} atteint sa valeur maximale pour une tension V_{DS} maximale.

A une température plus élevée on a une énergie d'équilibre thermique plus élevée ce qui permet aux électrons de se déplacer librement dans le nanotube de carbone. On remarque que la température affecte le courant I_{off} et le DIBL (Abaissement de la barrière de potentiel induit par le drain) qui augmentent avec la température ainsi que la pente sous le seuil.

IV .3.6. L'étude de l'effet de l'abaissement de la barrière induite par le drain (DIBL) en fonction de Température.

Lorsque la longueur du canal entre dans le régime nanométrique, de nombreux effets indésirables quantiques et à canal court (SCE) comme la tension de seuil et le DIBL deviennent plus apparent. Ces effets nocifs provoquent une déviation de la performance idéale des CNTFET.

L'effet DIBL est un effet électrostatique qui peut changer le canal d'un état de pincement à la conduction et entraîner une fuite du courant et rend la grille inefficace pour contrôler le canal. Par conséquent, L'effet DIBL dégrade les performances du dispositif.

Comme on peut le voir à partir de Figure IV.89. En augmentant la température le DIBL augmente de manière significative. Il convient de noter que le l'effet DIBL se produit lorsque la hauteur de la barrière pour les porteurs du canal au bord de la source est réduite en

raison de l'influence du champ électrique sur le drain lors de l'application d'une tension de drain élevée. Un mécanisme similaire peut avoir lieu lorsque la température augmente. Par conséquent, l'énergie des porteurs augmente et un grand nombre de porteurs injectés dans le canal, conduisant à une augmentation et perte de courant.

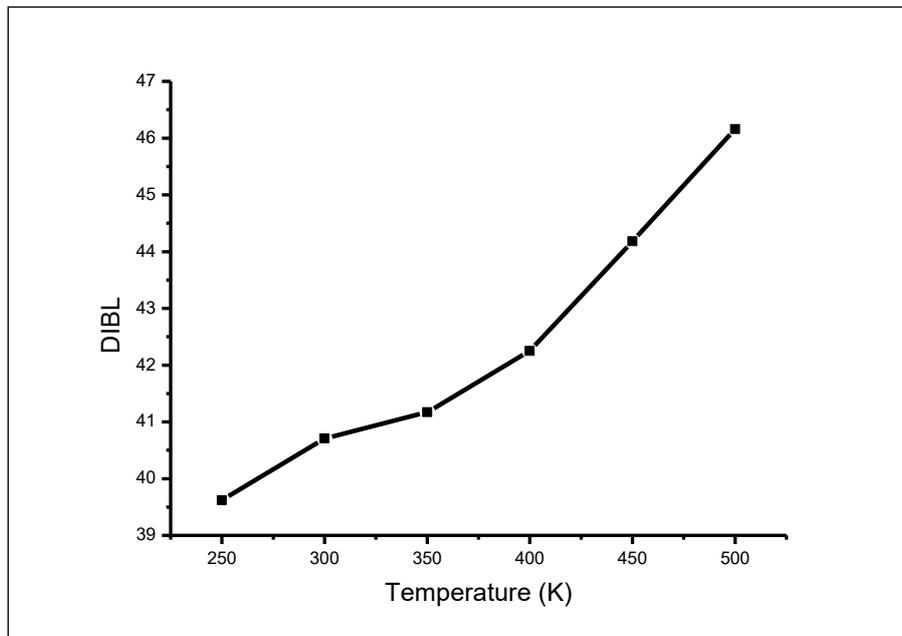


Figure IV. 90: Abaissement de la barrière induite par le drain (DIBL) en fonction de la température.

IV .3.7. L'étude de l'effet du rapport du courant I_{on}/I_{off} en fonction de la température

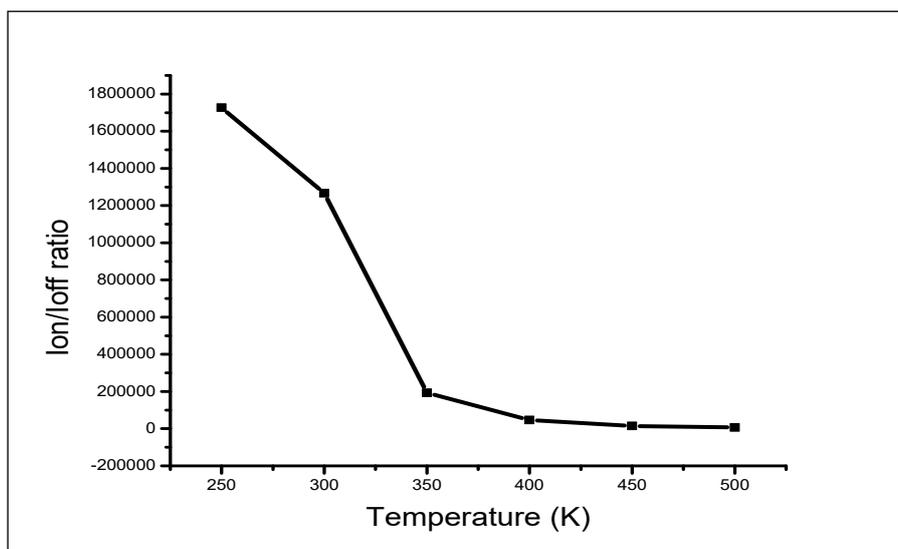


Figure IV. 91: Le rapport du courant I_{on}/I_{off} en fonction de la température.

La figure IV.90 permet de représenter le rapport (I_{on} / I_{off}) simulé du CNTFET pour différentes températures allant de (250 à 500 °K), Le rapport I_{on} / I_{off} , est considérablement réduit à des températures plus élevées. En augmentant la température le rapport I_{on} / I_{off} diminue. Il ressort du tableau que le rapport I_{on} / I_{off} à une température de 250°K, à une valeur de $17.26 \cdot 10^6$ et à 500° K elle est de $6.30 \cdot 10^3$. Les résultats impliquent que l'augmentation de la température diminue le contrôle de la grille sur le canal.

IV. 4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation que nous avons obtenus et nous mettant en évidence l'effet de la variation des paramètres du CNTFET sur ses caractéristiques électrique en mode DC. Les résultats ont alors été discutés et parfois comparés à différents résultats obtenus dans différentes études conduites dans le même sens.

L'intérêt de cette étude a été d'étudier les performances du CNFET comparé au MOSFET. Différents travaux effectués par d'autres chercheurs ont montré que les CNTFETs ont de meilleurs caractéristiques DC comparés aux MOSFETs

Nous avons étudié l'effet de la température, la chiralité, l'épaisseur d'oxyde et le diamètre ainsi que la constante diélectrique ainsi que le DIBL et le courant I_{on}/I_{off} sur les performances du dispositif CNTFET, une analyse de l'influence des paramètres cités ci-dessus sur les caractéristiques de sortie du transistor a été démontrée.

Les résultats que nous avons obtenus par cette étude nous permettent de conclure que les CNTFETs pourraient remplacer efficacement le MOSFET dans l'électronique à l'échelle nanométrique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Anisur Rahman, Jing Guo, Supriyo Datta, and Mark S. Lundstrom, " Theory of Ballistic Nanotransistors" IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 50, NO. 9, SEPTEMBER 2003
- [2] A.M. Hashim , H.H. Ping, and C.Y. Pin"Characterization of MOSFET-like Carbon Nanotube Field Effect Transistor"Material Innovations and Nanoelectronics (MINE) Research Group,International conference on advanced materials and nanotechnology,2007
- [3] Khoder Bachour , Majdeddin Ali , Ied Alabboud, "Impact of changing channel length and band gaps of a carbon nanotube on the current of a Carbon Nanotube Field Effect Transistors (CNTFETs) "*Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences NJES*, 23(1)21-29, 2020.
- [4]A. Laribi, A.Guen Bouazza "Effect of Chirality and Oxide Thickness on the Performance of a Ballistic CNTFET," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 8, No. 6, pp. 4941~4950,Unit of Research Materials and Renewable Energies, Department of Electronics, Faculty of Technology, University Abou-Bakr Belkaid, Algeria, 2018 .
- [5] D. Dass and R. Vaid, "Impact of SWCNT Band Gaps on the Performance of a Ballistic Carbon Nanotube Field Effect Transistors (CNTFETs)," *Journal of nano- and electronic physics*, vol/issue: 9(4), 2017.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La technologie à base de silicium a connu une croissance phénoménale au cours des dernières années.

Une grande partie du succès du transistor MOS est due la réduction de ses dimensions à l'échelle nanométrique, ce qui se traduit par de meilleures performances. Néanmoins, le MOSFET va atteindre ses limites. Afin de surmonter les problèmes liés à la miniaturisation notre travail a été porté sur l'étude du transistor CNTFET qui est l'une des alternatives les plus prometteuses en raison de ses propriétés électriques supérieures.

Nous avons tout d'abord commencé par une étude sur le nanotube de carbone qui est le matériau de base du transistor CNTFET nous avons fait une recherche bibliographique sur ses caractéristiques.

Le NTC possède des propriétés uniques qui peuvent améliorer les performances du dispositif CNTFET, ils peuvent supporter une densité de courant très élevée, en fonction de sa chiralité les NTC peuvent avoir des caractéristiques semi-conductrices ou métalliques. Les CNT semi-conducteurs peuvent être utilisées comme canaux de transistors car ils présentent les caractéristiques d'un semi-conducteur, tandis que les CNT métalliques peuvent être utilisées en tant que fil sur des cartes de circuit imprimé ou des interconnexions électroniques. Ensuite une recherche bibliographique sur les caractéristiques du transistor à effet de champ à base de nanotubes (CNFET). Fondamentalement, la structure de CNFET est presque identique à celle de MOSFET la seule différence est que le canal de silicium est maintenant remplacé par le nanotube de carbone. La structure de MOSFET a évolué passant de la grille arrière à la grille du haut, et récemment une structure verticale a été proposée.

La dernière partie nous l'avons consacré à l'étude de simulation donc un modèle mathématique analytique a été utilisé dans cette thèse afin de d'étudier les caractéristiques I-V de CNFET.

Le courant de drain calculé dans le modèle de simulation est basé sur la charge totale dans la première sous-bande du nanotube, ce qui conduit à un courant de drain inférieur pour toute tension de drain et de grille spécifiée.

Notre objectif principal a été d'examiner l'impact de la variation des différents paramètres (l'effet de la chiralité, l'épaisseur de l'oxyde de grille, la température, la constante diélectrique) du N-CNTFET étudié sur ses caractéristiques en mode DC. Outre une analyse comparative a été faite entre nos résultats et les travaux déjà réalisé par d'autres groupes de chercheurs.

En conclusion, le transistor a nanotube de carbone CNFET à un dispositif qui mérite d'être étudié et amélioré pour devenir un dispositif de commutation efficace. Néanmoins il est encore loin d'être un dispositif commercial dans l'industrie électronique, mais les chercheurs font un effort considérable pour améliorer ses performances afin de remplacer le MOSFET au cœur des applications numériques.

LISTE DES PUBLICATIONS

LISTE DES PUBLICATIONS :

Conférence Internationale :

Asma Laribi, Ahlam Guen Bouazza, “ *Etude de l’effet de la température sur le transistor a nanotube de carbone (CNTFET)* “. **ICEMAEP’18 Fourth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution: April 29-30, 2018, Constantine, Algeria**, 1141-1150.

Publication Internationale:

A. Laribi, A.Guen Bouazza “*Effect of Chirality and Oxide Thickness on the Performance of a Ballistic CNTFET,*” **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, Vol. 8, No. 6, pp. 4941~4950, Unit of Research Materials and Renewable Energies, Department of Electronics, Faculty of Technology, University Abou-Bakr Belkaid, Algeria, 2018.

Résumé

Ces dernières années des progrès colossaux ont permis de comprendre la physique des dispositifs électroniques aux nanotubes de carbone, ce qui a manifestement et indéniablement permis d'identifier les différentes applications potentielles de cette technologie innovante.

La difficulté de réduire les transistors au silicium au-delà d'une certaine taille est reconnue depuis des années.

Les nanotubes de carbone (CNT) offrent une solution intéressante aux problèmes de dimensionnement des transistors, depuis leur découverte ils révèlent en permanence des propriétés physiques importantes. À cet égard, les nanotubes de carbone (CNT) sont considérés comme des candidats prometteurs pour les futurs dispositifs nanoélectroniques tels que le transistor à effet de champ à base de nanotubes de carbone (CNTFET).

Dans ce travail, Nous avons contribué dans l'étude des performances des composants aux nanotubes de carbone tel que le CNTFET en variant plusieurs paramètres et voir leurs impacts sur le comportement du transistor ainsi que sur la caractéristique électrique du transistor en particulier le courant de drain $I(V)$, ce travail est basé sur un programme de simulation numérique.

Les résultats obtenus seront comparé avec d'autres travaux qui ont été déjà effectué dans ce sens.

Mots-clés : Dispositifs électroniques, Transistors, CNT, CNTFET, $I(V)$, Simulation numérique.

Abstract

In recent years, enormous progress has been made in understanding the physics of carbon nanotube electronic devices, which has clearly and undeniably led to the identification of the different potential applications of this innovative technology.

The difficulty of reducing silicon transistors beyond a certain size has been recognized for years.

Carbon nanotubes (CNTs) offer an interesting solution to the problems of sizing transistors, since their discovery they constantly reveal important physical properties. In this respect, carbon nanotubes (CNTs) are considered promising candidates for future nanoelectronics devices such as the carbon nanotube field effect transistor (CNTFET).

In this work, we contributed in the study of the performance of the components to carbon nanotubes such as the CNTFET by varying several parameters and their impact on the behavior of the transistor as well as on the electrical characteristic of the transistor, in particular the drain current. $I(V)$, this work is based on a numerical simulation program.

The results obtained will be compared with other work that has already been done in this direction.

Keywords: Electronic devices, Transistors, CNT, CNTFET, $I(V)$, Numerical simulation.

ملخص:

في السنوات الأخيرة ، تم إحراز تقدم هائل في فهم فيزياء الأجهزة الإلكترونية لأنابيب الكربون النانوية، والتي أدت بوضوح وبشكل لا يمكن إنكاره إلى تحديد التطبيقات المحتملة المختلفة لهذه التكنولوجيا المبتكرة.

تم الاعتراف بصعوبة تقليل ترانزستورات السيليكون التي تتجاوز حجم معين لسنوات. تقدم أنابيب الكربون النانوية (CNTs) حلاً مثيراً للاهتمام لمشكلات ترانزستور التحجيم ، حيث إن اكتشافها يكشف باستمرار عن خصائص فيزيائية مهمة. في هذا الصدد ، تعتبر أنابيب الكربون النانوية (CNTs) مرشحة واحدة للأجهزة الإلكترونية النانوية المستقبلية مثل ترانزستور تأثير حقل الأنابيب النانوية الكربونية (CNTFET).

في هذا العمل ، ساهمنا في دراسة أداء المكونات في الأنابيب النانوية الكربونية مثل CNTFET من خلال تغيير العديد من المعلمات وتأثيرها على سلوك الترانزستور وكذلك على الخاصية الكهربائية للترانزستور ، ولا سيما الصرف تيار. $I(V)$ ، يستند هذا العمل إلى برنامج محاكاة عددي. ستتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع الأعمال الأخرى التي تم تنفيذها بالفعل في هذا الاتجاه. **الكلمات المفتاحية:** الأجهزة الإلكترونية ، الترانزستورات ، CNT ، CNTFET ، $I(V)$ ، المحاكاة العددية.

Résumé

Ces dernières années des progrès colossaux ont permis de comprendre la physique des dispositifs électroniques des nanotubes de carbone , ce qui a manifestement et indéniablement permis d'identifier les différentes applications potentielles de cette technologie innovante.

La difficulté de réduire les transistors au silicium au-delà d'une certaine taille est reconnue depuis des années.

Les nanotubes de carbone (CNT) offrent une solution intéressante aux problèmes de dimensionnement des transistors, depuis leur découverte ils révèlent en permanence des propriétés physiques importantes. À cet égard, les nanotubes de carbone (CNT) sont considérés comme des candidats prometteurs pour les futurs dispositifs nanoélectroniques tels que le transistor à effet de champ à base de nanotubes de carbone (CNTFET).

Dans ce travail, Nous avons contribué dans l'étude des performances des composants aux nanotubes de carbone tel que le CNTFET on variant plusieurs paramètres et voir leurs impacts sur le comportement du transistor ainsi que sur la caractéristique électrique du transistor en particulier le courant de drain $I(V)$, ce travail est basé sur un programme de simulation numérique.

Les résultats obtenus seront comparé avec d'autres travaux qui ont été déjà effectué dans ce sens.

Mots-clés : Dispositifs électroniques, Transistors, CNT, CNTFET, $I(V)$, Simulation numérique.

Abstract

In recent years, enormous progress has been made in understanding the physics of carbon nanotube electronic devices, which has clearly and undeniably led to the identification of the different potential applications of this innovative technology.

The difficulty of reducing silicon transistors beyond a certain size has been recognized for years.

Carbon nanotubes (CNTs) offer an interesting solution to the problems of sizing transistors, since their discovery they constantly reveal important physical properties. In this respect, carbon nanotubes (CNTs) are considered promising candidates for future nanoelectronic devices such as the carbon nanotube field effect transistor (CNTFET).

In this work, we contributed in the study of the performance of the components to carbon nanotubes such as the CNTFET by varying several parameters and their impact on the behavior of the transistor as well as on the electrical characteristic of the transistor, in particular the drain current. $I(V)$, this work is based on a numerical simulation program.

The results obtained will be compared with other work that has already been done in this direction.

Keywords: Electronic devices, Transistors, CNT, CNTFET, $I(V)$, Numerical simulation.

ملخص:

في السنوات الأخيرة ، تم إحراز تقدم هائل في فهم فيزياء الأجهزة الإلكترونية لأنابيب الكربون النانوية، والتي أدت بوضوح وبشكل لا يمكن إنكاره إلى تحديد التطبيقات المحتملة المختلفة لهذه التكنولوجيا المبتكرة.

تم الاعتراف بصعوبة تقليل ترانزستورات السيليكون التي تتجاوز حجم معين لسنوات.

تقدم أنابيب الكربون النانوية (CNTs) حلاً مثيراً للاهتمام لمشكلات ترانزستور التحجيم ، حيث إن اكتشافها يكشف باستمرار عن خصائص فيزيائية مهمة. في هذا الصدد ، تعتبر أنابيب الكربون النانوية (CNTs) مرشحة واعدة للأجهزة

الإلكترونية النانوية المستقبلية مثل ترانزستور تأثير حقل الأنابيب النانوية الكربونية (CNTFET).

في هذا العمل ، ساهمنا في دراسة أداء المكونات في الأنابيب النانوية الكربونية مثل CNTFET من خلال تغيير العديد من المعلمات وتأثيرها على سلوك الترانزستور وكذلك على الخاصية الكهربائية للترانزستور ، ولا سيما $I(V)$. يستند هذا العمل إلى برنامج محاكاة عددي.

ستتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع الأعمال الأخرى التي تم تنفيذها بالفعل في هذا الاتجاه.

الكلمات المفتاحية: الأجهزة الإلكترونية ، الترانزستورات ، CNT ، CNTFET ، $I(V)$ ، المحاكاة العددية.