

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de

**Master**

En

« Télécommunications »

**Option :**

« Systèmes des Télécommunications »

**Titre :**

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION D'UN DISPOSITIF MIS-HEMT  
FIELD-PLATE HEMTs ALGAN/GAN POUR LES APPLICATIONS  
A HAUT DEBIT**

**Réalisé par:**

ZOUGGAR Khouloud

TOUMI Salima

**Encadré par:**

Dr. KADDECHE Mourad

Année Universitaire: 2017/2018

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de  
l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure  
bonne santé et longue vie.*

*A ces que j'aime beaucoup et qui m'ont soutenu et tout au long  
de ce projet: A mes frères et mes sœurs.*

*A toute ma famille et mes amis*

*A mon binôme **SALIMA** et toute la famille **TOUMI**.*

*Et*

*à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce pro  
jet soit possible, je vous dis merci.*

**ZOUGGAR KHOULOU**

## *Dédicaces*

*Al'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.*

*Ala lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et mes sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir leur revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.*

**TOUMI SALIMA**

## *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté examiné ce mémoire.*

*Nous remercions Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.*

*Nous remercions Monsieur Kaddache Mourad, notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisées qui nous ont aidé à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.*

## **Résumé**

La technologie des nitrures est actuellement la plus prometteuse pour la fabrication des dispositifs électriques à haute mobilité l'électronique de puissance comme moyen de contrôle de l'énergie prend une place très importante dans les technologies modernes.

Le présent travail a été consacré à l'étude des différentes propriétés du semi-conducteur Nitrure de Gallium (GaN) et la simulation de la structure MIS-HEMT FP-HEMT à base d'hétérostructures AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>.

Nous avons présenté une nouvelle conception de ce dispositif pour des applications de haut débit, basée sur l'utilisation d'une structure MIS-HEMT (un diélectrique) combiné avec une plaque de champ (Field-Plate).

### **Mots clés :**

transistor à haute mobilité électronique (HEMT), nitrure de gallium (GaN), nitrure d'aluminium de gallium (AlGa<sub>N</sub>), MIS-HEMT FIELD-PLATE HEMT , SILVACO.

## **Abstract**

Nitride technology is currently the most promising for the manufacture of high-mobility electrical devices Power electronics as a means of controlling energy is very important in modern technologies.

The present work has been devoted to the study of the different properties of Gallium Nitride (GaN) semiconductor and the simulation of the MIS-HEMT FP-HEMT structure based on AlGa<sub>N</sub> / Ga<sub>N</sub> heterostructures.

We have presented a new design of this device for broadband applications, based on the use of a MIS-HEMT structure (a dielectric) combined with a field-plate.

### **Keywords:**

High electronic mobility transistor (HEMT), gallium nitride (GaN), gallium aluminum nitride (AlGa<sub>N</sub>), MIS-HEMT FIELD-PLATE HEMT, SILVACO.

## Liste des abréviations

**GaN** : Le nitrure de galium.

**GaAs** : Arséniure de galium.

**ALGaN**: Nitrure de gallium-Aluminium.

**HEMT**: High Electron Mobility Transistor.

**JFET**: Transistor à effet de champ à jonction

**ZCE**: La Zone de Charge d 'Espace.

**DEL** : diodes électroluminescentes.

**MOSFET**: Métal Oxyde Semi-conducteur transistor.

**MESFET**: Métal Semi-conducteur Field Effect Transistor.

**SILVACO**: SiliconValley Corporation.

**MIS**: Métal Isolant Semi-conducteur.

**FP**: Field-Plate.

**ZnSe**: Séléniure deZinc.

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**: Oxyde d'aluminium.

## ***Liste des figures***

**Fig.I.1** : Maille cristalline de GaN dans sa phase wurzite.

**Fig.I.2** : polarités gallium et azote dans GaN hexagonal

**Fig.I.3** : Structure cristalline blende de zinc du GaN.

**Fig.I.4** : Semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect

**Fig.I.5** : Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN.

**Fig.I.6** : Mise en évidence de l'effet de la contrainte  $\sigma$  dans la phase wurzite suivant la direction (0001).

**Fig.I.7** : Structure de bandes d'un simple puits quantique GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N qui cristallise dans la phase wurzite

**Fig.II.1** : Transistor JFET à canal N et symboles des deux types de JFET

**Fig.II.2** : a) Comportement du JFET en fonction de  $V_D$  pour  $V_G < 0$ , b) régime de pincement .  
c) caractéristique I-V du JFET.

**Fig.II.3** : Vue en coupe d'un MESFET

**Fig.II.4** : Schéma d'un MESFET AlGaAs

**Fig.II.5** : transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET.

**Fig.II.6** : Coupe schématique d'un transistor MOSFET à canal N.

**Fig.II.7** : Principe d'un MOSFET à canal N : les zones hachurées sont de type N .

**Fig.II.8** : Structure d'un transistor HEMT

**Fig.II.9** : Vue en coupe du HEMT AlGa<sub>x</sub>N/GaN

**Fig.II.10**: Schéma de la structure d'un HEMT AlGa<sub>x</sub>N/GaN classique.

**Fig.II.11**: polarisation d'un transistor à effet de champ.

**Fig.II.12**: caractéristiques  $I_{DS}(V_{DS})$  pour différentes tension  $V_{GS}$  d'un HEMT GaAs.

**Fig.II.13**: Structure du Field plate employée par Chini et al.

**Fig.II.14** : Nouvelle structure du Field Plate présenté par Karmalkar et al

**Fig III.1:** Entrées et sorties d'Atlas .

**Fig III.2:** Ordre des groupes des commandes d'Atlas .

**Fig III.3 :** spécification de maillage

**Fig III.4 :** Spécification des régions et les électrodes

**Fig III.5 :** Attribution de matériaux pour les régions

**Fig III.6 :** Organigramme du programme de simulation

**Fig III.7 :** a) Structure étudiée à base de ALGaN/GaN, b) à base de AGaAS/GaAs

**Fig III.8 :** pour les deux structure GaN-HEMT et le GaAs-HEMT.

**Fig III.9 :** Structure MIS-HEMT FP étudiée

**Fig III.10 :** Les caractéristiques courant - tension de drain ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) pour les deux structures

**Fig III.11:** les caractéristiques ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor AlGaN/GaN FP MIS-HEMT

**Fig III.12 :** Les caractéristiques ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) en fonction de variation de largeur de la grille.

**Fig III.13:** L'effet de variation du taux d'Aluminium sur la caractéristique ( $I_{ds}$  -  $V_{ds}$ ) du transistor AlGaN/GaN MIS-HEMT FP-HEMT.

**Fig III.14:** L'effet d'ajout d'une Kaplayer sur la caractéristique ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP

**Fig III.15:** L'effet de variation de l'épaisseur de cap-layer sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP.

**Fig III.16:** Variation du travail de Grille sur la caractéristique ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) de transistor MIS-HEMT FP ALGaN/GaN.

**Fig III.17:** L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaN sur la caractéristique ( $I_{ds}$  -  $V_{ds}$ ).

**Fig III.18:** comparaison entre le HEMT à base de GaN et le HEMT à base de GaAs

# Table de Matière

**Dédicaces**

**Remerciement**

**Résumé**

**Liste des abréviations**

**Introduction générale ..... 1**

## **Chapitre I : Le nitrure de Gallium(GaN)**

I.1.Introduction .....	2
I.2. Caractéristiques du Nitrure deGallium.....	2
I.2.1 Le NitruredeGallium .....	2
I.3 Propriétés de nitruredeGallium .....	2
I.3.1 Propriétés cristallines .....	2
I.3.1.1 Structure de type wurtzite .....	2
I.3.1.2 Structure de type zinc blende .....	4
I.3.1.3 Comparaison entre les deux structures .....	4
I.3.2 Propriétés physiques.....	5
I.3.3 Propriétés électroniques .....	5
I.3.4 Propriétés électriques .....	6
I.3.4.1 La polarisation.....	6
I.3.4.2 La polarisation spontanée .....	6
I.3.4.3 La polarisation piézoélectrique.....	7
I.3.5 Propriétés optiques du GaN.....	8
I.3.6 Propriétés thermiques.....	8
I.3.6.1 Dilatation thermique.....	8
I.3.6.2 Conductivité thermique.....	9

I.3.6.3 Chaleurspécifique.....	9
I.3.6.4 TempératuredeDebye .....	10
I.4Le champ de claquage .....	10
I.5HétérostructureGaN/AlGaN.....	10
I.5.1Propriétés del'hétérostructuresGaN/AlGaN.....	10
I.6 Le dopage .....	11
I.6.1 Le dopagen .....	11
I.6.2 Le dopagep .....	11
I.7 AvantagesduGaN .....	12
I.8Conclusion.....	13

## **Chapitre 2 : Le transistor HEMT à base de GaN et de AlGaN**

II.1Introduction.....	15
II.2Généralité a transistor à effetdechamp.....	15
II.2.1 Le transistor à effet de champ àjonction (JFET).....	15
II.2.2 Principe de fonctionnementdu JFET.....	15
II.2.3.Contraintes etdomaines d'utilisation .....	16
II.2.2 Transistor a effet de champ à grilleisolée (MESFET) .....	17
II.2.2.1 Description.....	17
II.2.2.2 Le Principe de fonctionnementdu MESFET.....	18
II.2.2.3 Contraintes etdomainesd'utilisation .....	19
II.1.3LeMOSFET .....	20
II.2.3.1 Description.....	20
II.2.3.2 Principe de fonctionnementdu MOSFE.....	20
II.2.3.4Contraintes etdomaines d'utilisation .....	21
II.3LetransistorHEMT .....	22
II.3.1 Historique.....	22
II-3.2 Descriptiondes couches .....	23
II.3.2 Le transistor HEMT àbased'AlGaN/GaN .....	24
II.3.2.1 Structured'un HEMT .....	24
II.3.2.2 Principede fonctionnement .....	25
II.3.4 Caractéristiques ID(VDS) des HEMT .....	26

II.3.4.1 Fonctionnement linéaire .....	26
II.3.4.2 Régime de saturation du courant.....	27
II.5 Le Field Plate-HEMT .....	28
II.5.1 Historique.....	28
II.5.2 Etudes du Field Plate « l'électrode de champ » avec différents topologies.....	28
II.6 Conclusion .....	30

### **Chapitre 3 : Simulation et interprétation des résultats**

III.1 Introduction .....	32
III.2 Présentation de TCAD-SILVACO .....	32
III.2.1 Présentation du logiciel ATLAS-SILVACO .....	32
III.2.2 Ordres de commandes d'Atlas.....	33
III.2.3 Les commandes fondamentales .....	34
III.2.2 Spécification de la structure .....	36
III.2.2.1 Le maillage .....	36
III.2.2.2 Spécification des régions et les électrodes .....	37
III.2.2.1.1 Attribution de matériaux pour les régions .....	38
III.2.2.1.1 Doping .....	39
III.2.2.1.2 Modèles .....	39
III.2.2.6 Beam.....	40
III.2.2.7 Contact.....	40
III.2.2 Sélection de la méthode numérique.....	40
III.2.4 Spécification des solutions .....	41
III.2.4.1 Log.....	41
III.2.4.2 Solve .....	44
III.2.4.3 Load et save .....	41
III.2.5 Analyse des résultats .....	41
III.2.6 Organigramme de simulation .....	42
III.3 Résultats de simulation et interprétation.....	43
III.3.1 Etude comparative entre le HEMT à base de AlGaIn/GaN et le HEMT à base de GaAs/AlGaAs .....	43

III.3.1.2 Les caractéristiques électriques du HEMT .....	44
III.3.2 Etudes comparatif entre la technologie Field- Plate HEMT à base de AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et MIS-HEMT Field-Plate proposée .....	46
III.3.2.1 Topologie de la structure étudiée (proposée) en utilisant la technologie MIS-HEMT Field-Plate	46
III.3.2.2 L'effet de la variation de la largeur de la grille de la structure AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MIS-HEMT FP-HEMT	48
III.3.2.3 L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche donneuse de la structure AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> FP-HEMT .....	49
III.3.2.4 L'effet de la variation du taux d'aluminium de la couche donneuse de la structure MIS-HEMT FIELD-PLATE AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .....	50
III.3.2.5 L'effet de l'ajout d'une couche cap-layer sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .....	51
III.3.2.6 L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche cap-layer de la structure MIS-HEMT FP AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .....	52
III.3.2.7 Variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) de la structure MIS-HEMT FP a base Ga <sub>N</sub> .....	53
III.3.2.8 L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGa <sub>N</sub> sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP .....	54
III.3.2.9 L'influence du diélectrique de la structure MIS sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .....	55
III.4 Conclusion .....	56
Conclusion générale .....	58
Bibliographie	

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

De nos jours, l'intérêt aux composées III-V tels que le nitrure de gallium (GaN) a été spectaculaire. Le GaN admet une bande interdite large et directe, une grande stabilité chimique et thermique, de très bonnes propriétés optiques, et des propriétés physiques très intéressantes pour opérer en haute température, haute puissance et haute fréquence. Il est très prometteur pour des applications en optoélectronique et hyperfréquences.

Le nitrure de gallium présente la particularité d'être un matériau pyroélectrique et piézoélectrique. Cette spécificité permet de réaliser des transistors HEMTsGaN dont la densité d'électrons à l'interface est très grande. En contre partie, les procédés de fabrication utilisés pour les HEMT AlGaN/GaN sont complexes et entraînent la formation de nombreux défauts cristallins.

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude et à la modélisation d'une nouvelle structure proposée MIS-HEMT FP à base d'hétérostructure AlGaN/GaN, afin d'améliorer les performances de ce composant qui est très utilisé dans les applications militaires, spatiales ou civiles, dans le domaine des hautes fréquences. Pour cela, la simulation numérique bidimensionnelle ATLAS-SILVACO, est utilisée pour définir les modèles qui décrivent les spécificités de ce composant.

Ce mémoire se décompose en trois chapitres :

Le premier étant destiné à la description du nitrure de Gallium et son alliage le AlGaN, matériau de base servant à cette étude, et où on a présenté ses propriétés structurales, électriques, électroniques et optiques.

Dans le second chapitre, nous allons présenter l'aspect physique et électrique des différentes technologies existantes des transistors à effet de champs utilisés pour haut débit tels que les JFET, MOSFET, MESFET, et le HEMTs.

Dans le troisième chapitre, et dans une première partie, on s'est consacré à la présentation du principe de fonctionnement du logiciel de simulation numérique ATLAS, pour l'étude de notre structure proposée MIS-HEMT FP.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la nouvelle technologie proposée des composants HEMT, c'est la structure MIS-HEMT FP et de déterminer les caractéristiques électriques  $I_{ds}$ - $V_{ds}$ , avec l'influence des différents paramètres physiques et technologiques. En fin de ce mémoire, nous donnerons une conclusion générale avec les perspectives.

# **Chapitre1**

## **LE NITRURE GALLIUM (GaN)**

## **I.1 Introduction :**

Le GaN (nitrure de gallium) est un semi-conducteur III-N, montrant une très grande largeur de bande interdite, il présente donc des tensions de polarisation et des densités de porteurs importantes à haute température. De plus, ce semi-conducteur présente également un champ de claquage élevé, cinq fois plus élevé que celui de l'arséniure de gallium. Ce critère permet une utilisation à haut débit. Le GaN offre également la possibilité de réaliser des hétérojonctions avec l'AlN et l'AlGaIn, permettant la fabrication de dispositif HEMTs. L'objectif de ce premier chapitre est de rappeler l'intérêt des matériaux à base de GaN.

## **I.2 Caractéristiques du Nitrure de Gallium :**

### **I.2.1 Le Nitrure de Gallium :**

Le GaN est un semi-conducteur à large bande interdite (3,4 eV) utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de grande puissance ou de haute fréquence. C'est un composé binaire (groupe III/groupe V) qui possède une semi conductivité intrinsèque. Il est peu sensible aux rayonnements ionisants (comme tous les autres nitrures du groupe III), ce qui fait de lui un matériau approprié pour les panneaux solaires des satellites[1].

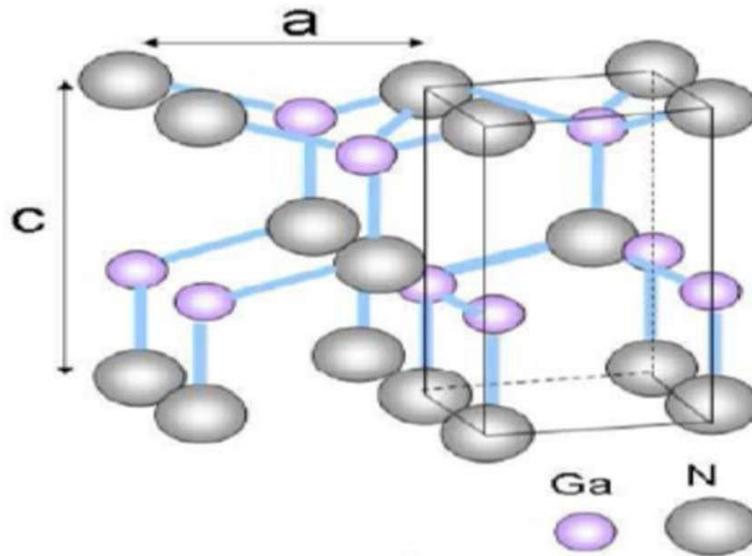
## **I.3 Propriétés de nitrure de Gallium**

### **I.3.1 Propriétés cristallines**

Le nitrure de gallium se présente sous deux formes cristallines : la structure de type Wurtzite (hexagonale) et la structure blende de zinc (cubique)[2].

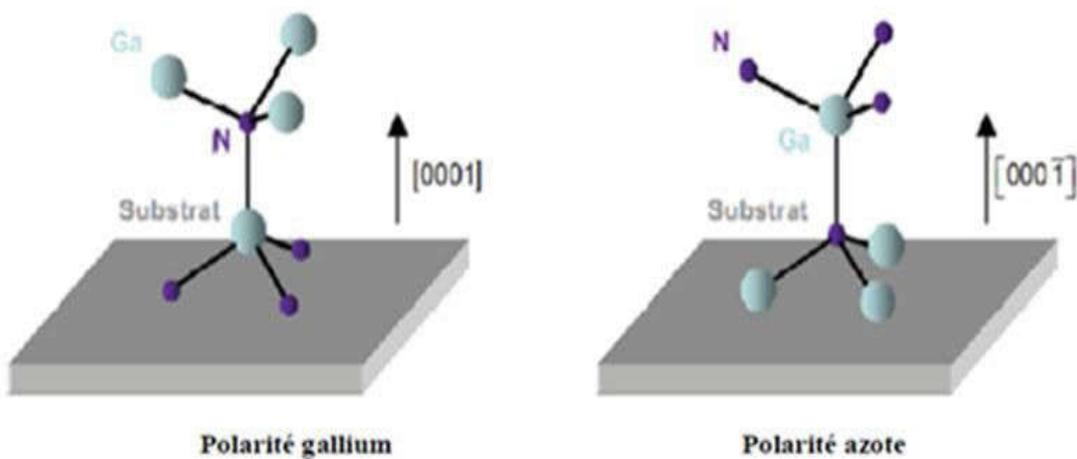
#### **I.3.1.1 Structure de typewurtzite**

Dans la structure de type wurtzite (figure1), les atomes d'azote (N) forment un empilement hexagonal compact. Les atomes de gallium (Ga) occupent la moitié des sites tétraédriques. Cette structure est caractérisée par les paramètres de maille  $a$  et  $c$ , mais aussi par le paramètre  $u = l/c$ , où  $l$  est la longueur de liaison Ga-N suivant  $c$  [3].



**Figure I.1** : Maille cristalline de GaN dans sa phase wurzite.

La structure wurzite n'est pas symétrique par rapport au plan (0001), on parle alors de polarité. En effet, les directions  $[0001]$  et  $[000\bar{1}]$  ne sont pas équivalentes. Pour le nitrure de gallium, il existe deux arrangements possibles des atomes de gallium et d'azote lors de la croissance. Dans le cas où la liaison orientée Ga-N pointe vers la surface, on dit que l'on a une polarité gallium (figure 2). Dans le cas contraire, on a une polarité azote. Il convient de noter que la polarité d'une couche ne présage pas de la nature des atomes en surface. Par exemple, une couche à polarité gallium peut aussi bien se terminer par des atomes de gallium que par des atomes d'azote en surface[4].



**FigureI. 2** : polarités gallium et azote dans GaN hexagonal.

### I.3.1.2 Structure de type zinc blende:

Cette structure est formée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées comprenant chacun un type d'atomes décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille. Cette structure est thermodynamiquement instable et est moins exploitée par rapport à l'autre type, la valeur de sa maille élémentaire est de  $4.511 \text{ \AA}$  à  $\alpha = \text{A0}$  à 300K [5].

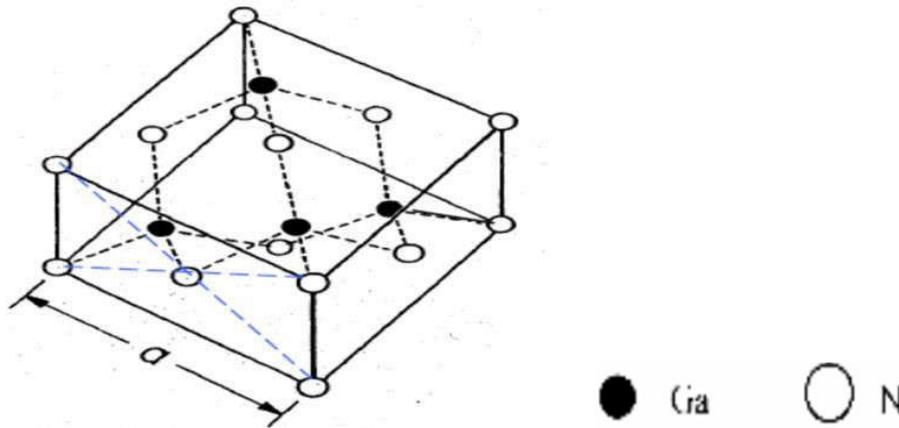


Figure I.3 : Structure cristalline blende de zinc du GaN

### I.3.1.3 Comparaison entre les deux structures:

Les deux structures cristallines sont similaires dans le cas où chaque atome de Ga est lié par quatre atomes de N et vis versa. La différence principale est la séquence d'empilement des plans cristallins, pour la structure hexagonale la croissance est suivant l'axe c [0001], pour la structure zinc blende la croissance est suivant l'axe [111][6] Voici un tableau récapitulatif des principales propriétés des deux types de structures du GaN à une température de 300K.

Propriétés électroniques	Zinc Blende	Wurtzite
Bande interdite [eV]	3.2	3.39
Affinité électrique [eV]	4.1	4.1
Constante diélectrique	9.7	8.9
Champ critique [V .cm <sup>-1</sup> ]	$\sim 5 \times 10^6$	$\sim 3.3 \times 10^6$
Vitesse Max de saturation [cm .s <sup>-1</sup> ]	$\sim 2.5 \times 10^7$	$\sim 2.5 \times 10^7$

Tableau I. 1: principales propriétés des structures du GaN

### I.3.2 Propriétés physiques:

Comme beaucoup de matériaux III-V, le GaN est un semi-conducteur à gap direct, et est donc très adapté pour les applications optoélectroniques. Sur la (figure I.4) les énergies de bande interdite de quelques semi-conducteurs dont les nitrures sont reportées en fonction de leur paramètre de maille. Les nitrures permettent de couvrir une large gamme en énergie : du très proche infrarouge à l'ultra-violet, en passant notamment par le bleu qui est "inaccessible" aux autres semi-conducteurs III-V. Hormis les difficultés de croissance des hétéro structures nitrurées, la principale discutée pour réaliser des diodes électroluminescentes (DEL) bleues à base de GaN était de maîtriser le dopage p [25].

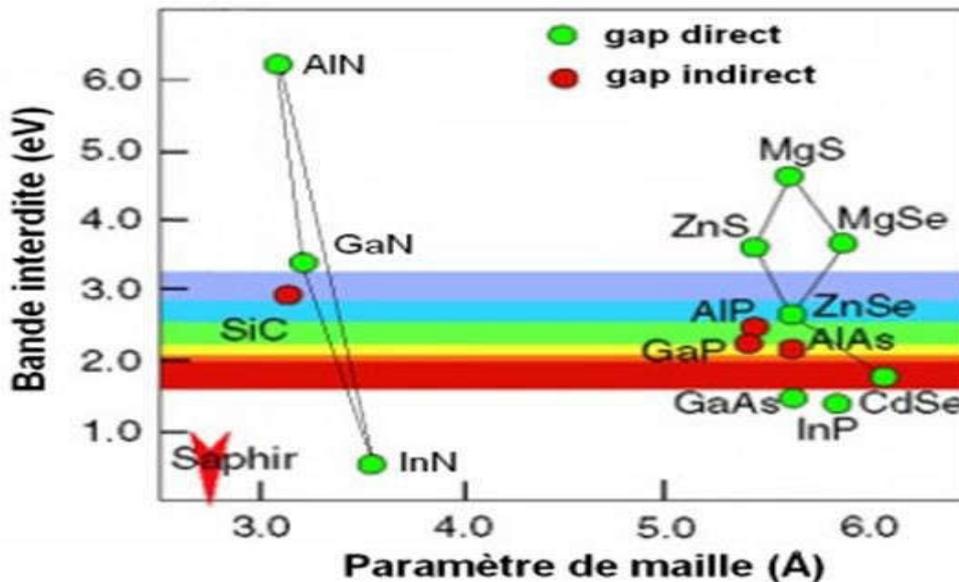


Figure I.4 :Semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect [25].

### I.3.3 Propriétés électroniques

Le nitrure de gallium est un semiconducteur à large gap direct de 3.42eV, ce qui permet aux dispositifs à base de GaN tels que les HEMTs, de supporter un champ électrique interne en moyenne cinq fois supérieur que celui du Si et du GaAs. Sa tension de claquage élevée qui est supérieure à 50V (elle est de l'ordre de 30V pour le GaAs) est un attribut souhaité pour les applications de haute puissance[6].

Matériaux	Si	GaAs	SiC	GaN
Constantediélectrique	11.9	13.1	9.7	9.0
Energie du gap (eV)	1.12	1.43	3.3	3.42
Champ de claquage (MV/cm)	0.3	0.4	2	>2.5
Vitesse de saturation (cm/s)	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$2.2 \times 10^7$
Mobilité électronique (cm <sup>2</sup> /V.s)	1500	8500	800	1250
Conductivitéthermique (W/cm.K)	1.5	0.46	4.9	1.7

**Tableau I.2:** Propriétés électroniques du GaN comparées à d'autres matériaux utilisés

### **I.3.4 Propriétésélectriques**

#### **I.3.4.1 Lapolarization**

Le champ électrique dû aux charges induites par la polarisation joue un rôle important dans les propriétés électriques et optiques des hétérostructures à base de nitrure d'où la croissance est suivant l'orientation [0001]. Ce champ est une source de gaz d'électron bidimensionnel accumulé à l'interface de l'hétérojonction. La compréhension et le contrôle de la source des électrons du transistor HEMT sont importants pour l'optimisation de ses performances [7].

#### **I.3.4.2 La polarisationspontanée**

Dans une structure cristalline GaN de type wurtzite, les électrons de la bande de valence sont plus attirés par l'azote que par l'aluminium ou le gallium à cause de sa forte électronégativité (Figure I.5). Cette attraction entraîne la déformation de la structure tétraédrique et le rapport des paramètres de maille ( $c/a$ ) devient plus faible que la valeur attendue ( $c/a=1.633$ ). La non concordance des barycentres des charges positives et négatives entraîne donc la création d'une polarisation appelée polarisationspontanée [8].

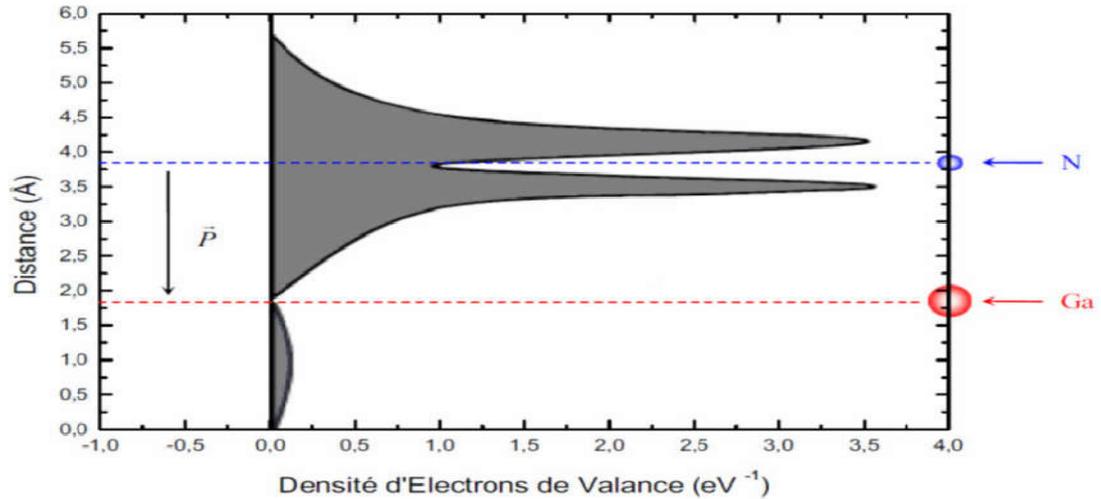


Figure I. 5: Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN.

### I.3.4.3 La polarisation piézoélectrique:

La polarisation piézoélectrique trouve essentiellement son origine dans la symétrie du cristal. L'effet piézoélectrique peut se définir comme l'apparition d'une polarisation électrique dans une couche semi-conductrice lorsque celle-ci est soumise à une contrainte  $\sigma$  qui modifie la maille du cristal en brisant sa symétrie. Comme nous l'avons déjà mentionné les nitrures peuvent cristalliser suivant deux phases cristallines. Ces deux phases : zinc-blende (cubique) et wurtzite(hexagonale) sont non centrosymétriques. Ceci induit l'existence en leur sein de l'effet piézoélectrique. L'apparition du champ électrique peut être représentée par un modèle ionique simple faisant intervenir le déplacement, sous l'effet de la contrainte, des barycentres des charges positives et négatives à l'intérieur des tétraèdres formant la maille cristalline. Il apparaît alors à l'intérieur de chaque tétraèdre de la maille un dipôle élémentaire orienté selon la direction de la contrainte comme on peut le voir sur la( Figure I.6) .

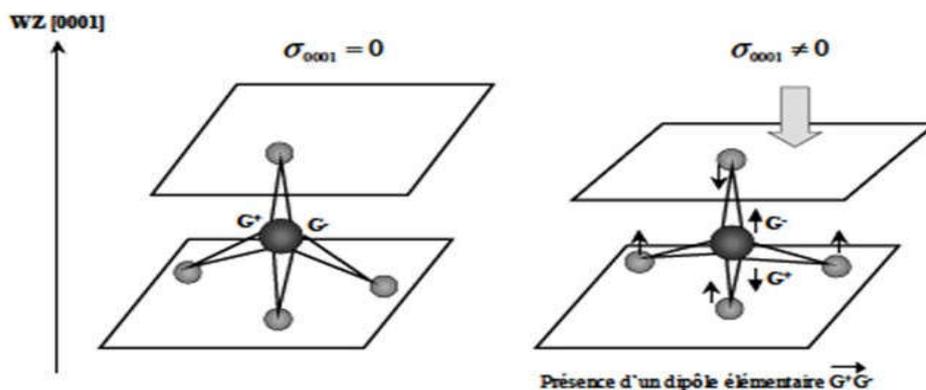


Figure I.6 : Mise en évidence de l'effet de la contrainte  $\sigma$  dans la phase wurtzite suivant la direction (0001).

Une contrainte suivant la direction de croissance (0001) dans la phase hexagonale va donner naissance à une polarisation d'origine piézoélectrique suivant cette direction car le déplacement relatif des barycentres des charges positives et négatives est non nul.

La valeur de la polarisation d'origine piézoélectrique peut être quantifiée à partir de la valeur de la contrainte présente dans la couche [9].

### **I.3.5 Propriétés optiques du GaN:**

Comme attendu avec un gap direct, le coefficient d'absorption est élevé, atteignant  $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  pour des énergies juste supérieures au gap. L'indice optique du GaN est égal à 2.45 pour des énergies inférieures au gap et augmente jusqu'à 2.8 environ au niveau du gap. Cet indice est inférieur à celui de GaAs par exemple. Ceci entraîne un coefficient de réflexion à l'interface air/matériau inférieur dans le GaN ce qui a comme conséquences pour les détecteurs, un meilleur couplage avec la lumière [10].

### **I.3.6 Propriétés thermiques**

#### **I.3.6.1 Dilatation thermique**

La dilatation thermique est liée à la variation de densité d'un solide avec la température, les distances interatomiques se modifiant sous l'effet des vibrations. La dilatation thermique d'un semi-conducteur dépend de sa microstructure, c'est à dire de sa stœchiométrie, présence de défauts étendus, de la concentration en porteurs libres pour obtenir des résultats cohérents, les mesures doivent être réalisées sur monocristaux. La dilatation thermique a été mesurée en fonction de la température sur les monocristaux. Selon  $a$ , le coefficient de dilatation thermique est constant sur toute la gamme de température. Selon  $c$ , la composante principale -parallèle à l'axe  $c$ - dépend de la température, la dilatation thermique connaissant une rupture de pente à 700K. La valeur du coefficient de dilatation thermique est importante à connaître pour l'élaboration de dispositifs électroniques. En effet ; dans le cas de couches hétéroépitaxiées, si la dilatation thermique du substrat est différente de celle de la couche, il peut se créer des contraintes résiduelles induisant des fissures du substrat et de la couche épitaxiée. Ceci intervient alors fortement sur l'efficacité du dispositif considéré [12].

Le tableau (I.3) donne les coefficients de dilatation de GaN et les substrats les plus souvent utilisés lors de l'hétéroépitaxie de GaN. Bien que le carbure de silicium 6H-SiC soit le plus adapté en terme de compatibilité de la dilatation thermique aux températures de travail (autour de 300 K), c'est le saphir qui est le plus souvent utilisé en raison de son coût bien moins élevé.

Matériaux	GaN	GaN	Saphir 300 K	6H-SiC 300K	3C-SiC 300 K	ZnO 300K	GaAs 300K
	300-700k	700-900k					
$\alpha_{\theta}(10^6 K^{-1})$	5.59	5.59	7.5	4.2	2.7	2.9	6
$\alpha_{\theta}(10^{-6} K^{-1})$	3.17	5.59	8.5	4.7	2.7	4.75	6

**Tableau I.3 :** Coefficients de dilatation de GaN et les substrats les plus souvent utilisés.

### I.3.6.2 Conductivité thermique:

La conductivité thermique d'un matériau traduit sa capacité à dissiper la chaleur. Or, la résistance thermique (notée  $R_{th}$ ) est inversement proportionnelle à la conductivité thermique  $R_{th}(W/K)$ ,

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} \quad (I.1)$$

Où  $\Delta T$  est l'élévation la température en K,  $P_{diss}$  est la puissance dissipée en W. On voit donc que la résistance thermique est directement liée à la puissance dissipée. Cela signifie qu'une forte conductivité thermique du matériau permet l'évacuation de la puissance dissipée (sous forme de chaleur) sans échauffement important de celui-ci. Dans le cas de l'amplification de puissance où les puissances délivrées sont importantes, l'élévation de température pour une puissance dissipée donnée sera bien plus faible dans des transistors à grand gap [6].

### I.3.6.3 Chaleur spécifique:

Dans un composant semi-conducteur, l'augmentation de la température entraîne une augmentation du nombre de phonons. La chaleur spécifique est le paramètre physique qui permet de relier les variations de la température du réseau au nombre de phonons présents dans le semi-conducteur, sa valeur peut être calculée à partir de la relation de Debye [8]:

$$CP(T) = \frac{12\pi^4 R}{5} \left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \quad (I.2)$$

Avec  $R = 8.344 \text{ J/mol.K}$ ,  $T_D$ : température de Debye.

**I.3.6.4 Température de Debye:**

La température de Debye  $T_D$  caractérise la valeur maximale des énergies des vibrations. Elle a été calculée par Polian et al. à partir de la chaleur spécifique, et par Demidienko et Al. à partir des propriétés élastiques. Les valeurs obtenues sont respectivement de 700K et 650K. Ces valeurs sont cohérentes avec les calculs de Kim et Al. Christensen et Al. et Azuhaka et al. qui prédisent  $T_D$  entre 620 et 690K [12].

**I.4 Le champ de claquage:**

Le champ de claquage (noté  $E_c$ , unité :V/cm) est la valeur du champ électrique maximum que peut supporter le matériau. On peut supposer que la forte valeur de la bande interdite doit engendrer un champ maximum relativement élevé. Effectivement, si en théorie  $E_c = (E_g)^{3/2}$  il est estimé à 2MV/cm, les mesures le situent à des valeurs localisées entre 1 et 3 MV/cm [13].

**I.5 Hétérostructure GaN/AlGaN****I.5.1 Propriétés de l'hétérostructures GaN/AlGaN :**

Les hétérostructures GaN/AlGaN à base de puits quantiques sont les constituants de base des dispositifs optoélectroniques actuels. L'intérêt principal de cette structure est le confinement de porteurs dans le puits quantique suivant la direction de croissance. Ces hétérostructures sont de

type I. les niveaux énergétiques accessibles aux porteurs sont discrétisés par ce confinement, et l'écartement entre ces niveaux déterminera l'énergie des transitions inter bandes et inter sous bande de l'hétérostructures[14] Les hétérostructures GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N outre leurs spécificités de posséder un grand gap, elles permettent d'atteindre des champs électriques internes très internes très intenses, résultant à la fois de la polarisation spontanée à l'interface et des effets piézoélectriques résultant de la contrainte entre les couches.

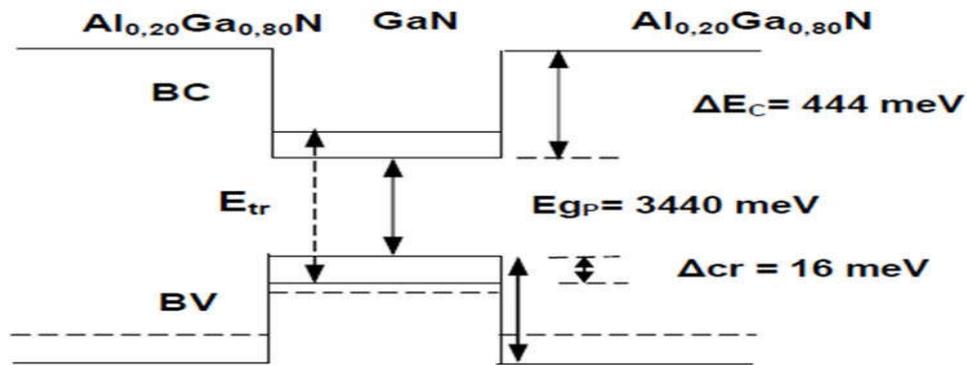


Figure I.7 : Structure de bandes d'un simple puits quantique GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N

## I.6 Le dopage

### I.6.1 Le dopage n :

Le dopage n est réalisé avec le silicium qui donne un niveau donneur peu profond dont l'énergie d'ionisation est de l'ordre de 60 meV. L'implantation ionique est réalisée avec des tensions d'accélération de l'ordre de 100 keV, et des doses d'implantation variant entre  $10^{13}$  et  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup>. Le silicium se met en site gallium à relativement basse température et devient électriquement actif après un recuit à haute température, qui annihile les antisites créés lors de l'implantation. Il faut noter que la solubilité du silicium dans GaN est importante. D'autre part le seuil d'amorphisation de GaN sous implantation ionique est élevé ( $2 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup> comparé à  $4 \cdot 10^{13}$  cm<sup>-2</sup> pour GaAs). Ces caractéristiques permettent d'atteindre des taux de dopage n très importants [34].

### I.6.2 Le dopage p :

Le dopage p pose généralement un problème dans les semi-conducteurs à grand gap, car les énergies d'ionisation des accepteurs sont toujours relativement élevées. Ceci limite le nombre d'accepteurs ionisés, et par suite le nombre de trous, à la température ambiante. L'accepteur le moins profond dans GaN est le magnésium, son énergie d'ionisation est néanmoins comprise entre 150 et 170 meV.

En outre la solubilité de Mg dans GaN et AlGaIn est limitée. Ceci entraîne des concentrations de trous limitées, qui sont généralement insuffisantes pour assurer des contacts ohmiques de faible résistance. Il n'en demeure pas moins, qu'en l'état actuel des connaissances, le magnésium semble être le dopant p le plus performant [34].

## I.6 Avantages du GaN

Le GaN a l'avantage d'avoir une bande interdite directe et large de 3,4 eV à 300K. De plus ; par le fait de sa structure cristalline wurtzite et sa forte ionicité, il exhibe une variété de propriétés qui n'est pas présente(ou d'une façon moins importante) dans les semiconducteurs conventionnels. L'élément principal est l'effet de la polarisation spontanée et de la polarisation piézoélectrique dont plusieurs études expérimentales et théoriques ont révélé leurs importances dans les performances des composants à base d'hétérostructures de nitrures

De plus, des densités d'électrons supérieures à  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  (gaz d'électrons à 2 dimensions '2DEG' avec hétérostructure AlGaN) grâce à de fortes polarisations spontanée et piézoélectrique sans dopage intentionnel, sont un atout pour l'amplification de signaux.

Une autre figure importante de mérite pour les dispositifs électroniques et les détecteurs à base de GaN : c'est leur grande vitesse électronique de saturation qui est de l'ordre de  $3 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ . On note aussi que les III-N forment des hétérostructures ayant un gap direct, et des contacts ohmiques meilleurs que les autres semi-conducteurs III-V. Les composés III-N sont alors très prometteurs.

GaN présente de nombreuses applications vouées à un grand développement, dont certaines sont déjà commercialisées :

Les LED bleues ou vertes pour l'affichage couleur ou la signalisation, les LED blanches pour l'éclairage, les LD bleues ou violettes pour l'impression (laser) ou le stockage optique de données (CD et DVD), les détecteurs UV "solarblind" pour la détection des incendies, l'identification ou le guidage des missiles, ou encore le dosage personnel des UV, et enfin les transistors "haute fréquence – haute puissance" pour la communication ou les radars fonctionnant à haute température (applications spatiales)[23].

**I.7 Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principales propriétés des nitrures binaires GaN et AlN dans les deux types de structures hexagonale et cubique ; puis nous avons présenté la mobilité et vitesse de saturation pour les composées ternaires AlGaN pour la réalisation du transistor à haute mobilité d'électrons HEMT, nous avons rappelé l'intérêt de la structure cristalline wurtzite du GaN et La structure blende de zinc. Nous avons montré les polarisations spontanée et piézoélectrique, aussi nous avons montré ses principales propriétés électriques, optiques et thermiques remarquables.

# **Chapitre 2**

## **Le transistor HEMT à base de GaN et AlGaN**

## II.1 Introduction

Le HFET (transistor à effet de champ à hétérostructure) ou bien le HEMT (High Electron Mobility Transistor) est un transistor à haute mobilité d'électrons. Il est composé de semi-conducteurs de bande interdite différente. Ce chapitre est consacré à l'étude du transistor HEMT à base d'hétérostructure AlGaIn/GaN commençant par une généralité sur les transistors à effet de champ, après, une étude détaillée sur les HEMTs avec ces différentes topologies et en particulier le HEMTs avec la technologie FIELD-PLATE à base d'hétérojonction AlGaIn/GaN.

## II.2 Généralité a transistor à effet de champ:

### II.2.1 Le transistor à effet de champ à jonction (JFET):

Le transistor JFET est un composant de structure plane. Il est constitué par une mince couche de matériau semiconducteur de type N (pour un JFET canal N), sur un substrat de type P. Une diffusion de type P+ à la surface de la couche réalise l'électrode de la grille et constituant ainsi une jonction P+N verticale (voir figure II.1). Deux diffusions N+, aux extrémités du canal, permettent d'assurer les contacts ohmiques de source et de drain [16].

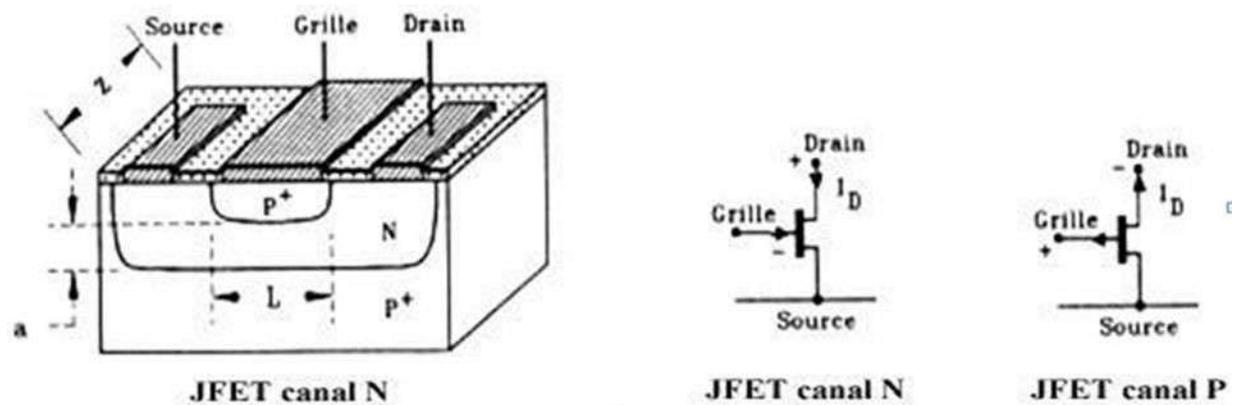


Figure II.1 : Transistor JFET à canal N et symboles des deux types de JFET [16].

#### II.2.1.2 Principe de fonctionnement du JFET

La variation de la polarisation module la variation de la section conductrice du canal. Sans polarisation, il peut y avoir une zone de désertion sur une certaine profondeur dans le

canal. La désertion est liée à différents paramètres tels que le matériau de la grille et les propriétés d'interface.

Pour une tension drain-source ( $V_D$ ) nulle, la variation de la tension grille ( $V_G$ ) permet la modulation de la profondeur de zone de désertion, et donc la partie conductrice du canal. Pour une polarisation  $V_G < 0$  (et  $V_D \approx 0$  volt), la zone de désertion se développe plus profondément dans le canal, provoquant le rétrécissement de celui-ci et donc une augmentation de sa résistance. Pour une tension  $V_G = V_p$  (tension de pincement), la zone de charge d'espace occupe la totalité du canal. La résistance entre drain et source devient très élevée. Pour une tension  $V_D$  non nulle et une tension  $V_G$  négative, on a un canal conducteur. Un courant  $I_D$  circule entre le drain et la source. Si  $V_D$  devient de plus en plus positive, le champ électrique à travers le canal augmente ainsi que la vitesse des électrons. La distribution de tension à travers le canal aura pour conséquence une différence de potentiel entre la grille et le canal sur la longueur de celui-ci. Ceci explique la différence observée pour la profondeur de la zone de désertion le long du canal, qui augmente vers le drain. Si la tension  $V_D$  atteint la valeur  $V_{Dsat}$  (tension de saturation), le régime de pincement apparaît. Le courant  $I_D$  atteint sa valeur de saturation. L'augmentation de la tension  $V_D$  au-delà de  $V_{Dsat}$  n'affecte pas l'évolution du courant  $I_D$  qui garde une valeur relativement constante [17].

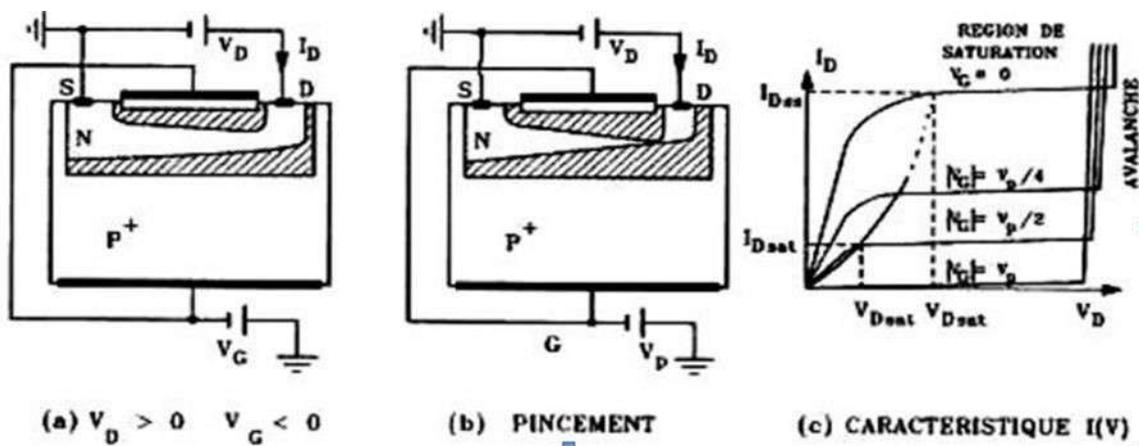


Figure II.2 : a) Comportement du JFET en fonction de  $V_D$  pour  $V_G < 0$  [17]

b) régime de pincement.

c) caractéristique I-V du JFET

### II.2.1.3 Contraintes et domaines d'utilisation

La forte impédance d'entrée des JFET (plusieurs dizaines, voire centaines de mégohms) associée à un faible bruit propre, rend ces transistors particulièrement bien adaptés

à l'amplification des faibles signaux sous forte impédance. En commutation, ils présentent par rapport aux transistors bipolaires certains avantages, comme un gain en puissance plus élevé et une impédance d'entrée aux faibles fréquences beaucoup plus forte, ce qui permet de réaliser de grandes constantes de temps avec des capacités assez faibles (réalisation de monostables ou d'astables)[11].

## II.2.2 Transistor à effet de champ à grille isolée (MESFET)

### II.2.2.1 Description

Le MESFET (MEtal Semi-conducteur Field Effect Transistor) est d'abord constitué d'un substrat d'arséniure de gallium semi-isolant, celui-ci assure essentiellement un support mécanique pour le reste de la structure. La couche active est constituée de GaAs dopé n (le canal). On trouve également deux zones fortement dopées sous les électrodes de source et de drain pour minimiser les résistances de contact. Viennent enfin les dépôts métalliques constituant les trois électrodes classiques du transistor à effet de champ : les contacts ohmiques de source et de drain et la grille Schottky[18].

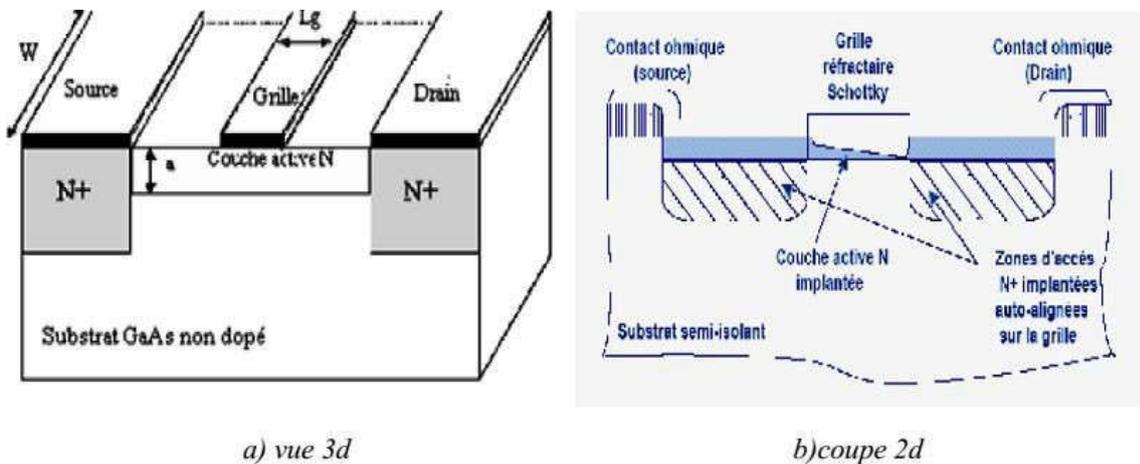


Figure II.3 : Vue en coupe du MESFET GaAs.

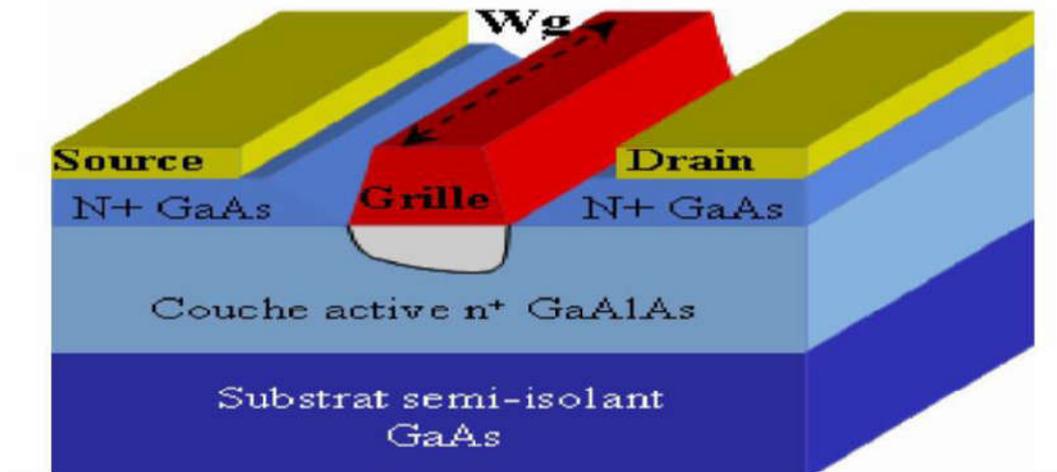


Figure II.4: Schéma d'un MESFET AlGaAs[20]

### II.2.2.2 Le Principe de fonctionnement du MESFET

Le principe de fonctionnement du MESFET est basé sur la modulation de la conductance entre deux contacts ohmiques appelés "Source" et "Drain", par l'action électrostatique d'une électrode de commande dénommée "Grille". La variation de cette conductance est proportionnelle au nombre de porteurs libres dans le canal, et donc au courant entre source et drain. C'est l'effet d'amplification transistor qui permet de transformer un faible signal appliqué sur la grille en un signal plus fort récupéré sur le drain[21].

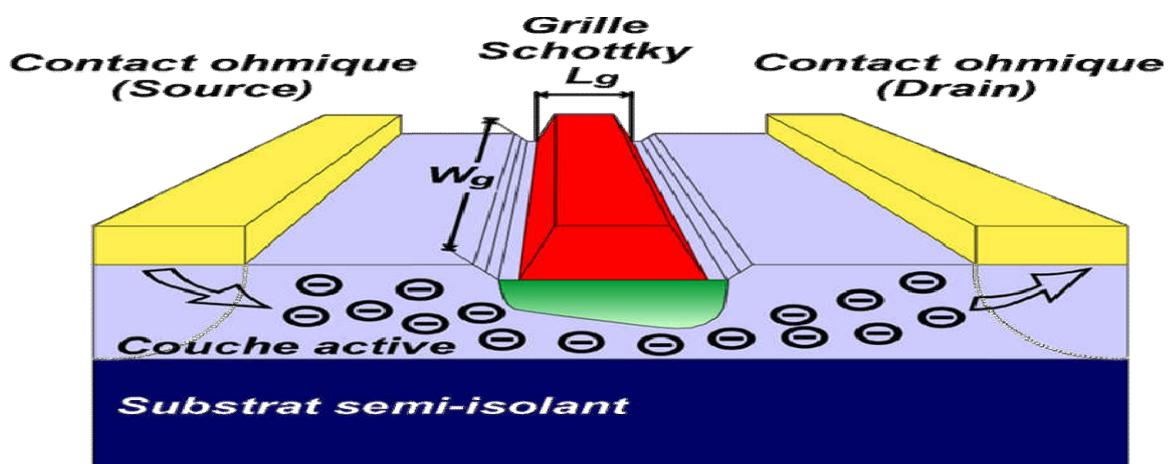


Figure II.5 : Transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET.[21]

Ce type de transistor, illustré par la figure II.5, tire sa particularité de son contact métal/semi-conducteur de grille, que l'on nomme Schottky en référence au modèle qui régit son fonctionnement : à l'hétéro-interface métal/semi-conducteur apparaît une barrière de potentiel pour les électrons (tension de built-in  $V_b$ ), qui correspond à la différence de travail de sortie entre le métal et le semi-conducteur. Le comportement électrique de ce contact est celui d'une diode. En polarisation inverse, cette jonction se comporte comme un condensateur [21].

### II.2.2.3 Contraintes et domaines d'utilisation

Le MESFET GaAs est longtemps resté le composant à effet de champ prépondérant pour l'amplification de puissance micro-onde. En effet, les propriétés de transport électronique de l'Arséniure de Gallium permettent d'obtenir des densités de porteurs dont la vitesse moyenne dans le canal est bien supérieure à celle du Silicium. Avantage supplémentaire, le GaAs permet le dépôt de contacts ohmiques de bonne qualité par rapport à la plupart des autres composés III-V. Pour fournir une puissance élevée, le FET doit pouvoir délivrer un courant drain-source  $I_{ds}$  le plus élevé possible tout en supportant des tensions  $V_{ds}$  de grande amplitude. Cependant, l'obtention d'un fort courant  $I_{ds}$  nécessite l'emploi de dopages élevés qui entraînent une dégradation de la tension de claquage. D'autre part, si l'on veut privilégier un fonctionnement à de très hautes fréquences, il convient de réduire la longueur de grille. La nécessité de garder un facteur d'aspect (le rapport entre la longueur de grille et l'épaisseur de la couche active) raisonnable contraint alors à diminuer l'épaisseur de cette couche active, ce qui se traduit par une diminution de courant drain-source.

Pour des applications de forte puissance, des MESFET utilisant des matériaux dits à « grand gap » présentent des caractéristiques intéressantes. Ainsi, l'utilisation du Carbure de Silicium SiC permet d'obtenir des performances élevées grâce à un champ de claquage huit fois plus élevée et une conductivité thermique trois fois plus élevée que le Silicium.

Ces propriétés permettent d'utiliser les composants avec des tensions très élevées, de plusieurs dizaines de volts et à haute température. Compte tenu de ces performances, le domaine d'utilisation privilégié de ces composants est l'amplification de très forte puissance (Objectif > 100W) pour l'émission en station de base par exemple [19].

## II.1.3 Le MOSFET

### II.2.3.1 Description

Le MOSFET est un composant dont la structure est proche du MESFET. La différence est que le MOSFET (figure II.6) se caractérise par le dépôt d'une couche d'oxyde isolante entre la grille et le substrat constituant une capacité MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur). Cette structure est basée sur la commande par une polarisation sur une électrode isolée de porteurs libres dans une zone peudopée.

La modulation du nombre de porteurs permet d'établir un canal de conduction entre deux zones conductrices semi-conductrices très dopées.

Une capacité MOS est réalisée sur le substrat entre la source et le drain. L'électrode de commande de la capacité MOS constitue la grille du transistor [12].

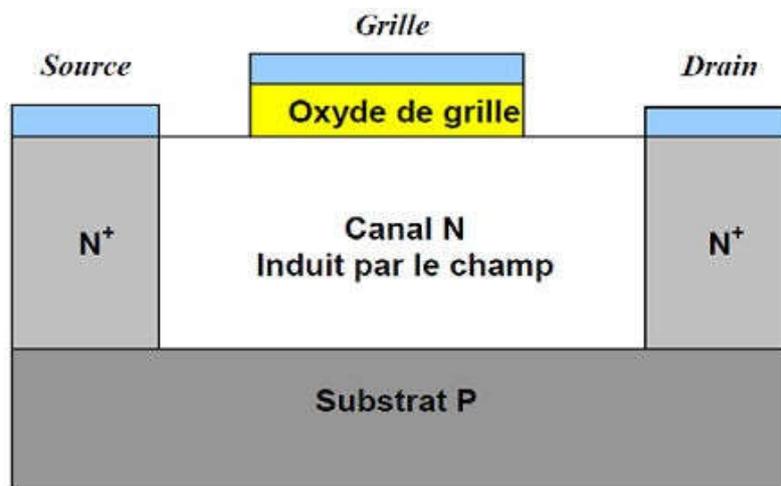
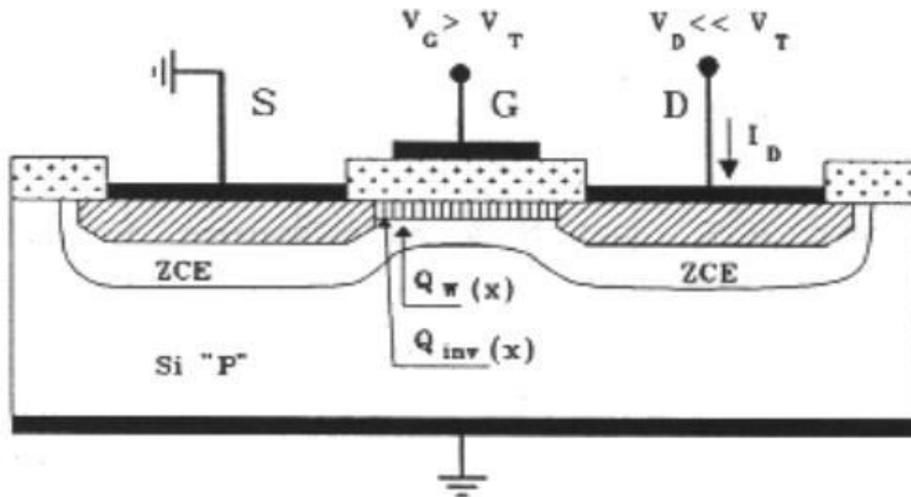


Figure II.6 : Coupe schématique d'un transistor MOSFET à canal N [12].

### II.2.3.2 Principe de fonctionnement du MOSFET

La figure (figure II.7) illustre parfaitement le principe d'un transistor MOS à canal N. La source et le drain sont de type N+ (hachures obliques) et la grille est isolée du semi-conducteur par une couche d'oxyde.



**Figure II.7 :** Principe d'un MOSFET à canal N : les zones hachurées sont de type N [16].

Lorsque la grille est polarisée positivement elle crée à l'interface diélectrique semi-conducteur une couche dite d'inversion (hachures verticales) comportant un grand nombre d'électrons (porteurs minoritaires de la zone P), dès que  $V_G$  est supérieure à une valeur de seuil  $V_T$  cette couche est suffisamment importante pour créer un canal conducteur entre les deux zones N+. Mais ceci suppose que le potentiel au drain soit très inférieur à ce seuil. La relation liant  $I_D$  à  $V_D$  est linéaire et le canal se comporte comme une simple résistance.

### II.2.3.4 Contraintes et domaines d'utilisation

La grille étant isolée, la résistance d'entrée du transistor MOS est très élevée ( $10^{11}\Omega$  à  $10^{15}\Omega$ ) et la capacité grille-source étant très faible, ces transistors sont extrêmement sensibles aux charges électrostatiques qui peuvent provoquer le claquage de la couche de silice. Il faut donc intégrer des dispositifs de protection contre les surtensions (le plus souvent, deux diodes tête-bêche placées entre grille et source).

En raison de leurs très petites dimensions, de leur faible consommation et de leur facilité d'intégration, le domaine privilégié d'emploi des transistors MOS est celui des circuits intégrés (mémoires, microprocesseurs, circuits logiques). Certes, ces dispositifs sont encore moins rapides, Malgré que des progrès spectaculaires ont été effectués en vue de la miniaturisation des transistors MOS et plus particulièrement la diminution de la longueur du canal, ce qui a permis d'augmenter la densité d'intégration et la vitesse de fonctionnement des

circuits mais cette réduction de dimensions à engendrer des phénomènes parasites (modification de la tension de seuil, augmentation du phénomène des porteurs chauds, ...) qui détériorent les caractéristiques courant-tension. Toute fois, les technologues ont imaginé des procédés de fabrication particuliers en vue de conserver ces caractéristiques (Technologie SOI, NMOS, CMOS, VMOS, ...), par exemple les transistors de type VMOS (à grille particulière en forme de V) permettent des applications de puissance (plusieurs dizaines de watts) jusqu'à des fréquences très élevées (plusieurs milliers de mégahertz) [19].

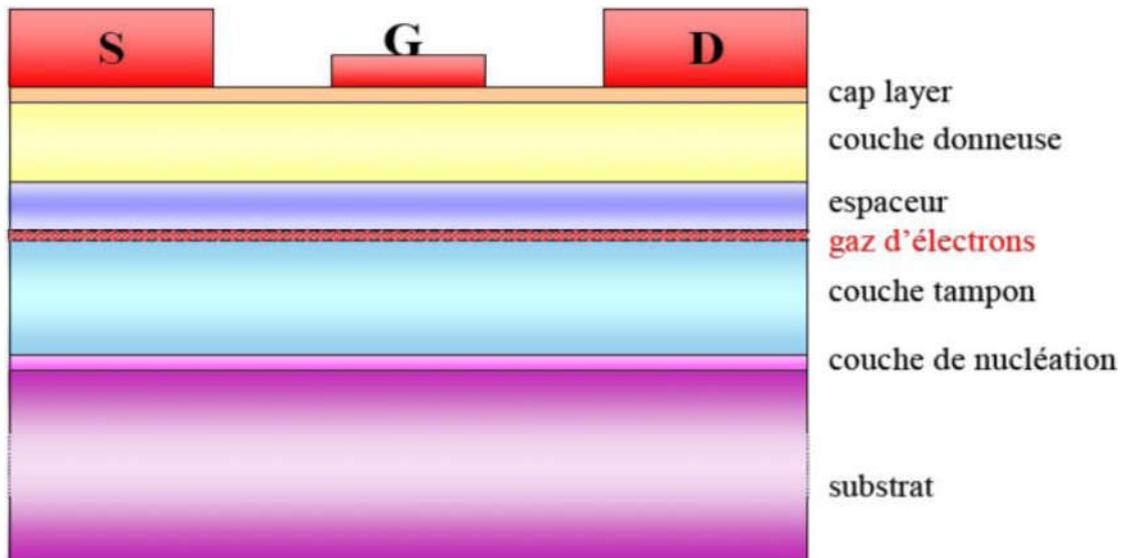
## **II.3 Le transistor HEMT:**

### **II.3.1 Historique:**

Les premiers transistors HEMT (High Electron Mobility Transistor) sont apparus en 1980 (Fujitsu, Thomson). En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique ayant les plus faibles caractéristiques en bruit au monde. Initialement, ce transistor était utilisé dans un radiotélescope à Nobeyama, Japon, qui présente un diamètre de 45 mètres. En refroidissant le composant à la température de l'hélium liquide, il est possible de capter un signal provenant d'une molécule interstellaire située à mille années lumières de la Terre. Plus tard, le HEMT sera implanté dans des récepteurs de télévision pour capter les signaux des satellites géostationnaires (36000km d'altitude). Puis petit à petit, ce composant se fera une place dans notre quotidien.

Le HEMT constitue une évolution majeure du MESFET (Fet à jonction métal/semi-conducteur) et a pris le pas sur ce dernier depuis le début des années 1990.

Ce composant est désormais largement utilisé en tant que composant faible bruit dans les systèmes de télécommunications terrestres et spatiales, dans les radiotélescopes, dans les récepteurs de télévision par satellite....., dans bon nombre de systèmes électroniques, des téléphones portables aux véhicules automobiles [22].



**Figure II.8** : Structure d'un transistor HEMT. [23]

### II.3.2 Description des couches :

- Cap layer : C'est la couche superficielle, elle est formée par un matériau de faible bande interdite pour permettre la réalisation des contacts ohmiques de source et de drain. Cette couche est généralement fortement dopée afin de diminuer la valeur des résistances de contact.
- La couche à grand gap non dopée : elle est destinée à la réalisation du contact Schottky de grille- La couche à grand gap dopée : son rôle est de fournir les électrons libres à la structure, appelée la couche donneuse. Ce dopage pouvant être volumique réalisé généralement par un plan de dopage silicium 'Si'.
- Espaceur (spacer): une couche de matériau à grand gap non intentionnellement dopée permettant de séparer les atomes donneurs d'électrons de la couche donneuse des électrons du canal. Les interactions à distance sont ainsi réduites. A l'inverse, plus cette couche sera moins épaisse, plus la mobilité des électrons dans le canal sera meilleure. Le transfert des électrons de la couche donneuse dans le canal est favorisé par un espaceur fin.
- Le canal : il est constitué d'un matériau à petit gap non dopé. cette couche est importante dans la mesure où elle reçoit le gaz d'électron bidimensionnel (2DEG) qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.

- La couche tampon : appelée aussi buffer, permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat.
- Le substrat : cette couche permet également d'avoir un matériau de base de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des autres couches [7].

## II.3.2 Le transistor HEMT à base d'AlGaN/GaN

### II.3.2.1 Structure d'un HEMT

Un HEMT AlGaN/GaN contient 3 contacts : un contact Schottky (appelé grille, noté G) entre deux contacts ohmiques (appelés source (noté S) et drain (noté D)). Par convention, la source est reliée à la masse ( $V_S = 0$ ). Les tensions appliquées à la grille et le drain sont respectivement notés  $V_{gs}$  et  $V_{ds}$  (Figure II.9).

L'effet de transistor est obtenu en modulant la densité du gaz 2D d'électrons donc le courant source-drain  $I_{ds}$  par une tension appliquée à la grille. En effet, une tension négative appliquée sur la grille aura pour effet de créer une zone désertée vidant le gaz d'électrons jusqu'au pincement du canal, c'est-à-dire jusqu'à obtenir un courant négligeable. Les études analytiques du contrôle du gaz 2D d'électrons par la tension de grille  $n_s(V_{gs})$  et de la caractéristique courant tension  $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$  [24].

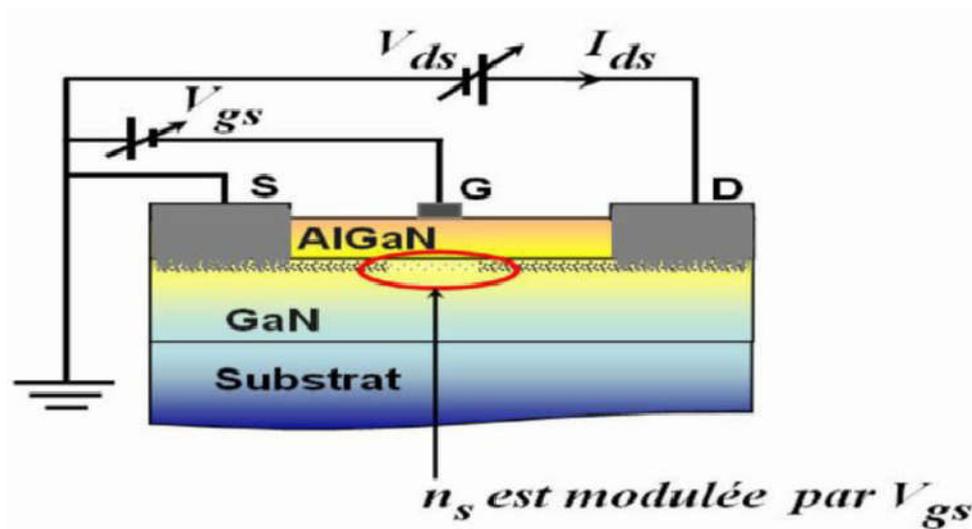
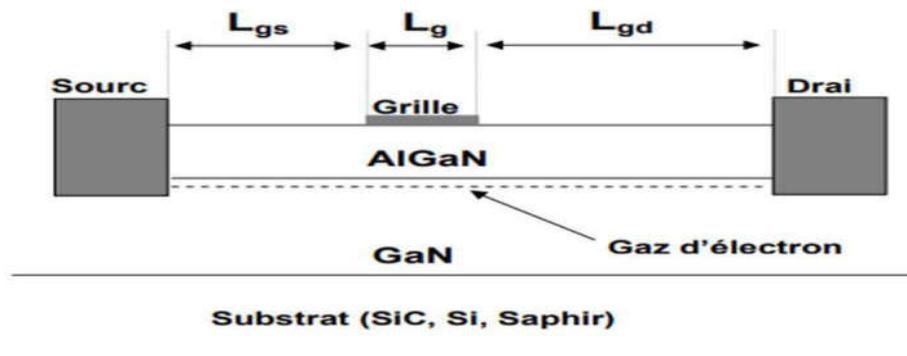


Figure II.9: Vue en coupe du HEMT AlGaN/GaN [24].

### II.3.2.2 Principe de fonctionnement :

Les transistors à haute mobilité électronique, ou HEMTs, sont des transistors à effet de champ et ont une structure horizontale. Ils possèdent trois électrodes : la source, la grille et le drain. En mode d'amplification de puissance, ils sont montés en source commune. L'électrode de grille sert alors à la commande basse puissance et celle de drain sert de commande de puissance. En effet, la tension grille-source contrôle la densité des porteurs dans le canal, et donc contrôle le courant de drain. Le schéma physique d'un HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> basique est présenté à la figure (II.10)



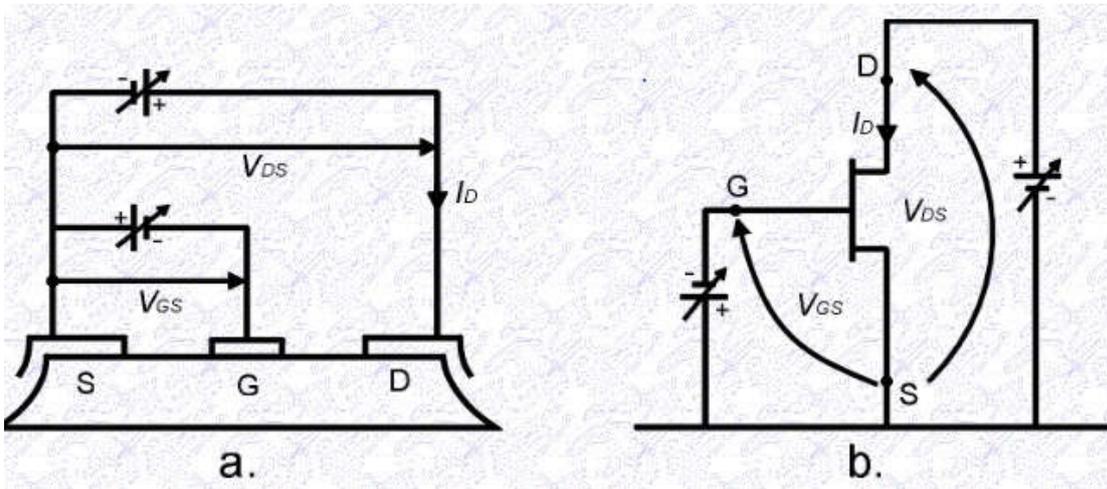
**Figure II.10:** Schéma de la structure d'un HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> classique.

La structure d'un HEMT est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite. La différence de hauteur de barrière entre les deux matériaux permet de créer une hétérojonction à l'interface, qui crée un puits de potentiel et donc une zone de confinement des électrons libres. Les charges qui sont confinées sur quelques nanomètres de profondeur à la surface de Ga<sub>N</sub>, constituent un gaz d'électrons à deux dimensions et ont un comportement quantique : cela signifie qu'elles sont situées sur des niveaux d'énergie discrets dans le puits de potentiel. Elles ont ainsi une mobilité bien élevée ; c'est pourquoi on appelle ces composants « transistors à haute mobilité électronique » (High Electron Mobility Transistors).

Dans le cas des transistors HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, la couche d'AlGa<sub>N</sub> placée au-dessus du canal n'est pas nécessairement dopée (à la différence de la couche AlGaAs dopée N<sup>+</sup> dans les HEMTs AlGaAs/GaAs). L'accumulation des électrons dans le canal est le résultat de l'effet cumulé de la polarisation spontanée présente dans les matériaux AlGa<sub>N</sub> et Ga<sub>N</sub> et de la polarisation piézoélectrique dans l'AlGa<sub>N</sub> [26].

### II.3.4 Caractéristiques $I_D(V_{DS})$ des HEMT:

La caractéristique courant-tension  $I_D=f(V_{DS})$  d'un HEMT est similaire à celle d'un MESFET. Prenons le cas d'un HEMT à déplétion. En régime de fonctionnement normal, le dispositif est polarisé comme le montre la figure (II .11)[15]



**Figure II.11** : polarisation d'un transistor à effet de champ [15].

- a) Emplacement des sources de polarisation
- b) Représentation schématique.

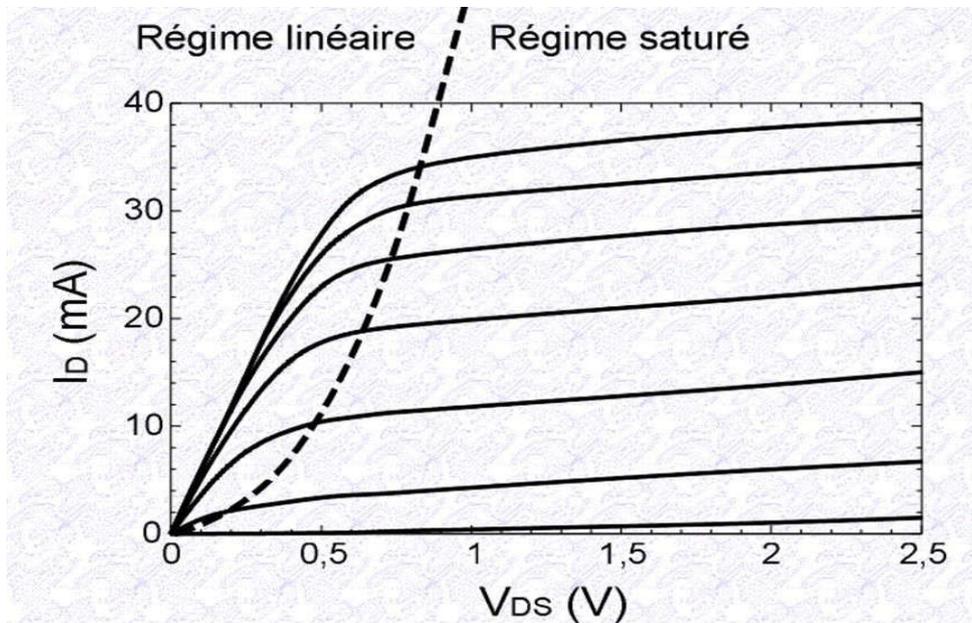
La grille est polarisée négativement par rapport à la source : la barrière Schottky est en inverse. Le drain est polarisé positivement par rapport à la source. Il se crée dans l'ensemble du dispositif un champ électrique qui draine les électrons dans sa direction. La différence de potentiel entre la grille et un point du canal est plus faible à l'extrémité située près de la source (entrée du canal). Le canal est donc plus resserré près du drain qu'à son entrée. L'intensité du champ électrique va donc croissant depuis l'entrée du canal (partie large) jusqu'à sa sortie (partie resserrée) [15].

#### II.3.4.1 Fonctionnement linéaire

Pour les faibles valeurs de la tension de drain la densité de porteurs de charge dans le canal reste sensiblement uniforme sous la grille. Cette densité dépend essentiellement de la tension qui polarise celle-ci. Le dispositif se comporte alors comme une conductance contrôlée par la grille : le courant  $I_D$  varie proportionnellement à  $V_{DS}$  [15].

### II.3.4.2 Régime de saturation ducourant

Lorsque la tension de drain s'accroît, l'effet du champ électrique s'accroît à la sortie de la grille (extension de la zone de charge d'espace). Cela provoque le ralentissement de la croissance du courant de drain. Trois mécanismes sont alors susceptibles de provoquer la "saturation" du courant de drain : le pincement du canal, la saturation de vitesse en régime de transport stationnaire, le transfert après régime de survitesse. Ces trois phénomènes sont très bien décrits dans l'ouvrage de R. Castagné, J. P. Duchemin, M. Gloanecet Ch. Rumelhard[17]. Au-delà d'une certaine tension de drain apparaît le claquage par avalanche du composant dû au phénomène d'ionisation par choc [15].



**Figure II.12** : caractéristiques  $I_{DS}(V_{DS})$  pour différentes tension  $V_{GS}$  d'un HEMT GaAs[15]

A partir de la caractéristique  $I_D(V_D)$  précédente on peut définir les paramètres électriques suivants :

#### La transconductance $G_m$ :

Les HEMT se distinguent de tous les autres transistors à effet de champ par leur transconductance élevée. La transconductance d'un transistor est définie par l'équation II-1.

$$G_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} (V_{DS} = \text{constante}) \quad (\text{II.1})$$

Fonction de la conductance sous la grille, la transconductance est l'expression du mécanisme de commande d'un transistor : c'est la variation du courant de drain en fonction de la polarisation de grille à tension drain-source constante. Elle n'est donc pas constante avec VGS [15].

### La conductance de sortie $G_d$ :

Exprimée par l'équation II.2, la conductance de sortie traduit la variation du courant de drain en fonction de la tension  $V_{DS}$  à polarisation de grille constante [15].

$$G_d = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} (V_{GS} = \text{constante}) \quad (\text{II.2})$$

## II.5 Le Field Plate-HEMT

### II.5.1 Historique

En 1999, S.T. Sheppard [27] présente des travaux sur un transistor HEMT GaN (substrat SiC) avec une densité de puissance de  $6.9 \text{ W/mm}^3$  à 10GHz [29]. En 2004, K. K. Chu et al présentent un HEMT AlGaN /GaN sur les substrats de GaN permet d'attendre une densité de puissance exceptionnel  $9,4 \text{ W/mm}^3$  à 10 GHz avec une Polarisation du drain égale à 50V. De très bon résultats ont aussi été obtenus à partir de transistors HEMTsGaN sur substrat silicium avec des densités de puissance allant jusqu'à  $12 \text{ W/mm}^3$  à 2.14GHz.

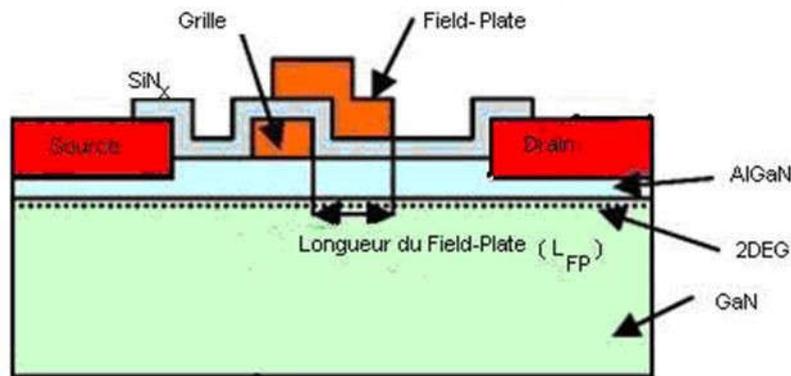
Nous constatons donc que tous les résultats présentés jusqu'ici, et obtenus avec des transistors HEMTs à structure conventionnelle, ne dépassent pas les  $10 \text{ W/mm}^3$  pour des applications bande X. Au début de l'année 2004, un saut technologique a été franchi avec l'ajout d'une métallisation de grille, appelée « Field Plate » ou « overlapping gate » (Figure II.13 ), située au-dessus de la couche de passivation du composant. Ces nouvelles structures FP-HEMTs permettent d'atteindre des densités de puissance exceptionnelles [27].

### II.5.2 Etudes du Field Plate « l'électrode de champ » avec différents topologies

Les composants non passivés ont montrés des tentions de claquage relativement basses de l'ordre de 30-40V. la première possibilité pour pallier ce problème est de passiver le composant, la seconde possibilité pour y parvenir de façon plus efficace encore consiste à déposer une électrode de champ supplémentaire sur la couche de passivation. Cependant, l'effet de cette nouvelle technologie est mal connu. Il est donc nécessaire de bien choisir parmi les différents

topologie de « Field plate » avec plus de certitudes la topologie adéquate à une fréquence de travail donnée.

La structure du dispositif montrée en Figure II.11 employée par Chini et al [27], après la formation du contact de Grille, une couche de passivation de  $\text{SiN}_x$  a été déposée. Le Field Plate a été alors déposé sur la couche  $\text{SiN}_x$ , juste au-dessus de la grille comme étant une deuxième Grille et qui peuvent être polarisée indépendamment. « LF » représente la longueur du Field plate (distance entre les deux bords Grille-Field Plate).



**Figure II.13 :** Structure du Field plate employée par Chini et al [27].

Le Field plate dans cette nouvelle structure montrée en Figure II.12, présenté par Karmalkaret al [27], et défini comme étant une prolongation de la Grille avec un isolant au-dessus du Field plate, les diélectriques couramment utilisés sont les Nitrures ( $\text{AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{BN}$ ,  $\text{GaN}$ ...) ou les Oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ...), cette passivation est élaborée par PECVD RF à  $340^\circ\text{C}$ . Ou « t, d » représentent les épaisseurs du diélectrique (50-100nm) et de la couche de passivation successive, « l, L » la longueur du Field plate et de la grille, «  $\epsilon_t, \epsilon_d$  » les constantes diélectriques de la couche de passivation et de l'AlGaIn successive. «  $n_{s0}$  » La densité 2DEG.

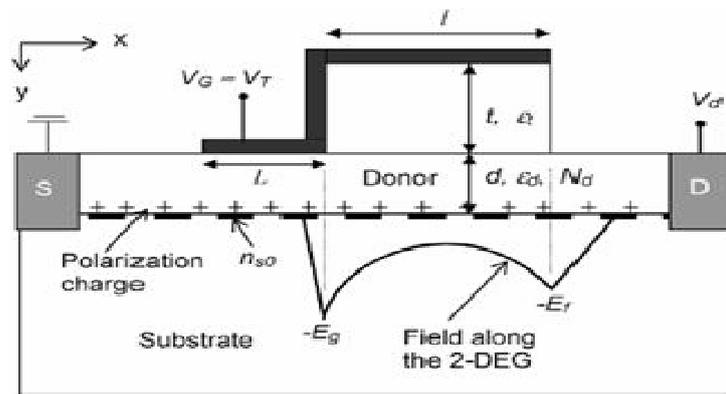


Figure II.14 : Nouvelle structure du Field Plate présenté par Karmalkar et al [27].

## II.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons montré les avantages des transistors à effet de champ à travers un aperçu général leurs différents types (JFET, MOSFET, MESFET et le HEMT), après, une étude détaillé sur le transistor à effet de champ HEMT et en particulier la technologie FIELD-PLATE HEMT à base d'hétérostructure AlGaIn/GaN, ce qui nous permet de comprendre ce composant électronique et ses caractéristiques physiques et électriques prometteuse pour des applications en haute fréquences.

# **Chapitre3**

## **Simulation et interprétation des résultats**

### III.1 Introduction

ATLAS-SILVACO est un logiciel de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Cet outil est employé dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs électroniques.

Dans le présent chapitre, nous allons présenter le logiciel de simulation numérique « Silvaco-Atlas », en expliquant les étapes suivies pour la simulation et l'amélioration de la structure étudiée du MIS-HEMT Field Plate à base de l'hétérojonction AlGaIn/GaN.

### III.2 Présentation de TCAD-SILVACO

#### III.2.1 Présentation du logiciel ATLAS-SILVACO

ATLAS SILVACO (Atlas Silicon Valley Corporation) est un environnement qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteurs avant leur fabrication, beaucoup de projets de recherches ont été développés grâce à ATLAS SILVACO.

L'ATLAS-SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, etc. tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de ceux de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables.

Les modules de ATLAS-SILVACO peuvent être utilisés pour la simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, MESFET, les transistors bipolaires...etc. [28].

Dans le schéma de la figure (III.1) nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'Atlas. La plupart des simulations réalisées par Atlas utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'ATLAS s'exécute (représenté par Fichier de commande). Le second fichier est un Fichier de structure qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichiers :

1. la sortie «Runtime » c'est le premier fichier qui donne la progression, les erreurs et les

messages d'avertissements pendant la simulation.

2. Le deuxième type de fichier est le fichier log et appelé aussi le fichier du comportement électrique qui stocke toutes les valeurs de tensions et de courants provenant de l'analyse du dispositif simulé.[29]

3. Le troisième fichier de sortie est le fichier physique, ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation TonyPlot.

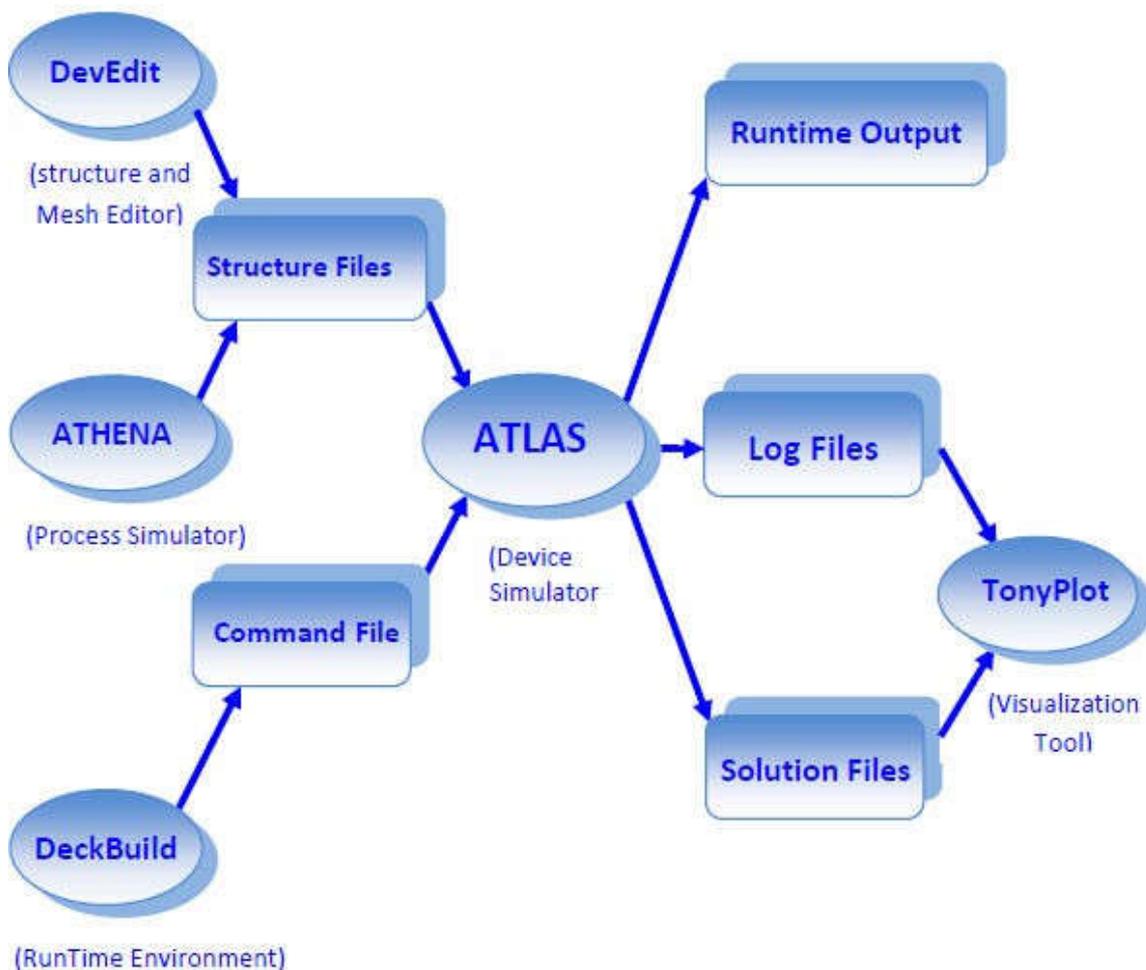
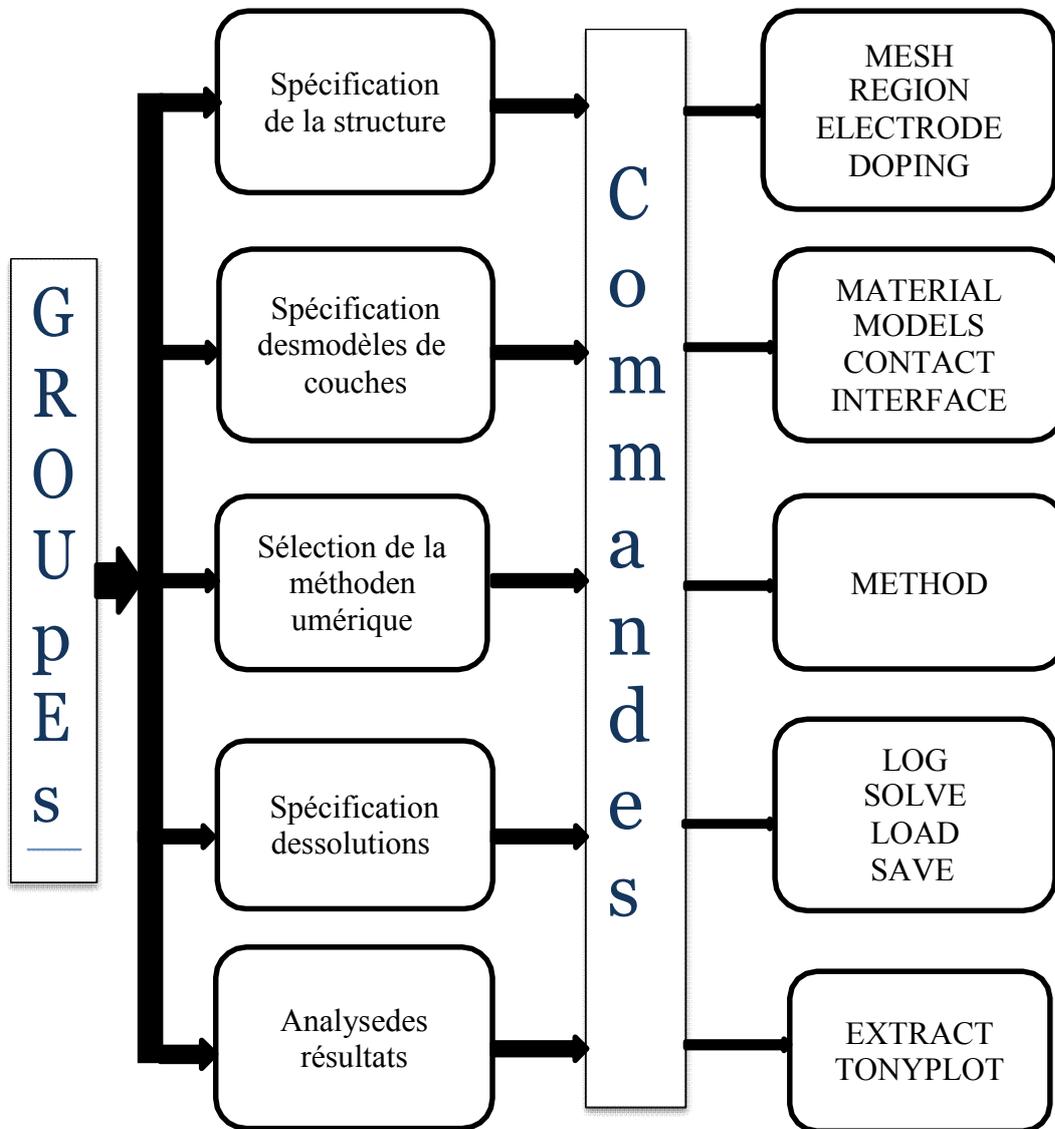


Figure III.1: Entrées et sorties d'Atlas [32].

### III.2.2 Ordres de commandes d'Atlas

Il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (Figure III.2). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne

s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte. [33].



**Figure III.2:** Ordre des groupes des commandes d'Atlas  
(Les commandes fondamentales afférentes).

### III.2.3 Les commandes fondamentales sont

**MESH** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.

**REGION** : c'est une instruction qui définit une région dans une structure.

**ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une structure

**DOPING** : indique le type et le profil de dopage.

**MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation par exemple : affinité électronique, énergie de gap, la fonction de la densité des états, les vitesses de saturation, les durées de vie des porteurs minoritaires, etc.... (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standards)

**MODELS** : Cette instruction permet de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel, nous pouvons citer comme exemples les modèles de recombinaison Shockley Read Hall (SRH), Auger et les modèles concernant les statistiques des porteurs de Boltzmann, Fermi, etc. ...

**CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode : anode, cathode, drain, etc. ...

**INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/isolant, comme exemple, la vitesse de recombinaison en surface et la densité de charge à l'interface.

**METHOD** : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes. Les méthodes numériques qui peuvent être spécifiées par cette instruction incluent des méthodes telles que celles de Gummel et de Newton.

**LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée, qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE est sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

**SOLVE** : ordonne à Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

**LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conditions initiales à d'autres points de polarisation.

**SAVE** : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.

**EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou solution.

**TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des données. Elle permet de présenter les solutions trouvées pendant la simulation sous forme de graphe. Une autre commande importante est **BEAM**, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. **BEAM** indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale) collimatée. Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande **SOLVE**, dans ce cas le module Luminous est activé. Donc **BEAM** est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

### III.2.2 Spécification de la structure

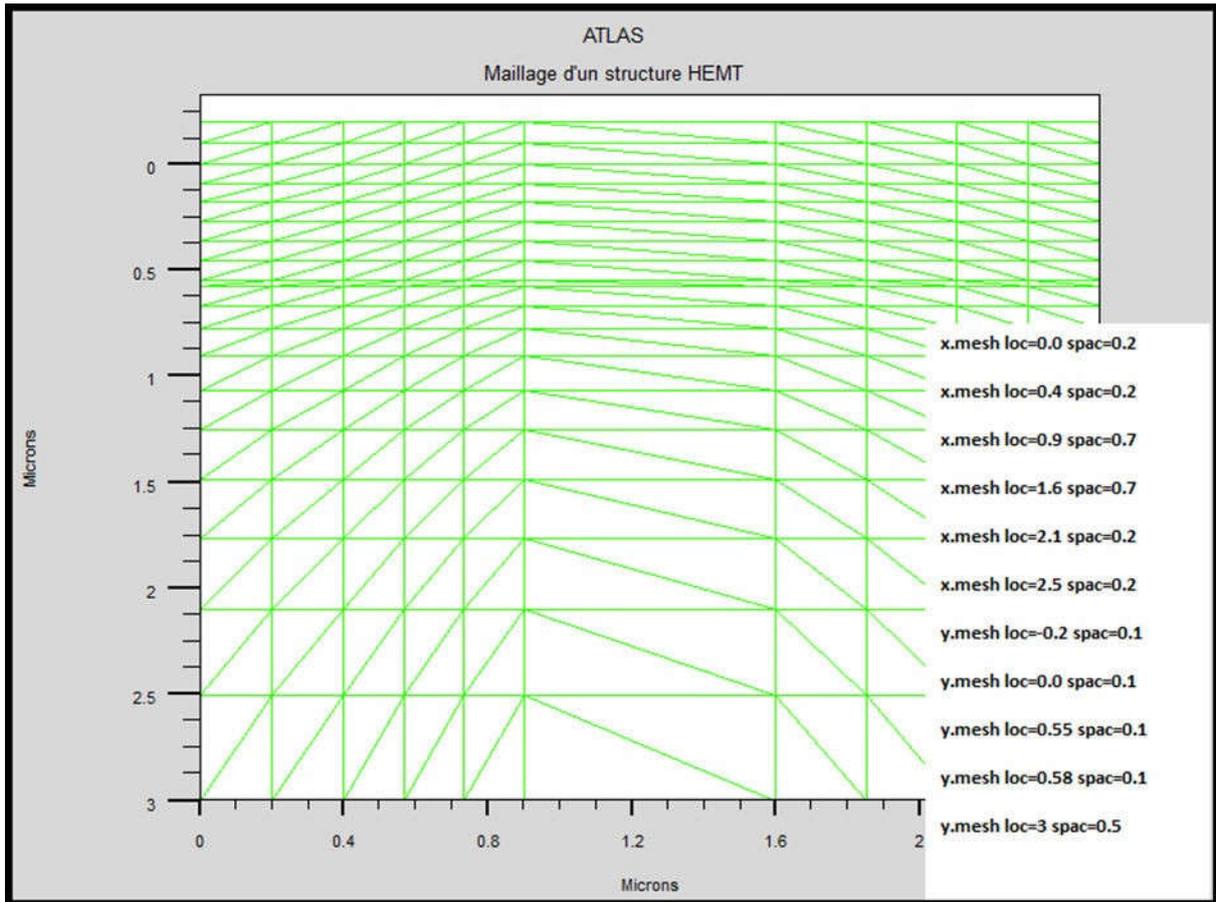
Silvaco Atlas reçoit les fichiers d'entrée qui contiennent les programmes de simulation de DeckBuilt. Atlas est appelé à exécuter ces derniers par la commande suivante : `go atlas`. Le format des commandes d'Atlas est le suivant

**< STATEMENT > < PARAMETER > = < VALUE >**

#### III.2.2.1 Lemaillage

Le maillage adopté dans notre travail est bidimensionnel. Par conséquent on définit seulement les paramètres  $x$  et  $y$ . Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elles.

L'optimisation du maillage est donc une étape importante pour la calibration des simulations, qui se répète à chaque changement de la géométrie de la structure ou la prise en compte d'un nouveau mécanisme physique. La figure III.3, indique un maillage de d'une structure HEMT AlGaIn/GaN



**Figure III.3 :** spécification de maillage

### III.2.2.2 Spécification des régions et les électrodes

Il est nécessaire de définir les régions constituant le composant microélectronique. La définition de ces régions est faite par déclaration de type de matériau et de sa position dans les deux dimensions qui traduisent l'épaisseur et la largeur. Aussi Les électrodes peuvent être définies en ATLAS par l'identification de leur position en x et y et leurs profondeurs. La Figure III.4 montre les régions du maillage. Les limites de chaque région sont explicitement identifiés dans les axes x et y et la position de la source, grille et drain.

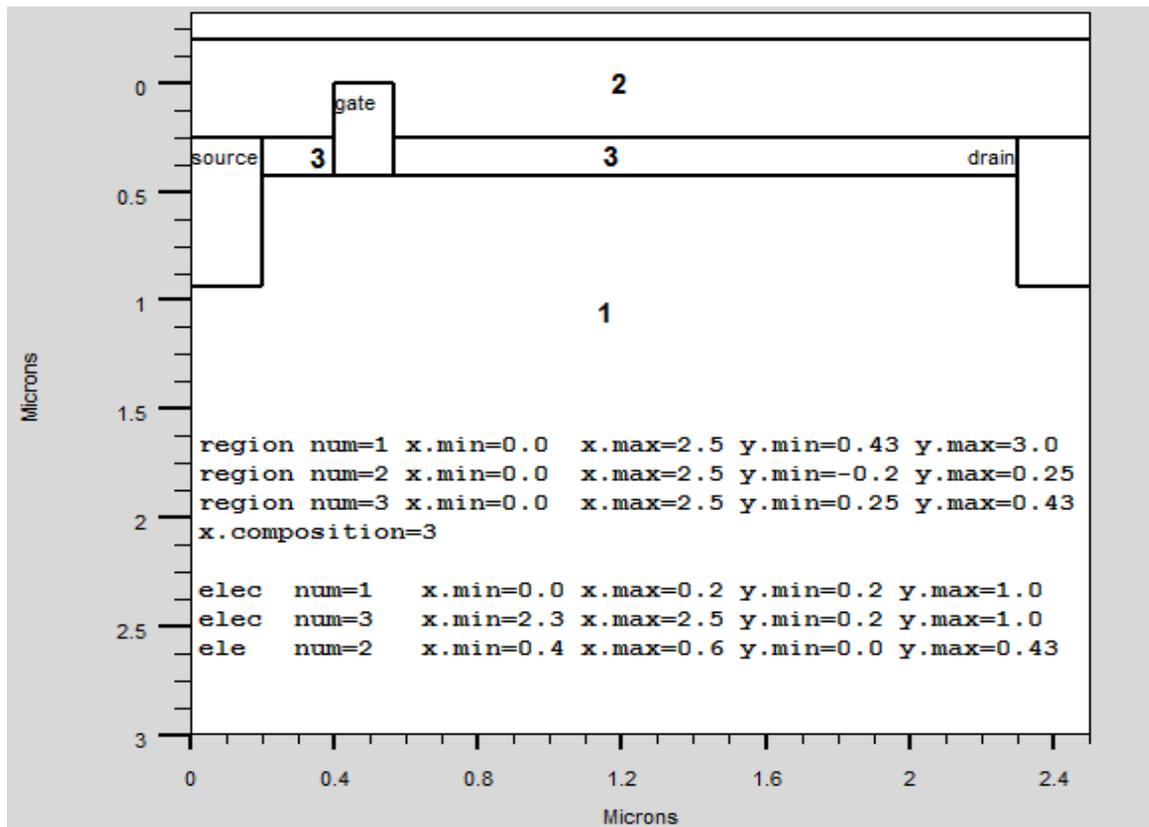


Figure III.4 : Spécification des régions et les électrodes

### III.2.1.1 Attribution de matériaux pour les régions

Les transistors à haute mobilité électronique peuvent être fabriqués à partir de plusieurs types de matériaux tels que le nitrure de Gallium (GaN), l'arséniure de Gallium (GaAs) et plusieurs d'autres substrats, Dans notre cas, le choix de matériaux est le GaN.

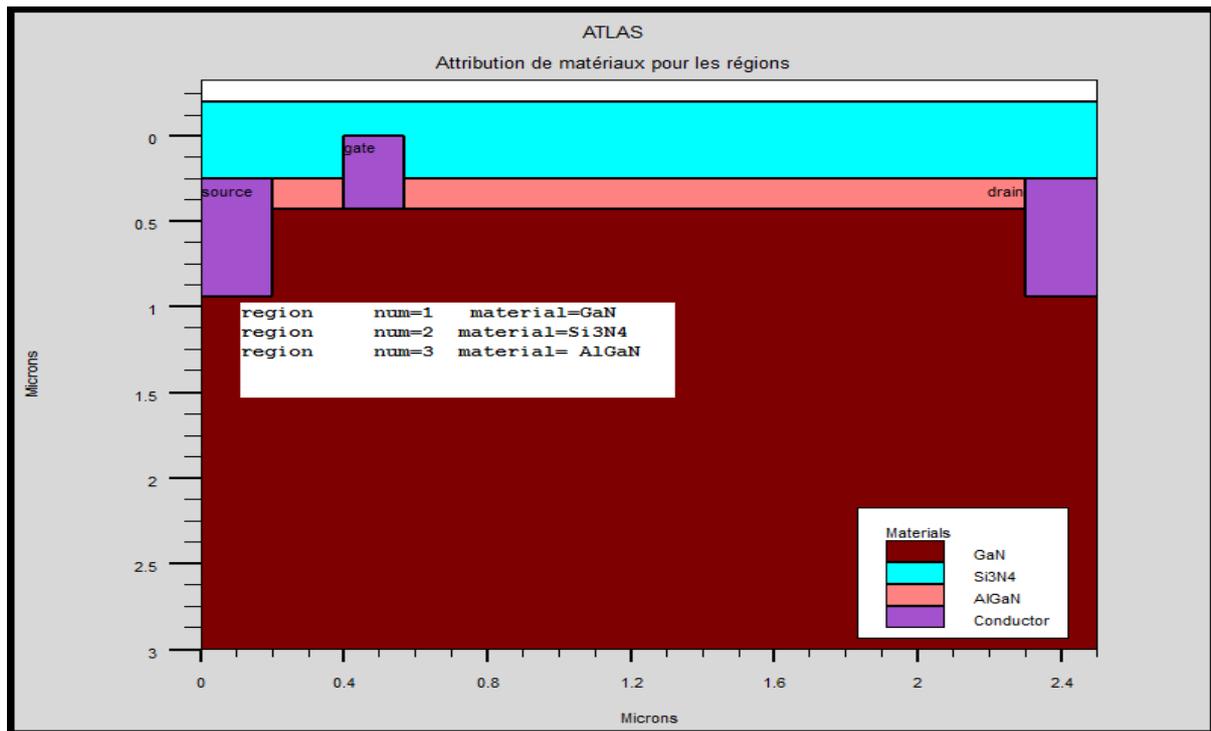


Figure III.5 : Attribution de matériaux pour les régions

### III.2.1.1 Doping

La dernière spécification de la structure est le dopage. Le format pour définir le dopage est le suivant :

**DOPING <distribution type><dopant\_type><position parameters>**

### III.2.1.2 Modèles

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels. La syntaxe de la commande Model est la suivante:

**MODELS <model flag><generalparameter><model dependentparameters>**

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci- dessous active plusieurs modèles. MODELS CONMOB FLDMOB SRH CONMOB est le modèle de la concentration dépendante. FLDMOB est le modèle de dépendance du champ électrique. SRH est le modèle de Shockley-Read-Hall.

### III.2.1.3 Beam

Lorsque l'illumination est importante pour un dispositif (comme dans les cellules solaires), il y'a la possibilité d'utiliser un certain nombre de sources de lumière et d'ajuster leurs localisation, orientation et intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit dans tous les détails nécessaires. Polarisation, réflectivité et lancer le tracé de rayons est aussi parmi les caractéristiques du simulateur.

### III.2.1.4 Contact

Contact détermine les attributs de l'électrode. La syntaxe de contact est comme suit:

**CONTACTNUMBER=<n>|NAME=<ename>|ALL**

Ce qui suit est un exemple de la commande Contact.

**CONTACT NAME=anode current**

## III.2.2 Sélection de la méthode numérique

Après la spécification du modèle des matériaux, le choix de la méthode numérique doit être spécifié. La seule commande qui s'applique pour la sélection de la méthode numérique est Method. Il existe plusieurs méthodes numériques pour calculer des solutions aux problèmes des dispositifs à semi-conducteur. Trois types de techniques de solution sont utilisés dans le simulateur Silvaco Atlas:

Découplée (Gummel)

Entièrement couplé (NEWTON)

BLOC

La méthode Gummel résout pour chaque inconnue en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y est une solution stable. La méthode de Newton résout toutes les inconnues simultanément. La méthode BLOC résout quelques équations avec la méthode Gummel et les autres avec La méthode NEWTON. Le Procédé Gummel est utilisé pour un système d'équations qui sont faiblement couplées et lorsqu'il Ya convergence linéaire. Le Procédé NEWTON est utilisé lorsque les équations sont fortement couplées avec convergence quadratique. L'exemple suivant montre L'utilisation de la commande Method. METHOD GUMMEL NEWTON Dans cet exemple, les équations sont résolues par la méthode Gummel. Si la convergence ne sera pas atteint, alors les équations doivent être résolu en utilisant la méthode de Newton.

### III.2.4 Specification des solutions

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de solution. La spécification de solution se décompose des commandes suivantes log, solve, load, et save.

#### III.2.4.1 Log

LOG enregistre toutes les caractéristiques du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistrée. La commande suivante montre un exemple de la commande LOG: LOG OUTFILE=myoutputfile.log L'exemple enregistre les informations de courant-tension dans le fichier myoutputfile.log.

#### III.2.4.2 Solve

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une Solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de la commande SOLVE. Solveinit: spécifié la valeur 0 pour l'électrode

#### III.2.4.3 Load et save

La commande LOAD entre les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de noeud dans un fichier de sortie. Ce qui suit sont des exemples des instructions LOAD etSAVE.

SAVE OUTF=HEMT.STR Dans ce cas, les informations sont enregistrées dans le fichier HEMT.STR après une commande SOLVE. Puis, dans une simulation différente, HEMT.STR peut être chargé comme suit:

LOADINFILE=HEMT.STR

### III.2.5 Analyse des résultats

Une fois qu'une solution a été trouvée pour un problème de dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec l'instruction TONYPLOT. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT, comme la montre la Figure III.7 Dans l'exemple ci-dessous, l'instruction EXTRACT obtient la caractéristique courant/tension d'un transistor. Ces informations sont enregistrées dans le fichier IVcurve.dat. Ensuite, TonyPlot trace le graphique reliant les informations contenues dans

le fichier IVcurve.dat.

### III.2.6 Organigramme de simulation

En vue d'intensifier la compréhension, à contribuer à développer davantage de part et d'autre et pour éviter toutes répétitions et confusion inutiles, l'organigramme de la figure III.6 permet de présenter le programme de simulation d'une MIS-HEMT qui contient des sections principales structurées.

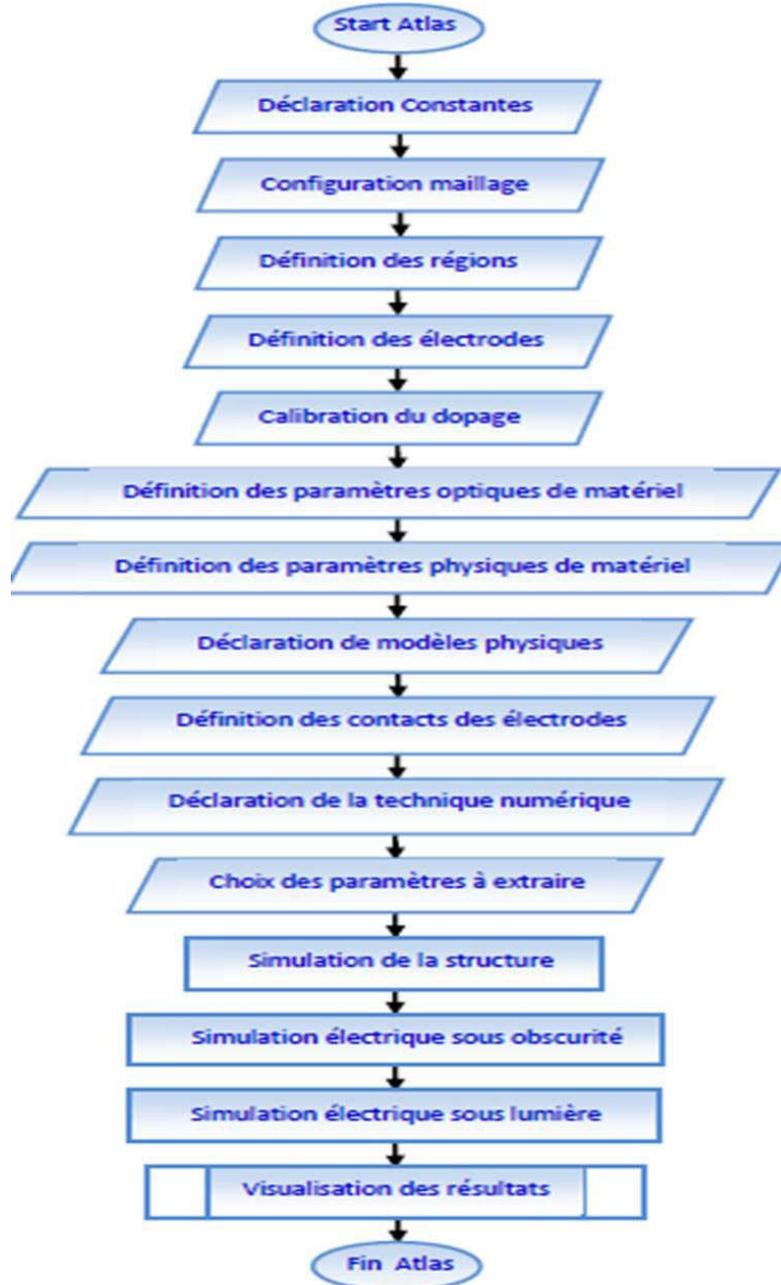


Figure III.6: Organigramme du programme de simulation

### III.3 Résultats de simulation et interprétation

Le HEMT (High Electron Mobility Transistor) est un transistor à haute mobilité d'électrons connu aussi sous le nom de transistor à effet de champ à hétérostructure. Il est composé de deux semi-conducteurs de bande interdite différente qui à leur frontière forment un puits quantique dans lequel les électrons sont confinés formant ainsi un gaz bidimensionnel d'électrons.

Dans cette partie, nous exposons les résultats de simulation numérique bidimensionnelle des caractéristiques courant-tension de transistor AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT avec différents paramètres technologiques et physiques tels que longueur, profondeur de la grille et le dopage du canal. Selon les modèles présentés dans le chapitre II, la simulation de la structure est faite en utilisant logiciel ATLAS-SILVACO.

Nous décrivons l'évolution des caractéristiques,  $I_{ds}$  en fonction de  $V_{ds}$  et  $V_{gs}$ , tout en étudiant l'influence des différents paramètres physiques et technologiques sur la structure MIS-HEMT FP.

#### III.3.1 Etudes comparatif entre le HEMT à base de AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et le HEMT à base de GaAs/AlGaAs

Les dispositifs HEMTs peuvent être fabriqués à partir de plusieurs types de matériaux tels que le Ga<sub>N</sub> et plusieurs d'autres semi-conducteurs, Conséquemment, il est bien connu que certain paramètre technologique influe sur les performances du transistor HEMT et par suite affecte ces caractéristiques de sortie surtout dans le domaine de hautes fréquences. Dans notre cas, nous avons fait une étude comparative pour choisir le matériau semi-conducteur, entre l'AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>-HEMT et le AlGaAs/GaAs-HEMT sont représentés sur la figure suivante :

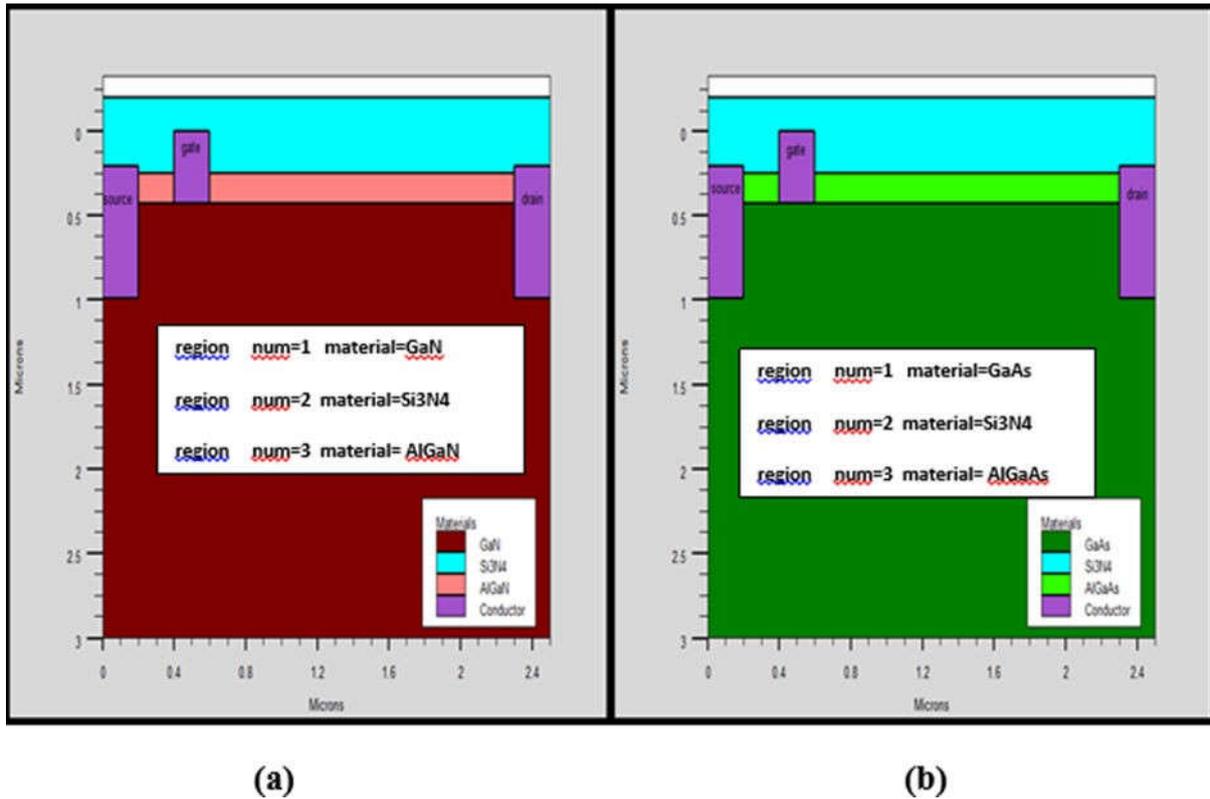
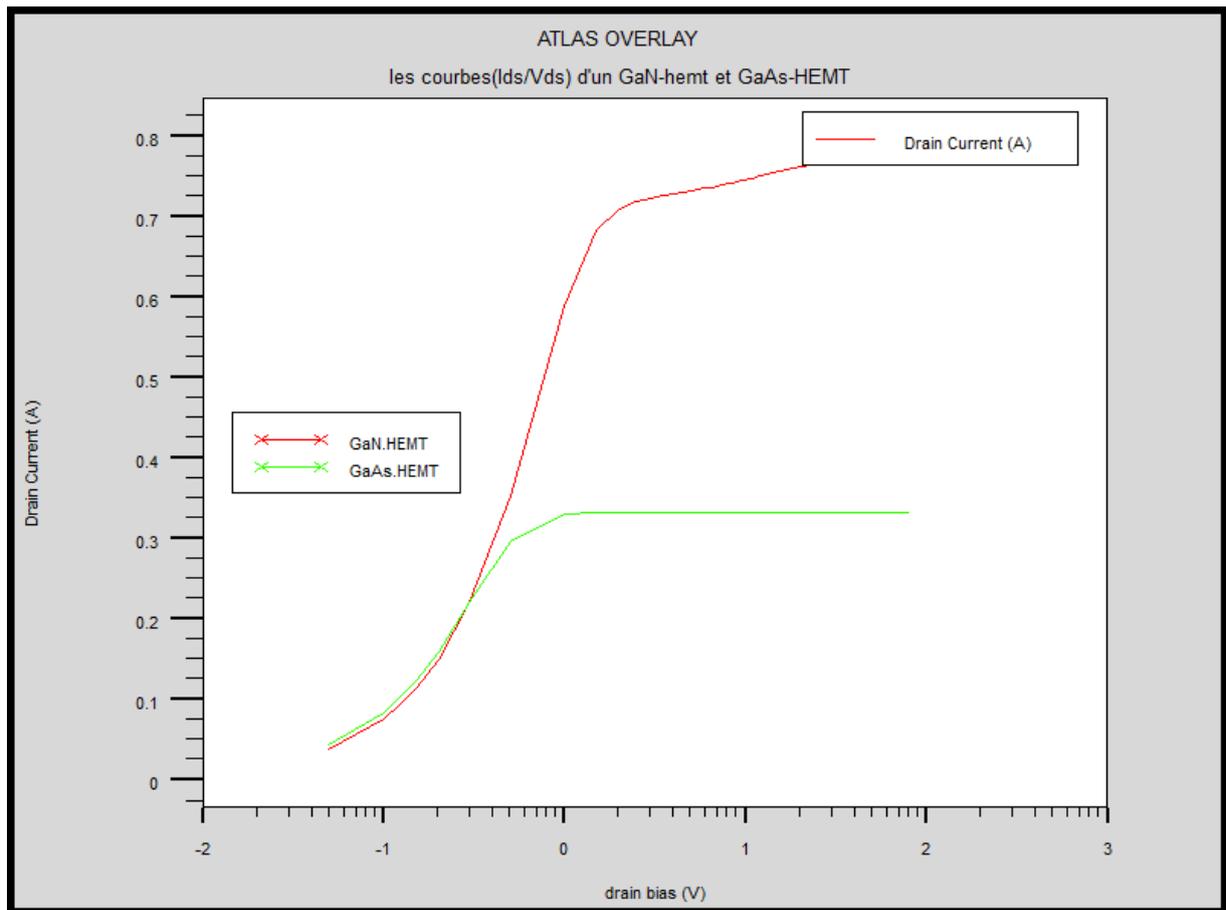


Figure III.7 : a) Structure à base de ALGa<sub>x</sub>N/GaN, b) à base de AGa<sub>x</sub>As/GaAs

### III.3.1.2 Les caractéristiques électriques du HEMT

Les caractéristiques de transfert du HEMT ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) sont illustrées par la figure III.8, pour les deux structure GaN-HEMT et le GaAs-HEMT, obtenues à partir du circuit de polarisation du HEMT fig II.11.



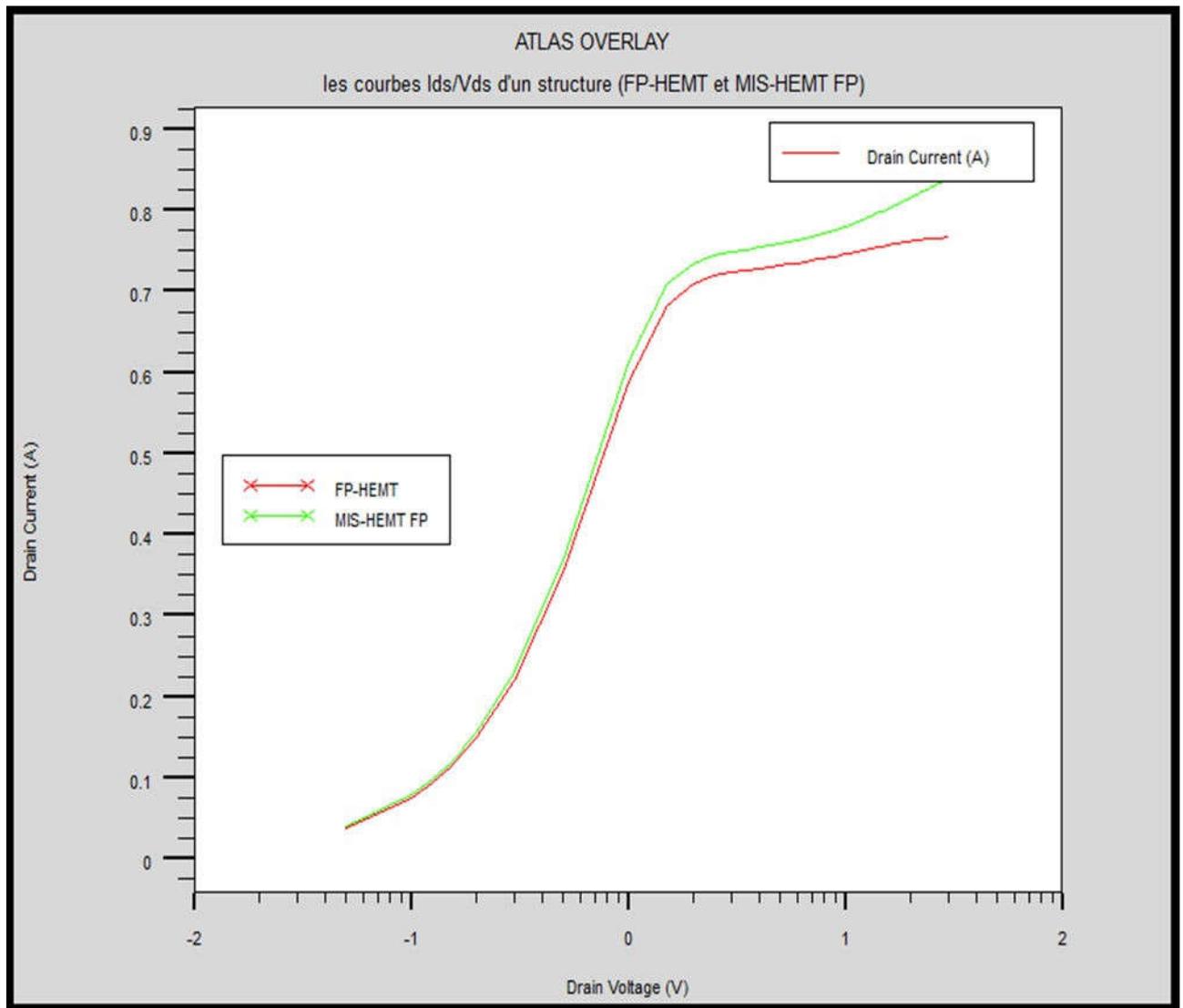
**Figure III.8:** Les caractéristiques courant - tension de drain ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) pour les deux structures avec  $V_{gs}=-3$ .

A partir de cette figure, deux régimes de fonctionnement sont observés :

- Le régime ohmique: le courant  $I_{ds}$  croît de façon linéaire en fonction des tensions  $V_{ds}$  et  $V_{gs}=-3$ , plus la tension Drain-Source augmente et plus la mobilité des électrons dans le canal augmentent, induisant un accroissement du courant  $I_{ds}$ .
- Le régime de saturation: le courant  $I_{ds}$  est quasi-constant vis-à-vis de la tension Drain-Source mais croît avec la tension Grille-Source. Au-delà de la tension coude : les électrons du canal atteignent leur vitesse de saturation. En conséquence, le courant  $I_{ds}$  atteint un certain niveau de saturation pour une tension de commande donnée.

La structure HEMT à base de GaN représente une augmentation de la densité d'électrons dans le canal 2DEG et donc une augmentation du courant  $I_{ds}$  de l'ordre de 60% par rapport à la structure HEMT à base de GaAs.



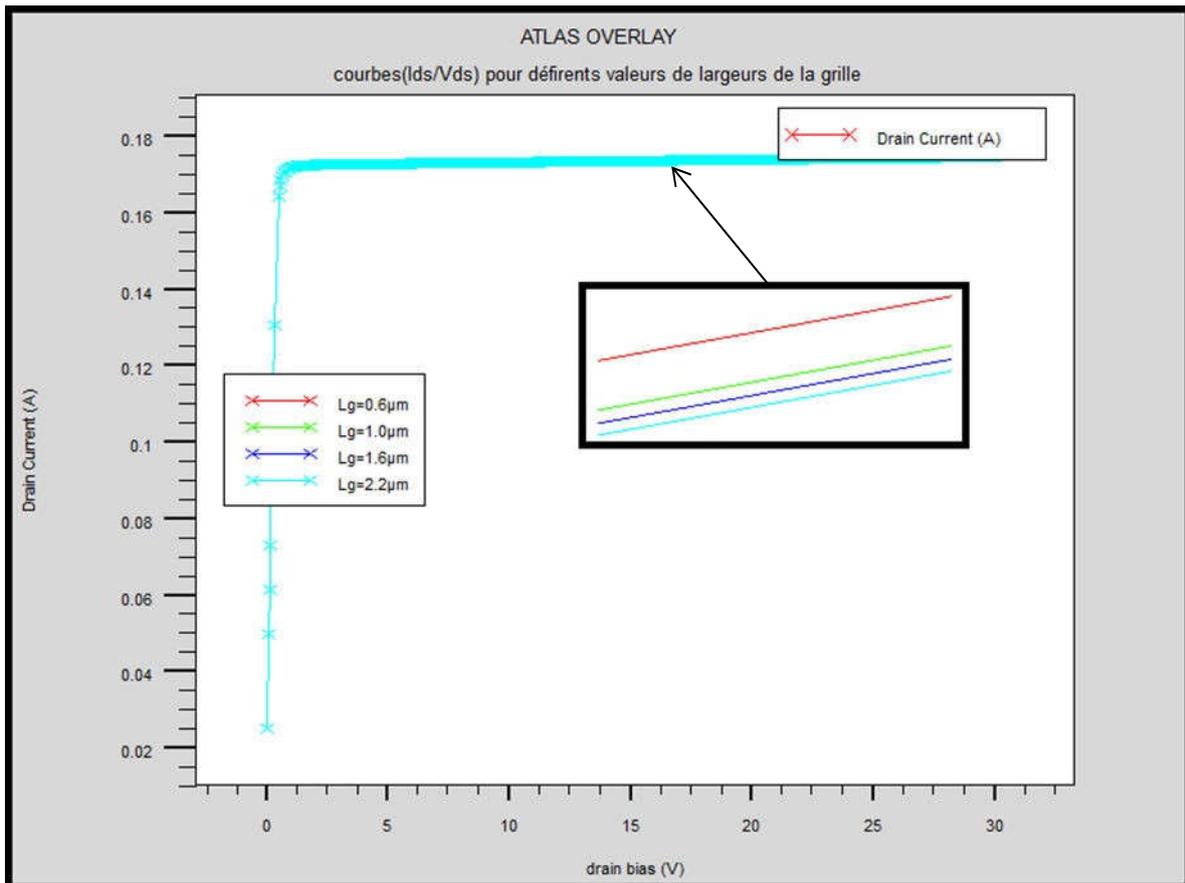


**Figure III.10 :** Les caractéristiques courant - tension de drain ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) pour les deux structures avec  $V_{gs}=-3$ .

On peut voir que le courant  $I_{ds}$  a été améliorée, cette observation peut être expliquée par l'effet important de la structure MIS-HEMT FP qui améliore efficacement l'intensité du courant source-drain dans le canal 2DEG. Ce résultat est dû aussi à la diminution du courant de fuite de la grille en appliquant un diélectrique entre la grille et la couche donneuse AlGaIn donc en augmente la barrière de Schottky, ce qui améliore l'efficacité du transport dans le transistor et par conséquent une amélioration des caractéristiques ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) .

### III.3.2.3 L'effet de la variation de la largeur de la grille de la structure AlGaIn/GaN MIS-HEMT FP-HEMT

L'effet de la variation de largeur de la grille de la structure étudiée, sur les caractéristiques ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor AlGaIn/GaN MIS-HEMT FP est représenté sur la figure III.11.



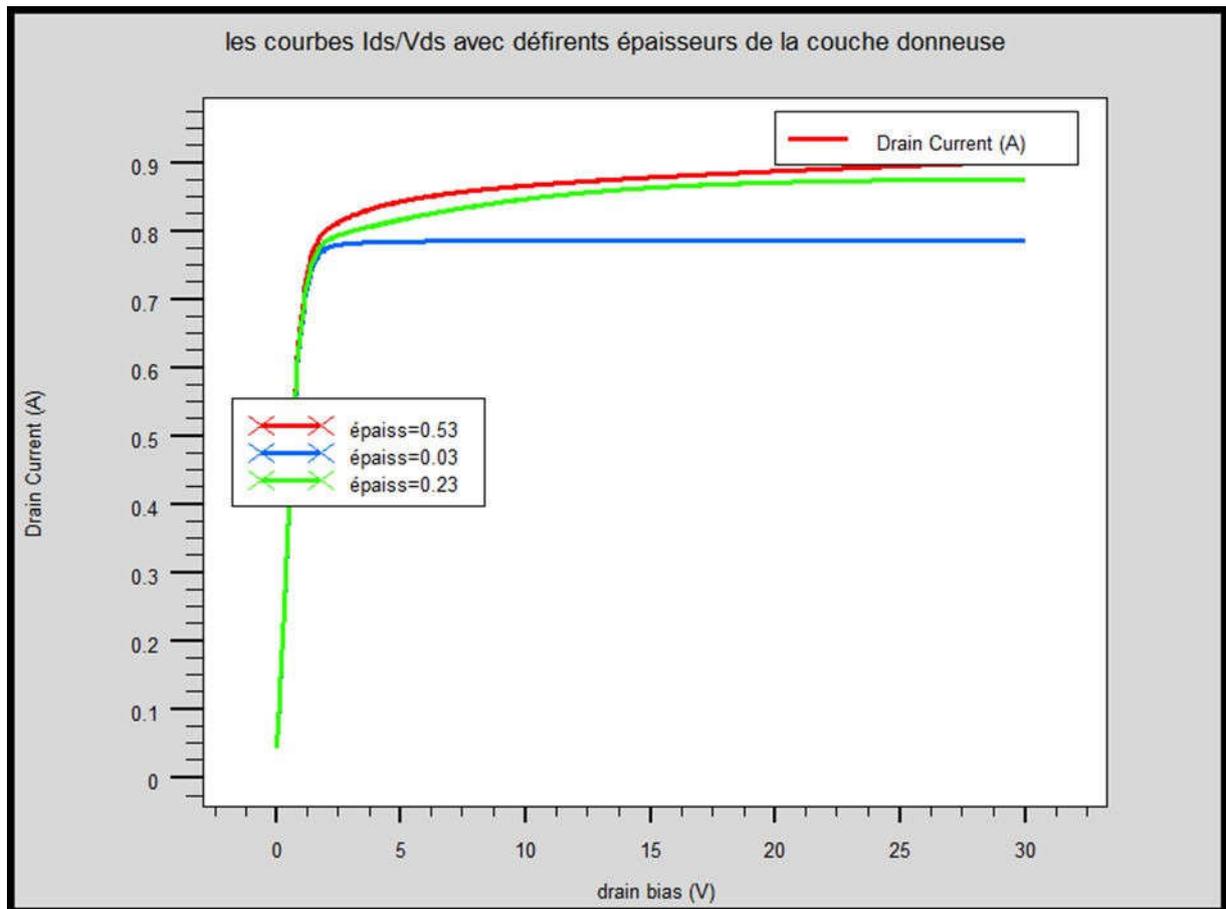
**Figure III.11** : Les caractéristiques ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) en fonction de variation de largeur de la grille avec  $V_{gs} = -3\text{V}$ .

A partir de cette figure nous pouvons observer que l'augmentation de la largeur de la grille engendre une augmentation du courant drain-source par conséquent une amélioration des caractéristiques ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) pour des largeurs plus élevées de la grille (2.2  $\mu\text{m}$ ) provoque la diminution du courant ( $I_{ds}$ ). Pour bien contrôler le courant qui passe entre la source et le drain, il faut trouver une bonne localisation et dimension de la Grille, et par cette simulation nous avons trouvé qu'il faut que la largeur de grille varie entre 0.6 et 1  $\mu\text{m}$  et une position

varie entre 2 et 3  $\mu\text{m}$  distant à la source ( $L_{gs}$ ) et  $V_{gs} = -3\text{V}$ .

### III.3.2.3 L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche donneuse de la structure AlGaN/GaN MIS-HEMTFP

L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche donneuse de la structure étudiée, sur les caractéristiques ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor AlGaN/GaN MIS-HEMTFP est représenté sur la figure III.12.



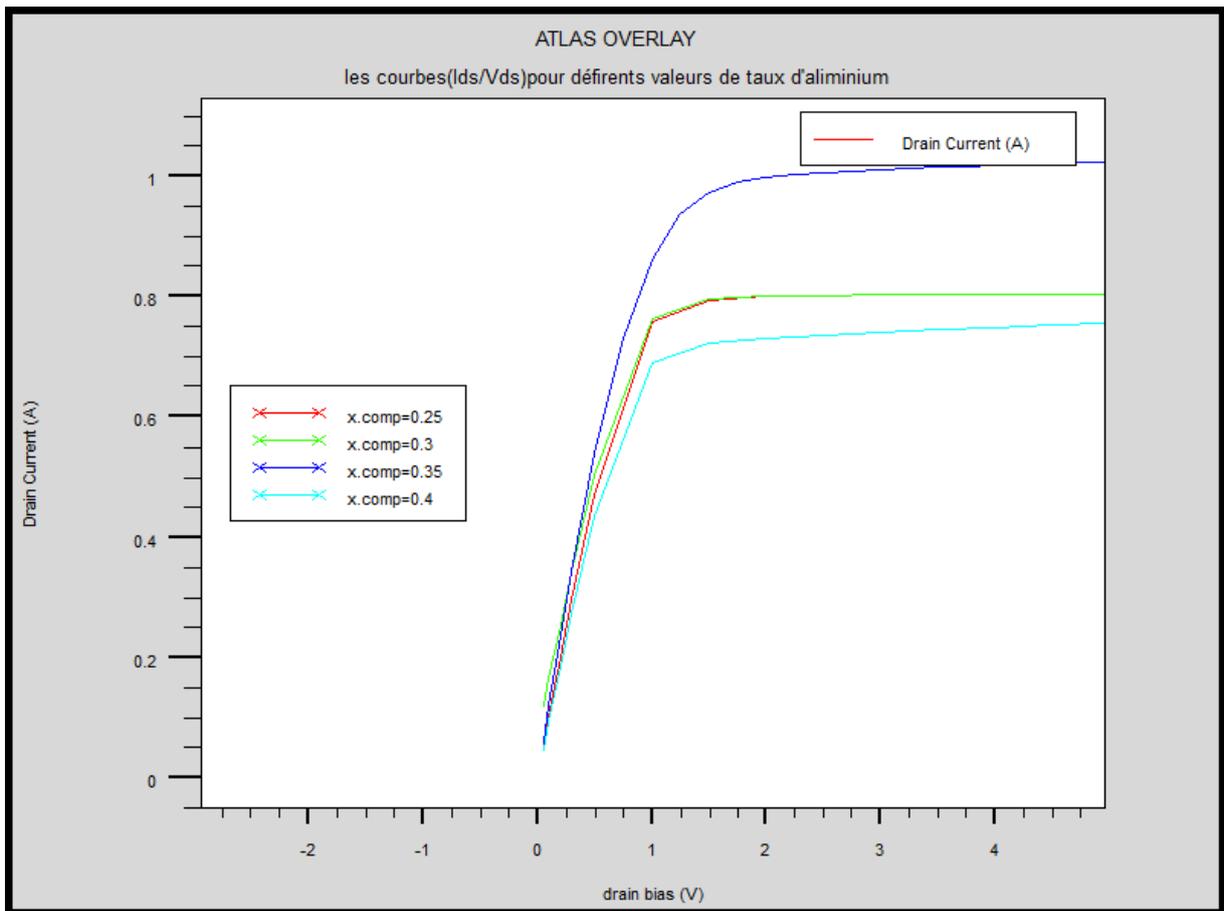
**Figure III.12** : L'effet de variation de l'épaisseur de la couche donneuse sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor AlGaN/GaN MIS-HEMT Field-Plate.

Nous pouvons observer que le courant Drain-Source augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche donneuse AlGaN, à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confinent dans le puits de potentiel et

forment le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) dans le canal et par conséquent une amélioration des performances du dispositif. Les meilleurs résultats sont effectués avec une épaisseur de  $0,53\mu\text{m}$  de la couche donneuse.

### III.3.2.4 L'effet de la variation du taux d'aluminium de la couche donneuse de la structure MIS-HEMT FIELD-PLATE AlGaN/GaN

Les caractéristique  $I_{ds}(V_{ds})$  sont représentées sur la figure III.13 à différentes fractions molaires d'Aluminium de la couche donneuse AlGaN. Dans ce cas, nous fixons les paramètres de notre transistor AlGaN/GaN HEMT tels que la couche tampon GaN non intentionnellement dopée, l'épaisseur de la couche donneuse AlGaN est de  $0.03\mu\text{m}$  et son dopage est de  $3.10^{19}$  atomes/ $\text{cm}^{-3}$ . Puis nous faisons varier le taux d'aluminium de 0.25 à 0.4, pour tension  $V_{gs}=0$

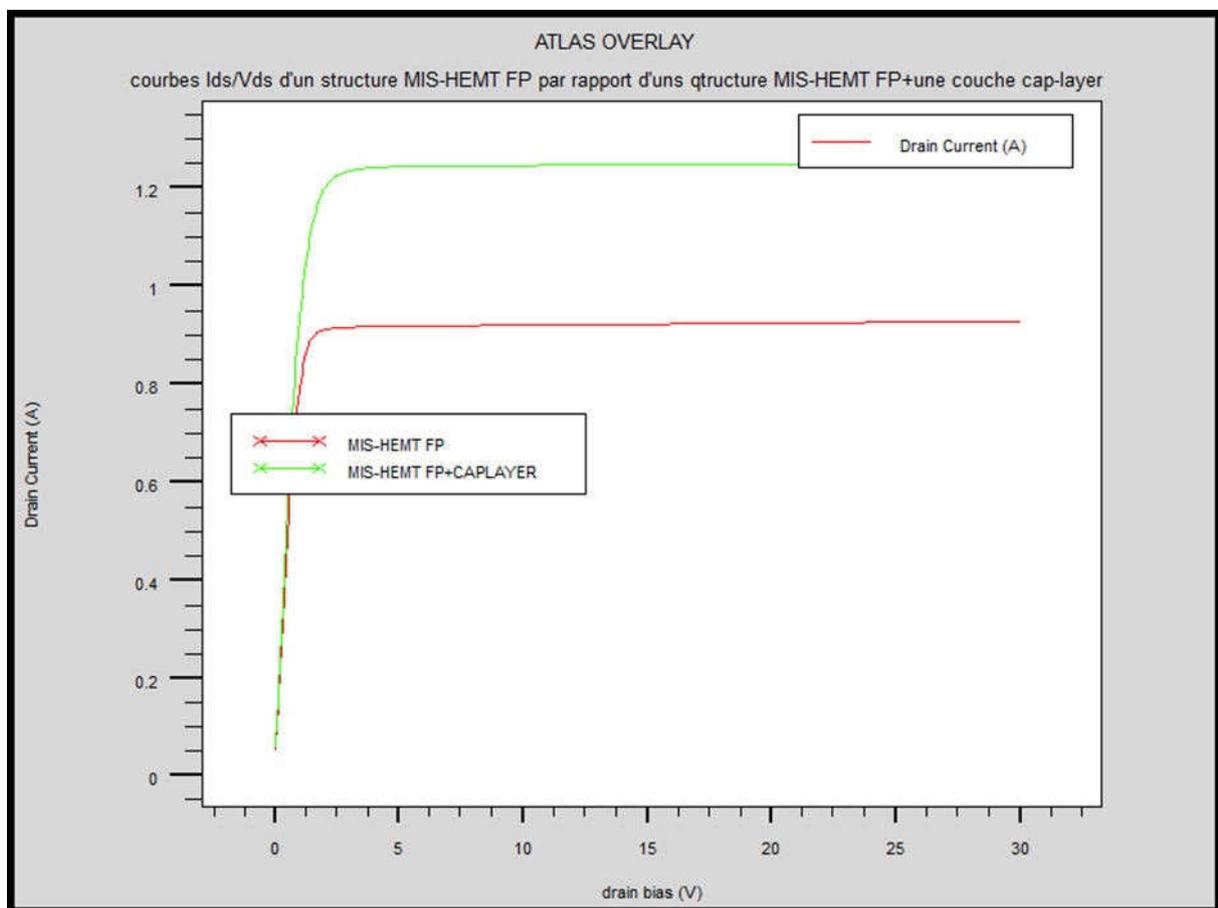


**Figure III.13:** L'effet de variation du taux d'Aluminium sur la caractéristique ( $I_{ds} - V_{ds}$ ) du transistor AlGaN/GaN MIS-HEMT FP-HEMT.

Sur la figure III.13, on peut voir que le courant diminue pour une forte augmentation de la fraction molaire ( $m=0.4$ ) d'Aluminium de la couche donneuse AlGaIn. Cet effet est dû au désaccord de maille entre AlGaIn et GaN avec forte discontinuité de la bande de conduction, pour cette raison la valeur optimale de la fraction molaire est de l'ordre de 35% pour laquelle le courant est maximum.

### III.3.2.5 L'effet de l'ajout d'une couche cap-layer sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGaIn/GaN.

L'effet de l'ajout d'une couche cap layer (dans la structure MIS-HEMT FP) sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGaIn/GaN est représenté sur la figure III.14

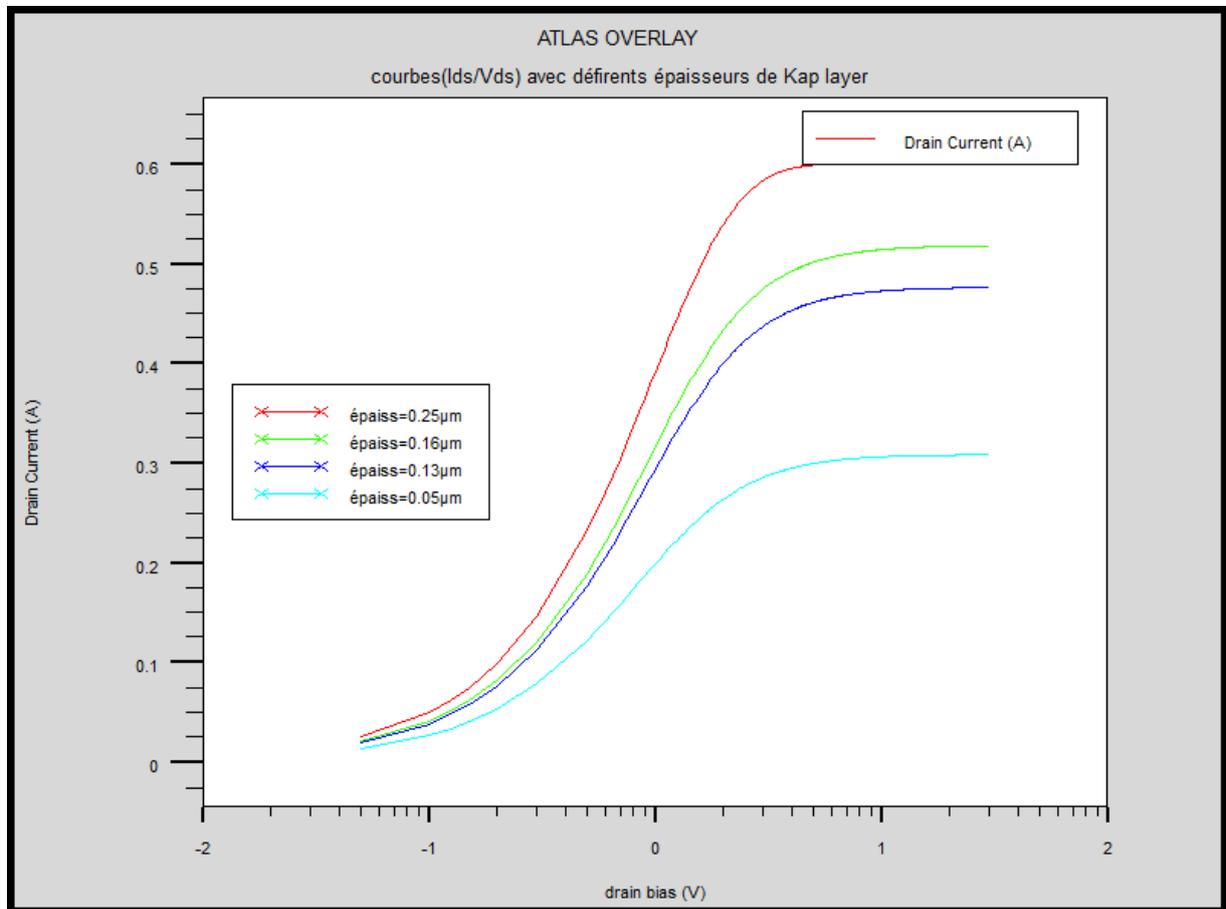


**Figure III.14:** L'effet d'ajout d'une Kap layer sur la caractéristique ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP

L'ajout d'une couche cap layer dans la structure MIS-HEMT FP à base d'AlGaN/GaN, influence la fonction de transfert  $I_{ds}/V_{ds}$  du HEMT, mais le plus important c'est d'ajouter une couche cap layer entre la couche donneuse AlGaN et la grille, ce qui engendre une augmentation de 0.15 A à 1.25 A.

### III.3.2.6 L'effet de la variation de l'épaisseur de la couche cap-layer de la structure MIS-HEMT FP AlGaN/GaN.

L'effet de variation de l'épaisseur de la couche cap-layer sur la caractéristique électrique du transistor MIS-HEMT FP AlGaN/GaN est représenté sur la figure III.15.



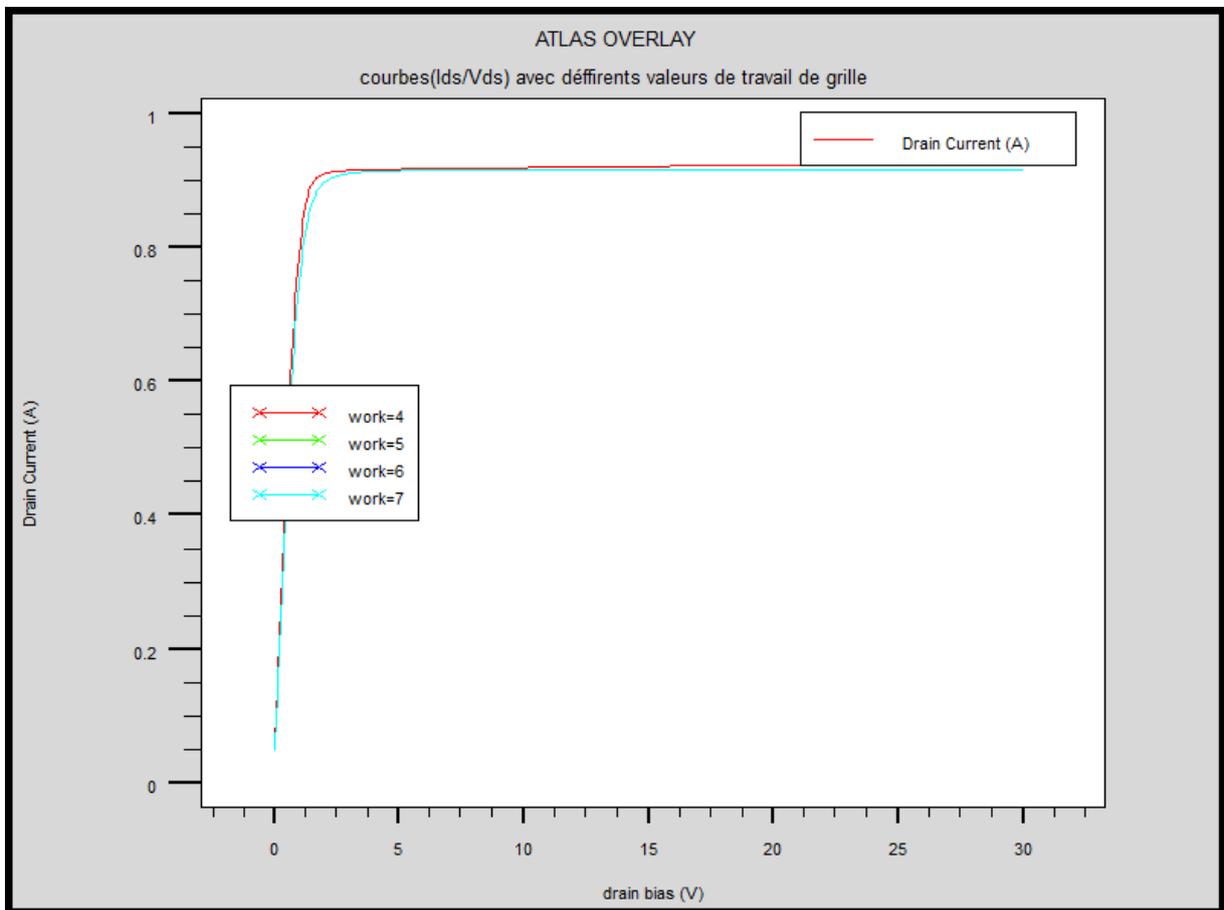
**Figure III.15 :** L'effet de variation de l'épaisseur de la couche cap-layer sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP.

En peut noter à partir de cette figure, que le courant drain-source augmente avec

l'augmentation d'épaisseur de la couche cap-layer à cause de contacte Schottky (barrière de Schottky) qui réduit le courant de fuite à travers la grille, donc il redresse le passage des électrons de la source vers le drain par conséquence l'augmentation du courant drain-source.

### III.3.2.7 Variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) de la structure MIS-HEMT FP a base GaN.

L'effet de la variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) de la structure MIS-HEMT FP à base de GaN est représenté sur la figure III.16.

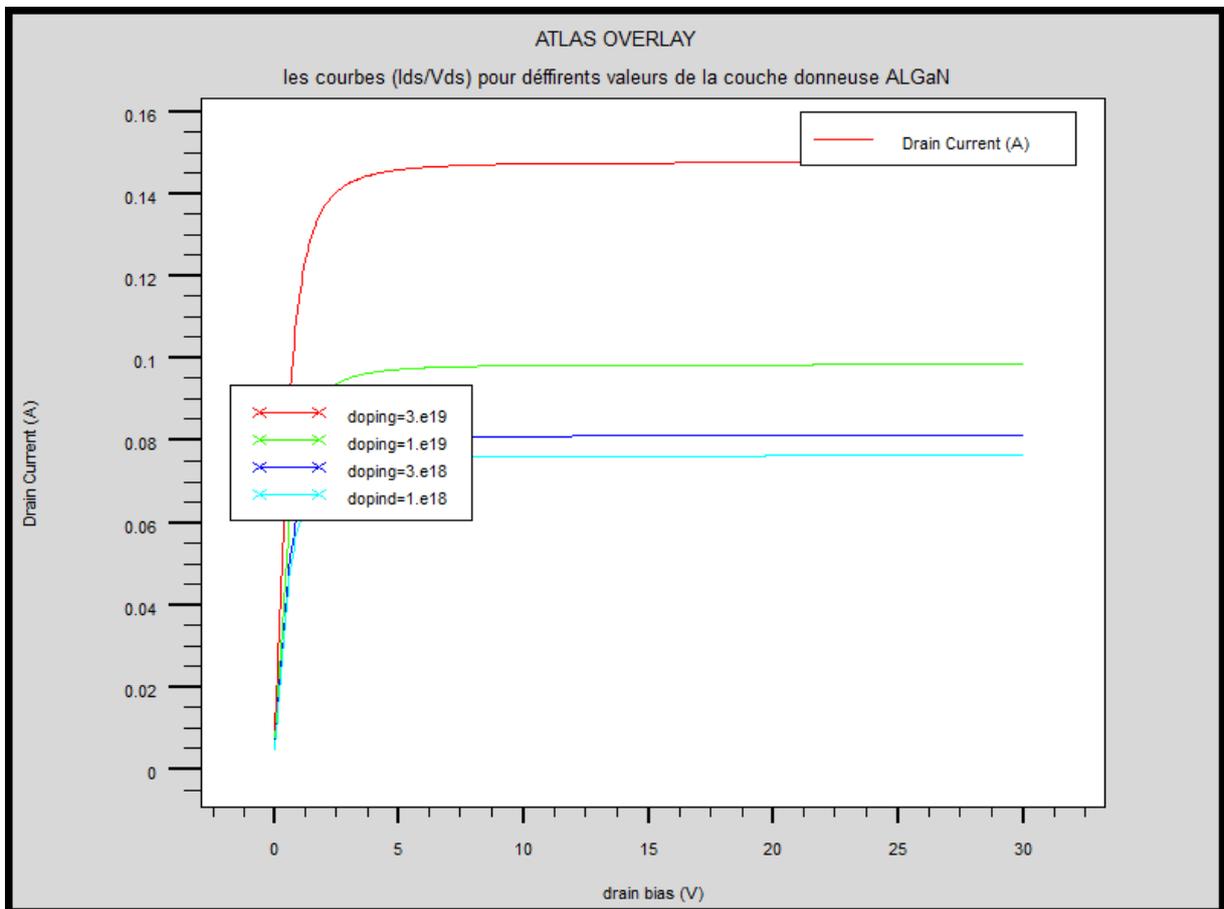


**Figure III.16 :** Variation du travail de de sortie de la grille sur la caractéristique ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP ALGaN/GaN.

A partir de cette figure, le courant drain-source diminue avec l'augmentation du travail de sortie de la grille. Pour travail de sortie entre 4 et 5, on a pratiquement le même courant. Ensuite il diminue pour des travaux de sortie plus élevée (6 et 7). Le meilleur résultat ( $I_{ds}/V_{ds}$ ) la valeur optimale du travail de la grille de la structure MIS-HEMT FP ALGaN/GaN et de l'ordre de 4 jusqu'au 5.

### III.3.2.8 L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaN sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMTFP.

L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaN sur la caractéristique ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP est représenté sur la figure III.17

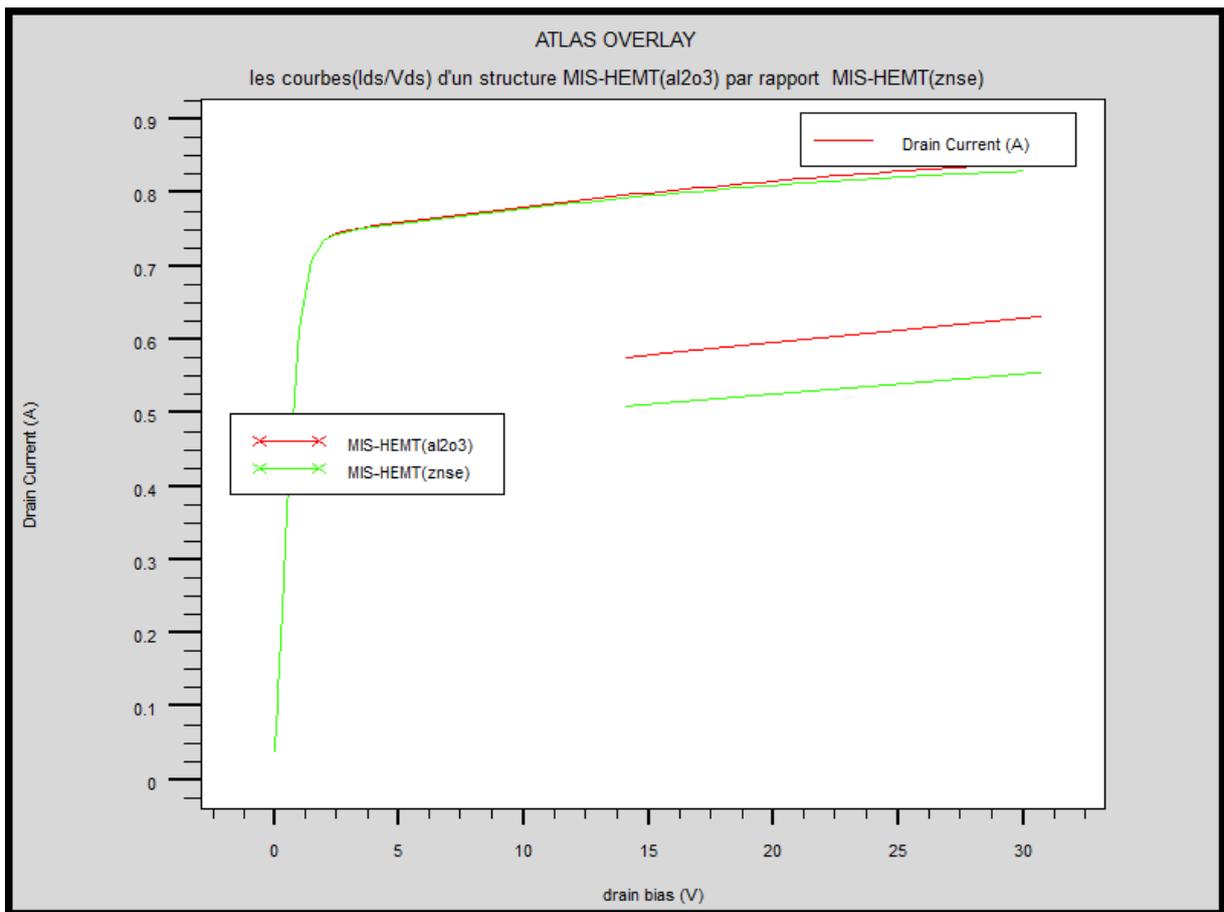


**Figure III.17:** L'effet de variation du dopage de la couche donneuse AlGaN sur la caractéristique ( $I_{ds}$  -  $V_{ds}$ ).

Cette figure montre, que la densité du courant augmente avec l'augmentation concentration du dopage (Nd) de la couche donneuse AlGa<sub>N</sub>. La densité du 2DEG (gaz bidimensionnel d'électrons) augmente à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confinent dans le puits de potentiel et forment le gaz bidimensionnel d'électrons dans le canal, ce qui se traduit par une amélioration des caractéristiques ( $I_{ds} - V_{ds}$ ) de ce composant.

### III.3.2.9 L'influence du diélectrique de la structure MIS sur la caractéristique ( $I_{ds}-V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>.

L'effet de changement du diélectrique de la structure MIS sur la caractéristique ( $I_{ds}-V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> est représenté sur la figure III.18



**Figure III.18** : L'effet de changement du diélectrique de la structure MIS sur la caractéristique ( $I_{ds}-V_{ds}$ ) du transistor MIS-HEMT FP AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>.

Cette figure montre que le changement de diélectrique (ZnSe et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans la structure MIS influe sur les caractéristiques électriques ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ), est en particulier l' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , qui s'exprime par une légère augmentation du courant du transistor MIS-HEMT FP AlGaIn/GaN.

### III.4 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons simulé le transistor AlGaIn/GaN MIS-HEMT FP-HEMT, basée sur l'utilisation d'une structure MIS-HEMT (un diélectrique) combiné avec une plaque de champ (Field-Plate), après la présentation du logiciel SILVACO nous avons modélisé la structure de ce composant d'une façon de trouver les meilleures performances électriques, ainsi, que les valeurs optimales de la structure proposé AlGaIn/GaN MIS-HEMT FP-HEMT à base de l'hétéro-structure AlGaIn/GaN, par conséquent une amélioration des performances des FP-HEMTs, pour des application en haut débit.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion Générale**

Les transistors HEMTs à base d'AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ont montré ces dernières années des résultats extrêmement prometteurs pour des applications hyperfréquences nécessitant des tensions et des débits élevés. L'objectif de ce mémoire est d'étudier une topologie proposée du HEMTs (MIS-HEMT FIELD-PLATE) à base de l'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, côté structurale et propriétés électriques utilisant le logiciel de simulation numérique bidimensionnelle ATLAS- SILVACO.

Notre travail a été mené de la façon suivante :

Le premier chapitre a été consacré à l'étude des différentes propriétés de semi-conducteur Ga<sub>N</sub> (Nitride de Gallium) tels que les propriétés électriques, optiques, structurales, physique et thermiques. Ce matériau présente des très importantes caractéristiques, sa grande conductivité thermique et son champ de claquage élevé, ces dernières assurent que le Ga<sub>N</sub> est un matériau de bon choix pour les applications de fortes puissances en hyperfréquence.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu une généralité sur les transistors à effet de champ (JFET, MOSFET et MESFET), après nous avons étudié le transistor HEMT (High electron mobility transistor) et présenté ces caractéristiques ainsi que son principe de fonctionnement.

Au troisième chapitre, nous avons simulé notre structure proposée MIS-HEMT FP à base de Ga<sub>N</sub> par le logiciel de simulation SILVACO-ATLAS, en variant plusieurs paramètres technologiques et physiques tels que l'épaisseur, le dopage, la fraction molaire...ect. Les résultats obtenus dans ce manuscrit montrent bien que ces paramètres ont une forte influence sur les performances du transistor FP-HEMT à base d'AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. Ainsi, nous pourrions dire que le transistor AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT a été optimisé avec une amélioration des propriétés électriques, augmentant ainsi la tension de polarisation pour des applications haute fréquences, par conséquent une amélioration des performances des FP-HEMTs engénérale.

Ce travail ouvre sur plusieurs perspectives d'études complémentaires et de caractérisations de d'autres structures à base de Ga<sub>N</sub>.

# **Bibliographie**



## *Bibliographie*

[1] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitruure\\_de\\_gallium](https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitruure_de_gallium)

[2] : Arnaud CURUTCHET Intitulé « Étude et simulation d'un transistor AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT »  
.Mémoire de fin d'étude en Master .UNIVERSITE BORDEAUX 1,2005.

[3] : [M. Leszczynski, J. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano and C. Wetzel, Common crystal structure of the group III nitrides, Properties, processing and applications of gallium nitride and related semiconductors, 1998, Publication INSPEC, Data review series n°23, p3-5].

[4] : Dahmane Khalida « Mémoire de fin d'étude en Master Intitulé: Étude et simulation d'un transistor AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT » thèse de Magister Université Med Khider Biskra 2014

[5] : Mme Abdelaziz Fares, « Caractérisation électrique des HEMTs à base de nitrure de Gallium AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> » Thèse de Doctorat Magister, Université de Costantine, 2005

[6] : Kaddeche Mourad, « Modélisation et Analyse de l'effet du field plate avec couche diélectrique HIGH-K sur propriétés électriques » Thèse de Doctorat Université de Costantine, 2014.

[7] : DJIMLI CHAHRAZAD « Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts ohmiques dans les transistors HEMTS base de GaN » thèse de Magister Université de Constantine, 2005.

[8] : BOUTITA LAKHDAR « Modélisation des effets de la contrainte en surface et étude des effets thermiques dans les composants à base GaN » . thèse de Magister, Université de Constantine, 2008.

[9] : Audrey PHILIPPON - MARTIN « Étude d'une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium.. Conception et réalisation d'amplificateurs distribués de puissance large bande à cellules cascodes en montage flip-chip et technologie MMIC. » Thèse Doctorat. Université de Limoges, 2007.

[10] : Ludovic Lacheze, « étude et simulation physique des effets parasites dans les HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> » thèse doctorat université de bordeaux 2009

- [11] : Samira Bouzid « Réalisation et caractérisation de HEMTS GaN transistor pour des applications dans le domaine millimétrique » Thèse Doctorat de Université, 2013
- [12] : belarbiabdelmalik, « transistor DHFET à base d'InGaN simulation et optimisation de ses performances dc et rf par le logiciel silvaco » Magister Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen 2014
- [13] : Thi Dak Ha Nguyen, « Réalisation caractérisation de HEMTs AlGaN/GaN sur silicium pour applications à haute tension » Thèse de Doctorat, Université de PARIS-SUD, 2013
- [14] : Mahifatima « Etude des détecteurs de molécules biologique à base d'un nano-mesfet de GaN/AlGaN. » Magister, Université d'Oran, 2008.
- [15] : <http://www.polytech-lille.fr/cours-transistor-effet-champ/hemt/hemtc2a.htm>
- [16] : GUIZA Douadi « Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs » Magister UNIVERSITE CONSTANTINE. 2009
- [17] : BEKRI Omar HORRA Mohammed Djilani « Effet de la température sur le transistor GaN MESFET submicronique » Université EL OUED Mémoire Master Académique 2015
- [18] : Melle Ikram El Makoudi « Etude et fabrication de transistors à enrichissement de la filière InAlAs/InGaAs pour applications millimétriques faible bruit » Doctorat délivré par l'université de Lille 2010
- [19] : GUIZA Douadi « Analyse des transistors à effet de champ MESFET GaAs » Magister Université Mentouri Costantine 2009
- [20] : T. Gasseling, « Caractérisation non linéaire avancée de transistors de puissance pour la validation de leur modèle CAO », thèse doctorat, Université de Limoges 2003.
- [21] : <http://www.polytech-lille.fr/cours-transistor-effet-champ/hemt/hemtc1a.htm> (Présentation du composant et de son fonctionnement)
- [22] : Sandra DE MEYER « Etude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium. Conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande. » Université de Limoges. Thèse N° : 26-2005
- [23] : Melle ABDELMOUMENE Mestaria « Etude et modélisation d'un transistor HEMT AlGaN/GaN » Magister, Université Tlemcen, 2012
- [24] : Mechoug Amina « SIMULATION D'UN TRANSISTOR AlGaN/InGaN/GaN A EFFET DE CHAMP (HEMT) » Mémoire de fin d'étude en Master Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

- [25] : Ali DJAFOUR, « Les propriétés des semi-conducteurs SiGe-SiC-GaN-GaAs » mémoire master université de Mouloud Mammeri Tiziouzou.
- [26] : Estudio y Modelado de la Fiabilidad y Estrés Térmicos en Transistors GaN para Applications de Microondas, 2012
- [27] : Kaddeche Mourad, « ETUDE DES EFFETS DU FIELD PLATE SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES TRANSISTORS HEMTs A BASE DE GaN »
- [28] : Yazid BEDDIAFI « Modélisation d'un transistor MESFET en GaAs en utilisant le simulateur atlas-silvaco » thèse de magistère, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [29] : Melle BELBACHIR Soumia, Melle MANSOURI Ines « Etude du comportement DC du transistor La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaN MOS-HEMT » DIPLOME DE MASTER, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID – TLEMCEM, 2016.
- [30] : M. Gassoumi, « Étude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN », Thèse de Doctorale, INSA-Lyon, juin 2006
- [31] : Han-Yin Liu, Ching-Sung Lee, Fu-Chen Liao, Wei-Chou Hsu, Bo-Yi Chou, Jung Hui Tsai, and Hsin Yuan Leed, « Comparative Studies on AlGaN/GaN MOSHEMTs with Stacked La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dielectric Structures », Journal of Solid State Science and Technology, 3(8) N115-N119, 2014
- [32] : Yacine MAROUF, « Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant AtlasSilvaco », mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [33] : MECHGOUG Amina, « Simulation d'un transistor AlGaN/InGaN/GaN à effet de champ (HEMT) », Mémoire Master soutenue en 2014 Université Med Khider Biskra.
- [34] : Henry Mathieu Hervé, « Fanet Physique des semiconducteurs et des composants électroniques » 6<sup>ème</sup> édition.