

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



**THESE**

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

**En :** Microélectronique

Par : Mr BOURSALI Amin

**Sujet**

**Contribution à la modélisation et simulation  
numérique des composants à base de matériaux III.V :  
Application à un HEMT sur substrat InP.**

Soutenue publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Mr. HAMDOUNE Abdelkader	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mme. BOUAZZA GUEN Ahlam	Professeur	UNIV. Tlemcen	Directeur de thèse
Mme.SAYAH Choukria	Professeur	UNIV.Ain Temouchent	Co-Directeur de thèse
Mr.MESLI Sidi Mohammed	MCA	ESSA . Tlemcen	Examineur 1
Mr.KERAI SALIM	MCA	UNIV. Tlemcen	Examineur 2

## **Remerciements**

### **Remerciements**

Tout d'abord et avant tout je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la santé, le courage, la confiance et la foi durant toutes ces années d'études ce qui m'a permis de d'avancer et d'arriver jusqu'à ce point.

Je ne saurais vraiment pas trouver , les expressions appropriées , adéquates et plus qu' éloquentes que mérite mon directeur de thèse Madame **BOUAZZA née Guen Ahlam** Professeur à l'université Abou-Bekr Belkaid, pour sa grande patience, ses conseils et sa compétence qui a rendu ce travail particulièrement intéressant. Je la remercie ainsi vivement pour son aide plus que précieuse lors de mes travaux de simulation et de modélisation ainsi que pour ses différents conseils plus que pertinents qui ont permis l'aboutissement de ce travail de thèse .

Je remercie aussi mon co-encadreur madame Ayache née Sayah Choukria Professeur à l'université de AIN TEMOUCHENT, qui a co-dirigé mes travaux de thèse, pour ses conseils permettent la réalisation de ce travail

J'adresse aussi mes remerciements aux différents membres du jury qui me font l'honneur d'examiner cette modeste contribution à l'étude des HEMTs à base de matériaux III.V.

Je remercie tout d'abord Monsieur **HAMEDOUNE Abdelkader** Professeur à l'Université AbouBekr Belkaid de Tlemcen d'avoir accepté de présider ce jury de thèse.

Je tiens à remercier aussi Monsieur **Mr.KERAI SALIM** MCA à l'Université AbouBekr Belkaid de Tlemcen d'avoir accepté de participer à cette thèse en qualité de d' examinateur. et d'avoir aussi accepté d'expertiser ce travail .

Je tiens également à remercier Monsieur **MESLI Mohammed** MCA à l'ESSAT Tlemcen d'avoir accepté de participer à cette thèse en qualité de d' examinateur.

et d'avoir aussi accepté d'expertiser ce travail .

Pour finir, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, et contribué d'une façon ou d'une autre à l'aboutissement de ce modeste travail.

## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Mes chers frères

Mes professeurs

Mes amis et mes collègues

## Sommaire

### Sommaire :

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	xi
Liste des abréviations.....	xii
Introduction générale .....	1
<i>CHAPITRE I: SEMI-CONDUCTEURS III-V .....</i>	<i>5</i>
<i>1.1 Introduction.....</i>	<i>6</i>
<i>1.2 Définition des semi-conducteurs III-V.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3 . Les différents composés semi-conducteurs III.V.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3.1 les composés binaires.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3.2. Les composés ternaires et quaternaires.....</i>	<i>9</i>
<i>1.4 Propriétés des semi-conducteur III-V .....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.1. Structure cristalline des semi-conducteurs III-V .....</i>	<i>10</i>
<i>1.4.2 Propriétés Electrique .....</i>	<i>11</i>
<i>1.4.3. Les propriétés optiques .....</i>	<i>12</i>
<i>1.5. Structure des bandes d'énergie des semi-conducteurs III – V .....</i>	<i>14</i>
<i>1.5.1. Structure de bande du GaAs et de l'InP.....</i>	<i>16</i>
<i>1.5.1.1. Structure de bande du GaAs .....</i>	<i>16</i>
<i>1.5.1.2 Structure de bande de l'InP .....</i>	<i>19</i>
<i>1.5.2Vitesse de saturation : .....</i>	<i>21</i>
<i>1.6 Bandes interdites des composés III-V .....</i>	<i>21</i>
<i>1.6.1 Bandes interdites des principaux composés III-V .....</i>	<i>21</i>
<i>1.6.2 Les hétérostructures des matériaux.....</i>	<i>22</i>
<i>1.7 Phénomènes de transport dans les semi-conducteurs.....</i>	<i>24</i>
<i>1.8. L'intérêt des alliages semi-conducteurs .....</i>	<i>24</i>
<i>1.9. Phénomène d'ionisation par impact .....</i>	<i>25</i>
<i>1-10 : Les avantages des semi-conducteurs III-V .....</i>	<i>26</i>
<i>1.11 Applications des semi-conducteurs III-V: .....</i>	<i>27</i>
<i>Conclusion .....</i>	<i>28</i>

## Sommaire

CHAPITRE II :	29
TRANSISTOR A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE.....	29
I. Introduction.....	30
II. Définition de l'hétérojonction.....	31
II.1 Introduction.....	31
II.2 Discontinuité de la bande .....	32
VI. Contact métal semi-conducteur.....	34
VI.1. contact ohmique ( $\Phi_m < \Phi_s$ ).....	34
VI.2. Contact shottky ( $\Phi_m > \Phi_s$ ).....	36
V. Les transistors à effet de champ.....	39
V.1 Transistors JFET et MESFET.....	39
V.1.1. Principe de fonctionnement du MESFET.....	42
V.2. Le Transistor MOSFET.....	43
V.2.1 Principe de fonctionnement du Transistor MOSFET.....	44
V.3 Le Transistor HEMT.....	45
V.3.1 Structure et principe de fonctionnement de transistor du HEMT.....	45
V.3.2. Caractéristiques électriques des transistors HEMTs.....	48
V.3. 3. Le courant de drain-source.....	49
V.3.4 .Eléments intrinsèques décrivant l'aspect actif intrinsèque du transistor.....	53
V.3.4.2 Les capacités.....	55
V.3.4.3 Les résistances $R_i$ , $R_{gd}$ .....	55
V.3.5. Schéma équivalent petit signal .....	56
V.3.6. Dégradation des performances du HEMT.....	57
V.3.6.1 . Effondrement du courant (collapse Current).....	57
V.3.7 La fréquence de coupure intrinsèque.....	58
V.3.8. La Fréquence maximale d'oscillation.....	58
IV. Effets limitatifs et indésirables dans les HEMTs.....	58
IV.1. L'ionisation par impact.....	59
IV.2 L'effet « kink ».....	59
IV.3 Les effets de canaux courts.....	59
9IV.4 Abaissement de barrière de potentiel induit par le drain (DIBL) :.....	60

## Sommaire

IV.5 .Phénomènes de piège.....	61
IV.6 Effets d'auto-échauffement et d'électrons chauds.....	62
IIV. Conclusion.....	63
Chapitre III:.....	64
Résultats et discussions.....	64
III.1 Introduction.....	65
III.2 Présentation de TCAD-SILVACO .....	65
III.2.1 Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO .....	66
III.2.1.1 Équations de bases de la physique des semi-conducteurs .....	66
III.2.1.2Présentation de l'outil ATLAS .....	68
III.2.1.3. Ordre des commandes ATLAS .....	71
III.2.1.4. les Modèles physiques.....	73
III.2.1.5. Méthodes numériques .....	73
III.3. Résultats de simulation .....	74
III.3.1.Structure HEMT simulée.....	74
III.3.2 Structure étudiée en 3D et maillage.....	75
III.3.3. Diagramme de bande d'énergie et paramètres internes.....	77
III.3.4.Caractéristiques électriques du HEMT InAlAs/InAs sur substrat InP étudié.....	79
III.3.4.1.Caractéristique de sortie .....	79
III.3.4.2 Caractéristique de transfert .....	81
III.3.4.3. Transconductance .....	81
III.3.4.4 Abaissement de barrière induit par drain (DIBL) .....	82
III.3.4.5. Les caractéristiques fréquentielles et paramètres S .....	84
III.3.2.1 l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche canal sur les performances du dispositif	86
III.3.2.2. l'impact de la variation de fraction molaire du matériau du canal InGaAs.....	93
III.4 . Conclusion .....	100
Conclusion générale .....	101
References.....	105
Résumé .....	111

## Liste des figures

---

Figure I-1: (a) La structure blende de zinc et (b) sa première zone de Brillouin.....	10
Figure I.2: les transitions optiques directes et indirectes.....	13
Figure I.3 : Structure de bande d'énergie du :a-gap indirect et b-gap direct [11].....	15
Figure I.4: Structure de bandes de GaAs.....	17
Figure I.5 : Structure de bandes d'InP.....	20
Figure I .6: évolutions de l'énergie de bande interdite et du paramètre cristallin des alliages de composés III-V [20].....	22
Figure I.7 : diagrammes schématique montrant les différents types d' hétérojonctions [21].....	22
Figure I-8: représentation des bandes de conduction et de valence d'un HEMT.....	23
Figure I.9 : phénomène d'ionisation par choc (ei- : électron à l'état initial,ef : électron à l'état final, es-: électron secondaire créé, es+ : trou créé).....	26
Figure I.10: Exemples d'applications des semi-conducteurs III-V. [29].....	27
Figure II.1 Le gap énergétique des composés III – V et des dérivés ternaires en fonction de la constante de réseau [31].....	31
Figure II.2 .Diagrammes de bande d'énergie pour les semi-conducteurs à bande interdite large et étroite(A)avant et (b) après le contact.....	32
Figure II.3 Puits quantique de forme carrée non dopée idéale (a) Structure, diagramme de bande d'énergie et (c) Diagramme de bande de conduction si AlGaAs est dopé n [33].....	34
Figure II.4 .Diagramme de bande d'une interface métal-semi-conducteur: (a) avant contact et (b) après contact [32].....	35

## Liste des figures

---

Figure II.5 Energie et schéma du contact Schottky: (a) avant contact et (b) au contact [34].....	37
Figure II- 6: Diagramme énergétique d'un contact Schottky, a) en polarisation direct, b) en polarisation inverse.[35].....	39
Figure II.7 Coupe schématique d'un JFET et diagramme de bande.....	40
Figure II.8 Coupe schématique du MESFET.....	41
Figure II.-9 La structure du MESFET.....	42
Figure II.10. la polarisation du transistor MESFET.....	43
Figure II.11. Caractéristique de sortie IDS-VDS du MESFET.....	43
Figure II.12 représentation schématique d'un MOSFET classique.....	44
Figure II.13 Structure typique du transistor HEMT à hétérojonction.....	46
Figure II.14 Représentation schématique des éléments électriques d'un transistor HEMT.....	49
Figure II.15 Caractéristique courant – tension d'un transistor HEMT.....	50
Figure II.16: Caractéristique de sortie d'un HEMT [52].....	52
Figure II.17 Schéma équivalent d'un FET en régime petits signaux.....	56
Figure II.18 DIBL(Drain-Induced Barrier Lowering).....	61
Figure II.19 Caractéristique de sortie avec l'effet de l'Auto-échauffement.....	62
Figure III.1 : Fichiers d'entrée et de sortie d'ATLAS [63].....	70
Figure III.2 : Ordre des groupes de commandes d'ATLAS avec leurs instructions [63].....	72

## Liste des figures

---

Figure III.3. Coupe schématique du HEMT étudié.....	74
Figure III.4. Structure simulée du transistor HEMT.....	75
Figure III.5. Maillage de la structure en 3D.....	76
Figure III.6. Maillage de la structure en 2D.....	76
Figure III.7. Dopage des différentes couches du HEMT étudié.....	77
Figure III.8. Diagramme de bande d'énergie.....	77
Figure III.9. La mobilité des électrons.....	78
Figure III.10. Champ électrique suivant l'axe x.....	78
Figure III.11. Champ électrique interne suivant l'axe y.....	79
Figure III.12. Caractéristique IDS-VDS pour le transistor HEMT InAlAs / InGaAs / InP étudié.....	80
Figure III.13. Courant de drain en fonction de la tension source-grille pour un transistor InAlAs / InGaAs / InP HEMT étudié.....	81
Figure III.14. Transconductance.....	82
Figure III.15. Evolution du courant drain-source en fonction de la tension grille-source à Vds = 1.0 et 3.0 V.....	83
Figure.III.16. Courants Ion et Ioff.....	84
Figure III.17. Gain en courant, h21 et gain en puissance en fonction de la fréquence pour notre HEMT InAlAs / InGaAs / InP.....	85
Figure III.18. Paramètres S11 et S21 du transistor HEMT InAlAs / InGaAs / InP.....	85

## Liste des figures

---

Figure III.19. Structure InAlAs/InAs/InP simulé.....	87
Figure III.20.Maillage de la structure.....	88
Figure III.21. Profil de dopage de la structure simulée.....	88
Figure III.22.Diagramme de bande d'énergie.....	89
Figure III.23.Courant de drain en fonction de la tension source-drain pour un transistor InAlAs / InAs / InP HEMT étudié.....	89
Figure III.24.Courant de drain en fonction de la tension source-grille pour le transistor HEMT InAlAs / InAs / InP étudié.....	90
Figure III.25. Transconductance.....	90
Figure III.26. Evolution du courant drain-source en fonction de la tension grille-source à $V_{ds} = 0.1$ et $3.0$ V.....	91
Figure III.27. Courants $I_{on}$ et $I_{off}$ .....	92
Figure III.28. Gain en courant en fonction de la fréquence pour le HEMT InAlAs / InAs / InP étudié.....	92
Figure III.29.la caractéristique de transfert $I_{ds}-V_{gs}$ pour différentes fraction molaire de l'indium de la couche canal InGaAs pour le transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	93
Figure III.30. La caractéristique de sortie $I_{ds}-V_{ds}$ pour différentes fraction molaire de l'indium de la couche canal InGaAs pour le transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	93
Figure III.31. La transconductance avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	94
Figure III.32. Courants $I_{on}$ et $I_{off}$ avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	95
Figure III.33. Courants de fuites de la grilleavec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	95

## Liste des figures

---

Figure III.34 La capacité drain-source avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	97
Figure.III.35 La capacité grille -source avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	97
Figure.III.36. Représentation de la mobilité pour différente fraction molaire d'indium dans la couche canal du HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	98
Figure III.37.Gain en courant en fonction de la fréquence pour différente fraction molaire d'indium dans la couche canal du HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	99
Figure.III.38.Gain en puissance en fonction de la fréquence pour différente fraction molaire d'indium dans la couche canal pour le transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.....	100

## Liste des tableaux

---

Tableau I.1 : Extrait de la classification périodique des éléments mettant en évidence les éléments III et V.....	7
Tableau I-2 Propriété des principaux composés binaires III-V à température ambiante [4,5].....	8
Tableau I.3. : Propriétés électroniques du GaAs et du $Ga_{1-x}Al_xAs$ [9]. .....	12
Tableau I.4: matériaux III.V et Type de gap correspondant.....	15
Tableau (I-5) : Propriétés du GaAs à température ambiante (300 K).....	18
Tableau I -6 : matériaux avec accord de maille [26].....	25
Tableau III.1 : Paramètres physiques et géométriques du $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}As/InP$ HEMT.....	75
Tableau III.2 : Paramètres géométriques du $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}As/InP$ HEMT.....	80
Tableau III.3: Paramètres géométrique du dispositif.....	87
Tableau III.4. Impact de la fraction molaire sur les caractéristique DC et AC du HEMT.....	96
Tableau III.5. effet de la variation de la fraction molaire sur les fréquences caractéristiques $F_t$ et $F_{max}$ du HEMT étudié. ....	99

**Liste des abréviations et symboles :**

Ga : Gallium  
Al : Aluminium  
In : Indium  
P: phosphide  
As : arsenide  
GaAs : arsenide de Gallium  
InP : Indium de phosphide  
InAs : arsenide d' Indium  
AlAs : arsenide d' Aluminium  
AlGaAs : arsenide de Gallium -Aluminium  
InAlAs : arsenide d' Aluminium- Indium  
Psp : Polarisation spontanée  
Ppz : Polarisation piéziélectrique  
E : Champ électrique  
P : Polarisation  
TMG : Triméthylgallium  
TMA : Triméthylaluminium  
TMI : Triméthylindium  
GaCl : Monochlorure de gallium  
TEGa : Triéthylgallium  
CpMg : Biscyclopentadh énylmagnésium  
NH<sub>3</sub> : Ammoniac  
SiH<sub>4</sub> : Hydrures  
SiC : Carbure de Silicium  
ZnO : Oxyde de Zinc  
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> : Nitrure de Silicium  
EPVH : Epitaxie en phase vapeur hydrure  
ELO : Croissance par reprise d'épitaxie latérale  
EPVOM : Epitaxie en phase vapeur organométallique  
EJM : Epitaxie par jets moléculaires  
PDA : Assistants numériques personnels  
DEL : Diode Electroluminescente  
Eg : Energie du gap  
Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Oxyde d'yttrium

## Liste des abréviations et symboles

---

IR : Infrarouge  
THz : Terahertz  
GPa : Giga Pascal  
MET : Microscope électronique à transmission  
DBR : Réflecteur de Bragg distribué  
b : Paramètre de courbure (Bowling parameter)  
PL : Spectre de photoluminescence  
HCL : Acide chlorhydrique  
mmgh : Millimètre de mercure  
RHEED : Diffraction d'électrons à haute énergie  
2DEG : Gaz électronique à deux dimensions (Two-dimensional Electron Gas)  
Ns : Densité d'électrons  
 $\sigma$  : Densité de charge  
q : Charge d'électrons  
 $\epsilon_0$  : Permittivité du vide  
 $\epsilon_r$  : Permittivité relative  
FET : Transistor à effet de champ  
JFET : Transistor à effet de champ à jonction  
MESFET : Transistor à effet de champ à barrière Schottky  
MOSFET : Transistor à effet de champ à grille isolée  
HEMT : Transistor à Haute Mobilité Electronique  
HFET : Transistor à effet de champ à hétérojonction  
DHFET : Transistor à effet de champ à double hétérojonctions  
ZCE : Zone de Charge d'Espace  
Vds : Tension drain-source  
Vgs : Tension grille-source  
Ids : Courant drain-source  
Igs : Courant grille-source  
Vth : Tension de seuil  
Vsat : Vitesse de saturation  
Vknee : Tension de coude  
 $\mu$  : Mobilité  
 $m^*$  : Masse effective des porteurs  
 $\mu_n$  : Mobilité des électrons  
E : Champ électrique  
Ft : Fréquence de transition  
Fmax : Fréquence d'oscillation maximale

## Liste des abréviations et symboles

---

Gm : Transconductance

Cgs : Capacité grille-source

Cgd : Capacité grille-drain

Cds : Capacité drain-source

GU : Gain en puissance

VBR : Tension de claquage (Breakdown vomtage)

SHE : Effet d'auto-échauffement (Self-Heating)

n.i.d : non intentionnellement dopé

# ***Introduction Générale***

Ces dernières décennies nous avons assisté à une fulgurante évolution dans tous les domaines de la science et de la technologie tels que les télécommunications, l'automobile, le domaine médicaux, le confort, la sécurité, et même le divertissement, et ceci grâce à la révolution des dispositifs micro et nanoélectroniques. Au cours du temps, une progression dans le domaine des semi-conducteurs quasi-exponentielle et une miniaturisation associée furent observées. L'une des technologies clés rendant cette évolution possible fut basée sur l'utilisation des matériaux III-V pour les applications hautes fréquences par exemple. Le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor), présenté pour la première fois en 1993 par Khan, avec un potentiel et des performances exceptionnelles (puissance élevée, haute fréquence et haute tension dans le domaine micro-ondes et plage d'ondes millimétriques), comparés à leurs homologues basés sur d'autres matériaux, ont montré d'excellentes aptitudes dans les applications exigeant une grande vitesse et un faible bruit. Ils ont aussi permis le passage à l'électronique numérique et l'optique rapide. Les HEMT ont ainsi reçu une attention substantielle pour leur excellent transport d'électrons assurant des applications à haute vitesse et à haute puissance. Les dispositifs HEMT concurrencent et remplacent les transistors à effet de champ traditionnels avec d'excellentes performances à haute fréquence, et haute puissance. D'autre part l'introduction des matériaux III.V pour la conception des HEMT pour les applications haute fréquence fut plus que bénéfique dans le domaine des télécommunications et les systèmes de communication à fibres optiques à haute vitesse et opérant à haute fréquence et permettant le développement des systèmes de communication sans fil. Les exigences de faible coût, de faible consommation d'énergie, d'intégration de haut niveau et de dispositifs de fonctionnement en fréquence deviennent de plus en plus nécessaires. De nombreux efforts ont

## Introduction générale

---

été faits pour améliorer les performances des dispositifs afin de réaliser des HEMT avec une mobilité électronique plus élevée et une longueur de grille plus courte ceci a pu être réalisé grâce à l'utilisation d'hétérojonctions .et par conséquent de HEMTs à base de matériaux III.V.

Ainsi notre travail a consisté à étudier les performances d'un HEMT à base de matériau III.V soit un HEMT à base de l'  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{InP}$  .Notre étude a été réalisé par le biais de la simulation sous environnement SILVACO-TCAD.

Notre travail fut ainsi divisé en trois chapitres:

- ❖ Dans le premier chapitre, nous avons présenté les propriétés physiques, électriques et optiques, les structures cristallographiques et les différentes propriétés des composés semi-conducteurs III-V.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré quelque définition des hétérojonctions. Nous avons aussi présenté les différents transistors à effet de champ tels que le transistor JFET (Junction Field Effect transistor), le transistor MESFET (Metal Semi-conductor Field Effect Transistor), le transistor MOSFET (Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor) et transistor HEMT ou HFET (High Electron Mobility transistor ou Heterojunction Field Effect Transistor, pour lesquels nous avons rappelé les principes de fonctionnement .
- ❖ Au troisième chapitre nous présentons les résultats de simulations obtenus suite à l'utilisation du logiciel SILVACO -TCAD, pour ceci nous avons tout d'abord présenté le simulateur que nous avons utilisé (silvaco- TCAD) suite à quoi nous présenté notre structures soit le HEMT étudié à base de  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{InP}$ , nous avons aussi montré l'importance du matériau formant le canal et la variation de sa fraction

## Introduction générale

---

molaire sur les performances du HEMT étudié .Nous terminons notre thèse par une conclusion générale et des perspectives.

***CHAPITRE I: SEMI-CONDUCTEURS III-V***

## ***1.1 Introduction***

Depuis quelques temps, les semi-conducteurs occupent une place fondamentale dans notre vie. Ainsi les ordinateurs, , tablettes tactiles, les téléphones portables , objets utilisés au quotidien sont essentiellement basés sur la mise en œuvre de ces matériaux. Le semi-conducteur le plus utilisé à nos jours reste sans aucun doute le silicium car il est disponible en grande quantité et reste idéal pour la réalisation de circuits imprimés d'une grande complexité. Par ailleurs, les coûts et la qualité des lingots de silicium monocristallin sont largement plus attractifs que ceux de tous les autres matériaux semi-conducteur. Cependant, le silicium possède des propriétés fondamentales qui ne lui permettent pas de convenir à n'importe quel domaine d'application tels que l'optoélectronique où il devient indispensable d'utiliser d'autres matériaux semiconducteur , dans ce cas on utilise généralement les matériaux III.V Ces matériaux sont déjà largement employés dans de nombreuses technologies présentes dans le commerce, ainsi que pour la conception de dispositifs (opto-)électroniques de pointe. Ils sont alors utilisés dans la conception de transistors, de diodes laser, de photodétecteurs, de modulateurs électro-optiques occupent de nos jours une position favorisée dans différents domaines d'applications. Ainsi, les semi-conducteurs III-V et les alliages qui leur correspondent, occupent de nos jours une position favorisée dans différents domaines d'applications tels que le domaine de l'optoélectronique qui a connu un essor considérable grâce à l'utilisation des semi-conducteurs III-V tel que le GaAs, le GaSb, l'InP et les alliages associés à gap direct. Ces matériaux permettent ainsi de concevoir différents dispositifs tels que les transistors HEMT auxquels nous sommes intéressés dans cette étude.

Les semi-conducteurs III-V ont des propriétés physiques remarquables et interviennent dans presque tous les équipements électriques et optiques. En électronique rapide et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables à d'autres matériaux tel que le silicium par exemple pour lequel la mobilité des porteurs reste relativement petite avec des transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique. Parmi les semiconducteurs III.V les plus utilisés on trouve quelques composés binaires tel que le GaAs, l'InP, ainsi que quelques composés ternaires, tel que le GaAlAs, et l'InGaAs, Les propriétés de ces

matériaux III.V sont très intéressantes pour la conception de différents dispositifs actuellement utilisés pour les applications hautes fréquences et applications faible bruit.

## I.2 Définition des semi-conducteurs III-V

Les matériaux semi –conducteurs III-V sont des composés formés d’un élément de la III<sup>eme</sup> Colonne et d’un élément de la V<sup>eme</sup> colonne de la classification périodique de Mendeleïev .Le tableau I.1 représente un extrait de cette classification. Le chiffre en haut est le numéro atomique et le chiffre en bas représente la masse atomique de l'élément.

III	IV	V
$^{10.81}_{5}B$	$^{12.01}_{6}C$	$^{14.01}_{7}N$
$^{26.98}_{13}Al$	$^{28.09}_{14}Si$	$^{30.97}_{15}P$
$^{69.74}_{31}Ga$	$^{72.59}_{32}Ge$	$^{74.92}_{33}As$
$^{114.82}_{49}In$	$^{118.69}_{50}Sn$	$^{121.75}_{51}Sb$

Tableau I.1 : Extrait de la classification périodique des éléments mettant en évidence les éléments III et V.

Le tableau I.1 est une représentation simplifiée du tableau périodique de Mendeleïev permettant de former différents composés et alliages possibles tel que le composé III.V GaAs composé du Gallium Ga et de l'Arsenic As.

- Pour le Gallium Ga le nombre d'électron de valence est 3 électrons.
- pour L'arsenic As le nombre d'électron de valence est 5 électrons.

ainsi:

Ga + As = GaAs . Le GaAs est un semi-conducteur car la somme des électrons des deux espèces (Ga et As) est égale à 08 électrons de valence. La condition du Bragg  $2d\sin \theta = n\lambda$  est satisfaite. Cette loi représente la loi déplacement des électrons. Au tableau I.2 on donne des exemples des

matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonctions des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendeleïev [1,2,3].

### ***1.3 . Les différents composés semi-conducteurs III.V***

Les semi-conducteurs peuvent généralement se trouver sous forme élémentaire ou sous forme composé. Les composés semi-conducteurs III.V auquel nous nous intéressons sont les composés binaires, ternaires et quaternaires, les semi-conducteurs à base de III.V binaires incluent le GaN, l'InP, l'AlP, et le GaAs Il existe également les alliages, ternaires et quaternaires qui en découlent. Ils présentent des propriétés très intéressantes pour, les applications hyperfréquences. Nous allons présenter brièvement dans ce qui suit les III V binaires, ternaires et quaternaires.

#### **1.3.1 les composés binaires**

Les composés binaires sont obtenus par la combinaison d'un élément du groupe III avec un élément du groupe V .Tous les binaires n'ont pas le même intérêt .On regroupe dans le tableau I.2. les principales propriétés de différents composés III.V binaires.

Composés III-V	Eg (eV)	m*/m <sub>0</sub>	μ (cm <sup>2</sup> /Vs)	a (Å)
BN	7.5			3.6150
BP	2.0			4.5380
AlP	2.45			5.4510
AlAs	2.16			5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaSb	0.72	0.042	5000	6.0959
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794

Tableau I-2. Propriété des principaux composés binaires III-V à température ambiante [4,5]

L'étude des propriétés des composés binaires III.V montre que les éléments les plus légers donnent des composés ayant une large bande interdite avec un gap indirecte, une masse effective élevée pour les électrons. Les composés qui contiennent du bore, de l'aluminium ou de l'azote en font partie. Ces composés n'ont en fait pas un grand intérêt pour l'électronique rapide [6]. Par ailleurs, pour une électronique rapide des semi-conducteurs avec des porteurs de charge à forte mobilité sont utilisés. Pour l'optoélectronique des composés à structure de bande directe doivent être utilisés pour que les transitions optiques soient efficaces [7]. Notons qu'il existe des composés à base de Gallium tel que le GaAs, et le GaSb ou à base d'indium tel que l'InP, InAs, InSb ayant des propriétés très intéressantes et permettant de concevoir des dispositifs avec de hautes performances.

### I.3.2. Les composés ternaires et quaternaires

Les composés ternaires sont obtenus par substitution partielle de l'un des éléments du composé par un autre élément appartenant à la même colonne. Nous pouvons par exemple obtenir des alliages des types  $Ga_xAl_{1-x}As$  ou  $In_{1-x}Ga_xAs$ . Ces alliages peuvent donner des matériaux à très haute mobilité et alors constituer la zone active de ces dispositifs capables de fonctionner à de très hautes fréquences.

**Cas des composés Ternaires :** ces composés sont obtenus lorsqu'il y a substitution de 2 atomes sur l'un des sous réseaux, soit,  $A_xA'_{(1-x)}B$ .

Exemple:  $Ga_xIn_{(1-x)}P$ , lorsque la composition exacte compte peu, on écrit tout court GaInP.

**Quaternaires 1+3 :** ces composés sont obtenus s'il y a substitution de 3 atomes sur des sous réseaux soit :  $A_xA'yA''B_{(1-x-y)}$

Exemple  $Ga_xIn_yAl_{(1-x-y)}As$ .

**Quaternaires 2+2 :** ces composés sont obtenus s'il y a substitution de 2 atomes sur chacun des deux sous réseaux, soit :  $A_xA'(1-x)B_yB''_{(1-y)}$ .

Exemple  $Ga_xIn_{(1-x)}PyAs_{(1-y)}$ .

la loi de Vegard ,relation linéaire entre le paramètre de réseau et la composition  $x$ , est approximativement suivie. On observe alors une évolution progressive et régulière des propriétés (dont la bande interdite et les paramètres cristallins) en fonction du taux de substitution [4].

## I.4 Propriétés des semi-conducteur III-V

### I.4.1. Structure cristalline des semi-conducteurs III-V

La plus part des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite appelée communément structure Zinc Blende. Cette structure, qui rejoint celle du diamant, est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V. La structure appelée structure "Zinc Blende" , celle du diamant et celle de la première zone de Brillouin de la structure zinc Blende font l'objet de la figure I .1.

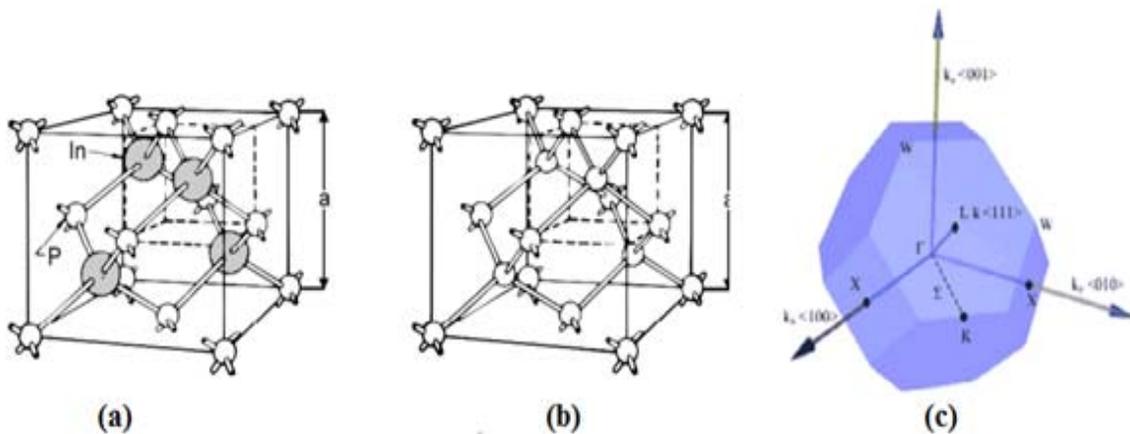


Figure I-1: (a) La structure zinc blinde et (b) structure du diamant (c) La première zone de Brillouin.

La structure blende est une structure cristalline dérivée de la structure cubique à faces centrées composée de deux espèces atomiques différentes. La structure est similaire à la structure diamant et à la structure fluorite. La structure blende est la structure cristalline de la

majorité des semi-conducteurs III-V, particulièrement importants à l'industrie de l'opto-électronique. Ces semi-conducteurs cristallisent aussi souvent dans la structure wurtzite.

Dans ce cas deux sous réseaux de la structure zinc Blende de type CFC enchevêtrées, l'un formé uniquement un premier atome et l'autre uniquement avec un second atome sont décalés d'un vecteur  $\left(\frac{a_0}{4}, \frac{a_0}{4}, \frac{a_0}{4}\right)$ . Dans ce cas  $a_0$  représente le paramètre cristallin.

Ainsi, chaque atome de la structure zinc blende se trouve donc au centre d'un tétraèdre régulier. Les sommets de ce tétraèdre sont occupés par un atome de l'autre espèce. La maille élémentaire, à partir de laquelle on peut reconstituer le cristal entier par un ensemble de translations, est formée par un atome de chaque type. Les liaisons atomiques dans les matériaux III-V reposent sur un transfert électronique des atomes du groupe V sur ceux du groupe III.

Le réseau réciproque associé à la structure de type zinc-blende est un réseau de type cubique centré noté CC. La première zone de Brillouin du réseau réciproque a la forme octaèdre tronqué (voir figure I.1(b)) par les six faces d'un cube. Elle présente un centre de symétrie à l'origine noté  $\Gamma$  et les axes de symétrie X, L, et K. Les points de rencontre de chacun de ces axes avec les frontières de la zone de Brillouin jouent un rôle essentiel dans la théorie des bandes. On les note généralement de la manière suivante [8]:

- Points X de coordonnées  $(2\pi/a, 0, 0)$  sur les axes  $\langle 100 \rangle$ ,
- Points L de coordonnées  $(\pi/a, \pi/a, \pi/a)$  sur les axes  $\langle 111 \rangle$
- Points K de coordonnées  $(0, 3\pi/2a, 3\pi/2a)$  sur les axes  $\langle 011 \rangle$

#### I.4.2 Propriétés Electrique

Les propriétés électriques permettent de faire la distinction entre les différents matériaux. Au tableau I.3 nous résumons les paramètres électriques relatifs au GaAs et au  $Ga_{1-x}Al_xAs$  [9]. Nous pouvons remarquer que ces paramètres qui diffèrent d'un matériau à l'autre permettent de les distinguer l'un de l'autre.

Paramètre	GaAs	Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As
Constante de maille a(A <sup>0</sup> )	5.6533	5.6533+0.0078x
Densité (g.cm <sup>-3</sup> )	5.360	5.360-1.6x
Coefficient de dilatation thermique β <sub>th</sub> (x10 <sup>-6</sup> ^C <sup>-1</sup> )	6.4	6.4-1.2x
Constante diélectrique ε <sub>r</sub>	13.18	13.18-3.12x
Largeur de la bande interdite E <sub>g</sub> (eV)	1.424	1.424+1.247x      0<x<0.45 1.900+0.125x+0.143x <sup>2</sup> 0.45<x<1
L'affinité électronique χ(eV)	4.07	4.07-1.1x      0<x<0.45 3.64-0.14x      0.45<x<1
Masse effective des électrons m <sub>n</sub> <sup>*</sup> (xm <sub>0</sub> )	0.067	0.067+0.083x      0<x<0.45 0.85-0.14x      0.45<x<1
Masse effective des trous m <sub>p</sub> <sup>*</sup> (xm <sub>0</sub> )	0.62	0.62+0.14x
Mobilité des électrons μ <sub>n</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	8800	8.10 <sup>3</sup> -2.2.10 <sup>4</sup> x+10 <sup>4</sup> x <sup>2</sup> 0<x<0.45 -255+1160x-720x <sup>2</sup> 0.45<x<1
Mobilité des électrons μ <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	400	370-950x+740x <sup>2</sup>
Coefficient de diffusion des électrons D <sub>n</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	220	200-550x+250x <sup>2</sup> 0<x<0.45 -6.4+29x-18x <sup>2</sup> 0.45<x<1
Coefficient de diffusion des trous D <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	10	9.2-24x+18.5x <sup>2</sup>
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	10 <sup>7</sup>	(4.4-2.1x).10 <sup>7</sup> 0<x<0.45 2.3 .10 <sup>7</sup> 0.45<x<1

 Tableau I.3.: Propriétés électroniques du GaAs et du Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As [9].

### I.4.3. Les propriétés optiques

L'interaction d'un électron avec un photon implique la conservation de l'énergie et celle du vecteur d'onde. Et puisque le vecteur d'onde du photon est nettement inférieur à celui des électrons, les transitions optiques directes entre la BV et la BC apparaissent verticalement dans le diagramme de bande des électrons que nous présentons en figure I.2. Dans le cas d'un semi-conducteur à gap indirect les transitions optiques à travers le gap ne peuvent se produire que grâce à une interaction supplémentaire, comme celle d'un phonon par exemple.

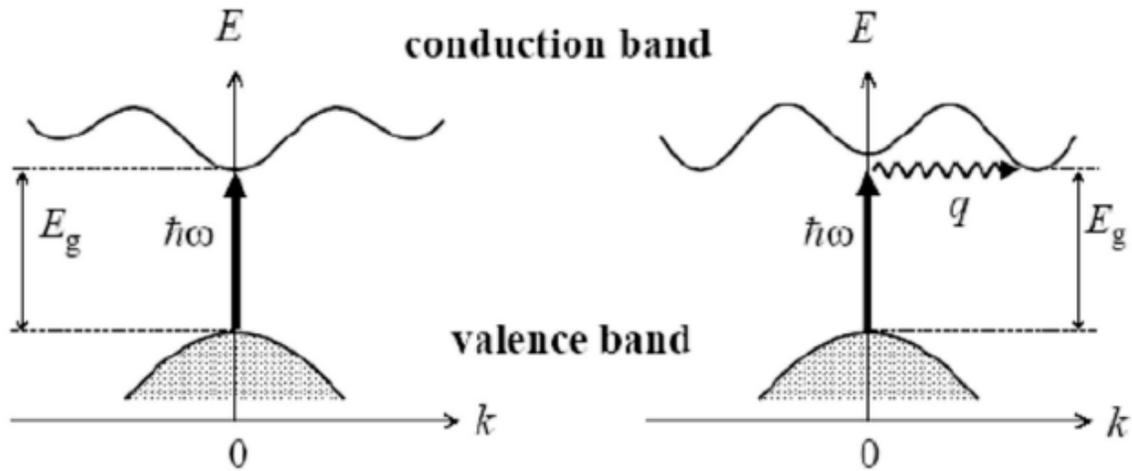


Figure 1.2: les transitions optiques directes et indirectes

Les caractéristiques optiques des matériaux sont :

✓ **Le coefficient de réflexion R**

Ce coefficient qu'on peut déterminé par :

$$R = \frac{(n - 1)^2 + \chi^2}{(n + 1)^2 + \chi^2}$$

$\chi$  est le coefficient d'extinction et n l'indice de réfraction

✓ **Le coefficient de transmission T**

Ce dernier a pour expression :

$$T = \frac{4n}{(n + 1)^2 + \chi^2}$$

n est l'indice de réfraction En générale, l'indice de réfraction est lié à la constante diélectrique par la relation :  $(n \approx \sqrt{\epsilon})$

## ***1.5. Structure des bandes d'énergie des semi-conducteurs***

### ***III – V***

La description la plus parlante des bandes d'énergie permises aux électrons s'effectue dans l'espace réciproque appelé aussi espace des vecteurs d'onde  $k$ . Pour cela on considère les variations de l'énergie  $E$  en fonction de  $k$  selon les directions de plus haute symétrie de cet espace. On se limite généralement à la première zone de Brillouin. En effet, Les bandes d'énergie nous renseignent sur les états d'énergie accessibles aux électrons en fonction du vecteurs d'onde  $k$ . Les bandes d'énergie sont donc représentés dans l'espace réciproque, dans les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin. La bande interdite qui sépare la bande de valence notée "BV" de la bande de conduction notée "BC" détermine les propriétés de transport du semi-conducteur.

Dans les semi-conducteurs à base de matériaux III-V, le gap est direct car le minimum de la BC et le maximum de la BV correspondent au même vecteur d'onde situé au centre de la zone de Brillouin. La transition d'énergie minimale entre ces deux bandes d'énergie se produit sans changement de vecteur d'onde  $K$ , ce qui va permettre l'absorption et l'émission de lumière de façon beaucoup plus efficace que dans le cas des matériaux à gap indirect comme dans le cas du silicium par exemple silicium [10]. Le minimum central de la bande de conduction des semi-conducteurs à gap direct, correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobiles. Cependant ceux qui ont un gap indirect, leur bande de conduction correspond à des électrons de grande masse effective, donc ayant une faible mobilité.

En figure I.3 nous représentons la structure de bande d'énergie d'un semiconducteur à gap direct (figure I.3 (a)) et la structure de bande d'énergie d'un semiconducteur à gap indirect (figure I.3 (b)).

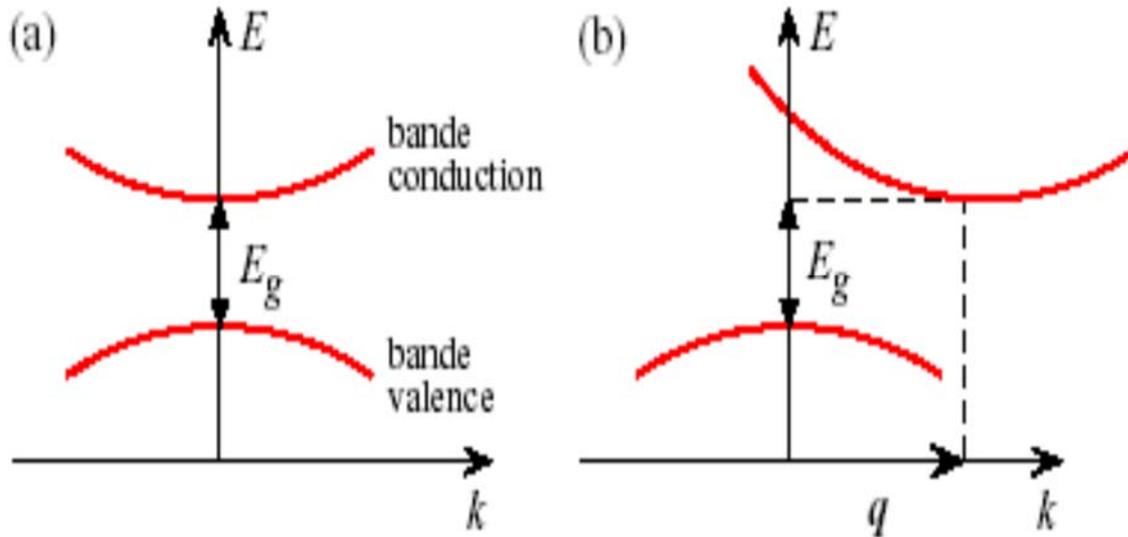


Figure I.3 : Structure de bande d'énergie (a)-gap indirect et (b)-gap direct [11]

Au tableau I.4 nous donnons quelques matériaux III.V, où nous spécifions ceux à gap direct de ceux à gap indirect.

Semi-conductor	Type de gap
InP	Directe
GaP	Indirecte
AiP	Indirecte
BP	Indirecte
GaAs	Directe
GaSb	Directe

Tableau I.4: matériaux III.V et Type de gap correspondant

L'étude des propriétés des III.V , et particulièrement la structure de leur bandes, montre que les éléments les plus légers donnent des composées à large bande interdite, qui se rapproche en terme propriétés à celle des isolants, et à la structure de bande indirecte. Au tableau I.5 nous avons résumé les principales propriétés des semi-conducteurs III-V à base de gallium [12].

### I.5.1. Structure de bande du GaAs et de l'InP

Notre travail a consisté à étudier un HEMT à base de matériaux III.V, nous introduisons donc la notion hétérostructures. Une hétérostructure est un cristal composé de plus semi-conducteurs de type différent. En général, ceux-ci sont sous la forme de couches minces, plus ou moins alignés l'un après l'autre dans la dite première direction qui est la direction de croissance. L'interface entre une couche et la suivante est appelée hétérojonction. Il faut pouvoir faire la croissance de ces matériaux les uns sur les autres, ce qui peut se réaliser par la filière adaptée en maille (lattice matched), la filière pseudo-morphique, la filière métamorphique que nous présenterons ultérieurement. Le HEMT que nous avons étudié est conçu sur substrat InP. Nous présentons dans ce qui suit deux matériaux III.V qui trouvent toute leur utilités en optoélectronique et qui sont l'InP (le phosphure d'indium) composé inorganique binaire de type III-V, constitué d'indium et de phosphore et le GaAs (l'arséniure de gallium) qui est aussi un composé inorganique binaire de type III-V, constitué d'arsenic et de Gallium. Ces deux matériaux sont largement utilisés en micro-électronique sont produits industriellement sous forme semi-isolante.

L'arséniure de gallium GaAs et l'InP font partie des matériaux III-V, ils sont constitués d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V du tableau de Mendeliev. Ils possèdent des propriétés intrinsèques intéressantes telle qu'une haute mobilité électronique et un gap direct. Le GaAs présente une mobilité électronique intrinsèque de  $8500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , son gap direct avec une valeur de 1,42 eV font du GaAs un matériau très intéressant pour les domaines d'application de l'électronique, la photonique et donc de l'optoélectronique. L'InP présente une mobilité électronique intrinsèque de  $4600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , son gap direct avec une valeur de 1,35 eV font aussi de l'InP un matériau très intéressant pour les domaines d'application de l'électronique, la photonique et aussi donc de l'optoélectronique.

#### I.5.1.1. Structure de bande du GaAs

Pour l'arséniure de gallium GaAs, le maximum de la BV est observée en  $K=0$ . La BV est doublement dégénérée avec deux branches au centre de la zone de Brillouin ceci est illustré en figure I.4. Les deux bandes obtenues à partir de la BV dégénérée permettent de déterminer la disposition des porteurs de masses effectives différentes, la masse des trous lourds est de

0.68 $m_0$ , alors que celle des trous légers est de 0,12 $m_0$  .On rappelle que  $m_0$  représente la masse de l'électron au repos.

On note aussi une troisième branche de la BV qui est abaissée par rapport aux deux premières bandes d'une énergie égale à 0,33 ev .

La BC située , au centre de la zone de Brillouin ( $K=0$ ), est une vallée à symétrie nommée vallée centrale. On remarque aussi l'existence de différents niveaux énergétiques possédant une énergie plus importante, et quatre vallées à symétrie L dans la direction  $\langle 111 \rangle$  et les directions équivalentes.

D'après la courbure des différentes vallées, auxquelles on associe la masse effective des électrons beaucoup moins lourds et par conséquent possédant une grande mobilité que ceux dans les vallées X et L. Cette propriété est responsable de certaines caractéristiques des phénomènes de transport dans le semi-conducteur de type GaAs. qui est un composé à gap direct, les transitions électriques les moins énergétiques entre la BV et la BC peuvent se faire avec conservation du vecteur d'onde K sans l'intervention des phonons [13].

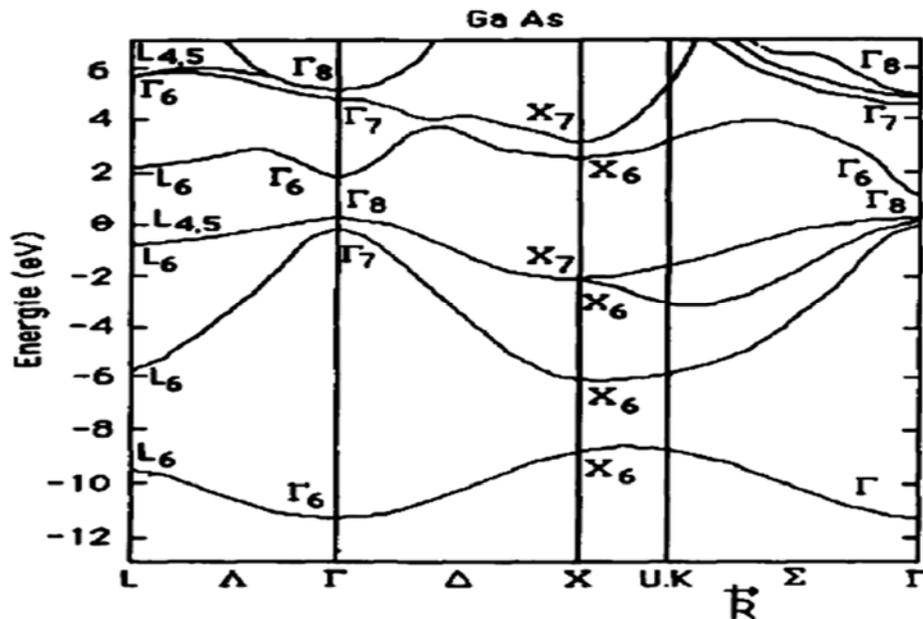


Figure I.4: Structure de bandes du GaAs

Les principales propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à 300°k sont regroupés dans le tableau I.5 qui suit [14-17].

Paramètres	Valeurs
Structure cristalline	Zinc-Blende
Paramètre cristallin	5.63 Å° [14][15]
Energie de gap Eg	1.424 eV [14][15]
Mobilité des électrons	8000 cm <sup>2</sup> /VS [16]
Mobilité des trous	400 cm <sup>2</sup> /VS [14]
Masse volumique	5.32 g/cm <sup>3</sup> [15]
Coefficient de dilatation thermique linéaire	5.86.10 <sup>-6</sup> /°K
Chaleur spécifique	0.35J/gK
Constante diélectrique relative $\epsilon_r$	12,5
Affinité électronique $\chi$	4.07 eV [14] [15]
Densité effective d'états dans la Bande de Valence Nv	7.10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> [17]
Densité effective d'états dans la Bande de Conduction Nc	4,7.10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> [17]

Tableau I-5 : Propriétés du GaAs à température ambiante (300° K).

Pour finir nous jugeons utile de rappeler que le GaAs est largement utilisé pour la réalisation de composants micro-ondes, des circuits intégrés monolithiques hyperfréquences, des composants opto-électroniques, des diodes électroluminescentes dans l'infrarouge, des diodes laser, des cellules photovoltaïques et des fenêtres optiques. L'AsGa est aussi généralement utilisé comme substrat pour la croissance épitaxiale d'autres matériaux III-V tels que l'arséniure de gallium-aluminium  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  et l'arséniure d'indium-gallium  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

### **I.5.1.2 Structure de bande de l'InP**

L'InP est aussi un composé semi-conducteur III-V à gap direct ayant une bande interdite de 1,344 eV à 300 K, une mobilité électronique de  $0,46\text{m}^2/\text{VS}$ , et une mobilité de trous de  $0,015\text{m}^2/\text{VS}$ . L'énergie minimale de la BC ( $\Gamma_{15}$ ) et l'énergie maximale de la BV ( $\Gamma_{15}$ ) sont localisées au milieu de la zone de Brillouin. La BC présente une courbure énormément accentuée au voisinage de son minimum ( $\Gamma$ ). Cette coupure nous permet de connaître la masse effective des électrons qui est en fait inversement proportionnelle à cette courbure. En effet, la masse effective des électrons en ( $\Gamma$ ) des SC III-V à gap directe comme l'InP et le GaAs est très faible donnant une mobilité électronique élevée. La figure I.6 nous permet de constater la présence de deux vallées latérales soit la vallée L dans la direction  $\langle 111 \rangle$  et vallée X dans la direction  $\langle 100 \rangle$  réparties dans l'espace. Ces vallées sont situées sur la BV en bordure de la zone de Brillouin. On remarque donc la présence de quatre vallées de type L équivalentes et trois de type X. Les vallées sont caractérisées par une courbure faible et par conséquent par des électrons ayant une masse effective élevée et une faible mobilité [18].

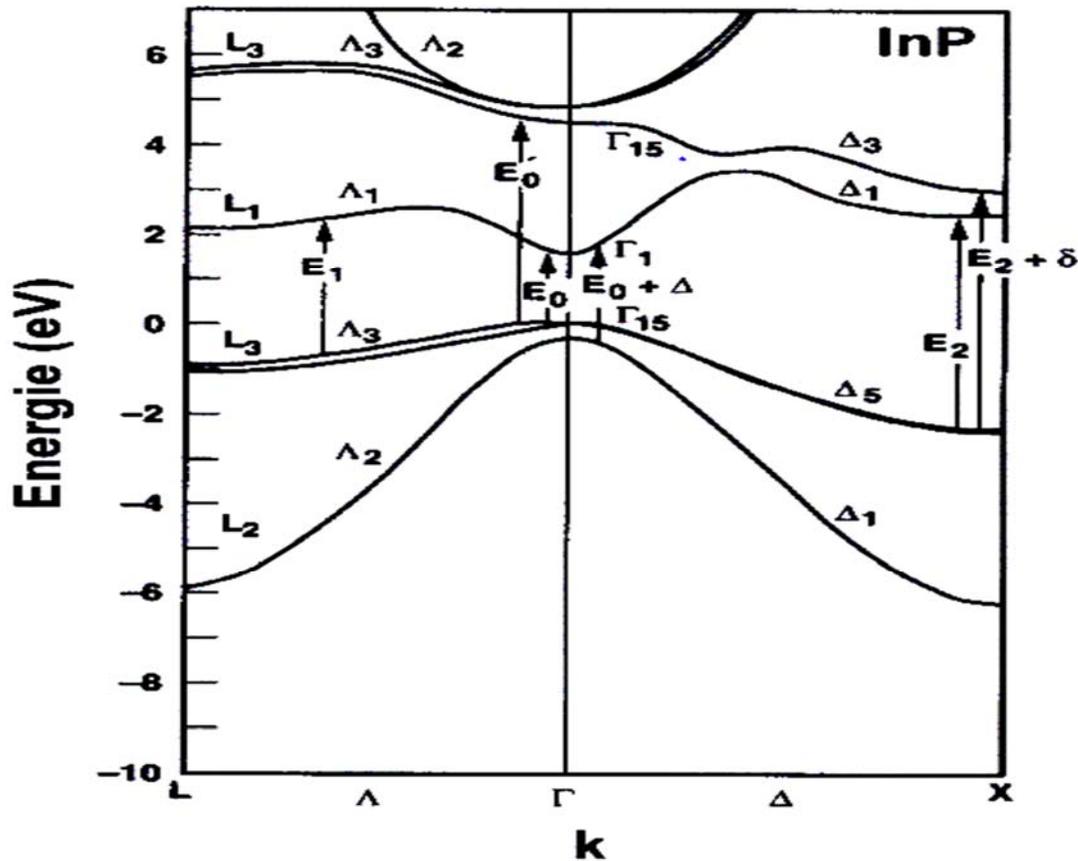


Figure I.5 : Structure de bandes de l'InP.

Vu sa plus grande mobilité électronique en comparaison aux mobilités des semi-conducteurs plus communs, telle que le silicium et l'arséniure de gallium, l'InP est largement utilisé dans les applications électroniques à haute fréquence et à haute puissance. En effet l'InP possède un gap direct, ce qui le rend apte à être utilisé en optoélectronique, comme par exemple dans la conception des diodes laser. InP est aussi adopté comme substrat permettant la croissance par épitaxie de composés optoélectroniques à base d'arséniure d'indium-gallium "InGaAs". Le paramètre de maille de l'InP diffère convenablement de celui de l'arséniure d'indium, permettant la formation de structures à confinement quantique telle que les boîtes quantiques InAs/InP, utilisées dans la fabrication de lasers pour les télécommunications par fibre optique.

### **I.5.2 Vitesse de saturation :**

Les minima des vallées satellites du GaAs et l'InP sont séparés du minimum de la vallée  $\Gamma$  par une énergie de quelques dixièmes d'eV. De ce fait, ils sont donc abordables aux électrons ayant acquis de l'énergie. Pour les matériaux ayant une énergie de séparation importante, il faut appliquer un grand champ électrique pour que les électrons puissent accéder aux vallées satellites.

Pour de plus amples explications, considérons un ensemble d'électrons ayant une énergie  $\epsilon$ , au voisinage du minimum  $\Gamma$ ; leur mobilité est élevée alors que leur masse effective est faible. En gagnant de l'énergie, en s'échauffant dans un champ électrique intense, ils vont acquérir une énergie qui leur permettra de passer à la vallée  $\Gamma$  et pourront alors être portés à un niveau énergétique égal ou supérieur au minimum de L ou X. Une collision avec un phonon, peut alors les transférer dans l'une des vallées satellites. L'énergie cinétique de ces électrons diminuera de l'énergie de transfert  $\Delta\epsilon$  et leur masse effective augmentera. Ce phénomène est alors à l'origine de la saturation de vitesse de transport des électrons. Cette situation est à l'origine de la saturation de vitesse de transport  $v$  des électrons, observée dans les matériaux III-V, lorsque le champ électrique  $E$  augmente (courbe  $v(E)$  présentant une décroissance en champs forts) [19].

## ***I.6 Bandes interdites des composés III-V***

### **I.6.1 Bandes interdites des principaux composés III-V**

Le diagramme de la figure I-6 représente les variations de l'énergie de bande interdite en fonction du paramètre cristallin. Ce dernier varie avec la composition "x". En ligne continue sont représentées les bandes interdites directes alors qu'en lignes discontinues sont représentées les bandes interdites indirectes. Certaines lignes présentent un point anguleux, qui symbolise une transition entre un gap direct et un gap indirect. Ce diagramme est important, car il nous donne la possibilité de connaître la composition de tous les alliages ternaires pouvant être déposés en couche mince, par épitaxie, sur un substrat binaire telle que le GaAs ou l'InP. Les matériaux III-V offrent une grande variété de compositions qui leur permettent de modifier leurs propriétés électroniques.

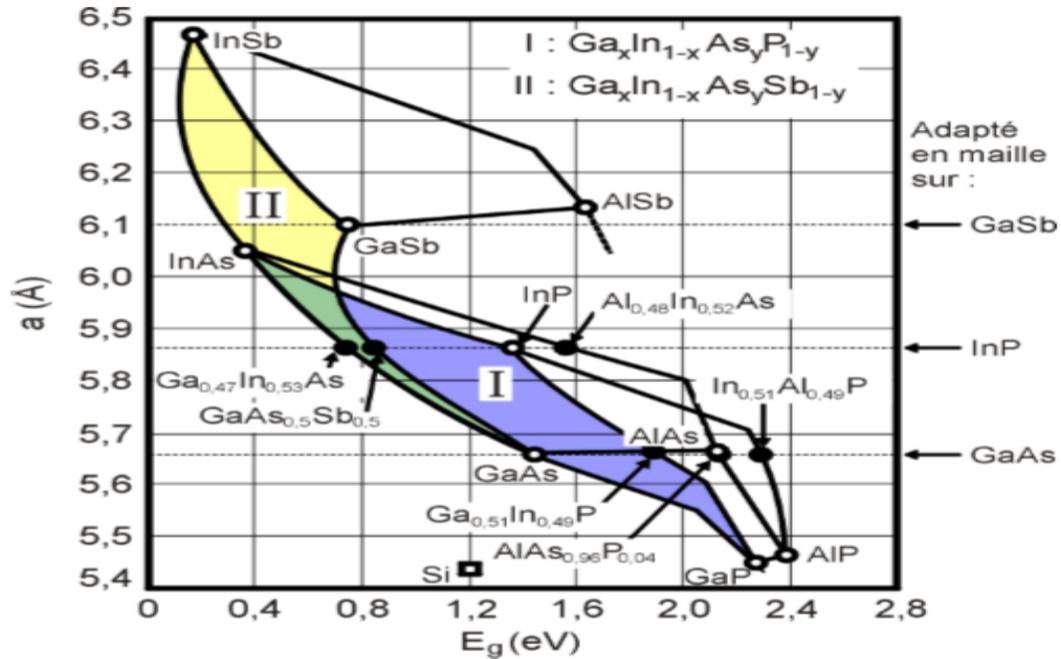


Figure I .6: évolutions de l'énergie de bande interdite et du paramètre cristallin des alliages de composés III-V [20].

### I.6.2 Les hétérostructures des matériaux

Le fonctionnement des HEMT est basé sur l'existence d'hétérojonctions SC/SC. Le passage abrupt de structure de bandes à l'hétéro-interface entre deux SC conduit à l'apparition de discontinuités à la jonction des BC ou BV. Cela est illustré par le diagramme de bandes d'une hétérojonction. En figure I.7 on présente différents diagrammes schématiques mettant en évidence différents types d'hétérojonctions.

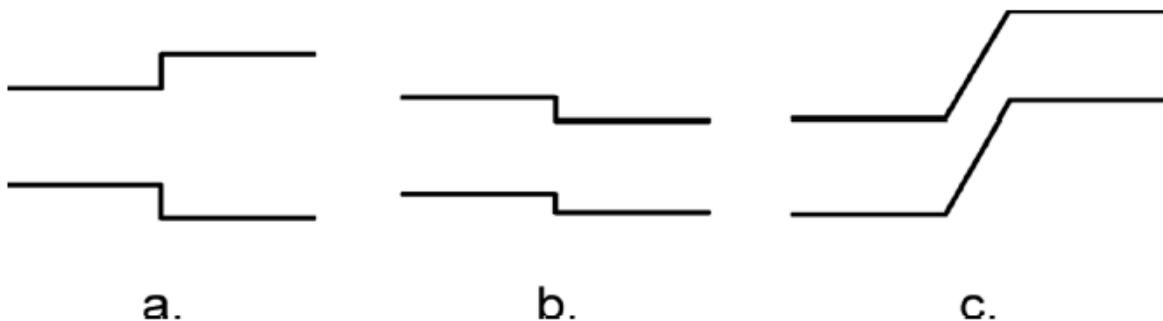


Figure I.7 : diagrammes schématique montrant les différents types d' hétérojonctions [21]

Afin d'établir ces diagrammes de bande , il nous est nécessaire de connaître l'affinité électronique des deux semi-conducteurs respectives, il est aussi nécessaire de connaître la position des bandes de valence et de conduction à l'interface. La forme de la barrière dépend essentiellement de la différence des travaux d'extraction mais aussi de la position du niveau de Fermi dans les deux matériaux semi-conducteurs.

Les composants conçus avec des hétérostructures conçus principalement par épitaxie par jets moléculaires ont le pouvoir de contrôler le flux et la distribution des électrons / trous à travers le décalage de bandes. Les hétérojonctions sont classées en différents types suivant le type de discontinuités appelées offsets qui se produisent à l'hétérojonction abrupte de semi-conducteurs. Dans l'hétérojonction de type I, figure I-7 -a, les offsets de bande pour la BC et la BV agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petit gap permettant de concevoir le canal des HEMTs par exemple. Les hétérojonctions de type II sont à gap décalé, figure I-7 -b, ou brisé, figure I-7 -c. Dans ce cas, les électrons et les trous sont séparés ainsi les électrons vont diffuser dans un premier matériau et les trous diffuseront dans l'autre.

la figure I-8 représente la structure des bandes d'un HEMT, où chaque hétérojonction a de l'importance dans la mesure où les transports horizontaux et verticaux des électrons et des trous s'en trouvent influencés [22].

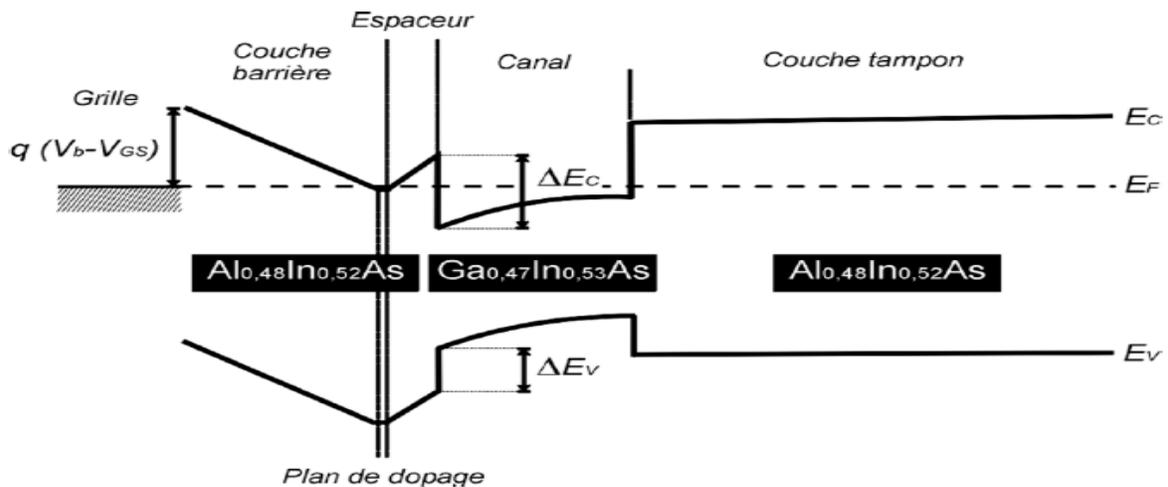


Figure I-8: représentation des bandes de conduction et de valence d'un HEMT.

## ***1.7 Phénomènes de transport dans les semi-conducteurs***

Dans les semi-conducteurs , sous l'action d'une force extérieure, un courant se produit grâce au déplacement des porteurs de charge libres . Ce courant est soit dû à excitation par champ électrique et donnera un courant de conduction ou alors dû à un gradient de concentration dans le semi-conducteur donnant lieu à un courant de diffusion [23]. Le courant de conduction est donc dû à l'application d'un champ électrique ou magnétique on assiste alors à un déplacement des porteurs de charge, électrons et trous. La conduction dans le matériau pourra se faire par:

- Les électrons de la bande de conduction , qui se déplacent dans le sens inverse que le champ électrique appliqué.
- Les trous de la bande de valence qui se déplacent dans le même sens que le champ électrique appliqué [23].

Le paramètre le plus pertinents lié à l'étude des phénomènes du transport électronique dans les semi-conducteurs est la vitesse des porteurs de charge qui est maximale quand le cristal se trouve dans un potentiel périodique autrement dit quand les porteurs de charge se déplacent librement et sans aucune interaction à l'intérieur du réseau, ce qui irréalisable car pendant leur déplacement à l'intérieur du matériau, les électrons sont soumis à différentes interactions tels que les interactions avec le réseau cristallin, interactions avec les porteurs, interactions avec les impuretés, et interactions avec les alliages [23].

## ***1.8. L'intérêt des alliages semi-conducteurs***

La famille des composé III. A fut découverte à partir des années 50. Presque au même moment où surgit l'idée de constituer des solutions solides de ces composés binaires . L'extension permettait d'envisager l'introduction de semi-conducteurs dont la bande interdite pouvait prendre toutes les valeurs comprises entre 0.18 à 2.42 eV [24]. Alors que l'arséniure de gallium (GaAs) passait au stade du développement au début des années 1970, les alliages ternaires restaient au niveau du laboratoire. Seul le composé  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$  fit son apparition dans le

domaine de l'électronique et optoélectronique . Au Tableau I -6, nous regroupons ces différents matériaux présentant un accord de maille [25].

<i>matériaux</i>	<i>substrat</i>	<i>Accord de maille</i>	<i>Fraction molaire</i>
<b>AlGaAs</b>	GaAs	GaAs Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As AlAs	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As 0 ≤ x ≤ 0.25
<b>GaInAsP/InP</b>	InP	Ga <sub>0.47</sub> In <sub>0.53</sub> As Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As <sub>y</sub> P <sub>1-y</sub> x=0.74; 0 ≤ y ≤ 1 InP	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As 0.4 ≤ x ≤ 0.6 InAs <sub>x</sub> P <sub>1-x</sub> 0 ≤ x ≤ 0.2
<b>AlGaInAs/InP</b>	InP	Ga <sub>0.74</sub> In <sub>0.53</sub> As (Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> ) <sub>0.47</sub> In <sub>0.53</sub> As 0 ≤ x ≤ 1 Al <sub>0.48</sub> In <sub>0.52</sub> As	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As 0.4 ≤ x ≤ 0.6
<b>AlGaInP</b>	GaAs	GaAs Ga <sub>0.5</sub> In <sub>0.5</sub> P (Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> ) <sub>0.5</sub> In <sub>0.5</sub> P 0 ≤ x ≤ 1	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As 0 ≤ x ≤ 0.25 Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> P 0.4 ≤ x ≤ 0.6
<b>GaAsP</b>	GaAs InP	GaAs GaP	GaAsP

Tableau I -6 : matériaux avec accord de maille [26].

## ***1.9. Phénomène d'ionisation par impact***

L'ionisation par impact ( par choc) est observée dans les matériaux, pour des champs électriques intenses. En effet, un électron qui dérive sous l'effet d'un champ électrique dans un matériau, va gagner de l'énergie qui se présente sous la forme d'énergie cinétique et la transmet progressivement au cristal par l'intermédiaire des nombreux chocs qu'il accomplit avec les

phonons du réseau. Si le champ électrique est suffisamment important, certains électrons pourront, au cours d'un vol libre, acquérir une énergie par leur impact sur un atome du réseau cristallin aboutissant à la rupture d'une liaison et à la création d'une paire électron trou. Ce processus, illustré sur la figure I-9, peut devenir cumulatif et conduire au phénomène d'avalanche. Cet effet est d'autant plus important que le gap du matériau est plus petit (l'énergie de seuil de l'ionisation par choc est approximativement égale à  $3/2 E_g$ ).

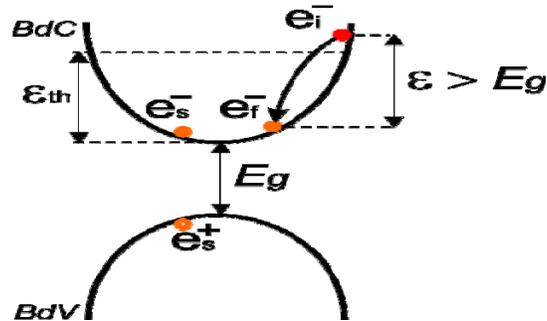


Figure I.9 : phénomène d'ionisation par choc ( $e_i^-$  : électron à l'état initial.

$e_f^-$  : électron à l'état final,  $e_s^-$  : électron secondaire créé,  $e_s^+$  : trou créé).

## I-10 : Les avantages des semi-conducteurs III-V

La filière des composés III-V est considérée comme la seule filière hyperfréquence dont la technologie est assez mature pour des conceptions au niveau industriel et réalisation de circuits (circuits bas niveau ,Amplification faible bruit, Fonction de contrôle, commutation, etc....). Ainsi le développement et la maturité de cette technologie ont permis d'aboutir à des coûts de production abordables et très compétitifs , mais qui restent quand même largement supérieurs à ceux de la filière silicium [27].

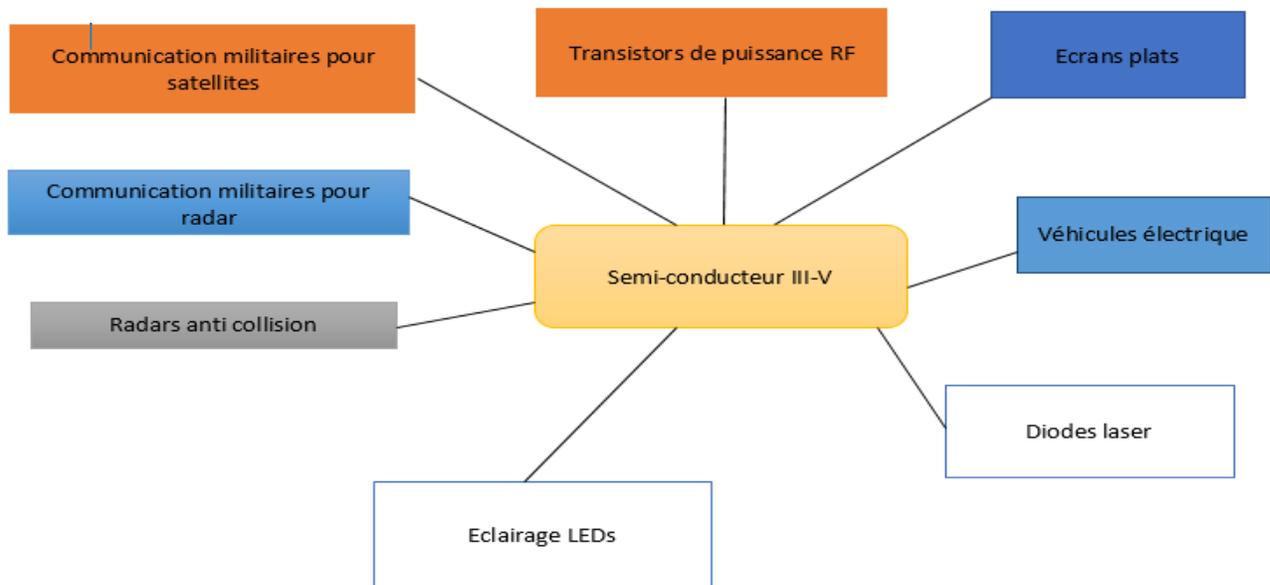
Les avantages des semi-conducteurs III-V sont :

- Leur résistance aux radiations.
- Leur capacité à travailler à des températures supérieures à celle du silicium standard, ce qui rends l'utilisation des III.V attractifs pour les applications dans le domaine militaires.

- Leur propriété de semi-isolant leur permet de fabrication des circuits Intégrés hyperfréquences.
- Leurs performances vitesse/consommation absolument supérieure à celles des calculateurs utilisant des circuits à base de silicium .
- Le vaste domaine fréquentiel couvert puisquela gamme de fréquence couverte s'étend de 1 GHZ à Plus de 100 GHZ. Ce dernier aspect est très important , vu que les composants à base de silicium sont actuellement limités à une fréquence inférieure à quelque Giga Hertz [28].

### ***I.11 Applications des semi-conducteurs III-V:***

Le marché de semi-conducteur III.V tel que le (GaAs, GaAlAs,...) est très important. cessemiconducteurs jouent un rôle clé dans plusieurs d'applications qu'on résume sur le schéma de la figure III.9. :



**Figure I.10: Exemples d'applications des semi-conducteurs III-V [29].**

## ***Conclusion***

Dans ce chapitre nous avons donné quelque définition concernant les matériaux III-V binaires tels que l'arséniure de gallium (GaAs), l'indium de phosphide (InP), et ternaires tels que l'InGaAs, le GaAsP. D'autre part, nous avons donné un aperçu sur les caractéristiques spécifiques et les propriétés physiques des semi-conducteurs III-V. Enfin nous avons donné des exemples application de marché de semi-conducteur.

***CHAPITRE II :***

***TRANSISTOR A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE***

### I. Introduction

L'évolution grandissante du marché des télécommunications civiles d'une part, ainsi que les demandes en moyens de communication de grande fiabilité et performantes provenant du domaine militaire, pousse d'autre part les concepteurs à concevoir des composants électroniques permettant la conception des chaînes radiofréquences où les composants doivent opérer avec des signaux hautes fréquences de plusieurs gigahertz, émettant d'importantes puissances, permettant aussi de bons rendements énergétiques tout en fonctionnant dans des environnements sévères. L'ensemble de toutes ces contraintes posent les limites des technologies classiques sur substrat en silicium, c'est la raison pour laquelle différentes nouvelles filières technologiques furent considérées. C'est pour cela que nous nous sommes intéressés dans ce travail aux transistors HEMT à base de matériaux III-V.

L'invention du transistor HEMT a révolutionné le monde de la microélectronique et l'électronique à haute fréquence. Tout d'abord les HEMT à base de GaAs/InGaAs puis les HEMTs à base de InP puis les HEMTs à base de GaN. Ce type de composants ont pu atteindre des niveaux plus élevés de performances en termes de gain haute fréquence, de bruit et Puissance.

Actuellement, les HEMTs à base de matériaux III-V tels que l'InAs, l'InAlAs sur InP présentent les meilleures réponses en terme de fréquences atteignant des fréquences  $f_T$  et  $f_{max}$  importantes. Ainsi, les composants à base de matériaux III-V, se révèlent être d'excellents candidats favorisant un fonctionnement à hautes fréquences et sous de fortes puissances, et c'est indubitablement pour atteindre des fréquences de fonctionnement importantes tout en maintenant des niveaux de puissance importants que les HEMTs sont réalisés. L'amélioration de la mobilité des HEMTs est rendue possible par la réalisation d'hétéro-structures spécifiques réalisées à base de matériaux III-V.

Dans ce chapitre on fait un rappel non exhaustif des principes fondamentaux qui régissent le développement des HEMT. Une introduction à l'hétérojonction, leurs structures de bande, la formation de puits quantiques, le confinement des porteurs et le gaz bidimensionnel 2DEG seront présentées. Nous présentons aussi le principe de fonctionnement des HEMTs.

## II. Définition de l'hétérojonction

### II.1 Introduction

En général, les structures HEMT sont basées sur des couches développées par épitaxie avec différentes compositions et différentes bandes interdites. Lorsque ces différentes couches semi-conductrices sont mises en contact, elles forment des hétérojonctions où chacun des matériaux de l'hétérojonction présente sa propre bande interdite d'énergie ( $E_g$ ) et sa constante de réseau "a". La figure II.1 illustre les paramètres de constante de réseau et de gap d'énergie pour différents types de matériaux III-V. Ces paramètres jouent un rôle très important dans composant électronique avancée de la bande interdite afin d'optimiser les caractéristiques des dispositifs.

L'hétéro-structure est obtenue par la juxtaposition de deux matériaux de natures différentes (différents gaps). Les semi-conducteurs formant l'hétéro structure ont généralement la même structure cristallographique qui est la plupart du temps une structure cubique à faces centrées, c'est donc une hétéro-épitaxie avec un accord de maille relatif. Quand deux Semi-conducteurs ont une conductivité du même type, l'hétéro-structure est dite isotype, dans le cas inverse elle est anisotype [30].

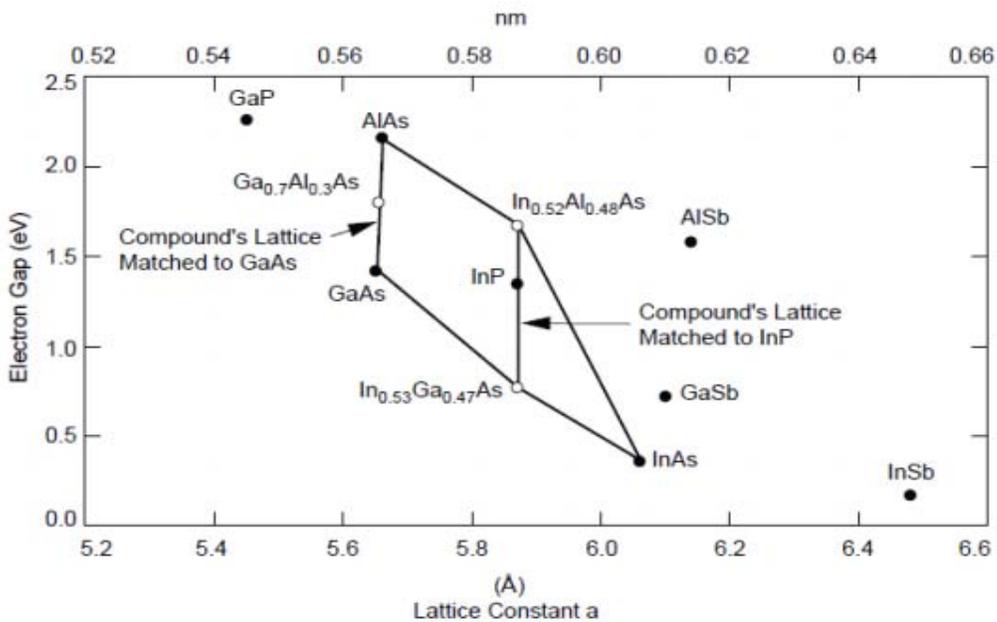


Figure II.1 Le gap énergétique des composés III – V et des dérivés ternaires en fonction de la constante de réseau [31]

II.2 Discontinuité de la bande

La discontinuité de la bande d'énergie est l'aspect le plus important des hétérojonctions. C'est une caractéristique très intéressante pouvant être utilisée pour modifier le transport des porteurs de charge. La jonction de deux semi-conducteurs différents entraîne une modification abrupte du diagramme de la bande d'énergie de l'hétéro-structure.

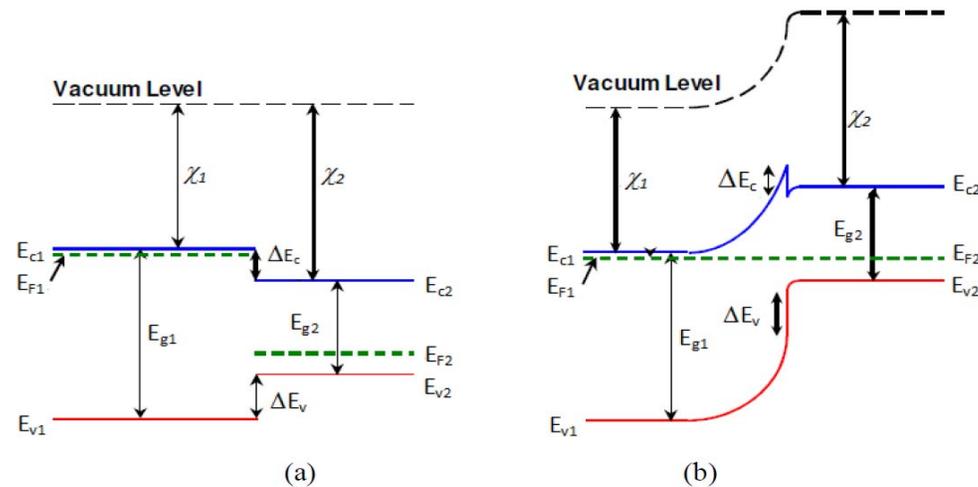


Figure II.2. Diagrammes de bande d'énergie pour les semi-conducteurs à bande interdite large et étroite (a) avant et (b) après le contact.

Lors la mise en contact de deux matériaux de gap différents, leurs niveaux de Fermi s'alignent, il se produit alors une discontinuité de leurs bandes d'énergie à l'équilibre leurs niveaux de Fermi s'alignent. La figure II.2 montre le diagramme de bande d'énergie de deux semi-conducteurs avant et après contact où  $E_c$  et  $E_v$  indiquent les bandes de conduction et de valence respectivement,  $E_{gA}$  et  $E_{gB}$ , sont les bande interdite pour le matériau A et le matériau B,  $E_F$  le niveau de Fermi,  $\chi$  l'affinité électronique et  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  représentant les discontinuités de conduction et de bande de valence entre les deux matériaux [32]. Les discontinuités des bandes d'énergies pour les deux matériaux sont justement déterminées par  $\Delta E_c$  pour la bande de conduction et  $\Delta E_v$  pour la bande de valence. Une fois que l'équilibre thermique est obtenu entre les deux matériaux semi-conducteurs (les niveaux de Fermi des deux matériaux A et B s'alignent) la hauteur de la discontinuité énergétique  $\Delta E_g$  pour les deux matériaux est donnée par :

$$\Delta E_g = E_g^A - E_g^B \quad \text{II.1}$$

### III. 3. Gaz électronique à deux dimensions (2DEG)

Le principe de base d'un HEMT est le transfert des électrons des atomes donneurs de la couche à plus grand gap vers celle à petit gap pour former le canal près de l'interface. Le gaz bidimensionnel d'électrons est engendré par la différence de polarisation à l'interface barrière/canal. Ainsi, la notion de Gaz est utilisée car les électrons du puits quantique qui n'est que de quelques Angstrom sont séparés des atomes donneurs et ne subissent que très peu d'interactions coulombiennes. Ce gaz est appelé gaz bidimensionnel car les porteurs se déplacent librement dans le plan parallèle à l'interface mais sont confinés dans le plan qui lui est perpendiculaire du fait de la faible largeur du puits, ainsi les électrons occupant les niveaux du puits de très faible épaisseur ont une faible interaction avec les atomes donneurs ionisés, ils présentent une mobilité plus importante dans les HEMTs comparé aux autres structures.

La figure II.3. permet d'expliquer la notion de gaz bidimensionnel. En effet, lorsqu'une couche mince de matériau semi-conducteur de l'ordre de quelques Å et à faible bande interdite est insérée entre deux semi-conducteurs similaires à grande bande interdite tel que l'AlGaAs, un puits quantique (QW) peut être formé dans l'hétérojonction. Une telle hétérojonction à la limite connaîtra des discontinuités aux bords de la bande de conduction et de la bande de valence avec un puits quantique généré pour les porteurs (électrons et trous), comme illustré à la figure II.3 (b). Les dopants dans les couches à haute bande interdite peuvent alors fournir les porteurs au puits quantique. Lorsque le fond du puits quantique se situe en dessous du niveau de Fermi, les donneurs d'énergie élevée vont au puits, créant ainsi un gaz électronique à deux dimensions (2DEG). Les électrons sont alors libres de se déplacer parallèlement à l'interface. Ce Gaz est donc quasi bidimensionnel. Cependant, les électrons dans le puits quantique ne peuvent pas se déplacer dans la direction perpendiculaire à l'interface, donc la direction de croissance des cristaux [33]. Pour bien contrôler le puits quantique (densités de porteurs dans le 2DEG) il faut choisir une bonne composition d'alliage.

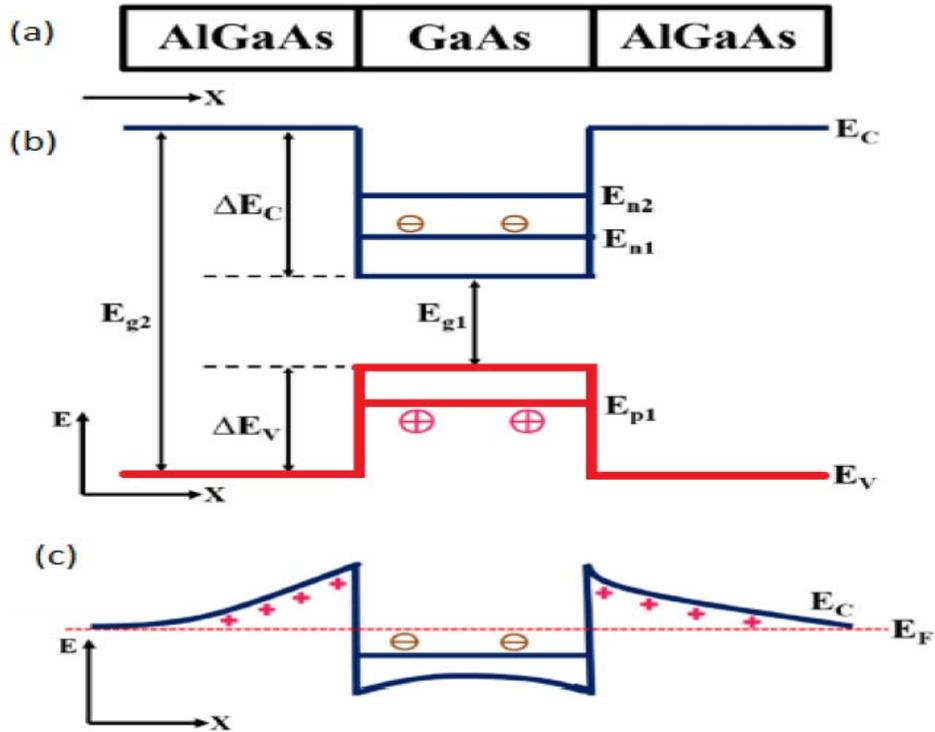


Figure II.3 . (a) Un Puits quantique idéal de forme carrée non dopée, (b) diagramme de bande d'énergie et (c) Diagramme de bande de conduction pour de l'AlGaAs est dopé n [33]

## VI. Contact métal semi-conducteur

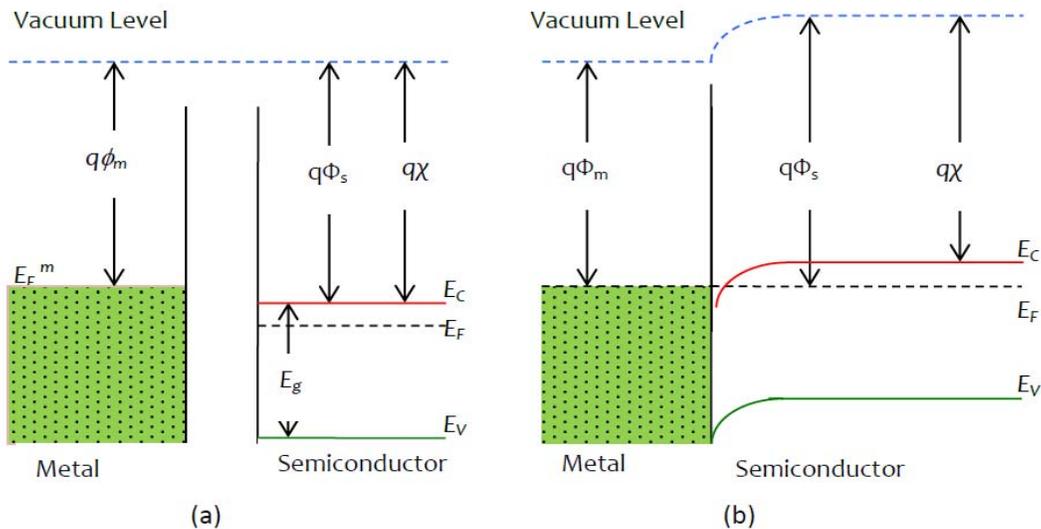
Il existe deux types de contact pour une jonction . Le premier est un contact métal-semi-conducteur de type Schottky le second est un contact ohmique. Ces contacts dépendent des caractéristiques de l'interface entre matériaux. Autrement dit, selon le modèle proposé par Schottky-Mott le contact métal/semi-conducteur peut être ohmique ou Schottky (redresseur) selon leur travail de sortie.

### VI.1. contact ohmique ( $\phi_m < \phi_s$ )

Dans le cas où le travail de sortie du métal est inférieur à celui d'un semi-conducteur de type n par exemple lors du contact, les électrons passent du métal vers le semi-conducteur.

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

Un contact ohmique est formé si aucune barrière de potentiel n'existe entre le métal et le semi-conducteur. Ce contact ne contrôle pas le flux de courant puisqu'il n'est pas de type redresseur. Le courant circule donc dans les deux sens avec la caractéristique linéaire I-V. De plus, un contact ohmique devrait avoir une résistance de contact non significative,  $R_c$  par rapport à la résistance en série,  $R_s$  du semi-conducteur, de sorte qu'une perte de courant est nulle ou très faible se produit dans le dispositif. Il existe 2 types de contact ohmique: (1) pour un semi-conducteur de type n; la fonction de travail du métal,  $\Phi_m$  doit être plus proche ou inférieure à l'affinité électronique semi-conducteur  $\chi$ . Par conséquent,  $\Phi_m$  doit être plus petit que la fonction de travail du semi-conducteur  $\Phi_s$ , c'est-à-dire que  $\Phi_s > \Phi_m$ , pour un semi-conducteur de type p,  $\Phi_m$  doit être proche ou supérieure à la somme de l'affinité et de l'énergie des électrons, ce qui est généralement peu pratique. Par conséquent, les contacts ohmiques de type p sont beaucoup plus difficiles à fabriquer que les types n.



**Figure II.4 .Diagramme de bande d'une interface métal-semi-conducteur:**

**(a) avant contact et (b) après contact [32]**

Autrement dit , pour un contact ohmique  $\Phi_m < \Phi_s$ , Il se crée alors une couche de charges positives à la surface du métal et négatives dans le semi-conducteur au voisinage de la surface, jusqu'à atteindre l'équilibre thermodynamique se traduisant par un niveau de

Fermi constant. A l'interface, l'hypothèse de continuité du niveau du vide est maintenue. On a, par création et un champ électrique se crée dû à l'existence de ces charges, induisant une courbure de bandes. Il se crée donc couche d'accumulation d'électrons côté semi-conducteur. Il n'y a pas de barrière pour limiter la circulation des porteurs dans la structure. Le contact est appelé ohmique et sa caractéristique I-V est linéaire.

Il existe deux manières d'obtenir un bon contact ohmique dans le traitement des semi-conducteurs: soit par couche de dopage à semi-conducteur élevée, soit par une barrière de Schottky de faible hauteur, à une jonction métal-semi-conducteur. À tout contact métal-semi-conducteur, il existe toujours une barrière de Schottky [34].

### VI.2. Contact schottky ( $\phi_m > \phi_s$ )

Un contact Schottky est un contact métallique. Ce contact est utilisé pour le contact de grille assurant un meilleur contrôle du canal. Ce contact assure la circulation du courant dans un sens et sert de barrière à la circulation du courant dans le sens opposé (contact redresseur). Pour un contact Schottky, le travail de sortie du métal, est plus important que celui du semi-conducteur .

Donc ,considérons le cas où le travail de sortie du métal  $\phi_m$  est supérieur au travail de sortie  $\phi_s$  d'un semi-conducteur de type n. Après contact les deux matériaux échangent des porteurs jusqu'à établissement de l'équilibre thermodynamique dans toute la structure. Le niveau de Fermi est alors constant.

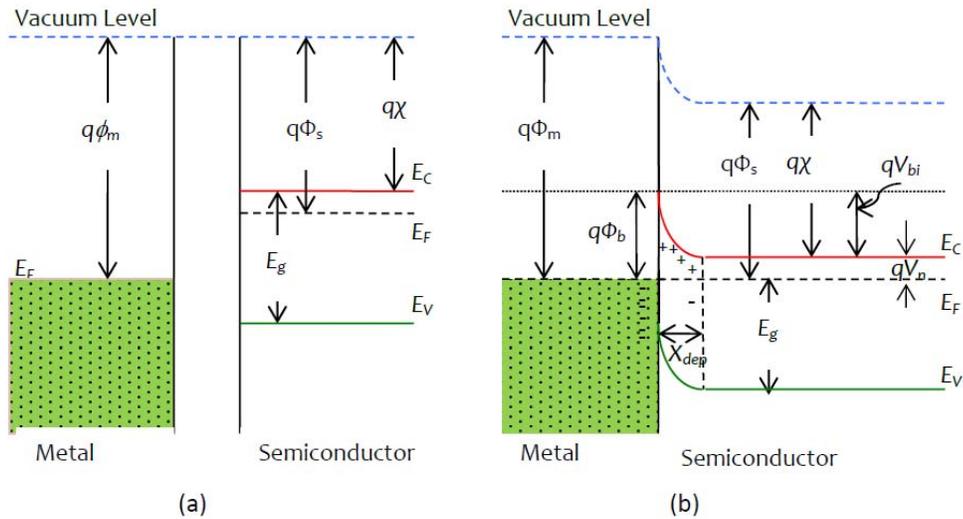


Figure II.5 Energie et schéma du contact Schottky: (a) avant contact et (b) au contact [34]

La figure II.6 (a) permet de représenter le diagramme de bande d'un contact métal – semi-conducteur pour former un contact Schottky. Près de l'interface métal – semi-conducteur, un électron voit un niveau de vide identique soit du côté métal ou du côté du semi-conducteur. C'est l'hypothèse de la continuité du niveau du vide énoncée par Anderson. Côté semi-conducteur, la distance énergétique du niveau de Fermi à la bande de conduction est modifiée fortement, se traduisant par l'apparition d'une ZCE s'étendant dans le volume jusqu'à ce que les conditions d'équilibre soient établies. Côté métal, la très forte densité des électrons a pour conséquence le rétrécissement de l'étendue de cette ZCE et le potentiel de la ZCE est négligeable.

La barrière de potentiel que doit traverser l'électron pour passer dans le semi-conducteur est appelée barrière Schottky  $\phi_b$ . Sa hauteur est égale à la différence entre le travail de sortie du métal et l'affinité électronique du semi-conducteur :

$$q\phi_B = q\phi_m - q\chi$$

II.2

où:  $\phi_B$  la hauteur de la barrière dépend du travail de sortie  $\phi_m$ , et de l'affinité électronique de semi-conducteur  $\chi$ .

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

---

La barrière de potentiel que doit franchir l'électron situé au bas de la BC du semi-conducteur pour passer du semi-conducteur dans le métal est égale à  $\phi_m - \phi_s$ . Elle est moins élevée, que la barrière Schottky.

Si la jonction est polarisée par une tension métal – semi-conducteur  $V$  positive, le champ électrique appliqué est opposé au champ électrique de la ZCE et la courbure des bandes diminue. Les bandes d'énergie du semi-conducteur s'élèvent de la quantité  $qV$  et la barrière semi-conducteur – métal diminue de la même quantité soit  $qV$  alors que la barrière métal – semi-conducteur reste inchangée vu qu'il n'y a pas de chute de potentiel dans un métal. Ainsi, le flux d'électrons qui transite du semi-conducteur vers le métal augmente alors que le flux inverse reste inchangé. Ce flux d'électrons se traduit par un courant augmente exponentiellement avec la tension appliquée. La jonction est polarisée en sens passant ou direct [35].

Si maintenant la structure est polarisée par une tension métal – semi-conducteur  $V_{\text{négative}}$  Le champ électrique appliqué va renforcer le champ électrique de la ZCE. La zone de déplétion s'élargit alors et les bandes d'énergie du semi-conducteur s'abaissent de la quantité  $qV$ . La hauteur de la barrière semi-conducteur – métal augmente alors que la barrière métal – semi-conducteur reste inchangée vu que la chute de potentiel dans le métal est négligeable. Le flux d'électrons passant du semi-conducteur au métal diminue fortement. Par contre, le flux d'électrons du métal vers le semi-conducteur reste inchangé[35]. Le passage d'électrons du semi-conducteur vers le métal est alors bloqué on obtient alors un très faible courant qui sature dès que la tension inverse  $V$  dépasse quelques  $k_B T$ . La jonction est alors polarisée dans le sens inverse ou bloqué. Ce contact est de type redresseur et est appelé contact Schottky.[35]

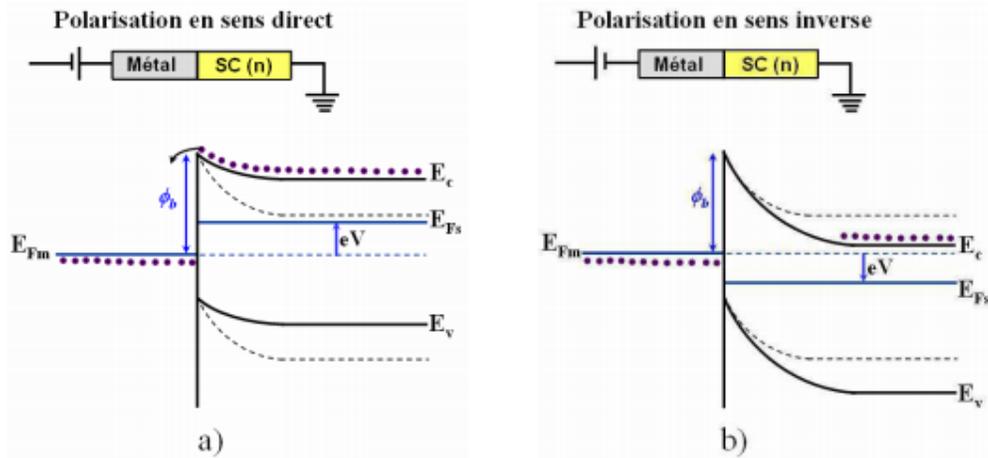


Figure II- 6: Diagramme énergétique d'un contact Schottky, a) en polarisation direct, b) en polarisation inverse.[35]

## V. Les transistors à effet de champ

Le transistor à effet de champ (FET : Field Effect Transistor) a été décrit pour la première fois en 1952 par Shockley [33,36-37]. Il a été primitivement appelé transistor unipolaire par opposition au transistor bipolaire car un seul type de porteur est utilisé.

Le courant est contrôlé par l'action d'un champ électrique plutôt que par l'injection de porteurs. Sur ce principe, divers structures de transistors à effet de champ correspondant à différents types de contacts de grille furent élaborées, on mentionne alors:

- ✓ Le JFET (Junction Field Effect Transistor) : grille à jonction PN,
- ✓ Le MOSFET (Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor) : grille métallique isolée de la couche active par un oxyde isolant.
- ✓ Le MESFET (Metal Semi-conductor Field Effect Transistor) : grille métallique à barrière Schottky.
- ✓ Transistor HEMT "High Electron Mobility transistor" : grille métallique à barrière Schottky.

### V.1 Transistors JFET et MESFET

Le transistor à effet de champ (FET) pourrait être défini comme un bloc de semi-conducteur est contrôlé par un champ électrique appliqué perpendiculairement au sens du

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

courant, le FET est constitué d'une couche de semi-conducteur, le canal, dans lequel les porteurs circulent entre deux contacts ohmiques, la source et le drain.

Le transistor à effet de champ à jonctions (*Junction Field Effect Transistor : JFET*) comporte trois électrodes :

- une électrode qui injecte les porteurs dans la structure : la source (*source*).
- une électrode qui recueille les porteurs : le drain (*drain*).
- une électrode où est appliquée la tension de commande : la grille (*gate*).

La partie du semi-conducteur située sous la grille est souvent appelée canal. Le JFET à canal N est constitué d'une mince plaquette de silicium N qui va former le canal conducteur principal. Cette dernière est recouverte partiellement d'une couche de silicium P pour former une jonction PN latérale par rapport au canal.

Le transistor FET fonctionnera toujours avec la jonction grille-canal polarisée en inverse. Dans le JFET le courant est créé par le déplacement d'un seul type de porteurs qui sont les porteurs majoritaires (composant unipolaire), ce courant est modifié par un champ électrique appliqué transversalement au sens de déplacement des porteurs. Le JFET utilise donc la largeur de la zone de déplétion d'une jonction P-N dépendant de la tension qui lui est appliquée pour contrôler le flux du courant. La Figure II.7 représente un Coupe d'un JFET et le diagramme de bande correspondant. Une couche de type N est déposée par épitaxie sur un substrat. La jonction de grille de type P peut être réalisée par épitaxie [38-39], par implantation ionique [40],[51] ou par diffusion [42-44].

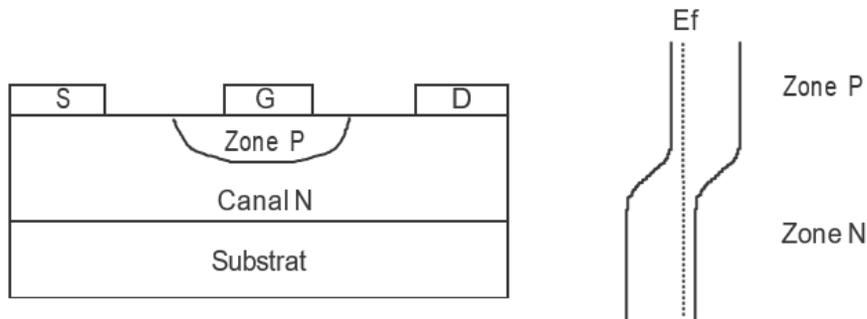


Figure II.7. Coupe schématique d'un JFET avec son diagramme de bande.

La technologie MESFET (Metal Semi-conducteur Field Effet Transistor) est réalisée par une diode Schottky, et présente une grille métallique dont le contact avec le semi conducteur. Un MESFET est constitué par un barreau de semi-conducteur de type N sur lequel sont réalisés à ses deux extrémités les contacts ohmiques de source et de drain. Entre la source et le drain, un contact Schottky matérialise l'électrode de grille. comme le montre la figure II.8. Ce type de transistor fit son apparition en 1966 et fut le premier à être fabriqué à partir d'un composé III-V [45-46]. Pour un MESFET à base de GaAs, le transistor MESFET est conçu par un barreau semi-conducteur de type N sur lequel sont réalisés, à ses deux extrémités, les deux contacts ohmiques de source et de drain, entre lesquels un contact Schottky matérialise l'électrode de grille. Ce transistor est réalisé sur un substrat semi-isolant GaAs sur lequel on fait croître par épitaxie ou par implantation ionique la couche active avec des impuretés de type donneur. L'adjonction d'une couche fortement dopée permet l'accrochage des contacts ohmiques de source et de drain, ainsi que la diminution des résistances parasites de source et de drain.

Ainsi, la structure du transistor MESFET à effet de champ à contact Schottky repose sur une couche active qui forme le canal, directement implantée dans le substrat semi-isolant. Ensuite, la grille métallique réfractaire est déposée afin de matérialiser le contact schottky. Par la suite, les zones N+ sont implantées en se servant du métal comme d'un masque afin d'obtenir deux zones d'accès auto alignées sur la grille. Notons que les contacts de source et de drain sont des contacts ohmiques contrairement au contact Schottky de grille.

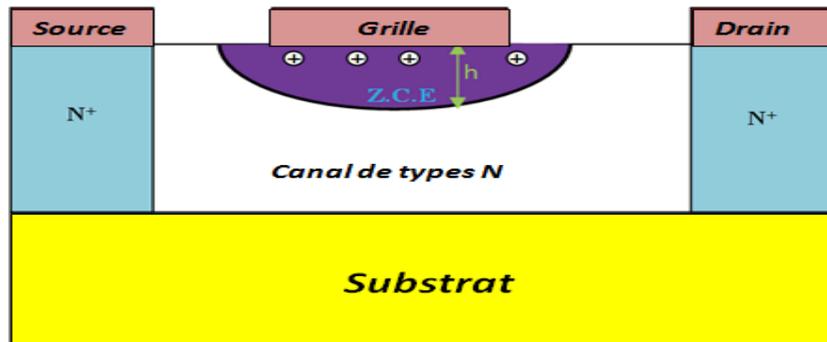


Figure II.8 . Coupe schématique du MESFET.

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

le première MESFET a été conçu sur un substrat GaAs, et c'est la structure la plus simple pour un transistor à effet de champ. Théoriquement, un MESFET représenté en figure II.9, est constitué d'un barreau de semi-conducteur dopé « N », sur lequel sont réalisés à ses deux extrémités, les deux contacts ohmiques de source et de drain.

### V.1.1. Principe de fonctionnement du MESFET

Le principe de base du MESFET repose essentiellement sur les caractéristiques d'une jonction Schottky. La base de fonctionnement de ce dispositif est la possibilité de moduler l'épaisseur du canal sous la grille de transistor. En régime de fonctionnement normal le drain est polarisé positivement par rapport à la source, alors que la grille est polarisée négativement, par rapport à la source.

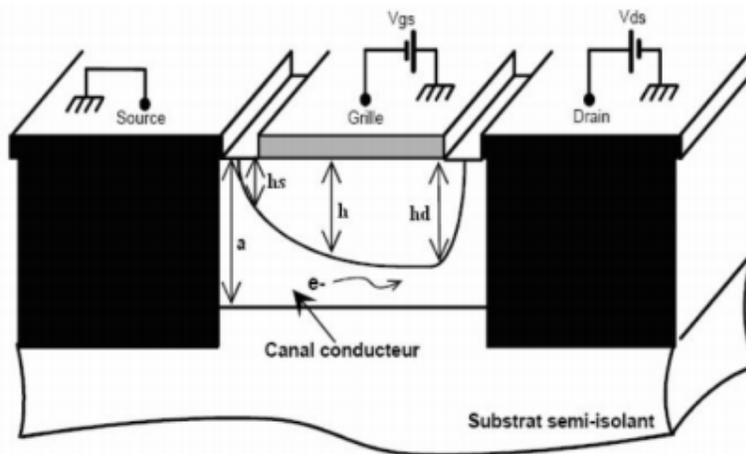


Figure II.-9. La structure du MESFET.

Ainsi, lorsque les conditions de polarisation normales pour le MESFET sont vérifiées, la présence du contact Schottky crée une zone dépeuplée de porteurs libres sous la grille. La concentration des électrons mobiles est ainsi maximale dans la fraction restante de la couche conductrice appelée canal conducteur. En effet, lorsqu'on applique une tension drain source notée  $V_{ds} > 0$ , un flux d'électrons traverse le canal de la source vers le drain correspondant à un courant  $I_{ds}$  dans le sens inverse. Cependant, la section du canal conducteur disponible est limitée à  $(a-h)$ . Si on diminue la tension de polarisation  $V_{gs}$ , l'épaisseur " $h$ " va augmenter, par conséquent le courant  $I_{ds}$  diminue. Lorsque  $h$  atteint la valeur " $a$ ", le canal sera pincé et le courant  $I_{ds}$  s'annule. On peut alors contrôler le passage du courant de sortie par la commande de grille.

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

Les tensions de polarisation  $V_{GS}$  et  $V_{DS}$  permettent de générer un réseau de caractéristiques : la caractéristique principale de sortie met en évidence la zone ohmique et la zone de saturation figure II.10.

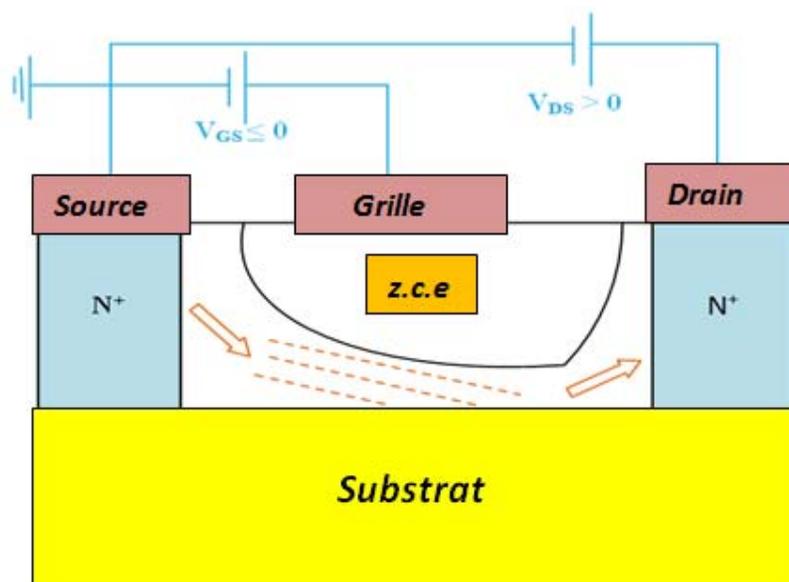


Figure II.10. la polarisation du transistor MESFET.

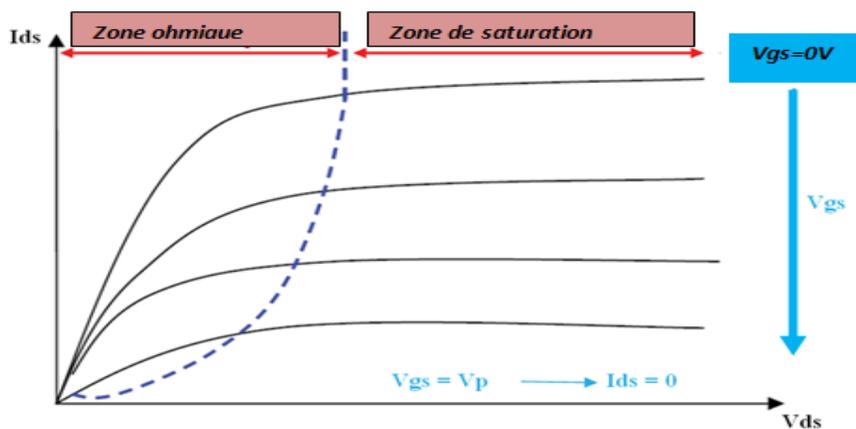


Figure II.11. Caractéristique de sortie  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  du MESFET.

### V.2. Le Transistor MOSFET

Le MOSFET Metal Oxide Semi-conductor field effect transistor est un transistor à effet de champ à grille isolée. C'est le dispositif semi-conducteur le plus utilisé en électronique

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

numérique. Il est présent en forte densité dans les microprocesseurs, il constitue l'élément de base permettant la construction de portes logiques. Le transistor MOSFET présenté en figure II.12 fut proposé dans le début des années 1930 par Julius Edgard Lilienfeld et Oskar Heil [47-48]. Le MOSFET, n'est apparu sous sa forme moderne qu'en 1955 grâce à Ross . De nos jours, le MOSFET est vu comme la base de la conception des circuits intégrés VLSI et ULSI et a mené la technologie CMOS au rang avéré de technologie dominante de l'industrie du semi-conducteur.

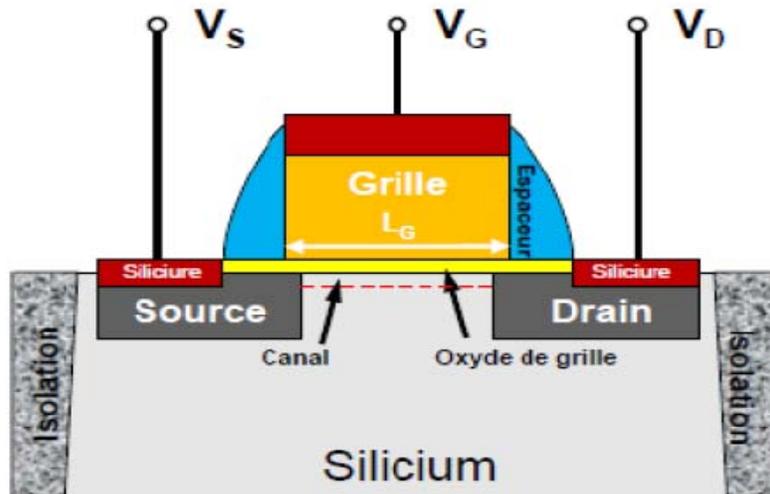


Figure II.12 représentation schématique d'un MOSFET classique

### V.2.1 Principe de fonctionnement du Transistor MOSFET

Le MOSFET module le courant qui le traverse avec un signal appliqué à son électrode de grille, ainsi la conduction du transistor est contrôlée par la polarisation de la grille. On distingue alors suivant la polarisation trois régimes de fonctionnement : l'accumulation, l'inversion, la déplétion.

Ces transistors peuvent être de deux types : soit des transistors à enrichissement ou à appauvrissement de canal. On distingue aussi des transistors à canal N ou à canal P.

Afin d'expliquer le fonctionnement des MOSFETs, nous considérons un MOSFET à canal N à enrichissement de canal, ce dernier est constitué d'un substrat de type P faiblement dopé, d'une couche conductrice métallique ou parfois d'une couche de polysilicium fortement dopé appelée grille déposée sur l'isolant qui est généralement dans le cas des MOSFETs du  $\text{SiO}_2$  et

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

---

de deux régions fortement dopées, et appelées source et drain considérés comme deux réservoirs de charges très fortement dopées, et de type opposé au substrat. La région entre ces deux régions est appelée la région du canal.

Contrairement au bipolaire le MOSFET fait appel à un seul type de porteurs de charge, il est ainsi unipolaire. Le fonctionnement repose sur l'effet du champ électrique appliqué sur son électrode de grille, l'isolant et la couche semi-conductrice, appelée substrat. Généralement, comme nous l'avons indiqué auparavant, en micro-électronique la couche métallique est remplacée par du silicium polycristallin.

Lorsque la différence de potentiel entre la grille et le substrat est nulle soit  $V_{GS}=0V$ , il n'y a pas de champ électrique et donc pas de charge dans le canal, ainsi le circuit électrique entre la source et le drain est constitué de deux diodes à jonction P-N et quel que soit le signe de la polarisation drain-source l'une des deux diodes considérée est en polarisation inverse ainsi le courant  $I_{DS}$  est nul ou tout au moins négligeable. Lorsque cette et le transistor est en mode bloqué. Lorsque  $V_{GS}$  augmente, les charges libres dans le semi-conducteur sont repoussées de la jonction oxyde-semi-conducteur, créant tout d'abord une zone dite de « déplétion », puis une zone « d'inversion ». Cette zone d'inversion est donc une zone où le type de porteurs de charges est opposé à celui du reste du substrat, créant ainsi un « canal » de conduction. Autrement dit, lorsque le champ appliqué dans le semi-conducteur augmente et devient suffisamment important pour attirer les porteurs minoritaires qui s'accumuler sous l'oxyde, il se crée alors un canal constitué d'électrons sous l'oxyde. Ainsi, le passage entre la source et le drain devient possible et un faible courant  $I_{DS}$  peut commencer à circuler dans le canal.

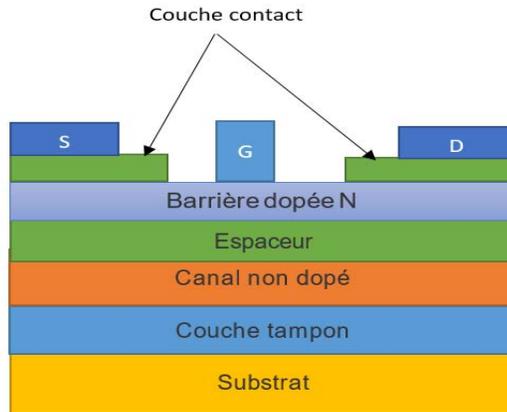
Lorsqu'une tension grille-source appliquée est supérieure à la tension de seuil notée  $V_{th}$ , un canal de type n est induit dans le corps de type p. et ce canal permet au courant électrique de circuler du drain vers la source.

### V.3 Le Transistor HEMT.

#### V.3.1 Structure et principe de fonctionnement de transistor du HEMT .

Un transistor à haute mobilité électronique HEMT est un cas particulier du transistor à effet de champ FET. Ce transistor HEMT a été découvert et réalisé simultanément, pour la première fois, par FUJITSU [49] au Japon et par THOMSON [50] en France en 1980 où on a pu observer une augmentation de 30 % de la mobilité électronique dans ce dispositif par rapport

au MESFET, à 300 K. La Figure II.13 représente La structure de base du transistor HEMT.



**Figure II.13. Structure typique du transistor HEMT à hétérojonction.**

L'effet transistor, qui va donc consister en un effet de la modulation de la conductance dans le gaz 2D par une variation d'une tension de commande, sera obtenu par la création de deux contacts ohmiques source et drain et d'un contact Schottky : la grille .qui représente l'électrode de commande permettant le contrôle de la densité d'électrons dans le gaz 2D.

L'idée principale c'est d'utiliser comme canal conducteur du transistor .un gaz bidimensionnel d'électrons circulant dans un matériau peu dopé et résultant de l'occupation des niveaux d'énergie du puits de potentiel caractéristique d'une hétérojonction.

La structure des couches du HEMT est similaire à celle du HFET, mais le mode de fonctionnement différent. La barrière grand gap est fortement dopée, pour générer une accumulation d'électrons dans le canal non dopé, si on met en contact un matériau de grande bande interdite dopé N et un matériau de faible largeur de bande interdite non dopé on obtient un transfert de charges vers le matériau de faible largeur de bande interdite. Ce type de transistor est rapide et donne des fréquences de coupure plus élevées.

La solution trouvée au problème des dopants qui limitent la mobilité des porteurs dans le canal de conduction des MESFETs consiste à transférer des électrons, contenus dans un plan de dopage, dans le canal non dopé directement. Le plan de dopage est ainsi contenu dans un matériau semi-conducteur à grand gap qui définira le contact Schottky avec le métal de grille.

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

---

C'est sur le principe d'une hétérojonction entre un matériau grand gap (couche barrière Schottky) et un matériau à petit gap (le canal) qui vont permettre de séparer spatialement les charges coulombiennes de la couche donneuse (plan de dopage) des électrons libres du canal que reposent les HEMTs [51].

Les HEMT les plus célèbres sont à base des matériaux III-V. Typiquement un HEMT consiste en un isolant à large bande interdite tel que l'AlGaAs ou InAlAs, un canal à petit gap tel que le GaAs ou l'InGaAs, un buffer ou couche tampon à large gap et un substrat semi-isolant, généralement GaAs ou InP. En figure II.13, on présente une structure typique du transistor HEMT à hétérojonction, ou on distingue.

- **Une couche cap layer:** c'est une couche superficielle formée par un matériau de faible bande interdite fortement dopée (généralement  $> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) Les deux contacts ohmiques de source et de drain sont déposés sur cette couche, dont le rôle est de diminuer la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès L'épaisseur de cette couche est d'environ 50Å à 100 Å [52]. On peut ainsi dire que les contacts de source et drain sont épitaxie sur une couche semi-conductrice, fortement dopée, nommée "cap layer" permettant de déminer la résistance des électrodes.
- **Une couche Schottky:** Une couche à grand gap non dopée et insérée sous la grille sa fonction consiste à former une barrière Schottky sous la grille.
- **Une couche donneuse:** cette couche fournit des électrons libres à la structure, elle joue un rôle très important car elle contribue à l'augmentation de la concentration des électrons fournis.
- **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. Cependant, une couche d'espacement plus épaisse pourrait être appliquée pour fournir une plus grande mobilité des électrons avec une densité de

charge plus faible dans le canal. Aux températures cryogéniques, les performances d'un HEMT dépendent fortement de l'épaisseur de l'espaceur en raison de la forte augmentation de la mobilité électronique et de la vitesse [53].

- **Le canal:** cette couche est constitué d'un matériau à faible gap, c'est la couche la plus importante du HEMT, car c'est dans cet endroit que se crée le canal qui reçoit le gaz bidimensionnel d'électrons et c'est cette couche qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau. Le canal permet ainsi un transit rapide des électrons grâce à la forte mobilité électronique et au caractère non dopé du matériau le constituant. Notons que la haute mobilité électronique des porteurs dans le canal permet donc de fabriquer des dispositifs pour l'électronique rapide.
- **La couche tampon:** cette couche de matériau à grand gap possède des propriétés structurales moyennes entre les propriétés du substrat et celles du matériau formant le canal. Cette couche favorise le confinement des électrons en s'interposant à l'injection des porteurs vers le substrat. cette couche permet de diminuer la contrainte liée au désaccord de maille entre la couche du canal et le substrat semi-insolant
- **Le substrat :** C'est la couche sur laquelle on fait croître les matériaux par épitaxies. Le choix du substrat est décisif pour la qualité du composant et pour son fonctionnement. En effet, un mauvais choix du substrat peut donner naissance à des causer dislocations lors de la croissance, qui peuvent rendre le composant non fonctionnel. Les matériaux les plus utilisés sont le silicium, le saphir et le carbure de silicium.

### V.3.2.Caractéristiques électriques des transistors HEMTs

Après avoir présenté brièvement le transistor HEMT, nous expliquons dans ce paragraphe les paramètres électriques qui permettent de déterminer les performances du

composant. Les différents éléments passifs et actifs du dispositif sont représentés sur la figure II.14.

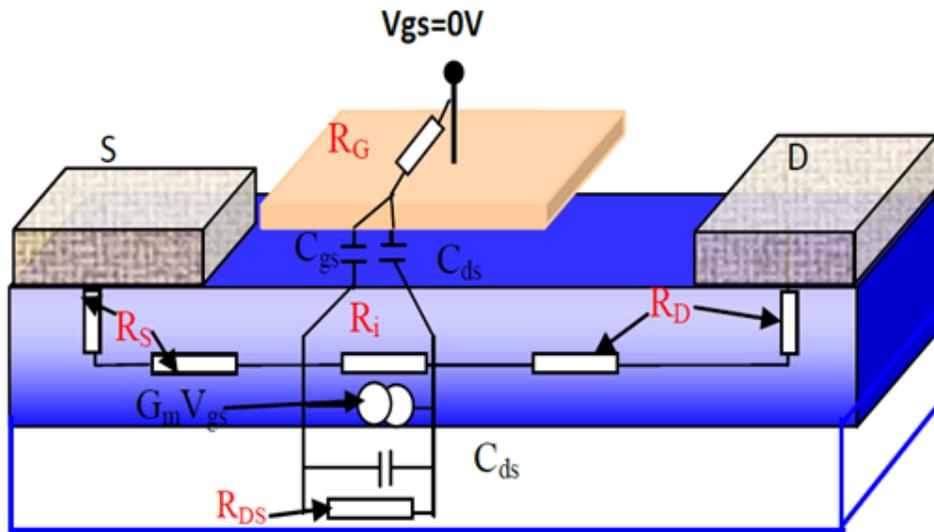


Figure II.14. Représentation schématique des éléments électriques d'un transistor HEMT.

L'analyse du transistor consiste à déterminer d'une part, les caractéristiques électriques au travers des mesures statiques et dynamiques, et d'autre part, les différents éléments parasites tels que les résistances induites par les plots métalliques, les inductances et les différentes capacités. Tous ces éléments sont représentés sur la figure II.15. La quantification de ces paramètres est effectuée en s'appuyant sur le schéma équivalent en régime petit signal basé sur un modèle théorique associé à des formules mathématiques.

### V.3. 3. Le courant de drain-source

On rappelle qu'un transistor HEMT est un transistor à effet de champ à hétérojonction. Son principe de fonctionnement est basé sur la modulation de la conductance entre deux contacts ohmiques source et drain, par l'action électrostatique d'une électrode de commande métallique : la grille de longueur  $L_g$  et de largeur  $W_g$ .

La Figure II.15 représente un réseau de caractéristiques courant-tension  $I_{ds}-V_{ds}$ , du HEMT soit la caractéristique de sortie qui permet de donner l'évolution du courant  $I_{ds}$  circulant entre le drain et la source lorsqu'on fait croître la tension  $V_{ds}$  en maintenant la tension de grille  $V_{gs}$  à une valeur constante.

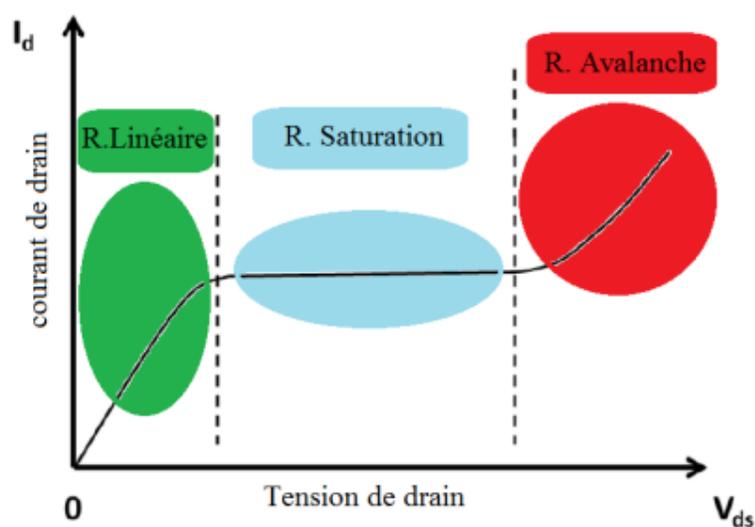
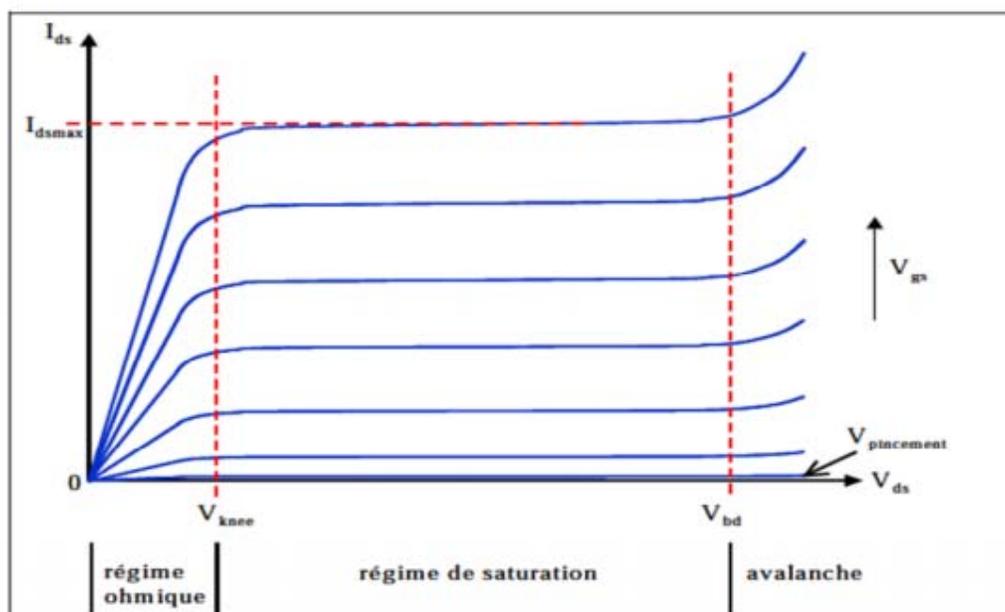


Figure II.15 Caractéristique courant – tension d'un transistor HEMT.

Sur ces courbes, trois régimes de fonctionnement sont observés :

- Le régime ohmique: le courant  $I_{ds}$  croît de façon linéaire en fonction des tensions  $V_{ds}$  et  $V_{gs}$ . Cette zone est délimitée par les valeurs  $V_{knee}$  ( tension de coude) et  $I_{dsmax}$ . Pour de faibles valeurs de la tension  $V_{ds}$  , plus  $V_{ds}$  augmente et plus la mobilité des

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

---

électrons dans le canal augmente, induisant un accroissement du courant  $I_{ds}$ , par ailleurs plus la vitesse de saturation des électrons est faible et plus la limite supérieure  $V_{knee}$  de cette zone sera petite.

- 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 . La région de saturation due à la saturation des électrons où le courant de drain est sensiblement indépendant de la tension  $V_{ds}$ . Lorsque la tension  $V_{gs}$  augmente en valeur absolue, on a une diminution de la profondeur du puits de potentiel à l'hétérojonction entraînant celle de la densité surfacique des électrons. Pour une tension de grille  $V_{gs}$  négative, le canal est pincé. Cette tension de seuil est définie comme une tension de pincement notée  $V_p$ . il y a une forte dépendance entre la concentration des porteurs d'une part, et l'épaisseur et le dopage de la zone de grand gap d'autre part, ceci rend difficile la maîtrise de la tension de pincement. Au-delà de la tension  $V_{ds}=V_{knee}$ , 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.
- L'avalanche: le courant  $I_{ds}$  s'emballe jusqu'à la destruction du dispositif. Lorsque le champ dans le canal atteint la valeur du champ critique  $E_{critique}$  de claquage, il se produit un phénomène d'avalanche. En effet lorsque le champ atteint la tension de claquage, de plus en plus d'électrons et de trous sont libérés jusqu'à une augmentation brutale et irréversible du courant  $I_{ds}$ ; menant à la destruction du dispositif . Cette caractéristique permet d'indiquer la limite des tensions de commande du transistor.

Pour modéliser le courant drain source d'un HEMT, premièrement on doit tenir compte:

- premièrement de la contribution du courant principal qui résulte du déplacement des électrons du gaz bidimensionnel dans le puits quantique au niveau de l'interface de l'hétérojonction.

- Deuxièmement du courant de l'effet MESFET parasite sous la grille, qui est dû à une déplétion incomplète.
- Troisièmement des éléments parasites résistifs des chemins d'alimentation de drain, grille et source du transistor menant à des chutes des tensions  $V_{ds}$  et  $V_{gs}$ , et donc à une diminution du courant  $I_{ds}$  et de la transconductance extrinsèque du dispositif.

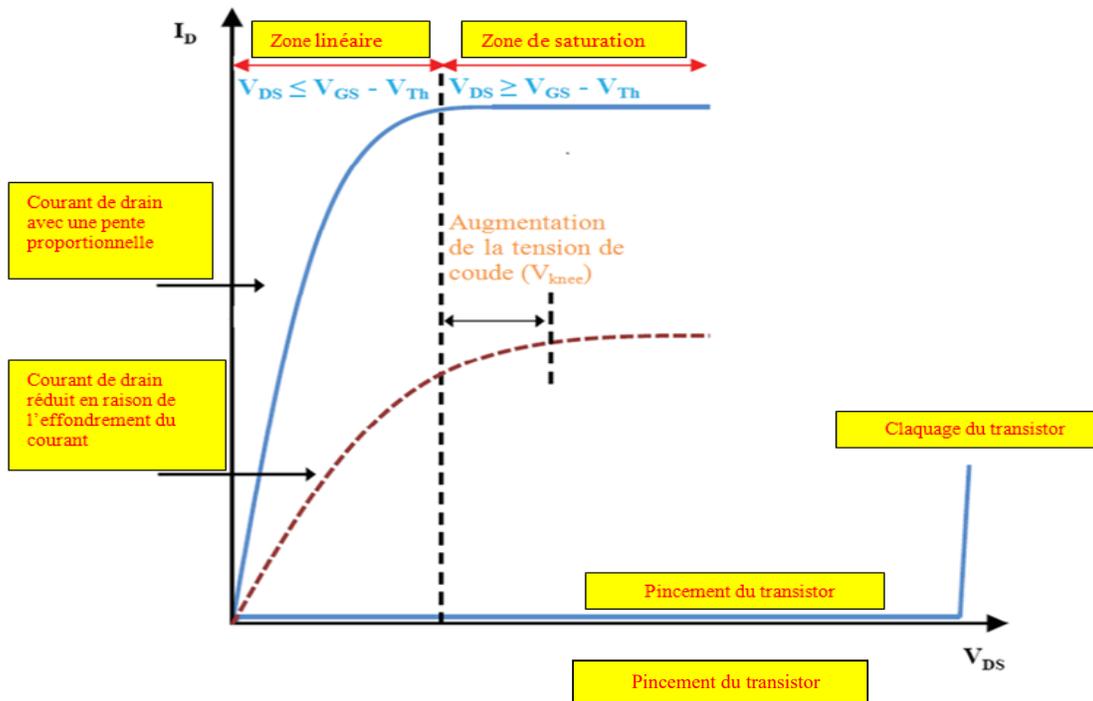


Figure II.16: Caractéristique de sortie d'un HEMT [52].

- Régime linéaire: dans cette région, le courant  $I_{ds}$  est proportionnel à la tension  $V_{ds}$  appliquée, dans ce cas le courant de drain  $I_{ds}$  s'exprime par:

$$I_{ds} = q \cdot N_s W_g V_d \quad \text{II.3}$$

$V_d$  est la vitesse de dérive des électrons est telle que:

$$V_d = \mu \frac{V_{ds}}{L_{sd}} \quad \text{II.4}$$

où:

$v_d$  est la vitesse de dérive des électrons du gaz 2D dans le canal qui, pour de faibles champs, est proportionnelle au champ appliqué,  $\mu$  est la mobilité qui est constante, et  $L_{sd}$  est la distance source-drain,  $W_g$  représente la largeur de la grille du composant,  $N_s$  la densité surfacique de charge du 2-DEG. par conséquent le courant  $I_{ds}$  s'exprimera par:

$$I_{ds} = q \cdot N_s \mu \frac{W_g}{L_{sd}} V_{ds} \quad \text{II.5}$$

➤ Régime saturé:

lorsque la tension de polarisation  $V_{ds}$  continue à augmenter la mobilité des électrons diminue, et le champ électrique va atteindre la valeur critique pour laquelle la vitesse des électrons va saturer. Cette tension correspond à la tension de coude et le transistor passe du régime linéaire au régime saturé.

La différence de potentiel drain-grille est plus grande que la tension  $V_{GS}$ . Le courant  $I_{dsat}$  a pour expression :

$$I_{dsat} = q N_s W_g V_{sat} \quad \text{II.6}$$

On peut augmenter la densité de charges dans le puits par l'augmentation de la concentration du dopage de la barrière. La limite de cette augmentation est alors fixée par le champ électrique à la jonction Schottky qui augmente à mesure que le dopage augmente induisant des risques de claquage.

### V.3.4 .Eléments intrinsèques décrivant l'aspect actif intrinsèque du transistor

Les éléments intrinsèques décrivant l'aspect actif intrinsèque du transistor sont donnés dans ce qui suit:

$g_m$  : la transconductance

$g_d$  : La conductance de sortie ( $g_d=1/R_{ds}$ )

$C_{gs}$  : représente la capacité grille-source

$C_{gd}$  : représente la capacité grille-drain

$C_{ds}$  : représente la capacité drain-source

$R_i$  : représente la résistance d'entrée.

### V.3.4.1 La transconductance intrinsèque $g_m$ :

La transconductance  $g_m$  est un paramètre capital du transistor .Le mécanisme de gain intrinsèque du HEMT est fourni par sa transconductance. la transconductance traduit l'aptitude de la grille du transistor à contrôler le courant dans le canal. La transconductance intrinsèque elle s'exprime par :

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{ds}=\text{constant}} \quad \text{II.7}$$

$g_m$  peut aussi être s'exprimée par:

$$g_m = \frac{V_{sat} C_{gs}}{L_g} \quad \text{II.8}$$

Cette relation importante montre que la transconductance dépend fortement de la vitesse de saturation des électrons. Une transconductance importante permet la conception d'amplificateurs de puissance .

#### V.3.4.1.1 La transconductance extrinsèque :

La transconductance extrinsèque  $g_m$  peut être exprimée par la relation suivante:

$$g_m = \frac{g_{m0}}{1+g_{m0}R_s} \quad \text{II.9}$$

$g_{m0}$  représente ici la transconductance intrinsèque du HEMT.

#### V.3.4.1.2 La conductance de sortie :

La conductance est définie par:

$$g_d = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right|_{V_{gs}=\text{constant}} \quad \text{II.10}$$

La conductance de sortie  $g_d$  traduit la conduction drain-source parasite du HEMT. La conductance est essentiellement due aux effets canaux courts et aux états énergétiques

introduits dans la bande interdite . la conductance de sortie se défini ainsi qu'elle est l'inverse de la résistance de sortie  $R_{ds}$  sous une tension de grille constante.

### V.3.4.2 Les capacités

#### V.3.4.2 .1 Capacité grille-source ( $C_{gs}$ )

La capacité grille-source ( $C_{gs}$ ) représente la variation de la charge accumulée sous la grille dans la zone déplétée. Cette capacité est déterminée par la variation de la charge de la ZCE de la jonction Schottky grille-source par rapport à la variation de la tension grille-source pour une tension grille-drain constante.

$$C_{gs} = \left. \frac{\partial Q_g}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{gd}=\text{constant}} \quad \text{II.11}$$

#### V.3.4.2.2 La capacité grille-drain ( $C_{gd}$ )

La capacité grille-drain ( $C_{gd}$ ) représente la variation de la charge accumulée sous la grille située dans la zone déplétée. Cette capacité détériore les performances dynamiques du dispositif . Cette dernière est déterminée par la variation de la charge dans la ZCE de la jonction Schottky par rapport à la variation de la tension grille-drain pour une tension grille-source constante.

$$C_{gd} = \left. \frac{\partial Q_g}{\partial V_{gd}} \right|_{V_{gs}=\text{constant}} \quad \text{II.12}$$

Cette capacité peut dégrader les performances dynamique du composant par effet Miller ou par couplage direct.

#### V.3.4.3 Les résistances $R_i, R_{gd}$

La résistance  $R_i$  représente la résistance d'entrée du transistor ;  $R_{gd}$  représente la résistance drain-source cette dernière parfois négligée. les capacités  $C_{gs}$  et  $C_{gd}$  sont en série avec deux zones partiellement conductrices, modélisées par les résistances  $R_i$  et  $R_{gd}$ . Ces résistances sont dus au fait que la barrière sous la grille et plus exactement les régions d'accès au canal actif ne sont pas totalement dépletées . Ces résistances sont en parallèle avec les capacités  $C_{gs}$  et  $C_{gd}$ .

### V.3.4.4. Les résistances d'accès $R_d$ et $R_s$

Ces résistances sont dû aux contacts ohmiques de drain et de source, et à la densité de charge limitée dans les régions d'accès. Le gain extrinsèque du transistor dépend de cette résistance et diminue pour des valeurs élevées de cette dernière

### V.3.5. Schéma équivalent petit signal

La figure II.17 représente le schéma électrique équivalent d'un transistor FET en régime petit signal. Ce schéma équivalent est établie en utilisant les éléments que nous avons définis auparavant.

Le schéma équivalent petit signal permet de déterminer les potentialités du transistor en hyperfréquence.

Ce schéma comprends deux parties :

Une première zone comprenant les éléments intrinsèques du HEMT. Ces éléments dépendent de la polarisation du transistor.

Une zone comprenant ses éléments extrinsèques qui sont supposés être indépendants de la polarisation du transistor. Ainsi la partie intrinsèque permet de modéliser la partie active. La partie extrinsèque modélise les éléments d'accès du dispositif, ces éléments sont indépendants de la polarisation.

Notons par ailleurs que lorsqu'un HEMT est réalisé physiquement, les inductances parasites d'accès  $L_g$ ,  $L_d$ ,  $L_s$  respectives aux grille, drain et source se rajoutent au schéma.

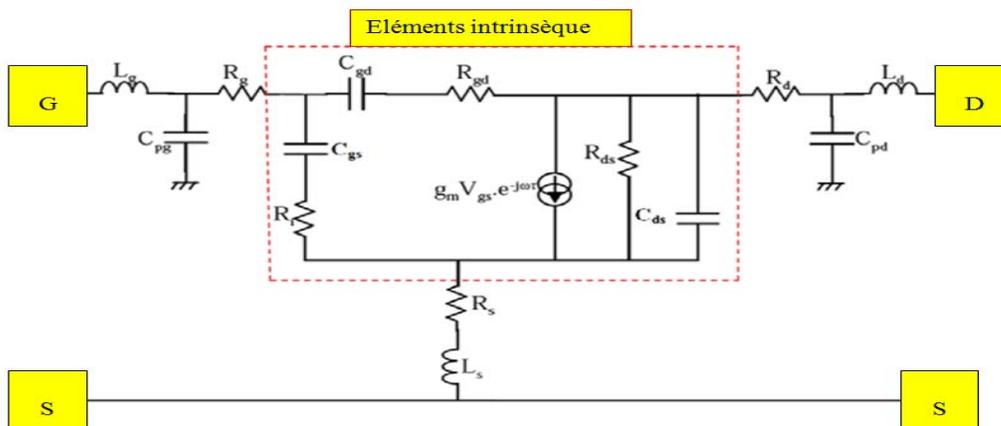


Figure II.17 Schéma équivalent d'un HEMT en régime petits signaux.

**V.3.6. Dégradation des performances du HEMT**

**V.3.6.1 . Effondrement du courant (collapse Current)**

La puissance de sortie maximale théorique pouvant être donnée par un HEMT peut être estimée à partir de ses caractéristiques de sortie  $I_{ds} - V_{ds}$  (pour un courant sinusoïdal autour de la polarisation CC acquiescent) est donnée par [54]:

$$P_{out} = \frac{1}{8} \cdot I_{max} \cdot (V_{BR} - V_{Knee}) \quad \text{II.13}$$

où :  $I_{max}$  est le courant de drain maximum,  $V_{BR}$  la tension de claquage et  $V_{KNEE}$  la tension de coude à laquelle les courbes  $I_{ds} - V_{ds}$  passent de la région linéaire à la région de saturation. Cependant, il a été démontré expérimentalement que, dans des conditions RF ou pulsées, le courant de drain est temporairement réduit. Cette diminution du courant de sortie est le résultat direct des pièges qui existent à la surface et à des niveaux profonds qui réduisent le nombre d'électrons disponibles dans le canal [55].

**V.3.7 La fréquence de coupure intrinsèque**

Un des paramètres des plus important dans une étude fréquentielle est la fréquence de coupure notée  $f_T$ . Cette fréquence est définie par la fréquence à laquelle le gain en courant de court-circuit est unitaire ce qui revient à dire que le courant circulant dans la grille est égal au courant qui s'écoule au drain. Dans un montage d'étude de fréquence les courant d'entrée  $i_g$  et de sortie  $i_d$  peuvent être exprimés respectivement par:

$$i_g = \frac{V_{gs}}{\left(\frac{1}{j\omega(C_{gs} + C_{gd})}\right)} = j\omega(C_{gs} + C_{gd}) \cdot V_{gs} \quad \text{II.14}$$

$$i_d = g_m \cdot V_{gs} \quad \text{II.15}$$

Le gain en court-circuit s'exprime par:

$$A_i = \frac{i_d}{i_g} = \frac{g_m \cdot V_{gs}}{j\omega(C_{gs} + C_{gd}) \cdot V_{gs}} = \frac{g_m}{j\omega(C_{gs} + C_{gd})} \quad \text{II.16}$$

La fréquence de coupure intrinsèque est obtenue lorsque le module de gain en courant est égal à l'unité soit  $|A_i|=1$ , ce qui permet d'écrire:

$$|A_i| = \frac{g_m}{2\pi f(C_{gs} + C_{gd})} \quad \text{II.17}$$

par conséquent:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi f(C_{gs} + C_{gd})} \quad \text{II.18}$$

$g_m$  : transconductance du dispositif

$C_{gs}$  : capacité grille-source

$C_{gd}$  : Capacité grille-drain

On remarque que cette fréquence dépend étroitement de la capacité totale de grille ainsi que la transconductance, par conséquent l'obtention d'une fréquence de coupure plus importante peut se faire en réduisant la capacité totale de la grille ou par l'augmentation de la transconductance.

### V.3.8. La Fréquence maximale d'oscillation

La fréquence maximale d'oscillation  $f_{max}$  est une seconde fréquence importante dans le fonctionnement des HEMT en RF . La fréquence maximale d'oscillation  $f_{max}$  est la fréquence pour laquelle le dispositif à un gain en puissance unilatéral unitaire . C'est-à-dire, lorsque le produit des gains en tension et en courant du dispositif est égal à 1.

La fréquence de coupure du gain en courant sert principalement à mesurer les performances du dispositif physique, cependant une mesure plus pratique de la performance à haute fréquence est la fréquence de coupure du gain en puissance. en effet, celle-ci est déterminée non seulement par le système de matériau, mais également par les paramètres de conception de la technologie et des dispositifs[56]. La fréquence maximale d'un transistor HEMT est donnée par :

$$f_{max} = \frac{f_t}{\sqrt{4g_{ds}R_i}} \quad \text{II.19}$$

Où:  $g_{ds}$  est la conductance de sortie, et  $R_i$  la résistance d'entrée du dispositif intrinsèque [56].

## IV. Effets limitatifs et indésirables dans les HEMTs

Nous présentons dans cette partie, les effets indésirables et limitatifs inhérents aux HEMTs et qui influent sur les caractéristiques statiques de ces dispositifs réduisant de manière significative leur performances hyperfréquences .

### IV.1.L'ionisation par impact

Lorsque la tension de polarisation  $V_{DS}$  augmente, le champ électrique correspondant dans le canal devient intense côté drain. Sous l'effet de ce fort champ électrique, les électrons sont accélérés et entrent en collision avec les atomes du réseau. Ces atomes ionisés créent des paires électrons / trous. Les électrons s'ajoutent alors au courant du drain alors que les trous sont collectés en partie par la grille. Pour des tensions de polarisations  $V_{DS}$  importantes les électrons issus de l'ionisation sont accélérés à leur tour ionisant d'autres atomes et entraînant un phénomène d'avalanche. Ce processus s'accompagne d'une faible augmentation du courant  $I_{DS}$  et de la création d'un courant de trous collectés par la grille, qui se superposera au courant de fuite de grille. L'ionisation par impact est en partie responsable de l'effet « kink » dans les HEMTs.

### IV.2 L'effet « kink »

L'effet Kink est une déformation spécifique de la caractéristique  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  en régime de saturation causé par les phénomènes d'ionisation par impact. Il se traduit de deux manières : une saturation anormale de  $I_{DS}$  à faible  $V_{DS}$ , et une augmentation rapide de la conductance de sortie  $g_d$  à fort  $V_{DS}$ . L'effet kink est lié aux trous générés par l'ionisation des atomes qui s'accumulent dans le canal. Leur accumulation côté source induit l'ouverture du canal et par conséquent entraînant l'augmentation du courant de drain. L'effet Kink est un facteur limitatif difficile à contrôler ayant pour conséquence la diminution du gain et la génération d'un fort bruit en basses et hautes fréquences.

### IV.3 Les effets de canaux courts

Les effets canaux courts font leur apparition pour les faibles longueurs de grille limitant les performances en terme de fréquence des HEMTs. Ainsi donc la miniaturisation, indispensable au fonctionnement à hautes fréquences, s'accompagne d'une augmentation des effets de canal court, qui dégradent fortement les performances du HEMT. La raison principale pour laquelle la réduction de la longueur de grille agit sur le fonctionnement du transistor repose sur la théorie du transport électronique dans le canal du HEMT.

Pour des tensions de polarisation  $V_{DS}$  importante, le champ électrique qui en découle accélère les électrons le long du canal. Lorsque l'équilibre est atteint entre cette accélération et le freinage dû aux collisions des électrons avec les atomes du réseau, le régime qui s'établira lorsque la distance parcourue par les électrons est très grande devant le libre parcours moyen

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

---

des électrons est dit stationnaire. Cependant, pour de petites longueur de grille, les électrons sont brusquement soumis à un champ électrique très important alors qu'aucune collision n'a encore eu lieu le transport des électrons est alors balistique. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces effets transitoires, où les électrons peuvent atteindre des vitesses bien plus importantes que celles d'un régime stationnaire c'est le phénomène de survitesse.

Lors du passage sous la grille, les électrons sous la grille sont en fait soumis à un fort champ électrique, et leur vitesse augmente très vite. la vitesse atteint alors sa valeur maximale mise en évidence par le pic représentatif de la survitesse, puis cette vitesse en bout de grille. La valeur de ce pic de survitesse est supérieure au maximum de vitesse obtenu en régime stationnaire. Ce phénomène permet la réduction du temps de transit des électrons sous la grille et donc d'augmenter la fréquence de coupure. Par ailleurs, le champ électrique important induit en bout de grille (côté drain) des HEMTs à grilles ultra courte ,cause une fuite des charges par la couche tampon et/ou par le plan de dopage.

En résumé les effets canaux courts se manifestent par une survitesse c'est-à-dire une augmentation de la vitesse des électrons, une dégradation du contrôle de la grille sur le canal, la réduction de la tension de seuil et la fuite des électrons chauds par la couche tampon. Différentes études ont pu montré qu'un facteur d'aspect supérieur à 5 permettait de réduire les effets canaux courts. Les effets de canal court se traduisent par une augmentation de la conductance de sortie en régime saturé. L'augmentation du rapport d'aspect améliore le contrôle des électrons du canal par la grille et réduit la variation de tension de seuil quand la longueur de grille qui diminue .

### **IV.4 Abaissement de barrière de potentiel induit par le drain (DIBL) :**

L'influence du potentiel de drain sur le canal du transistor peut avoir une influence sur les performances de dispositifs sub-micrométriques . L'effet DIBL (Drain Induced Barrier Lowering) correspond à l'abaissement de la barrière de potentiel dans la zone de charge d'espace coté drain sous effet de la forte polarisation du drain . La grille va donc perdre le contrôle de la barrière de potentiel pour une partie du canal situé coté drain. Par conséquent, une portion importante d'électrons vont franchir la barrière donnant naissance à un courant de fuite. Autrement dit, en régime de faible inversion, il existe une barrière de potentiel entre la source et le canal de conduction. La hauteur de cette barrière est le résultat de l'équilibre entre le courant de dérive et le courant de diffusion entre ces deux régions. Si une tension de

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

drain  $V_{ds}$  élevée est appliquée, la hauteur de cette barrière peut diminuer, conduisant à une augmentation de courant de drain . Ainsi, ce courant est commandé non seulement par la tension de grille mais aussi par la tension de drain .La tension de pincement diminue quand la tension de drain augmente.

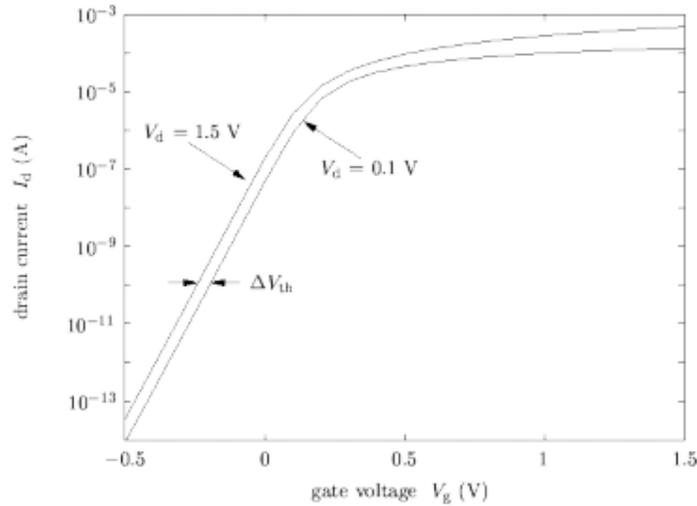


Figure II.18 DIBL(Drain-Induced Barrier Lowering)

On voit clairement l'effet DIBL sur la caractéristique  $I_{ds}-V_{gs}$ . L'effet DIBL est mis en évidence par le décalage latéral des courbes de transfert dans le régime sous le, il est exprimé :

$$DIBL (mV/V) = \frac{\Delta V_{TH}}{\Delta V_{ds}} \quad \text{II.20}$$

### IV.5 .Phénomènes de piège

Généralement ce phénomène consiste en la capture d'électrons par les défauts présents dans la structure cristalline d'un semi-conducteur, correspondant à un niveau énergétique dans la bande interdite  $E_g$ . Ainsi, les électrons capturés réduisent la densité de porteurs dans le canal de conduction, limitant directement le courant de drain  $I_{DS}$ . Ce phénomène influence aussitôt les performances du dispositif s'accompagnant de la saturation de la puissance de sortie du composant et d'une diminution du rendement (PAE).

On distingue ainsi deux types de pièges :

- les donneurs : Un piège de type donneur peut être soit positif soit neutre, signifiant la possibilité de capture ou d'émission d'électron.
- les accepteurs : Un piège de type accepteur peut être soit négatif soit neutre, signifiant la possibilité d'émission ou de capture d'électron.

### IV.6 Effets d'auto-échauffement et d'électrons chauds

Un fort courant qui circule dans le canal du transistor a pour effet la création d'effets thermiques importants liés à l'augmentation des collisions entre les électrons libres et le réseau cristallin, la mobilité des électrons alors diminue menant à la diminution du courant de drain  $I_{DS}$  quand la structure est polarisée de manière prolongée. Les conséquences sur les performances RF sont importantes : réduction de la transconductance ou encore de la puissance de sortie figure II.19 [57].

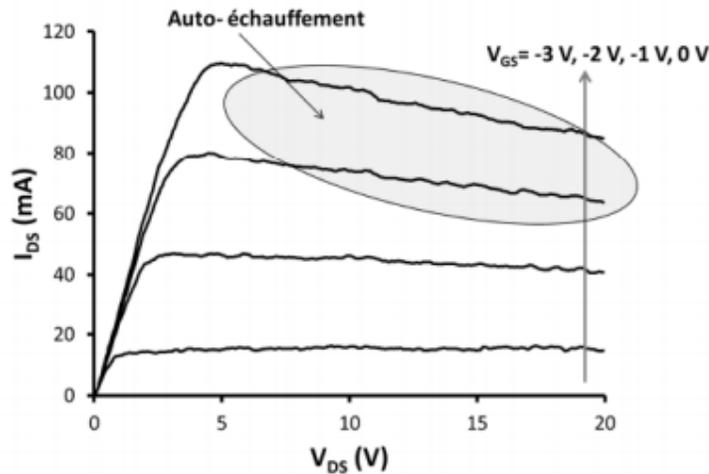


Figure II.19. Caractéristique de sortie avec l'effet de l'Auto-échauffement.

Les effets de l'Auto-échauffement ne se limitent pas à la réduction du courant  $I_{DS}$ . Des phénomènes plus complexes peuvent être mis en évidence tels que l'effet de l'activation d'un canal parasite qui se caractérise par une augmentation abrupte du courant  $I_{DS}$  à une certaine tension proche de la tension de coude tel qu'illustré sur Figure II-19 conduisant à l'augmentation de la conductance de sortie. Il n'y a pas de théorie collective qui explique ce

## CHAPITRE II : LES TRANSISTORS A HAUTE MOBILITE ELECTRONIQUE

---

phénomène. Concernant les HEMTs InGaAs/InAlAs, certains attribuent l'auto-échauffement à l'accumulation de trous sous l'effet d'ionisation [58].

### **IIV. Conclusion**

Les HEMT sont des dispositifs utilisés dans les applications nécessitant la particularité d'avoir une haute mobilité électronique.

Ainsi, nous avons pu dans ce chapitre présenter les différents transistors à effet de champs tels que les JFET, MESFET, MOSFET et HEMTS ainsi que leurs structures, leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques. Nous nous sommes particulièrement intéressé aux HEMT objet de notre étude. Nous avons alors expliqué la notion de confinement et de gaz bidimensionnel, notion permettant d'expliquer le principe de fonctionnement des HEMTs. En outre, les principaux problèmes de dégradation des performances et fiabilité des dispositifs HEMT, tels que l'effet des canaux courts, l'effet Kink, le DIBL et l'ionisation par impact ont été abordés. Le chapitre suivant sera consacré aux résultats de la simulation de notre propre structure HEMT à base de matériaux III.V.

***Chapitre III:***  
***Résultats et discussions***

### III.1 Introduction

Dans ce travail, l'étude des performances d'un transistor à haute mobilité électronique HEMT (InAlAs/InGaAs/InP) a été réalisée par le biais du simulateur de dispositifs et de process SILVACO -TCAD.

Dans ce chapitre nous commençons alors par une brève présentation du logiciel SILVACO, suite à quoi nous présenterons les différents résultats de simulation que nous avons obtenus par le simulateur SILVACO TCAD permettant de présenter les performances du HEMT étudié en mode DC et AC. Dans ce travail nous avons pu alors examiner l'effet de la variation de certains paramètres de notre dispositifs sur ses caractéristique en mode DC, et AC. Nous avons aussi examiné l'importance de la fraction molaire des matériau du canal (InGaAs) sur ses caractéristiques électriques.

### III.2 Présentation de TCAD-SILVACO

Silvaco (SiliconValley Corporation) est une société Américaine, situé à Santa Clara en Californie. Cette société fournit des logiciels de simulation permettant de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches et dans l'industrie de la microélectronique. La société a été créé en 1984 par le Dr. Ivan Pesic.

L'avantage majeur de ce type de simulateurs est sa possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles par le simulateur de process Athéna et de dispositif Atlas. [59]:

- Atlas permet la simulation électrique des dispositifs .
- Athéna permet la simulation des différentes étapes technologiques

SILVACO T-CAD que nous avons utilisé pour nos simulations SILVACO-TCAD, outil assisté par ordinateur va donc nous permettre de simuler le comportement électrique de notre HEMT en tenant compte de la structure soit de la géométrie , du dopage, des matériaux, ....

Ce logiciel va permettre de comprendre tous les mécanismes physiques qui régissent le fonctionnement de notre transistor. Il va résoudre de façon auto-cohérente les équations de continuité et de Poisson en tout point de la structure simulée.

Les équations des différents modèles physiques pris en compte seront résolues en fonction des paramètres des matériaux introduits.

### III.2.1 Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO

#### III.2.1.1 Équations de bases de la physique des semi-conducteurs

Le simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique [60].

##### ❖ L'équation de Poisson

L'équation de Poisson est une équation différentielle partielle bien connue qui a des fonctions en électrostatique et en physique théorique. Dans la modélisation des semi-conducteurs, elle sert souvent de point de départ pour obtenir des solutions quantitatives aux variables électrostatiques [61]. En électrostatique, l'équation de Poisson relie le potentiel électrostatique à la densité volumique de charges électriques et est donnée par [62]:

$$\text{div}(\nabla\Psi) = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad \text{III .1}$$

où :  $\Psi$  est le potentiel électrostatique,  $\varepsilon$  est la permittivité électrique du milieu, et  $\rho$  est la densité volumique de charges électriques .

La densité volumique de charges électriques est fonction de toutes les charges mobiles et fixes, y compris les électrons, les trous et les impuretés. Le champ électrique est obtenu à partir du gradient du potentiel et est donné par [62]:

$$\vec{E} = -\nabla\Psi \quad \text{III .2}$$

##### ❖ les équations de continuité :

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont données par les équations suivantes :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad \text{III .3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad \text{III .4}$$

Où:

$n$  et  $p$  sont la concentration des électrons et en trous. ,

$j_n$  et  $j_p$  sont les densités de courant d'électrons et de trous.

$G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération d'électrons et de trous.

$R_n$  et  $R_p$  sont les taux de recombinaison pour les électrons et les trous.

$q$  est la charge de l' électron.

#### ❖ Equation de transport

La probabilité pour qu'un état d'énergie  $E$  soit occupé par un électron à une température  $T$  donné est donnée par la fonction de Fermi-Dirac  $f(E)$  qui s'exprime par:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad \text{III.5}$$

Où :  $E_F$  est une énergie de référence spatialement indépendante et connue sous le nom de niveau de Fermi et  $k$  est la constante de Boltzmann. Si  $E - E_F \gg kT$ , l'équation précédant devient :

$$f(E) = \exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right) \quad \text{III .6}$$

Rappelons que le niveau de Fermi noté  $E_F$  correspond à l'énergie pour laquelle la probabilité d'occupation pour un état est égale à 1/2 quelle que soit la température.

Les équations de densité de courant connues sous le nom de modèles de transport de charge sont obtenues en simplifiant l'équation de transport de Boltzmann.

Ces hypothèses peuvent donner lieu à différents modèles de transport, tels que le modèle de dérive-diffusion, ou le modèle hydrodynamique [62].

Le choix du modèle de transport de charge a une influence importante sur le choix du modèle de génération et de recombinaison. Le modèle de transport appelé dérive diffusion a été utilisé dans le développement de ce modèle. Ainsi, la forme conventionnelle de l'équation dérive-diffusion permettant d'exprimer les courant des électrons et trous est donnée par:

$$\vec{J}_n = qn u_n \vec{E}_n + qD_n \nabla_n \quad \text{III .7}$$

$$\vec{J}_p = qn\mu_p\vec{E}_p + qD_p\nabla_p \quad \text{III .8}$$

Où:  $D_n$  et  $D_p$ , constantes de diffusions dans le cas de la statistique de Boltzmann, la relation d'Einstein permet d'exprimer  $D_n$  et  $D_p$  par:

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad \text{III .9}$$

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad \text{III .10}$$

où  $\mu_n$  est la mobilité des électrons et  $\mu_p$  la mobilité des trous,  $T$  la température en degré Kelvin  $K$  la constante de Boltzmann,  $q$  la charge élémentaire.

### III.2.1.2Présentation de l'outil ATLAS

Dans allons dans cette partie présenter l'outil atlas SILVACO que nous avons utilisé dans nos simulations. ATLAS-SILVACO est un simulateur de semi-conducteurs largement utilisé dans le monde universitaire et l'industrie. Silvaco International est une société de logiciels qui offre des programmes pour la modélisation dans différents domaines de l'électronique. Les entreprises qui utilisent ATLAS sont très nombreuses .SILVACO-TCAD (SiliconValley CorporationTechnology Computer Aided Design) est un logiciel qui permet de concevoir, modéliser et simuler les performances des dispositifs à semi-conducteur, avant de fabriquer des prototypes d'essais. SILVACO est très utile dans les projets de recherche-développement car il permet d'optimiser le temps des essais mais aussi réduit le coût de conception et de fabrication des dispositifs électroniques. Atlas Silvaco a permis en ce qui nous concerne à simuler le comportement électrique du composant électronique étudié à savoir un HEMT à base de matériau III.V .

Le logiciel SILVACO- TCAD permet l'utilisation de différents modèles physiques usant de méthodes et d' algorithmes numériques efficaces, menant à des solutions linéaires d'optimisation, et des résultats de simulation qui se rapprochent le plus possible de ceux obtenus pratiquement. L'avantage de ce type de simulateur est qu'il permet de visualiser numériquement des phénomènes physiques difficilement réalisables pratiquement et de comprendre par le biais de la simulation et de faconde pédagogique les procédés de fabrication

des dispositifs semi-conducteur .Ainsi SILVACO TCAD comprends différents modules, parmi lesquels on cite alors:

- ❖ ATHENA qui permet la simulation des étapes de fabrication technologique .
- ❖ ATLAS qui permet la simulation des caractéristiques électriques des dispositifs

Dans notre étude, les simulations sont effectuées par le module ATLAS. Le logiciel ATLAS-SILVACO est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs qui est basé sur les principes physiques à 2D ou 3D, ce qui permet la détermination des caractéristiques électriques qui sont associés aux structures physiques spécifiées et aussi aux conditions de polarisation. Ceci est obtenu en rapprochant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille à 2D ou 3D, comprenant un certain nombre de points de grille nommés des noeuds. Ce logiciel permet donc de résoudre les équations de continuité et de Poisson en chaque noeud de la structure étudiée. Les équations des différents modèles physiques sont résolues en s'appuyant sur les paramètres des matériaux

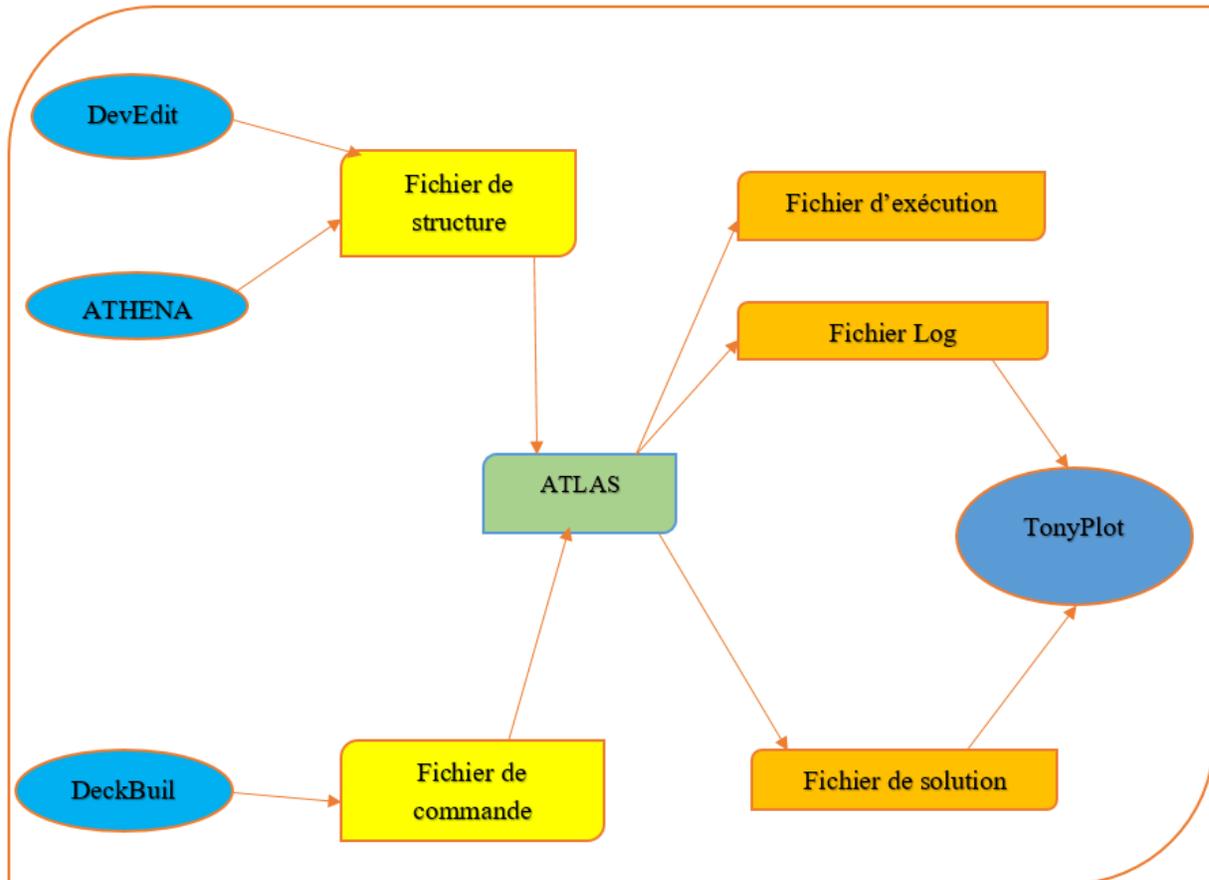
### **Atlas utilise deux types de fichiers d'entrée**

- ❖ Un fichier texte contenant des commandes Atlas.
- ❖ Un fichier de structure qui définit la structure à simuler.

### **Atlas produit trois types de fichiers de sortie**

- ❖ La sortie d'exécution qui donne des messages d'erreur et d'avertissement au cours de la simulation.
- ❖ Le fichier journal qui stocke les tensions et les courants de l'analyse dispositif.
- ❖ Le fichier de structure qui stocke les données 2D et 3D relatives aux valeurs des variables de la solution.

La figure 3.1 donne les différents fichiers d'entrée et de sortie de l'outil ATLAS.



**Figure III.1 : Fichiers d'entrée et de sortie d'ATLAS [63].**

- **DevEdit**: est un éditeur de structure 2D, 3D et de maillage.
- **ATHENA**: permet de simuler les procédés technologiques et les différentes étapes nécessaires à effectuer lors de l'élaboration du dispositif.
- **DeckBuild**: il fournit un environnement d'exécution interactif. Il joue rôle d'une interface avec les différents outils de simulation.
- **ATLAS**: est un simulateur 2D et 3D des dispositifs SC qui permet de prédire le comportement électrique des structures spécifiées donnant un aperçu des mécanismes physiques internes associés au fonctionnement du dispositif.
- **TonyPlot** : est un outil qui permet la visualisation des résultats de la simulation.
- **Fichier d'exécution** : ce fichier permet de suivre les progressions, les erreurs et les avertissements lors de la simulation. Pour activer ce fichier il faut introduire la commande PRINT dans « MODELS ».

- **Fichier Log** permet de stocker les caractéristiques calculées par ATLAS. Ce sont le courant et la tension pour chaque électrode dans les simulations DC. Dans les simulations transitoires, l'heure est stockée. Dans les simulations AC, la fréquence du signal, les conductances et les capacités sont enregistrées.
- **Fichier de solution (ou fichier de structure)** permet de fournir des données relatives aux valeurs des variables de solution à une condition de polarisation donnée (solution à courant continu ou point de solution transitoire).

### III.2.1.3. Ordre des commandes ATLAS

L'ordre dans lequel les instructions apparaissent dans le fichier d'entrée ATLAS est important. La logique de programmation ATLAS contient cinq groupes de commandes qui doivent être organisés dans un ordre déterminé autrement on reçoit un message d'erreur entraînant un arrêt incorrect du programme.

La figure 3.2 représente l'ordre des commandes de la logique de programmation d'ATLAS [63].

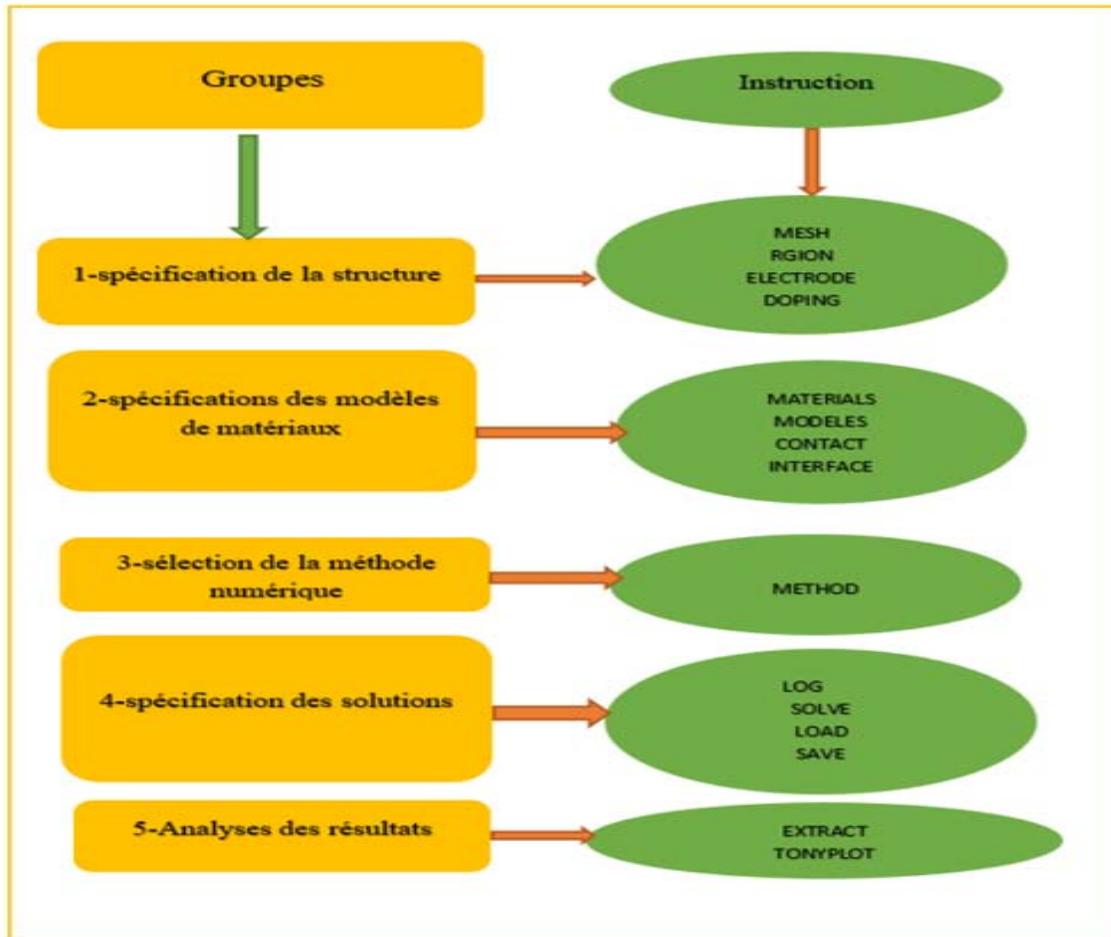


Figure III.2 : Ordre des groupes de commandes d'ATLAS avec leurs instructions [63].

Les instructions fondamentales de chaque groupe sont les suivants [63] :

- ❖ **MESH** : produit un maillage dans la structure simulée.
- ❖ **REGION** : définit l'endroit des matériaux et leurs limites géométriques.
- ❖ **ELECTRODE** définit l'endroit et les noms des électrodes.
- ❖ **DOPING** indique le profile de dopage dans chaque région ou matériau.
- ❖ **MATERIAL** permet la spécification des propriétés de matériaux des régions définies.
- ❖ **MODEL** indique les mécanismes physiques à étudier lors de la simulation.
- ❖ **CONTACT** pour indiquer des attributs physiques des électrodes.
- ❖ **INTERFACE** est utilisée lorsque la structure contient un matériau isolant. Elle permet l'indication des paramètres d'interface semi-conducteur/isolant.

- ❖ **METHOD** pour spécifier la méthode numérique à utiliser pour résoudre les équations et les paramètres liés à ses algorithmes lors de la simulation.
- ❖ **LOG** pour sauvegarder les résultats finaux dans un fichier. (log : signifie le type du fichier et LOG : la commande dans le programme).
- ❖ **SOLVE** permet l'exécution d'une solution pour des points de polarisation donnés.
- ❖ **LOAD** charge la solution enregistrée uniquement dans ATLAS ou charge les solutions précédentes des fichiers en tant que suppositions initiales vers d'autres points de polarisation. Le maillage, les électrodes, le dopage, les régions, les paramètres de contact, les paramètres de matériau, les modèles et les méthodes numériques doivent être spécifiés avant toute instruction LOAD.
- ❖ **SAVE** permet d'enregistrer les résultats de la simulation dans des fichiers de sortie.
- ❖ **EXTRACT** les extractions peuvent être effectuées une fois que la simulation est terminée.
- ❖ **TONYPLOT** : cette instruction lance le programme TonyPlot pour visualiser les résultats de simulation obtenus.

### III.2.1.4. les Modèles physiques

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories et sont spécifiés à l'aide des instructions MODELS et IMPACT. Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. On donne ici quelques modèles habituellement utilisés [63]

- ❖ Mobilité
- ❖ Recombinaison
- ❖ Statistiques des porteurs
- ❖ Ionisation par impact
- ❖ Effet tunnel.

### III.2.1.5. Méthodes numériques

Pour calculer les solutions aux problèmes de dispositifs à semi-conducteurs différentes méthodes numériques peuvent être utilisées, elles sont données dans les instructions METHOD du fichier d'entrée. Dans ce cas, ATLAS doit résoudre jusqu'à six équations différentes selon les combinaisons de modèles. Il existe principalement trois types de techniques de solution:

- découplé (GUMMEL),
- totalement couplé (NEWTON)
- BLOCK.

### III.3. Résultats de simulation

Après avoir présenté le logiciel de simulation que nous avons utilisé afin de déterminer les performances du dispositif HEMT étudié, nous allons dans le reste de ce chapitre présenter les résultats de simulation que nous avons obtenus permettant de déterminer les performances du HEMT étudié.

#### III.3.1. Structure HEMT simulée

Dans ce travail, nous avons étudié un transistor à haute mobilité électronique (HEMT) à base de matériaux III-V soit l'  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{InP}$ . Nous présentons au niveau de la figure III.3 suivante ce dispositif où toutes ses grandeurs géométriques de sont indiquées .

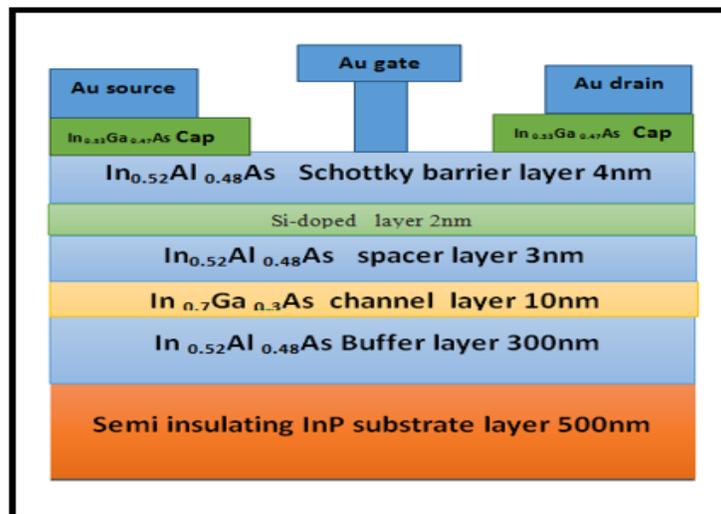


Figure III.3. Coupe schématique du HEMT étudié.

Nous regroupons dans le tableau 3.1, les différents paramètres utilisés pour la simulation de notre HEMT  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{InP}$ .

Les couches	Matériaux	$E_g$ (eV)	Epaisseur (nm)	Dopage(atoms/cm <sup>3</sup> )
Couche schottky	In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	1.48	4	n.i.d
Couche Donneuse	In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	1.48	2	3e <sup>19</sup>
Couche Espaceur	In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	1.48	3	n.i.d
canal	In <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> As	0.75	10	n.i.d
Couche Tampon	In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As	1.48	300	n.i.d
Substrat	InP	1.35	500	n.i.d

Tableau III.1 : Paramètres physiques et géométriques de l' In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/In<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As/InP HEMT simulé.

### III.3.2 Structure étudiée en 3D et maillage

Les figures III.4,III.5 et III.6 représentent respectivement la structure étudiée ainsi que le maillage de cette structure.

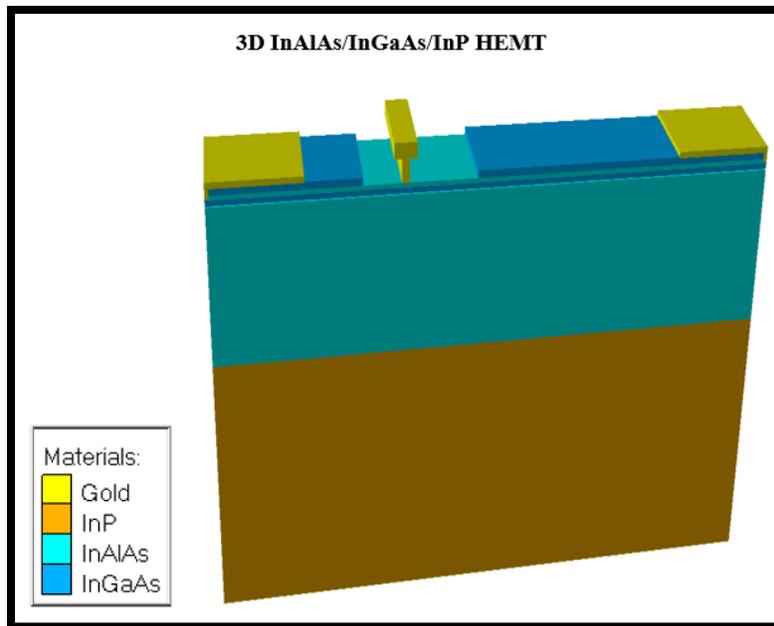


Figure III.4. Structure simulée du transistor HEMT en 3D.

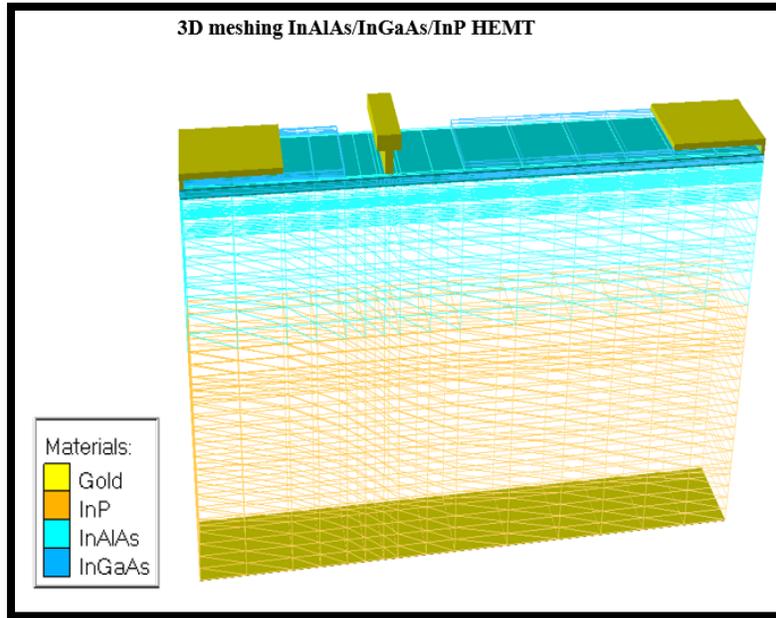


Figure III.5. Maillage de la structure en 3D.

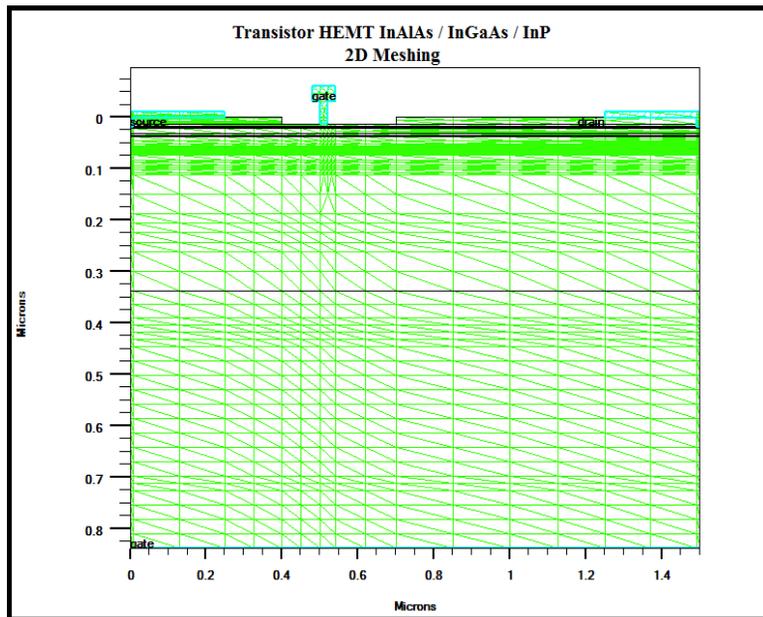


Figure III.6. Maillage de la structure en 2D.

On remarque que le maillage est fin dans la couche donneuse, dans le canal, et sous les électrodes permettant la précision des résultats obtenus.

Le profil de dopage de la structure étudiée est donné en figure III.7.

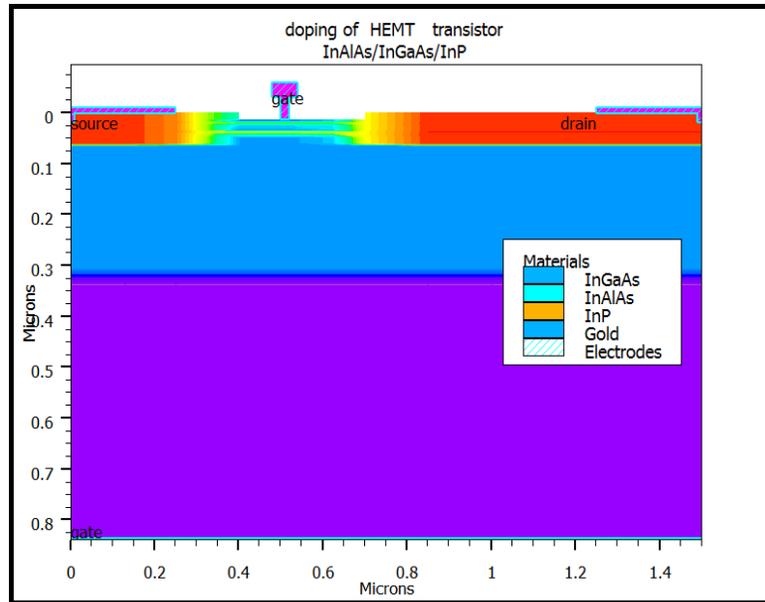


Figure III.7. Doping au niveau des différentes couches du HEMT étudié.

#### III.3.3. Diagramme de bande d'énergie et paramètres internes

Le diagramme de bande d'énergie de la structure simulée est représenté en figure III.8. Les énergies de bande de conduction et de valence sont représentées en fonction de la profondeur. La mobilité des électrons, le champ électrique suivant l'axe X et Y sont illustrées respectivement par les figure III.9, III.10 et III.11.

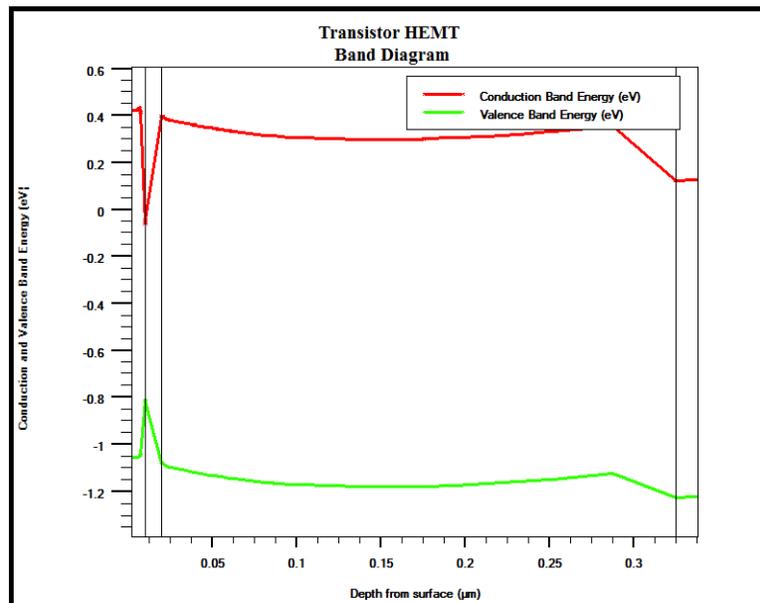


Figure III.8. Diagramme de bande d'énergie.

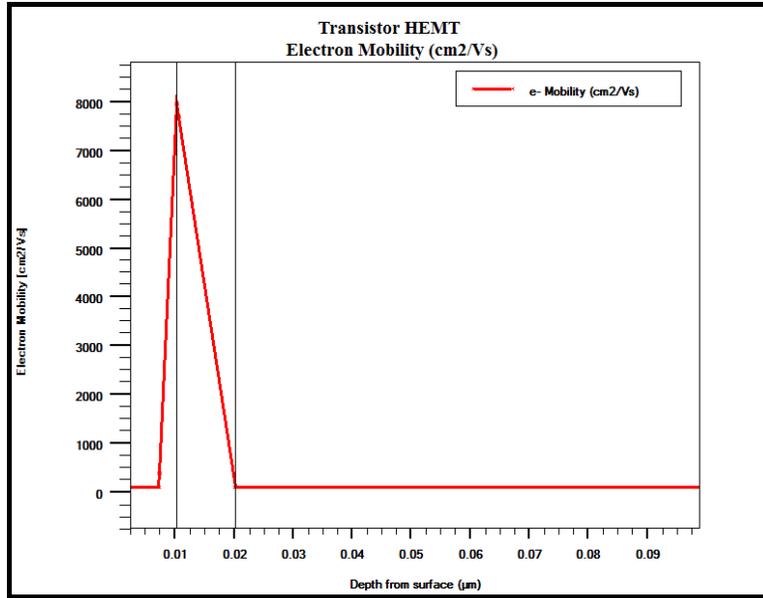


Figure III.9. La mobilité des électrons.

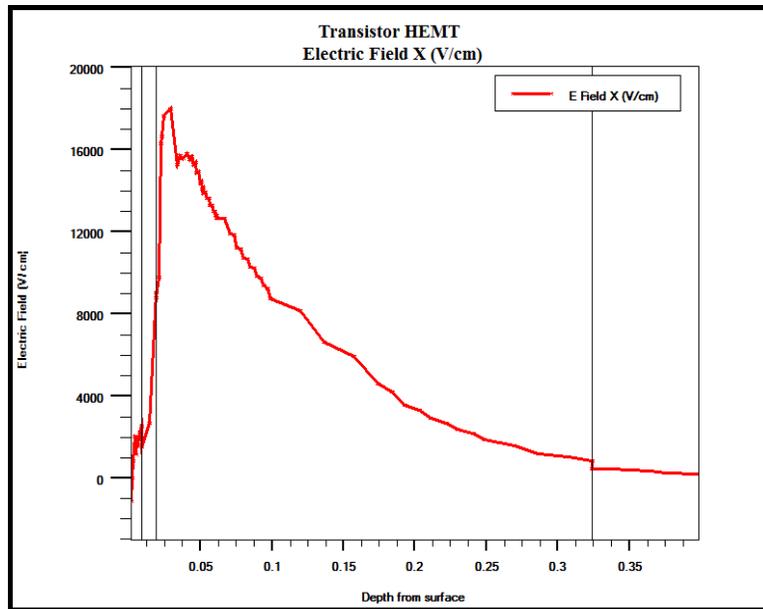
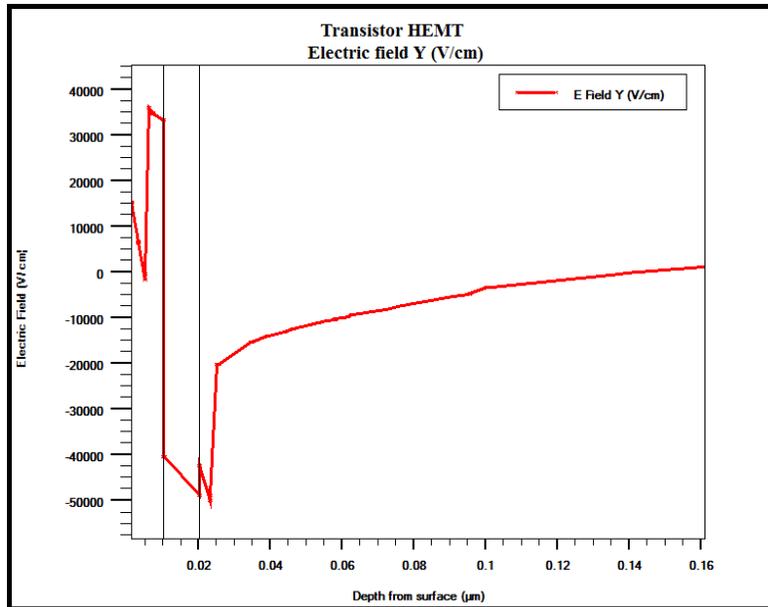


Figure III.10. Champ électrique suivant l'axe x.



**Figure III.11. Champ électrique interne suivant l'axe y.**

A l'interface de la couche active et la couche barrière on remarque que la mobilité des électrons est de l'ordre de  $8000\text{cm}^2/\text{Vs}$ . Le champ électrique interne du dispositif est de l'ordre de  $18000\text{ V/cm}$  suivant l'axe X avec un pic de champ électrique interne suivant l'axe Y est de l'ordre  $35000\text{ V/cm}$ .

### III.3.4. Caractéristiques électriques du HEMT InAlAs/InAs sur substrat InP étudié

#### III.3.4.1. Caractéristique de sortie

En figure III.12 on représente la caractéristique de sortie de la structure simulée qui est l'évolution du courant de sortie drain-source  $I_{ds}$  en fonction de la tension drain-source  $V_{ds}$  pour différentes valeurs de la tension grille-source  $V_{gs}$ . Durant la simulation de cette caractéristique nous avons varié la tension grille-source de commande de  $0.0\text{V}$  à  $-1.2\text{V}$  et la tension Drain –Source de  $0.0\text{V}$  à  $7.0\text{V}$ .

Les paramètres physiques et géométriques du HEMT étudié avec une longueur de grille de  $20\text{nm}$  sont donnés au tableau III.2.

	Cap layer	Couche schottky	Couche donneuse	Couche espaceur	Couche canal	Couche tampon
Epaisseur (nm)	20	4	2	3	10	300
Concentration des dopants atomes/cm <sup>3</sup>	$1 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{16}$

Tableau III.2 : Paramètres géométriques du  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{InP}$  HEMT.

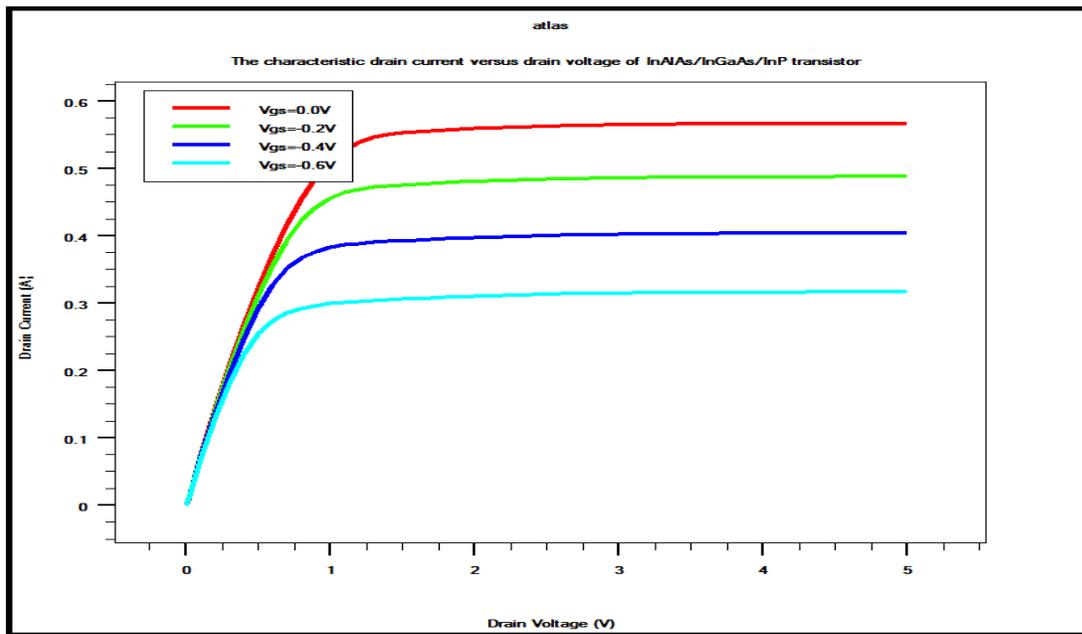


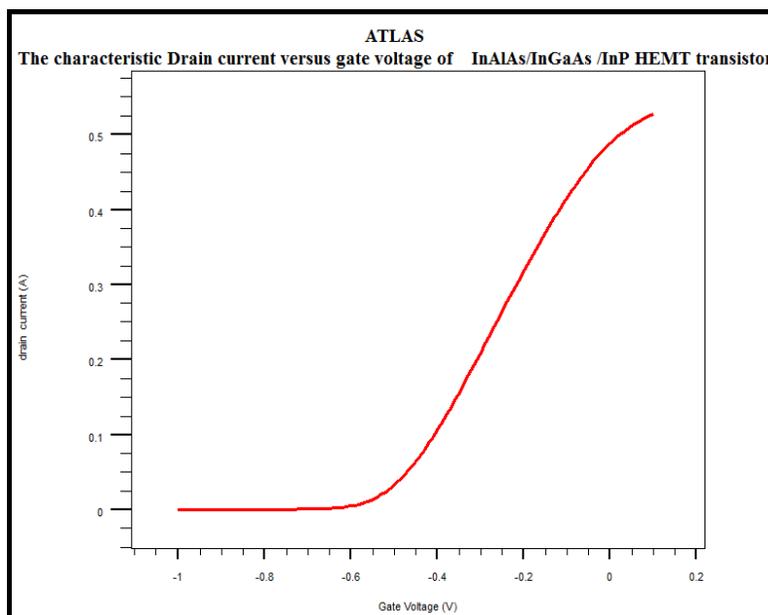
Figure III.12. Caractéristique  $I_{DS}-V_{DS}$  pour le transistor HEMT InAlAs / InGaAs / InP étudié.

A partir de la caractéristique de sortie, on remarque que ce dispositif offre un courant drain-source ( $I_{ds}$ ) de l'ordre de 550 mA pour une tension de commande ( $V_{gs}$ ) de 0.0V. On remarque aussi que lorsque la tension de commande  $V_{gs}$  diminue le courant de sortie ( $I_{ds}$ ) diminue aussi car la densité de charge dans le canal diminue à cause du déplacement du niveau

de fermi vers le bas par rapport aux énergies dans le canal. Pour une tension de commande grille-source ( $V_{gs}$ ) inférieure à la tension de seuil ( $V_{th}$ ) du dispositif le courant de sortie ( $I_{ds}$ ) devient nul.

### III.3.4.2 Caractéristique de transfert

En figure III.13 est représentée la caractéristique de transfert du dispositif, elle représente l'évolution du courant drain-source ( $I_{ds}$ ) en fonction de la tension grille-source ( $V_{gs}$ ) pour une tension drain-source ( $V_{ds}$ ) de 2.0V.



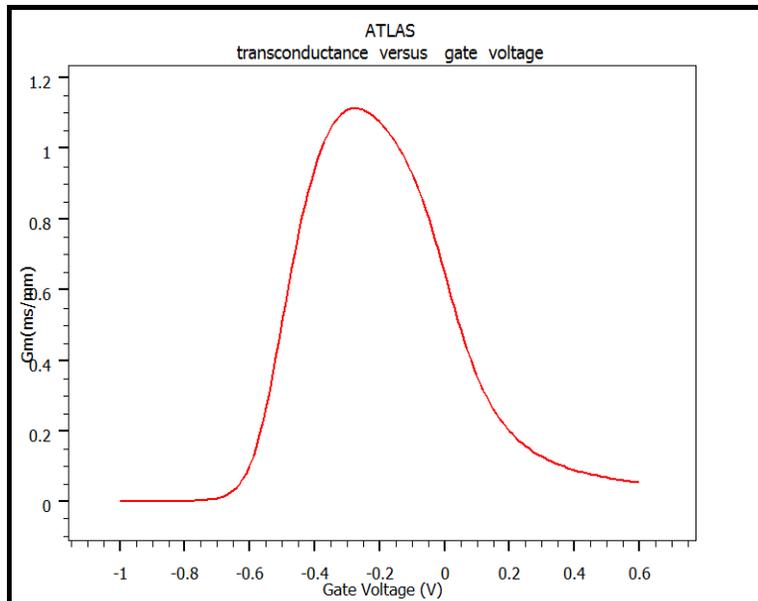
**Figure III.13. Courant de drain en fonction de la tension source-grille pour un transistor InAlAs / InGaAs / InP HEMT étudié.**

A partir de cette caractéristique on a pu déterminer la tension de seuil du dispositif étudié. Le dispositif présente une tension de seuil de -0.6 V pour une tension drain-source  $V_{ds}$  de 2.0 V.

### III.3.4.3. Transconductance

La figure III.14 permet de représenter la transconductance en fonction de la tension grille-source. La transconductance indique la variation du courant drain-source par rapport à la variation de la tension grille-source pour une tension drain-source fixe. Cette caractéristique est

simulée pour une structure HEMT  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{InP}$  de longueur de grille est de 20 nm.



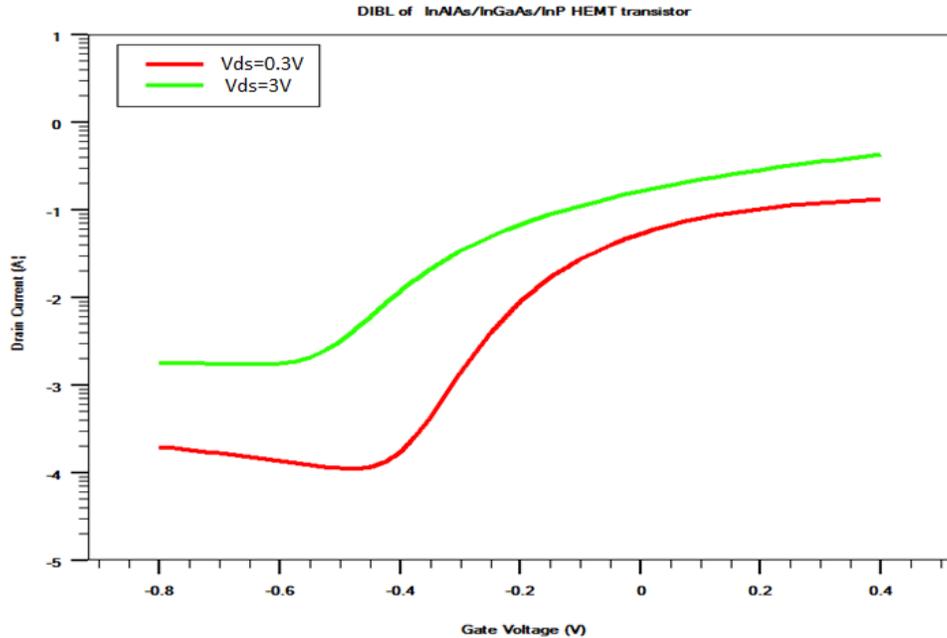
**Figure III.14. Transconductance.**

Le dispositif étudié est caractérisé par une transconductance de l'ordre 1130 mS/mm à  $V_{gs} = -0.3$  V et une tension drain-source de 2.0V.

### III.3.4.4 Abaissement de barrière induit par drain (DIBL)

La qualité du dispositif peut être indiquée par certains paramètres tels que l'abaissement de barrière induit par le drain (DIBL: drain-induced barrier lowering) et la pente sous seuil (SS : Sub-threshold voltage). La valeur du DIBL est calculée par le rapport entre la variation de la tension de seuil et la variation de la tension drain-source.

En figure III.15, on représente l'évolution du courant drain-source en fonction de la tension grille-source à  $V_{ds} = 0.3$  V et 3.0 V.



**Figure III.15. Evolution du courant drain-source en fonction de la tension grille-source à  $V_{ds} = 0.3V$  et  $3.0 V$ .**

Nos deux caractéristiques  $I_{DS}-V_{GS}$  ont été obtenus pour les tensions de polarisation de  $0.3V$  et  $3V$  successivement. Les tensions de seuils obtenues sont respectivement de  $-0.48 V$  et  $-0.87 V$ . Le DIBL obtenu est de l'ordre de  **$134.4mV/V$** .

En figure III.16, on représente les courants  $I_{on}$  et  $I_{off}$ . Cette caractéristique représente le courant drain-source tracé avec une échelle logarithmique en fonction de la tension grille-source pour tension de drain-source  $V_{ds}=2.0V$ .

Le dispositif simulé offre un rapport  $I_{on}/I_{off}$  d'environ  $5 \times 10^4$ , ce rapport est important car il donne des informations sur la qualité du composant et sa consommation.

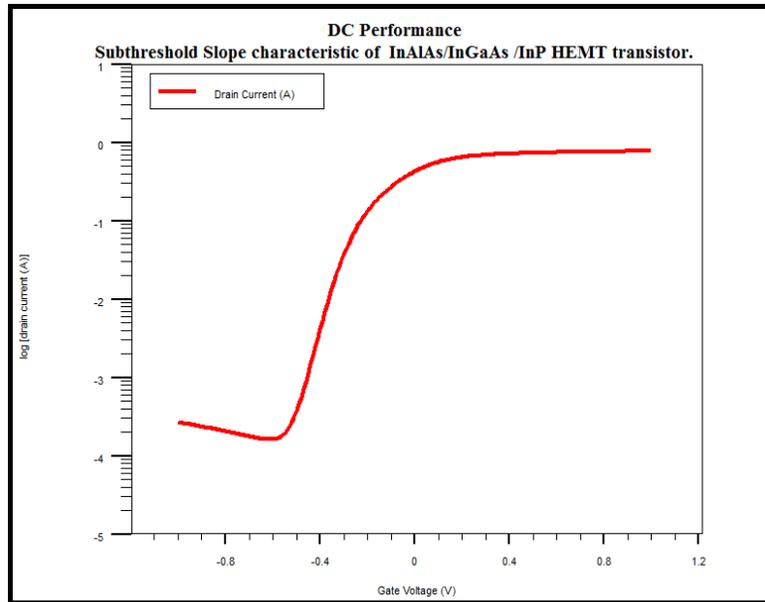


Figure.III.16. Courants Ion et Ioff.

### III.3.4.5. Les caractéristiques fréquentielles et paramètres S

Les transistors HEMTs sont généralement caractérisées en dynamique par deux paramètres importants, à savoir la fréquence de coupure  $F_T$  et la fréquence d'oscillation maximale  $F_{max}$ . MTG, GMS, GMA et h21 sont également des paramètres très importants qui peuvent être pris en compte dans une étude RF. En figure III.17 on représente le gain de courant (h21), le gain de puissance maximal du transducteur (MTG), le gain stable maximal (GMS), le gain de puissance maximal disponible (GMA) et le gain de puissance unilatéral en fonction de la fréquence du dispositif à longueur de grille de 20 nm  $V_{ds} = 5$  V et  $V_{gs} = 0,0$  V.

Nos résultats ont été obtenus sur une plage de fréquences de 1 kHz à 1 THz. Ces résultats permettent d'observer que nous avons obtenu un gain maximal en courant de 60 dB, un gain de puissance maximal du transducteur de 31 dB et un gain de puissance maximal de 30 dB à 1 GHz. Le transfert électronique dans le canal est optimisé du fait de l'effet de la capacité  $C_{GS}$ . Cette capacité de valeur élevée résulte de la longueur de grille effective [64], les chutes soudaines des gains de puissance unilatéraux en basse fréquence sont dues à la capacité  $C_{GS}$  qui peut être ignorée dans cette bande de fréquence. La fréquence de coupure et la fréquence maximale  $f_{max}$  obtenues pour le dispositif HEMT étudié sont de 980 GHz et de 1,3 THz respectivement.

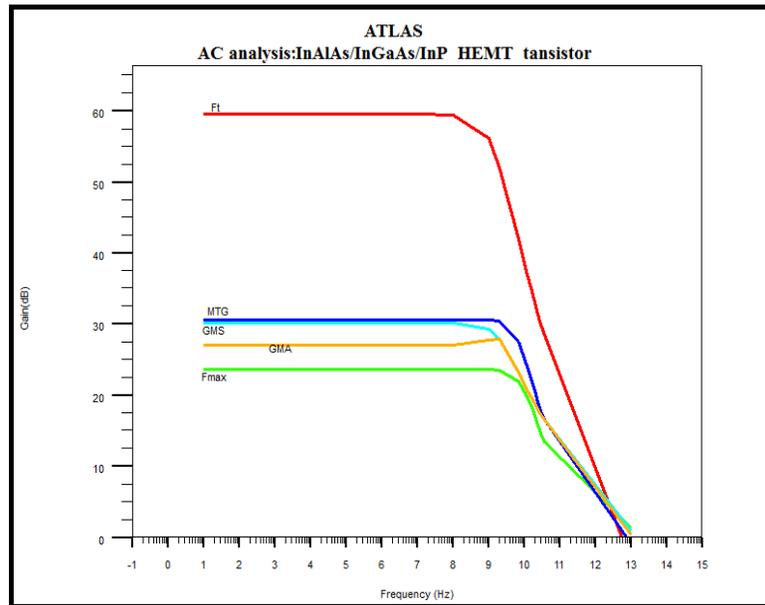


Figure III.17. Gain en courant,  $h_{21}$  et gain en puissance en fonction de la fréquence pour notre HEMT InAlAs / InGaAs / InP.

La caractéristique RF a été simulé de 50 MHz à 50 GHz sous une tension de polarisation  $V_{ds} = 5V$  et  $V_{gs} = -0,45V$ . Le coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ) est présenté en figure III.18. Le gain RF a une valeur maximale de  $S_{21} = -0,9$  à  $f = 5THz$ , les coefficients de réflexion ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ) sont inférieurs à 20 dB pour toutes les fréquences de la plage de simulation.

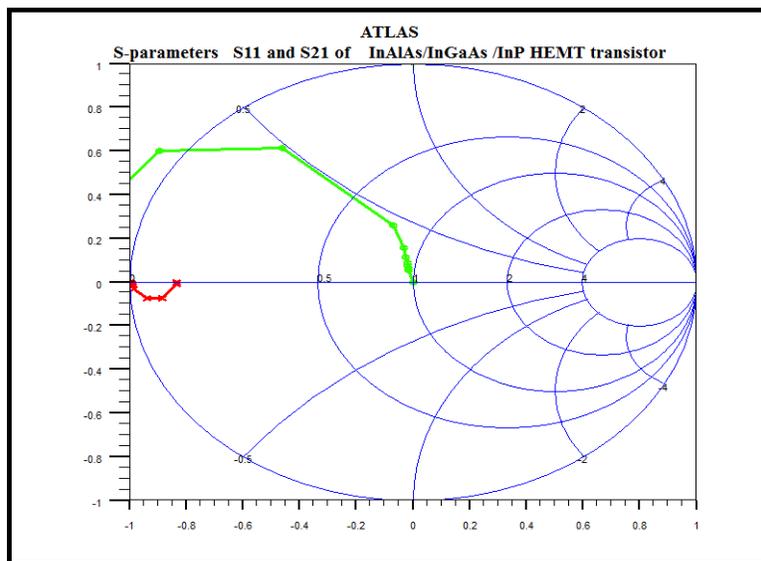


Figure III.18. Paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  du transistor HEMT InAlAs / InGaAs / InP.

### III.3.2.1 l'impact de la variation de l'épaisseur de la couche canal sur les performances du dispositif

En figure III.19 nous présentons une coupe 2D du dispositif HEMT InAlAs / InAs/InP étudié où on remarque que la couche cap layer est à base de l' InGaAs fortement dopée avec une concentration de  $10^{21} / \text{cm}^3$ , permettant un bon contact ohmique . La couche Schottky est une couche à large bande interdite par rapport au matériau de la couche de canal. À l'hétéro-interface InAlAs / InAs, une importante discontinuité de bande de conduction se produit car les électrons libres diffusent à partir du matériau InAlAs à bande interdite plus importante dans la couche canal InAs à bande interdite plus faible et formant 2DEG. De ce fait, une forte concentration de porteurs est obtenue dans la couche canal.

Une couche Schottky InAlAs plus fine permet de réduire la distance entre le métal de grille et la couche canal, ce qui offre une transconductance élevée, et diminue la tension de claquage du dispositif.

La couche espaceur sépare les donneurs ionisés et le gaz bidimensionnel 2-DEG à l'hétéro-interface de la couche donneuse et de la couche canal. Cette couche permet aussi la diminution de la diffusion Coulombienne des atomes donneurs, car cela améliore la mobilité électronique du dispositif. L'épaisseur de la couche donneuse est de l'ordre de 2 nm avec une concentration de dopage très élevée de l'ordre de  $3.10^{19} / \text{cm}^3$ , elle fournit tous les électrons à la couche canal et forme le gaz 2DEG.

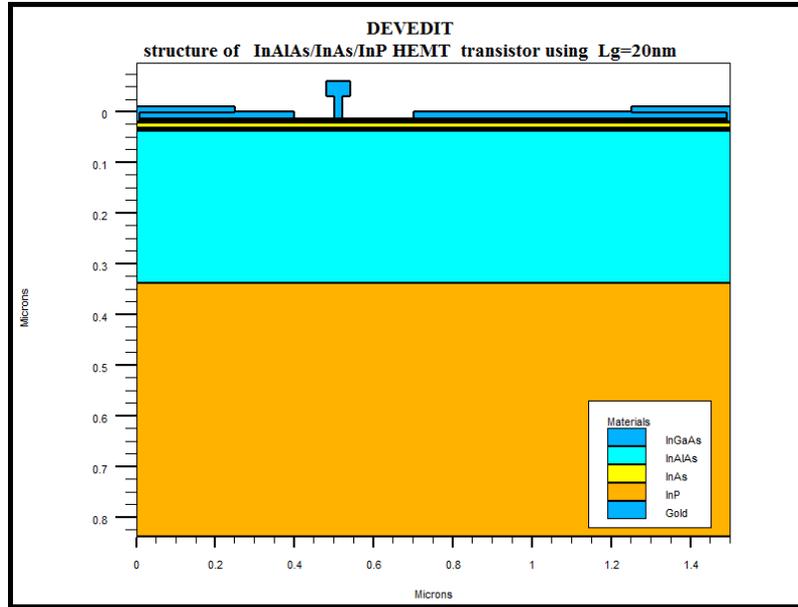


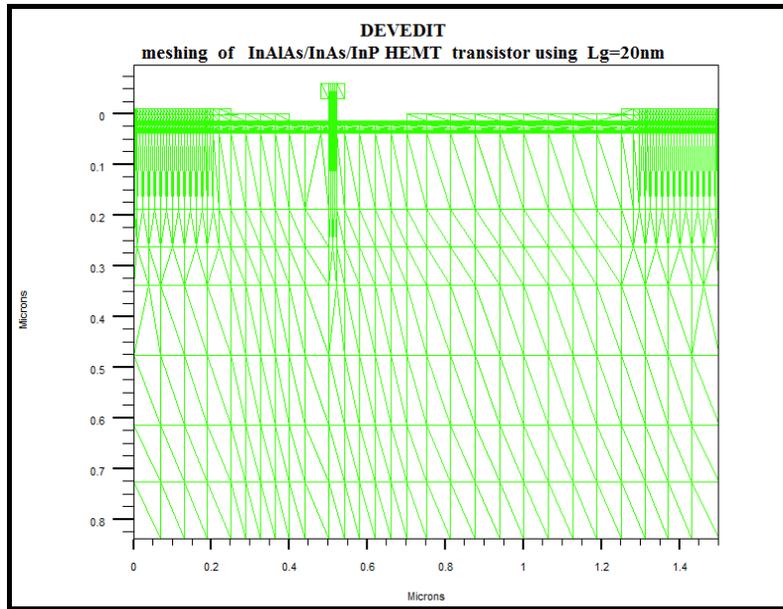
Figure III.19. Structure InAlAs/InAs/InP simulé.

Les paramètres physiques et géométriques de notre structure sont présentés au tableau III.3.

	layer	Thickness (nm)	Doping(cm <sup>-3</sup> )
InGaAs	cap	20	1e21
InAlAs	shottky	4	1e15
InAlAs	donor	2	3e19
InAlAs	spacer	3	1e16
InAs	channel	10	1e16
InAlAs	buffer	200	1e16
InP	substrat	500	1e15

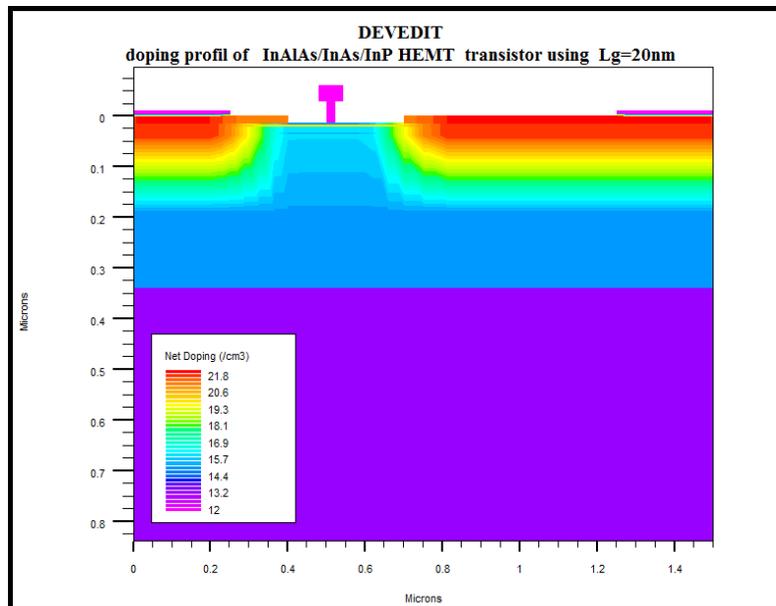
Tableau III.3: Paramètres géométrique du dispositif.

Rappelons que pour cette structure le maillage est fin dans la région du canal ceci est clair sur la figure III.20.



**Figure III.20. Maillage de la structure.**

En figure III.21 nous donnons le profil de dopage de notre dispositif. La couche cap layer et la couche donneuse sont fortement dopées, ce qui permet d'obtenir un bon contact ohmique et fournir des électrons libres à la région du canal.



**Figure III.21. Profil de dopage de la structure simulée.**

En figure III.22 le diagramme de bande du transistor HEMT basé sur InAlAs / InAs / InP considéré dans cette étude est présenté.

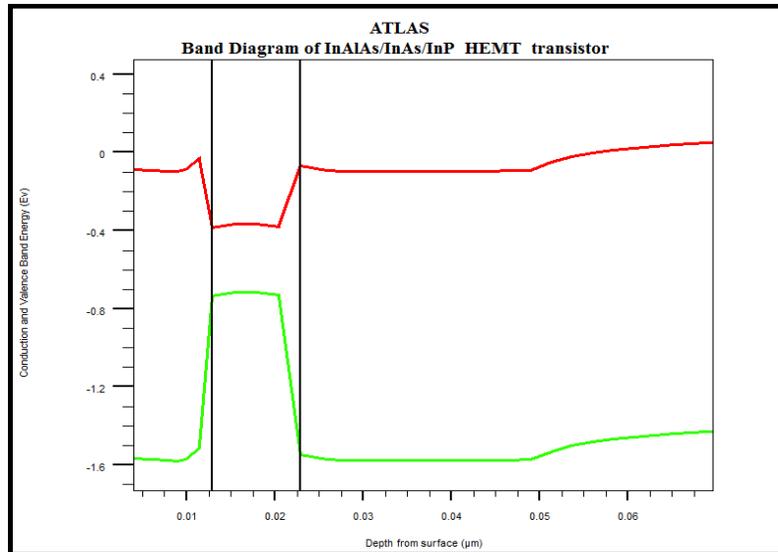


Figure III.22. Diagramme de bande d'énergie.

En figure III.23 on représente le courant de drain en fonction de la tension source-drain pour le transistor HEMT InAlAs / InAs / InP simulé à la 300°k. Le dispositif présente un courant de drain de 2.4A pour une tension source-grille égale à 0,0V, On remarque que le courant de drain est relativement faible à cause de la diminution de la tension grille-source.

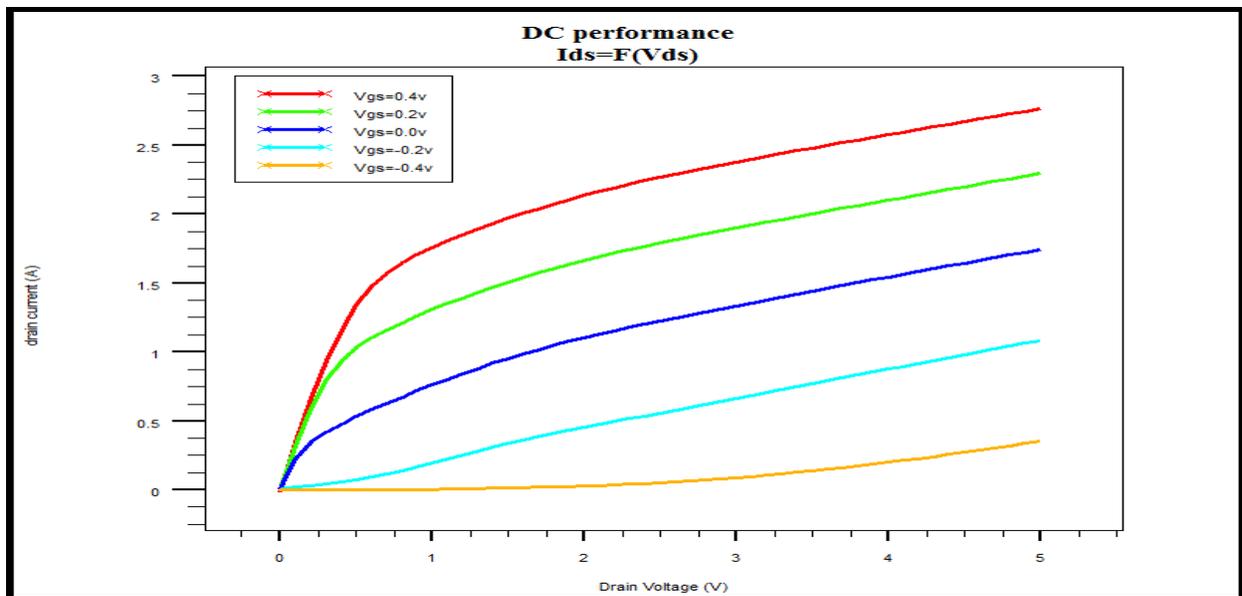


Figure III.23. Caractéristique  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  pour le transistor InAlAs / InAs / InP étudié.

En figure III.24 on représente la caractéristique  $I_{DS}$ - $V_{GS}$  à  $V_{DS} = 1,5$  V pour le transistor InAlAs / InAs / InP HEMT simulé à la  $T=300^{\circ}K$ . On remarque que la tension de seuil  $V_{TH}$  est de

-0.4 V.

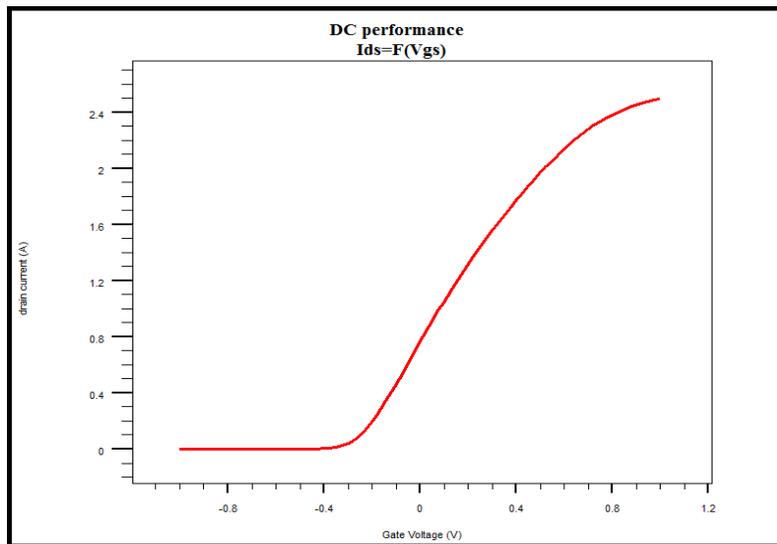


Figure III.24. Courant de drain en fonction de la tension source-grille pour le transistor HEMT InAlAs / InAs / InP étudié.

La transconductance représente la variation du courant drain-source par rapport à la variation de la tension grille-source pour une tension drain-source fixe. En figure III.25 on représente la transconductance en fonction de la tension grille-source. La transconductance maximale obtenue à partir de cette caractéristique est de 2600 mS/mm.

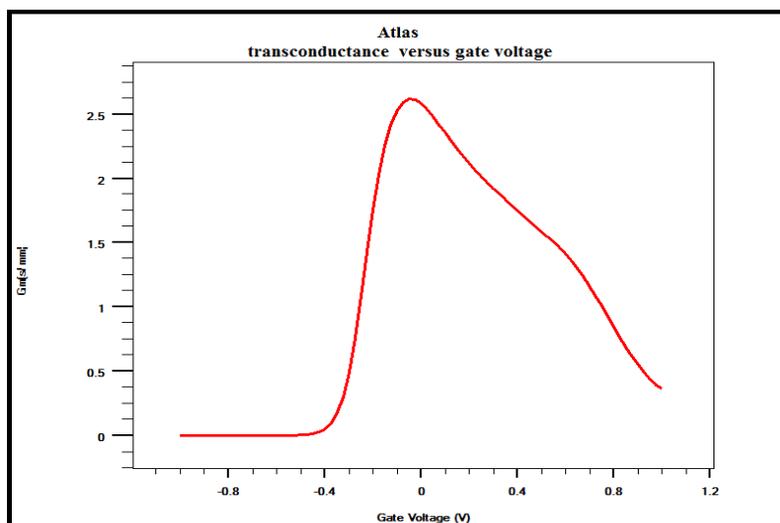
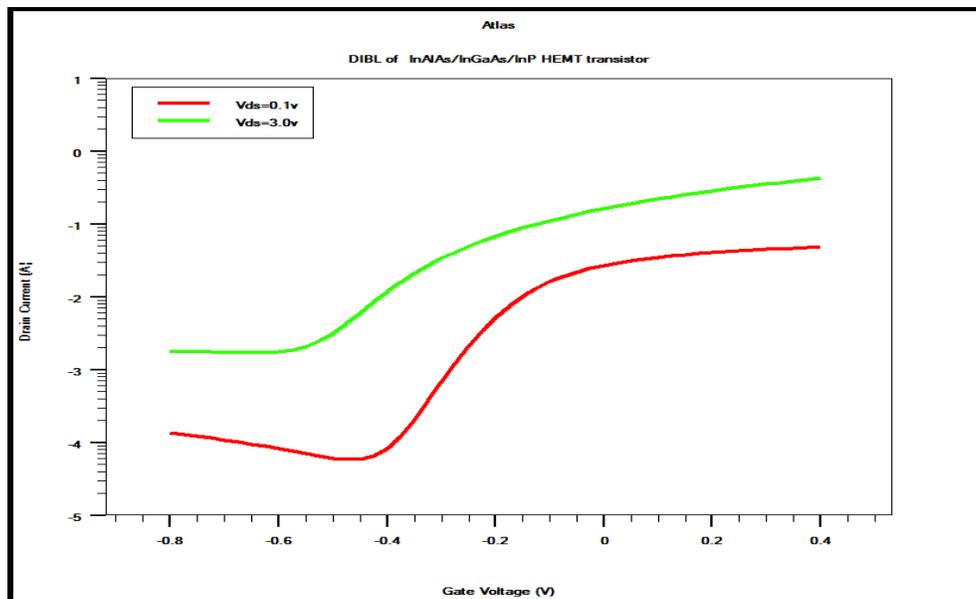


Figure III.25. Transconductance.

En figure III.26 on représente l'évolution du courant drain-source en fonction de la tension grille-source du transistor HEMT InAlAs/InAs/InP. Pour la détermination du DIBL, nous avons considéré deux tensions de polarisation drain source, tension drain-source de 0.1 V puis 3.0 V, les tensions de seuils obtenues sont respectivement -0.6 V et -0.8 V. Le DIBL obtenu est de l'ordre de 69mV/V.



**Figure III.26. Evolution du courant drain-source en fonction de la tension grille-source à  $V_{ds} = 0.1$  et  $3.0$  V.**

La figure III.27 représente les courants  $I_{on}$  et  $I_{off}$ . Le dispositif simulé offre un rapport  $I_{on}/I_{off}$  d'environ  $0.6 \times 10^4$  à  $V_{ds}=2.0V$ , la détermination de ce rapport est une donnée très importante pour la qualité du composant et la consommation d'énergie.

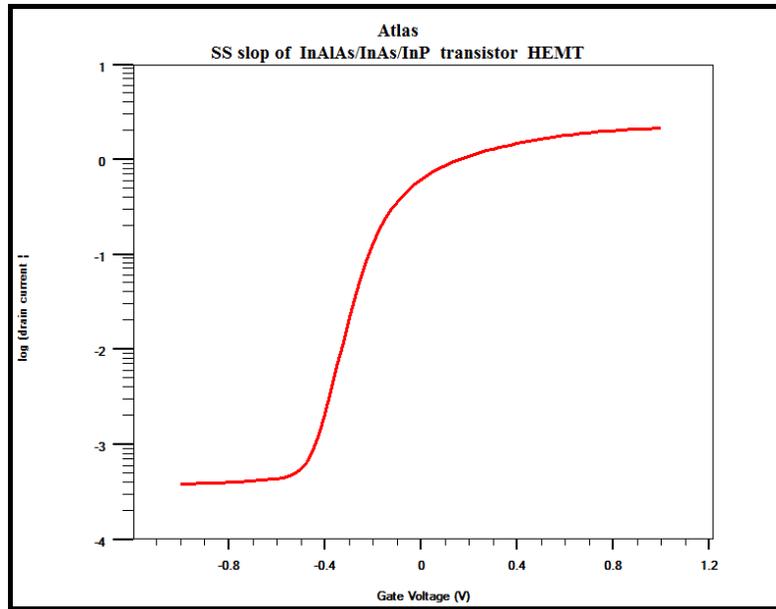


Figure III.27. Courants  $I_{on}$  et  $I_{off}$ .

La Figure III.28 permet de représenter les caractéristiques RF du dispositif simulé. Lors de la simulation de cette caractéristique nous avons obtenu une fréquence de coupure (gain en courant égal à l'unité) égale à 1 THz. Cette caractéristique est déterminée pour une tension  $V_{DS} = 1,5$  V et une tension  $V_{GS} = 1,2$  V.

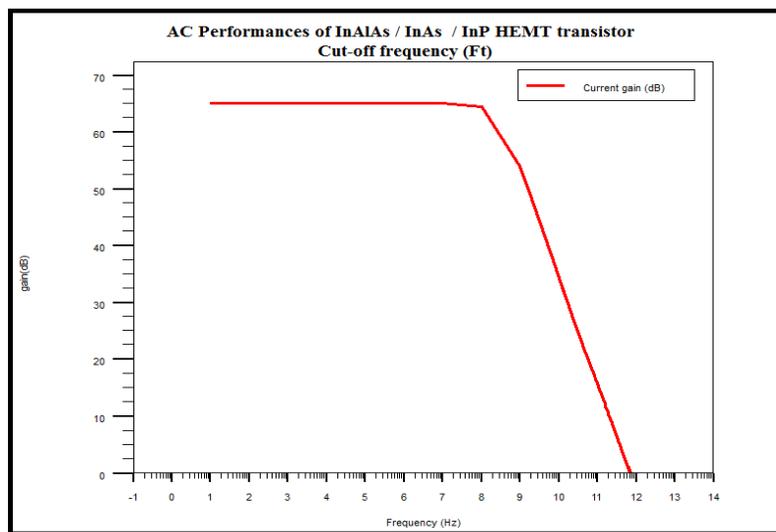


Figure III.28. Gain en courant en fonction de la fréquence pour le HEMT InAlAs / InAs / InP étudié.

### III.3.2.2. l'impact de la variation de fraction molaire du matériau du canal InGaAs

En figures III.29 et III.30, on représente les caractéristiques de transfert  $I_{ds}-V_{gs}$  et de sortie  $I_{ds}-V_{ds}$  du transistor HEMT InAlAs / InGaAs / InP avec différentes valeurs de la fraction molaire de l'indium de la couche canal InGaAs. A partir de cette caractéristique nous pouvons voir que le courant et la tension de seuil diminuent avec l'augmentation de cette fraction molaire .

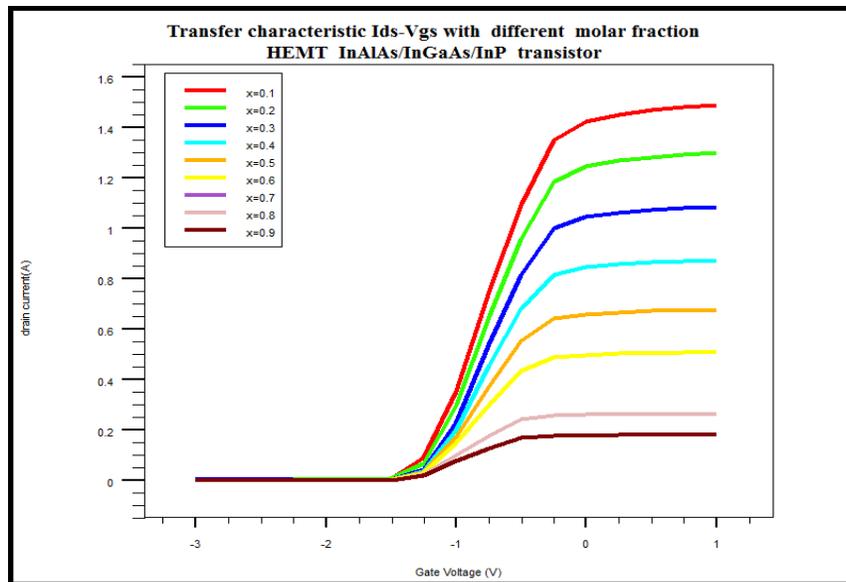


Figure III.29. Caractéristique de transfert  $I_{ds}-V_{gs}$  pour différentes fraction molaire de l'indium de la couche canal InGaAs pour le transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP

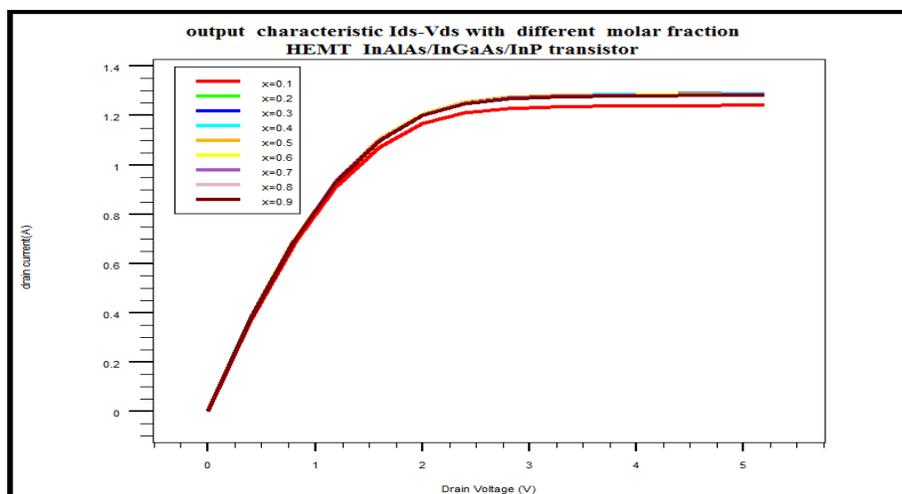
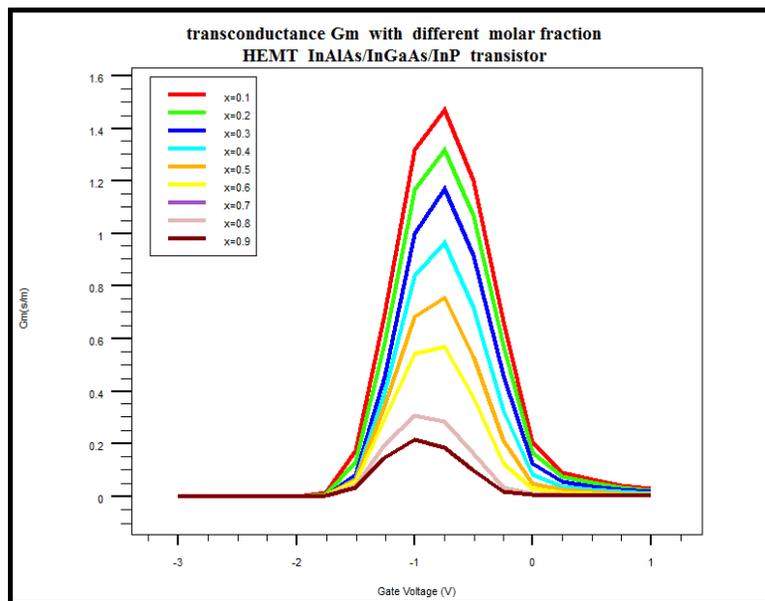


Figure III.30. La caractéristique de sortie  $I_{ds}-V_{ds}$  pour différentes fraction molaire de l'indium de la couche canal InGaAs pour le transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP

En figure III.31, nous représentons la transconductance en fonction de la tension source-grille pour différentes fraction molaire de l'indium de la couche canal InGaAs pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP à  $V_{ds} = 1,0$  V, le dispositif présente une transconductance de 1580 mS / mm et 280 ms / mm respectivement pour  $x = 0,1$  et  $x = 0,9$ . Nous remarquons de la caractéristique que lorsque la teneur en indium augmente dans le canal, la transconductance  $g_m$  diminue.



**Figure III.31. La transconductance pour différentes fractions molaires pour transistor HEMT à base de l'InAlAs/InGaAs/InP.**

En figure III.32 on représente les courants  $I_{on}$  et  $I_{off}$  pour différentes fractions molaires de l'indium dans la couche canal pour le transistor HEMT simulé. Pour  $x = 0,1$ , le dispositif offre une pente  $SS=75$  mV/ décade la valeur du  $SS$  obtenue est encourageante sachant que pour les transistors HEMTs, une valeur idéale de la pente du sous-seuil est de 60 mV / décade.

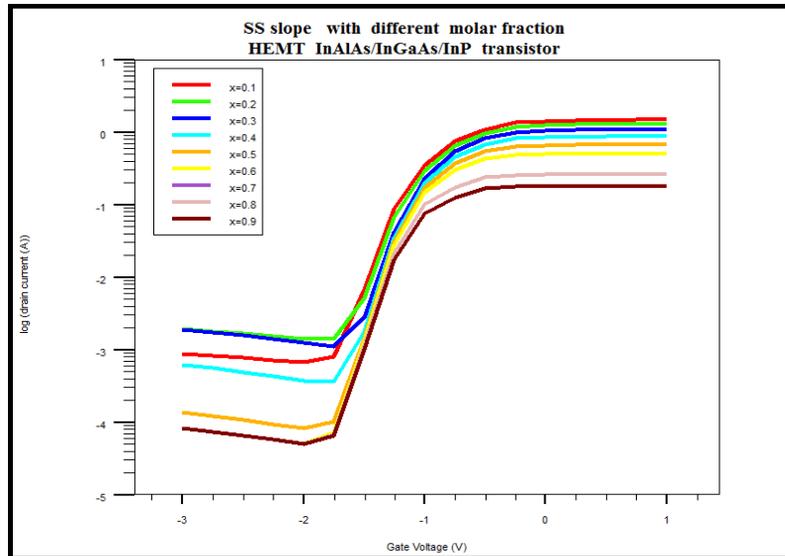


Figure III.32. Courants  $I_{on}$  et  $I_{off}$  avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.

En figure III.33 sont représentés les courants de fuites de la grille pour différentes fractions molaires pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP à  $V_{ds}=1.0V$ . Pour une concentration d'indium de  $x = 0,9$ , le dispositif offre un courant de fuite de grille  $0,9 \mu A$ .

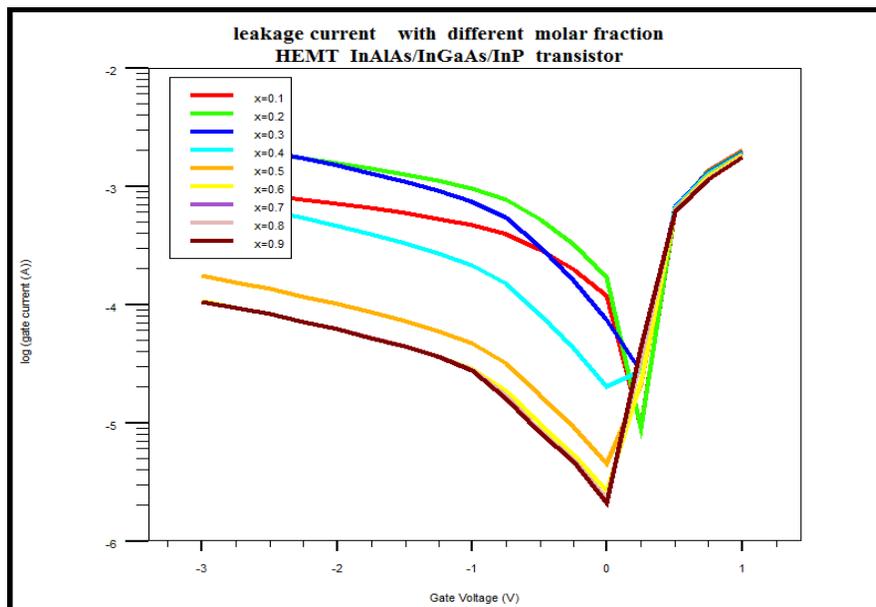


Figure III.33. Courants de fuites de la grille avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP.

### Chapitre III: Résultats et discussions

Nous résumons dans le tableau III.4 tous les résultats que nous avons obtenus pour différentes fractions molaires d'indium dans le canal à base d' InGaAs.

Fraction molaire	X=0.1	X=0.2	X=0.3	X=0.4	X=0.5	X=0.6	X=0.7	X=0.8	X=0.9
Gap e(g)	0.42812	0.50574	0.59286	0.59286	0.7956	0.91122	1.0363	1.171	1.3151
Nc	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17	4.35 e17
Nv	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18	8.16 e18
taun	1 e-9	1 e-9	1 e-9	1 e-9	1 e-9	1 e-9	1 e-9	1 e-9	1 e-9
taup	2.8 e-8	3.6 e-8	4.4 e-8	5.2 e-8	6 e-8	6.8 e-8	7.6 e-8	8.4 e-8	9.2 e-8
permittivité	15.3937	5.7008	16.0213	16.3552	16.7025	17.0632	17.4373	17.82	18.2257
$\epsilon_m$ (ms/mm)	1450	1245	1120	883	680	543	432	390	240
Ids(A)	1.43	1.22	1.55	0.87	0.65	0.53	0.42	0.38	0.23
SS(mv/dec)	75	76	78	79	81	83	85	87	89
Ion/Ioff	0.05*10 <sup>3</sup>	0.11*10 <sup>3</sup>	0.22*10 <sup>3</sup>	0.5*10 <sup>3</sup>	0.55*10 <sup>3</sup>	0.63*10 <sup>3</sup>	0.8*10 <sup>3</sup>	2.5*10 <sup>3</sup>	5*10 <sup>3</sup>
F <sub>T</sub> (GHZ)	400	390	375	371	346	312	299	150	110
Fmax(GHZ)	860	810	800	790	783	720	695	690	698

**Tableau III.4. Impact de la fraction molaire sur les caractéristique DC et AC du HEMT étudié.**

Les figures III.34 et III.35 permettent de représenter la variation de la capacité drain source et grille-source ( $C_{DS}$ ,  $C_{GS}$ ) pour une tension de drain constante et pour différentes valeurs de la fraction molaire dans le canal InGaAs. Ces condensateur impactent directement le calcul des fréquences caractéristiques de notre dispositif pour différentes valeurs de fraction molaire dans le canal InGaAs car ces condensateurs ont un impact direct sur le calcul de ces fréquences dans la gamme de fréquences que nous avons utilisé pour nos simulations où une diminution de valeur du condensateur de 0,1% ( $C_{DS} = 4e-12F$ ) et une augmentation de  $C_{GS}$  de 0,9% ( $C_{GS} = 6,5e-14F$ ) a été observée , ce qui signifie une augmentation de la fréquence de ces dispositifs qui peuvent être utilisés dans les applications haute fréquence.

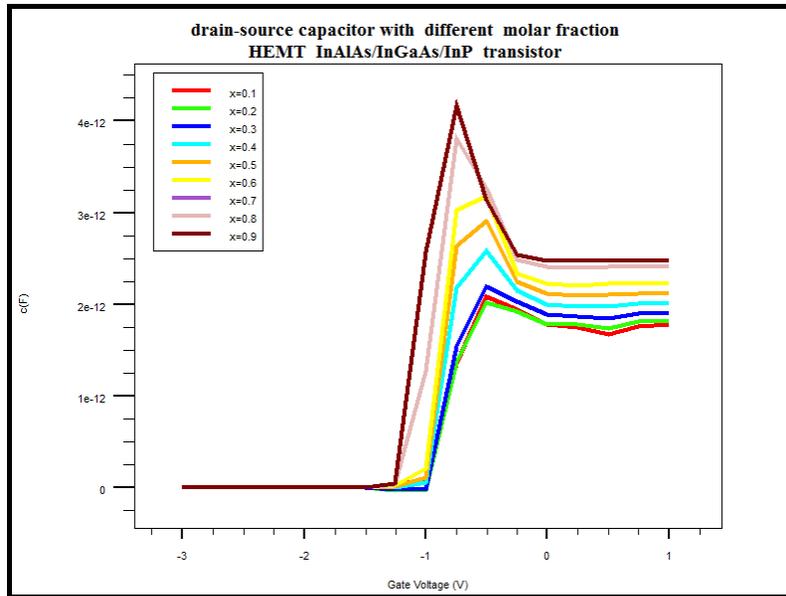


Figure III.34. Evolution de la capacité drain-source pour différentes fractions molaires HEMT InAlAs/InGaAs/InP.

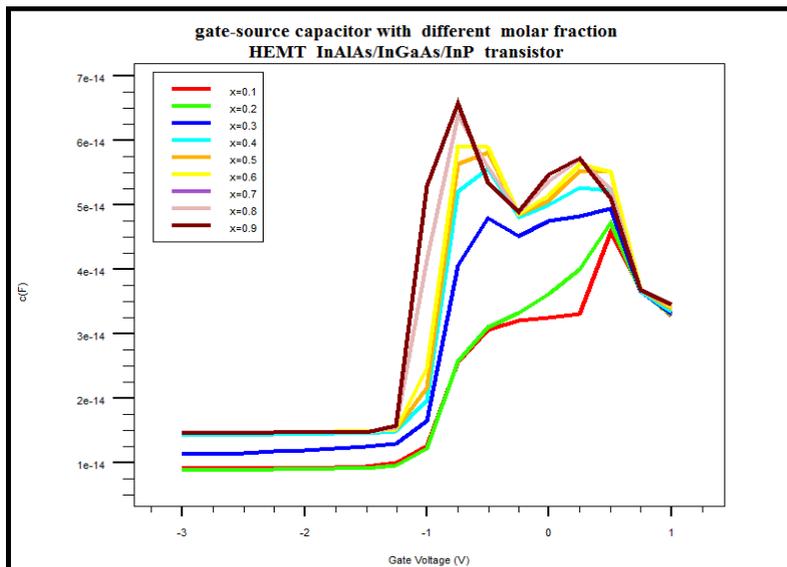
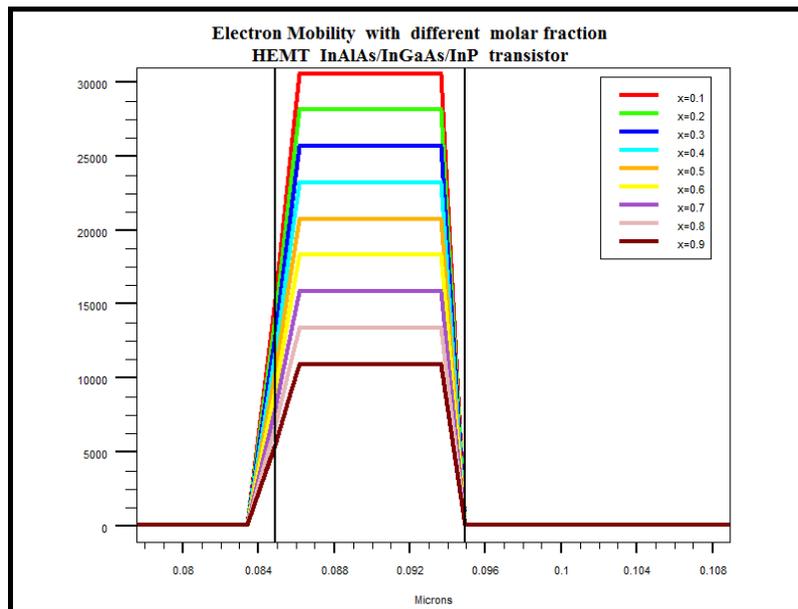


Figure.III.35. Evolution de la capacité grille -source pour différentes fractions molaires HEMT InAlAs/InGaAs/InP.

La mobilité des électrons dans le canal est très importante pour l'augmentation du courant. Dans la figure III.36, nous avons présenté La mobilité avec une différente fraction molaire pour transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP. Une mobilité de  $30000\text{cm}^2/\text{vs}$  est obtenue pour  $x=0,1$  et  $10\ 000\ \text{cm}^2/\text{vs}$  pour  $x=0,9$ .



**Figure.III.36. Représentation de la mobilité pour différente fraction molaire d'indium dans la couche canal du HEMT InAlAs/InGaAs/InP.**

Les figures III.37, et III.38 représentent respectivement le gain en courant et le gain en puissance en fonction de la fréquence pour différente fraction molaire  $x$  du matériau  $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$  formant le canal du transistor HEMT InAlAs/InGaAs sur substrat InP pour une fréquence qui s'étale sur une plage une plage de [10GHz à 1 THz].

La fréquence de coupure est de 400 GHz à 0 dB avec une fréquence d'oscillation maximale en GMS de 860 GHz à 0 dB . L'impact de la variation de la fraction molaire de l'indium dans la couche de du canal que nous avons pu faire varier de 0,1 à 0,9 nous a permis d'obtenir les résultats que nous avons regroupé au tableau III.5. Nous pouvons observer que  $F_{\max}$  et  $F_t$  diminuent avec l'augmentation de la fraction molaire.

Fraction molaire	$F_T$ (GHZ)	$F_{max}$ (GHZ)
$x = 0.1$	400	860
$x = 0.2$	390	810
$x = 0.3$	375	800
$x = 0.4$	371	790
$x = 0.5$	346	783
$x = 0.6$	312	720
$x = 0.7$	299	695
$x = 0.8$	150	690
$x = 0.9$	110	698

Tableau III.5. effet de la variation de la fraction molaire sur les fréquences caractéristiques  $F_T$  et  $F_{max}$  du HEMT étudié.

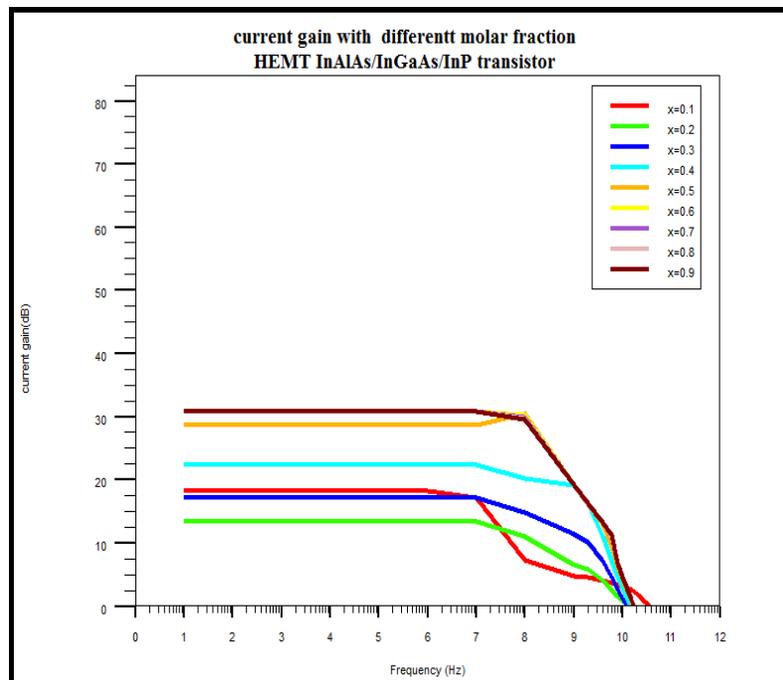
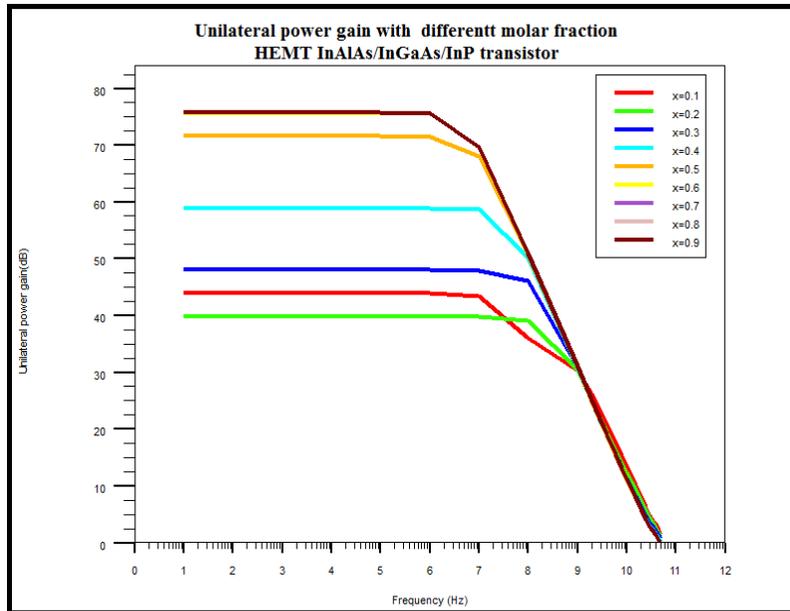


Figure III.37. Gain en courant en fonction de la fréquence pour différente fraction molaire d'indium dans la couche canal du HEMT InAlAs/InGaAs/InP



**Figure.III.38. Gain en puissance en fonction de la fréquence pour différente fraction molaire d'indium dans la couche canal pour le transistor HEMT InAlAs/InGaAs/InP**

L'augmentation du pourcentage d'indium dans le canal permet de bénéficier d'une plus forte mobilité électronique des porteurs dans le canal. Le gain et la fréquence max augmentent avec l'augmentation de la teneur en indium dans le canal. Pratiquement des structures allant jusqu'à 80 % d'indium ont déjà été développées.

L'inconvénient majeur de cette structure est le substrat InP qui est plus fragile et surtout plus coûteux comparé au substrat GaAs aussi très utilisé comme substrat pour ce type de structure.

### III.4 . Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation que nous avons obtenus suite à l'étude d'un transistor HEMT  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  sur substrat InP. Cette étude a été effectuée sous environnement Silvaco TCAD. Une étude en mode DC nous a permis de déterminer le courant du drain, la transconductance, le DIBL, le rapport  $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$  du HEMT étudié, une étude en mode AC nous a permis de déterminer le gain ainsi que les fréquences caractéristiques  $F_{\text{MAX}}$  et  $F_T$  du transistor. Pour finir, l'impact de la variation de fraction molaire  $x$  du matériaux de canal  $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$  sur les performances du dispositif a aussi été examinée.

# Conclusion générale

Notre étude a consisté à faire l'étude d'un transistor à effet de champ à haute mobilité soit un HEMT à base de matériau III-V les semi-conducteurs III-V interviennent dans presque tous les équipements électriques et optiques. Cette étude a été effectuée afin de déterminer les performances statiques et dynamique de ce type de dispositif. Nous nous sommes intéressés à l'étude d'une structure HEMT InAlAs/InGaAs à enrichissement sur substrat InP unissant de bonnes caractéristiques statiques et dynamiques en même temps. Ce type de composants sont généralement utilisés dans les systèmes numériques à haut débit, dans les systèmes analogiques et ceux à basse consommation.

Afin de faire cette étude, nous avons commencé dans un premier chapitre par la présentation des composés des matériaux III-V tel que le GaAs, le GaSb, l'InP et les alliages associés à gap direct. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour la conception de différents dispositifs actuellement utilisés pour les applications hautes fréquences et applications faible bruit Ces matériaux permettent ainsi de concevoir différents dispositifs tels que les HEMT auxquels nous nous intéressons dans cette étude. Nous avons alors énumérés les différentes propriétés des matériaux III-V tels que leur propriétés électrique, optique ect....

Au second chapitre nous sommes revenus sur la structure des transistors à haute mobilité électronique dits HEMTs , nous avons aussi définis les différentes couches les constituants, nous avons aussi expliquer le principe de fonctionnement de ce type dispositifs pour lesquels nous avons définis les différents paramètres qui les caractérisent tels que la tension de seuil  $V_{TH}$  , la

## Conclusion générale

---

transconductance  $g_m$  et le courant du drain en régime statique ainsi que la fréquence de coupure  $F_T$  et la fréquence max  $F_{MAX}$  en régime dynamique.

Au troisième chapitre nous avons présenté les résultats de simulation que nous avons obtenus après l'étude tout d'abord d'une structure à base de  $In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}As$  sur substrat  $InP$  d'une longueur de grille de 20nm. Cette étude a été effectuée par le biais du simulateur SILVACO TCAD que nous avons présenté au chapitre3 , nous avons ensuite présenté les résultats que nous avons obtenus et qui ont permis de déterminer les performances en mode DC et AC du dispositif étudié , ainsi le dispositif étudié est caractérisé par une transconductance de l'ordre 1130 mS/mm à  $V_{gs}=-0.5v$  et une tension drain-source de 2.0V. Nous nous sommes aussi intéressé au calcul du DIBL et des courants  $I_{on}$  et  $I_{off}$ , la valeur du DIBL est de 134mV/V,  $I_{on}/I_{off}= 5 \times 10^4$  . Les fréquences  $F_T$  et  $F_{max}$  sont telles que  $F_T= 1.3THZ$  et  $F_{max}= 980GHZ$

Une seconde étude nous a permis d'examiner l'effet de la fraction molaire  $x$  de la couche canal sur les performances de notre dispositif. Les propriétés du dispositifs varient en fonction de la teneur de l'indium dans le canal ou nous avons ainsi remarqué que le dispositif présente une transconductance de 1580 mS / mm et 280 ms /mm respectivement à  $V_{ds} = 1,0 V$  pour  $x = 0,1$  et  $x = 0,9$ . Nous remarquons de la caractéristique que lorsque la teneur en indium augmente dans la couche canal la transconductance  $g_m$  diminue.

Pour finir, nous avons pu remarquer d'après les résultats obtenus par cette étude que les HEMT à base de  $InAlAs/InGaAs$  sur substrat  $InP$  donnent de très bonne caractéristiques statiques en plus des performances dynamiques, ce qui ouvrent des perspectives intéressantes pour de nouvelles applications telles que les applications haut débit et faible bruit , par ailleurs l'utilisation de l' $InP$  comme substrat a été adopté par différentes sociétés commerciales pour

## Conclusion générale

---

des applications dans les communications par fibre optique à haute vitesse, car les technologies de dispositifs basées sur InP tirent parti des propriétés intrinsèques du matériau telles que sa conductivité thermique élevée, sa mobilité électronique élevée et sa faible bande interdite comparé au silicium, de silicium-germanium et au GaAs.

### Références

- [1] Gerald Bastard, *Wavemechanics applied to semiconductor heterostructures*, Les éditions de physique, paris, (1988)
- [2] Peter Y. YU, Manuel Cardona. *Fundamentals of semiconductors Physics and materials properties*. Springer (2001).
- [3] C. Kittel. *Introduction à la physique de l'état solide*, Dunod (1972)
- [4] J.S. Blakemore. *Semiconducting and other major properties of gallium arsenide*. *J. Appl. phys.* 53(10). October (1982).
- [5] Francis Levy. *Traité des matériaux (18). Physique et technologies des semiconducteurs*. Presses polytechniques et universitaires Romandes (1995)
- [6] W.C. Johnson, J.B. Parsons, and M.C. Crew. *J. Phys. Chem.* (1932), p. 2636-2651.
- [7] H.P. Maruska and J.J. Tietjen, *Journal of Appl. Lett.* (1969), p. 315-327.
- [8] M. Leszczynski, T. Suski, P. Perlin, H. Teisseyre, I. Grzegory, M. Bockowski, J. Jun, S. Porowski and J. Majo «Lattice constants, thermal expansion and compressibility of gallium nitride», *J. Phys. D*, Vol. 28 (1995), A 149.
- [9] "GaAs, AlAs and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As: material parameters for use in research and device applications", *J. appl. Phys.*, (1985), 58(3) : R1-R29
- [10] " Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque " mémoire de magister, université Batna, 2007.
- [11] J. R. Chelikowsky and M. L. Cohen, *Phys. Rev.* B14, 556 (1976)S
- [12] S. Laval Physique des Semi-conducteurs III-V Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS (URA 022) ? Bat, 220. Université Paris Sud, F-91405 Orsay Cedex, France
- [13] John Wiley and Sons, Ltd, *Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*, Japan, 2005.

## Références

---

- [14] Y. A. Goldberg. Handbook Series on Semiconductor Parameters. Vol. 2, World Scientific, London (1999).
- [15] S. Adachi. GaAs, AlAs, and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As: Material parameters for use in research and device applications. J. Appl. Phys, Vol. 58(3): R1-R29, (1985).
- [16] D. Ahmari, M. Fresina, Q. Hartmann, P. Barlage, M. Feng, G. Stillman. InGaP/GaAs Heterojunctions bipolar transistor grown on a semi-insulating InGaP buffer layer. IEEE Electron Device Letters, Vol. 18 (1997).
- [17] : W.T.Anderson " simulation of Semiconductor Device failure Mechanisms", Naval research Laboratory, Washington. D. C, 2. Fraunhofer Institute, Freiburg, Germany (2003).
- [18] S. Adachi, J. Appl. Phys. 53 (1982) 8775.
- [19] S. Adachi, J. Appl. Phys. 53 (1982) 8775.
- [20] D.M. Roessler, D.E. Swets, J. Appl. Phys. 49 (1978) 804.
- [21] N. M. Balzaretta and J. A. H. da Jornada, Solid State Commun. 99 (1996) 943.
- [22] T. S. Moss, Proc. Phys. Soc. B 63 (1950) 167
- [23] M. T. Yin and M. L. Cohen, Phys. Rev. B26, 5668 (1982).
- [24] Christian Karl "MESFET MODELS BASED ON GaAs". Edition 1996.
- [25] Olivier VANBESIEN "Modèles linéaires et non linéaires des composants actifs pour la CAO. Hyperfréquences", Cours DESS, septembre 2003.
- [26] Mohamed salah BENBOUZA " Conception assistée par ordinateur des circuits intégrés MESFET GaAs" Thèse de doctorat, Université de Batna, 2006
- [27] J.Zimmermann, thèse de doctorat d'état " Etude par la méthode Monté Carlo des phénomènes de transport électronique dans le Silicium de type N en régime stationnaires et non stationnaire.

## Références

---

Application à la simulation de composants submicroniques”, université de l’île 1, (1980)

[29] – A .AMRI, “Numerical analysis of microwave sintering of ceramic materials using a 3D-TLM method ” Thèse de Doctorat , ENSET-ORAN, 2005.

[30] Aouati Redha, « Etude de l’interaction électron-matière des nanostructures de l’arséniure de gallium», thèse de doctorat, 2011, université Mentouri Costantine.

[31] J. Javier Bautista, “Chapter 5 HEMT Low-Noise Amplifiers,” in Low-Noise Systems in the Deep Space Network, Macgregor S. Reid, Ed. 2008, pp. 195–243.

[32] S. M. Sze and K. K. Ng, Physics of Semi-conductor Devices, vol. 3. John Wiley & Sons, 2006, p. 832.

[33] M. Missous., “Ultra High Speed Nanoelectronics Devices [Lecture hand out].”

[Online]. Available: [http://intranet.eee.manchester.ac.uk/intranet/pg/coursematerial/MSc Co.](http://intranet.eee.manchester.ac.uk/intranet/pg/coursematerial/MSc%20Co)

[34] D. S. Deakin, E. A. Sovero, and J. A. Higgins, “High-performance Ka-band monolithic low-noise amplifiers using 0.2- $\mu\text{m}$  dry-recessed GaAs PHEMTs,” IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 6, no. 7, pp. 253–255, Jul. 1996

[35]: Thi Dak Ha Nguyen ,Réalisation et caractérisation de HEMTs AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> sur silicium pour applications à haute tension , THÈSE DE DOCTORAT soutenue le 19/12/2013

[36] M. Gassoumi, J. M. Bluet, C. Gaquière, G. Guillot, and H. Maaref, “Deep levels and nonlinear characterization of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs on silicon carbide substrate,” Microelectronics Journal, vol. 40, no. 8, pp. 1161–1165, Aug. 2009

[37]: W. Shockley « A unipolar Field-Effect transistor », Proceedings of the I.R.E., vol. 40, n°11, pp.1365-1376, 1952.

[38] J. d. F. Sexton, “Fabrication and Characterisation of High-Speed Indium Phosphide-Based Heterojunction Bipolar Transistors,” PhD Thesis, The University of

## Références

---

Manchester, 2005

- [39] W. Shockley, "A unipolar field-effect transistor.", Proc. IRE, 40, p.1365, 1952.
- [40] M. H. Somerville, A. Ernst, J. A. Alamo, and S. Member, "A Physical Model for the Kink Effect in InAlAs/InGaAs HEMT's," IEEE Transactions on Electron Devices,
- [41] Y. G. Chai and R. Yeats, "InGaAs submicrometer FET's grown by MBE.", IEEE Elec. Dev. Lett., EDL-4, p.252, 1983.
- [42]: W. Shockley « A unipolar Field-Effect transistor », Proceedings of the I.R.E., vol. 40, n°11, pp.1365-1376, 1952.
- [43] G. C. Dacey and I. M. Ross, "Unipolar field effect transistor.", Proc. IRE, 41, p.970, 1953; G. C. Dacey and I. M. Ross, "The field-effect transistor", Bell System Tech. J., 34, p.1149, 1955.
- [44] D. Wake, A. W. Nelson, S. Cole, S. Wong, I. E. Henning and E. G. Scott, "InGaAs/InP junction field effect transistors with high transconductance made using metal organic vapor phase epitaxy.", IEEE Elec. Dev. Lett., EDL-6, p.626, 1985.
- [45] R. Schmitt and K. Heime, "InGaAs Junction FET with high frequency limit (MAG=1) above 30GHz.", Electronics Letters, Vol. 21, N°10, p.449, 1985
- [46] J. F. Wager and S. J. T. Owen, "InPMJSFET technology.", J. Electrochem. Soc., Vol. 134, pp.160-165, 1987
- [47] J. S. E. Lilienfeld « Method and Apparatus for Controlling Electric Currents » U.S patent 1745175.1930.
- [48] J. S. E. Lilienfeld « Method and Apparatus for Controlling Electric Currents » U.S patent 1745175.1933
- [49] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii and K. Nanbu, "A new field effect transistor with selectively doped GaAs/n-AlGaAs heterostructure.", Japan J. Appl. Phys., Vol. 19, pp.L225-L227, 1980.
- [50] D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Labnion, J. Chaplart and N. T. Linh, "Two dimensional electron gas MESFET structure.", Elect. Lett., Vol. 16, pp.667-668, 1980.

## Références

---

- [51] G.C. Dacey and I.M. Ross, "Unipolar field-effect transistor.", *Proc. IRE*, 41, p.970, 1953; G.C. Dacey and I.M. Ross, "The field-effect transistor", *Bell System Tech. J.*, 34, p.1149, 1955.
- [52] "What is a HEMT | High Electron Mobility Transistor / HFET / MODFET | Tutorial." [Online]. Available: <http://www.radioelectronics.com/info/data/semicond/fet-field-effect-transistor/hemt-phemttransistor.php> [Accessed: 12-Apr-2015].
- [53] R. Pierret, *Semi-conductor Device Fundamentals*. Addison Wesley, 1996.
- [54] R. Vetry, N. Q. Zhang, S. Keller, and U. K. Mishra, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, pp. 560–566, March 2001.
- [55] L. F. Eastman, "Results, potential and challenges of high power GaN-based transistors," *Solid State Physics*, vol. 176, pp. 175–178, 1999.
- [56] Wolf, S., 1995. *The Submicron MOSFET. Silicon Processing for the VLSI Era*, Lattice Press, Sunset Beach, Volume 3
- [57] Guilhem, A., 2012. *Slides Reliability HEMT GaN technology*. s.l.: Micro and nanotechnologies / Microelectronics. University Paul Sabatier - Toulouse II
- [58] Werquin, M., 2003. *Theoretical and Experimental Study of HEMTs transistors of gallium nitride die for microwave power applications*. s.l.: University of Lille, France.
- [59] [www.silvaco.com](http://www.silvaco.com)
- [60] D. Truyen, *Etude par simulation composant 3D des effets singuliers SEU et SET induits par ions lourds sur le noeud technologique CMOS bulk 180 nm*, thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 2007.
- [61] R. F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*. Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996, pp. 792
- [62] Silvaco International, "Silvaco International, ATLAS User's Manual, February

## Références

---

2000." 2000.

[63] ATLAS user's manual [www.silvaco.com](http://www.silvaco.com). 2004

[64] Chung, E. Hoke, M. Chumbes, T. Palacios., "AlGaIn/GaN HEMT with 300-GHz  $f_{max}$ ," IEEE Electron Device Lett, vol. 31(3), pp. 197, Mar 2010.

## Résumé:

---

### Résumé:

Ce travail a consisté à faire l'étude par le biais de la simulation d'un transistor à effet de champ à haute mobilité soit un HEMT à base de matériau III.V. Cette étude a été effectuée afin de déterminer les performances statiques et dynamique de ce type de dispositif. Nous nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude d'une structure HEMT InAlAs/InGaAs sur substrat InP unissant de bonnes caractéristiques statiques et dynamiques en même temps. Ce type de composants sont généralement utilisés dans les systèmes numériques à haut débit, dans les systèmes analogiques, systèmes à faible bruit et ceux à basse consommation. Les résultats que nous avons obtenus et présentés dans ce travail sont assez encourageants aussi bien en mode DC qu'en mode AC, et permettant de constater que ce type de dispositif peut être utilisé pour des applications dans les communications à haute vitesse par exemple.

### Abstract

In this work a high mobility field effect transistor or a HEMT based on material III.V have been studied by means of the simulation of a high mobility field effect transistor or a HEMT based on material III.V. This study allowed to determine the static and dynamic performances of this type of device. We are interested in this work in the study of a HEMT InAlAs / InGaAs structure on InP substrate uniting good static and dynamic characteristics at the same time. This type of component is generally used in high speed digital systems, in analog systems, low noise systems and low power ones. The results that we have obtained and presented in this work are quite encouraging both in DC mode and AC mode, and allow us to see that this type of device can be used for example for applications in high speed communications.

### ملخص:

يتألف هذا العمل من إجراء الدراسة عن طريق محاكاة ترانزستور تأثير مجال عالي الحركة أي HEMT يعتمد على مادة III.V. أجريت هذه الدراسة لتحديد الأداء الثابت والديناميكي لهذا النوع من الأجهزة، في هذا العمل حاولنا دراسة بنية HEMT InAlAs / InGaAs على ركيزة INP تعطي خصائص ثابتة وديناميكية جيدة في نفس الوقت يستخدم هذا النوع من العناصر بشكل عام في الأنظمة الرقمية عالية السرعة، والأنظمة التناظرية، والأنظمة منخفضة الضوضاء، وتلك ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة، النتائج التي حصلنا عليها وقدمناها في هذا العمل مشجعة تماما في وضع التيار المتردد، وتوضح أنه يمكن استخدام هذا النوع من الأجهزة من أجل التطبيقات في الاتصالات عالية السرعة على سبيل المثال.