

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent
Institut de Technomogie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

**Contribution à l'étude des propriétés électroniques de
l'alliage ternaire AlInN**

Présenté par : OtsmaniBouhadjer

Devant le jury composé :

Dr. BADIR Lahouaria	MCB	C.U.B.B(Ain Temouchent)	Présidente
Pr.AYACHE(néeSAYAH) Choukria	Pr	C.U.B.B(Ain Temouchent)	Encadrante
Mr BERRABAHBaghdadi	Doctorant	C.U.B.B(Ain Temouchent)	Co-Encadrant
Dr. BENCHERIF Kaddour	MCA	C.U.B.B(Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué au centre universitaire de Belhadj Bouchaib à Ain-Temouchent sous la direction du Professeur Choukria AYACHE et le Doctorant Mr BERRABAH Baghdadi. Je vous exprime mes vifs remerciements pour l'aide constante durant la préparation de ce travail, vos conseils, l'enthousiasme que vous avez su me le communiquer et ses compétences scientifiques et humaines m'ont permis d'accomplir mon travail dans les meilleures conditions. Je vous remercie chaleureusement et amicalement.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements au Docteur BADIR Lahouaria, qui me fait l'honneur d'être la présidente du jury. Mes respectueuses reconnaissances s'adresse également à Docteur BENCHERIF Kaddour d'avoir accepté d'examiner mon travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je terminerai en remerciant aussi tous nos collègues du centre universitaire de Belhadj Bouchaib, Département Génie-Electrique.

Dédicace

A la mémoire de mon père, et de ma mère,

A ma petite famille, ma Femme et ma petite ange

A toute ma famille,

A mes amis,

A tous mes collègues,

A mes camarades de la promotion 2018-2019.

Je vous dédie mon travail en témoignage de votre affection et vos encouragements.

MC OTSMANI BOUHADJAR

Table de matières

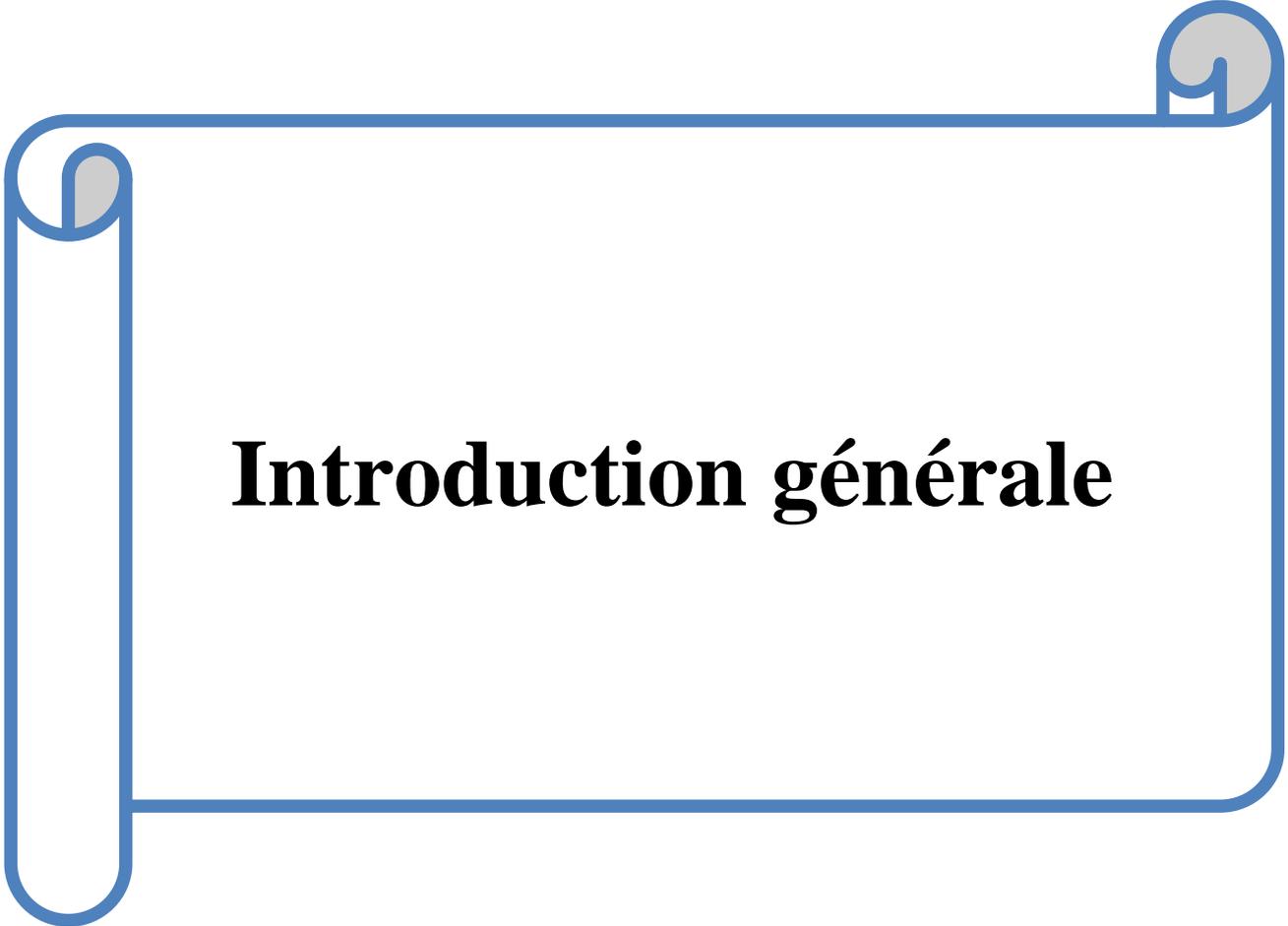
Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Introduction générale	1
Chapitre I : Les propriétés structurales et électroniques des nitrures III-N	1
I.1. Introduction	2
I.2. Paramètres fondamentaux des Nitrures III-N	2
I.3. Structure cristalline.....	4
I.4. Structure de bande	5
I.5. La mobilité des porteurs	8
I.5. 1. Modèle de mobilité à faible champ.....	9
I.5. 2. Modèle de mobilité à fort champ	10
I.6. Conclusion	11
I.7. Références Bibliographiques	12
Chapitre II : Simulation, Résultats et Interprétations.....	14
II.1. Introduction	15
II.2. Variation de la bande interdite avec la température	15
II.3. Influence de la température sur la mobilité des porteurs de charge	17
II.3.1. La mobilité en fonction de la température de InN et AlN	17
II.3.2. La vitesse en fonction du champ électrique de InN et AlN.....	19
II.3.3. l'effet de la diffusion d'alliage sur la mobilité du composé ternaire $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$	20
II.4. Conclusion.....	22
II.5. Références Bibliographiques :	23
Conclusion générale.....	25
Annex.....	26

Liste des tableaux

Tableau I- 1 : Propriétés physiques des différents matériaux semi-conducteurs à 300 K	4
Tableau I- 2: L'énergie de gap à $T=0$, 300 K et les paramètres α et β des deux nitrures AlN et InN	6
Tableau I- 3: Propriétés de transport volumique à 300K pour les matériaux binaires nitrurés	9
Tableau II- 1: Coefficients de Varshni des matériaux InN et AlN	15
Tableau II- 2: Paramètres de l'équation de FMCT pour la phase hexagonale du InN et AlN selon [6], réf=1017cm ⁻³	17

Liste des figures

Figure I- 1: Les différentes structures cristallines pour les matériaux nitrurés.....	5
Figure I- 2: Structures de bandes de GaN, AlN et InN dans leurs phases wurtzites	6
Figure I- 3: Bande interdite E_g en fonction de la température T dans les semiconducteurs binaires GaN, AlN et InN obtenue à partir du modèle de Varshmi.....	7
Figure I- 4: Bandes d'énergie interdite pour différents matériaux semi-conducteurs en fonction des paramètres de maille.	8
Figure II- 1: la variation de la bande interdite de AlN en fonction de la température.....	16
Figure II- 2: la variation de la bande interdite d'AlN en fonction de la température.	16
Figure II- 3: La mobilité d'AlN en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.	18
Figure II- 4: La mobilité d'InN en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.....	18
Figure II- 5: La vitesse des électrons dans AlN et InN en fonction du champ électrique pour différentes températures.....	19
Figure II- 6: La mobilité des électrons d'In _{0.18} Al _{0.82} N en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.....	20
Figure II- 7: La mobilité des trous d'In _{0.18} Al _{0.82} N en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.....	21
Figure II- 8: La vitesse des électrons et les trous dans In _{0.18} Al _{0.82} N en fonction du champ électrique.	21



Introduction générale

Introduction générale

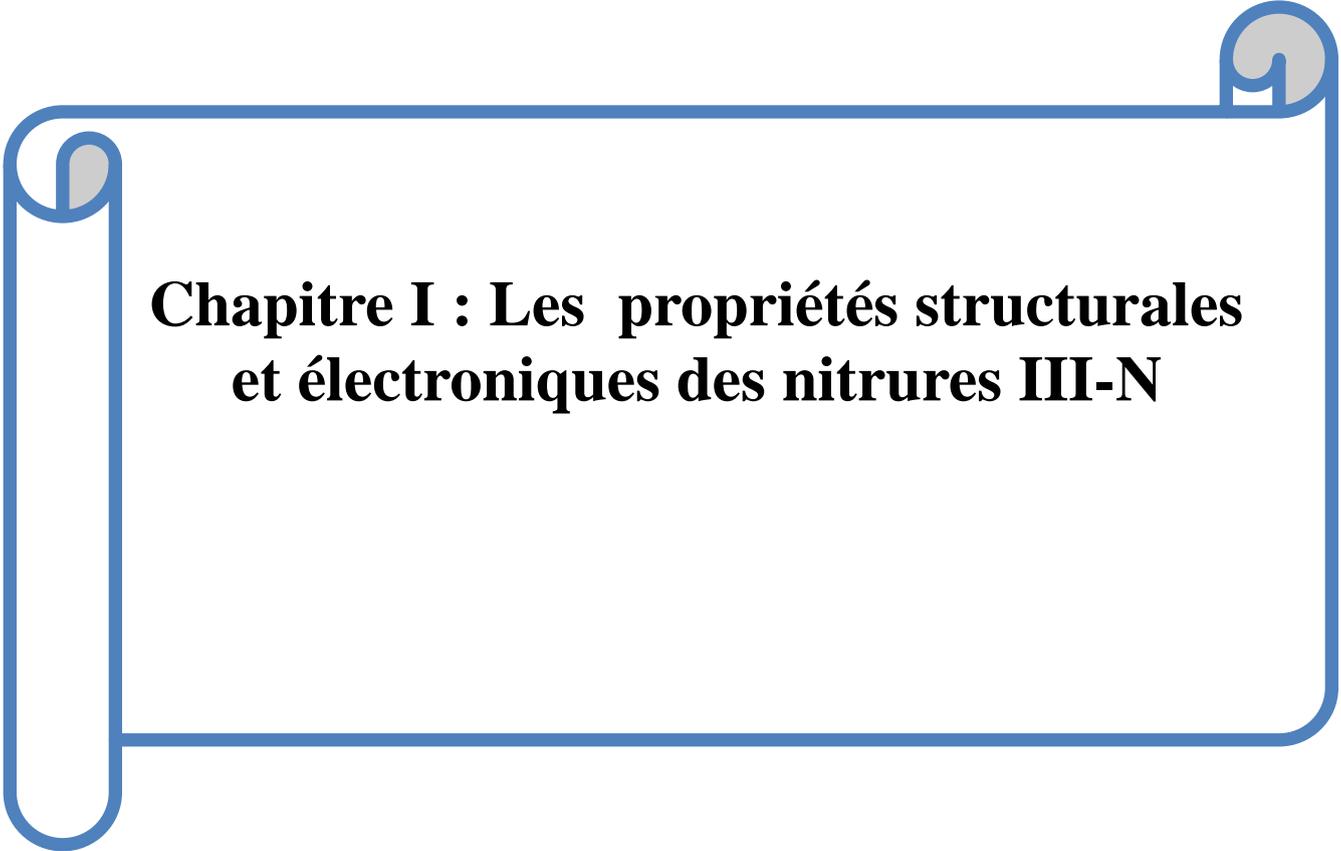
Pour la micro-électronique le silicium est actuellement le matériau de base (plus de 80% des applications dans ce domaine), mais son gap indirect le rend non performant dans certains cas, notamment pour les applications optoélectroniques. Pour pallier cet inconvénient, une recherche très soutenue a été entreprise sur d'autres matériaux, notamment les semi-conducteurs III-V (association d'éléments des colonnes III et V du tableau de Mendeleïev). Le domaine d'application de ces matériaux connaît une expansion très large vue les récents progrès et la compréhension de la physique des semi-conducteurs.

Les composants à base de nitrure de gallium sont actuellement les plus performants. Les composés III-N sont d'un grand intérêt dans le domaine de l'optoélectronique, leurs caractéristiques (stabilité et conductivité thermique, haute vitesse de saturation pour les électrons, large bande interdite) font des nitrures de bons candidats pour la réalisation de composants électroniques de puissance.

Actuellement l'étude théorique des propriétés du transport électronique dans les matériaux semi-conducteurs et plus précisément dans les matériaux III-N ternaires fait l'objet de plusieurs recherches. L'objectif principal de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des propriétés électroniques des matériaux III-N et la simulation des caractéristiques électriques, à travers le logiciel MATLAB.

Notre travail a ainsi fait l'objet de deux chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons un aperçu sur les semi-conducteurs III-N ensuite nous déterminons les propriétés de transport des matériaux à base de nitrures en se basant sur une modélisation analytique. Enfin, deux chapitres s'appuieront de manière fondamentale sur les résultats obtenus. Nous mènerons notre étude approfondie des matériaux III-N en particulier InN, AlN et $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ en commençant par une étude de la bande interdite, ensuite calculer les paramètres cinétiques tels que la vitesse de dérive des électrons et leur mobilité qui nous permettra d'analyser les principaux effets physiques mis en jeu. Au cours de cette étude, nous serons amenés à mettre en évidence l'influence de la température et de la présence d'impuretés et de voir aussi l'influence du potentiel d'alliage sur la caractéristique du transport électronique du matériau ternaire. Nous validons nos travaux en les comparant avec quelques résultats déjà publiés ; nous les trouvons en bon accord. Enfin ; nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.



**Chapitre I : Les propriétés structurales
et électroniques des nitrures III-N**

I.1. Introduction

Les matériaux semi-conducteurs III-N sont de bons candidats pour la fabrication de ces types de transistors et de diodes. Les matériaux semi-conducteurs III-N présentent plusieurs avantages tels que : large bande interdite, une grande stabilité chimique, des propriétés mécaniques exceptionnelles ainsi que d'autres propriétés physiques remarquables. Ces semi-conducteurs possèdent les qualités indispensables pour fabriquer des composants de puissance[1].

L'objet de ce chapitre est de rappeler quelques éléments pertinents connus de la physique concernant les matériaux semi-conducteurs de la filière III-N utiles pour notre étude. Dans un premier temps, nous rappelons les principales propriétés des semi-conducteurs III-N, telles que la structure cristalline du nitrure de gallium (GaN), la structure de bandes, etc.....

I.2. Paramètres fondamentaux des Nitrures III-N

Les matériaux III-V sont constitués des éléments des colonnes III et V de la classification périodique des éléments. Le **Tableau 1.1** [1] regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et en bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi, de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>
13 Al 29,98	14 Si 28,09	15 P 30,97
31 Ga 69,74	32 Ge 72,59	33 As 74,92
49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75

Tableau I-1: Extrait de la classification périodique des éléments[1]

Les semi-conducteurs diffèrent par leurs propriétés physico-chimiques. Une des caractéristiques essentielles est la largeur de leur bande d'énergie interdite qui joue un rôle important dans le choix de leurs applications. Les semi-conducteurs GaN, GaAs et InP présentent un gap direct ce qui fait de ces matériaux des candidats intéressants pour l'optoélectronique notamment pour la réalisation de diode laser à semi-conducteur. En effet, avec un gap direct, les transitions des porteurs (électrons ou trous) entre les bandes d'énergie sont directes ce qui permet facilement de générer des photons soit par absorption soit par la génération[2].

Leur largeur d'énergie de bande interdite (gap) élevée, bien que différente pour chacun de ces matériaux, leur permet d'avoir des tensions de claquage et des températures limites élevées ce qui leur offre les possibilités de supporter les fortes tensions nécessaires pour des applications de puissance. Le nitrure d'aluminium (AlN), le carbure de silicium (SiC) et le GaN ont un gap beaucoup plus élevé que le silicium (Si), le GaAs, le phosphore d'indium (InP) et le nitrure d'indium (InN) ce qui fait de ces matériaux les plus utilisés pour la réalisation des dispositifs de puissance à base de GaN.

Le fonctionnement à haute fréquence est une conséquence de la mobilité élevée et donc de la vitesse de saturation élevée des porteurs dans ces semi-conducteurs. Le GaAs est l'un des semi-conducteurs ayant une forte mobilité électrique avec $\mu_n = 8500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ce qui permet aux transistors FET réalisés avec ce matériau, de fonctionner à très haute fréquence. Les mobilités des autres matériaux sont présentées dans le **Tableau I.2** qui présente leurs propriétés. Comparées à celle du GaAs, les mobilités des matériaux présentés dans ce tableau sont faibles mais suffisantes pour la montée à très haute fréquence[2].

La permittivité relative (ϵ_r), faible dans le cas du GaN, du SiC et du AlN, permet pour une même impédance de sortie des transistors, d'avoir une surface plus grande du composant que dans le cas du Si. En effet, pour des semi-conducteurs de mêmes dimensions et de permittivités différentes, le semi-conducteur de faible permittivité permet d'avoir des capacités beaucoup plus faibles d'où la possibilité d'augmenter la taille de ces dispositifs et d'obtenir une puissance de sortie plus importante sans dégrader les fréquences de coupure du composant. Les permittivités relatives basses fréquences des composés ternaires $A_xB_{1-x}N$ formés à partir du GaN, de AlN et de InN, peuvent être calculées à partir des équations 1.1, 1.2 et 1.3 obtenues par interpolation linéaire [3].

$$\varepsilon(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 0.03x + 10.28 \quad \text{-----} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = 4.33x + 10.28 \quad \text{-----} \quad (1.2)$$

$$\varepsilon(\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}) = -4.30x + 14.61 \quad \text{-----} \quad (1.3)$$

Propriétés	Si	GaAs	InP	GaN 2H	AlN	InN	SiC 4H	C Diamant
Bande interdite (eV)	1.1	1.4	1.3	3.4	6.2	0.7	3.3	5.5
Champ de claquage (MV.cm ⁻¹)	0.3	0.4	0.5	3.3	8.4	1.2	3.5	5.6
Constante diélectrique	11.8	11.5	12.5	9.5	10.3	14.3	10	5.5
Conductivité thermique (W.cm ⁻¹ K ⁻¹)	1.5	0.5	0.7	1.3	2	0.45	4.5	20
Mobilité électronique (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹)	1500	8500	5400	990	135	3.6	650	1900
Vitesse de saturation (10 ⁷ cm/s)	1	2	1	2.5	2.1	1.8	2	2.7

Tableau I-2: Propriétés physiques des différents matériaux semi-conducteurs à 300 K[2]

I.3. Structure cristalline

Les nitrures III-N à large bande interdite sont des composés binaires, ternaires et quaternaires formés d'élément III (B, Ga, Al, In) et de l'azote. Ces composés III-N peuvent présenter deux phases cristallines: la phase Blende de Zinc qui se compose de deux réseaux cubiques à faces centrées (Figure 1), l'un occupé par les éléments III et l'autre occupé par les atomes d'azote, décalé d'un quart de la diagonale; la phase wurtzite, formée de deux réseaux hexagonaux compacts, l'un occupé par les atomes III et l'autre occupé par les atomes d'azote, décalés suivant l'axe c d'une valeur de $3c/8$ (Figure 1)[4]. La phase wurtzite est la plus stable dans les conditions normales de croissance (sur substrat saphir, SiC,...).

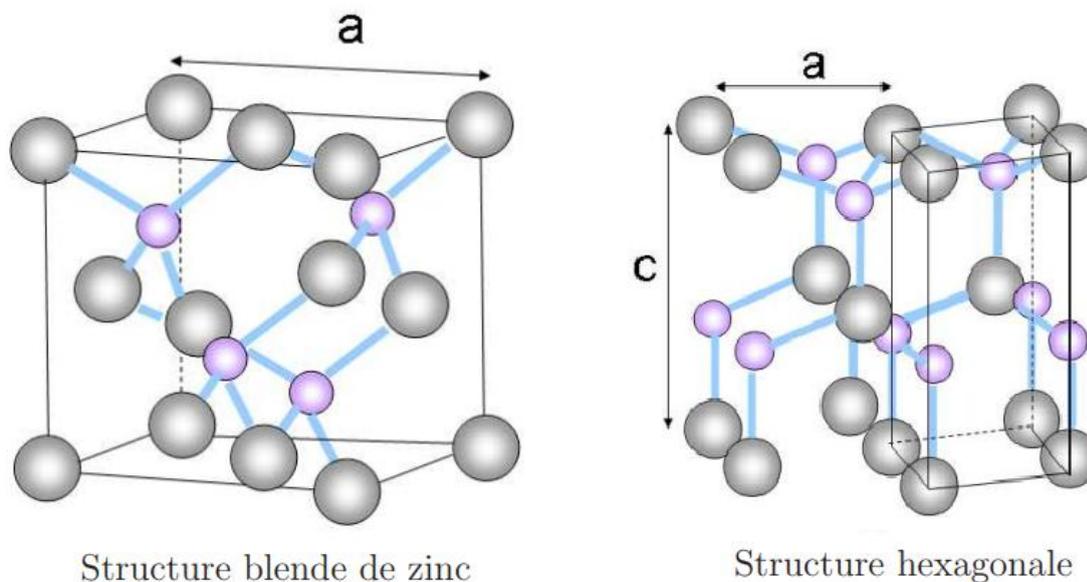


Figure I- 1:Les différentes structures cristallines pour les matériaux nitrurés[5]

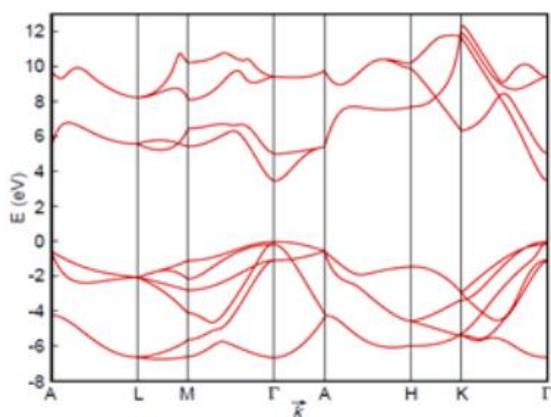
I.4. Structure de bande

L'allure générale des bandes est la même pour tous les composés III-N considérés. La structure de bandes est directe, c'est-à-dire que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont situés au centre de la zone de Brillouin ($k = 0$). Le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons ayant une faible masse effective, donc très mobiles[1].

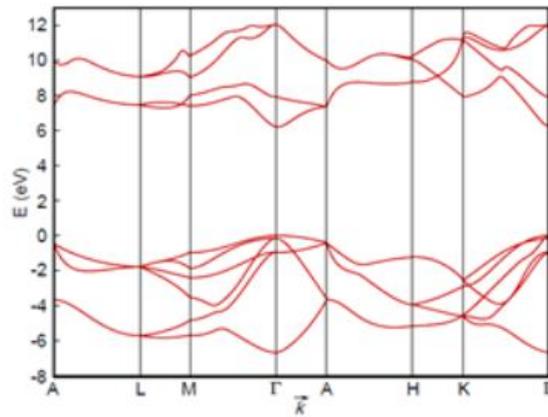
L'augmentation de la température entraîne une légère diminution de l'énergie de la bande interdite. En effet, comme le montre la Figure 1-3 qui présente le gap $E_g(T)$ en fonction de la température pour les 3 semi-conducteurs (GaN, AlN, InN), on a un comportement asymptotique (pente nulle) à faible température, une simple courbure dans une gamme de températures intermédiaires et une décroissance constante à température élevée. Parmi tous les modèles pseudo-empiriques développés pour décrire un tel comportement de $E_g(T)$, le modèle de Varshni[7] est le plus employé pour exprimer E_g dans la gamme de températures usuelles comme en réfère l'équation (I.4) :

$$\epsilon_g(T) = \epsilon_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \text{-----(1.4)}$$

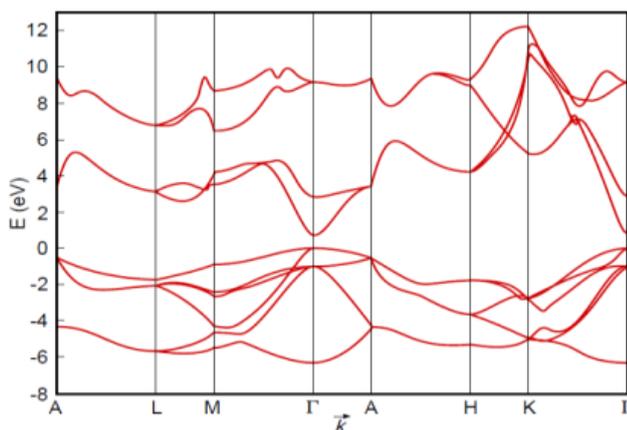
Où $\epsilon_g(0)$ est l'énergie de bande interdite à température nulle ; α et β sont des constantes déterminées expérimentalement (Tableau I-2).



a) Structure de bande du GaN



b) Structure de bande de l'AlN



c) Structure de bande de l'InN

Figure I- 2: Structures de bandes de GaN, AlN et InN dans leurs phases wurtzites[6]

Matériaux		$\epsilon_g(0k)$	$\epsilon_g(300k)$	α	β
AlN	Cubique	6 [24]	5.94 [27]	0.593 [24]	600 [24]
	Hexagonale	6.25 [25]	6.2 [26]	1.799 [25]	1462[25]
InN	Cubique	0.69 [28]	0.64 [28]	0.41 [28]	454 [28]
	Hexagonale	0.78[25][33]	0.8 [26] [29]	0.245 [25]	624 [25]
		1.89 [30]	0.64[34]	0.41[34]	454[34]
		0.69[34]	0.75[33]	0.245[33]	624[33]

Tableau I- 1:L'énergie de gap à T=0, 300 K et les paramètres α et β des deux nitrures AlN et InN[8]

Les alliages semi-conducteurs fournissent des moyens naturels d'accorder l'importance de gap interdit afin d'optimiser et élargir les applications des dispositifs semi-conducteurs. Les alliages semi-conducteurs III-N ont ouvert de nouvelles générations d'applications de dispositif pendant les dernières décennies [10] en augmentant considérablement les possibilités pour l'engineering des propriétés matérielles.

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires, il est possible de déterminer le gap d'énergie de ternaires en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure. La loi de Vegard est une loi empirique indiquant que les valeurs des propriétés d'un alliage (gap d'énergie, paramètre de maille, constantes élastiques, etc...) peuvent être déterminées par une interpolation linéaire des valeurs des propriétés de ses composants. Cependant, les valeurs mesurées peuvent dévier de l'interpolation linéaire à cause de la taille relative des constituants, du volume relatif par électron de valence, les effets de la zone de Brillouin, et des différences électrochimiques entre les éléments[8]. On doit alors introduire un paramètre de courbure dans l'expression afin de suivre les données expérimentales. La loi de Vegard avec paramètre de courbure est définie par :

$$\epsilon_g (A_xB_{1-x}N) = x\epsilon_g (A) + (1 - x) \epsilon_g(B) - b.x (1 - x) \text{ -----(1.5)}$$

Ou b est le paramètre de courbure qui prend en compte les non linéarités de la bande d'énergie interdite du composant ternaire.

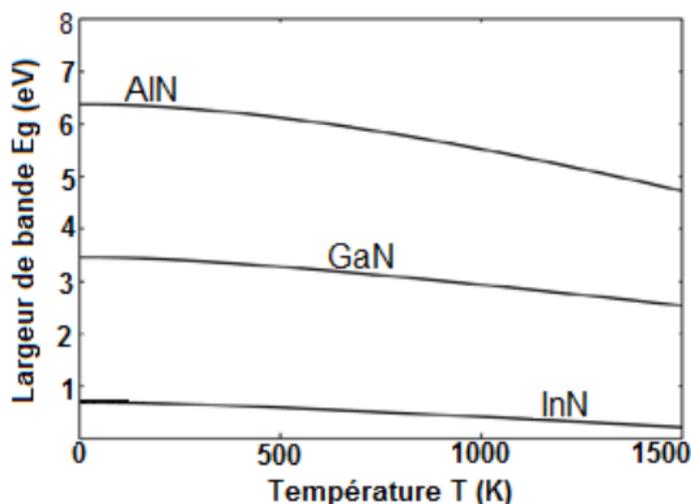


Figure I-3: Bande interdite E_g en fonction de la température T dans les semi-conducteurs binaires GaN, AlN et InN obtenue à partir du modèle de Varshmi[9]

La **Figure I-4** représente la variation de la largeur de bande interdite en fonction du paramètre de maille pour les 3 matériaux ternaires que nous avons évoqués. Il en résulte que l' $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}$ peut croître sans contrainte sur le GaN car ces deux matériaux sont parfaitement accordés en maille.

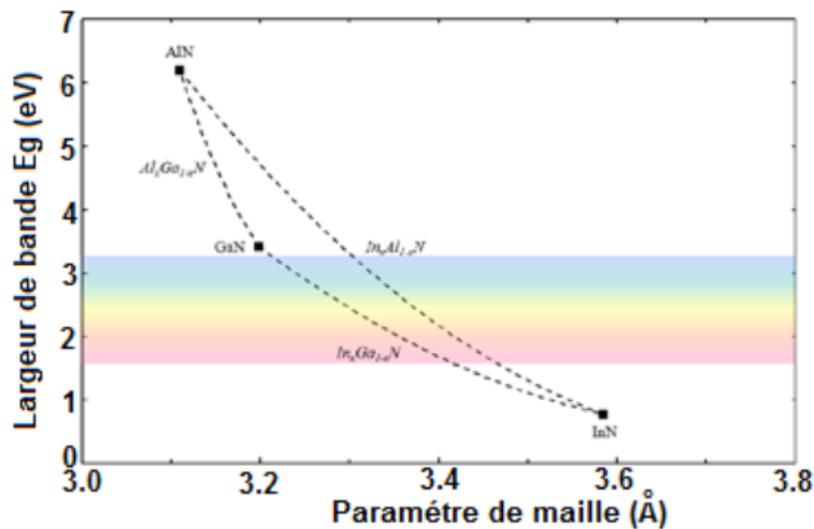


Figure I-4: Bandes d'énergie interdite pour différents matériaux Semi-conducteurs en fonction des paramètres de maille[9]

I.5. La mobilité des porteurs

La mobilité est une caractéristique très importante du matériau, car elle traduit la capacité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. C'est donc un facteur déterminant pour les dispositifs. Ceci est très important pour des domaines comme l'optoélectronique, ou les télécommunications[6].

A l'équilibre thermodynamique, le déplacement des électrons résulte de l'agitation thermique au sein du cristal. Il suit un mouvement brownien dont la composante moyenne du vecteur de vitesse est nulle. L'application d'un champ électrique à travers la structure apporte de l'énergie aux électrons et entraîne une vitesse moyenne non nulle et donc un déplacement cohérent des porteurs. Cette vitesse est appelée vitesse de dérive (ou drift velocity V_d). Cette évolution révèle deux régimes distincts séparés par un pic de survitesse. Le régime transitoire ou balistique est observé dans les premiers instants qui suivent l'application du champ électrique. Cette phase ne dure que quelques dizaines de femto seconds (fs) qui correspondent au temps de libre parcours moyen τ_m . Durant cette phase de transport, les

électrons sont accélérés sans rencontrer (statistiquement) de collision. Le régime de transport stationnaire intervient lorsque l'on atteint un équilibre entre l'accélération fournie par le champ électrique et la décélération engendrée principalement par les phénomènes d'interaction électrons-phonons optiques et l'augmentation de la masse effective. A la fin de cette phase, la vitesse des porteurs devient constante et atteint la vitesse de saturation v_{sat} . Entre les deux régimes, on observe un pic de vitesse présent pour les trois matériaux binaires III-N. Ce pic caractérise la vitesse maximale (v_{max}) atteinte mais aussi la valeur du champ électrique dit critique, à partir duquel la vitesse de dérive diminue jusqu'à atteindre la vitesse de saturation.

Lorsque le champ électrique augmente, on assiste à une hausse de la masse effective, due au transfert inter-vallée, ainsi qu'à une diminution du temps de libre parcours moyen. Nous présentons dans le **Tableau I-2** les différentes propriétés de transport volumique pour des matériaux binaires à 300K.

	GAN	AIN	InN
$v_{sat}(10^7 \text{ cm/s})$	1.75	1.5	1.4
$v_{max}(10^7 \text{ cm/s})$	2.9	1.7	6
$E_{crit}(KV/cm)$	140	450	22.5
$\mu(\text{cm}^2/V.s)$	880	130	10000

**Tableau I-2: Propriétés de transport volumique à 300K
pour les matériaux binaires nitrurés[6]**

I.5. 1. Modèle de mobilité à faible champ

Pour proposer une expression analytique simple, représentative de l'évolution de la mobilité des porteurs en fonction de la température et du niveau de dopage, des modèles ont pu être développés à partir de la méthode de Caughey-Thomas.

Farahmand et al. Développent un modèle de mobilité différentielle négative (NDM) pour GaN, InN, AIN[11-12] en utilisant les simulations Monte Carlo (MC); il est donc appelé Modèle de

mobilité Farahmand modifié Caughey-Thomas (FMCT) [13-14]:

$$\mu_0(T, N) = \mu_{min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_1} \frac{(\mu_{max} - \mu_{min}) \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_2}}{1 + \left[\frac{N}{N_{ref} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_3}} \right]^{\alpha \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_4}}} \quad (1.6)$$

Avec T est la température, N est la densité de dopage totale, et $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \mu_{min}, \mu_{max}$ et N_{ref} sont des paramètres qui peuvent être déterminé soit par expérience, soit par simulation de Monte Carlo. Ce modèle de mobilité à faible champ est adapté aux concentrations de dopage de 1×10^{16} jusqu'à $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $N_{ref} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

I.5. 2. Modèle de mobilité à fort champ

Dans la gamme de champs faibles, la mobilité μ_0 était indépendante du champ électrique, c'est-à-dire que la vitesse moyenne de dérive des porteurs était strictement proportionnelle à l'intensité du champ :

$$v = \mu_0 \cdot E \quad (1.7)$$

Ceci n'est plus vrai pour les champs électriques intenses : pour des valeurs de champ supérieures à 10^3 V/cm , la mobilité n'est plus indépendante du champ électrique; elle décroît lorsque l'intensité du champ croît. La vitesse de dérive des porteurs n'augmente alors plus de manière linéaire avec le champ électrique. Enfin, au-delà d'un champ de 10^5 V/cm d'intensité, la mobilité moyenne des porteurs décroît selon une loi inversement proportionnelle au champ électrique, ce qui signifie que la vitesse de dérive des porteurs est constante : les porteurs libres ont alors atteint leur vitesse limite, ou vitesse de saturation.

Dans le modèle de mobilité Farahmand modifié Caughey-Thomas (FMCT), la mobilité à fort champ est donnée par [12-15]:

$$\mu = \frac{\mu_0 + v_{sat} (E^{\delta-1} / E_C^\delta)}{1 + \alpha (E/E_C)^\gamma + (E/E_C)^\delta} \quad (1.8)$$

Où μ_0 est mobilité à faible champ. Il y a cinq paramètres dans le nouveau modèle, qui sont déterminés à partir des résultats de notre simulation de Monte Carlo. Ces paramètres sont v_{sat} , E_c , δ , γ et α avec v_{sat} la vitesse de saturation des porteurs, E_c le champ critique, et δ , γ et α des paramètres de fit.

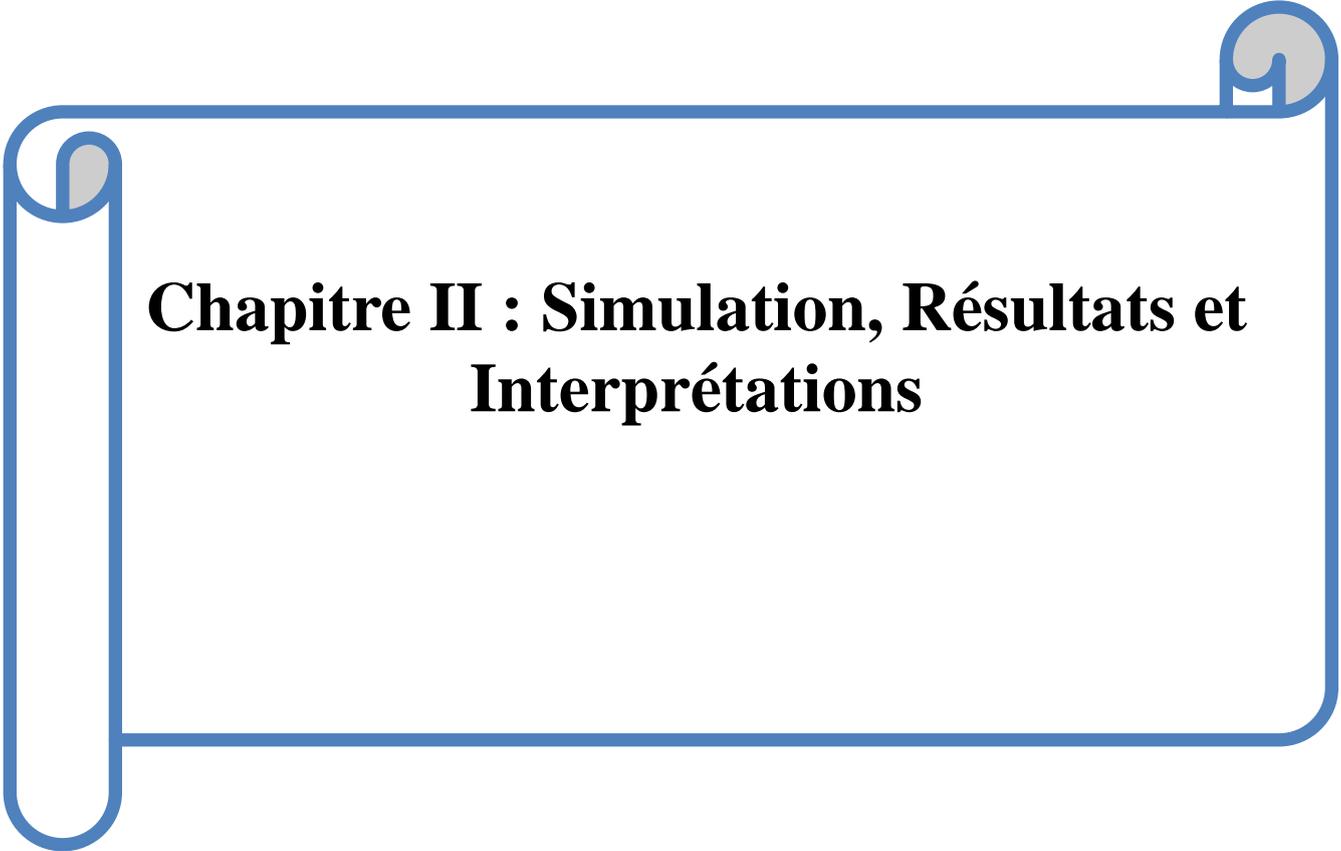
I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu de quelques propriétés physiques et électroniques des semi-conducteurs Nitruré tel que vitesse de saturation, mobilité des électrons, largeur de la bande interdite. Ensuite, nous présentons des différents modèles à faibles champs et forts champs qui permettent l'étude de la mobilité des différents matériaux.

I.7. Références Bibliographiques

- [1] Xiao TANG, « Optimisation théorique et expérimentale de composants hyperfréquences de la filière Nitrure de Gallium à partir d'études physico-thermiques et électriques », Docteur de l'Université en Micro et nanotechnologies, Acoustique et Télécommunication, Universités des sciences et technologies de Lille, 22 Janvier 2010.
- [2] Séraphin Dieudonné Nsele, « Analyse électrique et en bruit basse fréquence et haute-fréquence des technologies InAlN/GaNHEMTs en vue de la conception d'amplificateurs robustes faible bruit en bande Ka. », Doctorat en Micro et nanotechnologies/Microélectronique, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2014.
- [3] F. Bernardini, V. Fiorentini, « Polarization-Based Calculation of the Dielectric Tensor of Polar Crystals », Phys. Rev. Lett., vol. 79, no. 3958, 1997.
- [4] Twfik Baghdadli, « Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique », Docteur en physique énergétique et matériaux, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2009.
- [5] Sophie BARBET, « Etude par microscopie à champ proche de matériaux III-N pour émetteurs électroniques planaires », Docteur de l'Université en Molécules et Matière Condensée, Université des Sciences et Technologies de Lille, 3 mars 2008.
- [6] Alain AGBOTON, « Etudes théoriques et expérimentales de dispositifs à hétérojonction AL(GA,IN)N/GAN pour des applications de puissances en bande Q (40.5-43.5GHZ) », Docteur de l'Université en Micro et nanotechnologies, acoustique et télécommunications, Université de Lille 1, 01/07/2016.
- [7] Y. P. Varshni, « Temperature dependence of the energy gap in semiconductors », vol. 34, Physica, 1967, pp. 149-154.
- [8] AMER Bensaber Wafaa et AOUS Samia, « Propriétés physiques et électroniques de semi-conducteur à grand Gap : Carbure de Silicium », Master en Génie des Télécommunications, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [9] F. Lecourt, « hétérostructure AlGaIn/GaN et InAlN/GaN pour la réalisation de HEMTs de puissance Hyperfréquence en bande Ka », Ph.D. dissertation université de Lille 1, 2012.
- [10] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan, J. Appl. Phys. 89, 5815 (2001) And References Cited Therein.
- [11] R. Liu, A. Bell, F. A. Ponce, C. Q. Chen, J. W. Yang, And M. A. Khan, « Luminescence From Stacking Faults In Gallium Nitride. », Applied Physics Letter 86, 021908 (2005).

- [12] M. Farahmand, C. Garetto, E. Bellotti, K. F. Brennan, M. Goano, E. Ghillino, G. Ghione, J. D. Albrecht, And P. P. Ruden, « Monte Carlo Simulation Of Electron Transport In The III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries And Ternaries. », IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 48, No. 3, Pp. 535–542, Mar. 2001.
- [13] T. J. Ochalski, B. Gil, P. Lefebvre, N. Grandjean, J. Massies, S. Nakamura, And H. Morko₂C, « Photorefectance Investigations Of The Bowing Parameter In AlGa_N Allows Lattice-Matched to GaN », Applied Physics Letter 74, 3353 (1999).
- [14] W. Shan, J. W. A. III, K. M. Wu, W. Walukiewicz, E. E. Haller, M. C. Martin, W. R. Mckinney, And W. Yang, « Dependence of the fundamental band gap of Al_xGa_{1-x}N On Alloy Composition And Pressure. », Applied Physics Letter 84, 4452 (1998).
- [15] Lin-An Yang, Yue Hao, Improved, « Negative Differential Mobility Model Of GaN And AlGa_N for a Terahertz Gunn Diode », IEEE Transactions on Electron Devices, 2011.



Chapitre II : Simulation, Résultats et Interprétations

II.1. Introduction

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs III-N constituent une classe bien définie, avec des propriétés électronique particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs. Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs III-N interviennent dans presque tous les équipements électriques et optiques.

L'intérêt principal du chapitre présent sera d'étudier le comportement des matériaux III-N du point de vue microscopique. Pour cela, comme expliqué dans le chapitre précédent, nous utilisons le logiciel commercial MATLAB R2011b, permettant de calculer les principales grandeurs physiques qui caractérisent le transport électronique tout en mettant en évidence les principaux effets physiques qui interviennent dans ces matériaux. Notre travail repose sur l'analyse du comportement des électrons soumis à différentes excitations dans les matériaux tels que le nitrure de aluminium (AlN), le nitrure d'Indium (InN) et leur composé ternaire ($\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$).

II.2. Variation de la bande interdite avec la température

L'influence de la température dans les matériaux utilisés se traduit par une évolution de leurs propriétés physiques qui réduits les performances du composant[1]. La largeur de la bande interdite est l'une des principales caractéristiques de tout semi-conducteur, et connaissant sa valeur, on arrive à contrôler ses propriétés. Les paramètres de cette équation pour les matériaux AlN et InN sont donnés dans le **Tableau II.1**.

Matériaux		$\varepsilon_g(0\text{K})$	$\varepsilon_g(300\text{ K})$	α	β
AlN	cubique	6	5.941	0.593	600
	hexagonale	6.25	6.158	1.799	1462
InN	cubique	0.69	0.641	0.41	454
	hexagonale	0.78	0.756	0.245	624

Tableau II- 1: Coefficients de Varshni des matériaux InN et AlN[2]

La variation de la bande interdite des matériaux AlN et InN en fonction de la température est représentée sur les **Figures II.1** et **II.2**.

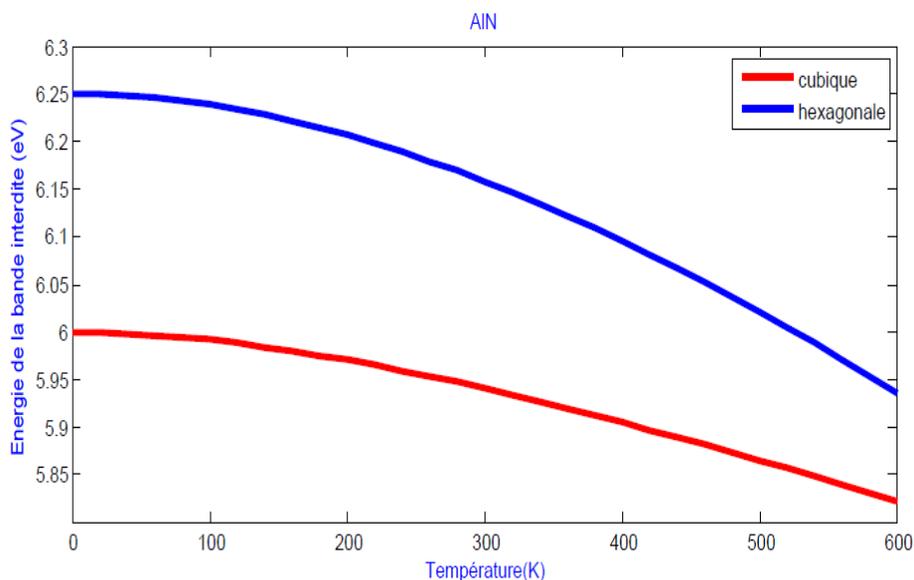


Figure II-1: la variation de la bande interdite de AlN en fonction de la température.

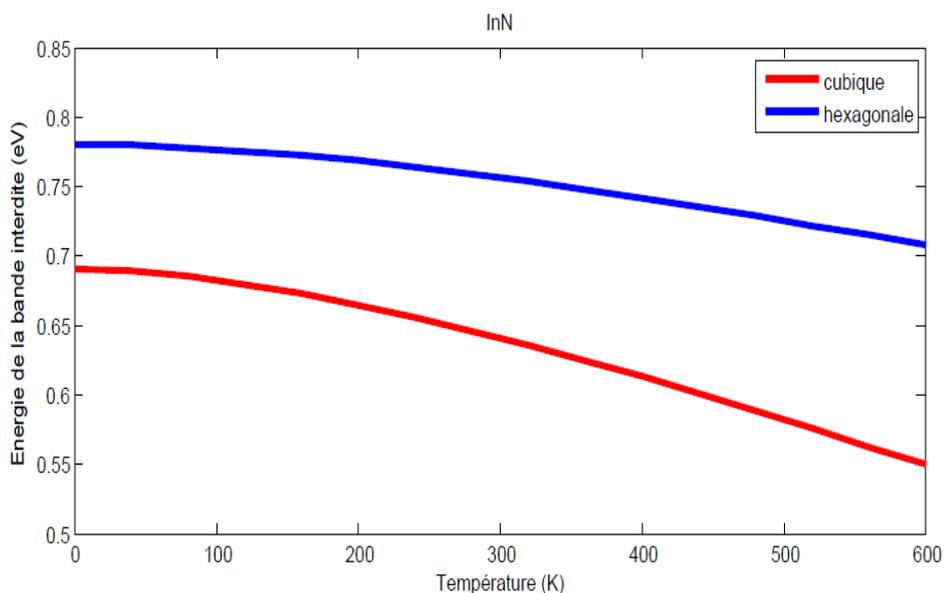


Figure II-2: la variation de la bande interdite d'InN en fonction de la température.

Classiquement on observe une diminution de l'énergie de bande interdite lorsque la température augmente. Deux mécanismes sont à l'origine de ce phénomène [3]:

- **La dilatation thermique**, modifie les distances interatomiques dans le réseau cristallin, ce qui va engendrer une modification des positions de la bande de valence et de la bande de conduction. Ce phénomène est à l'origine d'environ $\frac{1}{4}$ de la variation totale de la bande interdite en fonction de la température.
- **Les interactions électron-phonon**, elles aussi modifient la largeur de bande interdite. Ce sont elles qui ont la principale contribution à cette variation.

Les études expérimentales montrent que ce modèle reflète bien la variation de gap à haute température, moins bien à basse température car il fournit des valeurs légèrement trop élevées par rapport aux valeurs expérimentales[3].

II.3. Influence de la température sur la mobilité des porteurs de charge

II.3.1. La mobilité en fonction de la température de InN et AlN

La mobilité électronique est un paramètre crucial pour caractériser le transport des charges dans les hétérostructures, qui rend compte de la qualité de l'hétéro épitaxie et détermine les performances du composant[1].

Les interactions des porteurs avec les vibrations du réseau, phonons acoustiques et phonons optiques entraînent une diminution de la mobilité des porteurs. Puisque la densité des phonons est directement liée à la température du matériau [4-5-6], la mobilité des électrons dépend de la température.

Matériaux	μ_{min} ($cm^2/V.s$)	μ_{max} ($cm^2/V.s$)	α	β_1	β_2	β_3	β_4
InN	774	3138.4	0.68	-6.39	-1.81	-8.05	-0.94
AlN	297.8	683.8	1.16	-1.82	-3.43	3.78	0.86

Tableau II-2: Paramètres de l'équation de FMCT pour la phase hexagonale

du InN et AlN à $10^{17} cm^{-3}$ [7]

D'après l'Equation I.6 (chapitre 1), on peut tracer l'évolution de la mobilité en fonction de la concentration de porteurs pour des températures comprises entre 300K et 600K en utilisant les paramètres de l'équation d'ajustement pour la phase hexagonale du InN, et AlN (**Tableau II.2**). Les courbes sont représentées sur les **Figures II.3** et **II.4**. On remarque que la mobilité des porteurs diminue avec l'augmentation du dopage et de la température.

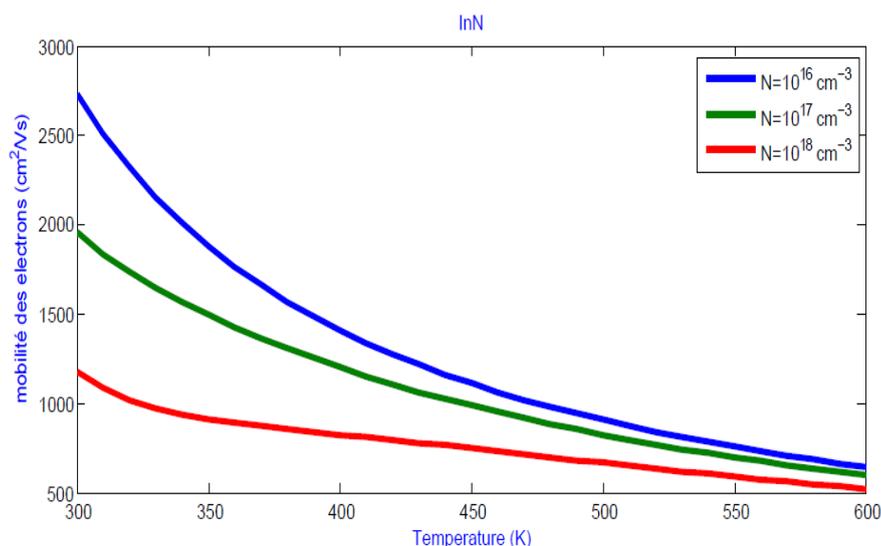


Figure II-3: La mobilité d'AlN en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.

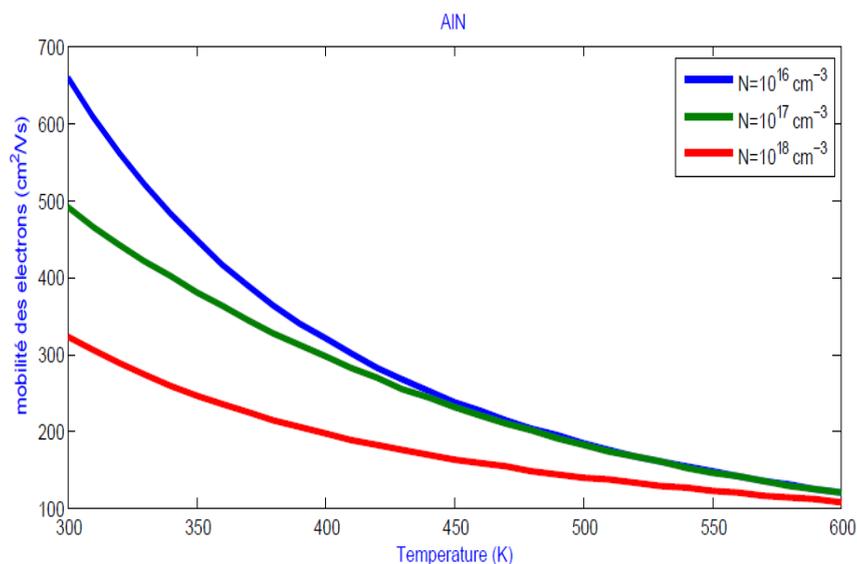


Figure II-4: La mobilité d'InN en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.

La mobilité dans InN à 300 K varie de $2700 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à $1200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Dans le cas de AlN, elle varie de $658.8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à $322.8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Cela est dû en partie à la masse effective qui est plus grande dans la vallée centrale dans AlN ($0.20 m_0$), comparée au InN ($0.11 m_0$). De plus ; à l'augmentation du phénomène de diffusion des porteurs.

II.3.2. La vitesse en fonction du champ électrique de InN et AlN

La **Figure III.5**, montre en fonction du champ électrique, les vitesses de dérivé pour différentes température de InN et AlN. En remarque que la vitesse change sensiblement à mesure que la température augmente. La vitesse de InN est extraordinairement élevée, autour de $4.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$, à un champ électrique de 40 kV/cm à 300 K . Ceci représente une vitesse de dérive maximale la plus élevée pour un semi-conducteur III-N, alors que pour AlN, une vitesse de dérive maximale de $3.17 \times 10^7 \text{ cm/s}$ se produit à un champ électrique d'environ 620 kV/cm .

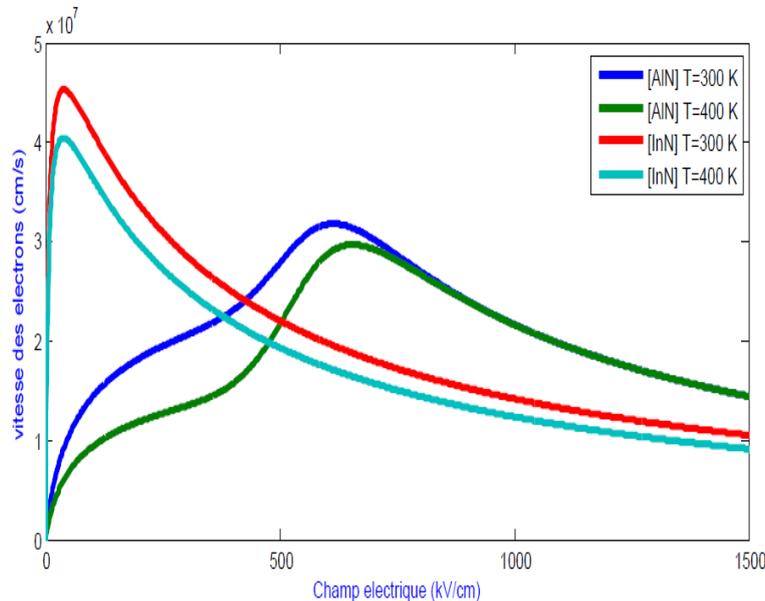


Figure II-5: La vitesse des électrons dans AlN et InN en fonction du champ électrique pour différentes températures.

Le pic de vitesse dans InN à 300 K varie de $4.52 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ à $4 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ pour 400 K. Dans le cas de AlN, elle varie de $658.8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à $322.8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

³. Pour 300 K, la vitesse de saturation diminue de $1.4 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ jusqu'à $1 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ pour 400 K pour InN.

Pour des températures allant jusqu'à 300 K, la bosse dans les caractéristiques de la vitesse de dérive est liée à la présence de la dispersion des impuretés. Aux températures élevées, la bosse disparaît, due à la dominance de la dispersion des phonons optiques polaires avec une réduction dans la dispersion des impuretés. Le transport à champ élevé, est dominé par les dispersions des phonons optiques polaires et intervallées qui ont une faible dépendance de la température du réseau.

II.3.3. l'effet de la diffusion d'alliage sur la mobilité du composé ternaire $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$

Pour mettre en évidence l'effet de la diffusion d'alliage, on a tracé la mobilité électronique calculée en fonction de la température pour trois concentrations différentes de donneurs ionisés égales à 10^{15} , 10^{16} et 10^{17} cm^{-3} (Figures II.6 et II.7) avec et sans la diffusion d'alliage.

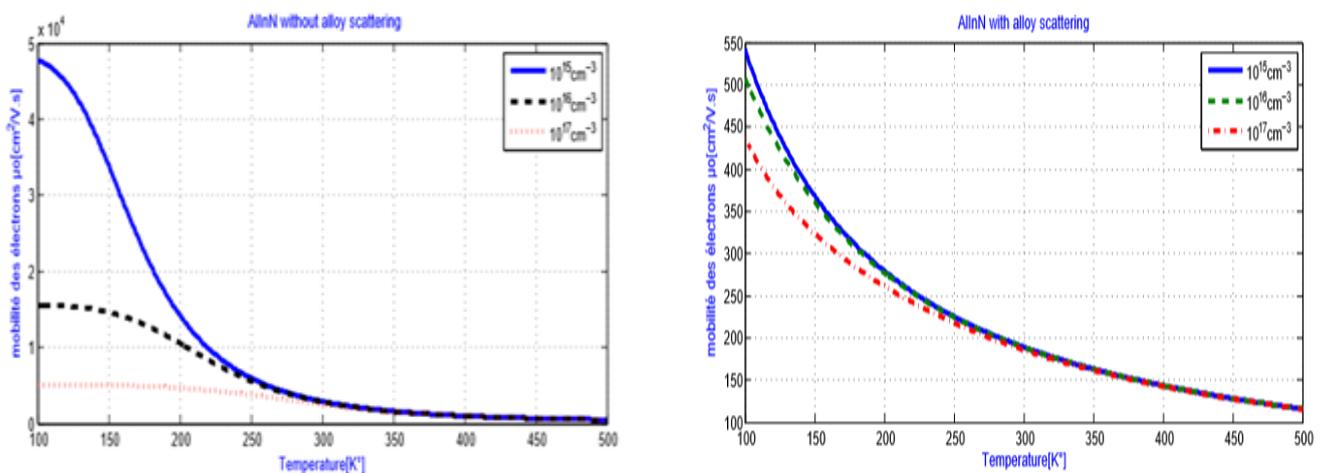


Figure II-6: La mobilité des électrons d' $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.

Dans tous les cas, la mobilité diminue avec l'augmentation de la température. En dessous de 300 K, la diffusion d'impuretés limite la valeur de mobilité maximale. On peut également remarquer qu'en l'absence de la diffusion d'alliages, la diffusion des impuretés domine et la mobilité diminue à mesure que la densité des donneurs augmente, en particulier à basse température. À des températures

plus élevées (supérieures à 300 K) l'effet de la diffusion d'impuretés sur la mobilité électronique est minime et sa valeur est déterminée par la force de la diffusion des phonons.

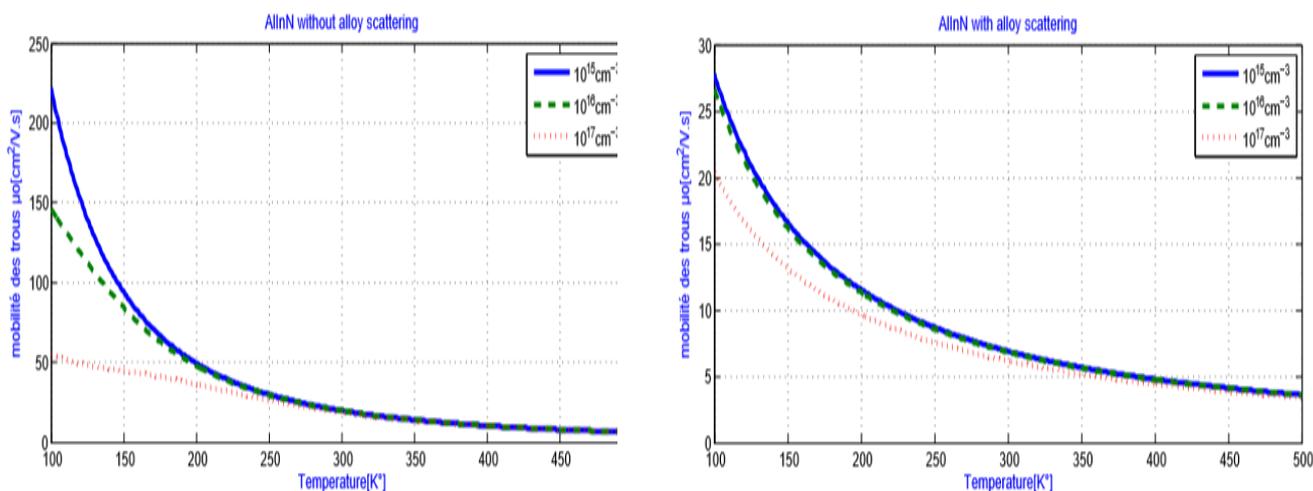


Figure II-7: La mobilité des trous d' $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ en fonction de la température pour différentes valeurs de dopage.

Cependant, si nous considérons l'effet de la diffusion de l'alliage, nous observons un changement significatif dans le résultat. Une vitesse de dérive nettement inférieure est observée lorsque la diffusion d'alliage est présente, ce qui est simplement le résultat d'un taux de diffusion total très élevé.

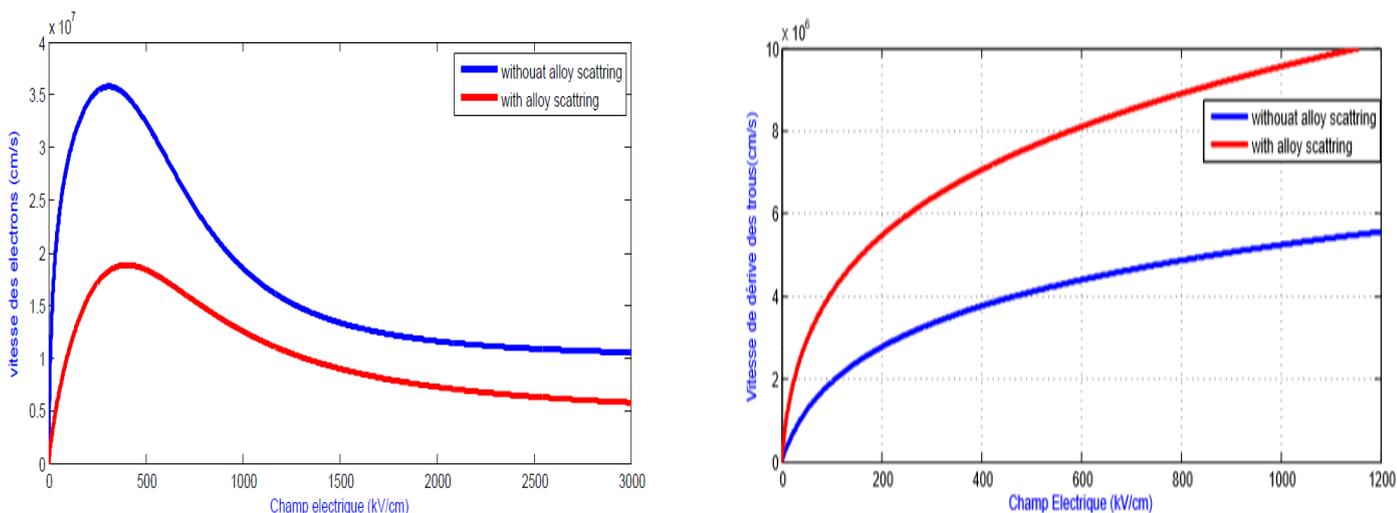


Figure II-8: La vitesse des électrons et les trous dans $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ en fonction du champ électrique.

En outre, en présence d'une diffusion en alliage, le pic de la vitesse des électrons se produit à un champ appliqué plus élevé par rapport au cas où la diffusion en alliage est négligée. Ceci est également dû au fait qu'en présence de diffusion d'alliage. Le taux de diffusion total est plus élevé, il faut donc un champ plus élevé pour chauffer les porteurs avant le début du transfert par intervalles.

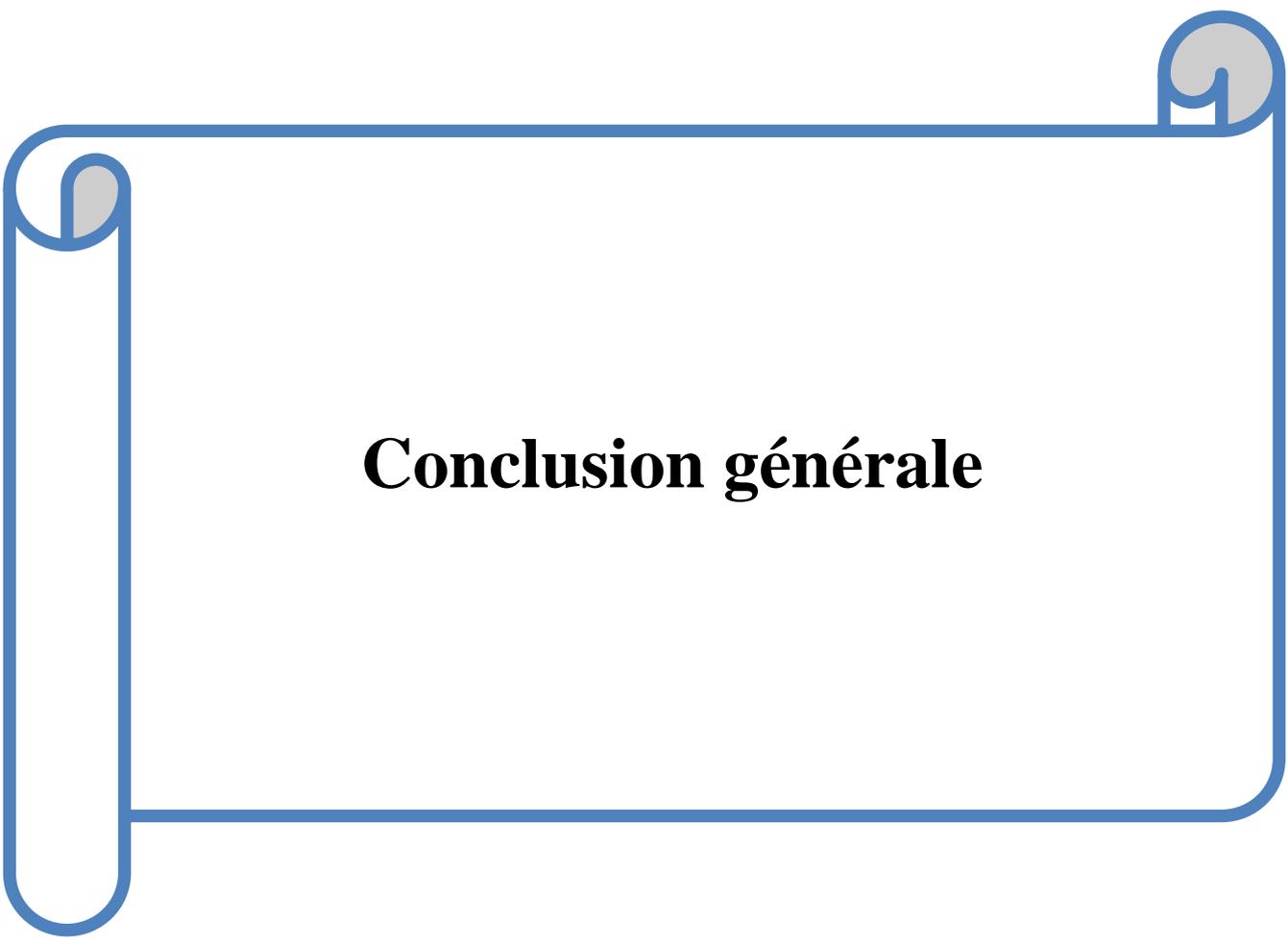
Les vitesses de dérive des électrons en fonction du champ électrique ont également été calculées pour $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$. Nous avons considéré le cas d'une température de réseau égale à 300K et d'une densité d'impuretés ionisées égale à 10^{17}cm^{-3} . La **Figure II.8** présente la variation de la vitesse de dérive des électrons et les trous en fonction du champ électrique lorsque la diffusion de l'alliage est négligée (courbe bleu) et incluse (courbe rouge). Comme on peut le constater immédiatement, il y a un changement significatif lorsque la diffusion de l'alliage est présente, De manière similaire à la situation rencontrée lors de l'analyse des résultats de mobilité, la diffusion de l'alliage est le processus dominant également pour limiter la vitesse de dérive maximale. En outre, lorsque la diffusion de l'alliage est incluse, la vitesse de peak se produit avec un champ électrique appliqué légèrement supérieur (275 kV cm^{-1}) par rapport au cas où il n'y a pas de diffusion de l'alliage (400 kV cm^{-1}). En l'absence d'effet d'alliage, les électrons peuvent potentiellement atteindre une vitesse de dérive de pic significatif, supérieure à $3.5 \times 10^7\text{cm s}^{-1}$. Une fois le gain réalisé, la présence de l'interaction des électrons avec l'alliage entraîne une réduction significative, jusqu'à un facteur deux, de la vitesse de dérive.

II.4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié les propriétés de transport des matériaux binaires et ternaires nitrurés. Nous avons constaté que les mobilités des deux porteurs sont limitées par le phénomène de diffusion de l'alliage. De plus, on prévoit que la mobilité des électrons à la température ambiante sera d'environ $175\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, tandis que pour les trous, la mobilité calculée à la même température sera d'environ $7\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Nous avons également calculé la vitesse de dérive des porteurs. La vitesse électronique maximale pour l'électron est de $1.9 \times 10^7\text{ cm s}^{-1}$, atteinte à une intensité de champ électrique de 400 kV cm^{-1} . Dans le cas de trous, nous prédisons une vitesse de saturation juste supérieure à $0,5 \cdot 10^7\text{cm. s}^{-1}$.

II.5. Références Bibliographiques :

- [1] Mohsine BOUYA, « Etude des mécanismes de défaillances et de transport dans les structures HEMTs AlGa_N/Ga_N. », DOCTEUR en Electronique, UNIVERSITE BORDEAUX 1, 21 juillet 2010.
- [2] AMER Bensaber Wafaa et AOUS Samia, « Propriétés physiques et électroniques de semi-Conducteur à grand Gap : Carbure de Silicium. », Master en Génie des Télécommunications, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [3] Stéphane Fanget, « Matériaux et Hétérostructures à base de Nitrures d'éléments III en phase cubique et hexagonale pour l'optoélectronique », doctorat en dispositifs de l'électronique intégrée, Université Joseph Fourier (Grenoble), 2002.
- [4] A.F.M. Anwar, « Temperature dependent transport properties in Ga_N, Al_xGa_{1-x}N, and In_xGa_{1-x}N semiconductor », IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.48, N0.3, pp. 567-572, March 2001.
- [5] L.Hsu, W.Walukiewicz, « Electron mobility in AlGa_N/Ga_N heterostructures », Physical review B, Vol 56, N° 3, pp 1520-1528, July 1997.
- [6] F.Semond, P.Lorenzini, N.Grandjean, J.Massies, « High-electron-mobility of AlGa_N/Ga_N heterostructure on Si(111) by molecular-beam epitaxy », Applied Physics Letters, Vol. 78, N0 3, pp. 335-337, Janvier 2001.
- [7] M. Farahmand, C. Garetto, E. Bellotti, K. F. Brennan, M. Goano, E. Ghillino, G. Ghione, J. D. Albrecht, And P. P. Ruden, « Monte Carlo Simulation Of Electron Transport In The III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries And Ternaries. », IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 48, No. 3, Pp. 535–542, Mar. 2001.



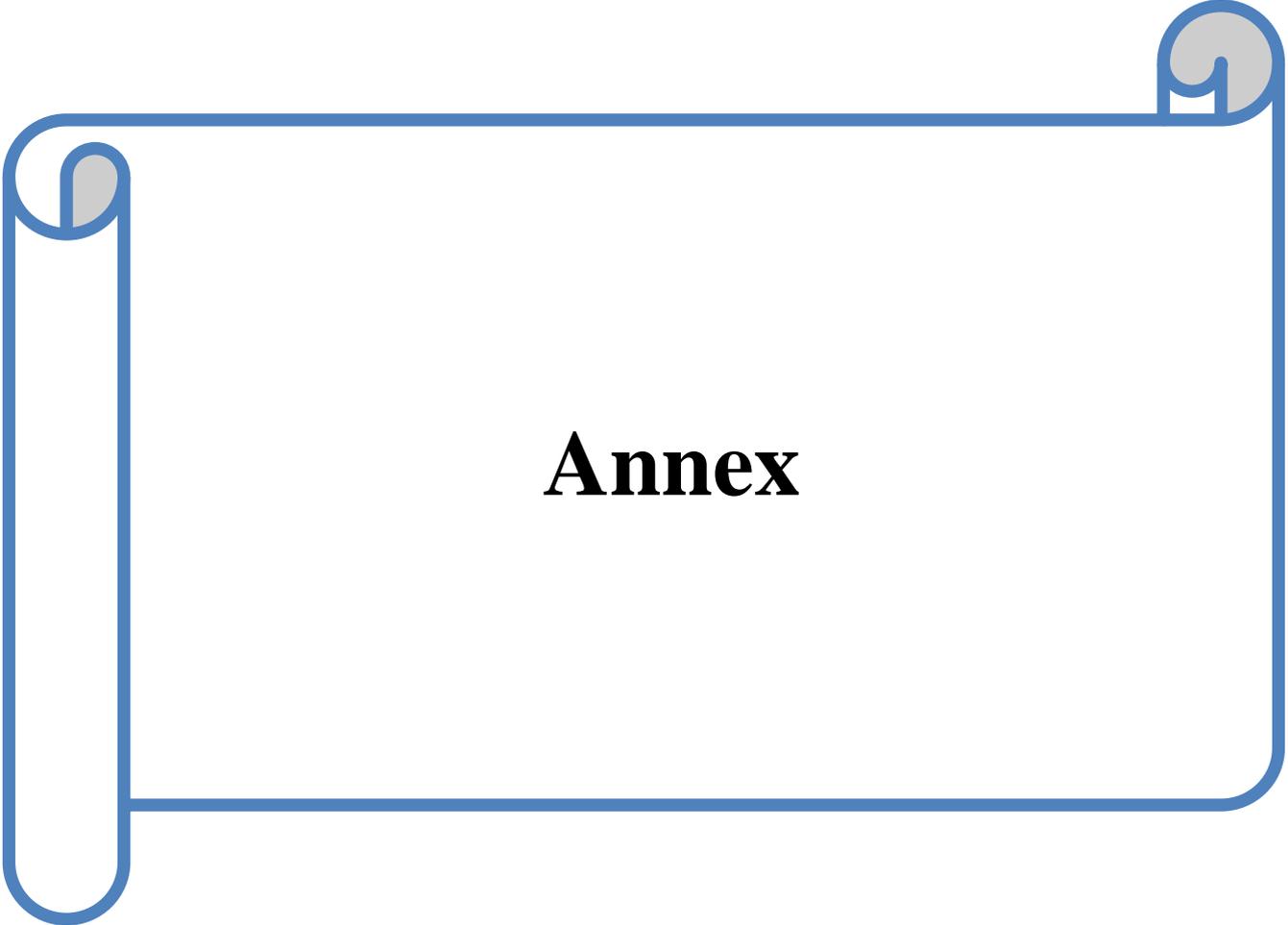
Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de ce travail, l'étude des propriétés de transport des semi-conducteurs nitrurés à large bande interdite en particulier les matériaux InN, AlN et $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ a été effectuée. L'un des points importants de cette étude consiste à l'extraction des paramètres de transport tels que la vitesse et la mobilité des électrons en utilisant le modèle de Caughey-Thomas dans le but d'approfondir la connaissance de ces matériaux. Ce modèle permet de représenter l'évolution de la mobilité des porteurs en fonction de la température et du niveau de dopage.

Les résultats obtenus par cette simulation dépendent fortement des propriétés du semi-conducteur surtout de la structure de bande ainsi que les paramètres constituant cet alliage. Pour certains paramètres, il y a aussi plusieurs méthodes de leurs calculs et chaque calcul aboutit à des résultats qui sont des fois différentes des résultats obtenus par d'autre méthode. Alors dans ce cas, le choix de ces paramètres s'avère très difficile. Ces résultats ne sont pas toujours exacts et restent purement théoriques, alors il faut toujours les comparés avec des résultats existant dans la littérature.

Les perspectives de ce travail concernent l'étude d'autres semi-conducteurs ternaires à base de nitrure. Cette étude est alors transposable à n'importe lequel de ces composés. Il sera alors intéressant de faire des études comparatives des propriétés présentées par ces matériaux afin de choisir celui qui sera le plus approprié à l'application envisagée au niveau du composant, avant toute réalisation technologique.



Annex

I.8. Structure cristalline

Les nitrures d'éléments III sont formés par l'association d'un élément de la colonne III (Gallium (Ga), Indium (In), Aluminium (Al), ...) et de l'Azote (N) de la classification de Mendeleïev (**Tableau I.5**). Il s'agit du nitrure de gallium (GaN), du nitrure d'indium (InN), du nitrure d'aluminium (AlN) et leurs alliages ternaires (AlGaN, InGaN, ...) et quaternaires (InAlGaN).

		III	IV	V	VI	VII
		B	C	N	O	F
		Al	Si	P	S	Cl
I	II	Ga	Ge	As	Se	Br
Cu	Zn	In	Sn	Sb	Te	I
Ag	Cd	Tl	Pb	Pb	Po	At
Au	Hg					

Tableau I.5: les classification de Mendeleïev de (GaN, InN et AlN).

Les nitrures d'éléments III peuvent exister sous deux formes cristallines différentes: la structure Zinc-blende (cubique) et la structure Wurtzite (hexagonale) toutes deux représentées sur les **Figures I.4 et I.5**.

Résumé

Au cours de ce travail, Nous avons étudié les propriétés de transport du semi-conducteur III-N en particulier . Nous avons essentiellement utilisé la modélisation analytique (Caughey-Thomas) dans le but de faire une comparaison des résultats obtenus par ces derniers. On détermine leurs bandes interdites, vitesses de dérive et la mobilité des porteurs. Dans cette étude, nous serons amenés à mettre en évidence l'influence de la température, la présence d'impuretés au sein du réseau cristalline du potentiel d'alliage sur la caractéristique du transport électronique des matériaux ternaires $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$.

Mot clé: Propriétés de transport, Semi-conducteur III-N , AlN , InN , $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$, Mobilité des porteurs, Vitesses de dérive.

Abstract

During this work, we have studied the transport properties of the III-N semiconductor, in particular AlN , InN and $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$. We essentially used the analytical modeling (Caughey-Thomas) in order to make a comparison of the results obtained by them. Their band gaps, drift velocities and carrier mobility are determined. In this study, we will highlight the influence of temperature, the presence of impurities in the crystal lattice and alloy potential on the characteristic of the electronic transport of ternary materials $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$.

Keyword: Transport properties, Semiconductor III-N, AlN , InN , $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$, Carrier mobility, Drift velocities.

ملخص

خلال هذا العمل ، درسنا خصائص نقل أشباه الموصلات III-N ، و لا سيما AlN و InN و $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$. استخدمنا بشكل أساسي النمذجة التحليلية (Caughey-Thomas) من أجل إجراء مقارنة للنتائج التي حصلت عليها. يتم تحديد الفجوات الفرقة، سرعات الانجراف و التنقل الناقل . في هذه الدراسة ، سوف نسلط الضوء على تأثير درجة الحرارة، وجود شوائب في الشبكة البلورية لإمكانات السبيكة على خاصية النقل الإلكتروني للمواد الثلاثية $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$.

الكلمات الرئيسية: خصائص النقل، أشباه الموصلات III-N، AlN ، InN ، $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ ، حاملات الناقل، سرعات الانجراف.