



HAL
open science

Etude de l'effet du piégeage sur les caractéristiques des composants AlGaN/GaN

Maroun Alam

► **To cite this version:**

Maroun Alam. Etude de l'effet du piégeage sur les caractéristiques des composants AlGaN/GaN. 16ème Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE-2022), Jun 2022, Le Croisic, France. hal-03946176

HAL Id: hal-03946176

<https://hal.science/hal-03946176v1>

Submitted on 15 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de l'effet du piégeage sur les caractéristiques des composants AlGaN/GaN

Maroun ALAM

Université de Lyon, INSA-Lyon, Laboratoire Ampère, 21 avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex, France
maroun.alam@insa-lyon.fr

RESUME – Le développement des composants en nitrure de gallium (GaN) est l'un des progrès les plus notables dans l'électronique de puissance et pour les applications à haute fréquence. Il en est de même pour autres technologies de semi-conducteurs à large bande interdite telles que le carbure de silicium. Néanmoins, les composants GaN ne sont pas encore totalement fiables surtout à cause du phénomène de piégeage qui affecte les caractéristiques statiques des composants GaN dont la résistance à l'état passant.

Cette étude vise à identifier l'influence des pièges localisés dans des différentes régions de la structure des dispositifs GaN, sur le courant et la résistance dynamique (R_{dyn}) à l'état passant des dispositifs à base d'un canal 2DEG (Two Dimensional Electron Gas), comme les diodes Schottky AlGaN/GaN et des transistors HEMT. Elle s'appuie sur des simulations par éléments finis avec le logiciel Sentaurus TCAD.

Nos résultats ont montré une dégradation majeure de la résistance dynamique à partir des concentrations des pièges de 10^{18} cm^{-3} localisés dans la couche GaN Channel et AlGaN. En outre, R_{dyn} varie en fonction de l'énergie d'activation des pièges. Concernant les pièges localisés à l'interface AlGaN/GaN, R_{dyn} varie fortement à partir d'une concentration de 10^{12} cm^{-2} .

MOTS-CLES – électronique de puissance - piégeage - 2DEG (Two Dimensional Electron Gas) - simulations par éléments finis - diodes Schottky AlGaN/GaN - transistors HEMT- Logiciel Sentaurus

1. Introduction

Les transistors HEMT (High Electron Mobility Transistor) à base de GaN sont apparus comme des candidats très attractifs pour le fonctionnement à haute température, haute fréquence et haute puissance [1]. Cependant, ces transistors ne sont pas encore totalement fiables et ils sont en cours de développement et d'amélioration.

Le phénomène de piégeage est l'un des plus grands problèmes qui limite les performances des HEMT notamment la résistance à l'état passant. La dégradation de la résistance dynamique s'induit après l'application d'une haute tension à l'état bloqué qui permet de piéger les électrons dans des différentes régions ainsi qu'un changement de la densité des électrons dans le canal 2DEG.

La simulation par éléments finis en utilisant le logiciel Synopsys Sentaurus TCAD (Technology Computer-Aided Design) permet d'étudier des divers problèmes de fiabilité des HEMT AlGaN/GaN tels que les phénomènes d'électron chaud [2], l'effondrement du courant et l'effet de piégeage [3][4].

La simulation TCAD prend en compte la structure du composant, le dopage et les propriétés physiques des matériaux GaN et AlGaN. Elle permet de mieux comprendre des phénomènes physiques qui sont mis en jeu lors du fonctionnement du composant et d'estimer ses performances électriques.

Ainsi, les travaux en cours s'inscrivent dans ce contexte général d'amélioration des performances des diodes de puissance à base d'hétérojonction AlGaN/GaN et des transistors HEMT, en s'appuyant sur des simulations par éléments finis. Cette étude est réalisée sur deux structures à base de 2DEG, des diodes Schottky AlGaN/GaN et des HEMT normally-off. Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet européen IPCEI/Nano 2022 avec notamment la société STMicroelectronics.

2. Simulation TCAD

Le logiciel Synopsys Sentaurus® permet de décrire la structure du dispositif (géométrie et dopage) et de résoudre l'équation de Poisson ainsi que les deux équations de continuité pour les concentrations des électrons et des trous.

2.1 Structures utilisées

Dans cette partie nous détaillerons les deux structures de test, des diodes AlGaN/GaN fournies par STMicroelectronics et un Gate Injection Transistor (GIT) qui est un transistor AlGaN/GaN Normally-Off [5].

Le dispositif de la diode utilisé dans le cadre de cette étude est une hétérostructure $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$. La structure utilisée est décrite dans la figure 1-a. Elle est formée d'une couche AlGaN et d'une couche GaN non dopée. Entre ces deux couches, une

couche d'AlN d'épaisseur 0.65 nm est ajoutée pour confiner les électrons dans le canal. Les contacts sont déclarés comme un contact Schottky pour l'anode et un contact ohmique pour la cathode.

La caractéristique la plus notable du GIT est la couche p-AlGaN formée sur l'hétérostructure Al_{0.15}Ga_{0.85}N / GaN non dopée illustrée dans la figure 1-b. La couche p-AlGaN élève le potentiel au niveau du canal, ce qui permet un fonctionnement Normally-Off. Les contacts sont tous déclarés comme contact ohmique.

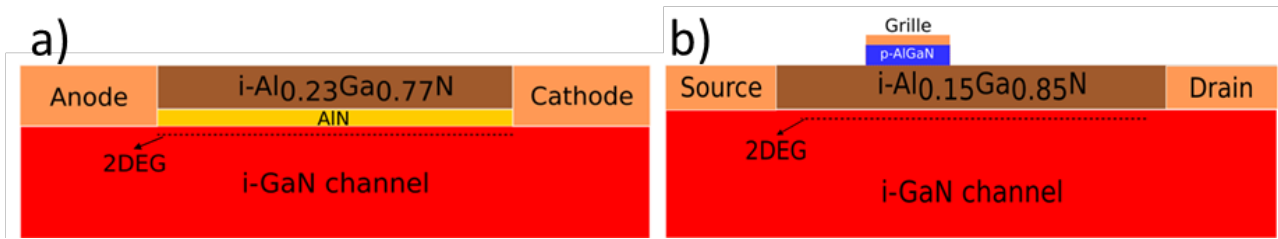


Figure 1 : Coupe schématique verticale des structures GaN/AlGaN simulées

2.2 Modèles physiques utilisés

Après avoir défini la structure, il est nécessaire d'introduire des modèles physiques qui doivent être activés pour reproduire le fonctionnement GaN HEMT comme le modèle Drift-Diffusion pour la densité des porteurs. La statistique réaliste de Fermi (Realistic Fermi statistics) est encore utilisée pour son importance pour le GaN HEMT avec des densités de porteurs élevées $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, telles que celles obtenues dans le canal 2DEG. De plus, le modèle anisotrope [6] est pris en compte dans l'équation de Poisson pour représenter les propriétés diélectriques anisotropes associées au GaN. Pour la génération de porteurs par recombinaison, les modèles Shockley-Read-Hall (SRH) et Auger [6] ont été activés pour leur pertinence avec des densités de porteurs élevées. Pour finaliser et simuler correctement le GaN HEMT, il est nécessaire d'activer le modèle de polarisation piézoélectrique [7], [8] qui calcule en interne les charges de polarisation spontanées et piézoélectrique à chaque interface de la structure.

La figure 2 montre la variation de la densité des électrons et la bande de conduction au niveau de l'hétérojonction AlGaN/GaN, en réalisant une coupe verticale sur la structure. Cette figure montre que la densité des électrons augmente au niveau de l'hétérojonction AlGaN/GaN et elle est localisée dans la chute de potentiel de la bande de conduction. Alors les électrons sont bien confinés dans le canal 2DEG.

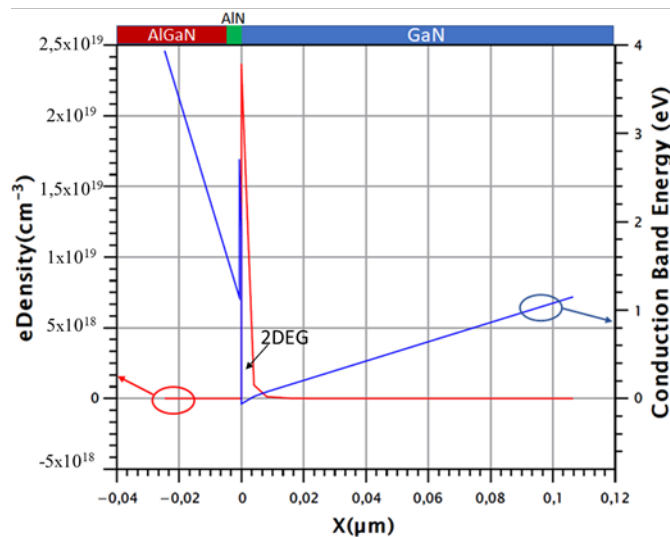


Figure 2 : Variation de l'énergie en fonction de la profondeur de la bande de conduction et de la densité des électrons dans l'hétérostructure AlGaN/GaN.

La figure 3 montre les simulations électriques effectuées sur les GIT AlGaN/GaN ainsi que les deux caractéristiques de transfert et de sortie du transistor avec la tension de seuil équivalente à 1,4 V.

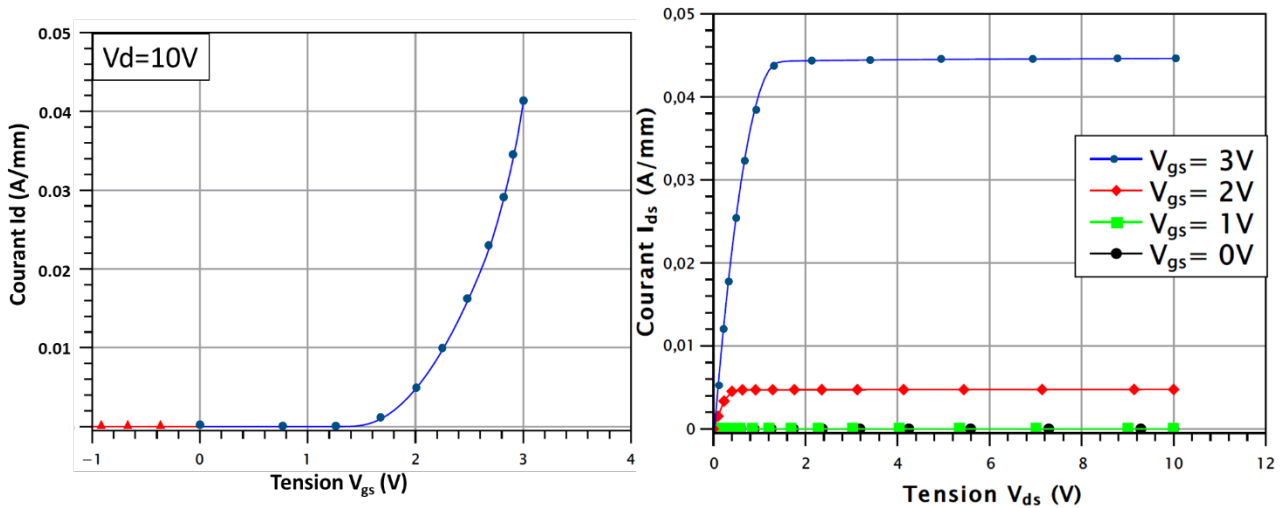


Figure 3 : Simulation des caractéristiques de transfert et de sortie du GIT

Dans ce qui suit, on utilise la simulation électrique de la diode AlGaIn/GaN et du GIT (pour $V_{gs}=3V$ et $V_{ds}=10V$) pour étudier l'influence des pièges sur ces caractéristiques.

3. Résultats

Dans Sentaurus, des pièges peuvent être introduits en fonction de leur signature. Cette dernière inclut l'emplacement du piège qui peut être défini dans des régions ou des matériaux ainsi que des interfaces des matériaux ou de régions. De même le type de piège peut être choisi (accepteur ou donneur) avec ses concentrations et ses énergies d'activation.

Les pièges sont définis dans différentes régions comme dans les matériaux GaN, AlGaIn et sur l'interface AlGaIn/GaN en variant la concentration et l'énergie d'activation de ces pièges.

3.1 Diode AlGaIn/GaN

Pour démontrer l'influence des pièges sur le comportement des diodes AlGaIn/GaN, on a varié la concentration des pièges de type accepteur dans la couche i-GaN de 10^{16} cm^{-3} jusqu'au 10^{19} cm^{-3} avec une énergie d'activation fixe $E_A=0.6V$. La figure 4a présente les caractéristiques $I(V)$ de la diode en fonction des concentrations. Une dégradation de la résistance dynamique R_{dyn} à partir des concentrations de 10^{16} cm^{-3} jusqu'à une concentration de 10^{18} cm^{-3} a été obtenue ce qui présente une forte variation de la R_{dyn} . Avec les mêmes paramètres et pour des pièges localisés à l'interface AlGaIn/GaN, la figure 4b montre que la résistance varie fortement pour une concentration des pièges équivalentes à 10^{12} cm^{-2} .

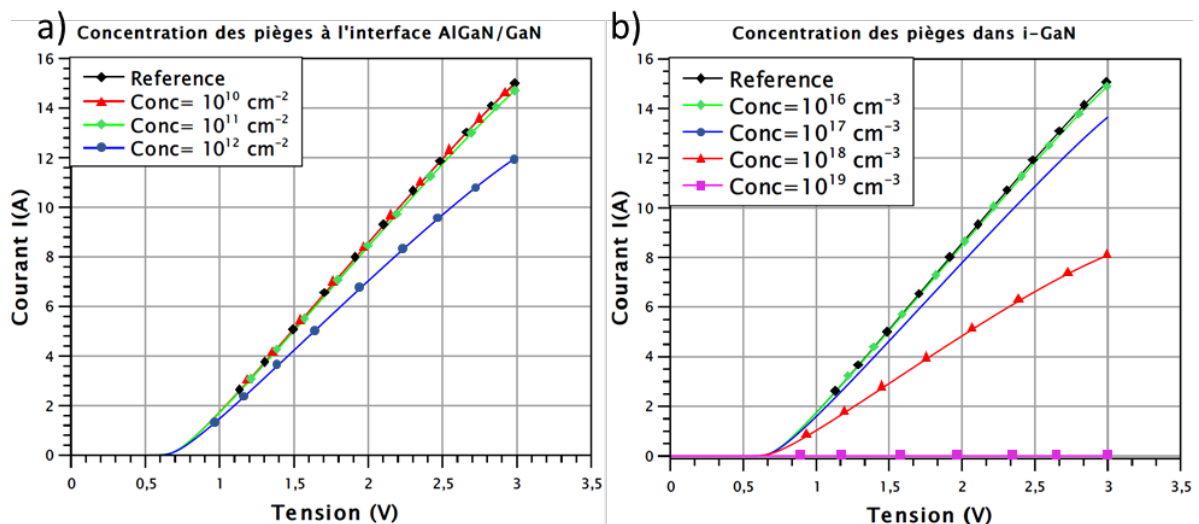


Figure 4 : Influence des pièges localisés dans a) i-GaN b) interface AlGaIn/GaN, sur les caractéristiques en direct de la diode.

Pour des concentrations fixes de 10^{18} cm^{-3} pour les pièges dans i-GaN et 10^{12} cm^{-2} pour ceux qui sont localisés à l'interface AlGaIn/GaN, on a varié l'énergie d'activation de l'énergie de la bande de conduction du 0.3 eV jusqu'au mid-gap soit exactement entre la bande de conduction et la bande de valence (1.717 eV). Les valeurs de R_{dyn} correspondantes sont extraites de la partie linéaire des courbes entre $V = 1.5 V$ à $2.5 V$ et résumées dans la figure 6. L'impact de l'énergie d'activation des pièges sur la R_{dyn} par rapport à la référence devient progressivement plus élevé pour les pièges localisés dans i-GaN. Les pièges plus éloignés de la bande de conduction ont des constantes de dépiégeage plus élevées et on observe qu'ils ont un impact plus important ce qui

entraîne une plus grande perte de courant et une dégradation de Ron. L'influence de la position de l'énergie E_A du piège n'apparaît pas pour les pièges à l'interface AlGaIn/GaN.

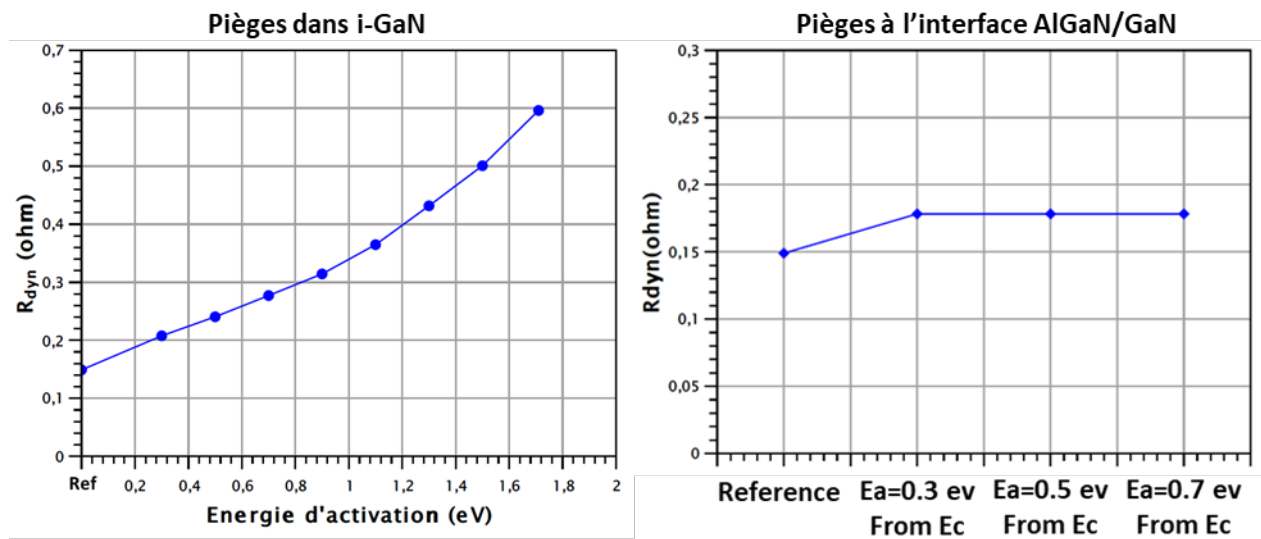


Figure 5 : Résistance dynamique normalisée en fonction de l'énergie d'activation.

3.2 GIT AlGaIn/GaN

Avec la même méthodologie, on a étudié l'influence de la concentration des pièges sur les caractéristiques de transfert et de sortie de la structure GIT AlGaIn/GaN. La figure 6 montre l'influence de la concentration des pièges avec $E_A=0.6$ eV (de la bande de conduction), les résultats montrent une dégradation majeure pour des concentrations de 10^{18} cm^{-3} .

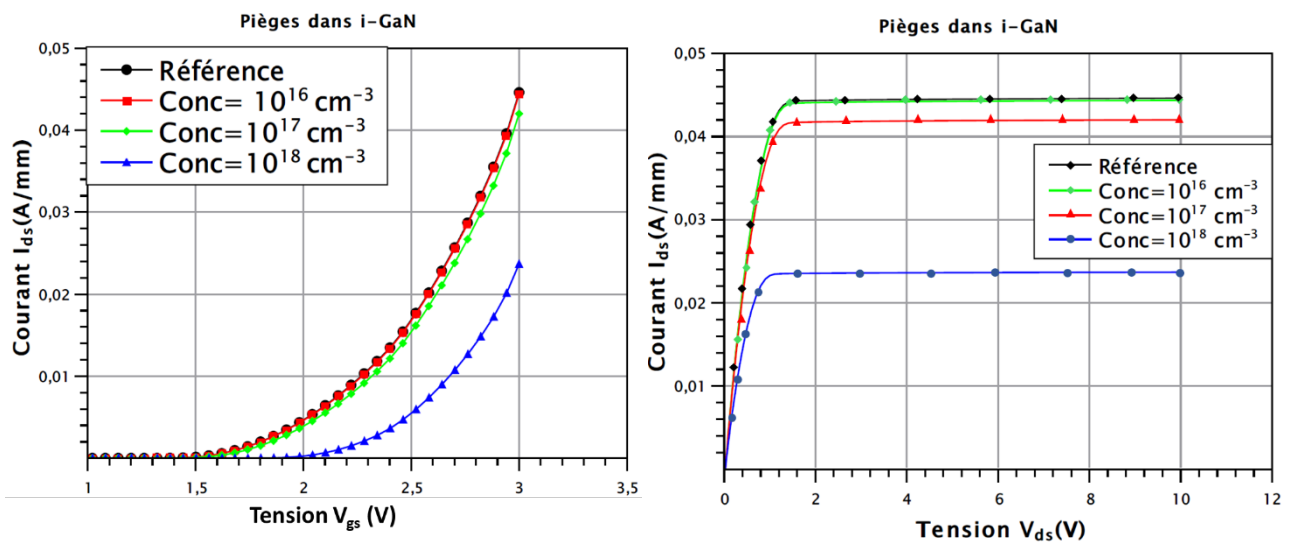


Figure 6 : Caractéristiques de transfert et de sortie du GIT en fonction de la concentration des pièges

Les valeurs de R_{dyn} correspondantes sont extraites de la partie linéaire des courbes autour de la tension 0.4V et la tension de seuil est donnée pour un courant équivalent à 10^{-5} A/mm . La figure 7 montre l'évolution de la tension de seuil, le courant de saturation (@ 10V) et la résistance à l'état passant qui sont normalisés par rapport de la référence telles que les caractéristiques de sorties et de transferts varient pour des concentrations égales à 10^{18} cm^{-3} pour les pièges localisés dans la couche GaN et AlGaIn.

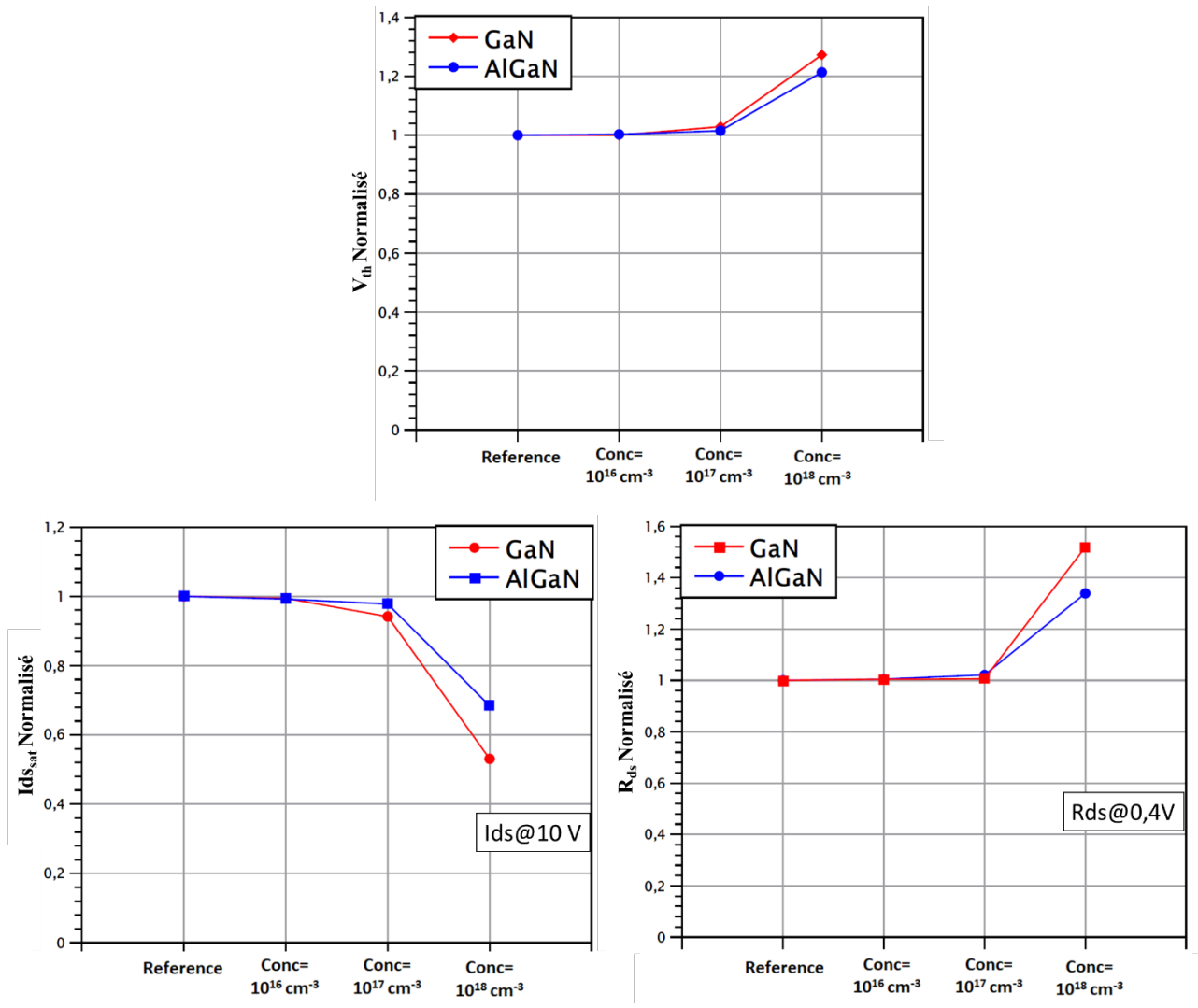


Figure 7 : Tension de seuil, courant de saturation et R_{dyn} normalisés pour les pièges localisés dans GaN et AlGaN

Pour les pièges localisés à l'interface AlGaN/GaN le comportement du GIT varie pour des concentrations des pièges de 10^{12} cm^{-2} .

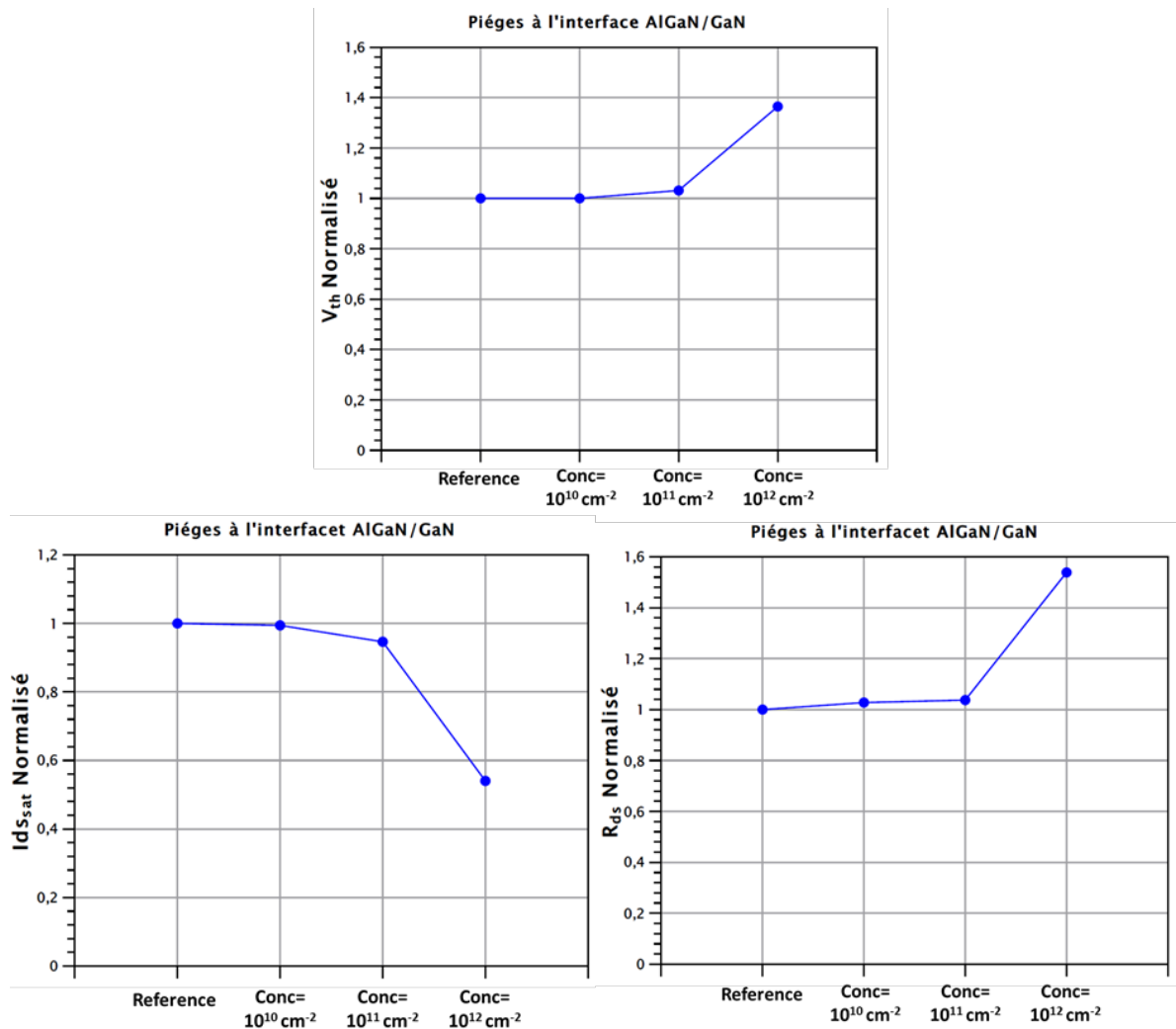


Figure 7 : Tension de seuil, courant de saturation et R_{dyn} normalisés pour les pièges localisés à l'interface AlGaIn/GaN

4. Conclusion

Cette étude nous a permis de mieux appréhender la simulation TCAD des composants GaN et de mieux comprendre l'impact du phénomène de piégeage sur les caractéristiques des diodes et des transistors d'hétérojonction AlGaIn/GaN, qui est considéré comme l'un des plus grands problèmes qui limite les performances des HEMT. Les résultats montrent une dégradation de la résistance dynamique en ajoutant des pièges dans des différentes régions de la structure et les caractéristiques changent avec la variation de la concentration des pièges et en fonction de ces énergies d'activation.

Ces simulations peuvent être considérées comme un outil pour mieux comprendre les problèmes de fiabilité et la dégradation de la R_{dyn} qui apparaissent après des différents types de stress surtout le stress à l'état bloqué ce qui génère les pièges dans les dispositifs AlGaIn/GaN.

Références

- [1] A. S. Augustine Fletcher, D. Nirmal, J. Ajayan, and L. Arivazhagan, "Analysis of AlGaIn/GaN HEMT using discrete field plate technique for high power and high frequency applications," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 99, pp. 325–330, 2019, doi: 10.1016/j.aeue.2018.12.006.
- [2] A. Minetto *et al.*, "Hot-Electron Effects in AlGaIn/GaN HEMTs Under Semi-ON DC Stress," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, no. 11, pp. 4602–4605, 2020.
- [3] M. Faqir *et al.*, "Analysis of current collapse effect in AlGaIn/GaN HEMT: Experiments and numerical simulations," *Microelectron. Reliab.*, vol. 50, no. 9–11, pp. 1520–1522, 2010, doi: 10.1016/j.microrel.2010.07.020.
- [4] P. Vigneshwara Raja, J. C. Nallatamby, N. DasGupta, and A. DasGupta, "Trapping effects on AlGaIn/GaN HEMT characteristics," *Solid. State. Electron.*, vol. 176, no. November 2020, p. 107929, 2021, doi: 10.1016/j.sse.2020.107929.
- [5] Y. Uemoto *et al.*, "Gate injection transistor (GIT) - A normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 54, no. 12, pp. 3393–3399, 2007, doi: 10.1109/TED.2007.908601.

- [6] "Sentaurus Device User Guide," *Synopsys*, 2013.
- [7] O. Ambacher *et al.*, "Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa_N/Ga_N heterostructures," *J. Appl. Phys.*, 2000.
- [8] W. E. Muhea, F. M. Yigletu, R. Cabre-Rodon, and B. Iniguez, "Analytical Model for Schottky Barrier Height and Threshold Voltage of AlGa_N/Ga_N HEMTs with Piezoelectric Effect," *IEEE Trans. Electron Devices*, 2018.