



HAL
open science

Etude de l'influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des HEMTs de la filière GaN

Sébastien Petitdidier

► **To cite this version:**

Sébastien Petitdidier. Etude de l'influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des HEMTs de la filière GaN. Electronique. Normandie Université, 2017. Français. NNT : 2017NORMC201 . tel-01491034

HAL Id: tel-01491034

<https://theses.hal.science/tel-01491034v1>

Submitted on 16 Mar 2017

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.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

**Spécialité : Electronique, microélectronique, optique et lasers,
optoélectroniques micro-ondes**

Préparée au sein du LUSAC

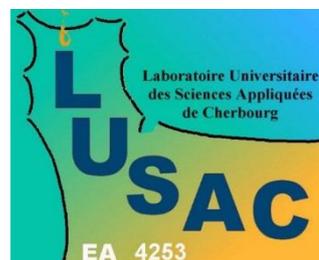
Etude de l'influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des HEMTs de la filière GaN

**Présentée et soutenue par
Sébastien PETITDIDIER**

**Thèse soutenue publiquement le 5 janvier 2017
devant le jury composé de**

Mme Nathalie MALBERT	Professeur à l'Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Jérôme BOCH	Professeur à l'Université de Montpellier	Président et Rapporteur
M. Philippe EUDELIN	Directeur Technologie et Innovation, société THALES	Examineur
M. Patrick MARY	Directeur Scientifique R&D, EAMEA, Marine Nationale	Examineur
M. Yannick GUHEL	Maître de Conférences à l'Université de Caen	Examineur
M. Bertrand BOUDART	Professeur à l'Université de Caen	Directeur de thèse

Thèse dirigée par le Professeur Bertrand Boudart, laboratoire LUSAC



Remerciements

Cette thèse, dirigée par le Professeur Bertrand Boudart est une collaboration entre le Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC), et l'École des Applications Militaires de l'Énergie Atomique (EAMEA) de la Marine Nationale, commandée successivement par les Capitaines de Vaisseau Yves Janci et Laurent Mandard.

Je remercie tout d'abord la Marine Nationale pour avoir financé ma thèse durant ces trois années. Je remercie plus particulièrement le Capitaine de Vaisseau Laurent Mandard pour avoir accepté que la soutenance et le pot de thèse se déroulent à l'EAMEA.

Les transistors de laboratoire utilisés pour les études rapportées dans ce manuscrit ont été fournis par le Professeur Christophe Gaquière de l'Université de Lille.

Je remercie Monsieur le Professeur Jérôme Boch (Université de Montpellier) de me faire l'honneur de présider le jury de soutenance ainsi que d'avoir jugé ce travail et d'en être le rapporteur.

Je remercie également Madame le Professeur Nathalie Malbert (Université de Bordeaux) qui m'a fait l'honneur de rapporter cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur Philippe Eudeline (Directeur Technologie et Innovation, société Thales) pour sa participation au jury.

J'exprime toute ma gratitude au Professeur Bertrand Boudart, mon directeur de thèse, pour m'avoir proposé de faire cette thèse, pour ses conseils, sa disponibilité et son amitié qui ont fait le succès de cette thèse.

Je remercie très chaleureusement Monsieur Yannick Guhel, mon co-encadrant, pour son soutien sans faille et sa motivation communicative.

Je remercie Monsieur Patrick Mary, Directeur scientifique R&D de l'EAMEA, pour sa disponibilité et avoir fait que cette thèse se déroule dans de bonnes conditions au sein de l'EAMEA.

Je tiens à remercier Jean-Lionel Trolet (EAMEA) pour son expertise en physique nucléaire et en métrologie ainsi que son amitié.

Remerciements

Merci à Bertrand Pouderoux (ESIX Normandie) pour son expertise en électronique et pour m'avoir aidé à réaliser et programmer le banc de caractérisation. Je lui souhaite bon vent pour ses croisières sur son voilier.

Merci à tous les collègues de l'école atomique qui ont chacun à leur manière permis que les moments passés à l'EAMEA soient agréables.

Je tiens également à remercier pour leur gentillesse les collègues de l'Université : Bertrand, Marion, Tanguy, Aurélien, Laurent, Martine, Romuald ainsi que les autres thésards du LUSAC : Tetiana, Guillaume, Mikaël et Philippe.

Je remercie les membres de ma famille pour leur soutien au cours de cette thèse et pour leur présence le jour de la soutenance.

Enfin, je remercie mon épouse Claire-Marie qui m'a ardemment soutenu, en particulier lors de la dernière année de thèse qui coïncide avec notre première année de mariage.

Sommaire

Introduction générale.....9

Chapitre 1 : Influence des stress électriques sur le comportement électrique de transistors HEMTs AlInN/GaN.....27

I. Introduction.....29

II. Présentation des paramètres électriques des transistors étudiés...30

III. Influence des stress électriques sur des transistors AlInN/GaN...34

A. Structure et réalisation des transistors.....34

B. Etudes préliminaires.....36

C. Influence d'un stress à canal ouvert sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlInN/GaN.....38

D. Influence d'un stress à canal pincé sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlInN/GaN.....48

E. Influence d'un stress NGB sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlInN/GaN.....52

F. Comparaison des trois stress.....56

G. Conclusion sur les études concernant les stress électriques.....58

IV. Etude d'électroluminescence au cours d'un stress à canal ouvert.58

V. Conclusion du chapitre 1.....72

Chapitre 2 : Influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN.....75

I. Introduction.....77

II. Présentation de la source utilisée.....79

III. Effet des irradiations sur des transistors HEMTs AlInN/GaN.....82

A. Influence des irradiations sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN.....	83
B. Influence des irradiations sur les caractéristiques électriques des transistors AlInN/GaN stressés.....	91
1. Transistors stressés à canal ouvert.....	91
2. Transistors stressés à canal pincé.....	96
3. Transistors soumis à des stress NGB.....	101
4. Comparaison de l'impact des irradiations effectuées sur des transistors AlInN/GaN vieillis par des stress à canal ouvert, à canal pincé et NGB.....	107
IV. Effets des irradiations sur des transistors MOS-HEMTs AlInN/GaN.....	111
V. Influence des irradiations sur le comportement électrique de HEMTs AlInN/GaN et de MOS-HEMTs AlInN/GaN.....	116
VI. Conclusion du chapitre 2.....	119
Chapitre 3 : Influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des transistors du commerce de la filière GaN...121	
I. Introduction.....	123
II. Conception d'un banc de mesures et de stress automatisé.....	126
III. Technologie des transistors NPTB00004.....	131
IV. Influence des stress électriques sur les caractéristiques de transistors AlGaIn/GaN de la marque Nitronex®.....	132
A. Etudes préliminaires.....	132
B. Influence du stress à canal ouvert sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaIn/GaN.....	135
C. Influence du stress à canal pincé sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaIn/GaN.....	141
D. Influence du stress NGB sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaIn/GaN.....	145

E. Comparaison des effets des trois types de stress.....	149
V. Influence d'irradiations neutroniques sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaN/GaN de la marque Nitronex®.....	152
A. Influence des irradiations sur des transistors non stressés.....	152
B. Influence des irradiations sur des transistors stressés à canal ouvert.	158
C. Influence des irradiations sur des transistors stressés à canal pincé...	160
D. Influence des irradiations sur des transistors ayant subi un stress NGB.....	163
E. Conclusion sur l'influence des irradiations neutroniques sur les transistors NPTB00004.....	166
VI. Conclusion du chapitre 3.....	167
Conclusions et perspectives.....	169
Références.....	177
Annexe.....	197

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les domaines militaires et aérospatiaux imposent des systèmes électroniques performants pouvant opérer à haute température, haute fréquence et/ou à forte puissance.

Les filières de puissance utilisent donc des semiconducteurs avec une grande bande d'énergie interdite, aussi appelée « gap ». L'un des candidats les plus prometteurs est le nitrure de gallium (GaN) car il possède un gap de 3,42 eV à 300 K. De plus, il est possible de fabriquer des composants électroniques à base de GaN qui répondent aux exigences en température [1] [2], en fréquence [3] et en forte puissance [4] imposées par leurs domaines d'utilisation. Les densités de puissance importantes de ces composants permettent une réduction de taille et de poids car les dimensions des systèmes de refroidissement s'en trouvent diminuées, ce qui est très intéressant pour les systèmes embarqués où la taille est primordiale [5].

On sait obtenir du GaN depuis les années 30 [6] mais ce n'est que depuis les années 1970 qu'on a commencé à l'utiliser pour la fabrication de composants électroniques [7]. Malgré cela, les difficultés de croissance et du dopage de type p ont freiné son développement. Il faut attendre les années 1980 pour obtenir une mise au point des techniques de dopage et de croissance de couches [8]. Une diode électroluminescente à base de GaN émettant dans le bleu et l'ultraviolet a été réalisée en 1989, ce qui prouve la faisabilité de composants avec du GaN. Dès lors, le GaN est devenu un matériau incontournable pour l'électronique.

La densité de porteurs intrinsèques du nitrure de gallium est de l'ordre de $2.10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à température ambiante et de $1.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ à 1000 °C alors qu'elle est de $1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à température ambiante et de $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 1000 °C pour le silicium [1]. La faible densité de porteurs intrinsèques permet ainsi de mieux contrôler la charge d'espace du composant et d'avoir un bon pincement des transistors.

Le GaN possède également une conductivité thermique de $1,3 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$, ce qui permet une dissipation thermique efficace en fonctionnement [9]. De même, le grand gap du GaN autorise des tensions de claquage supérieures à 100 V [10]. Sa mobilité électronique varie de 1480 [11] à $2200 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ [12] à température ambiante pour des hétérostructures AlGaIn/GaN non dopées contre $8500 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ pour les composants GaAs [1], mais sa vitesse de saturation des porteurs ($1.10^{17} \text{ cm.s}^{-1}$) en fait un bon candidat pour les domaines de fréquences élevées [13].

Il existe plusieurs méthodes pour faire croître du GaN sur un substrat, parmi lesquelles la méthode MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) et la méthode MBE (Molecular Beam Epitaxy) [1]. La méthode MOCVD est la méthode la plus utilisée. Elle consiste à évaporer un composé organométallique, tel que le triméthylgallium ou le triéthylgallium, et de l'ammoniac sur la surface du substrat chauffé à 1000 °C à une pression de travail entre 4000 et 27000 Pa [14]. Il est possible grâce à cette méthode d'obtenir une vitesse de croissance de quelques $\mu\text{m.h}^{-1}$. La méthode MBE consiste à évaporer ou sublimer, sous ultravide, les éléments de l'alliage et éventuels dopants. Ceux-ci sont ensuite absorbés à la surface du substrat. Pour le GaN, on utilise une source solide pour le gallium et du gaz (NH_3 ou N_2) pour l'azote. Le substrat est porté à une température comprise entre 450 et 850 °C, ce qui induit une vitesse de croissance lente inférieure à $1 \mu\text{m.h}^{-1}$ [1].

Le GaN massif étant difficile à faire croître, il est préférable de le déposer en phase vapeur sur des substrats tels que le saphir (Al_2O_3), le carbure de silicium (SiC), et le silicium (Si) [4] [15] [16]. Cela engendre malheureusement un désaccord de maille entre le substrat et le GaN et induit donc des défauts lors de la croissance. Il est notamment fait état d'un désaccord de maille de 30% entre le saphir et le GaN mais le fait de tourner la maille élémentaire de GaN de 30° par rapport à celle du saphir permet de réduire le désaccord de maille à 13%. Le SiC, quant à lui, possède un désaccord de maille de 3,5% [17] avec le GaN. Il possède en outre une plus grande conductivité thermique que le saphir ($5,0 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre $0,46 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le saphir [17]). Cela ferait de lui le candidat idéal si son prix et la difficulté à préparer sa surface ne venaient pas freiner son utilisation. Le meilleur compromis serait donc le silicium avec un désaccord de maille de 16% par rapport au GaN, une conductivité thermique de $1,54 \text{ W.cm}^{-1}$ et surtout un faible coût.

Le dopage est incontournable lorsqu'on fait croître des matériaux semiconducteurs. Le GaN non intentionnellement dopé est de type n. Cela est souvent attribué aux lacunes d'azote [18]. Or la formation de ces lacunes est rendue difficile par leur énergie de formation [19]. Il apparaîtrait plutôt que ce dopage n soit le résultat d'une contamination d'oxygène ou de silicium du substrat, qui donne des niveaux donneurs peu profonds [18]. Malgré cela, des couches de GaN de forte résistivité, d'environ $1.10^4 \Omega.\text{cm}$, ont été obtenues par la technique MBE en utilisant une couche tampon [20]. De même, une résistivité d'environ $1.10^{10} \Omega.\text{cm}$ a été obtenue par MOCVD là aussi en utilisant une couche tampon [21]. Le dopage n peut être réalisé en phase vapeur avec du silicium ou du germanium [20]. Le silicium donne un niveau donneur peu profond et son énergie d'ionisation est d'environ 60 meV. Son activation électrique et son

incorporation dans la matrice sont proches de 1. Ainsi, le taux de dopage peut atteindre des valeurs supérieures à $1.10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Il est également possible de doper localement l'AlGaIn et le GaN, en implantant des caissons de silicium sous les contacts ohmiques afin d'améliorer les propriétés électriques de ces derniers. Cela permet de réaliser des contacts ohmiques de bonne qualité tout en possédant un bon contact Schottky [22] qui est réalisé sur une couche de GaN ou d'AlGaIn non dopée.

Le dopage p pose en général un problème pour les semiconducteurs à grand gap tel que le GaN car les énergies d'ionisation des accepteurs sont toujours relativement élevées. Ceci limite le nombre d'accepteurs ionisés, et par la suite le nombre de trous à température ambiante. Le magnésium est l'accepteur ayant le niveau le moins profond dans le GaN. Son énergie d'ionisation est tout de même comprise entre 150 et 170 meV et il est souvent neutralisé par l'hydrogène. En outre, la solubilité du magnésium dans le GaN et l'AlGaIn est limitée. Cela entraîne des concentrations de trous généralement insuffisantes pour assurer des contacts ohmiques de faible résistivité. Afin de séparer l'hydrogène du magnésium, les couches sont recuites ou bombardées par des électrons par LEEBI (Low Energy Electron Beam Irradiation) [8] [23]. Malgré cela, en l'état actuel des connaissances, le magnésium semble être le dopant p le plus performant.

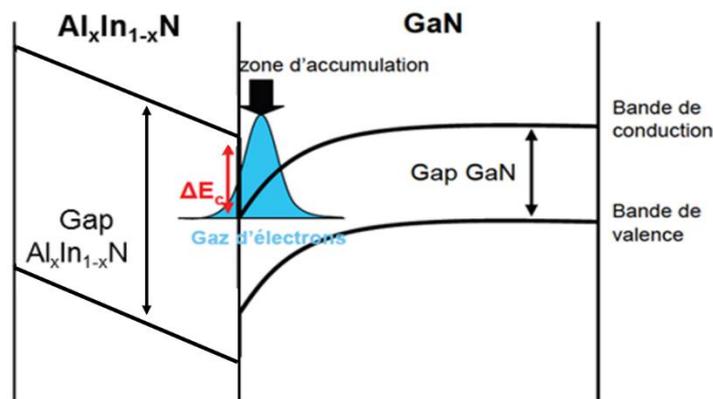


Figure 1 : Diagramme de bandes pour un transistor HEMT AlInN/GaN [24]

Les mécanismes physiques justifiant la réalisation des transistors à haute mobilité électronique (HEMT) de la filière GaN reposent sur la réalisation d'une hétérostructure à partir de deux matériaux différents. En effet, un alliage ternaire caractérisé par une large bande interdite, appelé la couche barrière, est épitaxié sur une couche buffer de GaN non intentionnellement dopée (nid) avec une bande interdite plus petite. Généralement, l'alliage

ternaire est constitué d'une couche d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ou d' $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$, qui ont un gap de 4,3 et 4,5 eV respectivement [25] [26] [27]. Ainsi, la mise en contact de matériaux ayant des largeurs de bande interdite différentes crée une discontinuité des énergies de bandes de valence et de conduction. Dans ces conditions, la discontinuité de bande de conduction donne naissance à un puits de potentiel dans lequel s'accumulent les électrons et implique la génération d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) (figure 1). Contrairement à la plupart des systèmes à hétérojonction, la génération d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) à l'interface est possible même sans dopage de la couche barrière. En effet, l'existence de champs de polarisation spontanée et polarisation piézoélectrique dans les structures AlGaN/GaN se combine à l'effet de discontinuité de bande et favorise ainsi le confinement des électrons dans le puits quantique. Les mécanismes sont légèrement différents dans le cas des structures AlInN/GaN car l'effet de polarisation spontanée est plus intense alors que l'effet de polarisation piézoélectrique est plus faible voire inexistant selon la composition chimique de la couche d'AlInN (taux d'indium).

L'effet de polarisation spontanée est dû au moment dipolaire de la liaison Ga-N qui engendre une polarisation macroscopique à l'échelle du cristal de GaN et de l'AlGaN. En maîtrisant la croissance du GaN et de l'AlGaN il est possible d'orienter la polarisation spontanée vers le substrat et donc d'améliorer la mobilité électronique du gaz bidimensionnel. L'effet piézoélectrique est dû quant à lui aux effets de contraintes entre la couche de GaN et celle d'AlGaN qui ne sont pas en accord de maille. La combinaison de la polarisation spontanée et de l'effet piézoélectrique permet le confinement des porteurs vers le canal, ce qui augmente leur densité dans le canal [28].

Dans le cas de l'AlInN/GaN, la polarisation spontanée est très grande, environ $-0,072 \text{ C.m}^{-2}$ pour l' $\text{Al}_{0,82}\text{In}_{0,18}\text{N}$ contre $-0,045 \text{ C.m}^{-2}$ pour l' $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$. Il est ainsi possible d'obtenir un gaz d'électrons avec une densité électronique de $4,84.10^{13} \text{ cm}^{-2}$ [29]. De plus, pour un taux d'indium de 18%, la maille d'AlInN est en accord de maille avec le GaN, il n'y a donc pas d'effet de contraintes entre les deux mailles [30]. Il y a donc moins de risques que les contraintes introduisent des défauts et dégradent ainsi les performances électriques. Cela veut dire aussi qu'il n'y a pas d'effet piézoélectrique [31], qui contribue habituellement à la densité et au confinement des porteurs dans les HEMTs AlGaN/GaN. Malgré cette absence d'effet piézoélectrique, l'AlInN possède une polarisation spontanée importante. On obtient ainsi une densité de porteurs dans le gaz électronique 2D qui est plus grande que pour les HEMTs AlGaN/GaN [26]. Cela en fait de bons candidats pour des applications à haute puissance, à

haute température et/ou à haute fréquence [32]. Cependant, la technologie des transistors AlInN/GaN n'est pas encore mature et il est nécessaire de comprendre et résoudre des problèmes de fiabilité tels que la présence de pièges avant de procéder à leur industrialisation. En effet, ces pièges entraînent entre autres une baisse du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès, dégradant ainsi les performances. Ils peuvent également être à l'origine de l'effet kink qui provoque une augmentation de courant lorsque ces pièges se déchargent sous l'effet du champ électrique.

La prochaine étape de la réalisation d'un HEMT concerne les contacts ohmiques. Ils sont généralement fabriqués en Ti/Al/Ni/Au ou en Ti/Al/Ti/Au. Après dépôt de ces métaux, le transistor subit un recuit afin de rendre ohmique le contact. Il est notamment possible d'obtenir une résistance spécifique de contact de $7,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ pour des contacts ohmiques Ti/Al/Ni/Au sur une couche d' $\text{Al}_{0,27}\text{Ga}_{0,73}\text{N}$ [33] et une résistance de contact de $0,15 \Omega \cdot \text{mm}$ avec des contacts ohmiques en Ti/Al/Ni/Au réalisés sur une couche d' $\text{Al}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{N}$ [34].

L'étape d'isolation peut être réalisée soit par implantation ionique d'argon [35] ou d'hélium [36], soit par gravure sèche par un plasma de SiCl_4 [11] ou de Cl_2 [37] par exemple. Les contacts Schottky sont en général réalisés en Mo/Au, en Ni/Au ou en Pt/Au. La grille en Mo/Au possède une hauteur de barrière d'environ 0,84 eV lorsqu'elle est déposée sur de l' $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}$ [38]. Celle en Ni/Au possède une hauteur de barrière de l'ordre de 1,17 eV quand elle est déposée sur une couche d' $\text{Al}_{0,11}\text{Ga}_{0,89}\text{N}$ et il est possible d'obtenir une hauteur de barrière de 1,39 eV lorsqu'une grille de Pt/Au est déposée sur de l' $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{N}$ [39].

Enfin, le courant de fuite est un facteur limitant des HEMTs [40] mais ce problème peut être partiellement résolu par l'ajout d'une couche d'oxyde entre la couche d'AlInN ou d'AlGaIn et la grille. Ainsi, il est possible de diminuer le courant de fuite d'un facteur 6 à 10 [41].

Après avoir décrit les mécanismes physiques expliquant le fonctionnement du HEMT, nous allons maintenant décrire le comportement électrique de ces transistors en fonction des conditions de polarisation utilisées. L'application d'une tension entre la source et le drain (V_{DS}) implique l'apparition d'un champ électrique qui provoque la circulation des porteurs dans le canal et donc d'un courant. La polarisation avec une tension négative de la grille (V_{GS}) engendre l'apparition d'une zone déplétée sous le contact Schottky dont la surface augmente au fur et à mesure que la tension de grille devient négative. Lorsqu'on atteint la tension V_{GS} dite de pincement, la zone déplétée pince le canal et le courant de drain est nul alors que le courant de

drain est maximum pour une valeur de V_{GS} légèrement positive. Il est ainsi possible de moduler la valeur du courant de drain en fonction des tensions V_{DS} et V_{GS} .

Voici à présent l'état de l'art concernant les performances électriques et hyperfréquences des HEMTs possédant une hétérostructure AlGaIn/GaN et AlInN/GaN.

Pour des HEMTs AlGaIn/GaN réalisés sur des couches ayant un substrat en saphir, une densité de courant de drain I_{DSS} de $2,1 \text{ A.mm}^{-1}$ a été obtenue pour un transistor possédant une longueur de grille L_g de $0,7 \mu\text{m}$ [37] et une transconductance g_m de 450 mS.mm^{-1} pour un transistor possédant un L_g de $0,15 \mu\text{m}$ [42]. Pour l'AlInN/GaN, il a été obtenu une densité de courant de $1,2 \text{ A.mm}^{-1}$ pour un transistor avec une longueur de grille de 225 nm ainsi qu'un g_m de 190 mS.mm^{-1} pour une longueur de grille de $0,25 \mu\text{m}$ [43].

La densité de courant la plus élevée pour un transistor AlGaIn/GaN réalisé sur un substrat en SiC et possédant un L_g de $0,25 \mu\text{m}$ est de $1,71 \text{ A.mm}^{-1}$ [44]. Pour ce même substrat, un g_m de 460 mS.mm^{-1} a été obtenu pour un transistor possédant un L_g de $0,35 \mu\text{m}$ [45]. Avec l'AlInN/GaN, il est possible d'obtenir une densité de courant de $2,3 \text{ A.mm}^{-1}$ et un g_m de 575 mS.mm^{-1} avec un transistor possédant une longueur de grille de $0,25 \mu\text{m}$ [32].

Pour un transistor HFET $\text{Al}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{N/GaN}$ réalisé sur un substrat de Si et possédant un L_g de $0,7 \mu\text{m}$, la densité de courant et la transconductance les plus élevées sont de l'ordre de 1 A.mm^{-1} et de 450 mS.mm^{-1} [46], respectivement. Ces grandeurs sont à comparer à une densité de courant de $1,43 \text{ A.mm}^{-1}$ et une transconductance de 415 mS.mm^{-1} pour un HEMT AlInN/GaN [47].

Les meilleures performances sont donc obtenues avec un HEMT AlInN/GaN sur SiC avec une densité de courant de $2,3 \text{ A.mm}^{-1}$ et une transconductance de 575 mS.mm^{-1} .

Il est difficile de comparer toutes les densités de courant rapportées dans la littérature. En effet, les performances électriques sont obtenues pour des composants réalisés sur des épitaxies différentes élaborées par des procédés technologiques différents et pour des transistors possédant des géométries différentes (longueur et largeur de grille).

Les fréquences de coupure et d'oscillation les plus élevées obtenues pour un HEMT AlGaIn/GaN réalisé sur un substrat de saphir sont respectivement de $F_t = 160 \text{ GHz}$ et $F_{\text{max}} = 200 \text{ GHz}$ pour une longueur de grille L_g de $0,7 \mu\text{m}$ [48]. Pour le même substrat mais

avec un HEMT AlInN/GaN possédant une longueur de grille de 225 nm, un $F_t = 52$ GHz et $F_{\max} = 120$ GHz ont été observées [49].

En ce qui concerne les HEMTs AlGaN/GaN réalisés sur un substrat de SiC, une fréquence de coupure F_t de 121 GHz (avec un F_{\max} de 162 GHz) a été obtenue pour une longueur de grille L_g de 0,12 μm [50]. Une fréquence d'oscillation F_{\max} de 300 GHz (avec un F_t de 70 GHz) a été obtenue pour une longueur de grille L_g de 0,06 μm . Quant aux HEMTs AlInN/GaN sur un substrat SiC, une fréquence de coupure de 370 GHz a été rapportée pour une longueur de grille de 30 nm [51].

Pour un HEMT AlGaN /GaN réalisé sur un substrat en Si, les fréquences de coupure F_t et d'oscillation F_{\max} les plus élevées sont respectivement de 100 et 206 GHz pour une longueur de grille de 0,125 μm [52]. Ces valeurs sont à comparer à une fréquence de coupure de 143 GHz et une fréquence d'oscillation de 176 GHz pour un HEMT AlInN/GaN [47].

Les densités de puissance les plus élevées pour un HEMT AlGaN/GaN réalisé sur un substrat de saphir sont de 6,6 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ à une fréquence de travail de 6 GHz [53] et de 6,5 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ à 8 GHz [4]. Pour le même substrat avec un HEMT AlInN/GaN, on obtient une densité de puissance de 2,9 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ à une fréquence de travail de 18 GHz [43].

Pour des HEMTs AlGaN/GaN réalisés sur un substrat de SiC, les densités de puissance les plus élevées sont de 4,6 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ et de 3,65 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ à une fréquence de travail de 10 GHz et de 18 GHz respectivement [21]. En revanche, pour des HEMTs AlInN/GaN sur SiC, la densité de puissance la plus élevée est de 10,3 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour une fréquence de travail de 10 GHz [32].

Les meilleures densités de puissance obtenues pour des HEMTs AlGaN/GaN réalisés sur un substrat Si sont de 12 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour une fréquence de travail de 2,14 GHz [16] et de 2,9 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour une fréquence de travail de 10 GHz [54]. Pour un HEMT AlInN/GaN sur Si, la densité de puissance est de 2,5 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour une fréquence de 10 GHz [55].

Ces densités de puissance ont été obtenues pour des HEMTs AlGaN/GaN et AlInN/GaN sans field plate. Nous pouvons remarquer que les meilleures densités de courant sont mesurées pour des HEMTs AlGaN/GaN sur Si avec 12 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour une fréquence de travail de 2,14 GHz et des HEMTs AlInN/GaN sur SiC avec 10,3 $\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$ pour une fréquence de travail de 10 GHz.

La présence de pièges au sein du composant peut limiter les performances électriques et hyperfréquences des composants de la filière GaN [56] [57]. Ces pièges, pouvant être présents à la surface du matériau, sont associés aux états de surface du matériau créés par les liaisons pendantes, les dislocations transversales accessibles en surface et les ions adsorbés provenant de l'atmosphère ambiante. Ces pièges peuvent également être présents dans la couche de GaN et d'AlInN (ou d'AlGaIn) mais aussi à l'interface AlGaIn/GaN ou AlInN/GaN. En effet, les états de surface du matériau piègent les électrons injectés par la grille et forment une couche de charges, à ou près de la surface, qui déplete le canal [58] [59]. De même, cette déplétion provoque une diminution de la largeur du canal et donc une diminution de la densité de courant.

Une des solutions à ce problème consiste à passiver le composant. Généralement, les composants sont passivés avec une couche de diélectrique tel que le SiO_2/SiN ou le SiN_x standard [60] [61]. En effet, la passivation de ces composants permet de limiter fortement l'influence de ces pièges électriques et d'inhiber la dégradation des performances électriques et hyperfréquences des transistors [62]. La littérature rapporte également qu'un prétraitement de surface doit être effectué avant la passivation des composants [63].

D'autres mécanismes de dégradation peuvent altérer les performances électriques et la fiabilité des composants comme [38] [56] [64] :

- La dégradation de la grille ou "gate sinking" attribuée au déplacement des atomes métalliques dans le canal, ce qui induit l'amincissement du canal comme cela a été observé pour les transistors de la filière GaAs ;
- La dégradation des contacts ohmiques, liée à des mécanismes de diffusion des métaux ;
- Le phénomène d'électromigration dans les métallisations activé par la combinaison de la température et de la densité de courant ;
- Les dégradations induites par les électrons chauds générés par ionisation par impact. Ce mécanisme est accéléré par le champ électrique ;
- Le phénomène de "gate-lag" qui est visible lors d'une commutation en tension sur la grille du transistor puisque la réponse du courant de drain présente un effet transitoire lié aux pièges existant initialement. Après vieillissement, le courant de drain présente une réponse plus ou moins rapide selon l'évolution de l'état des pièges. Ce phénomène affecte le fonctionnement hyperfréquence du dispositif ;

- Le phénomène de “drain-lag” qui, lui aussi, se traduit sur la réponse transitoire du courant drain-source I_{DS} suite à une impulsion appliquée sur le drain pour une tension de grille V_{GS} constante. Ce phénomène est attribué aux effets des pièges situés à l’interface couche active-substrat.

Il est important de noter que certaines dégradations des performances électriques des composants induites par les électrons chauds peuvent être temporaires telles que le “power drift” ou permanentes tels que le “power slump”.

Le “power drift” correspond à une dégradation temporaire de la réponse transitoire du courant de drain mesuré à la suite d’une impulsion appliquée sur la grille du transistor. Ce phénomène rend difficile le contrôle de la puissance de sortie et est attribué aux pièges présents dans la couche de passivation. Le “power slump” est également lié à la présence de pièges dans la couche de passivation, mais dans ce cas ces pièges entraînent une dégradation permanente du courant de drain.

Tous ces phénomènes de dégradation sont susceptibles d’être amplifiés dans un milieu “hostile”. Or, les transistors HEMTs AlGaIn/GaN peuvent être utilisés dans les systèmes embarqués aussi bien dans le milieu spatial qu’au sol ou dans l’espace aérien. Il faut prendre en compte que pour chaque altitude où le système embarqué est utilisé, différents phénomènes peuvent altérer les performances de ces composants électroniques comme la pression élevée, la température élevée ou au contraire très basse et le risque d’irradiation. Dans cette thèse, nous nous intéresserons notamment à l’influence des irradiations sur les performances électriques des transistors HEMTs AlGaIn/GaN et AlInN/GaN.

Durant les années 1970, l’effet des rayonnements cosmiques sur les basculements logiques observés dans des satellites a été mis en évidence. Ces rayonnements cosmiques, en pénétrant dans les satellites à travers leur superstructure, peuvent transférer une énergie suffisante dans les transistors des systèmes électroniques pour y provoquer des basculements logiques [65] [66]. La diminution de la taille des composants les rend encore plus sensibles aux irradiations [67].

Les irradiations subies par les systèmes embarqués vont varier en fonction de l’altitude à laquelle ils vont être amenés à travailler. En effet, les irradiations ont diverses origines comme les éruptions solaires ou le rayonnement cosmique, par exemple. Les systèmes amenés à

travailler dans l'espace, tels que les satellites, vont subir les quatre types de phénomènes suivants [68] :

- Les éruptions solaires sont riches en protons de forte énergie. En effet, le plasma éjecté par notre soleil lors d'une éruption est composé majoritairement de protons (96,4%) mais également de particules alpha (3,5%). Ces particules peuvent avoir une énergie de l'ordre du GeV/nucléon et avec une fluence de 1×10^{10} particules.cm⁻² sur la durée de l'éruption. Ce flux est de l'ordre de 1×10^5 particules.cm⁻².s⁻¹ à son maximum (ces valeurs ne prennent en compte que les particules possédant une énergie supérieure à 10 MeV/nucléon).
- Le vent solaire, plasma résultant de l'évaporation de la couronne solaire et remplissant l'ensemble du système solaire, est constitué essentiellement de protons et d'électrons d'énergie comprise entre 10 et 100 keV.
- Les ceintures de radiations de Van Allen sont quant à elles constituées d'électrons d'énergie comprise entre 1 keV et 10 MeV et de protons d'énergie comprise entre 1 keV et 300 MeV. Ces ceintures sont une zone toroïdale de la magnétosphère terrestre entourant l'équateur magnétique.
- Le rayonnement cosmique est constitué essentiellement de protons (87%) et de particules alpha (12%). Ils peuvent avoir des énergies allant jusqu'à 1×10^{11} GeV mais à un flux de seulement quelques particules.cm⁻².s⁻¹ (variant selon le cycle solaire).

Les particules ionisantes de l'environnement spatial vont interagir avec les atomes constituants de l'air créant ainsi des particules isolées comme les protons et les neutrons. L'intensité de cette radiation va être maximale à 20 km d'altitude et va diminuer progressivement jusqu'au niveau de la mer. Pour une altitude de 10 km, qui correspond à l'altitude de vol des avions, le flux de neutrons "atmosphériques" est de 1×10^4 particules.cm⁻².h⁻¹. Ces neutrons possèdent une énergie comprise entre quelques meV et plusieurs GeV. Au niveau de la mer, ce flux sera de 10 particules.cm⁻².h⁻¹ et, même s'il paraît faible, peut entraîner des défaillances dans les circuits intégrés. Cependant, ces effets sont modulés par l'activité solaire et ne sont donc pas identiques au cours du temps [69] [70].

Ces neutrons atmosphériques ont déjà été mis en cause lors de basculements logiques observés dans de grands calculateurs au sol mais également dans les systèmes électroniques d'avions militaires et civils [71] [72] [73].

Introduction générale

Nous constatons donc que les composants peuvent être soumis à diverses irradiations (neutrons dans l'atmosphère, particules alpha, protons...) qui peuvent altérer leurs performances. De plus, ces irradiations vont être de nature différente et à un flux différent en fonction de l'endroit où le composant est utilisé. Ce flux va également dépendre de phénomènes tels que les éruptions solaires qui vont accentuer certaines irradiations.

La présence de photons γ a été également observée dans l'univers. Cependant, l'origine exacte de ces photons γ n'est pas encore bien connue. En effet, même si les astronomes savent que ces radiations cosmiques sont générées par des flux de particules en accélération, ils ignorent les propriétés précises et même parfois la nature exacte des environnements célestes où se déroule le phénomène. Des observatoires comme HESS (High Energy Stereoscopy System), installé en Namibie, ont pour but de repérer depuis le sol les plus durs des flashes γ sachant que les moins énergétiques d'entre eux ne peuvent être détectés que hors de l'atmosphère. Le satellite Glast (Gamma-ray Large Area Space Telescope) mis en orbite en 2008 permet d'apporter des réponses à ce phénomène [74]. Notamment il a détecté début 2009 le plus violent sursaut gamma jamais observé, provenant de la constellation Carina.

Les sources d'irradiation et les flux sont tellement différents d'un point à l'autre que ces phénomènes ne peuvent être reproduits en laboratoire. De plus, la détention de nouvelles sources étant très contrôlée et les procédures d'obtention de nouvelles sources étant longues et coûteuses, nous avons pu utiliser les sources déjà présentes au sein de l'EAMEA (Ecole des Applications Militaires de l'Energie Atomique) qui a financé cette thèse, en collaboration avec le LUSAC (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg). Les sources présentes sont une source de neutrons et des sources de rayons γ . Dans cette thèse, seule la source de neutrons a été utilisée.

Des études concernant l'influence d'irradiation neutronique ou γ sur les performances électriques de transistors HEMTs AlGaIn/GaN ont déjà été effectuées durant la thèse de Fanny Berthet [75] et quelques publications présentent des études concernant l'impact de fortes doses d'irradiation sur les comportements électriques des transistors [76] [77] [78]. Pour ces raisons, nous commencerons par résumer les principaux résultats rapportés dans la littérature et en particulier ceux obtenus en irradiant les composants par des rayonnements neutroniques.

Tout d'abord, le GaN seul subit des transformations au niveau cristallin par transmutation des atomes de gallium en germanium et des atomes d'azote en oxygène [79]. Le

nombre de transmutation du gallium est plus important que celui de l'azote car la section efficace de capture de neutrons thermiques est plus grande pour le gallium. Il s'ensuit une contrainte dans le GaN due à des lacunes en Ga et des Ge dans les sites de Ga. Ces défauts créent ainsi une contrainte dans le GaN.

En ce qui concerne l'irradiation des HEMTs AlGa_N/Ga_N, une étude effectuée en 2006 présentait des résultats d'irradiation sur des HEMTs réalisés sur un substrat saphir avec un taux d'Al de 30% [80]. Ces transistors ont subi des fluences entre 1.10^{13} et $1,7.10^{17}$ neutrons.cm⁻² avec des neutrons rapides ayant une énergie de 1 MeV. En 2007, des transistors HEMTs non passivés et réalisés sur un substrat de SiC [81] ont été soumis à des irradiations de neutrons rapides, là aussi de 1 MeV mais avec des fluences de 3.10^{10} à 5.10^{12} neutrons.cm⁻² à une température de 80 K. En 2011, des transistors sur substrat de SiC [82], ont été irradiés avec des neutrons de 9,8 MeV et une fluence de $2,8.10^{11}$ neutrons.cm⁻². En 2012, Ling et al. ont réalisé des irradiations sur des HEMTs sur substrat de SiC [83] avec des neutrons de 1 MeV pour une fluence de 1.10^{15} neutrons.cm⁻². Durant la même année, une étude a comparé les effets des rayonnements neutroniques sur HEMTs AlGa_N/AlN/Ga_N, AlGa_N/Ga_N et AlInN/Ga_N [84]. Les fluences sont de 1.10^{15} et 3.10^{15} neutrons.cm⁻² avec des neutrons rapides ayant une énergie de 2 MeV.

Les effets observés dans ces études sont une chute du courant de drain et une augmentation du courant de grille [80] [82] [83] [84]. Ces dégradations sont dues à la création de pièges au sein de la structure, augmentant la concentration de pièges au cours de l'irradiation. Ces pièges sont créés dans le buffer Ga_N ainsi qu'à l'interface AlGa_N/Ga_N [83] [84]. De plus, Polyakov et al. ont montré que plus on augmentait la fraction molaire d'aluminium dans l'AlGa_N, plus la création de pièges était importante [84]. Il est intéressant de noter que les HEMTs AlInN/Ga_N sont plus sensibles aux irradiations neutroniques que les HEMTs AlGa_N/Ga_N, dû selon les auteurs à la faible qualité cristalline et à la contamination élevée dans l'AlInN/Ga_N [84]. L'étude des irradiations neutroniques sur des HEMTs AlGa_N/Ga_N à 80 K a démontré une augmentation réversible du courant de drain [81]. Cette augmentation est attribuée à une recombinaison des pièges créés durant l'irradiation avec les impuretés présentes initialement dans les transistors [81].

En ce qui concerne la tenue de la grille sous irradiation, Ling et al. ont constaté une diminution de la hauteur de barrière de 0,61 à 0,58 eV et une augmentation du coefficient d'idéalité de 2,16 à 2,49 pour une fluence de 1.10^{15} neutrons.cm⁻² avec des neutrons rapides

[83]. De même, Petrosky et al. [85] ainsi que Mc Clory et al. [81] ont mesuré une augmentation du courant de grille pour des fluences de 1.10^{12} et 6.10^{12} neutrons.cm⁻² respectivement. Enfin, Fanny Berthet a également montré la dégradation du contact Schottky. Elle a notamment observé une diminution de la hauteur de barrière de 0,60 à 0,50 eV sur des HEMTs AlGa_N/Ga_N avec une grille en Ni/Au après une irradiation de $1,3.10^{11}$ neutrons.cm⁻² avec des neutrons thermalisés. Ces dégradations de la grille sont expliquées par la création de défauts dans la couche d'AlGa_N proche de la grille qui favorise la conduction par effet tunnel assisté par les pièges [81] [85].

Dans la fin des années 2000, la première étude impliquant des neutrons thermalisés a été menée dans notre laboratoire [75] [86]. Elle a aussi l'originalité d'étudier les irradiations pour de faibles fluences, de l'ordre de 10^{12} neutrons.cm⁻² contre 10^{15} neutrons.cm⁻² dans la plupart des publications [75] [86]. Une augmentation du courant de drain a été observée et attribuée à la transmutation du gallium en germanium. Le germanium étant un dopant de type n, un surplus d'électron peut apparaître dans le canal [75]. Cette augmentation peut également provenir d'une modification des états de surface du matériau et donc de la densité de charges positives à la surface du composant, entraînant une diminution de l'effet de grille virtuelle [75]. Enfin, une modification, ou guérison, des pièges électriques et des défauts initialement présents dans les transistors et/ou un réarrangement structural des atomes et des impuretés à l'interface des contacts ohmiques et de la couche d'AlGa_N peuvent être à l'origine de l'augmentation du courant de drain [75].

Fanny Berthet a également montré que pour des HEMTs AlGa_N/Ga_N non stressés, l'irradiation avec des neutrons thermalisés provoque une diminution du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès, tandis que pour les mêmes HEMTs préalablement stressés à canal pincé, une augmentation du courant de drain et une diminution de la résistance d'accès est observée après irradiation [75] [87]. Cette différence pourrait provenir d'une modification de la densité des pièges électriques créés par les stress [75] [87]. En effet, ce phénomène peut être expliqué par la formation d'une structure complexe liée à la combinaison des pièges électriques induits par les stress avec ceux créés par les irradiations [75].

A ce jour, il n'existe pas de référence sur l'irradiation par des neutrons de MOS-HEMTs AlIn_N/Ga_N et les seules irradiations sur des MOS-HEMTs AlGa_N/Ga_N ont été faites avec des rayons γ [88]. Il est donc nécessaire d'effectuer des études d'irradiation neutronique sur des MOS-HEMTs AlIn_N/Ga_N afin de voir si la couche d'oxyde joue un rôle face à ces irradiations.

Les transistors de la filière GaN étant destinés aux applications touchant les domaines aérospatial et militaire, domaines pouvant mettre en jeu des milieux irradiants, ces transistors seront soumis simultanément aux champs électriques et aux irradiations. Pour ces raisons, nous avons étudié l'influence des irradiations par des neutrons thermalisés sur le comportement électrique en régime dc de composants non stressés et stressés électriquement afin de découpler les effets liés aux champs électriques et ceux induits par les irradiations par des neutrons thermalisés.

Les transistors HEMTs AlInN/GaN étant également destinés à des applications de haute puissance, il est essentiel d'identifier les causes de dégradation lorsque ces transistors sont amenés à travailler à une polarisation de drain élevée afin d'offrir une puissance de sortie élevée. Ainsi, le chapitre 1 de cette thèse est consacré à l'étude de l'impact des stress électriques sur le comportement électrique de ces transistors.

Trois types de stress ont été appliqués sur les transistors : le stress à canal pincé réalisé avec une tension grille-source V_{GS} de -6 V et une tension drain-source V_{DS} de 20 V, le stress à canal ouvert avec un V_{GS} de 0 V et un V_{DS} de 20 V et enfin le stress dit NGB (Negative Gate Bias) avec un V_{GS} de -20 V et un V_{DS} de 0 V. Le stress à canal ouvert permet de coupler l'influence de l'effet thermique au sein du transistor, car le passage des électrons dans le canal provoque un échauffement, et du champ électrique, puisqu'on applique une forte tension drain-source. Le stress à canal pincé crée un fort champ électrique dans le transistor et il est intéressant d'en étudier les effets. L'effet thermique est absent lors de ce stress puisqu'il n'y a pas de circulation de porteurs dans le canal. De plus, la grille est plus sollicitée que lors d'un stress à canal ouvert à cause de la polarisation de la grille. Enfin, le stress NGB permet d'éprouver la grille des HEMTs. Par ailleurs, une étude d'électroluminescence a également été réalisée avant et après un stress à canal ouvert afin de caractériser de manière originale les pièges induits par ce stress. En effet, cette étude fait appel à une analyse spectrale d'électroluminescence, contrairement à d'autres publications qui étudient essentiellement une variation de l'intensité d'électroluminescence.

Afin d'étudier l'influence des irradiations sur la fiabilité des transistors, il est non seulement nécessaire d'étudier l'impact des neutrons thermalisés sur les performances électriques des transistors AlInN/GaN non polarisés mais aussi sur les pièges électriques pouvant être induits par des stress électriques. Pour ces raisons, le deuxième chapitre est d'abord consacré à l'analyse de l'influence d'irradiation par des neutrons thermalisés sur les

performances électriques des transistors AlInN/GaN non stressés puis sur le comportement électrique des transistors AlInN/GaN stressés. Les HEMTs AlInN/GaN sont connus pour présenter des courants de grille élevés [40]. Il est possible de limiter les courants de grille de ces composants en insérant une fine couche d'oxyde entre le contact Schottky et la couche semiconductrice (AlInN par exemple) [41]. Ainsi, il nous semble judicieux d'analyser le comportement de cette couche d'oxyde lorsque les transistors sont irradiés par des neutrons thermalisés. Pour ces raisons, nous avons également étudié l'influence de l'irradiation par des neutrons thermalisés sur les performances électriques de transistors MOS-HEMTs AlInN/GaN dans ce chapitre 2.

Jusqu'à aujourd'hui, toutes les études effectuées dans notre laboratoire concernant l'impact des irradiations par des neutrons thermalisés sur les performances électriques des transistors de la filière GaN ont été menées en utilisant des composants AlGaIn/GaN (durant la thèse de Fanny Berthet) et AlInN/GaN (au cours de cette thèse) qui ont été réalisés en utilisant une technologie non optimisée. Pour ces raisons, il nous a semblé judicieux d'effectuer les mêmes études sur des composants de la filière GaN commercialisés afin de confirmer ou pas les tendances observées avec des composants fabriqués en laboratoire. Ainsi, le troisième chapitre présente l'impact de stress électriques sur les performances électriques de transistors HEMTs AlGaIn/GaN Nitronex® (racheté entre temps par MACOM®) qui ont été importés des Etats-Unis. Ensuite, les effets des irradiations par des neutrons thermalisés sur les comportements électriques de ces transistors non stressés et stressés ont été analysés. Ainsi, ces transistors ont été vieillis par les trois stress (canal pincé, canal ouvert et NGB) puis irradiés tandis que d'autres étaient irradiés sans avoir été stressés.

Enfin, une conclusion générale suivie de perspectives terminera ce manuscrit.

**Chapitre 1 : Influence des stress électriques
sur le comportement électrique de
transistors HEMTs AlInN/GaN**

I. Introduction

Les transistors AlInN/GaN reçoivent depuis la fin des années 2000 une attention croissante de la part de l'industrie car ce sont d'excellents candidats pour des applications à haute température, haute fréquence et à forte puissance [32]. Cela est dû à l'hétérojonction des transistors AlInN/GaN qui possèdent une densité de porteurs plus grande que les composants AlGaIn/GaN du fait d'une plus grande polarisation spontanée [26]. De plus, l'AlInN n'est pas piézoélectrique, ce qui retire une contribution à la mise en place du gaz électronique dans les transistors AlGaIn/GaN, mais cet effet est compensé par une polarisation spontanée plus grande [31]. Enfin, l'AlInN peut être en accord de maille avec le GaN, ce qui permet de ne plus avoir de contraintes mécaniques à l'hétérojonction [30] et donc de réduire le nombre de défauts créés à l'interface AlInN/GaN.

Etant donné que ces composants sont notamment utilisés pour des applications en puissance, il est essentiel d'identifier les causes de dégradation telles qu'une diminution du courant de drain, une baisse de la qualité du contact Schottky ou des contacts ohmiques. En effet, ces transistors AlInN/GaN doivent être polarisés à de fortes tensions afin de délivrer une forte puissance en sortie. C'est pourquoi dans ce chapitre nous étudierons les effets de trois stress électriques sur les caractéristiques de transistors HEMTs AlInN/GaN dont les conditions de polarisation sont les suivantes :

- un stress à canal ouvert réalisé à une tension drain-source V_{DS} de 20 V et une tension grille-source V_{GS} de 0 V,
- un stress à canal pincé effectué à une tension V_{DS} de 20 V et une tension V_{GS} de -6 V, et enfin
- un stress dit NGB (Negative Gate Bias) fait à une tension V_{DS} de 0 V et une tension V_{GS} de -20 V.

Chaque vieillissement a été effectué séparément sur 5 transistors durant 216 h à l'obscurité et à température ambiante.

Il est indéniable que la présence de pièges électriques dans les transistors AlInN/GaN peut avoir un impact sur leur fiabilité [31] [89]. Pour ces raisons, nous avons commencé par étudier l'influence de la lumière et du sens de polarisation de V_{GS} et V_{DS} sur le réseau de caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des composants afin de vérifier la présence ou non de pièges électriques. Ainsi, nous pourrions dissocier l'impact des pièges potentiellement présents

initialement dans les composants et celui des pièges électriques éventuellement induits par les stress électriques sur le comportement des transistors.

Ce chapitre débutera par une présentation des paramètres électriques utilisés pour étudier la fiabilité des composants. Ceux-ci nous permettront de quantifier les évolutions des transistors au cours des stress de vieillissement ainsi que durant les irradiations dont les résultats sont présentés dans les chapitres 2 et 3.

Ensuite, nous nous intéresserons aux effets des stress électriques sur le comportement des composants. Nous verrons ainsi que les stress à canal ouvert, canal pincé ou NGB provoquent chacun des effets différents sur les transistors AlInN/GaN.

Enfin, nous présenterons une étude d'électroluminescence au cours d'un stress à canal ouvert effectuée avec un spectromètre Raman afin de caractériser les pièges induits par le stress à canal ouvert et d'essayer de mieux comprendre les mécanismes physiques engendrés par ce dernier.

II. Présentation des paramètres électriques des transistors étudiés

Pour quantifier l'influence des stress et des irradiations sur les caractéristiques électriques des transistors HEMTs de la filière GaN, nous allons analyser l'évolution de plusieurs paramètres au cours des stress tels que le courant de drain maximal ($I_{DS \max}$), la résistance d'accès $R_{\text{accès}}$, le coefficient d'idéalité (η), la hauteur de barrière Φ_b et la tension de pincement (V_p). Toutes les caractérisations électriques ont été effectuées uniquement en régime statique.



Figure 1 : Photographie du traceur Agilent Technologies 4155 C

Les caractéristiques électriques des transistors ont été réalisées à température ambiante et 2 minutes après la mise à l'obscurité des composants afin de s'affranchir des effets de pièges

sensibles à la lumière. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un traceur Agilent Technologies 4155 C (figure 1). Les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) ont été mesurées avec une précision de 10 mV en tension et de 1 μ A en courant. De plus, l'incertitude des mesures de courant effectuées sur des HEMTs AlInN/GaN a été évaluée à 0,8%.

Les connexions électriques entre les contacts métalliques et les alimentations ont été réalisées à l'aide de pointes de caractérisation dites « statiques » (figure 2).

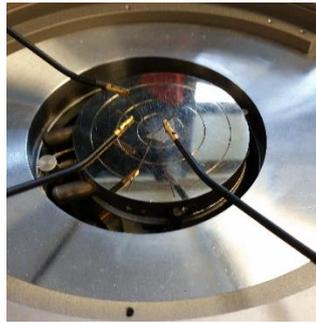


Figure 2 : Photographie du wafer avec un transistor connecté aux alimentations de tension via des pointes de caractérisation dites « statiques »

La densité de courant drain-source maximum ($I_{DS \text{ max}}$), extraite à partir des caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) présentées sur la figure 3, est la valeur d' I_{DS} pour une tension V_{DS} de 20 V et une tension V_{GS} de 1 V.

La résistance d'accès ($R_{\text{accès}}$) est l'inverse de la pente définie sur la figure 3. Les transistors possédant des bonnes performances électriques en régimes statique et dynamique possèdent une résistance d'accès faible.

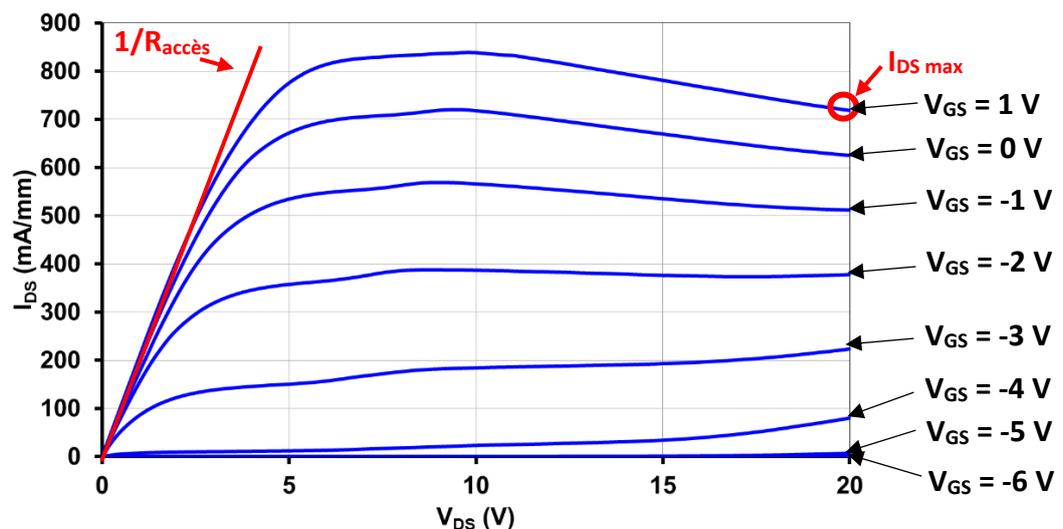


Figure 3 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un transistor HEMT de la filière GaN, V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V

La grille des transistors permet de commander la densité de porteurs présents dans le canal. Lorsque la grille est polarisée par une tension négative, pour un transistor de type n, le canal se trouve alors aminci et, pour une tension dite tension de pincement, il n'y a quasiment plus d'électrons qui circulent entre la source et le drain : le canal est dit pincé. Lorsque la grille est polarisée positivement, le canal est totalement ouvert.

Nous allons donc analyser l'évolution des caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) à une tension drain-source V_{DS} nulle afin d'obtenir des informations sur la qualité du contact Schottky par extraction du coefficient d'idéalité η et de la hauteur de barrière Φ_b . La détermination des valeurs de η et Φ_b s'obtient par identification de la mesure du courant de grille traversant la diode avec la relation physique reliant la tension appliquée et le courant créé par effet thermoionique. Cette relation est [77] [90] :

$$I_{GS} = I_S \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1) \approx I_S \cdot e^{\frac{q \cdot V}{\eta \cdot k \cdot T}} \text{ en direct} \quad (\text{II. 1})$$

où T est la température absolue (en K),

k est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

q est la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

V est la tension appliquée (V)

et I_S est le courant de saturation de la diode donné par la relation [77] :

$$I_S = A^* \cdot T^2 \cdot S \cdot e^{-\frac{q \cdot \Phi_b}{k \cdot T}} \quad (\text{II. 2})$$

où S est la surface de la grille (longueur de grille x développement total),

et A^* est la constante de Richardson ($56,0$ A.cm⁻².K⁻² pour de l'AlInN [91] et $28,9$ pour de l'AlGaN [22]) donnée par la relation :

$$A^* = \frac{4 \cdot \pi \cdot q \cdot m^* \cdot k^2}{h^3} \quad (\text{II. 3})$$

où h est la constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s)

et m^* est la masse effective des électrons dans le semiconducteur étudié ($0,2$ pour le GaN [1]).

Ainsi, en partant de la caractéristique $\ln(I_{GS}) = f(V_{GS})$, nous déduisons η grâce à l'équation [22] :

$$\eta = \frac{q}{k.T} \cdot \frac{\Delta V_{GS}}{\Delta(\ln I_{GS})} \quad (\text{II. 4})$$

La hauteur de barrière est quant à elle déterminée à partir de l'équation :

$$\Phi_b = \frac{k.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{A^* \cdot T^2 \cdot S}{I_S}\right) \quad (\text{II. 5})$$

Plus le coefficient d'idéalité sera proche de 1 et plus la hauteur de barrière sera élevée, meilleur sera le contact Schottky.

Afin d'obtenir les paramètres I_S et $\frac{\Delta V_{GS}}{\Delta(\ln I_{GS})}$ nous extrayons les données des caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ sur la figure 4. Par extrapolation de cette caractéristique pour $V_{GS} = 0$ V, on extrait le courant de saturation I_S . Pour calculer $\frac{\Delta V_{GS}}{\Delta(\ln I_{GS})}$ il faut tracer la courbe $V_{GS}(\ln I_{GS})$ en direct et mesurer la pente de la tangente à l'origine. Cette courbe nous permet également de mesurer les courants de grille en inverse et en direct.

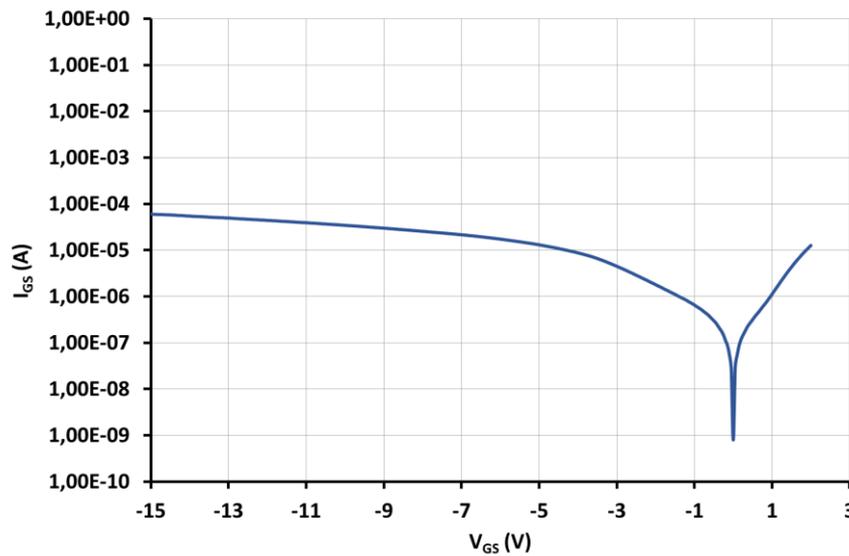


Figure 4 : Courant de grille I_{GS} en fonction de la tension grille-source V_{GS} pour un transistor possédant une grille de $50 \mu\text{m}$ de largeur et $1 \mu\text{m}$ de longueur

Il existe plusieurs façons d'obtenir la tension de pincement, telles que l'intersection de la tangente de la courbe $I_{DS}(V_{GS})$ et l'axe des abscisses (figure 5) ou considérer que le canal est pincé lorsque le courant de drain est inférieur à une valeur arbitraire (figure 6) [92]. Dans cette thèse nous utiliserons les deux méthodes afin de s'assurer de la valeur de la tension de

pincement. Pour la deuxième méthode nous prendrons 1 mA (20 mA/mm en prenant en compte la largeur de grille de 50 μm) comme valeur en dessous de laquelle le canal est considéré comme pincé.

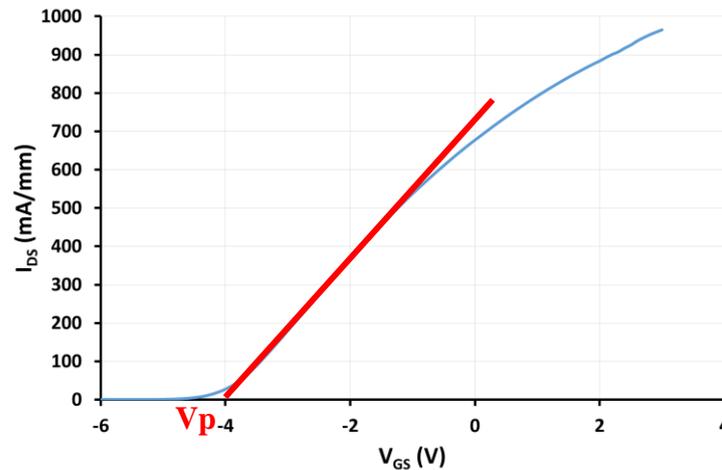


Figure 5 : Courant de drain I_{DS} en fonction de la tension grille-source V_{GS} . Obtention de la tension de pincement par la méthode 1.

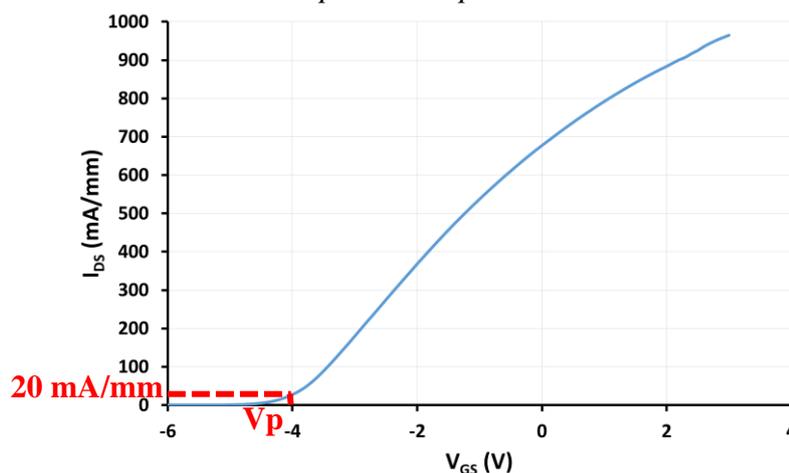


Figure 6 : Courant de drain I_{DS} en fonction de la tension grille-source V_{GS} . Obtention de la tension de pincement par la méthode 2.

III. Influence des stress électriques sur des transistors AlInN/GaN

A. Structure et réalisation des transistors

Ces transistors AlInN/GaN nous ont été fournis par l'IEMN (Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie). Comme on peut le voir sur la figure 7, ils possèdent un substrat en saphir sur lequel ont été déposées par MOCVD une couche de GaN de 3 μm , une couche d'AlN d'1 nm et une couche d' $\text{Al}_{0,82}\text{In}_{0,18}\text{N}$ non intentionnellement dopée de 11 nm.

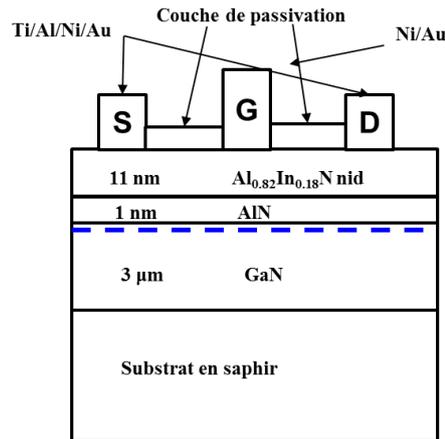


Figure 7 : Structure d'un HEMT AlInN/GaN

Les contacts ohmiques ont été obtenus en évaporant des couches de Ti/Al/Ni/Au puis en effectuant un recuit à 900 °C pendant 30 s sous atmosphère d'azote. Le contact Schottky a été obtenu en utilisant des couches de Ni/Au. Les longueurs de grille de 0,15, 0,35 et 0,7 µm ont été définies par lithographie électronique. Les largeurs de grille sont de 25, 50 et 100 µm et l'espace grille-drain est de 1,5 et 3,5 µm selon les transistors. De plus, l'espace grille-source est de 1 µm. L'isolation a été réalisée par gravure sèche et les composants ont été passivés avec des couches de SiO₂/SiN. Dans ce chapitre, seuls les HEMTs avec une largeur de grille de 50 µm et une longueur de grille de 0,35 µm ont été étudiés.

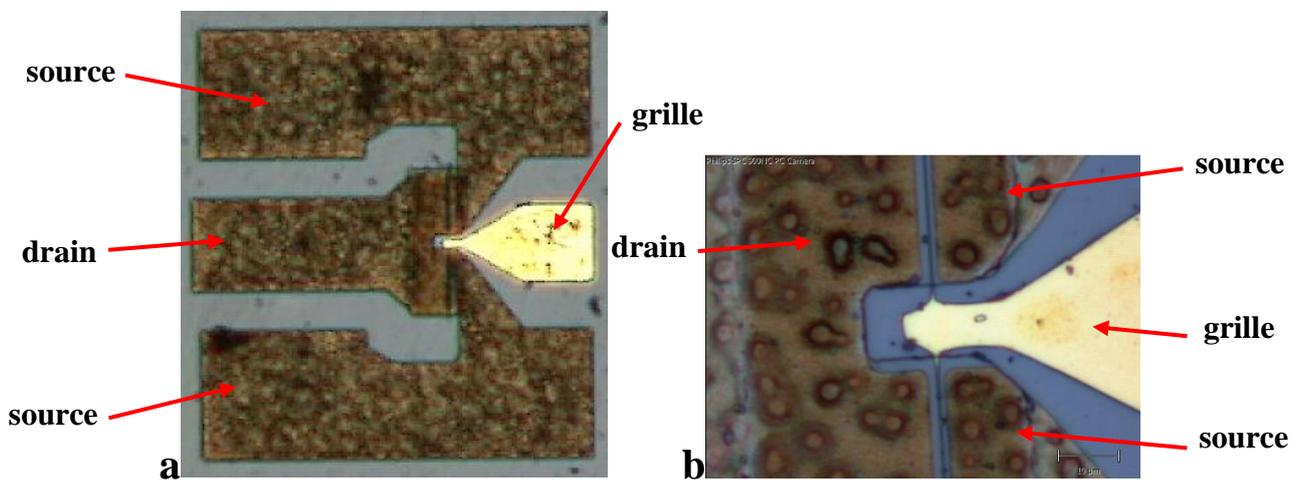


Figure 8 : Photographies d'un HEMT AlInN/GaN avec une largeur de grille de 50 µm et une longueur grille-drain de 3,5 µm a : composant entier, b : zoom sur les doigts de grille

La figure 8 présente la photographie d'un transistor HEMT AlInN/GaN avec une grille de 0,35 µm de longueur et de 50 µm de largeur. La distance grille-drain vaut 3,5 µm. Les défauts visibles sur les contacts ohmiques sont dus au recuit [93] [94].

B. Etudes préliminaires

De nombreuses publications ont montré que la présence de pièges électriques dans les transistors de la filière GaN limite leurs performances électriques [31] [75] [86] [95]. Ces pièges électriques sont connus pour être sensibles à la lumière, à la polarisation et à la température [86]. Dans cette thèse, nous analyserons l'influence de la lumière et du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ afin de mettre en évidence ou non la présence de pièges électriques dans les transistors sensibles à ces paramètres [31] [86].

Pour vérifier la présence de pièges sensibles à la lumière, nous laissons les transistors à l'obscurité pendant 2 min avant de faire une première caractéristique $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$. Puis, nous éclairons le transistor avec une lumière blanche sans UV durant 3 min avant de faire une deuxième caractéristique $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$. La figure 9 présente la comparaison des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN mesurées à l'obscurité (traits pleins bleus) et sous éclairement (tirets rouges).

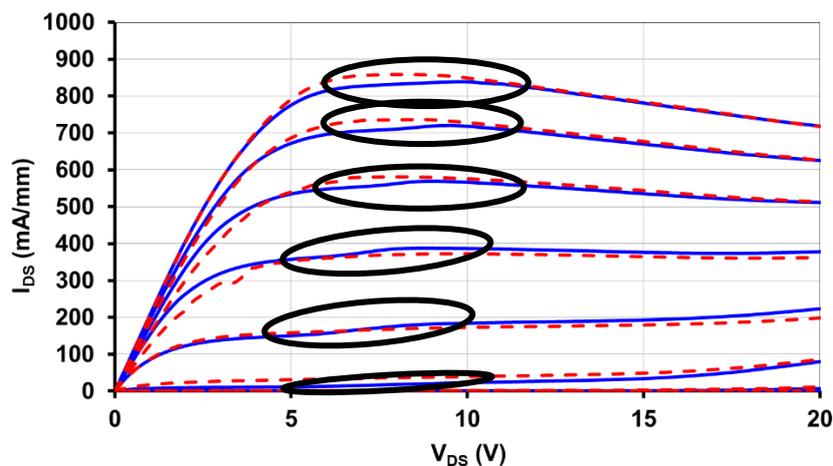


Figure 9 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ pour des valeurs de V_{GS} de -6 V à 1 V par pas de 1 V à l'obscurité (traits bleus) et sous éclairement (tirets rouges)

Nous observons que les caractéristiques électriques mesurées à l'obscurité mettent en évidence une « brusque » augmentation de courant lorsque V_{DS} est inférieure à 12 V (zone entourée en noir sur la figure 9). Ce phénomène, appelé effet kink, a déjà été observé sur des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ de transistors AlGaN/GaN [96]. Dans ce cas, l'effet kink peut être attribué à une capture d'électrons du canal par les pièges électriques présents dans la couche GaN (buffer) du transistor lorsque la tension V_{DS} est faible. Ensuite, lorsque la tension drain-source augmente et que le champ électrique devient suffisamment élevé, les électrons sont dépiégés [97]. La figure 9 met aussi en évidence une augmentation du courant de drain lorsque

V_{DS} est inférieure à 12 V pour V_{GS} entre -1 et 1 V lorsque les transistors sont éclairés. Ainsi, nous pouvons supposer que l'énergie apportée par la lumière est suffisamment élevée pour induire une libération des électrons piégés qui se traduit par une augmentation de courant [97]. Pour ces raisons, il est raisonnable de penser que l'augmentation de I_{DS} induite par la lumière peut être attribuée à l'existence de pièges donneurs et/ou à la libération d'électrons piégés dans des pièges accepteurs [86]. Pour $V_{DS} > 12$ V, tous les pièges donneurs ont libéré les porteurs que ce soit sous l'effet du champ électrique et/ou de la lumière et il n'y a donc pas d'augmentation du courant de drain.

L'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN est présentée sur la figure 10, afin de mieux comprendre les mécanismes engendrant l'effet kink.

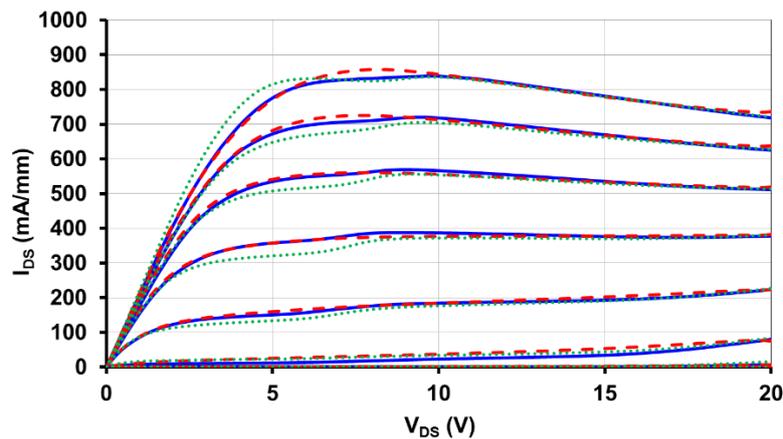


Figure 10 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN mesurées avec les conditions

C1 (traits pleins bleus), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V

C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

Pour faciliter la compréhension de ce paragraphe, nous avons nommé configurations 1, 2 et 3 les différentes configurations de mesures utilisées pour caractériser les transistors. Elles sont explicitées dans la légende de la figure 10. Il est important de noter que toutes ces mesures ont été faites à l'obscurité et à température ambiante.

Aucun effet kink n'a été observé lorsque les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des HEMTs AlInN/GaN ont été réalisées dans la configuration 3 (tirets rouges) contrairement à celles réalisées en configuration 1 (traits pleins bleus) ou C2 (pointillés verts). Ce comportement électrique est lié à la présence de pièges électriques dans les transistors AlInN/GaN.

En effet, nous supposons qu'une partie des électrons du canal sont piégés à faible V_{DS} (< 12 V), ce qui entraîne une diminution de la densité des électrons dans le canal des transistors. D'autre part, ces électrons piégés sont ensuite libérés dans le canal lorsque V_{DS} est suffisamment élevé, c'est-à-dire lorsque $V_{DS} > 12$ V. Ainsi, une augmentation du courant de drain résulte du dépiégeage de ces électrons. Cette explication est cohérente avec le comportement électrique des transistors lorsqu'ils sont polarisés avec un V_{DS} variant de 20 à 0 V. Dans ce cas, le champ électrique utilisé au début de la mesure est suffisamment élevé pour ioniser les pièges et ainsi libérer des électrons piégés induisant ainsi une augmentation de la densité d'électrons présents dans le canal. Une diminution de V_{DS} ne permet pas de piéger les électrons et ainsi aucun effet kink n'est observé lorsque les transistors sont caractérisés avec un V_{DS} variant de 20 à 0 V. Cependant, il est intéressant de noter que l'effet kink est plus prononcé quand les caractéristiques sont réalisées dans la configuration 2. Cela signifie que les électrons du canal sont plus facilement piégés lorsque la tension V_{GS} est supérieure à la tension de pincement du transistor. Nous pouvons conclure sur la dépendance de l'effet kink vis-à-vis de V_{DS} et V_{GS} et que celui-ci est favorisé par un courant de drain et une tension V_{DS} élevés [97]. De plus, la sensibilité des caractéristiques électriques des composants vis-à-vis de la lumière blanche sans UV et du sens de polarisation utilisé durant les mesures électriques met en évidence la présence de pièges dans les transistors AlInN/GaN. L'augmentation du courant de drain observée lorsque les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ sont mesurées sous éclairage ou lorsque les composants sont caractérisés dans les configurations 2 ou 3 montre que les pièges électriques peuvent être considérés comme des donneurs et/ou comme des accepteurs remplis qui libèrent leurs électrons.

C. Influence d'un stress à canal ouvert sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlInN/GaN

Afin d'analyser l'impact des pièges préexistants dans les transistors AlInN/GaN sur leur fiabilité, nous allons d'abord étudier l'influence d'un stress électrique à canal ouvert sur les caractéristiques des composants. Ce stress a été réalisé à une tension drain-source de 20 V et une tension grille-source de 0 V durant 216 h à l'obscurité et à température ambiante. Dans ces conditions, les transistors AlInN/GaN sont soumis à un effet de champ électrique et à un effet thermique induit par le courant de drain.

La figure 11 présente les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ de transistors AlInN/GaN avant stress (traits pleins bleus) et après 216 h de stress accumulé (tirets rouges). Une diminution du

courant de drain maximal ($I_{DS \max}$) de 720 à 290 mA/mm (- 60%) et une augmentation de la résistance d'accès $R_{\text{accès}}$ de 98 Ω à 476 Ω (+ 386%) sont constatées après le stress électrique.

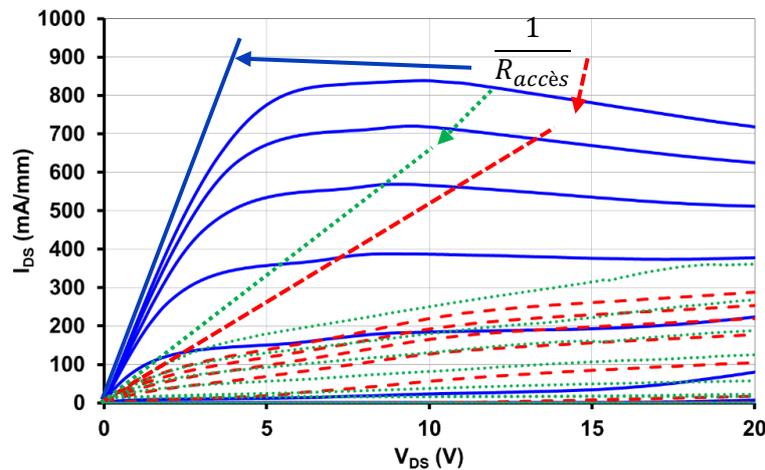


Figure 11 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbe bleue), après 216 h de stress (tirets rouges) et après deux mois de repos (pointillés verts) V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V

On peut également observer une légère amélioration de $I_{DS \max}$ et de $R_{\text{accès}}$ après avoir laissé les transistors au repos à l'obscurité durant 2 mois après la fin du vieillissement (traits pointillés verts). Cependant, les valeurs de $I_{DS \max}$ et $R_{\text{accès}}$ restent nettement éloignées de leurs valeurs initiales (avant stress). Ainsi, nous pouvons conclure que les fortes dégradations engendrées par le stress à canal ouvert sont quasi-irréversibles.

La figure 12 présente l'évolution des paramètres $I_{DS \max}$ et $R_{\text{accès}}$ en fonction de la durée de stress accumulé. Nous observons une chute rapide du courant de drain maximal de 720 à 566 mA/mm après 3 h de stress puis $I_{DS \max}$ diminue plus lentement de 566 à 300 mA/mm lorsque la durée du stress accumulé augmente de 3 à 170 h. Finalement, $I_{DS \max}$ reste quasi-constant lorsque la durée du stress varie de 170 à 216 h. Dans le même temps, la résistance d'accès augmente rapidement de 98 à 196 Ω durant les trois premières heures de stress alors qu'une élévation plus lente de $R_{\text{accès}}$ de 196 à 476 Ω est mise en évidence lorsque la durée de stress varie entre 3 et 176 h. Enfin, $R_{\text{accès}}$ reste sensiblement constante à 476 Ω lorsque la durée du stress est comprise entre 170 et 216 h. Ainsi, nous avons observé un comportement asymptotique qui nous a permis d'arrêter le stress à 216 h, même si la durée du stress semble faible par rapport à d'autres publications qui font état de plusieurs milliers d'heures de stress [38] [98] [99].

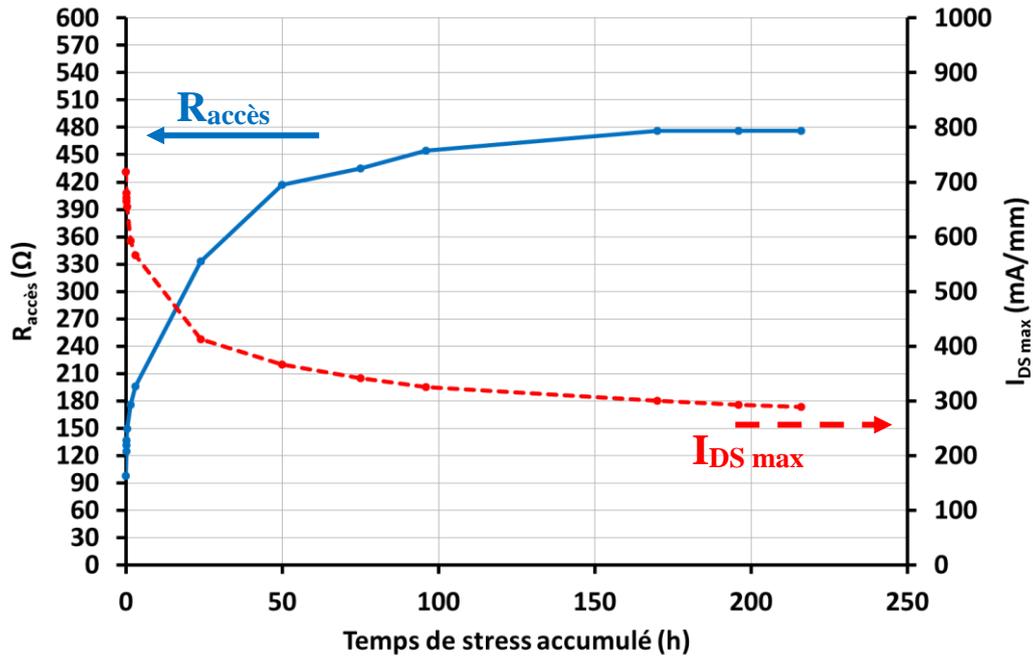


Figure 12 : Evolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction du temps accumulé de stress

Ainsi, nous pouvons supposer que ces dégradations sont induites par la création de pièges accepteurs qui entraîne une chute de $I_{DS\ max}$ et une élévation de $R_{accès}$. Il est également intéressant de noter que l'effet kink n'est pas clairement observé sur les caractéristiques électriques des transistors après le stress à canal ouvert.

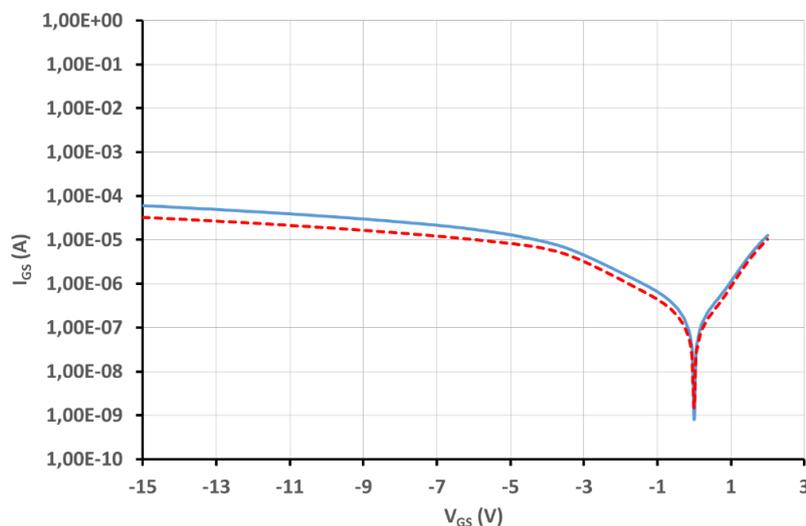


Figure 13 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) avant stress (courbe bleue) et après 216 h de stress (tirets rouges)

Afin d'étudier la robustesse de la grille, l'impact d'un stress à canal ouvert sur les caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) du contact Schottky est présenté sur la figure 13. Le stress à canal ouvert n'a provoqué aucune évolution du coefficient d'idéalité η ni de la hauteur de barrière

Φ_b . En effet, les valeurs de η et Φ_b sont restées respectivement égales à 3,7 et à 0,53 eV. Nous pouvons constater que la valeur du coefficient d'idéalité obtenue est élevée et peut être expliquée par un mécanisme de génération – recombinaison de Poole-Frenkel ou d'effet tunnel [100]. La hauteur de barrière est en accord avec certaines études qui proposent des hauteurs de barrière comprises entre 0,58 et 0,70 eV [91] [100] [101], même si d'autres études font état d'une hauteur de barrière supérieure à 1 eV [102].

La figure 13 montre également une légère diminution du courant de grille en régime inverse après un stress à canal ouvert. La caractéristique I_{DS} (V_{GS}) réalisée pour une tension drain-source de 15 V est reportée avant et après 216 h de stress accumulé sur la figure 14. Une chute importante de I_{DS} est observée et cela est en accord avec la diminution du courant de drain obtenue après 216 h de vieillissement (figure 11). De plus, on constate que la tension de pincement V_p reste constante à -3,4 V avant et après le stress.

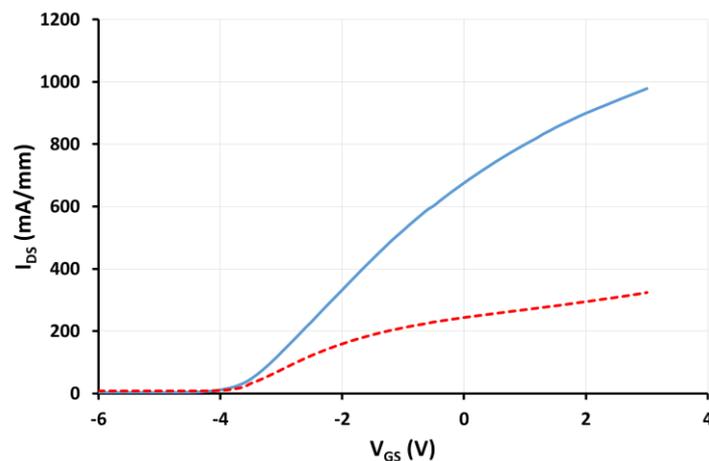


Figure 14 : Caractéristiques I_{DS} (V_{GS} , $V_{DS} = 15$ V) avant stress (courbe bleue) et après 216 h de stress (tirets rouges)

Afin de comprendre les mécanismes de dégradation induite par le stress électrique à canal ouvert, nous avons analysé l'influence de la lumière et du sens de polarisation sur le comportement électrique des composants AlInN/GaN stressés. Ainsi la figure 15 présente l'influence de la lumière sur les caractéristiques électriques d'un transistor avant (figure 15-a) et après stress (figure 15-b).

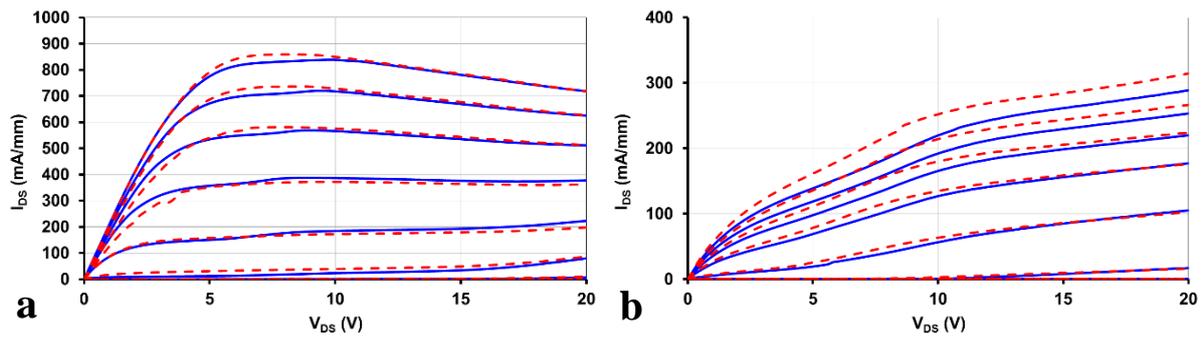


Figure 15 : Effets de lumière sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ avant stress (a) et après stress (b), courbes bleues à l'obscurité et tirets rouges sous éclairage V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V

La figure 15-b met en évidence une augmentation du courant de drain lorsque les courbes $I_{DS}(V_{GS})$ sont mesurées à $V_{GS} = 0$ et 1 V (figure 15-b) quelle que soit la valeur de V_{DS} après un stress à canal ouvert. Cette sensibilité à la lumière est différente de celle observée avant le stress (figure 15-a) car la sensibilité était visible lorsque V_{DS} était inférieure à 12 V comme nous l'avons montré précédemment. Ainsi, nous pouvons penser que la lumière apporte suffisamment d'énergie pour entraîner une libération des électrons par des pièges dits donneurs et/ou par des pièges accepteurs remplis pouvant être présents initialement dans les transistors (avant stress) et/ou induits par le stress à canal ouvert puisque la sensibilité vis-à-vis de la lumière est plus importante après le stress électrique. Afin de confirmer cette hypothèse, l'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN a été mesurée avant et après 216 h de stress à canal ouvert.

La figure 16 présente l'impact du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN avant (figure 16-a) et après stress (figure 16-b). Nous constatons que les différences entre les caractérisations électriques effectuées en configuration 1 (traits pleins bleus) et celles réalisées en configuration 2 (traits pointillés verts) sont les plus prononcées en particulier pour les courbes $I_{DS}(V_{DS})$ faites à $V_{GS} = -1, 0$ et 1 V. Cependant les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ obtenues dans la configuration 1 sont plus proches de celles obtenues dans la configuration 3 que celles mesurées dans la configuration 2 excepté pour une tension drain-source inférieure à 12 V. Néanmoins, la présence de l'effet kink sur les caractéristiques électriques des transistors stressés à canal ouvert n'est pas évidente.

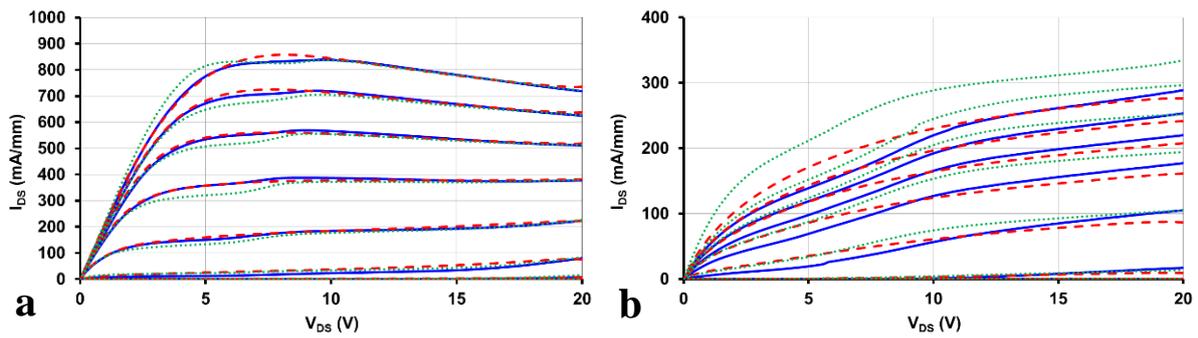


Figure 16 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ avant (a) et après (b) un stress à canal ouvert mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)
 C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V
 C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V
 C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

L'influence de la lumière blanche sans UV et du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors non stressés est principalement observée quand $V_{DS} < 12$ V quelles que soient les valeurs de V_{GS} . Cependant, les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés sont aussi sensibles à la lumière quelles que soient les valeurs de V_{DS} mais seulement pour les courbes $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ mesurées lorsque le canal du transistor est ouvert (figure 15-b) et par conséquent quand la zone déplétée est minimale. Ainsi, nous pouvons dire que les pièges électriques induits par le stress électrique sont plutôt localisés dans une zone située entre la grille et le drain proche de la surface du composant. L'impact du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ du transistor stressé (figure 16-b) quelle que soit la valeur de V_{DS} peut aussi être lié à la présence de pièges électriques pouvant agir comme des donneurs. De plus, la sensibilité vis-à-vis du sens de polarisation est plus importante lorsque les courbes $I_{DS}(V_{DS})$ sont mesurées à $V_{GS} = -1, 0$ et 1 V. Cela confirme que les pièges électriques sont localisés dans une région proche de la surface. Ainsi, nous pouvons supposer que les caractéristiques électriques des transistors stressés sont dégradées par des pièges accepteurs et donneurs induits par le stress à canal ouvert ainsi que par la présence de pièges étant à l'origine de l'effet kink. En effet, les pièges électriques accepteurs induits par le stress et provoquant une chute de I_{DS} et une élévation de $R_{accès}$ peuvent compenser les pièges donneurs existant dans le buffer GaN avant le stress et ainsi expliquer l'atténuation de l'effet kink sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés.

La figure 17 présente les résultats de la transconductance avant stress, après stress, 4 mois après la fin du stress et 1 an après la fin du stress.

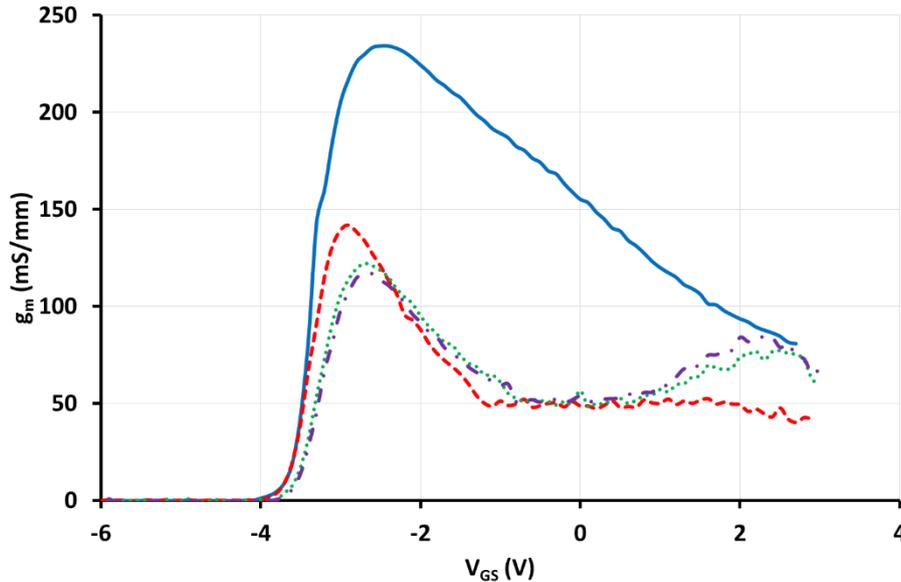


Figure 17 : Caractéristiques g_m (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN mesuré à $V_{DS} = 15$ V avant (courbe bleue), après un stress à canal ouvert de 216 h (tirets rouges), 4 mois après la fin du stress (pointillés verts) et 1 an après la fin du stress (intermittents violets)

Nous constatons que la transconductance extrinsèque maximum diminue de 234 à 142 mS/mm. Ce phénomène est cohérent avec la dégradation du courant de drain observée sur la figure 11 après le stress à canal ouvert. De plus, la figure 17 montre que le g_m du composant non stressé diminue de façon continue lorsque V_{GS} augmente de -2,5 à 3 V alors qu'il chute rapidement quand V_{GS} varie de -1,2 à -3 V. Après le stress, il reste quasiment constant lorsque V_{GS} est supérieur à -1,2 V. Ainsi, la figure 17 montre que la dégradation de la transconductance est plus prononcée après le stress lorsque V_{GS} varie entre -3 et 1 V que lorsque V_{GS} est proche de 2 V. Des tendances similaires ont été observées après des tests de vieillissement électriques réalisés sur des transistors AlInN/AlN/GaN par Zhu et al. [103]. Dans ce cas, la dégradation du g_m était principalement induite par la chute de la conductivité du canal (c'est-à-dire une augmentation de la résistance du canal) et par une augmentation de la résistance d'accès attribuée à un piégeage des électrons dans la zone d'accès grille-drain [103]. Nous pensons également que la dégradation de la transconductance observée après 216 h de stress à canal ouvert sur la figure 17 est liée à une dégradation du canal et à une augmentation de la résistance d'accès. En effet, si la diminution du g_m était due uniquement à une dégradation du canal alors les courbes g_m (V_{GS}), mesurées avant et après le stress à canal ouvert, seraient quasiment confondues pour des valeurs élevées de V_{GS} (i.e. proches de 0 V).

La figure 17 montre également que le maximum du pic du g_m varie de -2,5 à -3 V après 216 h de stress. Nous supposons que le déplacement du pic de g_m est lié à la création de pièges

électriques durant le stress. Néanmoins, ce dernier se déplace de -3 à -2,6 V quand la caractéristique $g_m(V_{GS})$ est mesurée 4 mois après la fin du stress. Nous pensons que des porteurs sont relâchés par des pièges électriques lents et que par conséquent le maximum de la transconductance est déplacé positivement.

De plus, il est important de noter l'apparition d'un second pic pour V_{GS} proche de 2 V quand la transconductance est mesurée 4 mois après la fin du stress. Afin d'établir l'irréversibilité ou non de ce deuxième pic, nous avons effectué une mesure de la caractéristique $g_m(V_{GS})$ 1 an après la fin du stress. Nous observons que le deuxième pic est toujours présent et que son intensité a légèrement augmenté. Dans ces conditions, ces résultats prouvent que l'apparition du deuxième pic est irréversible et nous pensons qu'il est induit par le stress à canal ouvert. Zhu et al. ont déjà rapporté l'apparition d'un deuxième pic sur les caractéristiques $g_m(V_{GS})$ après un stress NGB de 25 h. Selon eux, ce phénomène était similaire à l'effet kink qui pourrait être induit par le piégeage de porteurs chauds dans des pièges se comportant comme des donneurs dans la couche de GaN, puis un dépiégeage assisté par un champ électrique. Cependant, nous pensons que la présence d'un deuxième pic de g_m après le stress n'est pas forcément liée à l'effet kink car la figure 11 montre la présence d'effet kink avant le stress mais pas après. Pour ces raisons nous pensons que les mécanismes physiques qui expliquent la présence de deux pics de g_m sont différents de ceux rapportés par Zhu et al. [103]. De plus, cette hypothèse est cohérente avec le fait qu'ils ont observé un deuxième pic sur des transistors HEMTs AlInN/AlN/GaN après un stress NGB et non après un stress à canal ouvert [103].

Afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation induits par le stress à canal ouvert, nous avons analysé minutieusement la caractéristique $g_m(V_{GS})$ mesurée pour des HEMTs AlInN/GaN stressés durant 216 h (figure 17). Il est important de noter que le second pic de g_m est clairement apparu pour un V_{GS} proche de 2 V quand les HEMTs AlInN/GaN ont été caractérisés 4 mois puis 1 an après la fin du stress et non immédiatement après le stress. De plus, nous n'observons aucune différence de valeur de g_m pour $V_{GS} = 2,5$ V avant le stress et 4 mois après le stress. Nous pouvons en conclure que la dégradation du g_m est plus vraisemblablement expliquée par une augmentation de la résistance du canal que par une augmentation de la résistance d'accès induite par un effet de piège dans la zone d'accès grille-drain.

La présence de ces deux pics de g_m sur la figure 17 peut être la réminiscence d'une caractéristique $g_m(V_{GS})$ mesurée pour un HEMT AlInN/GaN à double canal [104] [105]. En

effet, nous pensons que le premier pic de g_m est attribué au canal du GaN dans les HEMTs AlInN/GaN et que le second pic de g_m clairement prononcé, qui apparaît 4 mois après la fin du stress à canal ouvert correspond à la création d'un canal parasite induit par le stress. Etant donné que la tension drain-source est forte et que le canal des HEMTs AlInN/GaN est totalement ouvert durant le stress à canal ouvert, une forte densité de porteurs chauds est générée dans la région entre le drain et la source et ces porteurs chauds peuvent causer des dégradations importantes dans le canal du GaN. Il est bien connu que les électrons générés par les stress à canal pincé ($V_{GS} = -6$ V et $V_{DS} > 32$ V) impliquent une création de pièges électriques dans la couche de GaN [31] car la composante verticale du champ électrique pointant vers le GaN favorise l'injection de porteurs chauds dans le GaN et par conséquent la création d'état de pièges. Néanmoins, aucun champ électrique vertical n'existe lorsque le composant est soumis à un stress à canal ouvert et nous pensons que la densité des défauts induits par les porteurs chauds dans le GaN est inférieure à celle d'un stress à canal pincé. De même, nous pensons que les porteurs chauds peuvent, durant le stress à canal ouvert, atteindre des niveaux d'énergie suffisants pour être injectés et générer davantage de défauts et de pièges électriques à l'interface AlInN/GaN et/ou dans la couche d'AlInN et/ou à l'interface couche de passivation/AlInN (figure 18).

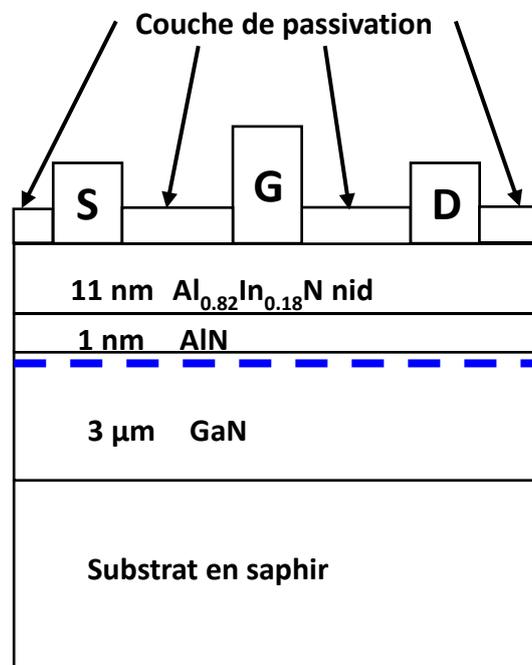


Figure 18 : Localisation probable des pièges dans le transistor

Ainsi, les porteurs chauds restent piégés dans la zone d'accès grille-drain. Cette hypothèse est en accord avec les interprétations justifiant la diminution de $I_{DS\ max}$,

l'augmentation de $R_{\text{accès}}$ et la chute de $g_{\text{m max}}$ après 216 h de stress à canal ouvert (figures 11 et 17). De plus, l'apparition du second pic sur les courbes $g_{\text{m}}(V_{\text{GS}})$ après le stress est clairement observée 4 mois puis 1 an après la fin du stress et non immédiatement après le stress. Ainsi, nous pouvons conclure que les conditions de polarisation utilisées durant le stress à canal ouvert permettent aux porteurs chauds d'avoir une énergie suffisante pour arracher des électrons des atomes de la couche du semiconducteur et/ou du canal GaN et ces porteurs sont confinés puis piégés à l'interface couche de passivation/AlInN et/ou dans la couche de passivation. Nous pouvons également établir que ces pièges électriques induits par les stress sont très lents puisque le canal parasite n'est visible que 4 mois après la fin du stress. Cela signifie que le second pic de g_{m} est seulement visible lorsque les pièges électroniques lents induits par le stress à canal ouvert libèrent leurs porteurs à l'interface couche de passivation/AlInN et/ou dans la couche de passivation. Cette hypothèse est cohérente avec le déplacement positif du pic de g_{m} qui a été observé 4 mois après la fin du stress (figure 17). De plus, l'apparition d'un second pic de g_{m} à V_{GS} proche de 2 V confirme que le canal parasite est créé proche de la surface des HEMTs AlInN/GaN. Ainsi, ces résultats prouvent que le stress à canal ouvert provoque un piégeage des porteurs chauds dans la couche de GaN et/ou une injection de porteurs chauds et de porteurs qui sont arrachés du canal au niveau de l'interface couche de passivation/AlInN et/ou de la couche de passivation. De même la présence d'un canal parasite peut expliquer le fait qu'il n'y ait aucune différence entre les valeurs de g_{m} mesurées à des V_{GS} proches de 2 V avant les stress et celles obtenues 1 an après la fin du stress à canal ouvert, et ce en dépit de la dégradation de la résistance d'accès de drain. Enfin, la diminution de la résistance d'accès est masquée par la présence d'un canal parasite dans la couche de passivation.

En résumé, nous avons montré que le stress à canal ouvert induit une diminution de I_{DS} et du g_{m} et une augmentation de $R_{\text{accès}}$. De plus, nous avons montré que le stress provoque la création d'un canal parasite dans une zone proche de la surface du composant. Ces dégradations sont expliquées par le piégeage des porteurs chauds dans la zone d'accès grille-drain et par le confinement des électrons arrachés au canal dans le buffer GaN. Elles pourraient également provenir d'une injection de porteurs chauds dans la couche de passivation et/ou à l'interface AlInN/couche de passivation.

Afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation induits par le vieillissement électrique, il est impératif d'étudier l'influence de stress réalisés dans d'autres conditions de polarisation sur les performances électriques des transistors AlInN/GaN.

D. Influence d'un stress à canal pincé sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlInN/GaN

Nous allons maintenant analyser l'influence d'un stress électrique à canal pincé sur les caractéristiques des transistors AlInN/GaN afin d'étudier uniquement l'effet du champ électrique sur le comportement électrique des transistors.

Le stress à canal pincé a été réalisé à $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = -6$ V durant 216 h. De même que pour le stress à canal ouvert, ce stress a été effectué à l'obscurité et à température ambiante. Dans ces conditions, il n'y a pas de porteurs qui circulent dans le canal et donc il n'y a pas d'effet thermique induit par le courant de drain. Cependant, la grille est plus sollicitée que dans le cas d'un stress à canal ouvert.

La figure 19 montre les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un transistor, mesurées avant le stress (traits pleins bleus), après 216 h de stress à canal pincé (tirets rouges) et après avoir laissé les transistors au repos à l'obscurité durant deux mois après avoir arrêté le stress (traits pointillés verts).

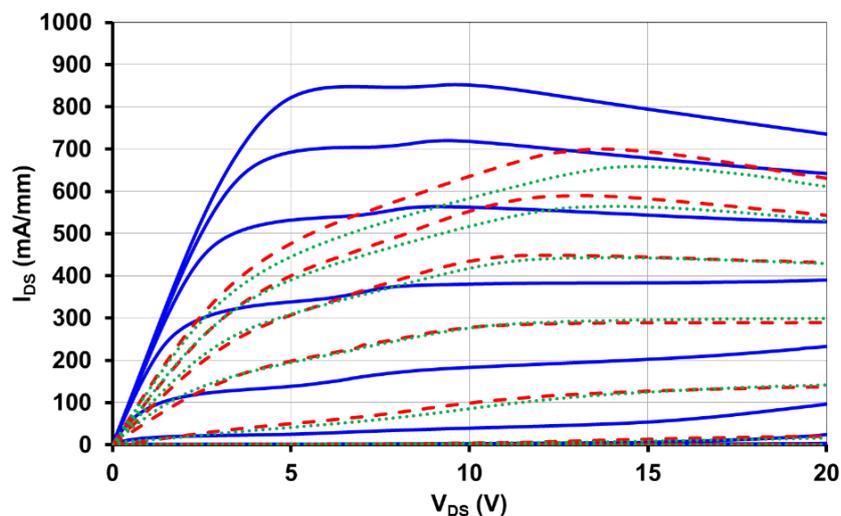


Figure 19 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant stress (courbe bleue), après 216 h de stress (tirets rouges) et après deux mois de repos (pointillés verts)

Une chute de $I_{DS \text{ max}}$ de 736 à 632 mA/mm (- 14%) et une augmentation de $R_{\text{accès}}$ de 91 à 164 Ω (+ 80%) ont été observées après le stress. De plus, les transistors ne retrouvent pas leurs performances électriques initiales (avant stress) après deux mois de repos. Les caractéristiques électriques de ces composants auraient même tendance à se dégrader légèrement. Nous constatons qu'aucun effet kink n'est visible sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants stressés.

L'évolution de $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la durée du stress accumulé est présentée sur la figure 20. Nous constatons que $I_{DS\ max}$ diminue de 736 à 632 mA/mm tandis que $R_{accès}$ augmente de 91 à 164 Ω lorsque la durée du stress augmente de 0 à 216 h.

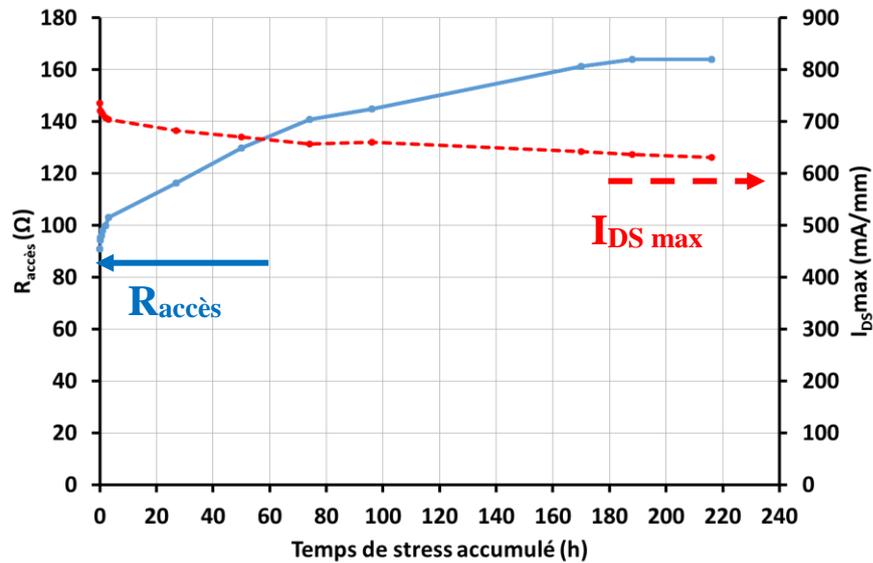


Figure 20 : Evolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction du temps accumulé de stress

Cependant, les évolutions de $I_{DS\ max}$ et de $R_{accès}$ semblent nettement plus rapides lors des premières heures du stress (0 à 3 h).

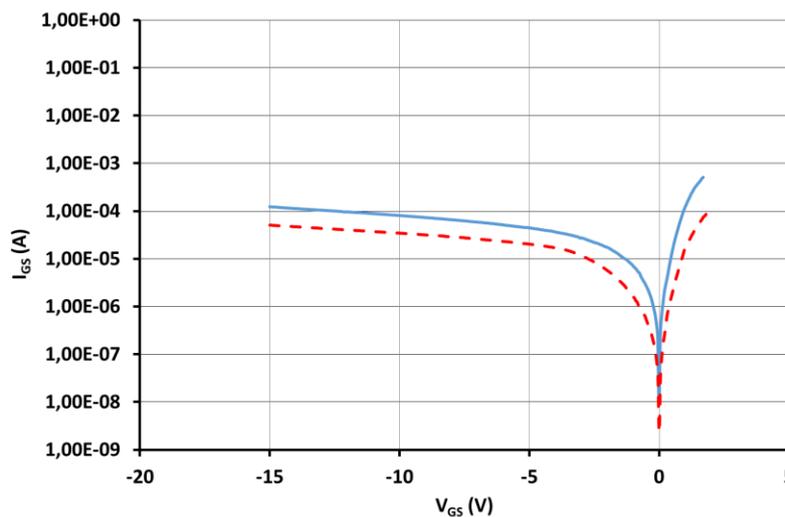


Figure 21 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) avant stress (courbe bleue) et après 216 h de stress (tirets rouges)

Dans le même temps, aucune évolution du coefficient d'idéalité et de la hauteur de barrière n'est observée et η et Φ_b restent constants respectivement à 3,1 et 0,53 eV. La figure 21 met en évidence également une légère diminution du courant de grille en régimes inverse et direct après le stress. La tension de pincement a également été extraite à partir des

caractéristiques I_{DS} (V_{GS}) mesurées avant et après stress (figure 22). On constate que V_p varie de -4 à -3,8 V après le stress à canal pincé. Les mécanismes de dégradation engendrés par ce vieillissement électrique peuvent être liés à la création de défauts de type accepteur dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN (figure 23). Ces pièges sont majoritairement créés dans le buffer GaN car le champ électrique vertical expulse les porteurs de charges du canal vers celui-ci.

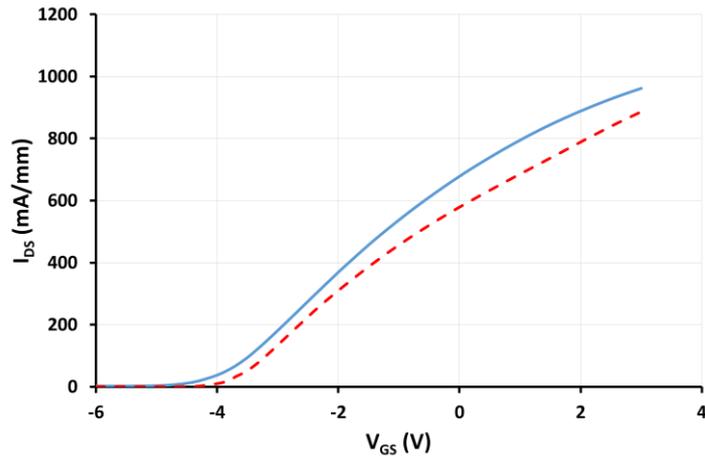


Figure 22 : Caractéristiques I_{DS} (V_{GS} , $V_{DS} = 15$ V) avant stress (courbe bleue) et après 216 h de stress (tirets rouges)

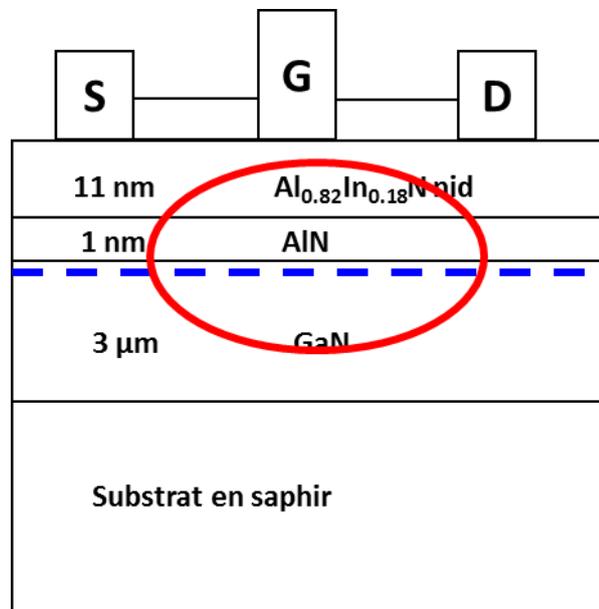


Figure 23 : Localisation probable des pièges dans le transistor

L'impact de la lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors AlInN/GaN a été analysé avant et après 216 h de stress à canal pincé. Il est rapporté sur la figure 24. Une sensibilité vis-à-vis de la lumière a été observée sur les courbes I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants stressés (figure 24-b) en particulier pour $V_{DS} < 12$ V. De plus, nous constatons que cet effet est

nettement plus important que celui observé avant le stress (figure 24-a). Nous pensons que la lumière provoque une libération des électrons par des pièges donneurs et/ou des pièges accepteurs remplis.

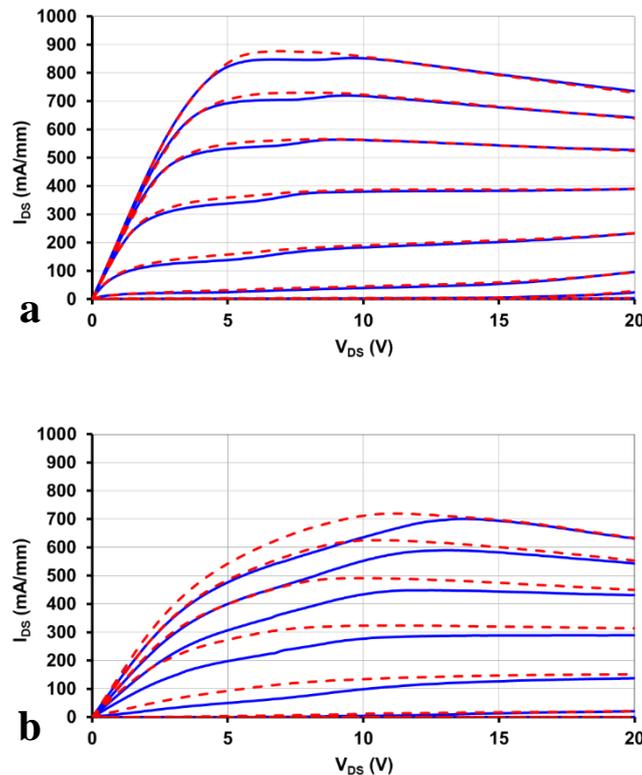


Figure 24 : Effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant stress (a) et après stress (b), courbes bleues à l'obscurité et tirets rouges sous éclairage

Afin d'interpréter les mécanismes de dégradation induits par le stress à canal pincé, nous avons analysé l'influence du sens de polarisation des caractéristiques électriques des transistors avant (figure 25-a) et après stress (figure 25-b). L'impact du sens de polarisation sur les courbes I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants stressés est plus important lorsque ces derniers sont mesurés dans la configuration 3 que dans la configuration 2 excepté lorsque $V_{GS} = 1$ V. On constate également que l'impact du sens de polarisation est fortement marqué lorsque V_{DS} est inférieure à 12 V. Nous observons donc une augmentation de la densité de pièges sensibles au sens de polarisation. Ces pièges sont en majorité situés proche de la surface du composant puisque les effets du sens de polarisation sont plus importants pour V_{GS} compris entre -1 et 1 V.

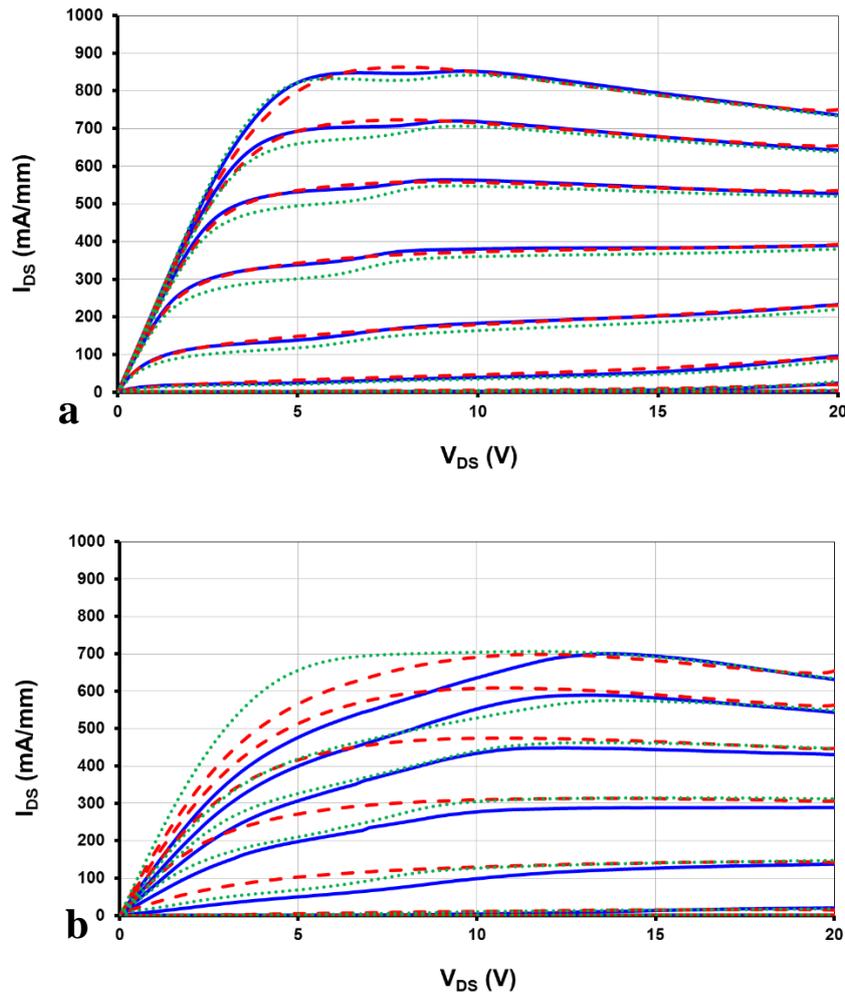


Figure 25 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant (a) et après (b) un stress à canal pincé mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)
 C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V
 C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V
 C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

E. Influence d'un stress NGB sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlInN/GaN

Afin d'étudier l'influence d'un fort champ électrique vertical, nous avons aussi analysé l'impact d'un stress dit NGB (Negative Gate Bias). Ce stress est réalisé à une tension drain-source de 0 V et une tension grille-source de -20 V durant 216 h. Ce stress a également été effectué à température ambiante et à l'obscurité. Les tendances observées après stress NGB sont les mêmes que celles obtenues après un stress à canal pincé. Cependant, la diminution de I_{DS} et l'augmentation de $R_{accès}$ sont moins importantes. En effet, la figure 26 montre une chute de $I_{DS\ max}$ de 716 à 626 mA/mm (- 12%) et une élévation de $R_{accès}$ de 102 à 139 Ω (+ 36%) après stress. La figure 26 montre également que les dégradations engendrées par le stress NGB sont

quasiment irréversibles (courbes en traits pointillés verts). L'effet kink n'est plus visible après 216 h de stress.

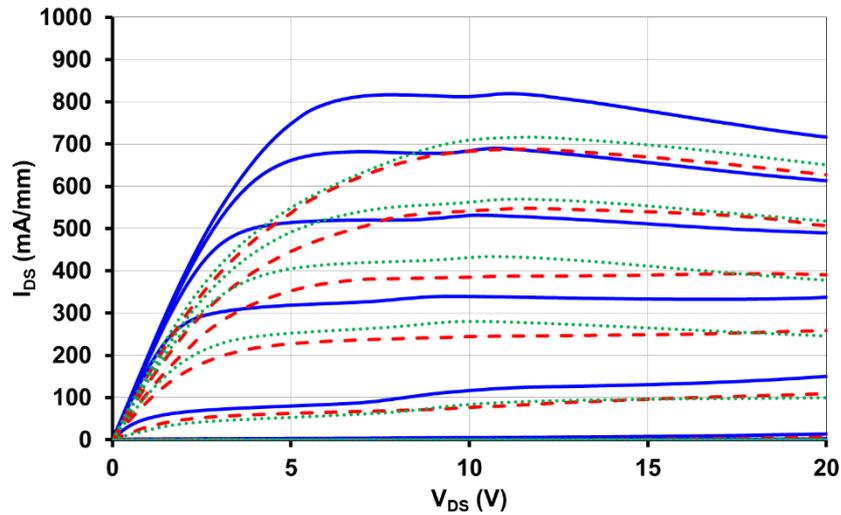


Figure 26 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant stress (courbe bleue), après 216 h de stress NGB (tirets rouges) et après deux mois de repos (pointillés verts). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 100 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V.

Dans le même temps, les valeurs de η et Φ_b restent égales respectivement à 3,5 et 0,53 eV (figure 27). Par contre, une évolution de V_p de -3,7 à -3,5 V est observée (figure 28) après le stress.

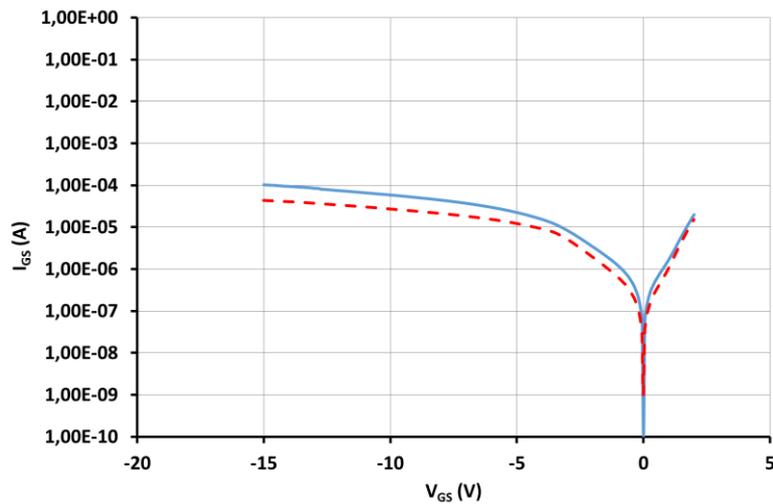


Figure 27 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) avant stress (courbe bleue) et après 216 h de stress (tirets rouges)

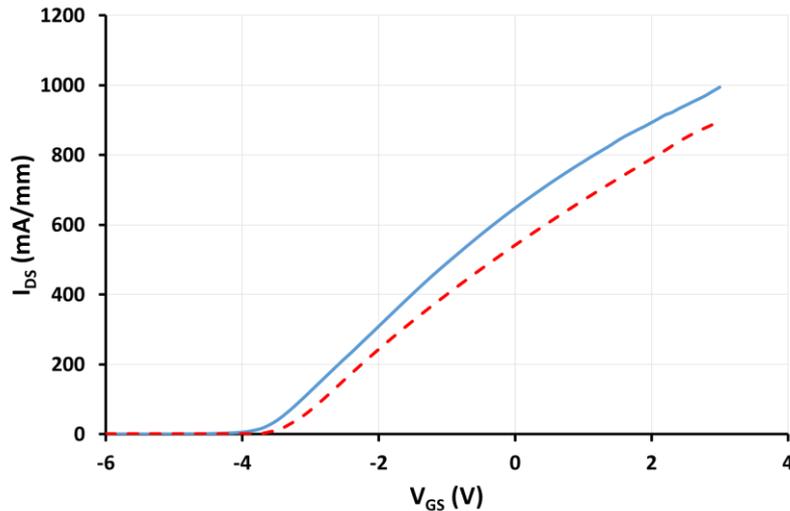


Figure 28 : Caractéristiques I_{DS} (V_{GS} , $V_{DS} = 15$ V) avant stress (courbe bleue) et après 216 h de stress (tirets rouges)

Ensuite, nous avons comparé la sensibilité aux effets de lumière des caractéristiques électriques des transistors avant stress et après 216 h de stress NGB comme cela est présenté sur la figure 29. Ainsi, les effets de lumière sont plus importants après le stress quelles que soient les valeurs de V_{GS} . Cela nous amène à penser que la densité de pièges électriques sensibles à la lumière a augmenté après le vieillissement électrique. L'augmentation du courant de drain et la diminution de la résistance d'accès engendrées par l'éclairement des transistors sont liées à la libération de porteurs de charges par des pièges donneurs et/ou des pièges accepteurs remplis.

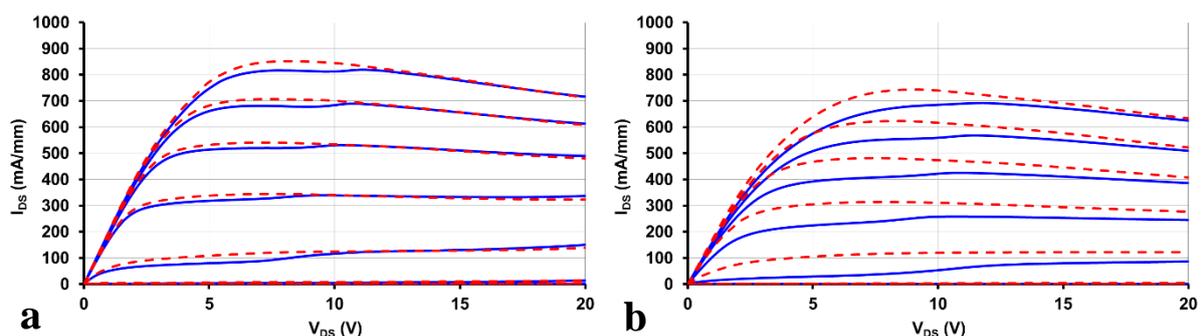


Figure 29 : Effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant (a) et après un stress NGB de 216 h (b), courbes bleues à l'obscurité et tirets rouges sous éclairnement

De même, l'impact du sens de polarisation sur les mesures I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors non stressés et stressés durant 216 h a été analysé (figures 30-a et 30-b).

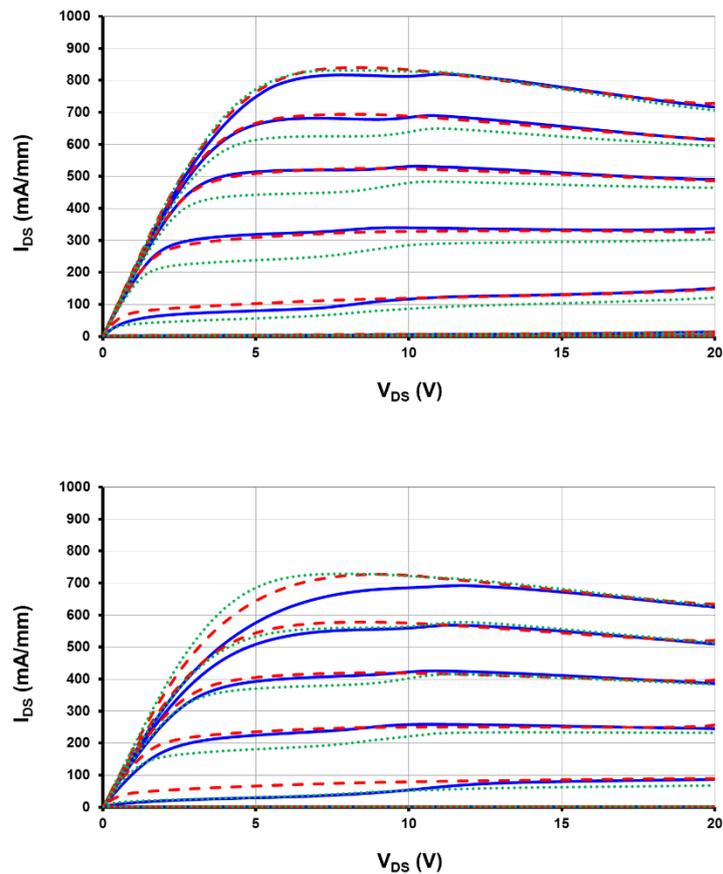


Figure 30 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ avant (a) et après (b) un stress NGB mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)
 C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V
 C2 : V_{DS} variant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V
 C3 : V_{DS} évoluant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

Nous pouvons noter une augmentation de I_{DS} et une diminution de $R_{accès}$ lorsque les mesures électriques des transistors stressés sont effectuées dans la configuration 3 en comparaison de celles réalisées en configuration 1. Cependant, la même tendance est observée lorsque les transistors sont caractérisés dans la configuration 2 uniquement lorsque $V_{GS} = 0$ et 1 V. Sinon, une chute du courant de drain est observée pour les courbes $I_{DS}(V_{GS})$ effectuées pour les autres valeurs de V_{GS} . Nous constatons donc une augmentation des pièges sensibles au sens de polarisation après un stress NGB. Ces pièges sont principalement localisés dans le buffer GaN (figure 31).

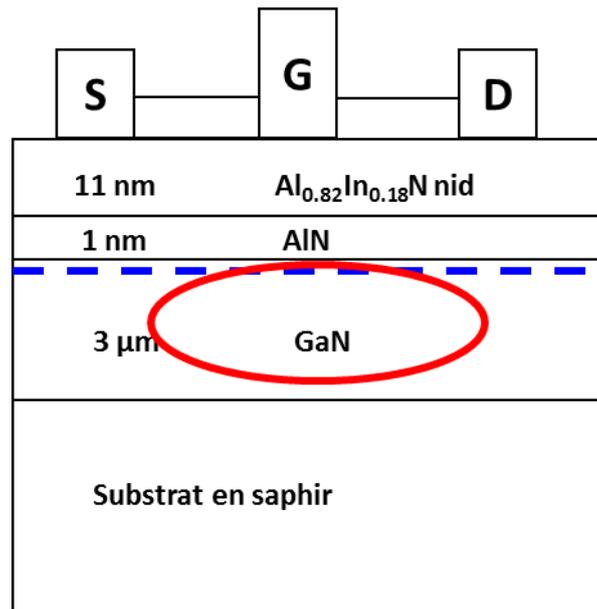


Figure 31 : Localisation probable des pièges

F. Comparaison des trois stress

Le tableau 1 présente l'évolution des paramètres $I_{DS \max}$, $R_{\text{accès}}$, η , Φ_b , V_p et de la sensibilité des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN vis-à-vis de la lumière et du sens de polarisation induite par les stress à canal ouvert, pincé ou NGB.

Paramètres	Stress à canal ouvert	Stress à canal pincé	Stress NGB
$I_{DS \max}$	-60%	-14%	-12%
$R_{\text{accès}}$	+386%	+43%	+36%
η	=	=	=
Φ_b	=	=	=
V_p	=	=	=
Evolution des effets de lumière	+	+	+
Evolution des effets de polarisation	+	+	+

Tableau 1 : Récapitulatif des évolutions des paramètres électriques selon les stress

Ce tableau montre que les dégradations de $I_{DS \max}$ (diminution de 60%) et de $R_{\text{accès}}$ (augmentation de 386%) observées après un stress à canal ouvert sont nettement plus importantes que celles obtenues après un stress à canal pincé (-14% pour $I_{DS \max}$ et 43% pour

$R_{\text{accès}}$). Cependant, la diminution de $I_{\text{DS max}}$ (-12%) et l'augmentation de $R_{\text{accès}}$ (36%) les plus faibles sont obtenues après un stress NGB.

Dans le même temps, aucune évolution de η et Φ_b n'a été constatée après les 3 stress électriques et V_p est restée quasiment inchangée quel que soit le vieillissement effectué. Cela est cohérent avec la légère diminution du courant de grille en régime inverse observée après 216 h de stress à canal ouvert, à canal pincé et NGB. Ces résultats prouvent une bonne fiabilité de la grille Ni/Au vis-à-vis de ces 3 stress. De même, les contacts ohmiques semblent robustes face au stress puisque les caractéristiques $I_{\text{GS}}(V_{\text{GS}})$ n'évoluent quasiment pas au cours du stress et que les contacts ohmiques sont sollicités durant la mesure de la courbe $I_{\text{GS}}(V_{\text{GS}})$.

Cependant, la chute de $I_{\text{DS max}}$ et l'élévation de $R_{\text{accès}}$ après les vieillissements électriques prouvent que les 3 stress électriques induisent l'apparition de pièges électriques de type accepteur dans les composants mais que la concentration de ces pièges est plus importante après un stress réalisé à canal ouvert. Tous ces stress ont également été réalisés avec des transistors AlInN/GaN ayant une distance grille-drain (L_{GD}) plus importante et nous avons constaté que les dégradations électriques obtenues sont moins marquées lorsque le L_{GD} est plus grand. Ainsi, pour un stress à canal ouvert sur un HEMT avec un L_{GD} de 3,5 μm , le courant de drain ne diminue que de 50% et la résistance d'accès n'augmente que de 165%. Cela est dû au fait que pour un L_{GD} plus faible, le champ électrique entre la grille et le drain est plus intense ce qui engendre la création d'une densité de pièges plus importante. Cela prouve également que les pièges accepteurs induits par ces vieillissements sont localisés dans une zone comprise entre la grille et le drain parce qu'on observe des effets différents lorsqu'on fait varier la distance L_{GD} . De même, les caractéristiques $I_{\text{DS}}(V_{\text{DS}}, V_{\text{GS}})$ des composants stressés sont plus sensibles à la lumière et au sens de polarisation pour les composants stressés qui possèdent un L_{GD} plus faible. Cela confirme la présence de pièges électriques dans une zone située entre le drain et la grille. De plus, la lumière engendre une élévation du courant de drain des composants après les 3 stress électriques. Ce phénomène est lié à une libération de porteurs par des pièges donneurs ou par des pièges accepteurs remplis induits par les stress. L'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{\text{DS}}(V_{\text{DS}}, V_{\text{GS}})$ des composants stressés par un stress à canal ouvert (figure 16-b) a été observée quelle que soit la valeur de V_{DS} contrairement aux composants qui ont été vieillis par un stress à canal pincé ou un stress NGB. Dans ce cas, l'impact du sens de polarisation est observé pour $V_{\text{DS}} < 12$ V (figures 25-b et 30-b). De plus, nous pouvons noter que les caractéristiques $I_{\text{DS}}(V_{\text{DS}}, V_{\text{GS}})$ des transistors stressés qui ont été mesurées dans la configuration 2 (figures 16-b et 25-b) sont toujours supérieures à celles réalisées dans la

configuration 1 excepté pour les composants vieillis par un stress NGB (figure 30-b). En effet, le courant I_{DS} mesuré en configuration 2 est plus faible que celui obtenu en configuration 1 excepté pour $V_{GS}=0$ et 1 V. Ce phénomène a déjà été observé pour les transistors non stressés (figure 10) et a été expliqué par un piégeage des électrons du canal quand V_{GS} est supérieur à V_p . Ainsi, cet effet est similaire à celui de l'effet kink et est lié à la composante verticale du champ électrique qui est élevée et qui induit non seulement un piégeage des électrons du canal dans les pièges préexistants dans les transistors mais également dans des nouveaux pièges induits par le stress NGB dans le buffer GaN.

Par contre, les dégradations observées après les stress à canal ouvert sont expliquées par la création de pièges accepteurs et/ou donneurs situés dans une zone entre la grille et le drain proche de la surface des composants. Finalement, les dégradations engendrées par le stress à canal pincé sont liées à la présence de pièges électriques dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN.

G. Conclusion sur les études concernant les stress électriques

Après avoir montré l'existence de pièges électriques dans les transistors AlInN/GaN non stressés, nous avons mis en évidence que les stress à canal ouvert, à canal pincé ou NGB induisent la création de pièges de types accepteur et donneur dans les composants. Cependant, les pièges électriques induits par le stress à canal ouvert sont localisés entre la grille et le drain dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN et/ou dans la couche d'AlInN et/ou à l'interface couche de passivation/AlInN. Les pièges électriques engendrés par le stress à canal pincé sont plutôt situés dans le buffer GaN et à l'interface GaN/AlInN et ceux créés par le stress NGB sont essentiellement présents dans le buffer GaN.

L'effet kink observé avant les stress électriques n'est pas clairement mis en évidence après avoir vieilli les composants avec un stress à canal ouvert ou un stress à canal pincé. Cependant, l'effet kink est légèrement observé après un stress NGB lorsque le composant est caractérisé dans la configuration C2. Nous pensons que les pièges induits par les stress à canal ouvert ou à canal pincé peuvent compenser les pièges préexistants responsables de l'effet kink. Par contre, ce n'est pas le cas lorsque les composants sont soumis à des stress NGB.

IV. Etude d'électroluminescence au cours d'un stress à canal ouvert

Comme nous l'avons montré précédemment, la présence de pièges électriques dans les transistors AlInN/GaN peut être à l'origine du manque de fiabilité de ces composants. En effet,

la présence d'un effet kink sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des HEMTs AlInN/GaN (figure 9) est néfaste pour les performances de ces transistors à effet de champ car elle induit une augmentation de la conductance de sortie, une compression de la transconductance et une dispersion entre les caractéristiques statiques et hyperfréquences [106]. L'origine de ces phénomènes n'est pas encore claire. Ainsi, l'origine de l'effet kink peut être liée à un mécanisme d'ionisation par impact, de piégeage de charges ou une combinaison des deux mécanismes [96] [97]. En outre, les phénomènes de piégeage de charges ou d'ionisation par impact sont engendrés par des champs électriques élevés et peuvent limiter la fiabilité des transistors AlInN/GaN [107]. De plus, la présence de pièges électriques dans les transistors peut modifier leurs comportements électriques en fonctionnement et donc influencer les mécanismes de dégradation induits par les tests de vieillissements électriques. Il est connu que les transistors de la filière GaN sont destinés à des applications nécessitant des champs électriques élevés qui peuvent entraîner la génération d'électrons chauds et ainsi émettre un signal d'électroluminescence (EL) [108] [109].

Pour ces raisons, nous avons décidé de caractériser les transistors AlInN/GaN en fonctionnement par des techniques d'électroluminescence. En effet, les mesures d'électroluminescence peuvent être utilisées afin d'analyser les mécanismes physiques liés aux dégradations des transistors de la filière GaN. Ainsi, Montes Bajo et al. ont mis en évidence que la dégradation des HEMTs AlGaInN/GaN durant un stress à canal pincé est liée à la génération de « piqures » ou « pits » en anglais à la surface du semiconducteur [95]. L'augmentation du courant de grille a été corrélée avec l'apparition de « spots » d'électroluminescence le long de la grille du côté du drain et à l'apparition de défauts tels que des « piqures » de surface induites par le stress électrique [95]. De même, Meneghini et al. ont étudié la fiabilité de HEMTs AlGaInN/GaN soumis à un stress à canal ouvert en utilisant des techniques d'électroluminescence [110]. Cet article a mis en évidence que les électrons chauds induisent un piégeage de charges négatives dans une zone située entre la grille et le drain située dans les couches de passivation et/ou d'AlGaInN des transistors AlGaInN/GaN. Ce phénomène entraîne une dégradation des performances électriques des transistors AlGaInN/GaN [110]. De plus, ils ont mis en évidence qu'une bande d'émission parasite peut se superposer au spectre d'électroluminescence lorsque le composant est polarisé à des tensions drain-source élevées [111]. Ce phénomène est lié à des transitions radiatives mettant en jeu les mêmes niveaux d'énergie que ceux responsables de la luminescence jaune des couches de GaN [111]. Zeng et al. ont également mené des études de fiabilité des transistors AlGaInN/GaN en caractérisant les

composants par électroluminescence [112]. Ils ont montré que la courbe représentant l'intensité du signal d'électroluminescence ($I(EL)$) émis par des transistors de la filière GaN non stressés en fonction de V_{GS} a une forme en cloche lorsque les composants sont polarisés à un V_{DS} relativement faible (< 10 V). En effet, l'intensité du signal d'électroluminescence est liée à la concentration d'électrons chauds dans le canal qui est proportionnelle à la valeur du champ électrique et de la densité d'électrons dans le canal [112]. De plus, l'intensité du signal d'électroluminescence augmente lorsque V_{GS} augmente de la tension de pincement jusqu'à une valeur maximale. Ce phénomène est lié à une élévation de la concentration d'électrons dans le canal du transistor. Cependant, $I(EL)$ diminue pour des valeurs élevées de V_{GS} à cause de la chute de V_{GD} qui résulte de la réduction du champ électrique dans le canal [112]. Zeng et al. ont également montré que l'intensité du signal d'électroluminescence mesurée lorsque que le transistor est polarisé à canal ouvert augmente de façon monotone lorsque V_{GS} augmente et lorsque V_{DS} est supérieur à 10 V. Dans ces conditions, la tension grille-drain, et par conséquent le champ électrique, est suffisamment élevée pour produire des porteurs chauds et ainsi $I(EL)$ est plus sensible à la densité de courant et non à V_{GD} [112]. Quelques articles présentent également des études d'électroluminescence sur la dégradation de transistors AlGaIn/GaN soumis à des stress à canal ouvert ($V_{DS} = 30$ V) et sur l'impact de V_{DS} et V_{GS} sur l'intensité du signal d'électroluminescence [113] mais les résultats ne sont pas exactement les mêmes que ceux rapportés par Zeng et al. [112]. En effet, les transistors utilisés ont une technologie en « field plate » qui engendre un impact du champ électrique différent sur V_{DS} et V_{GS} [112]. En résumé, tous ces papiers montrent que les techniques d'électroluminescence sont très intéressantes pour l'étude des mécanismes de dégradation des transistors de la filière GaN. Pour ces raisons, nous avons analysé l'impact d'un stress à canal ouvert réalisé avec des conditions de polarisation sévères sur les caractéristiques électriques d'un transistor AlInN/GaN. Ainsi, le stress à canal ouvert a été réalisé à $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V qui sont des conditions de polarisation qui permettent d'observer une courbe $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche et qui sont sévères pour le composant. Afin de comprendre les mécanismes de dégradation engendrés par ce stress, nous avons également étudié l'influence d'un stress électrique effectué dans ces conditions de polarisation sur le spectre d'électroluminescence mesuré pour un transistor AlInN/GaN.

Cette étude a été réalisée sur 6 transistors AlInN/GaN ayant une longueur de grille de $0,7 \mu\text{m}$, une largeur de grille de $50 \mu\text{m}$, une distance grille-source de $1 \mu\text{m}$ et une distance grille-drain de $3,5 \mu\text{m}$. Les spectres d'électroluminescence ont été enregistrés à l'aide d'un

spectromètre Raman INVIA Renishaw à température ambiante (figure 32). Pour faire cette étude, nous avons utilisé un objectif x100 ce qui veut dire que la zone analysée a un diamètre de l'ordre de 1 μm .

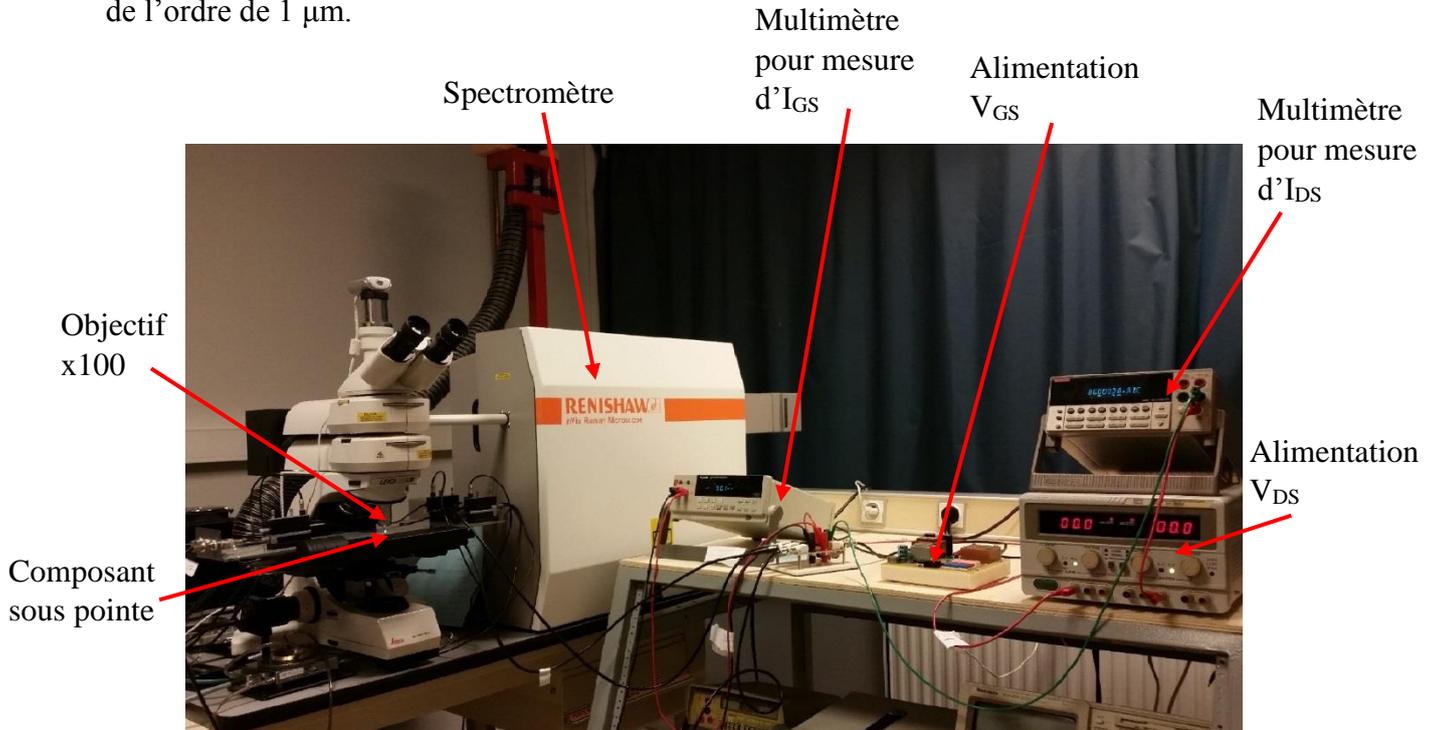


Figure 32 : Montage utilisé pour l'étude d'électroluminescence

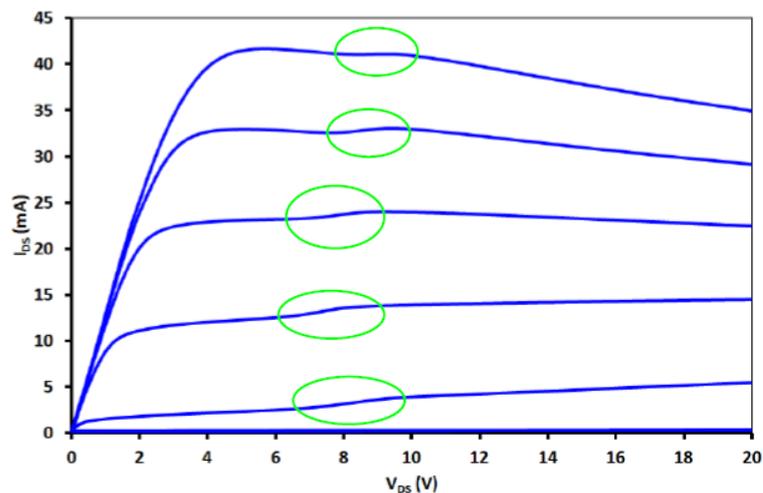


Figure 33 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avec V_{DS} variant de 0 à 20 V et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

La figure 33 montre les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) mesurées à l'obscurité et met en évidence une brutale augmentation du courant de drain lorsque V_{DS} est inférieur à 10 V (zone entourée par un cercle sur la figure 33) attribué à l'effet kink. Nous observons également une diminution du courant de drain lorsque V_{DS} est supérieur à 10 V et V_{GS} est égal à 0 et 1 V qui

est attribuée à un effet thermique lié à l'auto-échauffement du transistor polarisé et/ou à un effet de pièges. Comme nous l'avons montré précédemment [89], une augmentation du courant de drain est observée pour des $V_{DS} < 10$ V quel que soit V_{GS} et aucun effet kink n'est présent sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ lorsque le composant est éclairé avec de la lumière blanche sans UV. Ainsi, ce phénomène est lié à la libération des électrons par des pièges électriques de type donneur ou par des pièges accepteurs remplis préexistants dans les transistors AlInN/GaN.

Afin de mieux comprendre les mécanismes d'ionisation par impact et de l'effet kink (figure 33), nous avons analysé les spectres d'électroluminescence effectués au milieu du doigt de grille du côté du drain lorsque le composant est polarisé avec un $V_{DS} = 0$ V et un $V_{GS} = 0$ V puis pour un $V_{DS} = 26$ V et un $V_{GS} = 0,5$ V qui se révèlent être des conditions de polarisation très sévères pour les transistors AlInN/GaN utilisés.

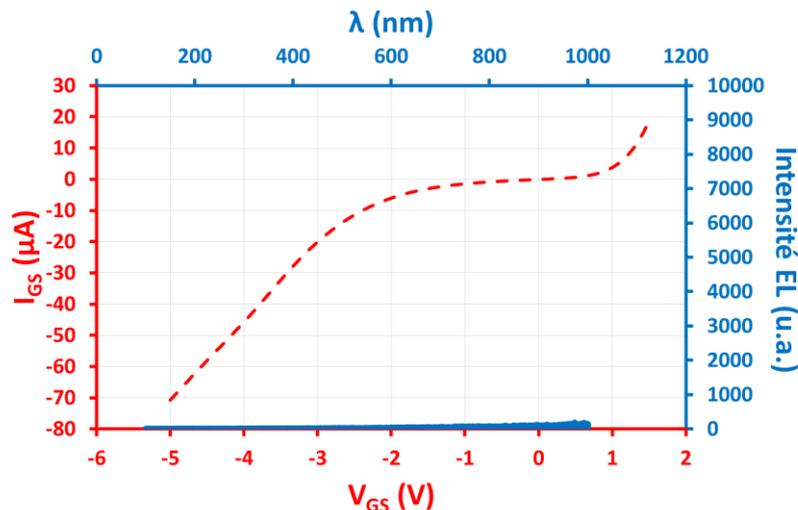


Figure 34 : Spectre d'électroluminescence d'un HEMT AlInN/GaN mesuré à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = 0$ V (courbe bleue) et caractéristique $I_{GS}(V_{GS})$ (tirets rouges)

La figure 34 montre le spectre d'électroluminescence réalisé au milieu de la grille dans la zone grille - drain d'un transistor AlInN/GaN polarisé à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = 0$ V et la caractéristique $I_{GS}(V_{GS})$ de celui-ci. On constate qu'aucun pic d'électroluminescence n'est observé dans ces conditions. Cependant, la courbe $I_{GS}(V_{GS})$ met en évidence un courant de grille élevé en régime inverse. Ainsi, il va être difficile de mettre en évidence les effets d'ionisation par impact qui pourraient en partie expliquer la présence d'effet kink sur la figure 33 car les méthodes électriques permettant d'identifier les courants de trous générés par l'ionisation par impact exigent que le courant de grille soit faible. Dans notre cas, le courant de trous pourra être potentiellement masqué par le courant de grille important [114]. En général,

l'apparition d'un courant de trous se manifeste par une courbe $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche contrairement à ce que l'on observe sur la figure 34.

Cependant, il est possible de mesurer les courbes $I_{GS}(V_{GS})$ à différentes valeurs de V_{DS} afin de vérifier la possibilité de détecter le courant de trous généré par l'ionisation par impact. La figure 35 présente une caractéristique $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche lorsque $V_{DS} = 26$ V. Ce résultat est surprenant parce que de nombreuses publications rapportent que le courant de trous peut facilement être masqué par des contributions additionnelles telles que des « fuites de surface » qui induisent des courants de fuite élevés dans les composants de la filière GaN [114].

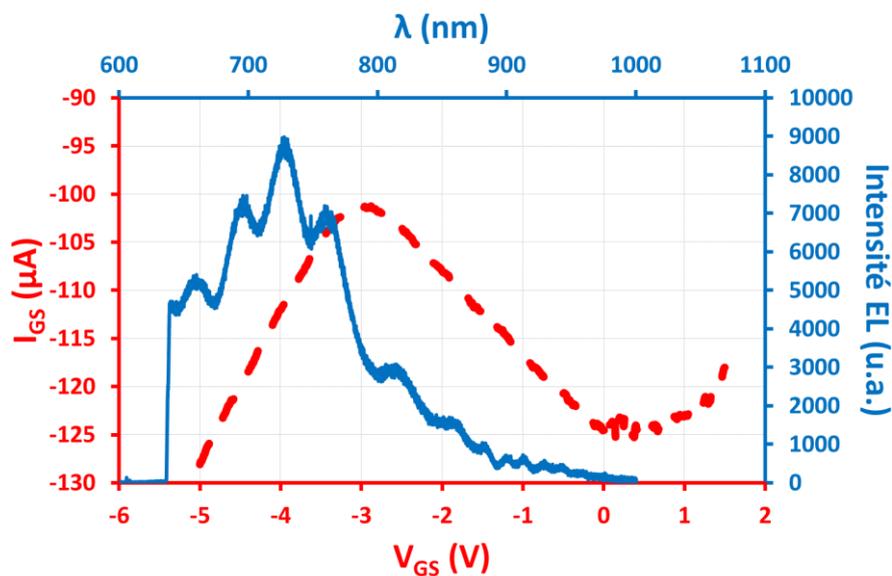


Figure 35 : Spectre d'électroluminescence d'un HEMT AlInN/GaN mesuré à $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V (courbe bleue) et caractéristique $I_{GS}(V_{GS})$ (tirets rouges)

Précédemment, B. Brar et al. [115] ont déjà présenté des courbes $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche centrée à une valeur proche de $-4,5$ V en caractérisant des HEMTs AlGaIn/GaN. Cependant, ces courbes n'ont pas été obtenues pour tous les composants du 'wafer'. De plus, les transistors ont été réalisés sur des semiconducteurs de très bonne qualité permettant ainsi aux électrons d'acquérir suffisamment d'énergie pour favoriser les phénomènes d'ionisation par impact [115]. Il est également important de préciser que le courant de fuite de la grille était faible et que les courbes $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche ont été réalisées à -25 °C. En effet, les faibles températures favorisent les mécanismes de génération de trous parce que le libre parcours moyen des électrons est plus élevé et par conséquent le taux d'ionisation par impact est augmenté [107]. Cependant, la figure 35 montre que la courbe $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche est centrée à une valeur proche de $0,5$ V. Une caractéristique de courant de grille centrée autour

d'un V_{GS} positif a déjà été observée par B. Boudart et al. [116] pour un MESFET GaAs basse température. En effet, la courbe en forme de cloche était centrée à $V_{GS} = 0,5$ V et à $V_{GS} = -1,5$ V quand les transistors étaient caractérisés pour un $V_{DS} = 10$ V à une température de 293 et 77 K, respectivement. Ainsi, ils ont conclu que la courbe du courant de grille en forme de cloche n'était pas liée à un mécanisme d'ionisation par impact mais à un mécanisme d'effet tunnel et/ou à des changements des propriétés électriques du matériau GaAs basse température.

Dans notre cas, nous pensons que la caractéristique électrique du courant de grille en forme de cloche n'est pas seulement expliquée par un mécanisme d'ionisation par impact mais par un mécanisme d'ionisation par impact assisté par des pièges électriques présents dans les transistors AlInN/GaN. Afin de confirmer cette hypothèse, la position des bandes les plus significatives ont été extraites en modélisant une courbe théorique, comme cela est présenté sur la figure 36.

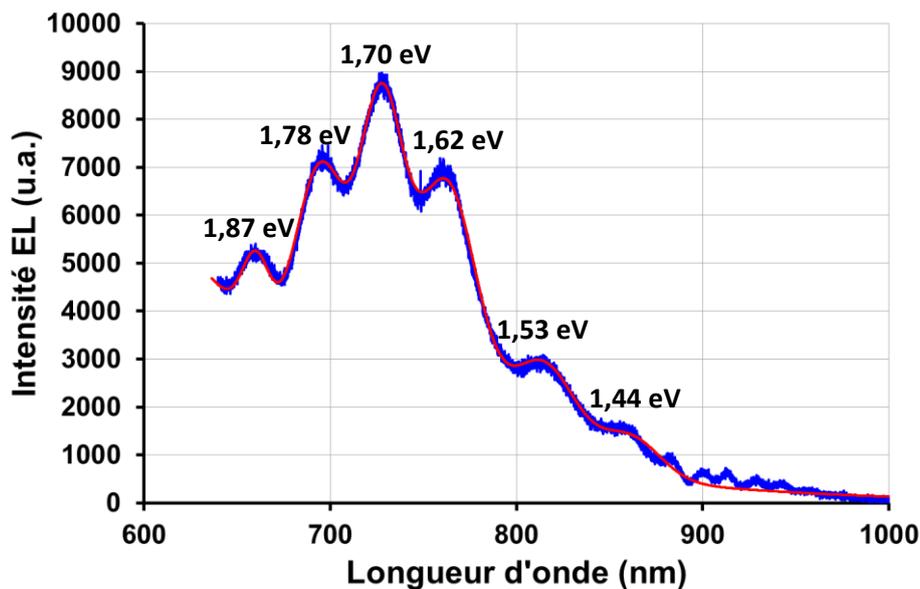


Figure 36 : Comparaison entre le spectre EL expérimental (courbe bleue) et le spectre EL modélisé (courbe rouge) en considérant l'existence de 6 pics de luminescence

La déconvolution a été effectuée en deux étapes : d'abord en soustrayant la composante correspondant à la ligne de base qui est modélisée par une exponentielle. Ce signal net obtenu a ensuite été modélisé comme une somme de six distributions gaussiennes dont les paramètres ont été ajustés par la méthode des moindres carrés via Excel. Ainsi, nous pouvons noter la présence de 6 pics localisés à 661 nm (1,87 eV), 695 nm (1,78 eV), 727 nm (1,70 eV), 762 nm (1,62 eV), 812 nm (1,53 eV) et 860 nm (1,44 eV). Ces pics ne correspondent pas aux énergies analogues au gap de GaN, ou AlN ou $Al_{0,82}In_{0,18}N$, qui sont égales à 3,39 ; 4,7 et 6,2 eV,

respectivement [26]. D'autant plus que notre détecteur ne permet pas de mesurer de telles énergies.

Nous constatons que les maxima des 6 pics sont espacés quasi régulièrement de 0,09 eV. Pour ces raisons, nous supposons que ces pics correspondent à des oscillations liées à des franges d'interférences de Fabry-Pérot et non à des signaux d'électroluminescence. Afin de mieux observer ces oscillations de Fabry-Pérot, un tracé semi-logarithmique du spectre d'électroluminescence de la figure 36 est présenté sur la figure 37.

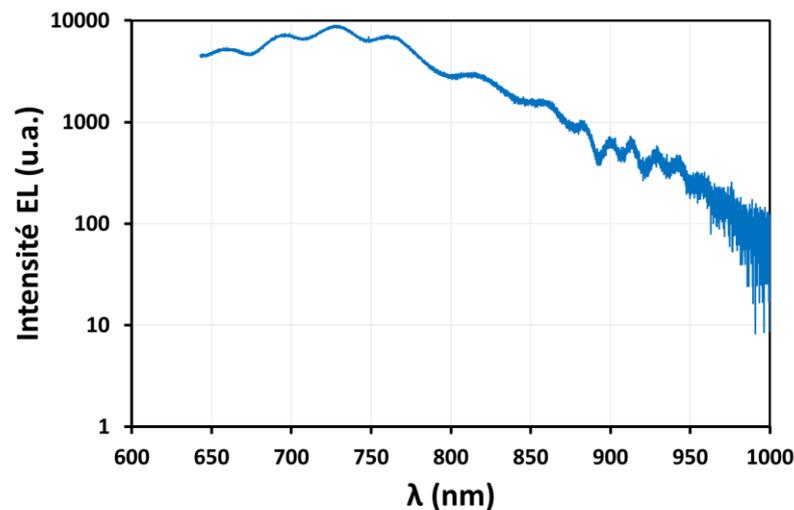


Figure 37 : Tracé semi-logarithmique d'un spectre d'électroluminescence mesuré à $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V

Ces résultats sont totalement en accord avec ceux reportés par Pomeroy et al. [117] pour un transistor AlGaIn/GaN polarisé à $V_{DS} = 20$ V et à $V_{GS} = 0$ V. De plus, Hodge et al. [118] ont également mis en évidence la présence de ces effets de Fabry-Pérot sur un spectre d'électroluminescence réalisé avec un HEMT AlGaIn/GaN polarisé à $V_{DS} = 25$ V et $V_{GS} = -16$ V et ont conclu que ces oscillations étaient attribuées à un effet d'interférences causé par différentes réflexions entre les couches semi-conductrices constituant les composants. En outre, la superposition des interférences de Fabry-Pérot et d'un spectre d'électroluminescence a non seulement été observée pour des HEMTs AlGaIn/GaN mais aussi pour des transistors AlInN/GaN polarisés à un $V_{DS} = 30$ V et à un $V_{GS} = 0$ V [30], ce qui confirme notre hypothèse. En effet, les origines des interférences de Fabry-Pérot sont généralement liées à un contraste important entre les indices de réfraction des couches minces et des substrats. Ainsi, de fortes modulations d'intensité ont également été observées sur des spectres de photoluminescence d'hétérostructures d'InGaIn/GaN et des puits quantiques épitaxiés sur un substrat de silicium (111) [119]. Ces phénomènes résultent d'un contraste élevé des indices de réfraction entre GaN

et Si et entre InGaN et l'air. Il est intéressant de préciser que ces interférences peuvent également être expliquées par des interférences d'électrons [120].

Ainsi la figure 36 montre des oscillations de Fabry-Pérot qui sont superposées sur une large bande de luminescence. Cela peut nous permettre de caractériser la qualité des couches semiconductrices épitaxiées. En effet, il est connu que des couches épitaxiées de très bonne qualité se comportent comme des étalons de Fabry-Pérot et montrent des effets d'interférence sur une large bande de photoluminescence. Ce phénomène peut nous permettre d'estimer l'épaisseur des couches et de démontrer que les interfaces ne sont pas rugueuses [121].

La large bande de luminescence présente sur les figures 36 et 37 correspond à l'émission d'un signal d'électroluminescence liée aux électrons chauds générés par l'existence d'un champ électrique intense au sein du composant polarisé à $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V. Ceci est cohérent car aucun signal d'électroluminescence n'est émis lorsque le transistor est polarisé à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = 0$ V (figure 34).

En effet, les HEMTs de la filière GaN sont connus pour émettre des signaux lumineux lorsqu'ils sont polarisés dans des conditions permettant de fonctionner à canal ouvert [113]. Dans ces conditions, un signal d'électroluminescence est induit par des transitions intrabandes d'électrons énergétiques (électrons chauds) dans la région du canal où le champ électrique est élevé [31] [109]. Pour ces raisons, plusieurs publications présentent des spectres d'électroluminescence qui montrent une distribution Maxwellienne typique c'est-à-dire un spectre dont l'intensité d'électroluminescence dépend exponentiellement de l'énergie des photons [111] et qui est lié à une transition intrabande radiative des électrons [26]. De plus, le spectre d'émission d'électroluminescence possède une forme en cloche sur laquelle est superposée des oscillations de Fabry-Pérot. Cette forme en cloche est liée aux transitions intrabandes inélastiques des électrons dues à la dispersion par les centres chargés. Ce mécanisme est décrit comme un effet de Bremsstrahlung [122].

Afin de mieux comprendre l'origine des spectres d'électroluminescence, nous avons étudié l'influence de V_{DS} sur ces derniers. La figure 38 confirme l'absence de signal d'électroluminescence lorsque le transistor est polarisé à $V_{DS} = 0$ V et à $V_{GS} = 0$ V.

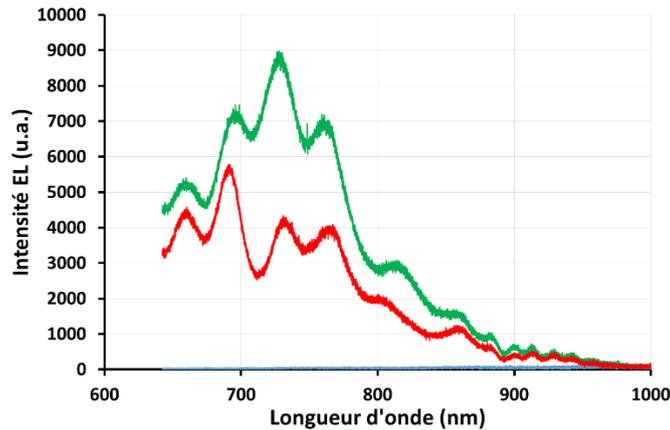


Figure 38 : Spectre d'électroluminescence d'un HEMT AlInN/GaN mesuré à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = 0$ V (courbe bleue), $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = 0,5$ V (courbe rouge), $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V (courbe verte).

Cependant, la superposition d'un spectre d'électroluminescence avec des interférences de Fabry-Pérot est observée lorsque le composant est polarisé à $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = 0,5$ V puis l'intensité du spectre d'électroluminescence s'élève lorsque V_{DS} augmente de 20 à 26 V. Cette tendance confirme que le signal d'électroluminescence provient d'une transition intrabande d'électrons chauds parce que la densité d'électrons chauds et leur énergie s'élèvent lorsque le champ électrique devient plus important. Cependant, l'intensité du pic d'émission localisé à 727 nm (1,67 eV) est clairement supérieure lorsque le transistor AlInN/GaN est polarisé à $V_{DS} = 26$ V qu'à $V_{DS} = 20$ V.

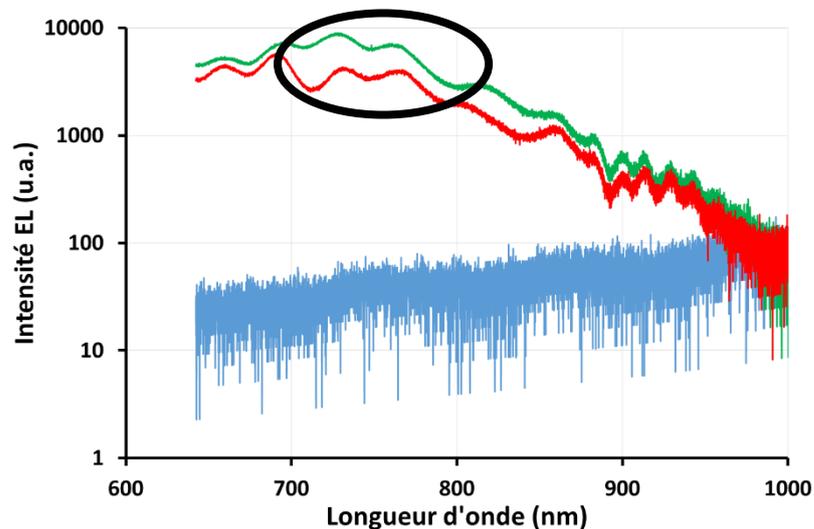


Figure 39 : Tracé semi-logarithmique des spectres d'électroluminescence d'un HEMT AlInN/GaN mesuré à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = 0$ V (courbe bleue), $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = 0,5$ V (courbe rouge), $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V (courbe verte)

Afin de comparer nos résultats à ceux rapportés dans la littérature, nous avons représenté ces spectres d'électroluminescence en utilisant une échelle semi-logarithmique sur la figure 39. Ainsi, on constate que l'augmentation de l'intensité du signal d'électroluminescence est plus importante dans la zone comprise entre 696 et 860 nm (zone entourée sur la figure 39) et que les oscillations de Fabry-Pérot sont différentes dans cette gamme de longueur d'onde. Ce résultat est surprenant parce que l'amplitude des oscillations de Fabry-Pérot devrait évoluer de façon identique lorsque V_{DS} augmente contrairement à nos observations. Pour ces raisons, nous pensons que le spectre d'électroluminescence présenté sur les figures 35 et 36 n'est pas qu'une superposition des bandes d'émission induites par des transitions intrabandes radiatives directes et inélastiques des électrons avec des oscillations de Fabry-Pérot mais que d'autres bandes d'émission liées à des pièges électriques peuvent aussi contribuer au signal d'électroluminescence recueilli.

Afin de confirmer que les spectres d'électroluminescence sont très sensibles à l'existence de pièges électriques dans les composants AlInN/GaN, nous avons étudié l'impact d'un stress à canal ouvert sur un spectre d'électroluminescence réalisé avec un composant polarisé à $V_{DS} = 26$ V et à $V_{GS} = 0,5$ V. Le stress à canal ouvert a également été réalisé à $V_{DS} = 26$ V et à $V_{GS} = 0,5$ V. La figure 40 met en évidence une diminution de l'intensité du pic d'électroluminescence lorsque la durée du stress augmente de 0 à 225 min.

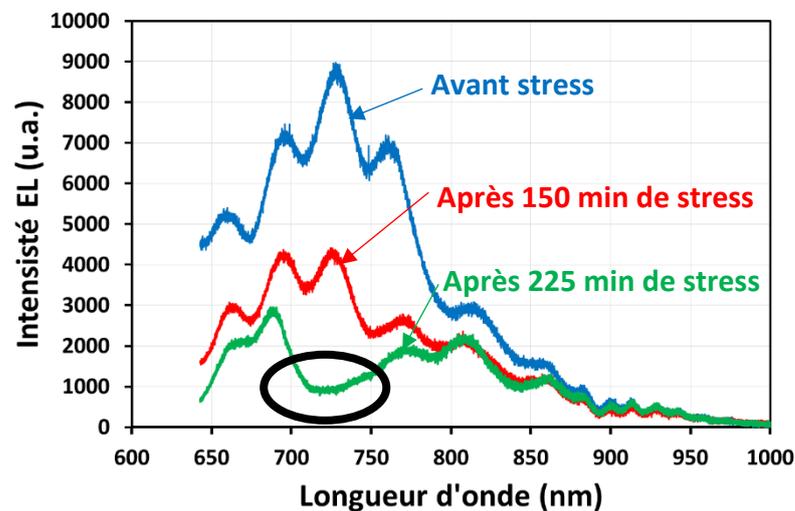


Figure 40 : Spectre d'électroluminescence d'un HEMT AlInN/GaN mesuré à $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V avant stress (courbe bleue), après 150 min de stress (courbe rouge) et après 225 min de stress à 26 V et $V_{GS} = 0,5$ V (courbe verte)

Sur la figure 40, on constate également une diminution de l'intensité du signal d'électroluminescence sur toute la gamme de longueur d'onde (640-890 nm) lorsque la durée

du vieillissement augmente de 0 à 150 min. Cependant, une chute brutale est observée dans la zone 690-790 nm (zone entourée sur la figure 40) après 225 min de stress.

Comme l'intensité du signal d'électroluminescence est proportionnelle à la densité d'électrons dans le canal, c'est à dire au courant de drain, et est fortement dépendante de l'amplitude du champ électrique [110], il est intéressant d'analyser l'impact d'un stress à canal ouvert sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors AlInN/GaN.

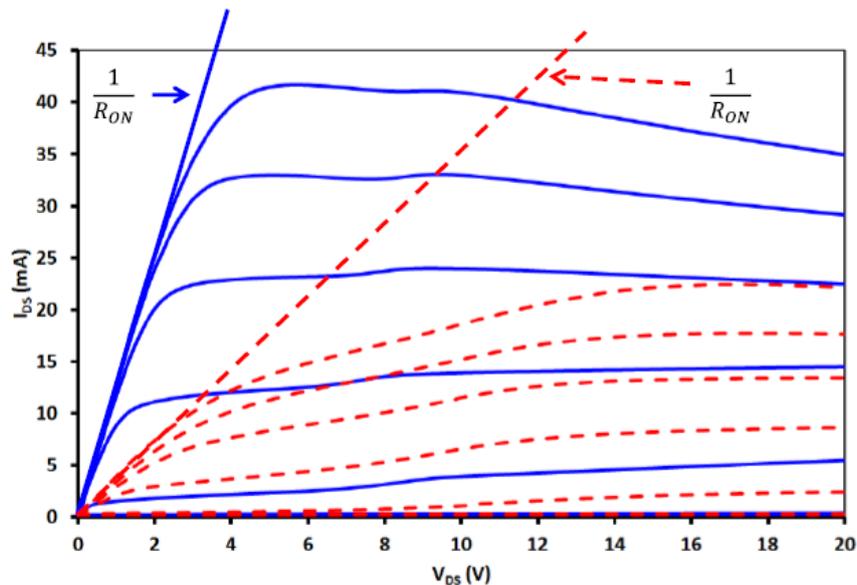


Figure 41 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant (courbe bleue) et après 216 h de stress à canal ouvert (tirets rouges). Le stress a été effectué avec $V_{DS} = 26$ V et $V_{GS} = 0,5$ V. V_{DS} varie de 0 à 20 V et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V. Les mesures ont été effectuées à l'obscurité et à température ambiante.

Ainsi, la figure 41 montre que le vieillissement électrique induit une diminution du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès. Dans ces conditions, nous pouvons conclure que la chute de l'intensité du signal d'électroluminescence est liée à une diminution de I_{DS} et à une augmentation de $R_{accès}$. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature [110] et sont expliqués de la manière suivante : les électrons peuvent atteindre un niveau d'énergie élevé lorsque les composants sont polarisés à des V_{DS} élevés et certains de ces électrons induisent un signal d'électroluminescence et d'autres peuvent être injectés dans la couche d'AlGaN (ou d'AlInN dans notre cas) et/ou dans la couche de passivation (SiN) dans lesquelles ils sont piégés. De plus, Ivo et al. ont montré que les stress électriques peuvent créer des défauts dans les composants qui peuvent entraîner une diminution du champ électrique et ainsi une chute de l'intensité du pic d'électroluminescence [123]. Cependant, les dégradations de I_{DS} et $R_{accès}$ peuvent aussi être expliquées par une augmentation

de la résistance du canal liée à une dégradation du canal impliquée par le piégeage des électrons dans la région grille-drain [103].

Pour ces raisons, nous pensons que les spectres d'électroluminescence sont le résultat de la superposition d'émissions intrabandes, des oscillations de Fabry-Pérot et des bandes d'émission dues à l'existence de pièges électriques dans les composants. En effet, les bandes d'émissions induites par des transitions radiatives directes et inélastiques des électrons et les oscillations de Fabry-Pérot sont prédominantes quand les composants sont polarisés à $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = 0,5$ V parce que la densité d'électrons chauds est suffisamment élevée pour masquer les bandes d'émission liées à la présence de pièges électriques dans les composants. Dans ces conditions, une diminution de V_{DS} provoquerait une chute de la densité d'électrons chauds et donc de l'intensité des signaux d'électroluminescence. Par conséquent, les bandes d'émissions causées par des mécanismes de recombinaison d'électrons liés aux pièges électriques devraient apparaître sur les spectres d'électroluminescence. Cela est effectivement le cas lorsque le composant est polarisé à $V_{DS} = 20$ V et à $V_{GS} = 0,5$ V puisque 2 bandes larges centrées à 1,6 eV (775 nm) et à 1,8 eV (689 nm) peuvent être observées sur les figures 38 et 39. De plus, cette hypothèse est cohérente avec les résultats présentés sur la figure 40. En effet, nous pouvons également identifier précisément 2 bandes d'émission centrées à 1,6 et à 1,8 eV quand les transistors AlInN/GaN sont stressés à $V_{DS} = 26$ V et à $V_{GS} = 0,5$ V durant 225 min. En résumé, nous pouvons dire que des pièges électriques existent dans les HEMTs AlInN/GaN non stressés et que les bandes d'émission induites par les pièges électriques sont masquées par les bandes de transitions directes et inélastiques liées aux électrons chauds et par les oscillations de Fabry-Pérot. Puis, le stress à canal ouvert induit une diminution de I_{DS} et une augmentation de $R_{accès}$ et par conséquent une chute de l'intensité des signaux d'électroluminescence liés aux électrons chauds. Ainsi, cette diminution de $I(EL)$ permet de rendre visible les bandes d'émission liées aux effets de pièges. L'existence de pièges électriques dans les composants avant stress est en parfait accord avec la sensibilité des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors vis-à-vis de la lumière ainsi qu'avec la présence d'effet kink montré à la figure 33. De plus, la bande d'émission localisée à 1,8 eV (680 nm) peut être attribuée à des pièges électriques existant dans le buffer GaN [103]. Par ailleurs, il est connu que les pièges préexistants dans le buffer GaN des composants AlInN/GaN et les pièges créés par le stress à canal ouvert peuvent être liés à une dégradation de la résistance du canal induite par les électrons chauds [26] [103] et par conséquent détériorer les performances électriques des transistors.

Un autre piège électrique apparaît sur les spectres d'électroluminescence à 1,6 eV (775 nm) (figure 40). A notre connaissance, peu de publications montrent l'existence de pièges électriques activés à 1,6 eV. Ainsi, Ibbetson et al. [25] ont rapporté que des pièges peuvent exister à 1,65 eV, sous la bande de conduction de $\text{Al}_{0,34}\text{Ga}_{0,66}\text{N}$ dans les HEMTs AlGaN/GaN mais cette explication est inappropriée dans notre cas puisque les composants étudiés sont des HEMTs $\text{Al}_{0,82}\text{In}_{0,18}\text{N}/\text{GaN}$ HEMTs. Cependant, Polyakov et al. [124] [125] ont mis en évidence que des bandes de luminescence localisées à 1,65 eV peuvent être attribuées à des transitions entre la bande de conduction et des niveaux accepteurs correspondant au fer présent dans les films de GaN. Il est intéressant de noter que les énergies d'activation dans la couche d'AlN ont été également observées à 1,68 eV [125]. Malgré ces études, l'impact de ce piège sur les paramètres électriques des composants à base de GaN n'est pas clairement expliqué mais nous pouvons conclure que ce piège peut être situé dans le buffer GaN, dans l'AlN et/ou dans la couche d'AlInN. Ainsi, nous pouvons dire que les pièges préexistants dans les HEMTs AlInN/GaN peuvent être liés à une dégradation de la résistance du canal induite par les électrons chauds et par conséquent à une dégradation des caractéristiques électriques des transistors [30] [126] [127]. De plus, nos résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature car certaines études ont déjà établi que les pièges profonds pouvaient être responsables du piégeage induit par les électrons chauds [128].

En revanche, nous ne pouvons pas affirmer que ces deux pièges électriques sont entièrement responsables de la chute du courant de drain observée après le stress à canal ouvert. En fait Anand et al. [129] ont déjà observé une distribution de niveaux d'énergies correspondant à des pièges situés dans la bande d'énergie du gap du buffer GaN par des caractérisations basées sur des mesures de courant transitoire dépendantes de la température réalisées pour des HEMTs AlGaN/GaN polarisés à des tensions de drain élevées. Ils ont conclu que la probabilité de piégeage des électrons sous un stress à canal ouvert est plus élevée dans le buffer GaN que dans la couche d'AlGaN. De plus, six autres pièges avec des énergies d'activation de 0,44 ; 0,55 ; 0,58 ; 0,65 et 0,73 eV ont été observés. Dans notre cas, ces électrons ne peuvent pas être détectés car seuls les pièges électriques étant activés à des énergies entre 1,1 et 2 eV peuvent être détectés par notre spectromètre Raman.

Ainsi, nous pouvons dire que la dégradation des caractéristiques électriques d'un transistor AlInN/GaN induite par un stress à canal ouvert peut être expliquée par la création de pièges électriques dans les couches d'AlN, AlInN et/ou dans la couche de passivation et/ou par le piégeage d'électrons dans les niveaux de pièges préexistants activés à des énergies de 1,6 et

1,8 eV. De plus, nos composants ont été passivés en utilisant un procédé technologique optimisé et ainsi la couche de passivation permet de limiter la chute de courant de drain lorsque les transistors sont soumis à des champs électriques élevés [130] [131]. Dans ces conditions, nous pensons que la chute de courant des HEMTs AlInN/GaN induite par le stress à canal ouvert peut être liée au piégeage d'électrons chauds par des pièges profonds préexistants dans le buffer GaN, dans les couches AlN et/ou AlInN. Cependant, ces résultats ne prouvent pas qu'aucun piège électrique ne soit induit par le stress à canal ouvert. En effet, le test de vieillissement peut impliquer la création de pièges correspondant à des énergies inférieures à 1,1 eV ou supérieures à 2 eV. Ces pièges ne peuvent pas être détectés par notre spectromètre Raman.

Ainsi, nous avons analysé l'impact d'un stress à canal ouvert sur les caractéristiques électriques des HEMTs AlInN/GaN en utilisant des méthodes de caractérisation électriques et une technique originale d'électroluminescence. Les paramètres du stress ont été choisis dans les conditions qui permettent d'observer un courant de grille en forme de cloche. Ainsi, une caractéristique $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche centrée à $V_{GS} = 0,5$ V a été mesurée pour $V_{DS} = 26$ V et le spectre d'électroluminescence effectué dans les mêmes conditions ont mis en évidence la présence de pièges électroniques dans les HEMTs AlInN/GaN. Ces pièges actifs électriquement peuvent expliquer le fait que le minimum de la courbe $I_{GS}(V_{GS})$ en forme de cloche soit localisé à $V_{GS} = 0,5$ V et non à une valeur de V_{GS} négative comme celles généralement rapportées dans la littérature [89]. De plus, nous avons montré que l'interprétation des spectres d'électroluminescence n'était pas si facile. En fait, nous avons mis en évidence que le spectre d'électroluminescence mesuré pour des HEMTs AlInN/GaN est le résultat de la superposition des transitions électroniques radiatives intrabandes, d'oscillations de Fabry-Pérot et de bandes d'émissions liées à des pièges électriques. D'autre part, il est important de préciser que les bandes d'émissions liées aux pièges électriques peuvent être masquées par l'émission intrabande quand le champ électrique est suffisamment élevé. Enfin, nous avons mis en lumière le fait que les dégradations électriques induites par les stress à canal ouvert sont principalement liées aux pièges préexistants activés à 1,6 eV dans le buffer GaN, dans l'AlN ou l'AlInN et à 1,8 eV dans le buffer GaN.

V. Conclusion du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'effet de trois stress différents sur les caractéristiques électriques de transistors HEMTs AlInN/GaN : un stress à canal ouvert, un stress à canal pincé et un stress dit NGB ou stress de grille. Les trois stress dégradent le

composant mais le stress à canal ouvert détériore davantage le transistor, suivi du stress à canal pincé puis du stress NGB. Nous en avons conclu qu'une création de pièges accepteurs et donneurs se produisait lors des stress. Dans le cas du stress à canal ouvert, ces pièges sont situés entre la grille et le drain dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN et/ou dans la couche d'AlInN et/ou à l'interface couche de passivation/AlInN. Les pièges induits par le stress à canal pincé sont localisés dans le buffer GaN et à l'interface AlInN/GaN. Enfin, les pièges créés par le stress NGB se trouvent principalement dans le buffer GaN. De plus, les mesures effectuées plusieurs mois après la fin du stress ont montré que les effets des stress étaient irréversibles.

Nous avons également mis en évidence la présence de pièges donneurs et/ou de pièges accepteurs remplis qui se déchargent sous l'effet d'un fort champ électrique ou sous illumination. Ces pièges sont présents avant les stress et voient leur densité augmenter pendant les stress, comme nous l'ont montré les études d'effet du sens de polarisation et d'effet de lumière.

De plus, nous avons fait état de la présence d'un deuxième canal parasite après un stress à canal ouvert. Ce deuxième canal est en partie dû à un piégeage des porteurs chauds dans la zone d'accès grille-drain. Il est aussi probablement expliqué par un confinement des électrons arrachés au canal et/ou par l'injection de porteurs chauds dans la couche de passivation pendant le stress. Ce double canal apparaît 4 mois après la fin du stress suite à la libération lente des porteurs et au confinement de ces derniers dans une zone proche de la surface du composant pendant la phase de repos. L'apparition de ce double canal est irréversible puisqu'il est toujours présent au bout d'un an.

En revanche, nous avons observé que les stress n'impactaient quasiment pas la grille puisque les hauteurs de barrière et les coefficients d'idéalité n'évoluent pas au cours du stress.

Enfin, nous avons caractérisé plus particulièrement les pièges créés par les stress grâce à une étude d'électroluminescence. Cette étude est originale puisqu'elle fait appel à une analyse spectrale d'électroluminescence, contrairement à d'autres publications qui étudient seulement une variation de l'intensité d'électroluminescence. Nous en avons conclu que le spectre d'électroluminescence était une superposition de transitions électroniques radiatives intrabandes dues à la diffusion par des centres chargés (cette contribution disparaît lorsque le courant de drain diminue fortement lors du stress), d'interférences de Fabry-Pérot et de deux états de pièges préexistants activés à 1,6 et 1,8 eV.

**Chapitre 2 : Influence d'irradiations par
des neutrons thermalisés sur les
caractéristiques électriques de transistors
AlInN/GaN**

Chapitre 2 : Influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN

I. Introduction

Les transistors de la filière GaN sont susceptibles d'être utilisés pour des applications dans les domaines militaires, nucléaires et aérospatiaux [32]. Il est donc impératif d'étudier le comportement des transistors dans des conditions extrêmes telles que les rayonnements ionisants. Notamment, les satellites et les avions volant à haute altitude sont particulièrement soumis à ce type d'agression. Ainsi, ces applications requièrent que les HEMTs restent opérationnels même après une exposition à de fortes doses d'électrons et de protons dans l'espace et de neutrons dans l'atmosphère et/ou de rayons gamma [132].

Des études antérieures ont montré que les performances électriques des HEMTs AlGaN/GaN peuvent être améliorées en les irradiant avec des neutrons thermiques et rapides [75] [81] [133] [134]. Cependant, la majorité des études rapportées dans la littérature concernant l'impact des irradiations sur des HEMTs AlGaN/GaN fait plutôt état d'une dégradation des performances électroniques (courant de drain, résistance d'accès, courant de grille) des transistors et notamment de la mobilité électronique dans le canal [80] [82] [83] [84]. Peu de papiers concernant l'irradiation de HEMTs AlInN/GaN ont été publiés. Cependant, Polyakov et al. [7] ont analysé l'impact des irradiations par des neutrons rapides, d'énergie 2 MeV, sur les performances électriques des composants AlInN/GaN. Le principal effet des irradiations, analysé pour une fluence variant de 1 à 3.10^{15} neutrons.cm⁻², est une diminution de la concentration et de la mobilité des électrons du canal. Il est important de noter que la chute de la mobilité est plus rapide que celle de la concentration des électrons, qui est surtout visible pour les doses de neutrons élevées [7]. Cette étude a également montré que les dégradations induites par les neutrons sont plus importantes pour les HEMTs AlInN/GaN que pour les HEMTs AlGaN/GaN [84]. Ces dégradations sont corrélées avec la présence de pièges profonds dans la couche barrière AlInN ou AlGaN. De plus, une augmentation de la concentration de ces pièges a été observée en fonction de la fluence de neutrons rapides [7].

La plupart des études rapportées dans la littérature concernent l'impact des irradiations par des neutrons rapides sur le comportement électrique des transistors de la filière GaN. Cependant, Fanny Berthet a montré qu'il était possible de dégrader ou d'améliorer les performances électriques de HEMTs AlGaN/GaN en irradiant par des faibles doses de neutrons thermalisés [75] [134] [135]. En effet, l'impact des irradiations sur le comportement électrique des transistors de la filière GaN est fortement lié au procédé technologique utilisé lors de la réalisation des composants (métallisation des contacts, nature de la couche de passivation,

dimensions des composants ...) et à la présence ou non de pièges électriques dans le composant. Pour ces raisons, nous avons décidé d'étudier l'influence des irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques des transistors AlInN/GaN. A notre connaissance, c'est la première fois qu'une telle étude est réalisée.

Il a été démontré, notamment dans le chapitre précédent et dans la littérature, que des pièges pouvaient initialement exister dans les transistors et qu'ils pouvaient dégrader la fiabilité des transistors vis-à-vis des stress [38] [89]. Ainsi, il est impératif de vérifier la présence de pièges électriques préexistants dans les composants avant de les irradier afin d'analyser leur influence sur le comportement électrique des transistors AlInN/GaN sous irradiation.

De plus, les applications auxquelles sont destinés les HEMTs impliquent leur fonctionnement, et donc leur polarisation, sous irradiation, il est donc nécessaire que les transistors soient fiables vis-à-vis de stress électriques mais également des irradiations. Pour ces raisons, nous avons d'abord étudié dans le chapitre 1 l'influence des différents stress électriques sur les performances électriques des transistors AlInN/GaN. Ce chapitre 2 est consacré à l'étude de l'impact des irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors réalisés avec le même procédé technologique que ceux étudiés dans le chapitre 1. Dans ces conditions, il est possible d'analyser les mécanismes physiques induits par les stress électriques dans un premier temps puis ceux liés aux irradiations dans un second temps. Afin d'être le plus proche possible des conditions d'utilisation des transistors AlInN/GaN, il aurait fallu polariser les transistors sous irradiation. Malheureusement, il nous est impossible d'un point de vue technique de réaliser cette manipulation pour le moment. C'est pourquoi nous avons également étudié l'impact des irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors stressés au préalable.

Ce deuxième chapitre commencera par la présentation des sources utilisées pour irradier les composants, afin de déterminer l'énergie et le flux des particules (neutrons et photons) atteignant les transistors.

Ensuite, nous nous intéresserons à l'effet d'irradiations par des neutrons thermalisés sur le comportement électrique de transistors AlInN/GaN non stressés et stressés à canal ouvert, canal pincé ou NGB.

Enfin, le courant de fuite de grille étant un facteur limitant les performances et la fiabilité de ces HEMTs [40], une couche d'oxyde peut être insérée sous la grille [41] afin de le diminuer.

Il est donc impératif que cette couche d'oxyde de grille soit résistante vis-à-vis des irradiations. C'est pourquoi nous avons analysé les évolutions des paramètres électriques de MOS-HEMTs AlInN/GaN afin de déterminer si la présence d'une fine couche d'oxyde sous la grille améliore ou non la fiabilité des transistors vis-à-vis des irradiations.

II. Présentation de la source utilisée

Pour les irradiations, la source utilisée est une source d'américium béryllium mesurant 27 mm de diamètre et 27 mm de hauteur. Cette source, se trouvant à l'Ecole des Applications Militaires de l'Energie Atomique, est conditionnée dans une double enveloppe d'acier d'épaisseur 4 mm. Elle possède une activité de 185 GBq et une fluence neutronique de 2.10^7 neutrons.s⁻¹ sous 4π stéradians (avec 10% d'incertitude). L'américium 241, en se désintégrant, émet une particule alpha qui est ensuite absorbée par le béryllium pour donner du ¹³C. Celui-ci ayant alors un neutron en trop par rapport à son isotope stable (¹²C), est trop lourd et se désexcite en éjectant un neutron. On peut résumer ces interactions par les réactions suivantes :



Nous avons donc des particules α , des particules γ et des neutrons qui sont émis lors de ces réactions. Les particules α sont arrêtées par la double enveloppe en acier entourant la source de neutrons et ainsi n'affectent pas les transistors [136]. Par contre, les photons γ ne sont pas arrêtés et peuvent potentiellement affecter les composants. Les photons émis par la source ont des énergies de 60 keV provenant de la désexcitation du neptunium (Np) [137] et 4,4 MeV ayant pour origine la désintégration du ¹³C en ¹²C + ¹n [138]. Un calcul effectué avec le logiciel RayXpert de la société TRAD Tests & radiations® montre que la dose γ reçue par nos échantillons est de 0,9 $\mu\text{Gy}/\text{mois}$ pour les γ de 60 keV et de 1,8 $\mu\text{Gy}/\text{mois}$ pour les γ de 4,4 MeV, ce qui est infime. De plus, nous avons enveloppé nos échantillons dans des feuilles de plomb d'une épaisseur de 0,5 mm afin de s'affranchir au maximum des effets de ces γ .

Chapitre 2 : Influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN

La répartition énergétique de la source de neutrons, déterminée par Fanny Berthet durant sa thèse [75], est donnée sur la figure 1. Nous observons qu'elle n'émet quasiment que des neutrons dits rapides.

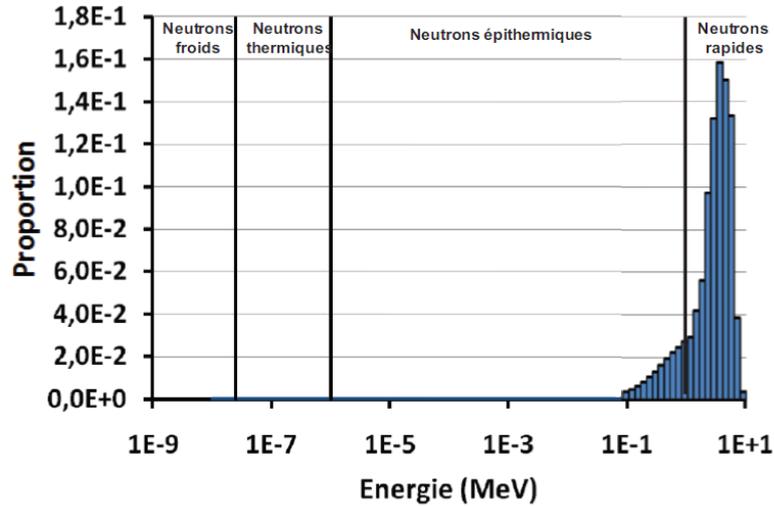


Figure 1 : Répartition énergétique des neutrons issus de la source d'Am-Be

Afin de thermaliser les neutrons et donc de les ralentir, nous utilisons une sphère en polyéthylène. En effet, ce matériau hydrogéné permet de diminuer l'énergie cinétique des neutrons grâce aux collisions des neutrons sur les atomes d'hydrogène [136]. La figure 2 montre la position de la source au centre de la sphère ainsi que celle du transistor. La sphère possède un diamètre de 30 cm et le transistor est placé dans le premier compartiment de la réglette soit à une épaisseur de polyéthylène de 3 cm.

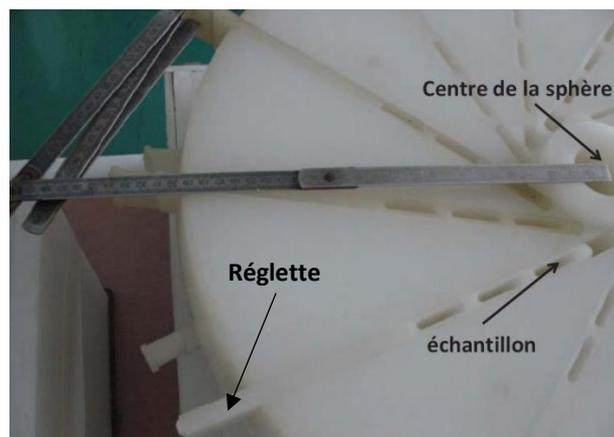


Figure 2 : Intérieur de la sphère de polyéthylène

Durant sa thèse [75], Fanny Berthet a étudié cette source de neutrons et a utilisé le code de calcul Tripoli pour estimer la fluence et l'énergie des neutrons qui atteignent le transistor après leur passage dans 3 cm de polyéthylène. Les résultats sont présentés sur la figure 3.

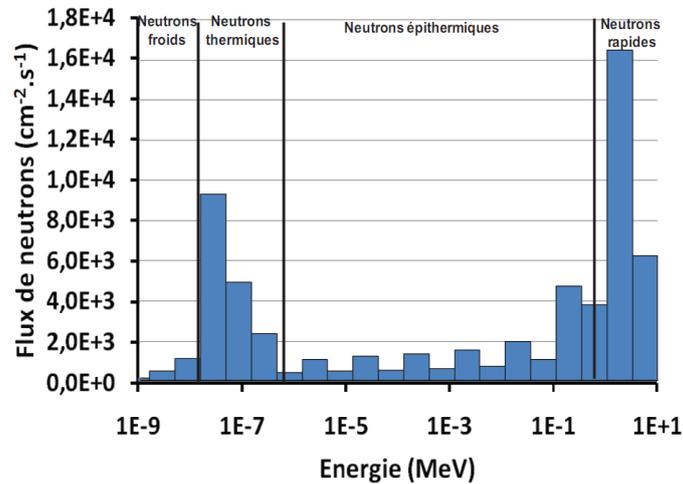


Figure 3 : Répartition énergétique des neutrons issus d'une source d'Am-Be au sein d'une sphère de polyéthylène au niveau du composant

Nous observons que parmi les neutrons arrivant sur le transistor, un tiers est composé de neutrons thermiques et deux tiers de neutrons rapides. Cette proportion de neutrons rapides peut sembler importante mais il faut prendre en compte le fait que la section efficace d'un matériau est plus élevée pour des neutrons thermiques que pour des neutrons rapides. Par exemple sur la figure 4, pour un matériau comme le gallium la section efficace pour des neutrons thermiques est de l'ordre de 20 barns contre 7 barns pour des neutrons rapides. Il y a donc une probabilité trois fois plus grande pour un neutron thermique d'interagir avec le gallium. De plus, le flux total au niveau de l'échantillon est estimé à 6.10^4 neutrons.cm⁻².s⁻¹. Dans la suite, nous appellerons « neutrons thermalisés », l'ensemble des neutrons thermiques et rapides atteignant les transistors et ayant donc la répartition énergétique de la figure 3.

Il existe trois modes d'interaction des neutrons avec le noyau d'un élément quelconque [136] :

- L'absorption par réaction nucléaire, au cours de laquelle le neutron disparaît : ce processus est dominant avec des neutrons lents ou thermiques (énergies inférieures à 0,5 eV). L'absorption des neutrons lents se fait essentiellement par capture radiative (n, γ) pouvant entraîner la transmutation ou la fission.
- La diffusion élastique se traduit par un partage de l'énergie du neutron incident entre le noyau cible, appelé dans ce cas noyau de recul, et le neutron diffusé. Le noyau cible, en

fonction de sa taille, recule sous l'effet du choc, en laissant sur place son cortège électronique. On obtient alors une paire de particules très fortement ionisantes.

- Pour la diffusion inélastique, le neutron diffuse sur le noyau en lui cédant une fraction de son énergie. Le noyau cible est alors dans un état excité. Le noyau retrouvera son état fondamental après émission d'un ou plusieurs photons γ . Ce processus est dominant pour les neutrons rapides (énergie de l'ordre du MeV) et le neutron incident doit avoir une énergie suffisante pour exciter le noyau.

Comme on peut le voir sur la figure 4 [139], pour les énergies mises en jeu (zones entourées en noir), la capture radiative, la diffusion élastique et la diffusion inélastique sont possibles.

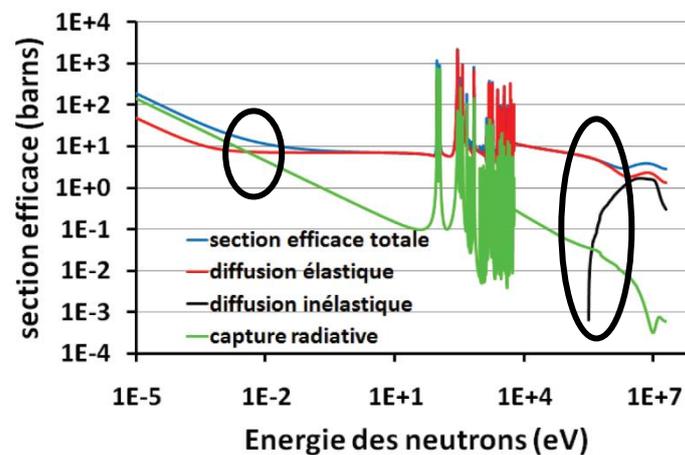


Figure 4 : Section efficace totale (courbe bleue), de diffusion élastique (courbe rouge), de capture radiative (courbe verte) et de diffusion inélastique (courbe noire) en fonction de l'énergie des neutrons incidents pour un matériau cible Ga

Remarque importante : dans ce travail de thèse, nous n'avons étudié que les effets d'irradiation par des neutrons thermalisés. Dans la suite, afin de simplifier l'écriture et donc la lecture, « neutrons » signifiera « neutrons thermalisés » et « irradiation » signifiera « irradiation neutronique » c'est à dire avec des neutrons thermalisés.

III. Effets des irradiations sur des transistors HEMTs AlInN/GaN

Dans le premier chapitre, nous avons mis en évidence la présence de pièges préexistants dans les HEMTs AlInN/GaN en étudiant la sensibilité des caractéristiques électriques des transistors vis-à-vis de la lumière blanche et des conditions de polarisation utilisées durant la mesure. L'augmentation de courant sous illumination et/ou dans certaines conditions de polarisation démontre la présence de pièges donneurs et/ou accepteurs remplis se déchargeant sous l'effet d'un champ électrique. De plus, la présence d'un phénomène pouvant s'apparenter

à de l'effet kink a été observé sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN. Ce phénomène peut également être lié à la présence de pièges préexistants dans les composants. Pour ces raisons, nous nous sommes intéressés à l'impact de ces pièges sur la fiabilité de ces transistors vis-à-vis des irradiations. Dans le même temps, la possibilité de création de pièges induits par les irradiations a été étudiée.

A. Influence des irradiations sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN

Les transistors utilisés dans cette étude sont des HEMTs AlInN/GaN ayant une longueur de grille de $0,35 \mu\text{m}$, une largeur de grille de $50 \mu\text{m}$, une distance grille-drain de $1,5 \mu\text{m}$ et une distance grille-source de $1 \mu\text{m}$. Dix transistors ont été soumis à une irradiation. Ces transistors ont été préalablement enveloppés dans des feuilles de plomb afin de réduire au maximum l'impact des photons γ . La fluence totale reçue est de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻² correspondant à une durée d'irradiation de 8 mois. Dans la suite, on ne précisera la dose que si elle est différente de cette valeur.

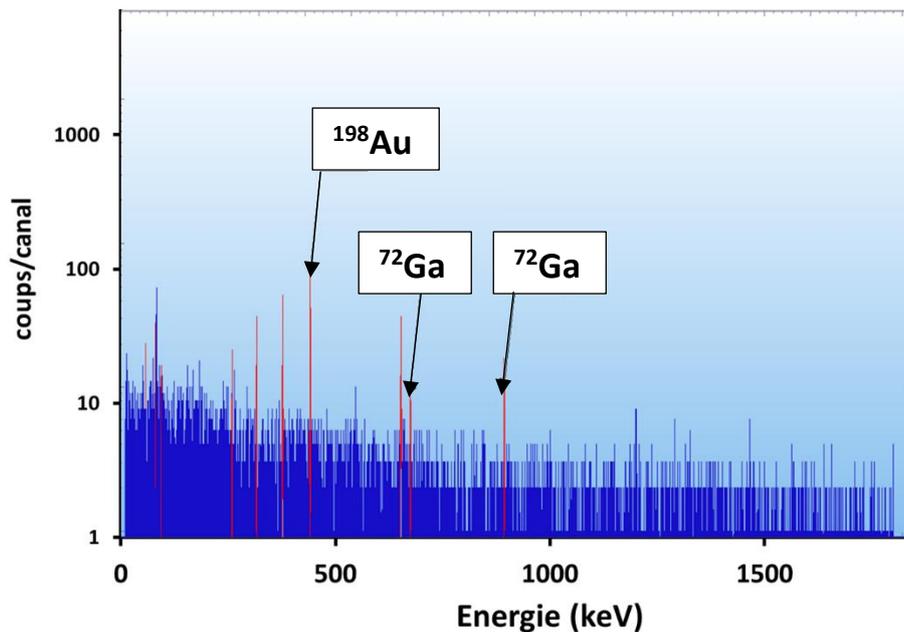
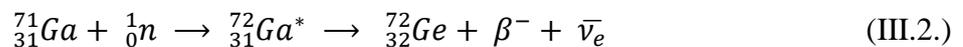
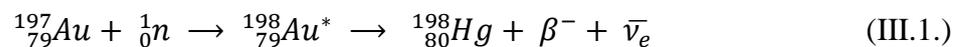


Figure 5 : Spectrométrie gamma des transistors AlInN/GaN après irradiation. Le temps de comptage est de 20 000 secondes.

Afin de déterminer les effets d'un flux de neutrons sur des transistors AlInN/GaN du point de vue nucléaire, nous les avons caractérisés par spectrométrie gamma après une irradiation (figure 5). La chaîne de mesure est constituée d'un détecteur GeHP (germanium hyper pur), d'une alimentation haute tension, d'un préamplificateur, d'un amplificateur, d'un

codeur ou convertisseur analogique-numérique, d'une électronique d'acquisition et d'un système d'analyse de spectre. Cette chaîne de mesure permet de déterminer la présence d'éléments radioactifs dans un échantillon. En effet, lors de la désintégration d'un élément, celui-ci va émettre un photon avec une énergie propre à cet élément. Le détecteur GeHP (germanium hyper pur) va donc permettre de mesurer l'énergie des photons détectés et donc d'identifier l'élément à l'origine de ce photon.

Dans notre cas, l'échantillon est activé par le flux neutronique. C'est-à-dire que les neutrons sont captés par des atomes de l'échantillon, rendant ces atomes instables. Lors de la désexcitation de ces atomes, il se produit une désintégration β^- accompagnée d'un photon γ . Ce que nous mesurons est donc l'énergie du photon issu de cette désintégration. Sur la figure 5, nous voyons que les photons détectés correspondent à la désintégration β^- de ^{198}Au en ^{198}Hg (Equation III.1.) et de ^{72}Ga en ^{72}Ge (Equation III.2.). Or le ^{198}Au et le ^{72}Ga sont le produit de la capture de neutrons de ^{197}Au et de ^{71}Ga . Ainsi, nous avons pu établir la présence de ^{197}Au et de ^{71}Ga ainsi que de ^{198}Hg et ^{72}Ge dans l'échantillon après l'irradiation. Les autres éléments détectés sur la spectrométrie, visibles avec des traits rouges, sont dus à la radioactivité naturelle. Il est impossible de déterminer la présence d'autres éléments à partir de cette spectrométrie gamma. Cela est dû au fait que la section efficace des autres éléments est trop faible (il y a peu de neutrons capturés et donc trop peu de désintégrations à observer) et/ou à un temps de demi-vie trop court. Dans ce cas, tous les atomes instables se sont désintégrés durant le temps de transport de l'échantillon jusqu'au spectromètre gamma. Il est également possible que le temps de demi-vie soit trop long et cela implique un nombre trop faible de désintégrations pendant la mesure pour permettre l'observation de la signature d'un élément sur le spectre gamma.



La figure 6 nous présente une comparaison des caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) de transistors AlInN/GaN avant et après irradiation. Nous pouvons observer que $I_{\text{DS max}}$ diminue de 735 à 695 mA/mm (- 5%) tandis que $R_{\text{accès}}$ augmente de 97 à 105 Ω (+ 8%) après irradiation. Ces dégradations étaient déjà visibles pour une fluence de $1,6 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² avec une diminution du courant de drain de 3% et une augmentation du courant de la résistance d'accès de 3% également [87] [140]. Le même comportement a été observé pour tous les composants non stressés.

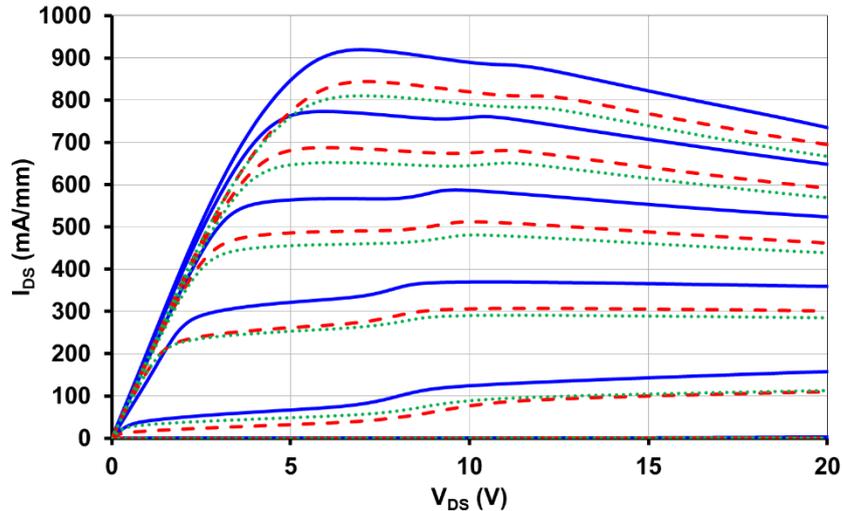


Figure 6 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant irradiation (courbe bleue), après irradiation (tirets rouges) et après 4 mois de repos (pointillés verts). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V

Ainsi, nous concluons que ces évolutions de paramètres électriques sont liées à la création de pièges accepteurs induits par les neutrons. Nous voyons également que les dégradations induites par les irradiations sont irréversibles car les caractéristiques électriques des transistors non irradiés ne sont pas recouvrées même après 4 mois de repos.

De plus, nous constatons que la diminution du courant de drain est supérieure lorsque $V_{DS} = 6$ V et $V_{GS} = 1$ V en comparaison à $I_{DS \max}$ (- 5%). Cette observation prouve que la chute de courant est plus importante lorsque V_{GS} est élevé (c'est-à-dire à canal ouvert) et à faible V_{DS} (c'est-à-dire dans la zone ohmique du réseau de caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors). Ce comportement peut être engendré par l'augmentation de la résistance d'accès de drain et être expliqué par un piégeage d'électrons dans le canal au niveau de la zone d'accès drain-grille, à la surface du composant et/ou dans les couches sous le canal [40]. Lorsque $V_{DS} > 6$ V, le fort champ électrique longitudinal masque presque entièrement les effets de l'augmentation de la résistance d'accès, ce qui explique la réduction de la dégradation du courant de drain pour les tensions de drain élevées [141]. De plus, nous pouvons constater que l'effet kink est toujours présent après l'irradiation. Polyakov et al. ont déjà observé une diminution du courant de drain pour des HEMTs AlInN/GaN [84] après une irradiation par des neutrons rapides. Ils ont expliqué ce phénomène par une diminution de la mobilité électronique de 1200 à 600 $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et une diminution de la concentration des porteurs du canal lorsque les fluences d'irradiation sont élevées. Ces effets sont corrélés à la création de pièges profonds dans l'AlInN [84]. Cette hypothèse pourrait également expliquer la baisse de courant de drain observée après

l'irradiation par des neutrons thermalisés car le flux de neutrons thermalisés est composé de 33% de neutrons thermiques et 67% de neutrons rapides (calcul réalisé sur Tripoli par Fanny Berthet [75]). Ainsi, nous pensons que ces neutrons rapides pourraient être à l'origine d'une diminution de la mobilité des porteurs du canal lorsque nos composants sont irradiés. Fanny Berthet a également observé une diminution du courant de drain (- 8%) et une augmentation de la résistance d'accès (+ 6%) de transistors AlGaN/GaN après une irradiation par des neutrons thermalisés correspondant à une fluence de 6.10^{11} neutrons/cm² [75] [135]. Ces dégradations sont liées à une réduction de la concentration et de la mobilité des porteurs du canal induite par la création de pièges ou de défauts par les irradiations à l'interface AlGaN/GaN [81].

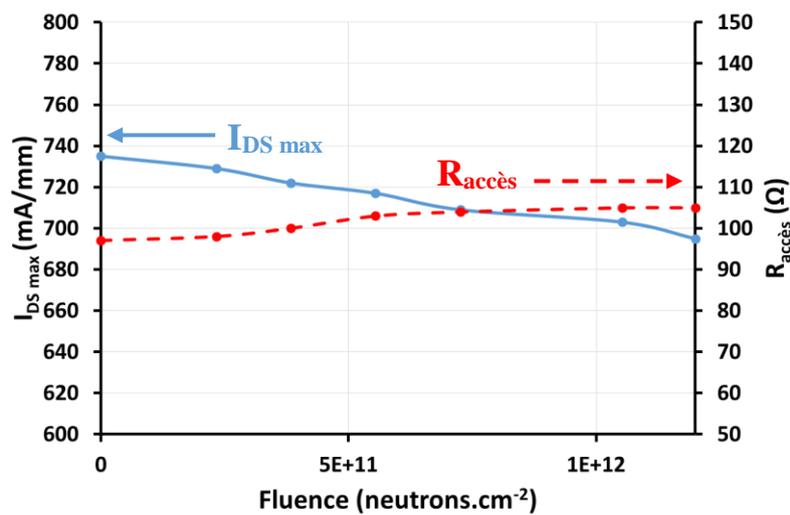


Figure 7 : Evolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence

En suivant l'évolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence (figure 7), nous constatons que $I_{DS\ max}$ diminue de façon monotone de 735 à 695 A.mm⁻¹ tandis que $R_{accès}$ augmente progressivement de 97 à 105 Ω lorsque la fluence d'irradiation augmente de 0 à $1,2.10^{12}$ neutrons.cm⁻². Cette dégradation est liée à une chute de la mobilité et/ou de la concentration des porteurs du canal. Il aurait été intéressant de continuer l'étude pour des fluences d'irradiation plus importante mais par manque de temps cela n'a pas pu être fait.

La comparaison du courant de grille I_{GS} (V_{GS}) avant et après une dose de $1,2.10^{12}$ neutrons.cm⁻² est présentée sur la figure 8. Nous constatons que le courant de grille en régime direct et inverse n'évolue pas après l'irradiation. De plus, le coefficient d'idéalité reste constant à 4,3 tandis que la hauteur de barrière diminue légèrement de 0,53 à 0,51 eV. Ainsi, nous pouvons dire que les irradiations neutroniques n'ont pas d'influence sur la grille.

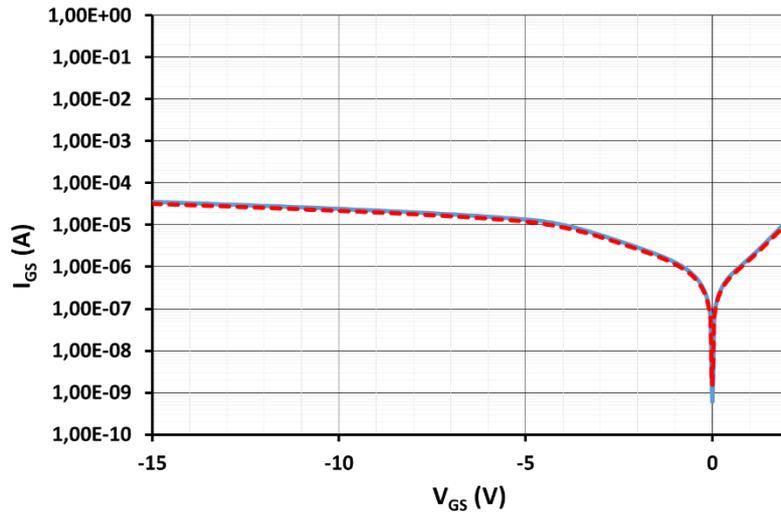


Figure 8 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant (courbe bleue) et après irradiation (tirets rouges)

La figure 9 présente la transconductance avant et après irradiation. Nous observons un léger décalage de la tension de pincement de -3,6 à -3,5 V consécutif à la diminution du courant de drain. De même la transconductance maximale a diminué de 227 à 210 mS.mm⁻¹.

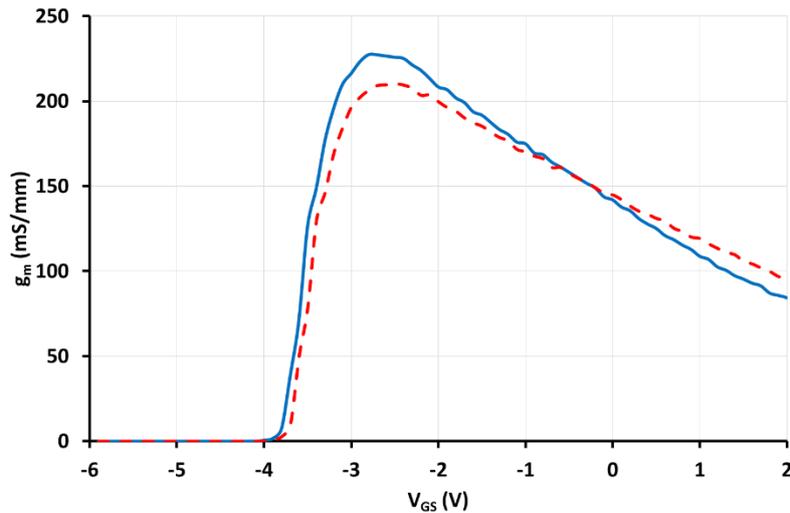


Figure 9 : Caractéristique g_m (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant (courbe bleue) et après irradiation (tirets rouges)

Afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation induits par les irradiations avec des neutrons thermalisés, la sensibilité des caractéristiques électriques des transistors vis-à-vis de la lumière et du sens de polarisation a été étudiée avant et après irradiation.

La figure 10 montre que l'illumination des composants non irradiés (10-a) et irradiés (10-b) induit une augmentation du courant de drain lorsque $V_{DS} < 12$ V et ce, quelle que soit la

valeur de V_{GS} . De plus, l'augmentation de I_{DS} est plus importante pour les composants irradiés et l'effet kink est toujours présent après irradiation (Figure 6).

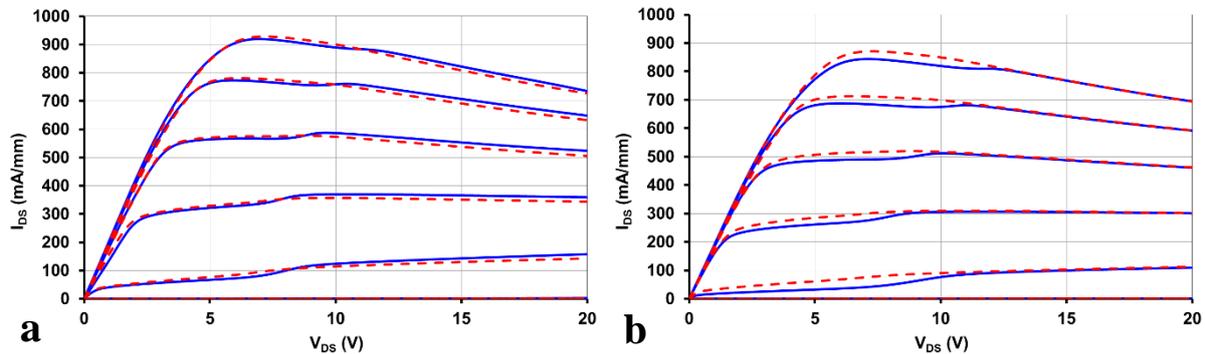


Figure 10 : Influence de la lumière sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation. Les mesures ont été faites à l'obscurité (courbe bleue) et sous éclairage (tirets rouges). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V.

On constate également que la tension drain-source ($V_{DS\ kink}$) qui provoque l'augmentation brutale de courant liée à l'effet kink est plus importante pour les composants irradiés quelle que soit la valeur de V_{GS} . Dans la suite du chapitre, nous appellerons $V_{DS\ kink}$ la tension V_{DS} à laquelle l'effet kink commence. Cependant, aucun effet kink n'est observé lorsque les composants irradiés ou non sont éclairés. Nous pensons que la sensibilité vis-à-vis de la lumière des caractéristiques électriques des composants non irradiés est liée à la libération de porteurs par des pièges donneurs et/ou de pièges accepteurs remplis préexistants. Comme évoqué dans le chapitre 1, l'effet kink peut être attribué à une capture d'électrons du canal par les pièges électriques présents dans la couche GaN (buffer) du transistor lorsque la tension V_{DS} est faible. Ensuite, lorsque la tension drain-source augmente et dès que le champ électrique devient suffisamment élevé, les électrons sont dépiégés [97]. Ainsi, l'éclairage des composants induit une libération des électrons par les pièges responsables de l'effet kink dans le canal parce que l'énergie apportée par la lumière est suffisante pour permettre la libération des électrons capturés et par conséquent l'effet kink n'est plus présent sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors.

La plus grande sensibilité vis-à-vis de la lumière des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des composants irradiés peut être expliquée, non seulement par la création de pièges donneurs induits par les irradiations mais aussi par la libération d'électrons par des pièges accepteurs remplis, engendrés par l'irradiation.

Afin de confirmer ces hypothèses, nous avons étudié l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors avant et après irradiation.

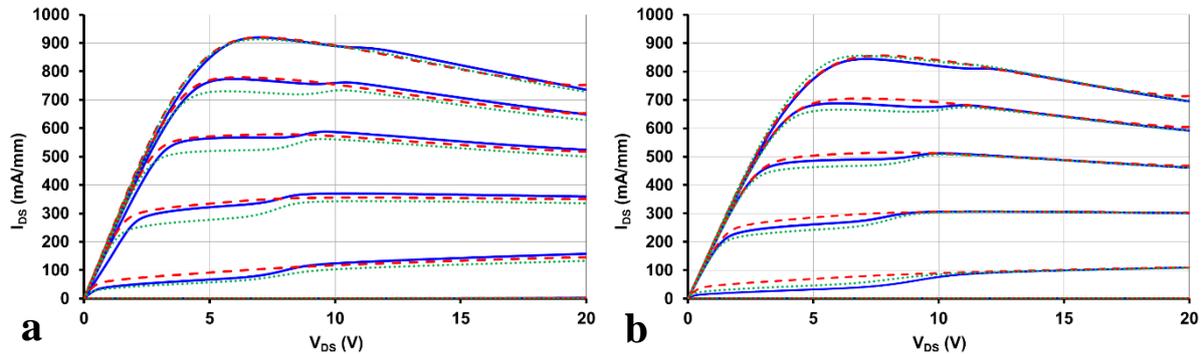


Figure 11 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges), à l'obscurité et à température ambiante.

C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

C2 : V_{DS} variant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V

C3 : V_{DS} évoluant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

La figure 11-a montre que les caractéristiques électriques des transistors non irradiés réalisées dans les configurations C1, C2 et C3 sont quasiment identiques lorsque $V_{DS} > V_{DS\text{ kink}}$.

De plus, aucun effet kink n'apparaît lorsque les transistors sont caractérisés dans la configuration C3 et le courant de drain est légèrement supérieur à celui obtenu en configuration C1 lorsque $V_{DS} < V_{DS\text{ kink}}$. Nous notons également que I_{DS} mesuré en configuration C2 est inférieur à celui obtenu en configuration C1 et C3 excepté à $V_{GS} = 1$ V.

Après irradiation, la figure 11-b montre que les caractéristiques électriques des composants sont également sensibles aux conditions de polarisation. En effet, le courant de drain mesuré dans la configuration C3 est supérieur à celui mesuré dans la configuration C1 alors que I_{DS} mesuré dans la configuration C2 est inférieur à celui mesuré dans la configuration C1 lorsque $V_{DS} < V_{DS\text{ kink}}$.

L'effet kink n'est pas observé sur les caractéristiques électriques des transistors non irradiés ou irradiés mesurés dans la configuration C3 car le champ électrique utilisé au début des mesures est suffisamment élevé ($V_{DS} = 20$ V) pour ioniser les pièges responsables de l'effet kink et ainsi augmenter la densité de porteurs dans le canal des composants. Dans ces conditions, une diminution de V_{DS} ne permet pas de piéger les électrons et ainsi aucun effet kink n'est observé lorsque le transistor est caractérisé électriquement dans la configuration C3,

c'est-à-dire lorsque V_{DS} varie de 20 à 0 V. De plus, l'effet kink est plus prononcé quand les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors, effectuées avant et après irradiation sont réalisées dans la configuration C2. Cela signifie que les électrons du canal peuvent être piégés même lorsque la tension grille-source est très supérieure à la tension de pincement. Nous pouvons conclure que la dépendance de l'effet kink vis-à-vis de V_{DS} et V_{GS} prouve que celui-ci n'est pas uniquement favorisé par une tension drain-source et un courant de drain élevés [97] mais est aussi visible pour un faible courant de drain.

Cependant, il est intéressant de noter que l'augmentation du courant de drain des transistors irradiés (figure 11-b) mesuré dans la configuration C3 par rapport à celui obtenu dans la configuration C1 est supérieure à celle observée avant l'irradiation (figure 11-a). Nous pensons que pour les caractérisations électriques des composants effectuées dans la configuration C3, c'est-à-dire lorsque V_{DS} varie de 20 à 0 V, le champ électrique existant au début de la mesure est suffisamment élevé pour permettre la libération d'électrons piégés non seulement par les pièges responsables de l'effet kink mais également par les pièges induits par l'irradiation par les neutrons thermalisés. Ainsi, les différences de courant de drain observées entre C1 et C3 sont supérieures lorsque les composants sont irradiés.

Par contre, nous constatons que la diminution de I_{DS} des composants irradiés mesurés dans la configuration C2 par rapport à celle obtenue dans la configuration C1 est inférieure à celle mise en évidence avant l'irradiation. Nous supposons que la densité d'électrons piégés lorsque la tension grille-source est supérieure à la tension de pincement diminue pour les composants irradiés car les irradiations pourraient annihiler l'effet des pièges préexistants dans les composants. En effet, soit les irradiations « guérissent » une partie des pièges électriques préexistants dans les composants, soit elles induisent la création de pièges qui compensent les effets engendrés par les pièges électriques présents dans les composants avant irradiation.

Il est également intéressant de noter que les courbes $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ mesurées à $V_{GS} = 1$ V, i.e. à canal ouvert, avant irradiation (figure 11-a) sont quasiment identiques dans les 3 configurations de mesure contrairement à celles observées après irradiation (figure 11-b).

Dans ces conditions, nous pouvons dire que les irradiations par des neutrons thermalisés induisent la création de pièges aussi bien dans la couche GaN (buffer) que dans une zone proche de la surface des composants.

On peut donc conclure que l'influence de la lumière et des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors non irradiés est liée à la présence de pièges

électriques préexistants localisés majoritairement dans la couche de GaN (buffer). Ces pièges agissent comme des pièges donneurs.

Ainsi, nous pouvons conclure que l'irradiation par des neutrons thermalisés crée des pièges de type donneur et/ou accepteur remplis dans toute la structure du composant.

Après avoir étudié les effets des irradiations sur des transistors HEMTs AlInN/GaN non stressés, nous allons maintenant comparer ces résultats avec des irradiations faites sur des HEMTs AlInN/GaN stressés.

B. Influence des irradiations sur les caractéristiques électriques des transistors AlInN/GaN stressés

Afin de comprendre l'impact des pièges électriques présents dans les transistors AlInN/GaN sur leur comportement électrique sous irradiation, il est impératif d'étudier l'influence des irradiations sur le comportement électrique de composants contenant si possible des pièges électriques de différentes natures (i.e. de type donneur, accepteur et de niveaux d'énergie différents). Durant sa thèse, Fanny Berthet a montré que la localisation et la nature des pièges électriques induits par des tests de vieillissement effectués sur des HEMTs AlGaInN/GaN dépendaient des conditions de stress électriques utilisées, c'est-à-dire les valeurs de V_{DS} et de V_{GS} . De plus, elle a montré que les irradiations par des neutrons thermalisés pouvaient annihiler les effets des pièges électriques induits par les tests de vieillissement et ainsi améliorer les performances électriques des composants stressés [75]. Ainsi, nous avons décidé d'étudier l'influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur le comportement électrique des HEMTs AlInN/GaN vieillis par des stress à canal ouvert, à canal pincé et NGB. Nous avons utilisé les transistors stressés dont les résultats ont été présentés dans le chapitre 1. Pour chaque type de stress, nous avons donc irradié cinq composants avec une fluence de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻².

1. Transistors stressés à canal ouvert

Dans le chapitre 1, nous avons montré que les dégradations des performances électriques des transistors les plus prononcées ont été obtenues après un stress à canal ouvert. En effet, une diminution du courant de drain maximal $I_{DS \max}$ de l'ordre de 60% et une augmentation de $R_{\text{accès}}$ de l'ordre de 400% ont été observées après 216 h de stress. Les études rapportées au chapitre 1 laissent supposer que ces dégradations sont liées à la création de pièges électriques localisés

entre la grille et le drain dans le GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN et/ou dans l'AlInN et/ou à l'interface couche de passivation/AlInN.

La figure 12-a présente les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant un stress à canal ouvert et avant irradiation (courbe bleue), après un stress à canal ouvert et avant irradiation (tirets rouges) et après un stress à canal ouvert et après irradiation (pointillés verts). Afin d'analyser la réversibilité des effets observés, les transistors stressés et irradiés ont également été mesurés (tirets pointillés mauves) 4 mois après l'irradiation. Afin de mieux appréhender les différences entre les caractéristiques électriques des transistors stressés qui ont été mesurés avant et après l'irradiation, un zoom de la figure 12-a est représenté sur la figure 12-b.

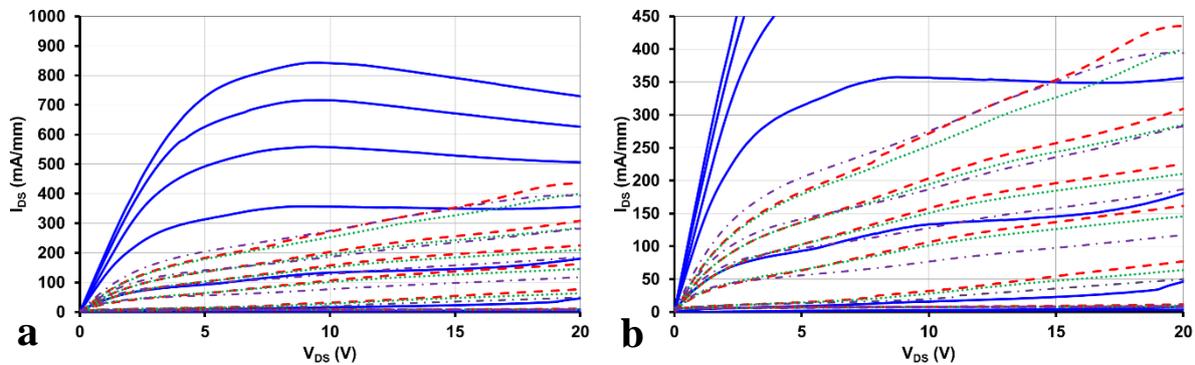


Figure 12 : a : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbes bleues), après stress et avant irradiation (tirets rouges), après stress et après irradiation (pointillés verts) et 4 mois après la fin des irradiations (tirets violets). b : zoom pour I_{DS} compris entre 0 et 450 mA/mm

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, une chute du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès ont été observées après 216 h de stress à canal ouvert. Après avoir irradié ces transistors stressés, $I_{DS \max}$ a diminué de 435 à 398 mA (- 9%). Dans le même temps, peu d'évolution de $R_{\text{accès}}$ a été constatée. Nous observons également que la diminution de I_{DS} est plus importante pour $V_{GS} = 1$ V, c'est-à-dire lorsque le canal est ouvert. De plus, nous pouvons noter que les effets des irradiations sont irréversibles puisque les paramètres électriques des transistors stressés et irradiés qui ont été caractérisés 4 mois après la fin de l'irradiation sont différents de ceux obtenus avant l'irradiation. Comme pour les composants non stressés, les irradiations des transistors AlInN/GaN entraînent une chute de $I_{DS \max}$ qui est expliquée par la création de pièges de type accepteur engendrés par l'irradiation.

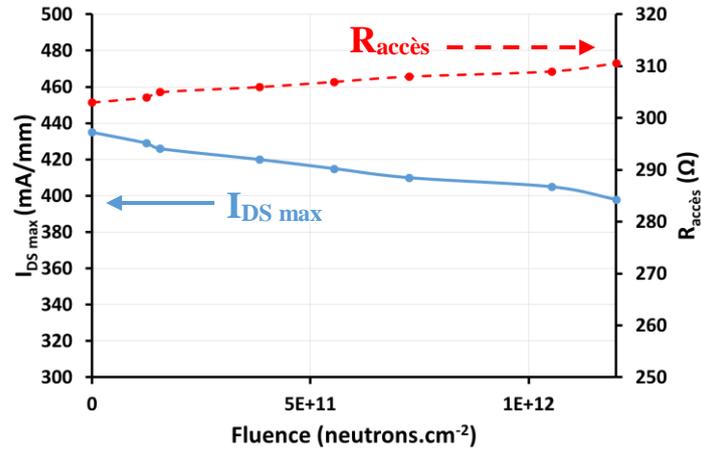


Figure 13 : Evolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence d'irradiation

La figure 13 montre que le courant de drain maximal diminue régulièrement de 435 à 398 mA.mm⁻¹ tandis que la résistance d'accès augmente progressivement de 306 à 316 Ω lorsque la fluence varie entre 0 à 1,2.10¹² neutrons.cm⁻².

En ce qui concerne la grille, comme nous le montre la figure 14, aucune variation n'a été observée après 216 h de stress à canal ouvert. Par contre, l'irradiation a dégradé la grille du composant stressé qui présente un courant bien plus important. Le coefficient d'idéalité augmente de 4,1 à 4,3 tandis que la hauteur de barrière diminue de 0,51 à 0,39 eV.

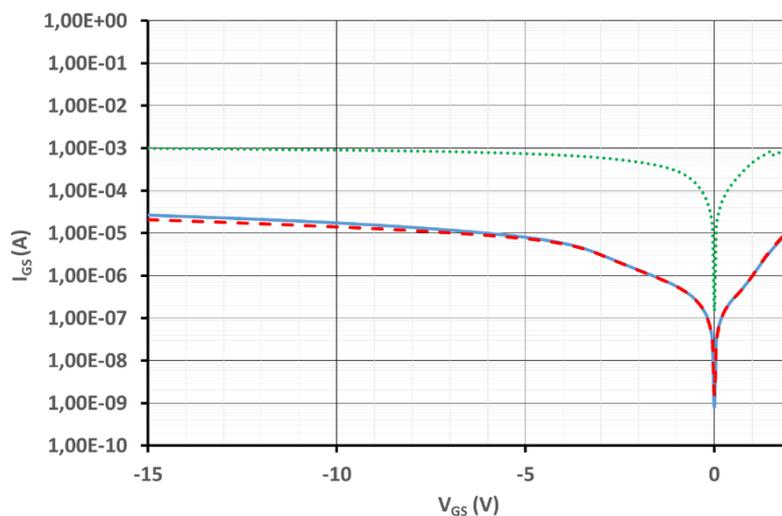


Figure 14 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbe bleue), après stress et avant irradiation (tirets rouges), après stress et après irradiation (pointillés verts)

Afin de comprendre les mécanismes physiques engendrés par les irradiations, nous avons étudié leur impact sur la transconductance mesurée à un V_{DS} de 15 V. La figure 15

présente la transconductance avant le stress à canal ouvert et avant les irradiations (traits pleins), après le stress et avant les irradiations (tirets) et après le stress et après irradiation (pointillés).

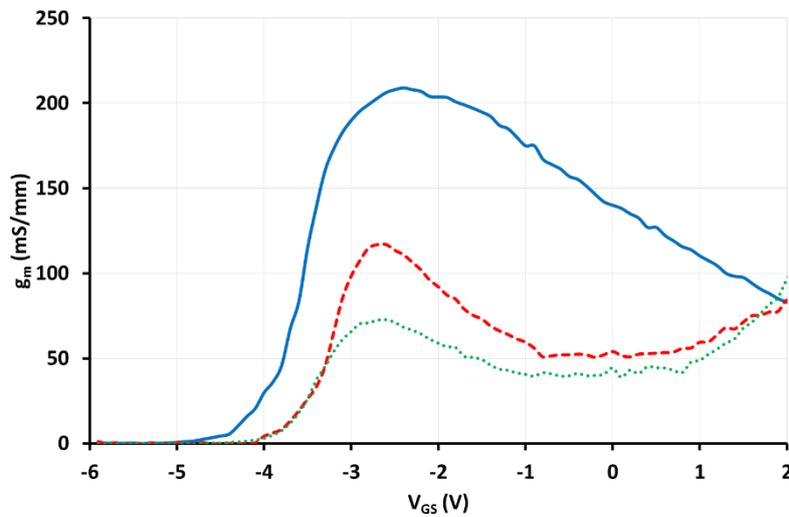


Figure 15 : Caractéristique $g_m(V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbe bleue), 1 an après stress et avant irradiation (tirets rouges) et après stress et après irradiation (pointillés verts)

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 1, le stress à canal ouvert implique une dégradation des courbes $g_m(V_{GS})$, de la tension de pincement et l'apparition d'un canal parasite. La figure 15 montre que l'irradiation provoque une diminution du $g_{m \max}$ de 117 à 73 $\text{mS} \cdot \text{mm}^{-1}$. Dans le même temps, la tension de pincement n'évolue pas et reste constante à -4 V.

Afin d'expliquer les évolutions du comportement électrique des transistors stressés après irradiation, nous nous sommes intéressés aux effets de lumière et des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés avant et après irradiation (figure 16).

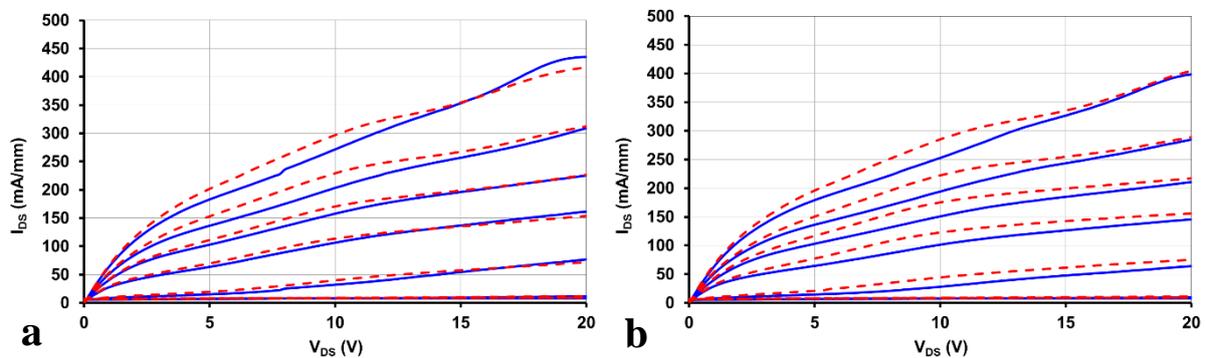


Figure 16 : Influence de la lumière sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation. Les mesures ont été faites à l'obscurité (courbe bleue) et sous éclairage (tirets rouges). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V.

La figure 16 met en évidence une augmentation du courant de drain sous éclaircissement avant et après irradiation. Dans les deux cas, nous pouvons en déduire que la sensibilité vis-à-vis de la lumière est liée à une libération des électrons par des pièges donneurs et/ou des pièges accepteurs remplis. Cependant, la sensibilité vis-à-vis de la lumière des transistors stressés est plus importante après l'irradiation, ce qui confirme que celle-ci induit la création de pièges électriques dans les transistors stressés.

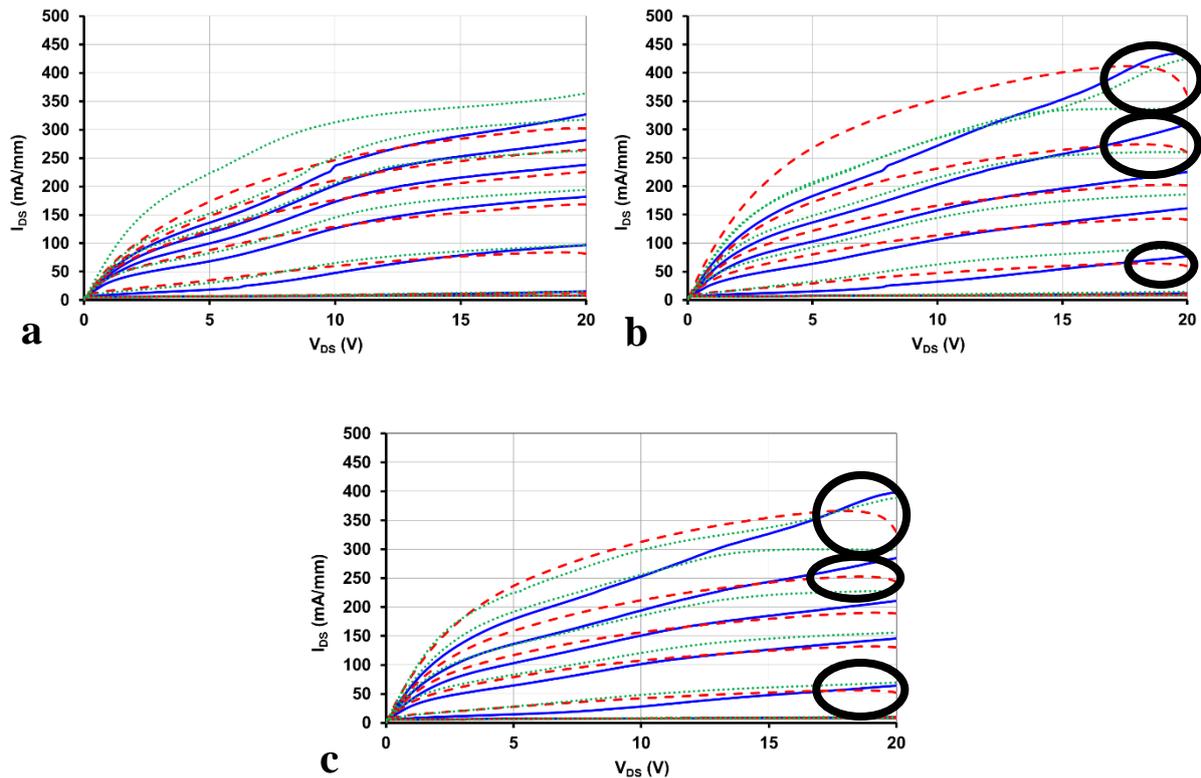


Figure 17 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN après stress (a), 1 an après stress et avant irradiation (b) et après irradiation (c) mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V

C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

La figure 17 présente l'impact du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés avant (17-b) et après irradiation (17-c). Nous constatons que les différences entre le I_{DS} mesuré dans la configuration C1 et C2 et entre le I_{DS} mesuré dans la configuration C1 et C3 ne sont pas identiques mais aucune tendance générale ne se dégage. On peut tout de même affirmer que l'irradiation par des neutrons thermalisés a modifié les effets de pièges des transistors vieillissés par un stress à canal ouvert. Il est également intéressant de noter une diminution du courant de drain lorsque V_{DS} est compris entre 18 et

20 V et pour des V_{GS} de -3, 0 et 1 V (zone entourée en noir sur la figure 17-b) lorsque le composant est caractérisé dans la configuration C3. Cette diminution n'était pas présente juste après le stress (figure 17-a). Elle est visible 4 mois après la fin du stress (chapitre 1), mais aussi 1 an après la fin du stress (figure 17-b) et après l'irradiation (figure 17-c) sur tous les composants stressés à canal ouvert. Cela pourrait être lié aux pièges lents (à double titre) créés durant le stress : lents car ce phénomène n'apparaît qu'au bout d'un certain temps après la fin des stress et lents car la fin de l'augmentation de I_{DS} et donc du dépiégeage (zone entourée en noir sur la figure 17-b) ne se produit que lorsque V_{DS} est égal à 18 V soit une dizaine de millisecondes après avoir polarisé le transistor à une tension V_{DS} de 20 V. Nous pensons que l'augmentation brutale de I_{DS} lorsque V_{DS} varie de 20 à 18 V est liée à la libération d'électrons provenant de pièges lents. Cette évolution diffère de celle que nous observons habituellement lorsque les composants sont mesurés dans la configuration C3 (figure 11-a). En effet, dans ce cas les porteurs sont libérés immédiatement par les pièges lorsque les composants mesurés dans la configuration C3 sont polarisés à 20 V.

Nous avons donc montré dans cette partie que les irradiations dégradent le transistor en créant des pièges accepteurs captant les porteurs du canal et qui diminuent le courant de drain et augmentent la résistance d'accès. De plus, la création de pièges agissant comme des donneurs a été constatée puisque nous avons montré que les effets de lumière étaient plus importants après l'irradiation.

Nous avons aussi mis en évidence que les irradiations par des neutrons thermalisés impliquaient une dégradation du courant de drain, de la résistance d'accès, du courant de grille, de la transconductance des transistors vieillissés par un stress canal ouvert. De plus, la sensibilité vis-à-vis de la lumière des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés est plus importante après l'irradiation alors qu'aucune tendance ne se dégage pour la sensibilité vis-à-vis des conditions de polarisation.

2. Transistors stressés à canal pincé

Nous avons vu dans le chapitre 1 que des pièges électriques étaient créés pendant le stress à canal pincé. Nous allons donc nous intéresser à leurs effets sur le comportement électrique du transistor sous irradiation.

Tout d'abord, nous pouvons observer sur la figure 18 que le transistor a été dégradé par le stress avec notamment une chute de $I_{DS \max}$ de 722 à 671 mA/mm (- 7%) et une augmentation de $R_{\text{accès}}$ de 84 à 116 Ω (+ 38%), comme cela a été rapporté dans le chapitre 1.

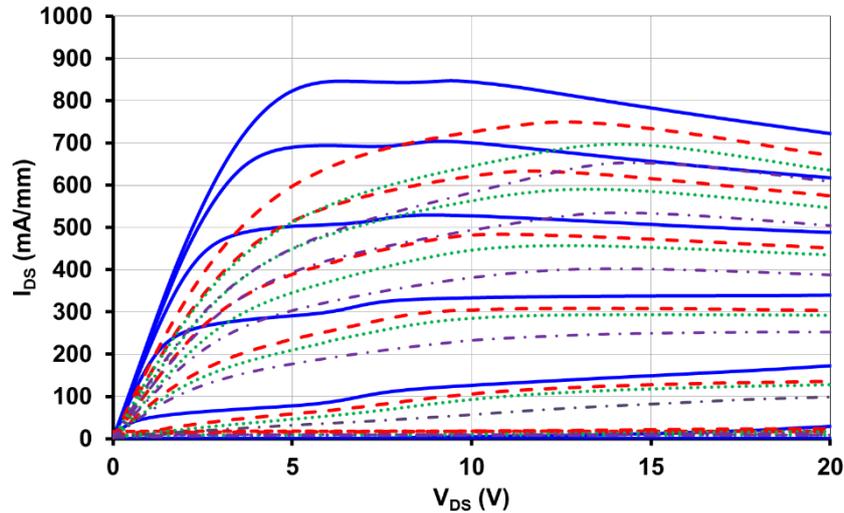


Figure 18 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbes bleues), après stress et avant irradiation (tirets rouges), après stress et irradiation (pointillés verts) et 4 mois après la fin de l'irradiation (courbe violette)

En effet, le stress à canal pincé implique la création de pièges donneurs et accepteurs et ces pièges sont situés dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN. Il est important de rappeler que ce type de vieillissement induit une densité de pièges de type accepteur supérieure à celle de type donneur. Ces composants stressés à canal pincé ont ensuite été irradiés. La figure 18 montre que $I_{DS \max}$ chute de 671 à 635 mA/mm (- 5%) et que $R_{\text{accès}}$ augmente de 116 à 135 Ω (+ 16%) après irradiation.

Cette évolution est liée à la création de pièges accepteurs engendrés par l'irradiation. Ces résultats sont différents de ceux rapportés par Fanny Berthet durant sa thèse [3] [135]. En effet, elle avait observé une augmentation du courant de drain $I_{DS \max}$ de 8% et une diminution de $R_{\text{accès}}$ de 6% après avoir irradié un transistor AlGaIn/GaN vieilli par un stress à canal pincé avec une fluence de 6.10^{11} neutrons.cm⁻² [75] [135]. Ces différences ne sont pas incohérentes parce que F. Berthet a utilisé des transistors AlGaIn/GaN contrairement à nous. Il est également important de noter que la nature des pièges induits par un stress à canal pincé dans les composants AlGaIn/GaN est certainement différente de celle des pièges induits dans des transistors AlInN/GaN comme dans notre cas. De plus, la différence de l'effet piézoélectrique pouvant exister dans ces deux types de structures peut également expliquer que nos résultats soient différents de ceux rapportés par F. Berthet.

La figure 18 montre également que les dégradations induites par l'irradiation sont irréversibles puisque les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) mesurées 4 mois après l'irradiation sont également dégradées en comparaison de celles obtenues juste après l'irradiation. On peut conclure que les mesures électriques des composants effectuées 4 mois après la fin des irradiations dégradent les composants stressés et irradiés ou alors que les irradiations induisent des pièges accepteurs lents qui continuent à capturer des électrons du canal durant plusieurs mois.

En suivant l'évolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence (figure 19), nous constatons qu' $I_{DS\ max}$ évolue de manière monotone au cours des irradiations. En effet, il diminue de 671 à 635 mA.mm⁻¹ lorsque la dose augmente de 0 à 1,2.10¹² neutrons.cm⁻². De plus, la résistance d'accès augmente de façon progressive de 116 à 135 Ω lorsque la dose varie entre 0 à 1,2.10¹² neutrons.cm⁻².

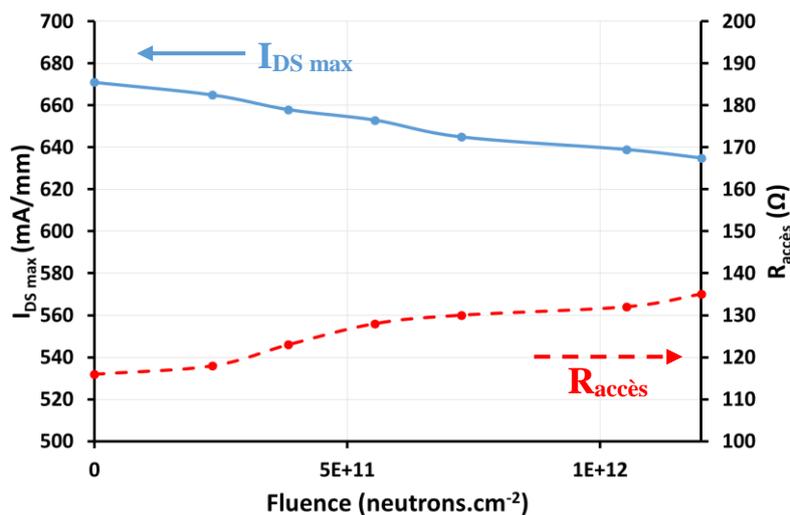


Figure 19 : Evolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence

Sur les caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) de la figure 20, nous observons que la grille n'a pas été impactée par le stress à canal pincé alors qu'une augmentation de courant de grille est mise en évidence après l'irradiation. Pour des HEMTs AlGaIn/GaN soumis à une fluence de 10¹⁵ neutrons.cm⁻² avec des neutrons rapides, Ling et al. ont constaté une diminution de la hauteur de barrière de 0,61 à 0,58 eV et une augmentation du coefficient d'idéalité de 2,16 à 2,49 [83].

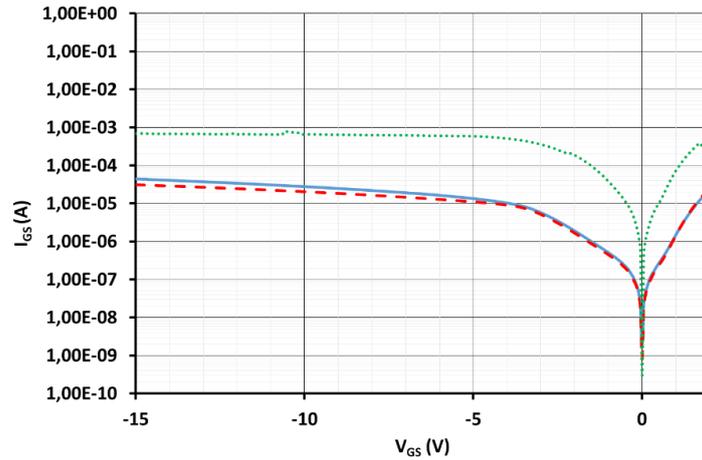


Figure 20 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant un stress à canal pincé (courbe bleue), après stress et avant irradiation (tirets rouges) et après stress et irradiation (pointillés verts)

Cette dégradation est expliquée par la création de défauts dans la couche d'AlGaIn proche de la grille, ce qui favorise la conduction par effet tunnel assisté par les pièges [81] [85]. Dans notre cas, les transistors ne possèdent pas d'AlGaIn mais une couche d'AlInN. Ainsi, nous pensons que les pièges induits par les irradiations peuvent être localisés dans la couche d'AlInN. Cette hypothèse est en accord avec les résultats rapportés par Polyakov et al. [6] qui ont mis en évidence une augmentation de la concentration de pièges électriques dans la couche barrière d'AlInN en fonction de la dose d'irradiation.

La figure 21 montre que le stress à canal pincé et l'irradiation n'ont aucune influence sur la tension de pincement (-3,9 V). De même, nous constatons que la transconductance diminue légèrement après irradiation pour V_{GS} compris entre -3,5 et 0,5 V avec notamment une baisse de $g_{m\max}$ de 187 à 179 $\text{mS}\cdot\text{mm}^{-1}$.

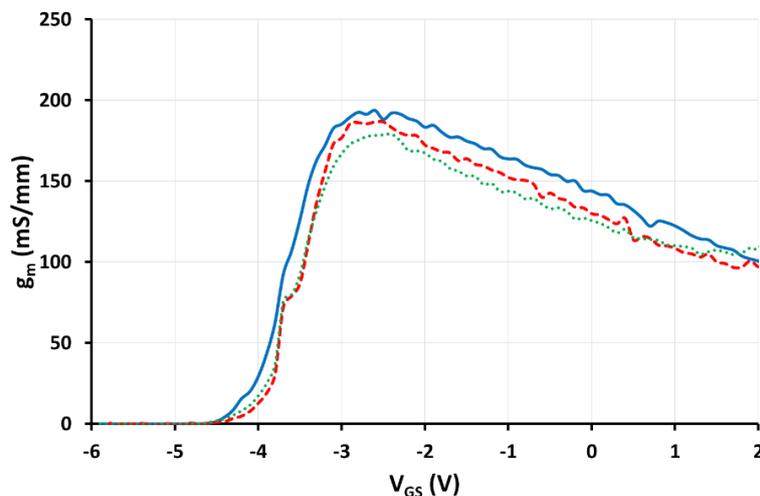


Figure 21 : Caractéristique g_m (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbe bleue), après stress et avant irradiation (tirets rouges) et après irradiation (pointillés verts)

Cette diminution de g_m ainsi que la chute de $I_{DS\ max}$ et l'augmentation de $R_{accès}$ observées après l'irradiation (figure 18) peuvent également être expliquées par la création de pièges électriques de type accepteur induits par l'irradiation.

Afin de confirmer cette hypothèse, l'influence de la lumière et des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés est analysée avant et après irradiation. Ainsi, la figure 22-a met en évidence que l'éclairement du composant stressé et non irradié implique une augmentation de I_{DS} lorsque $V_{DS} < 12\ V$. Cette augmentation de I_{DS} est nettement plus importante et est observée quelle que soit la valeur de V_{DS} après l'irradiation (figure 22-b).

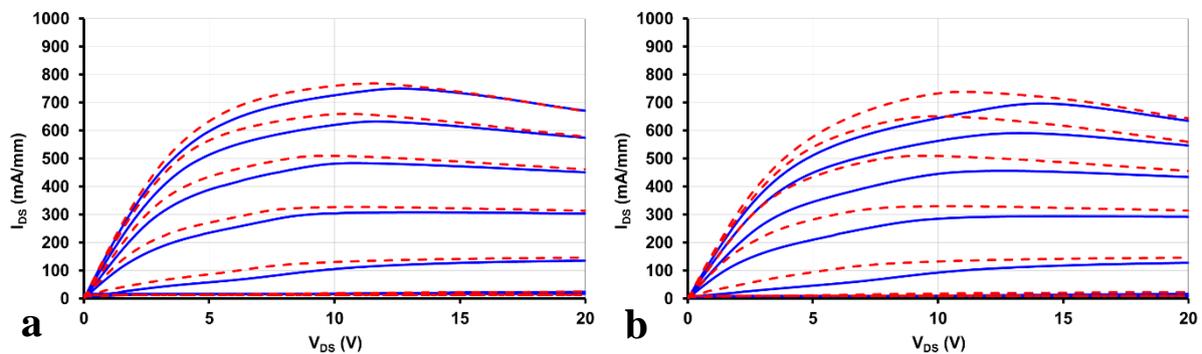


Figure 22 : Effets de lumière sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation. Les mesures ont été faites à l'obscurité (courbe bleue) et sous éclairage (tirets rouges). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V.

Cela peut être expliqué par une augmentation de la densité de pièges de type donneur ou/et des pièges accepteurs remplis induits par l'irradiation et ainsi la lumière provoquerait une libération d'un nombre plus important d'électrons dans le canal du composant.

La figure 23 met en évidence une influence importante des conditions de polarisation sur les caractéristiques des transistors stressés avant et après irradiation. De plus, les différences entre I_{DS} mesuré dans les configurations C1 et C2 et celui mesuré dans les configurations C1 et C3 sont plus importantes après l'irradiation. Cela confirme que l'irradiation engendre une création de pièges électriques qui peuvent être de type accepteur et/ou de type donneur. Cependant, la densité de pièges accepteurs est supérieure à celle de pièges donneurs car l'irradiation provoque une diminution de I_{DS} et une augmentation de $R_{accès}$ comme le montre la figure 18.

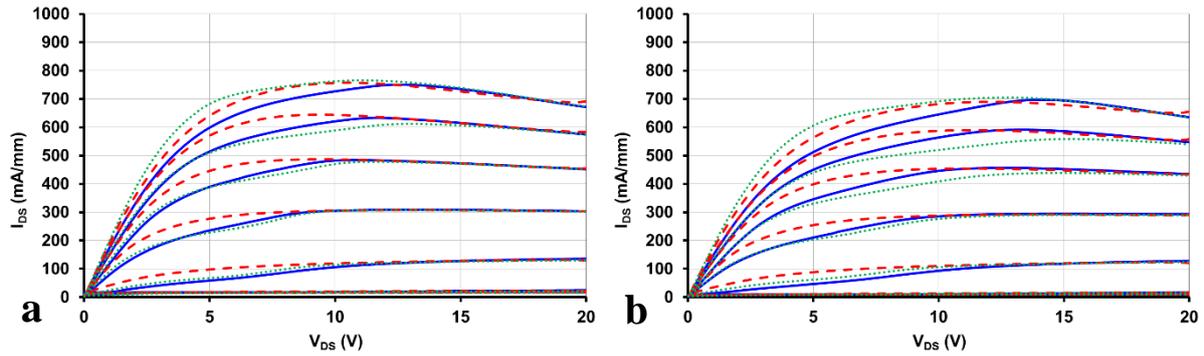


Figure 23 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V
 C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V
 C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

Nous avons donc étudié les effets des neutrons thermalisés sur des HEMTs AlInN/GaN soumis à deux types de stress, à canal ouvert et à canal pincé et nous avons vu que les transistors continuaient à être dégradés par les irradiations. Nous allons maintenant analyser les effets des irradiations sur des transistors ayant subi un stress NGB afin de vérifier si cette tendance se confirme ou non.

3. Transistors soumis à des stress NGB

Après avoir soumis des transistors à des stress NGB (Negative Gate Bias), effectués à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = -20$ V (voir chapitre 1) durant 216 h, nous les avons irradiés afin d'étudier les effets des neutrons thermalisés sur les pièges déjà créés par le stress.

La figure 24 montre que, lors du stress NGB, $I_{DS \max}$ a chuté de 722 à 603 mA/mm (-16%) tandis que la résistance d'accès $R_{\text{accès}}$ a augmenté de 87 à 124 Ω (+ 43%). Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, ces dégradations sont expliquées par la création de pièges électriques de types donneur et accepteur qui sont localisés dans une zone entre la grille et le drain dans la couche de GaN. La figure 24 présente également les caractéristiques électriques des transistors AlInN/GaN avant et après irradiation. Dans ces conditions, nous avons observé une augmentation de $I_{DS \max}$ de 603 à 655 mA/mm (+ 9%) après l'irradiation alors que $R_{\text{accès}}$ reste égale à 122 Ω .

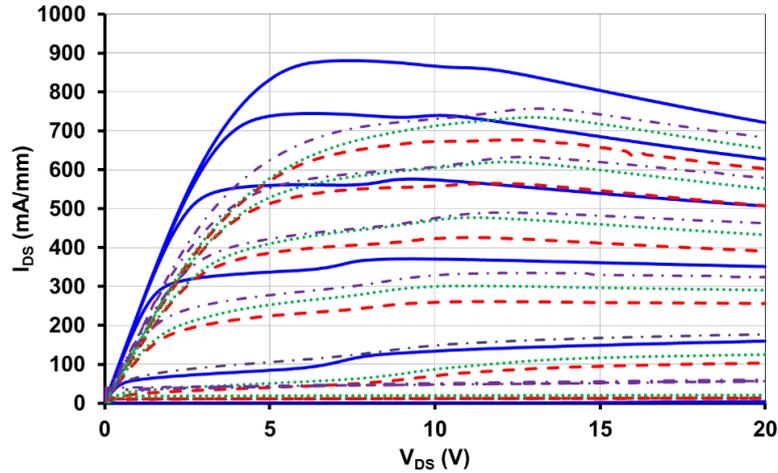


Figure 24 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant un stress NGB (courbes bleues), après stress et avant irradiation (tirets rouges), après stress et irradiation (pointillés verts) et 4 mois après l'irradiation (courbe violette)

Cette amélioration du comportement électrique du composant stressé peut être liée soit à la création de pièges donneurs provoquée par l'irradiation et/ou à la compensation des pièges électriques induits pendant le stress par des pièges créés durant l'irradiation. Il est intéressant de noter que le courant de drain maximal continue d'augmenter et évolue de 655 à 683 mA/mm tandis que la résistance d'accès diminue de 122 à 102 Ω , 4 mois après la fin de l'irradiation. Les caractéristiques électriques n'évoluent plus ensuite. Des mesures effectuées 7 mois après la fin des irradiations montrent que les caractéristiques électriques n'évoluent plus après 4 mois de repos.

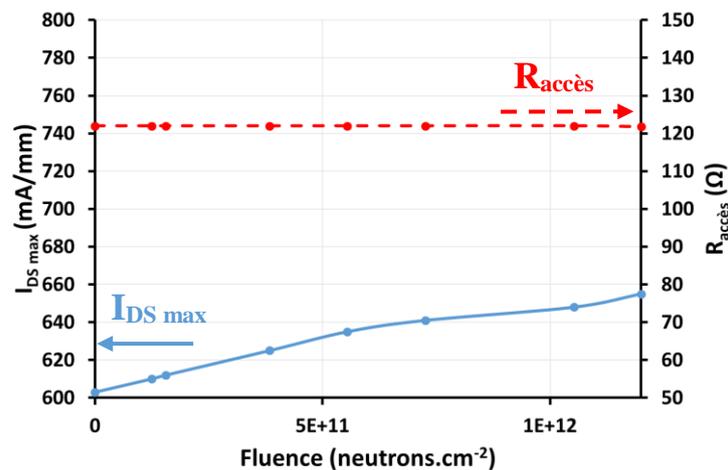


Figure 25 : Evolution des paramètres $I_{DS_{max}}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence

La figure 25 présente les évolutions de $I_{DS_{max}}$ et $R_{accès}$ en fonction de la fluence. Le courant de drain maximal augmente donc constamment de 603 à 655 mA.mm⁻¹ lorsque la

fluence évolue de 0 à $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻² tandis que la résistance d'accès reste constante à 122 Ω.

Afin d'expliquer ce phénomène, nous avons étudié les effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants stressés avant et après irradiation (figure 26). Ainsi, la figure 26-a montre que l'éclairement des composants stressés et non irradiés induit une augmentation du courant de drain et une légère diminution de la résistance d'accès. En effet, les stress NGB ont impliqué la création de pièges donneurs et/ou accepteurs dans le composant et la lumière fournit suffisamment d'énergie afin d'entraîner la libération d'électrons piégés dans le canal par les pièges donneurs et/ou les pièges accepteurs remplis.

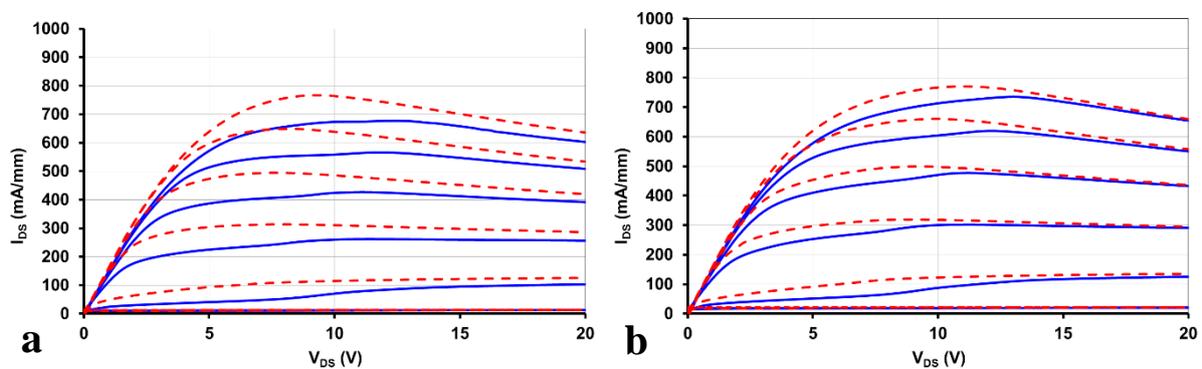


Figure 26 : Effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation. Les mesures ont été faites à l'obscurité (courbe bleue) et sous éclairage (tirets rouges). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -6 à 1 V par pas de 1 V.

Après irradiation (figure 26-b), une augmentation de I_{DS} et une légère diminution de $R_{accès}$ sont observés lorsque les composants sont illuminés. Ces tendances sont complètement différentes de celles observées après l'irradiation d'un composant non stressé (figure 6). La seule différence entre les composants non stressés et ceux vieillissés par un stress NGB est la présence de pièges électriques induits par le stress dans les transistors. De plus, les irradiations provoquent une diminution des effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants stressés contrairement à ceux observés pour les composants non stressés. Nous pouvons donc en déduire que les irradiations ont « guéri » des pièges électriques, sensibles à la lumière, créés lors du stress NGB.

En effet, l'augmentation du I_{DS} délivré par les composants stressés constatée après irradiation (figure 24) est expliquée par une « guérison » des pièges liée à une combinaison des pièges électriques induits par le stress NGB avec ceux engendrés par les irradiations. Il est également intéressant de noter que cette combinaison des pièges électriques n'est pas effectuée

avec tous les pièges créés par le stress NGB mais uniquement avec ceux qui sont sensibles à la lumière. Cette hypothèse est cohérente avec la diminution de la sensibilité des caractéristiques (I_{DS} , V_{DS}) des transistors stressés vis-à-vis de la lumière lorsque ces derniers sont irradiés (figure 26). Dans ces conditions, nous pouvons supposer qu'une partie des pièges se comportant comme des donneurs et sensibles à la lumière sont annihilés par ceux induits par l'irradiation et par conséquent l'influence de la lumière sur les caractéristiques électriques des transistors vieilliss par un stress NGB est moins importante après irradiation.

Afin de confirmer ces explications, nous avons étudié l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors vieilliss par un stress NGB avant et après irradiation.

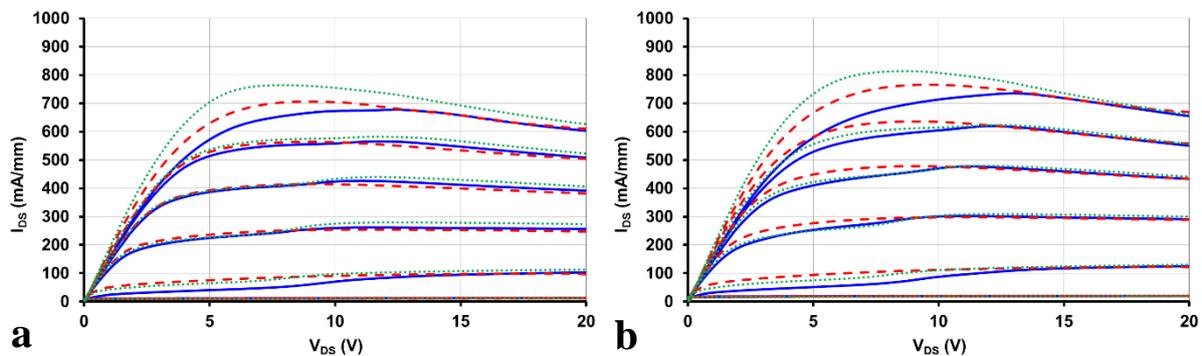


Figure 27 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant (a) et après (b) irradiation mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)

- C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V
- C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -6 V par pas de 1 V
- C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -6 à 1 V par pas de 1 V

Ainsi, la figure 27-a montre que les courbes I_{DS} (V_{DS}) mesurées à $V_{GS} = 1$ V (en particulier lorsque $V_{DS} < 12$ V) sont supérieures quand les composants stressés sont caractérisés dans la configuration C2, que C3 et que C1. Cependant, les caractéristiques I_{DS} (V_{DS}) obtenues à $V_{GS} \neq 1$ V sont proches quelle que soit la configuration de mesure utilisée pour caractériser les composants. Comme, nous l'avons évoqué précédemment, ces résultats sont expliqués par une libération des électrons provenant de pièges donneurs ou de pièges accepteurs remplis dans le canal des HEMTs AlInN/GaN stressés. Les mêmes tendances ont été observées après avoir irradié les composants stressés, comme cela est mis en évidence sur la figure 27-b. Néanmoins, la différence entre les courbes I_{DS} (V_{DS}) des composants stressés mesurées dans la configuration C1 et C2 ainsi qu'entre celles effectuées dans la configuration C1 et C3 sont plus prononcées après irradiation qu'avant. Ces résultats ne sont pas en accord avec la réduction de la sensibilité

vis-à-vis de l'éclairement des composants AlInN/GaN stressés observée après irradiation (figures 26-a et 26-b). Ainsi, les irradiations induisent une diminution de la densité de pièges électriques et une augmentation des pièges électriques sensibles aux conditions de polarisation. Comme nous l'avons vu précédemment, la plus faible sensibilité vis-à-vis de la lumière mise en évidence après irradiation peut être expliquée par la formation d'un système ou d'un défaut complexe entre une partie des pièges électriques induits par les irradiations et ceux créés par le stress NGB. Cependant, la sensibilité vis-à-vis des conditions de polarisation des caractéristiques électriques des composants stressés est plus élevée après irradiation. Cela signifie que les irradiations impliquent la création de plusieurs types de pièges dans les composants stressés. Ainsi, une partie des pièges électriques sont à l'origine de la création d'un défaut complexe permettant d'annihiler les pièges sensibles à la lumière induits par le stress NGB alors que d'autres pièges électriques sont responsables de l'augmentation de l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés et irradiés. Dans ces conditions, nous pouvons en déduire que les irradiations impliquent une chute de la densité de pièges électriques sensibles à la lumière et une augmentation de la concentration de pièges sensibles aux conditions de polarisation des composants.

Afin d'analyser l'impact d'un stress NGB suivi d'une irradiation sur la fiabilité du contact Schottky d'un HEMT AlInN/GaN, la figure 28 présente la caractéristique $I_{GS}(V_{GS})$ d'un transistor non stressé et d'un transistor stressé avant et après irradiation. Ainsi, aucun changement n'est constaté après 216 h de stress NGB.

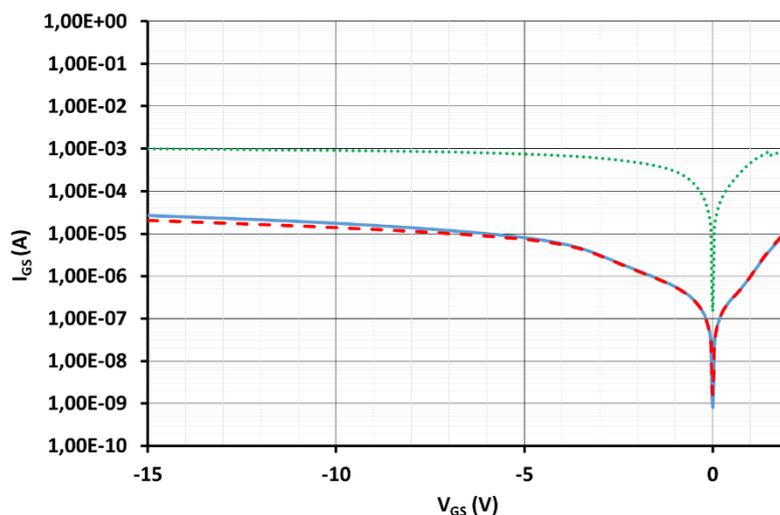


Figure 28 : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbe bleue), après un stress NGB et avant irradiation (tirets rouges), après stress et irradiation (pointillés verts)

En revanche, une augmentation du courant de grille en régimes direct et inverse est observée après irradiation. De même, le coefficient d'idéalité augmente de 3,5 à 3,9 et la hauteur de barrière diminue de 0,53 à 0,39 eV après irradiation. Nous pensons que cette augmentation du courant de fuite de grille est liée à un effet tunnel assisté par les pièges électriques créés par les irradiations. Ces pièges peuvent être également responsables de l'élévation de l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques électriques des transistors stressés constatée après irradiation (figures 27-a et 27-b).

Afin de mieux comprendre les mécanismes physiques engendrés par les irradiations, nous avons étudié leur impact sur la transconductance extrinsèque (g_m) d'un transistor AlInN/GaN avant un stress NGB, après un stress NGB et avant irradiation et après un stress NGB et après irradiation (figure 29).

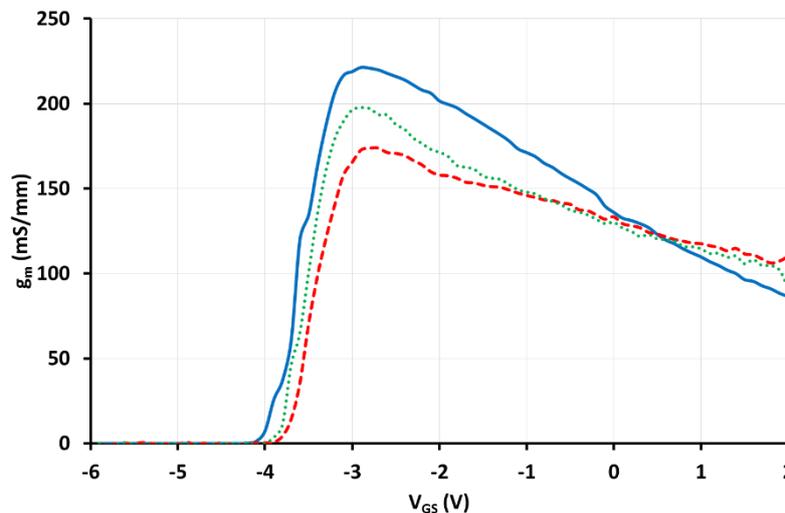


Figure 29 : g_m (V_{GS}) d'un HEMT AlInN/GaN avant stress (courbe bleue), après stress et avant irradiation (tirets rouges) et après irradiation (pointillés verts)

La figure 29 met en évidence la chute de la transconductance maximum de 222 à 174 mS/mm après 216 h de stress NGB. Une augmentation de 174 à 198 mS/mm est observée après irradiation. De plus, nous pouvons voir que la dégradation du g_m est plus prononcée après le stress NGB lorsque V_{GS} varie de -3,2 à -1,2 V que lorsque V_{GS} varie entre -1,2 et 2 V. Des tendances similaires ont été observées par Zhu et al. [103]. Dans ce cas, ils ont expliqué la dégradation du g_m par une chute de la conductivité du canal (i.e. une élévation de la résistance du canal) et à une moindre mesure par une augmentation de la résistance d'accès de drain liée à un piégeage des électrons dans la zone d'accès grille-drain. Ainsi, nous concluons que le stress NGB implique une dégradation du canal qui est localisée dans la couche de GaN.

L'augmentation du $g_{m \max}$ constatée après irradiation est cohérente avec celle du courant I_{DS} observée après irradiation également (figure 29).

Comme les différences entre la courbe $g_m(V_{GS})$ mesurée avant et après l'irradiation sont plus prononcées près du pic correspondant au $g_{m \max}$ que lorsque V_{GS} varie entre -1,2 et 2 V, nous pensons que l'augmentation du $g_{m \max}$ est principalement liée à une diminution de la résistance du canal. C'est pourquoi, l'élévation du courant de drain et de la transconductance observées après l'irradiation des composants stressés peut être expliquée par une diminution des pièges électriques existant dans le canal du composant et principalement ceux qui sont sensibles à la lumière. La figure 29 montre également que la caractéristique $g_m(V_{GS})$ est décalée vers les tensions grille-source positives après un stress NGB. Ce changement ne peut pas être lié à une dégradation du contact Schottky parce qu'aucune modification du courant de grille n'a été observée après le stress NGB (figure 28). Pour ces raisons, nous pensons que ce décalage est lié à la création de pièges électriques dans le buffer GaN [89] qui induit une diminution de la densité d'électrons dans le canal du composant et par conséquent, une valeur de V_{GS} plus faible est nécessaire pour dépléter le canal. D'autre part, la courbe $g_m(V_{GS})$ est décalée vers les valeurs négatives de V_{GS} après irradiation (figure 29). Ce phénomène est en accord avec l'augmentation du courant de grille observée après irradiation (figure 28).

Nous avons étudié les effets des neutrons thermalisés sur des transistors AlInN/GaN ayant préalablement subi un stress NGB. Nous avons constaté une augmentation du courant de drain après irradiation et une diminution de la résistance d'accès. Cette amélioration des performances électriques des composants stressés est attribuée à la formation d'un système complexe entre certains pièges électriques induits par le stress NGB et les pièges créés par les irradiations.

4. Comparaison de l'impact des irradiations effectuées sur des transistors AlInN/GaN vieilliss par des stress à canal ouvert, à canal pincé et NGB

Le tableau 1 présente l'évolution des paramètres $I_{DS \max}$, $R_{\text{accès}}$, η , Φ_b , V_p et de la sensibilité des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlInN/GaN vis-à-vis de la lumière et du sens de polarisation induite par les irradiations sur des HEMTs AlInN/GaN non stressés ou stressés à canal ouvert, à canal pincé ou NGB.

Chapitre 2 : Influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN

Paramètres	Non stressés	Stressés à canal ouvert	Stressés à canal pincé	Stressés NGB
$I_{DS \max}$	-5%	- 9%	- 5%	+ 9%
$R_{\text{accès}}$	+8%	=	+ 16%	=
η	=	+5%	=	+11%
Φ_b	-4%	-23%	=	-26%
V_p	+3%	+8%	=	-8%
Evolution des effets de lumière	+	+	+	-
Evolution des effets de polarisation	+	+	+	-

Tableau 2 : Récapitulatif des évolutions des paramètres électriques après irradiation selon les stress subis auparavant

Il se dégage de ce tableau que les irradiations neutroniques ont contribué à dégrader les performances électriques des transistors non stressés, stressés à canal ouvert et stressés à canal pincé. Ainsi le courant de drain diminue de 5% pour un composant non stressé, 9% pour les composants stressés à canal ouvert et 5% pour les stress à canal pincé. Il est intéressant de noter que les transistors ayant été stressés à canal ouvert et qui sont donc ceux qui ont été le plus dégradés par les stress [89] sont aussi ceux qui se dégradent le plus sous irradiation neutronique avec une diminution du courant de drain de 9%. Dans tous les cas, ces dégradations sont irréversibles et sont liées à la création de pièges accepteurs. De plus, les effets de lumière et du sens de polarisation deviennent globalement plus importants après irradiation, indiquant une libération dans le canal des électrons par les pièges donneurs et/ou accepteurs remplis. Dans ces conditions, nous pouvons dire que les irradiations impliquent une création de pièges donneurs et accepteurs. Cependant, nous pouvons affirmer que la densité des pièges accepteurs est supérieure à celle des pièges donneurs car les figures 6, 12 et 18 montrent une diminution du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès des transistors AlInN/GaN après irradiation. En revanche, l'impact des irradiations sur le courant de grille est différent si

le composant est stressé ou non. En effet, une nette augmentation du courant de grille est constatée après irradiation pour les composants stressés contrairement aux composants non stressés. A ce stade de l'étude, il est difficile de conclure sur la localisation des pièges électriques dans les composants irradiés. En effet, la dégradation du courant de drain et des résistances d'accès des composants non stressés peut signifier que les pièges induits par les irradiations peuvent être situés dans la zone située entre la grille et le drain [103]. Du fait d'une forte pénétration des neutrons dans les matériaux, il est possible que ces pièges soient situés dans toutes les couches GaN, AlN, AlInN, et SiN_x constituant les HEMTs AlInN/GaN ainsi qu'aux interfaces situées entre ces couches semiconductrices. La stabilité du contact Schottky des transistors non stressés vis-à-vis des irradiations peut signifier que l'irradiation n'implique pas la création de pièges sous la grille. Par contre, le courant de grille mesuré en régimes direct et inverse pour des transistors stressés augmente après irradiation quel que soit le stress effectué avant. Cela peut être expliqué par une conduction par effet tunnel assisté par des pièges électriques se situant dans la barrière AlInN [81] [85]. Cependant, la concentration des pièges induits uniquement par les stress électriques ou uniquement par les irradiations ne semble pas suffisante pour provoquer une augmentation du courant grille. Seul l'ensemble des pièges créés par les irradiations et les stress entraînent une augmentation du courant de grille.

Ces dégradations électriques peuvent être dues à la chute de la concentration du gaz électronique 2D et/ou de la mobilité électronique. Il est difficile de comparer ces résultats avec ceux de la littérature car la majorité des articles étudient l'impact des neutrons rapides sur les paramètres électriques des transistors AlGaInN/GaN. Ainsi, Polyakov et al. ont montré que la mobilité commence à diminuer après une fluence supérieure à 1.10^{15} neutrons.cm⁻² [80]. L'impact sur la mobilité des porteurs est principalement dû à l'introduction de défauts supplémentaires dans la couche buffer GaN de la structure AlGaInN/GaN tandis que la concentration du gaz 2D n'évolue que très peu [80]. Cet article montre que les irradiations avec des neutrons rapides introduisent des pièges électriques avec des énergies d'activation de 0,35 et 0,45 eV dans la couche barrière d'AlGaInN ainsi que des pièges à trous avec des énergies d'activation de 0,26 ; 0,6 et 1 eV dans le buffer GaN et la couche barrière AlGaInN [80]. Cependant, Zhang et al. ont rapporté que la densité de porteurs dans le gaz 2D reste constante après une irradiation neutronique avec une fluence de $6,13.10^{15}$ neutrons.cm⁻² mais elle décroît légèrement lorsque la fluence d'irradiation augmente jusqu'à $3,66.10^{16}$ neutrons.cm⁻² [142]. Dans notre cas, le spectre énergétique caractérisant les irradiations par des neutrons thermalisés est composé de 33% de neutrons thermiques et de 67% de neutrons rapides (figure 3). Pour ces

raisons, nous pouvons dire que la chute du courant de drain et l'augmentation de la résistance d'accès observée après une irradiation avec des neutrons thermalisés sont induites par la diminution de la mobilité électronique comme cela a été mis en évidence par la majorité des publications concernant les irradiations des composants par des neutrons rapides [80] [84] [142]. Néanmoins, les HEMTs AlInN/GaN sont aussi bombardés par des neutrons thermiques durant l'irradiation par des neutrons thermalisés et par conséquent des transmutations, notamment de Ga en Ge (figure 5) et de N en O se produisent. Il est important de noter que la concentration d'atomes d'oxygène obtenus après transmutation est très faible du fait de la petite section efficace de l'azote [137] [143]. Durant l'irradiation avec des neutrons thermalisés, les neutrons rapides induisent également différents défauts dans la couche de GaN tels que des lacunes, des atomes interstitiels, des défauts de niveaux profonds et des défauts complexes [143] [144]. De plus, après les réactions de transmutations, les atomes transmutés ne sont généralement pas situés à leur position initiale mais dans des sites interstitiels à cause d'un déplacement dû aux collisions entre les neutrons et les atomes [144]. C'est pourquoi, les irradiations avec des neutrons thermalisés induisent des défauts structurels (probablement des défauts complexes entre les lacunes de Ga et les atomes de Ge issus de la transmutation d'atomes de Ga) qui augmentent le nombre de pièges, ce qui implique une diminution de la concentration des porteurs [145]. Nous pouvons ajouter que les atomes d'Al des couches d'AlN et d'AlInN et les atomes d'In des couches d'AlInN peuvent aussi être transmutés respectivement en Si et en Sn [137]. Ce phénomène peut également contribuer à la dégradation de la densité d'électrons dans le canal des composants.

En revanche, les irradiations par des neutrons thermalisés ont permis d'augmenter de 9% le courant de drain des transistors stressés par un vieillissement NGB tandis qu'aucune évolution de leurs résistances d'accès n'a été observée. Dans le même temps, une diminution de la sensibilité vis-à-vis de la lumière des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des composants stressés NGB est observée. Dans ce cas, nous pensons que l'irradiation « guérit » les pièges électriques induits par le stress NGB qui sont sensibles à la lumière. En effet, ce phénomène peut être expliqué par la formation d'une structure complexe liée à la combinaison des pièges électriques sensibles à la lumière et induits par le stress NGB avec des pièges électriques créés par les irradiations. De plus, l'analyse précise des courbes $g_m(V_{GS})$ nous a permis de montrer que l'irradiation créait principalement des pièges électriques dans le canal des transistors qui entraînent une diminution de la mobilité et de la concentration des porteurs et donc du courant. Cette étude nous permet de conclure également que les irradiations impliquent la création de

différents types de pièges car certains de ces pièges permettent de diminuer la sensibilité vis-à-vis de la lumière des courbes I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors stressés NGB et d'autres impliquent une augmentation de la sensibilité vis-à-vis des conditions de polarisation des composants.

IV. Effets des irradiations sur des transistors MOS-HEMTs AlInN/GaN

Les transistors AlInN/GaN sont connus pour posséder un courant de grille élevé. Ce courant de fuite est un facteur limitant les performances et la fiabilité des HEMTs [40]. Ce problème peut être limité par l'insertion d'une fine couche d'oxyde diélectrique entre le métal de grille et la couche d'AlInN. En effet, ce procédé technologique permet de réduire le courant de grille d'un facteur 6 à 10 [41]. Cependant, la tension de pincement est plus basse pour un MOS-HEMT que pour un HEMT [40] [41]. Il est également possible d'atteindre une fréquence de coupure de 786 GHz, une fréquence d'oscillation de plus de 832 GHz pour des MOS-HEMTs AlInN/GaN à double grille [146] et une densité de puissance de $9 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-1}$ [41]. A titre de comparaison, les meilleures performances pour des HEMTs AlInN/GaN à une seule grille sont une fréquence de coupure de 370 GHz [51] et une densité de puissance de $10,3 \text{ W}\cdot\text{mm}^{-1}$ [32]. Dans cette perspective, il semble intéressant d'étudier l'influence des irradiations avec des neutrons thermalisés sur les performances électriques des MOS-HEMTs AlInN/GaN.

Afin de vérifier si des pièges électriques sont présents dans le composant avant de l'irradier, l'impact de l'illumination et des conditions de polarisation sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des MOS-HEMTs ont été étudiés.

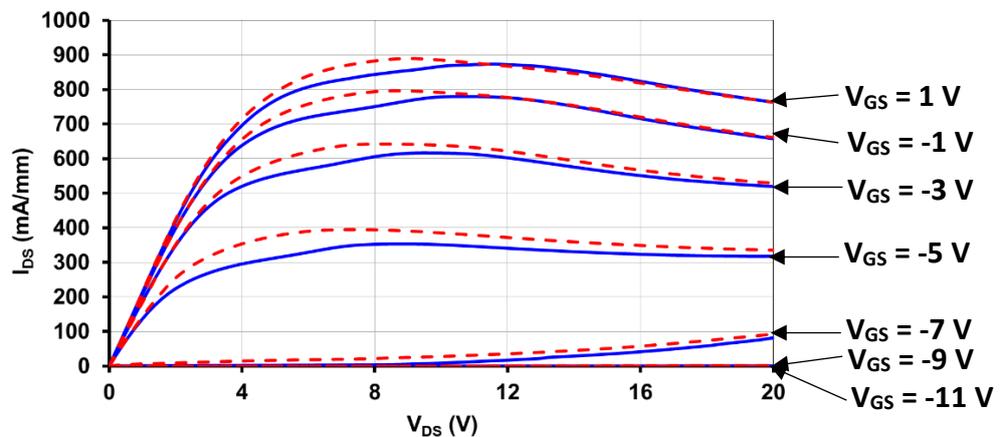


Figure 30 : Effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un MOS-HEMT AlInN/GaN avant irradiation. V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -11 à 1 V par pas de 2 V. Les mesures ont été faites à l'obscurité (courbe bleue) et sous éclairage (tirets rouges).

La figure 30 montre que l'illumination induit une augmentation du courant de drain excepté pour les courbes I_{DS} (V_{DS}) mesurées à $V_{GS} = -1$ et 1 V lorsque V_{DS} varie entre 12 et 20 V. La sensibilité vis à vis de la lumière met en évidence la présence de pièges électriques qui agissent comme des donneurs et/ou la libération d'électrons par des pièges accepteurs remplis dans le canal des transistors AlInN/GaN MOS-HEMTs.

La figure 31 présente l'impact des conditions de polarisation sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) mesurées à l'obscurité.

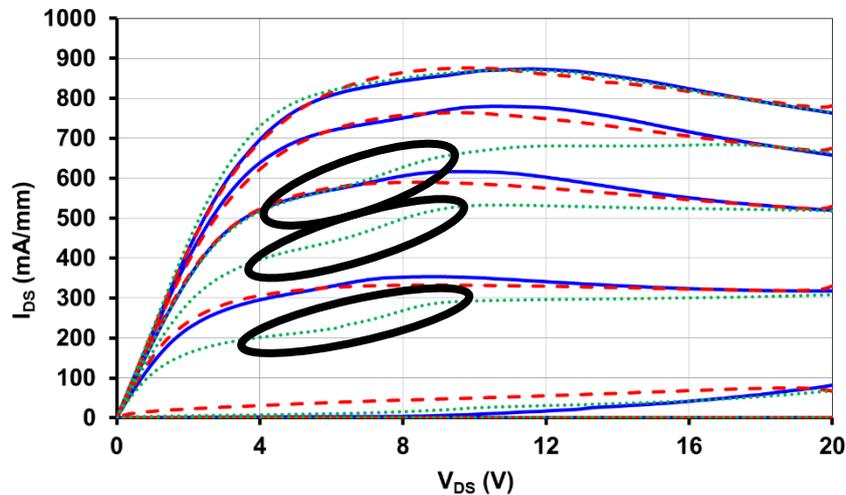


Figure 31 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un MOS-HEMT AlInN/GaN avant irradiation mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -11 à 1 V par pas de 2 V

C2 : V_{DS} évoluant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -11 V par pas de 2 V

C3 : V_{DS} variant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -11 à 1 V par pas de 2 V

Les mesures réalisées dans la configuration C1 et C3 sont quasiment identiques. En revanche, le courant mesuré en C2 est plus faible que celui obtenu dans les configurations C1 et C3 pour un $V_{GS} = -5$, -3 et -1 V. Cependant, la différence est plus prononcée lorsque V_{DS} est inférieur à 8 V. De plus, nous pouvons observer une brusque augmentation du courant de drain lorsque V_{DS} varie de 5 à 8 V (zones entourées sur la figure 31). Comme évoqué précédemment, ce phénomène pourrait s'apparenter à de l'effet kink [97]. De même, les différences entre les caractéristiques électriques réalisées dans les configurations C1 et C3 en comparaison de celles obtenues dans la configuration C2 sont plus prononcées pour les MOS-HEMTs AlInN/GaN que pour les HEMTs AlInN/GaN. Nous pouvons également noter qu'aucune évolution du courant de drain n'est observée pour $V_{GS} = 1$ V. Dans cette condition, la zone désertée sous la grille est minimale et ainsi, le canal est ouvert. Par conséquent, il ne

semble pas y avoir de pièges électriques dans la zone proche de la surface du composant. Cela est cohérent avec nos études précédentes et nous fait penser que les pièges électriques sont plutôt situés dans la couche de GaN.

Comme nous avons montré que des irradiations avec des faibles fluences de neutrons thermalisés peuvent réduire l'effet de pièges électriques induits par des tests de vieillissement, nous avons décidé d'étudier l'influence des irradiations par des neutrons thermalisés sur les pièges électriques préexistants dans les MOS-HEMTs AlInN/GaN. Les MOS-HEMTs étudiés dans ce chapitre ont reçu une fluence de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻².

La figure 32 montre les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) de MOS-HEMT AlInN/GaN avant et après irradiation.

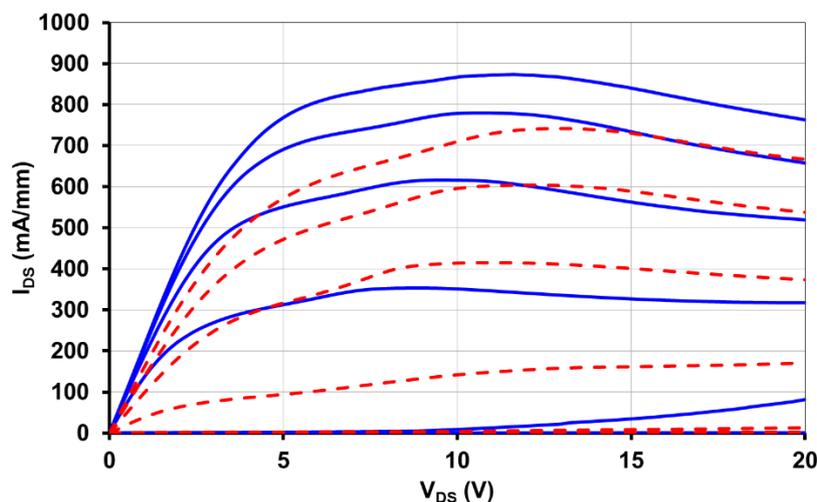


Figure 32 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un MOS-HEMT AlInN/GaN avant (trait plein bleu) et après (tirets rouges) irradiation

Ainsi, nous pouvons observer une diminution de $I_{DS \max}$ de 763 à 667 mA/mm (- 13%) et une augmentation de $R_{\text{accès}}$ de 93 à 123 Ω (+ 30%) après l'irradiation. Ces dégradations, qui étaient déjà visibles pour une fluence de $1,6 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² [140], peuvent être expliquées par la création de pièges électriques qui agissent comme des accepteurs. Ces évolutions semblent irréversibles puisqu'aucune évolution n'a été observée 4 mois après la fin du stress.

Dans le même temps, l'impact des irradiations sur la qualité de la grille est étudié et présenté sur la figure 33. Nous pouvons constater que Φ_b diminue de 0,50 à 0,47 eV et que le courant de grille augmente. Cette augmentation du courant de grille peut être due à la création de défauts dans la barrière Schottky qui facilite la conduction par effet tunnel assisté par des

pièges [85]. De même, l'évolution de la tension de pincement de -7 à -6,5 V durant les irradiations pourrait venir de la chute du courant de drain [84].

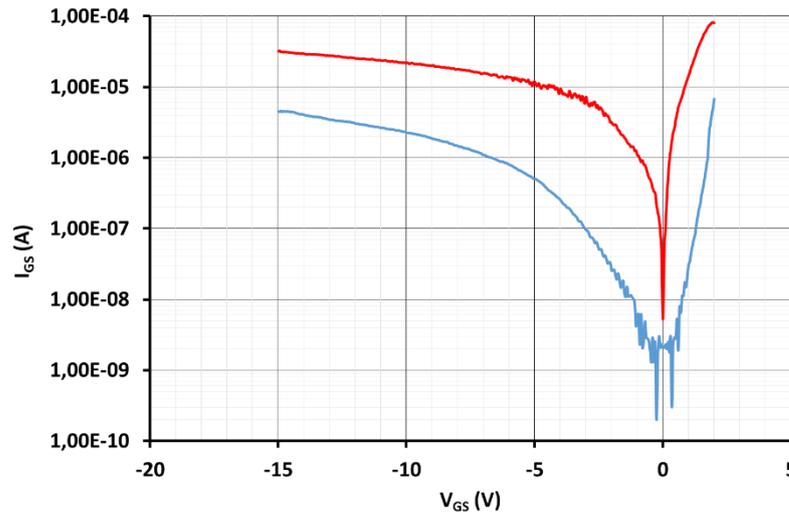


Figure 33 : Caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) d'un MOS-HEMT AlInN/GaN avant (trait plein bleu) et après irradiation (courbe rouge)

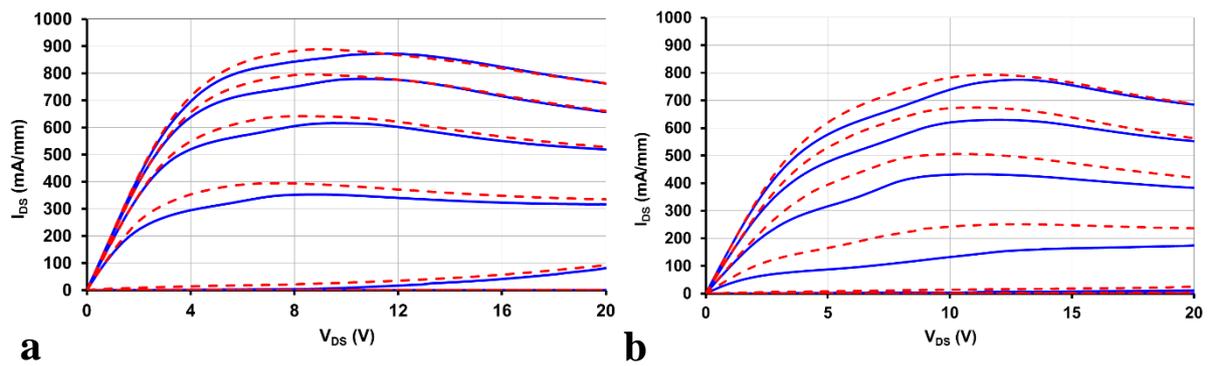


Figure 34 : Effets de lumière sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un MOS-HEMT AlInN/GaN avant (a) et après irradiation (b). Les mesures ont été faites à l'obscurité (courbe bleue) et sous éclairage (tirets rouges). V_{DS} varie de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} évolue de -11 à 1 V par pas de 2 V.

Afin d'expliquer ce phénomène, l'influence de l'éclairage du composant sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) de MOS-HEMTs AlInN/GaN a été analysée après irradiation. La figure 34 met en évidence que l'éclairage du composant provoque une augmentation du courant de drain sauf pour $V_{GS} = -1$ et 1 V et lorsque V_{DS} varie de 12 à 20 V. De plus, l'impact de l'illumination sur les caractéristiques électriques des composants est plus important après irradiation (figure 34-b) qu'avant (figure 34-a) et cela quelle que soit la valeur de V_{GS} . Ce résultat peut être lié à la création de pièges donneurs induits par l'irradiation. Dans ces conditions, nous pouvons conclure que l'irradiation provoque la création de pièges donneurs et accepteurs mais la densité des pièges accepteurs est supérieure à celle des pièges donneurs

puisque'une diminution de I_{DS} et une augmentation de $R_{accès}$ sont constatées (figure 32). Il est important de noter que l'augmentation du courant de drain, lorsque le composant est éclairé, peut également être liée à une libération d'électrons par des pièges accepteurs remplis.

La figure 35 montre l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des MOS-HEMTs AlInN/GaN mesurées à l'obscurité avant et après irradiation.

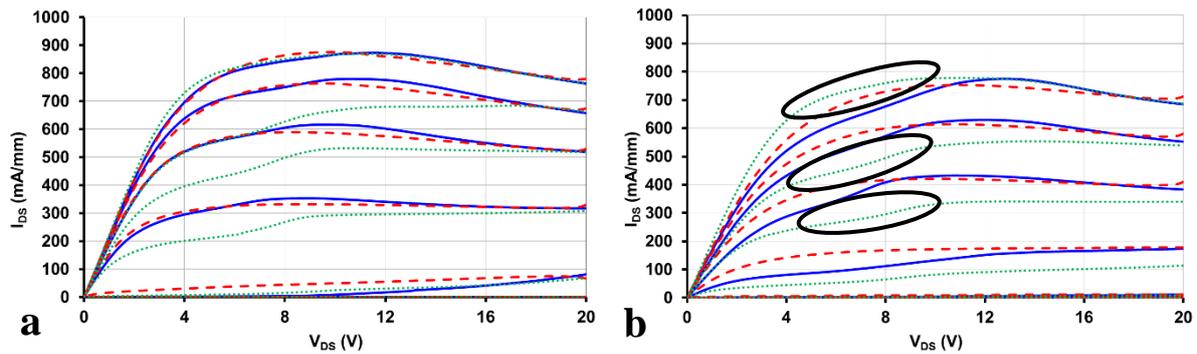


Figure 35 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un MOS-HEMT AlInN/GaN avant (a) et après irradiation (b) mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (pointillés verts) et C3 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} allant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -11 à 1 V par pas de 2 V

C2 : V_{DS} variant de 0 à 20 V par pas de 200 mV et V_{GS} de 1 à -11 V par pas de 2 V

C3 : V_{DS} évoluant de 20 à 0 V par pas de 200 mV et V_{GS} de -11 à 1 V par pas de 2 V

Les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) du transistor irradié mesurées en C1 et C3 (figure 35-b) sont quasiment les mêmes quelles que soient les valeurs de V_{GS} lorsque V_{DS} varie de 12 à 20 V. Par contre, le courant de drain mesuré en configuration C3 est nettement supérieur à celui obtenu en C1 quels que soient V_{GS} et V_{DS} variant de 0 à 15 V. Ce n'est pas le cas lorsque le transistor n'est pas irradié (figure 35-a). Le courant de drain obtenu dans la configuration C2 est indéniablement inférieur à I_{DS} mesuré dans la configuration C1 excepté pour $V_{GS} = 1$ V. De plus, nous pouvons observer une augmentation brutale du courant de drain quand le composant est caractérisé en configuration C2 et quand V_{DS} varie de 8 à 12 V (zones entourées sur la figure 35-b). La figure 35-b met également en évidence que I_{DS} mesuré dans les configurations C2 est supérieur à celui obtenu en C3 qui est lui-même plus élevé que celui caractérisé en C1 lorsque $V_{GS} = 1$ V et $V_{DS} < 16$ V. Ce phénomène n'a pas été observé avant les irradiations. En effet, les caractéristiques I_{DS} (V_{DS}) des MOS-HEMTs AlInN/GaN non irradiés effectuées à $V_{GS} = 1$ V sont quasiment identiques (figure 35-a) lorsque les mesures sont réalisées dans les configurations C1, C2 et C3. Dans ces conditions, le canal est ouvert et la zone déplétée est minimale. Cela implique que les irradiations induisent des pièges électriques dans une zone

proche de la surface des MOS-HEMTs AlInN/GaN [147]. De plus, les différences entre les caractéristiques électriques des transistors irradiés mesurées dans les configurations C1 et C2 semblent moins prononcées que celles obtenues avant irradiation excepté pour $V_{GS} = 1$ V.

Comme dans le cas des HEMTs AlInN/GaN, nous pensons que les pièges électriques induits par les neutrons thermalisés peuvent compenser les effets liés aux pièges préexistants dans les MOS-HEMTs AlInN/GaN.

V. Influence des irradiations sur le comportement électrique de HEMTs AlInN/GaN et de MOS-HEMTs AlInN/GaN

Nous avons montré que l'influence des irradiations par des neutrons thermalisés sur les propriétés électriques de HEMTs AlInN/GaN (composant 1) est moins importante que celle observées sur les performances électriques de MOS-HEMTs AlInN/GaN (composant 2). En effet, une diminution de $I_{DS\ max}$ de 5 et 13% et une augmentation de $R_{accès}$ de 8 et 30% ont été observées après irradiation pour des HEMTs AlInN/GaN et des MOS-HEMTs AlInN/GaN, respectivement.

Dans les deux cas, les dégradations induites par les irradiations sont irréversibles et sont liées à la création de pièges électriques de type accepteur. De plus, les caractéristiques électriques des composants 1 et des composants 2 effectuées avant et après les irradiations sont sensibles à la lumière blanche sans UV et aux conditions de polarisation utilisées durant les mesures.

Cependant, nous pouvons noter que la sensibilité vis-à-vis de la lumière est plus importante pour les composants MOS-HEMTs AlInN/GaN (figure 34) que pour les HEMTs AlInN/GaN (figure 10) qu'ils soient irradiés (figures 10-b et 34-b) ou non (figures 10-a et 34-a). Nous pouvons supposer que la densité de pièges électriques sensibles à la lumière est supérieure dans un transistor AlInN/GaN ayant une couche d'oxyde de grille que dans un composant AlInN/GaN ne possédant pas de couche d'oxyde de grille parce que des pièges donneurs et/ou que des pièges accepteurs remplis peuvent aussi être présents dans la couche d'oxyde de grille et/ou à l'interface couche AlInN/couche d'oxyde de grille. Cette hypothèse est confirmée par les figures 10 et 34 qui mettent en évidence que l'illumination induit une augmentation des courbes I_{DS} (V_{DS}) pour V_{GS} compris entre -6 et -3 V pour le composant 1 (figure 10) et une augmentation de I_{DS} quelle que soit la valeur de V_{GS} pour le composant 2 (figure 34). Dans ces conditions, nous pouvons conclure que les pièges électriques sont situés

dans la couche GaN (buffer) pour les HEMTs AlInN/GaN et dans la couche GaN, dans la couche AlInN et dans la couche d'oxyde de grille pour les MOS-HEMTs AlInN/GaN. Ainsi, l'existence de ces pièges électriques induit une augmentation du courant de drain quand les composants non irradiés et irradiés sont caractérisés sous illumination.

De plus, les effets d'illumination sur le courant de drain sont plus élevés quelles que soient les valeurs de V_{DS} et V_{GS} après irradiation pour le composant 1 (montré sur les figures 10-a et 10-b, respectivement) et pour le composant 2 (montré sur les figures 34-a et 34-b, respectivement). Cela pourrait aussi signifier que les irradiations induisent la création de pièges électriques sensibles à la lumière dans la couche buffer GaN, dans la couche AlInN, à l'interface couche AlInN / couche d'oxyde de grille et/ou dans la couche d'oxyde de grille des composants. Ce phénomène peut être lié à la création de pièges donneurs et/ou à la libération de porteurs par des pièges accepteurs remplis induits par les irradiations. Il est aussi intéressant de noter que les effets d'irradiation sont plus importants pour les MOS-HEMTs AlInN/GaN que pour les HEMTs AlInN/GaN, ce qui confirme qu'une partie des pièges électriques sont également créés dans la couche d'oxyde de grille [148].

Avant irradiation, l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ est plus prononcée pour le composant 2 que pour le composant 1. En effet, les différences entre les courbes $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ mesurées en configuration C1 et celles effectuées en C2 sont plus élevées pour le composant 2 que pour le composant 1. Cela confirme la présence de pièges électriques dans la couche d'oxyde de grille qui est la seule différence entre les deux composants. L'effet kink est observé sur les caractéristiques électriques des HEMTs AlInN/GaN et des MOS-HEMTs AlInN/GaN quand les mesures électriques sont effectuées dans la configuration C2. Ce phénomène peut également être lié à l'existence de pièges électriques dans la couche buffer GaN [96]. Dans les deux cas, l'influence des conditions de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ entre les configurations C1 et C2 est plus faible après avoir irradié les composants, excepté lorsque $V_{GS} = 1$ V. Nous pensons qu'une partie des pièges accepteurs créés par les irradiations compense une partie des effets induits par les pièges préexistants dans les composants 1 et 2, comme ceux responsables de l'effet kink par exemple. Cependant, l'impact des conditions de polarisation sur les courbes $I_{DS}(V_{DS})$ mesurées à $V_{GS} = 1$ V est plus élevé pour les MOS-HEMTs que pour les HEMTs après les irradiations. Nous pensons que le canal du composant est totalement ouvert à $V_{GS} = 1$ V, i.e. la zone désertée est minimale et le courant de drain est plus influencé par les pièges créés dans la couche d'oxyde de grille et/ou à l'interface AlInN/oxyde de grille par les irradiations. En effet, les irradiations

par des neutrons thermalisés peuvent induire des déplacements d'atomes et/ou de défauts qui pourraient dégrader la couche d'oxyde de grille [149].

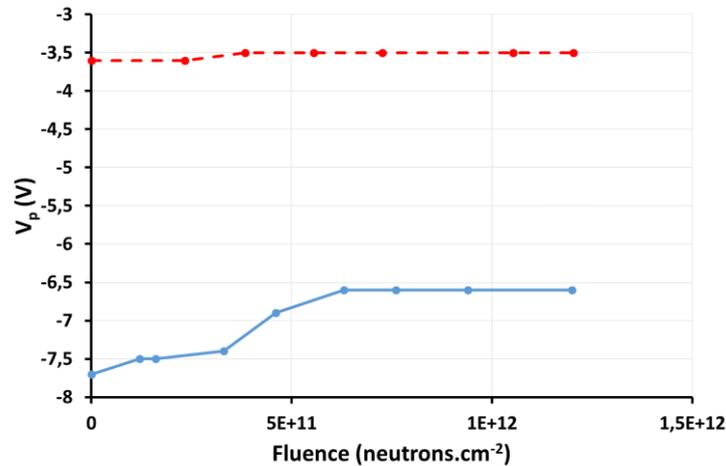


Figure 36 : Evolution de la tension de pincement d'un MOS-HEMT AlInN/GaN (courbe bleue) et d'un HEMT AlInN/GaN (tirets rouges) en fonction de la fluence

Afin de mieux comprendre l'impact des neutrons thermalisés sur les performances électriques des composants, nous avons analysé l'effet de la fluence d'irradiation sur la tension de pincement (V_p) des HEMTs AlInN/GaN et des MOS-HEMTs AlInN/GaN. La figure 36 montre que V_p reste proche de $-3,5$ V après une dose d'irradiation de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm^{-2} pour les transistors AlInN/GaN.

De plus, la figure 36 montre que V_p augmente de $-7,7$ à $-6,6$ V quand la dose d'irradiation varie de 0 à $6,3 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm^{-2} pour un MOS-HEMT AlInN/GaN. Elle reste ensuite constante à $-6,6$ V jusqu'à une fluence de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm^{-2} . Nous pensons que les irradiations induisent des défauts dans la couche d'oxyde de grille et/ou à l'interface oxyde de grille/couche AlInN. Ces défauts peuvent induire une déplétion du canal (comme montré à la figure 37) et amener à l'extension de la zone de déplétion de la grille. Dans ces conditions, une faible valeur de V_{GS} est nécessaire pour pincer le canal. Cette hypothèse est cohérente avec la chute du courant de drain observée après une dose d'irradiation de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons/cm^2 .

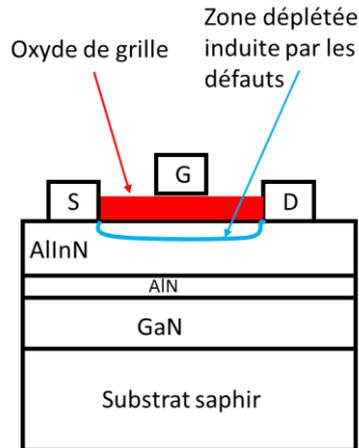


Figure 37 : Localisation possible des défauts induits par les irradiations neutroniques

Cette zone déplétée peut aussi expliquer la diminution du courant de drain induite par l'irradiation qui est plus élevée pour le MOS-HEMT AlInN/GaN que pour le HEMT AlInN/GaN.

Cette hypothèse est également cohérente parce que les irradiations par des neutrons peuvent induire des déplacements d'atomes de leurs sites. Puis les atomes déplacés peuvent à leur tour heurter et déplacer d'autres atomes cédant leur énergie à l'atome déplacé. Dans ces conditions, les interactions entre les neutrons et le semiconducteur peuvent provoquer la création de pièges électriques [147].

VI. Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté la source d'américium-béryllium utilisée pour les études sur les effets des rayonnements neutroniques. Nous avons également présenté le résultat du code de calcul Tripoli, effectué par Fanny Berthet, permettant de déterminer les énergies et le flux des neutrons qui atteignent les transistors.

Nous avons ensuite étudié les effets des neutrons thermalisés sur des transistors HEMTs AlInN/GaN non stressés et avons observé que ceux-ci étaient dégradés par les irradiations à cause de la création de pièges dans les composants, se traduisant notamment par une diminution du courant de drain maximal $I_{DS \max}$, une augmentation de la résistance d'accès $R_{\text{accès}}$. Malgré ces dégradations, nous n'avons observé aucune influence des irradiations sur la grille.

Des effets similaires ont été constatés pour des transistors stressés à canal ouvert et à canal pincé. Contrairement aux transistors non stressés, la grille se détériore sous l'effet des irradiations et nous observons alors une augmentation du courant de grille.

Chapitre 2 : Influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques de transistors AlInN/GaN

En revanche pour les HEMTs AlInN/GaN stressés NGB, nous avons pu observer que des pièges étaient « guéris » par les irradiations ce qui engendre un courant de drain plus important. Cette guérison peut être due à une recombinaison des pièges créés durant le stress avec ceux créés pendant les irradiations. En revanche, nous avons observé une dégradation de la grille due aux irradiations.

Enfin, l'étude des effets des irradiations neutroniques sur les MOS-HEMTs AlInN/GaN nous a permis de montrer que ceux-ci se dégradent plus vite que les HEMTs AlInN/GaN, avec notamment une diminution du courant de drain de 13% pour les MOS-HEMTs par rapport aux HEMTs.

Chapitre 3 : Influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des transistors du commerce de la filière GaN

*Chapitre 3 : Influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des transistors
du commerce de la filière GaN*

I. Introduction

La majorité des études effectuées sur la fiabilité des transistors AlGaIn/GaN concernent des stress électriques réalisés à une tension drain-source (V_{DS}) élevée ou pour des conditions de stress proches du fonctionnement rf d'un transistor dans les conditions d'« overdrive » [150] [151] [152] [153].

Les mécanismes de dégradation sont attribués aux électrons chauds générés dans la région située entre la grille et le drain pour une valeur élevée de V_{DS} [152]. Ces électrons sont probablement piégés à l'interface entre la couche de passivation et la couche d'AlGaIn et/ou dans la couche d'AlGaIn. Les électrons chauds piégés provoquent l'extension de la zone désertée proche de la surface et causent ainsi une dégradation des performances électriques [98] [150].

Sozza et al. ont ainsi étudié l'influence de stress HTRB (High Temperature Reverse Bias), HFGC (High Forward Gate Current), HTO (High Temperature Operating test) [98] et en ont conclu que les mécanismes de dégradation sont quasiment indépendants de la température et que les dégradations observées sont principalement attribuées aux effets induits par les électrons chauds.

D'autre part, Del Alamo et al. ont montré qu'un champ électrique intense apparaît sous le bord de la grille lorsque les transistors AlGaIn/GaN sont utilisés dans des conditions de fonctionnement utilisant des tensions élevées [154]. Dans ces conditions, des défauts cristallins apparaissent et affectent les performances électriques des transistors [154].

Durant sa thèse, Fanny Berthet a montré que des transistors AlGaIn/GaN étaient également dégradés par les stress électriques à canal ouvert et à canal pincé [75]. Dans cette étude, une augmentation de $R_{accès}$ et une diminution de $I_{DS\ max}$ ont été observées lors d'un stress à canal pincé et lors d'un stress à canal ouvert. Dans le même temps, η , Φ_b et le courant de grille en inverse sont restés constants ce qui montre une bonne fiabilité du contact Schottky Mo/Au. De plus, il est intéressant de noter que les dégradations induites par le stress réalisé à canal pincé sont plus importantes que celles créées par un stress à canal ouvert [1]. Ces résultats sont cohérents par rapport à ceux rapportés dans la littérature [39] [141]. F. Berthet a montré que les dégradations des performances électriques observées ne sont pas liées à une dégradation des contacts ohmiques, ni à une dégradation du contact Schottky, ni à une perte d'adhérence de la couche de passivation car les transistors retrouvent leurs performances électriques initiales

après éclaircissement. En effet, elle a mis en évidence que ces deux types de stress provoquent la création de pièges électriques dans la région grille-drain et en particulier à l'interface GaN (caplayer)/couche de passivation et/ou dans le haut de la couche de passivation. Par ailleurs, la création de pièges électriques dans le haut de la couche de GaN n'a été mise en évidence pour le stress à canal pincé mais pas pour un stress à canal ouvert. Ce phénomène peut ainsi amplifier la baisse du courant de drain et l'augmentation de la résistance d'accès lors du stress.

Ces études ont également montré que la dégradation des performances électriques des transistors était plus rapide et moins prononcée lors d'un stress à canal ouvert que lors d'un stress à canal pincé. Il est important de noter que les pièges électriques qui sont créés pendant le stress sont de types donneur et accepteur. Elle a également observé que les irradiations par des neutrons thermalisés dégradent les performances électriques des transistors AlGaIn/GaN non stressés alors qu'elles améliorent les caractéristiques électriques des transistors stressés à canal pincé [75] [135].

Plusieurs théories ont été émises afin d'expliquer les dégradations des performances électriques des transistors et, en particulier, la chute du courant de drain I_{DS} et l'augmentation de la résistance d'accès $R_{accès}$ durant un vieillissement. Cependant, elles ne sont pas toujours cohérentes entre elles. De ce fait, nous avons étudié le comportement de transistors AlGaIn/GaN face à différents stress afin de mieux comprendre ces phénomènes.

En effet, les dégradations induites par les vieillissements électriques sont fortement liées aux procédés technologiques utilisés lors de la réalisation des composants (structures des couches GaN et AlGaIn, dopage des couches, métallisations des contacts ohmiques et Schottky, présence d'une couche de passivation ou pas, présence d'un field plate ou non...) et aux paramètres électriques utilisés durant les stress électriques. De nombreuses publications rapportent des résultats concernant des vieillissements réalisés avec des transistors fabriqués en laboratoire [86] [87] [132]. Cependant, nous ne sommes pas sûrs que la technologie utilisée pour ces composants soit parfaitement optimisée. Pour ces raisons, il est souhaitable de confirmer les tendances obtenues durant les études de vieillissements effectuées avec des composants de laboratoire en étudiant l'impact des stress électriques sur des composants achetés dans le commerce. Certaines publications mettent en évidence des études concernant l'impact de tests de vieillissement réalisés sur des composants du commerce [155] [156] [157] mais elles montrent des résultats obtenus avec des stress dynamiques. Afin de confirmer les résultats obtenus avec des composants de laboratoire durant la thèse de Fanny Berthet, nous

avons décidé d'analyser l'impact de stress à canal ouvert, pincé et NGB sur les performances électriques des HEMTs AlGaN/GaN NPTB00004 de la marque Nitronex®.

De plus, F. Berthet avait également étudié l'influence des irradiations par des neutrons thermalisés sur les performances électriques de transistors AlGaN/GaN [75] [135]. En effet, une chute du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès ont été observées après une irradiation avec une fluence de 6.10^{11} neutrons.cm⁻². Ces évolutions sont liées à la création de pièges accepteurs par les irradiations par les neutrons thermalisés. Cependant, l'impact des irradiations est complètement différent lorsque les composants irradiés ont été vieillis par un stress électrique à canal pincé avant l'irradiation. En effet, une amélioration des caractéristiques électriques des transistors stressés a été mise en évidence après une dose d'irradiation de 6.10^{11} neutrons.cm⁻². Cela a été expliqué par une combinaison des pièges électriques induits par les stress électriques et les pièges électriques accepteurs créés par les irradiations. Ainsi, F. Berthet a conclu que les irradiations pouvaient « guérir » les pièges électriques induits par le stress électrique à canal pincé. Afin de vérifier si l'on retrouve ces résultats lors d'irradiations effectuées avec des composants réalisés avec une technologie mature, nous allons étudier l'influence d'irradiations par des neutrons thermalisés sur les caractéristiques électriques des transistors NPTB00004 non stressés et vieillis par des stress à canal ouvert, à canal pincé ou NGB.

Par conséquent, nous allons commencer ce chapitre par une présentation du banc de mesure conçu durant cette thèse et qui permet de caractériser et stresser automatiquement des transistors Nitronex®. Les données (datasheet) du fabricant sont en annexe et certaines caractéristiques sont détaillées plus loin.

Puis, nous étudierons les effets de trois stress électriques différents sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) de ces transistors :

- un stress à canal ouvert effectué avec $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = 0$ V,
- un stress à canal pincé réalisé avec $V_{DS} = 20$ V et $V_{GS} = -3$ V, d'après le fabricant, la tension de pincement est à $V_{GS} = -1,5 \pm 0,5$ V,
- un stress NGB appliqué avec $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = -10$ V.

Enfin, nous étudierons les effets des irradiations par des neutrons thermalisés avec une fluence de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² sur des transistors non stressés. De même, nous montrerons

les effets des neutrons thermalisés pour une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² sur des transistors ayant été préalablement stressés à canal ouvert, à canal pincé ou NGB.

II. Conception d'un banc de mesures et de stress automatisé

Au commencement de cette thèse, le LUSAC ne possédait pas de banc de mesures automatisé pour caractériser électriquement des transistors encapsulés. Il a donc fallu le concevoir en s'appuyant sur le cahier des charges suivant :

- Pouvoir effectuer des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$; $I_{GS}(V_{GS})$ et $I_{DS}(V_{GS}, V_{DS} = \text{cst})$ des transistors, en pouvant choisir les paramètres de polarisation.
- Pouvoir effectuer des stress électriques sur des transistors (stress à canal ouvert, stress à canal pincé, stress NGB), tout en suivant les évolutions des paramètres électriques au cours des stress.
- Pouvoir effectuer les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$; $I_{GS}(V_{GS})$ et $I_{DS}(V_{GS}, V_{DS} = \text{cst})$ à n'importe quel moment durant le stress. Cela implique que le stress doit s'arrêter, puis que les caractéristiques électriques se réalisent et enfin que le stress se relance. Cela doit être effectué automatiquement sans la présence de l'opérateur et autant de fois que celui-ci le souhaite.
- L'interface de commande du banc de mesure doit être conviviale et facilement appréhendée.

Le banc de mesure a été réalisé avec les appareils suivants (figures 1 et 2) :

- Une alimentation commandant la tension drain-source (Thurlby Thandar Instruments) avec une tension de commande maximale de 35 V et un courant maximal de 10 A.
- Une alimentation commandant la tension grille-source -15/+15 V
- Un multimètre mesurant le courant de drain (Keithley 2100)
- Un multimètre mesurant le courant de grille (Keithley 2100)
- Un board de mesures (Nitronex®) sur lequel le transistor est connecté.

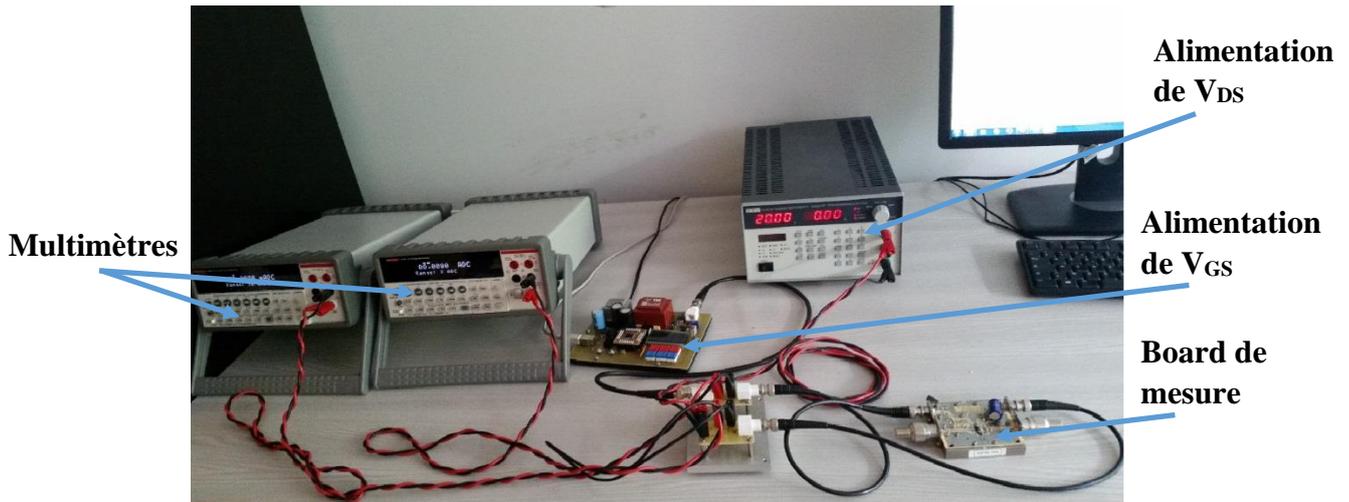


Figure 1 : Banc de caractérisation et de stress des transistors du commerce

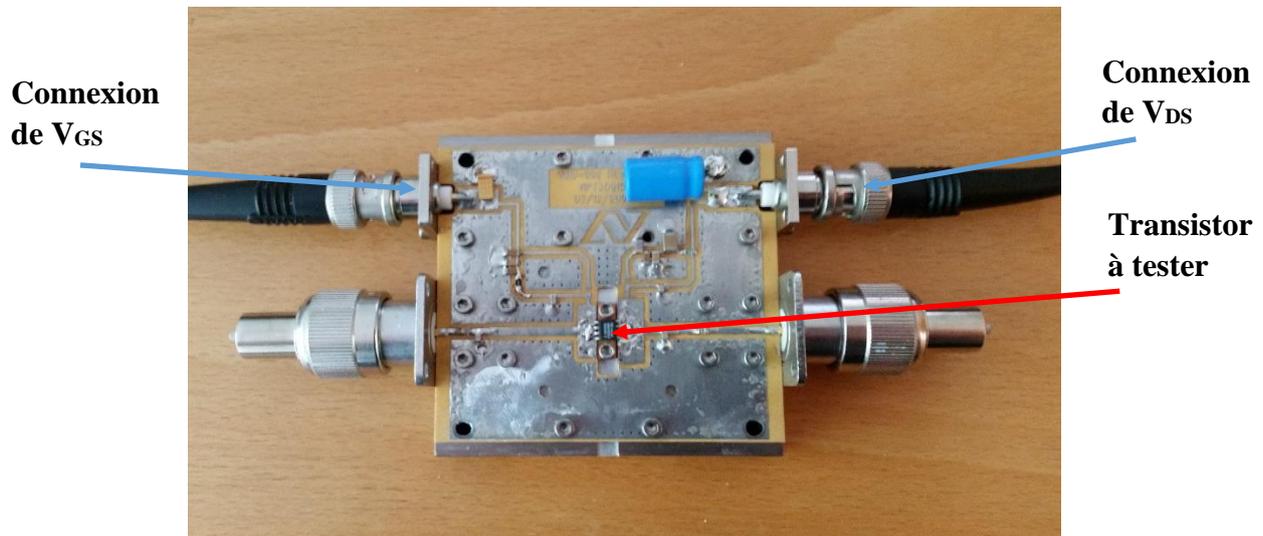


Figure 2 : Vue agrandie du board de mesure

Afin d'orchestrer tous ces appareils, nous avons décidé de créer un programme sur PC avec SharpDevelop qui est un logiciel utilisant le langage C# [158]. Nous avons ainsi pu créer une interface de contrôle des caractéristiques et des stress électriques. Cette interface est visible sur la figure 3. Nous pouvons donc mesurer les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$, $I_{GS}(V_{GS})$ et $I_{DS}(V_{GS}, V_{DS} = \text{constante})$. De plus, le programme en C# gère les stress automatiquement en effectuant les trois caractérisations électriques à des intervalles de temps que l'on peut choisir afin de suivre l'évolution des paramètres électriques au cours des stress. Il est également possible de choisir le temps total de stress ainsi que les tensions de polarisation V_{DS} et V_{GS} au cours du stress.

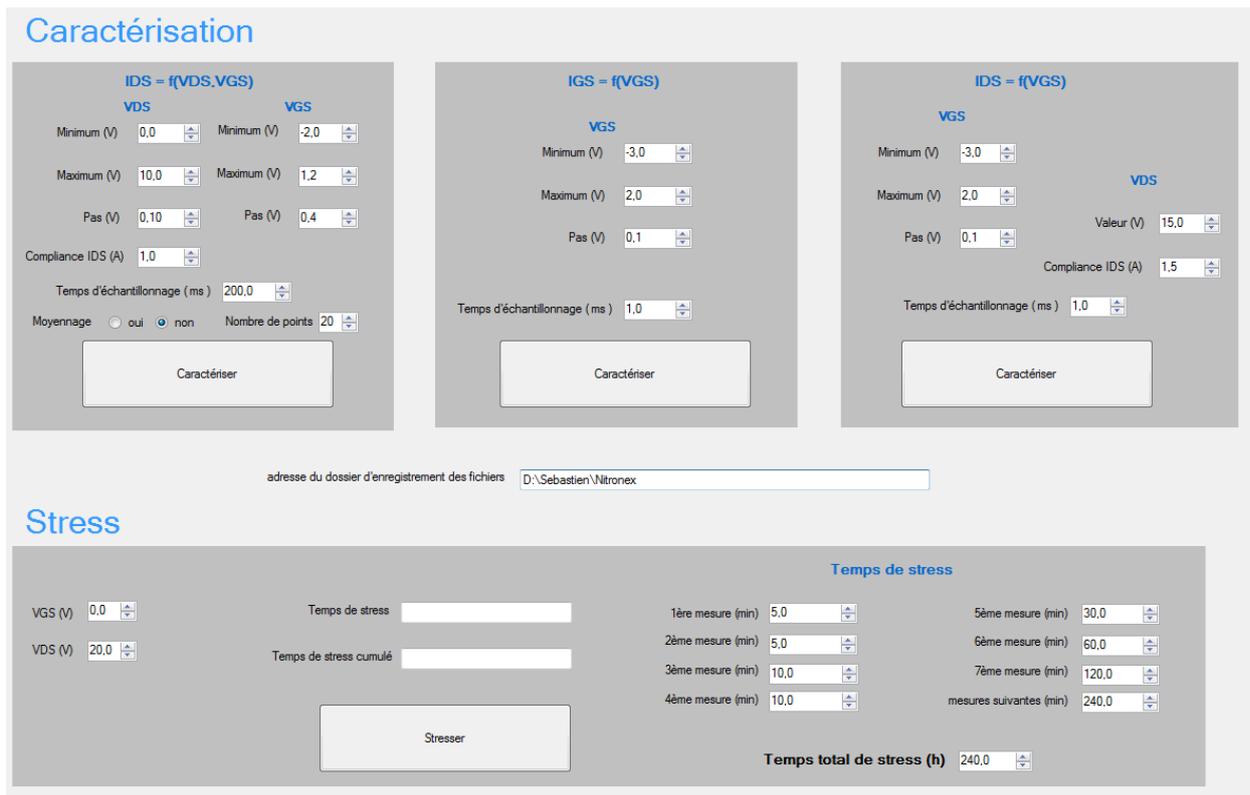


Figure 3 : Interface de commande du banc de caractérisation et de stress électriques

Afin de valider les mesures effectuées sur les transistors, il est nécessaire de déterminer les incertitudes en tension et en courant de notre banc de caractérisation. Nous avons donc effectué une étude statistique avec 200 mesures à un intervalle de 1 ms des paramètres électriques mis en jeu. La figure 4 montre la dispersion des 200 mesures de la tension V_{DS} pour une tension de consigne de 8 V, permettant ainsi de caractériser l'alimentation drain-source sur laquelle est branchée une résistance de 47 Ω .

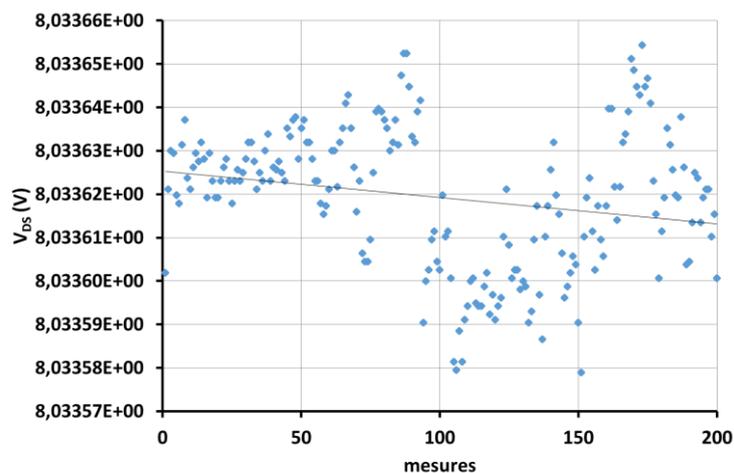


Figure 4 : Dispersion des 200 mesures de V_{DS} pour une tension de consigne de 8 V

Pour tous les essais, y compris pour la programmation de l'alimentation, nous avons utilisé cette résistance de 47Ω car cette alimentation peut générer une tension de 0 à 100 V et un courant de 0 à 2 A. Nous obtenons une moyenne de 8,034 V et un écart-type de $1,6 \cdot 10^{-5}$ V. C'est en accord avec les caractéristiques du constructeur qui donne une précision de 0,2% pour cette alimentation. La figure 5 montre la fréquence statistique des mesures de tensions V_{DS} en comparaison avec une loi théorique normale. Cette fréquence est calculée en divisant le nombre de fois qu'une valeur est mesurée par le nombre total de mesures. Nous constatons donc que la dispersion des mesures suit une loi normale et que nous avons donc une erreur systématique de 34 mV due au générateur de tension et une incertitude de mesure de l'ordre de $20 \mu\text{V}$ pour la tension V_{DS} .

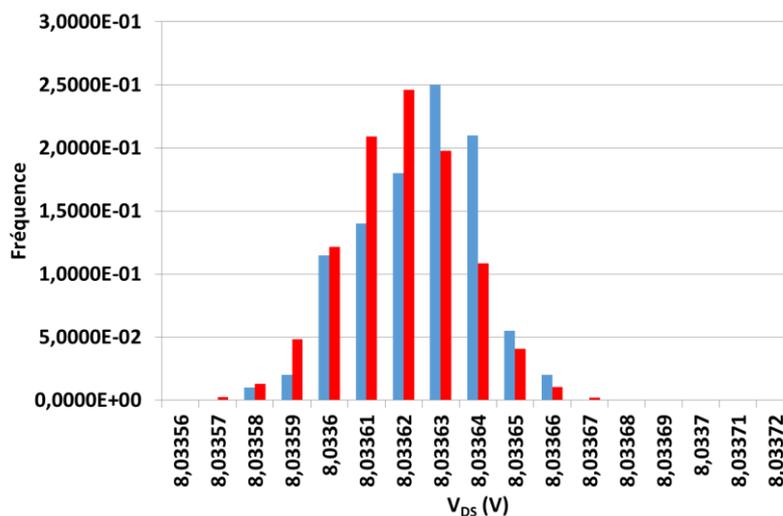


Figure 5 : Fréquence des tensions V_{DS} mesurées (en bleu) en comparaison avec une loi normale théorique (en rouge)

De même, pour la tension V_{GS} (figure 6), la dispersion des mesures pour une tension de consigne de -6 V, avec une résistance de 22Ω et un intervalle de 1 ms, a une valeur moyenne de -6,00 V et un écart-type de $1,4 \cdot 10^{-4}$ V. La résistance utilisée est de 22Ω car cette alimentation ne génère qu'une tension de 15 V au maximum. Cette fois, il n'y a donc pas d'erreur systématique et une incertitude de mesure de l'ordre de $100 \mu\text{V}$ pour la tension V_{GS} . La dérive observable peut être due au fait que la température augmente au sein de la résistance utilisée pour effectuer ces mesures.

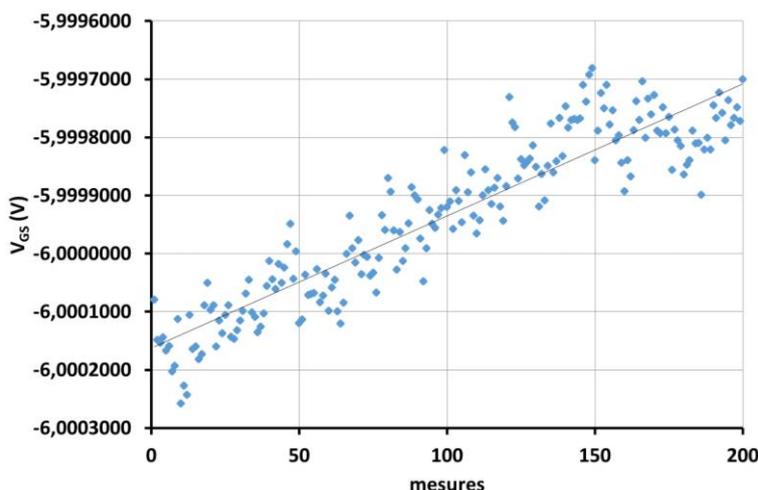


Figure 6 : Dispersion des 200 mesures de V_{GS} pour une tension de consigne de -6 V

En ce qui concerne l'incertitude de mesure du courant, nous pouvons voir la dispersion des 200 mesures de courant I_{DS} obtenues avec $V_{DS} = 2$ V et $V_{GS} = 0$ V sur la figure 7. Nous constatons que la valeur moyenne de courant est d'environ 673,6 mA avec un écart-type de $4,5 \cdot 10^{-4}$ A. Nous avons donc une incertitude de mesure de l'ordre de 50 μ A pour les mesures de courant avec notre banc de caractérisation.

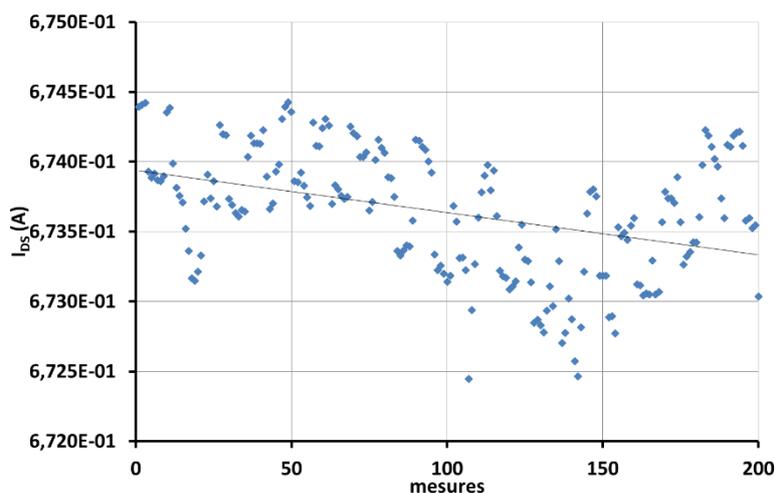


Figure 7 : Dispersion des 200 mesures de I_{DS}

Afin de s'affranchir de problèmes statistiques, une fonction de moyennage a été rajoutée au programme. Ainsi les valeurs utilisées pour tracer les courbes de ce chapitre sont la moyenne de 20 mesures effectuées par le multimètre.

III. Technologie des transistors NPTB00004

Comme évoqué précédemment, nous avons donc étudié les évolutions des performances électriques des transistors HEMTs AlGa_{0,26}N/GaN NPTB00004 de la marque Nitronex® (figure 8). Ceux-ci possèdent dix doigts de grille d'une longueur de 0,5 μm et d'une largeur de 200 μm, ce qui donne un développement total de 2 mm. Selon la datasheet, ces transistors ont une tension de pincement de $-1,5 \text{ V} \pm 0,5 \text{ V}$ et une résistance d'accès de 2 Ω. Ils peuvent en outre supporter une tension V_{DS} de 100 V et une tension V_{GS} variant de -10 à 3 V.



Figure 8 : Transistor HEMT AlGa_{0,26}N/GaN NPTB00004

Les figures 9 et 10 présentent la structure des HEMTs Al_{0,26}Ga_{0,74}N/GaN utilisés dans notre étude. Selon les données du fabricant, le substrat Si possède une résistivité de 10000 Ω.cm. La couche de GaN déposée par MOCVD a une épaisseur de 0,8 μm et les couches d'AlGa_{0,26}N et de GaN ont une épaisseur de 180 Å et 15 Å, respectivement.

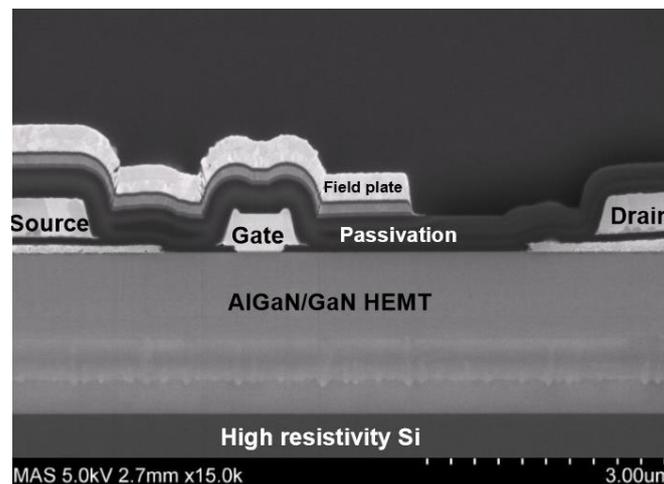


Figure 9 : Vue en coupe d'un transistor NPTB00004

GaN Cap	Cap Layer (15 Å)
AlGaIn Barrier	Barrier of Composition - x (26% Al) and Thickness - d (180 Å)
GaN Channel & Buffer	2DEG $n_s = 8.5 \times 10^{12} / \text{cm}^2 \pm 2.9\%$ $\mu_n = 1,500 \text{ cm}^2 / \text{V}\cdot\text{s} \pm 2.5\%$ Semi-insulating GaN Buffer Layer (0.8 μm)
Transition layer	Stress Mitigating Transition Layer
Silicon	High Resistivity Silicon Substrate (10,000 $\Omega\cdot\text{cm}$)

Figure 10 : Structure d'un HEMT AlGaIn NPTB00004

IV. Influence des stress électriques sur les caractéristiques de transistors AlGaIn/GaN de la marque Nitronex®

A. Etudes préliminaires

Comme cela a été effectué dans le chapitre 1 pour l'étude concernant l'impact des stress électriques sur les caractéristiques des transistors AlInN/GaN, il est impératif de vérifier s'il existe ou pas des pièges électriques dans les HEMTs AlGaIn/GaN. Pour ces raisons, l'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors va être analysée avant d'effectuer les tests de vieillissement sur ces derniers. Cependant, l'impact de la lumière blanche sans UV sur les caractéristiques électriques des transistors AlGaIn/GaN ne pourra pas être analysée, contrairement aux chapitres 1 et 2, car ces composants sont encapsulés. Afin de faciliter la compréhension de ce paragraphe, nous avons nommé configurations 1 et 2 les différentes configurations de mesures utilisées pour caractériser les transistors. Dans ces conditions, les mesures électriques effectuées en configuration 1 (traits pleins bleus) sont réalisées avec une tension V_{DS} variant de 0 à 10 V et V_{GS} de -2 à 1,2 V et celles obtenues en configuration 2 (tirets rouges) sont faites avec V_{DS} allant de 10 à 0 V et V_{GS} de -2 à 1,2 V. De plus, il est nécessaire de préciser que, dans ce chapitre, $I_{DS\text{ max}}$ est défini comme étant le courant de drain mesuré à $V_{GS} = 1,2 \text{ V}$ et à $V_{DS} = 10 \text{ V}$ et $R_{\text{accès}}$ comme étant l'inverse de la pente de la tangente à l'origine pour la courbe $I_{DS}(V_{DS})$ mesurée avec $V_{GS} = 1,2 \text{ V}$.

Ainsi, la figure 11 met en évidence une augmentation brutale du courant de drain (zone entourée en noir) sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS}) qui peut être assimilée à de l'effet kink [39] [159].

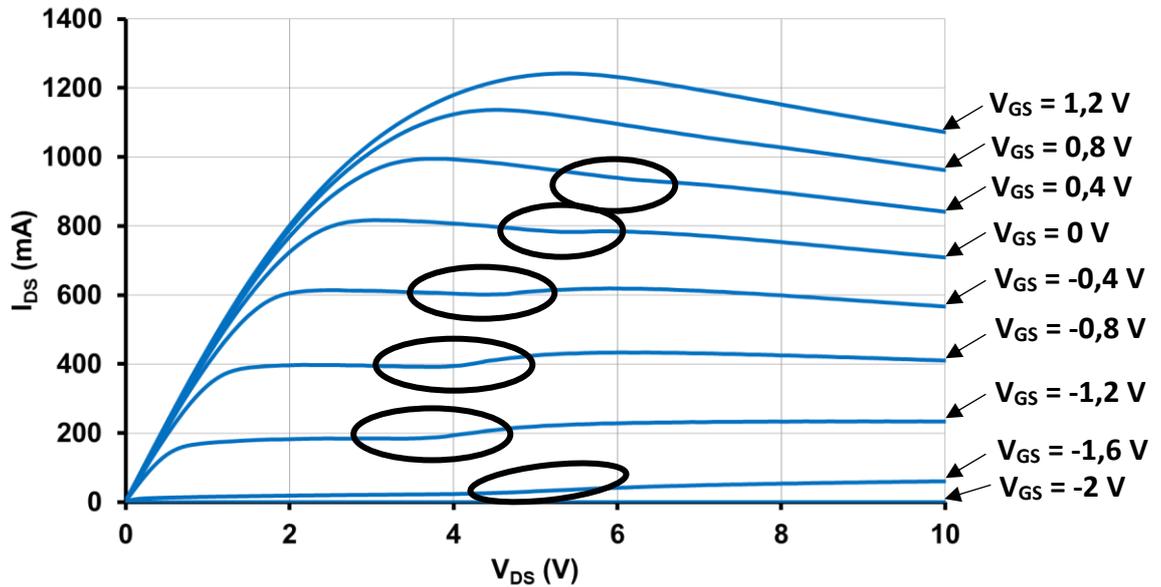


Figure 11 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 avec V_{DS} variant de 0 à 10 V et V_{GS} variant de -2 à 1,2 V par pas de 0,4 V

En effet, cette brusque augmentation du courant de drain est présente sur les courbes I_{DS} (V_{DS}) mesurées à des V_{GS} variant entre -1,6 et 0,4 V contrairement à celle obtenues pour des V_{GS} de 0,8 et 1,2 V. Pour $V_{GS} = -2$ V, le canal est pincé et ce phénomène n'est plus visible. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 1, la présence de cet effet kink sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors AlGaIn/GaN est la signature de la présence de pièges électriques dans ces composants [39]. La figure 11 montre également que la conductance est négative lorsque les composants sont caractérisés avec un V_{GS} égal à 0 ; 0,4 ; 0,8 et 1,2 V. En effet, les courbes de I_{DS} (V_{DS}) sont décroissantes lorsque V_{DS} varie de 5 à 10 V pour ces valeurs de V_{GS} . La conductance négative peut être liée à un effet thermique et/ou à un effet de pièges [160]. La présence de pièges électriques dans les transistors Nitronex peut paraître surprenante puisque ces composants sont réalisés avec un procédé technologique mature. Par conséquent, nous avons étudié l'impact du sens de polarisation sur les courbes I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) de ces transistors afin d'y confirmer l'existence de pièges électriques (figure 12). Cependant, il n'a pas été possible d'étudier l'influence du sens de polarisation de V_{GS} sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants puisque si la tension V_{GS} est polarisée de 1,2 à -2 V alors le composant se dégrade rapidement. Par conséquent, la figure 12 montre peu de différences entre les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) effectuées avec un V_{DS} variant de 0 à 10 V (courbes en traits

pleins) et celles obtenues pour un V_{DS} variant de 10 à 0 V (courbes en traits pointillés). En effet, nous constatons que les courbes I_{DS} (V_{DS}) mesurées en configuration C1 et C2 sont confondues lorsque $V_{DS} > 5$ V quelle que soit la valeur de V_{GS} . La seule différence significative est la disparition de la brutale augmentation de I_{DS} , assimilée à l'effet kink, lorsque le réseau I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) est mesuré en faisant varier V_{DS} de 10 à 0 V. En effet, dans ces conditions, le champ électrique existant à $V_{DS} = 10$ V est suffisamment élevé pour permettre une libération des porteurs par les pièges dès le début de la caractérisation des composants et ainsi l'effet kink n'est plus visible sur les caractéristiques électriques des transistors.

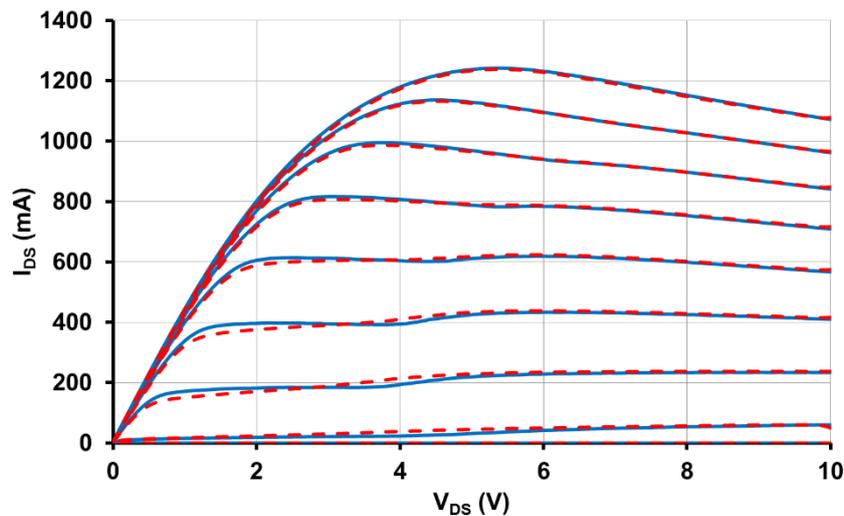


Figure 12 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 mesurées dans les configurations C1 (courbe bleue) et C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

Cependant, cet effet kink ne présente pas des caractéristiques similaires à celles rapportées dans la littérature [97] [161]. En effet, les courbes I_{DS} (V_{DS}) mesurées dans la configuration C2 auraient dû être supérieures à celles obtenues dans la configuration C1 lorsque $V_{DS} < V_{DS \text{ kink}}$, $V_{DS \text{ kink}}$ étant la tension V_{DS} à laquelle commence l'augmentation brutale de courant, c'est-à-dire l'effet kink. Cependant, la figure montre un effet inverse. Pour ces raisons, nous parlerons d'effet kink « anormal » dans ce cas.

Après avoir mis en évidence la présence de pièges électriques dans les transistors Nitronex NPTB00004, nous allons étudier l'impact des stress électriques à canal ouvert, à canal pincé ou NGB sur leurs performances électriques.

B. Influence du stress à canal ouvert sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaIn/GaN

Lorsqu'un stress est réalisé à canal ouvert, les composants sont soumis à un effet de champ électrique et à un effet thermique induit par le courant électrique. Dans cette étude, les stress à canal ouvert ont été effectués individuellement sur 5 composants à température ambiante et à l'obscurité en polarisant le composant avec une tension drain-source de 20 V et une tension grille-source de 0 V durant 240 h.

La figure 13 montre une dégradation des caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT AlGaIn/GaN NPTB00004 après 240 h de stress. Dans un souci de clarté, la figure 13 présente les caractéristiques électriques mesurées pour un V_{GS} variant de -2 à 1,2 V avec un pas de 0,8 V au lieu de 0,4 V habituellement.

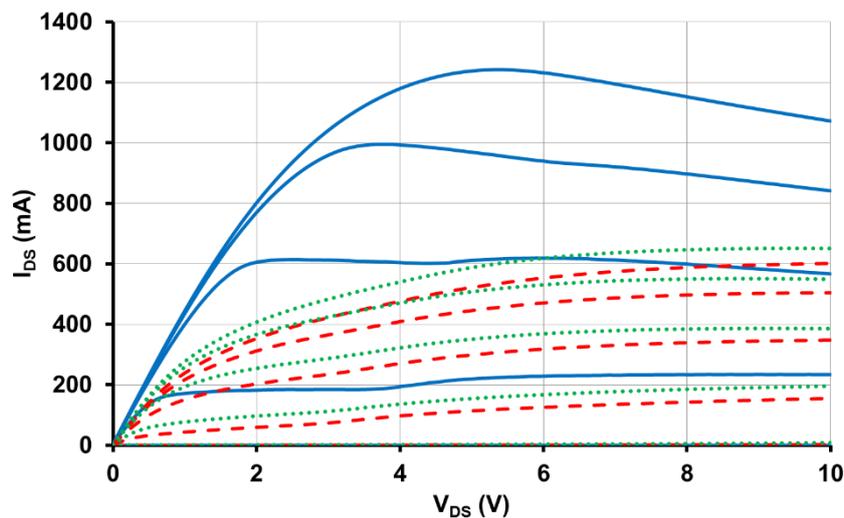


Figure 13 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 avant stress (courbe bleue), après un stress à canal ouvert de 240 h (tirets rouges) et après 2 mois de repos (pointillés verts). V_{DS} varie de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} évolue de -2 à 1,2 V par pas de 0,8 V.

Ainsi, nous pouvons observer une chute du courant de drain et notamment une diminution de $I_{DS \max}$ de 1072 à 603 mA (- 44%) et une augmentation de la résistance d'accès de 2,2 à 4,3 Ω (+ 95%). De plus, la figure 13 montre également que ces dégradations semblent quasi-irréversibles puisque les caractéristiques électriques des composants n'ont toujours pas retrouvé leur état initial 2 mois après la fin du stress. Il est intéressant de noter que les caractéristiques électriques des transistors stressés ne font plus apparaître de conductance négative contrairement aux transistors non stressés. Cela confirme que la conductance négative est certainement liée à un effet thermique induit par un courant de drain élevé. En effet, l'auto-

échauffement des composants en fonctionnement entraîne une diminution de la mobilité des électrons du canal et par conséquent une chute de I_{DS} . Après le stress à canal ouvert, le courant de drain n'est pas suffisamment élevé pour impliquer un effet thermique suffisant pour induire une diminution de la mobilité des électrons et donc aucun phénomène de conductance négative n'est observé.

Afin d'analyser précisément l'impact du stress à canal ouvert sur les caractéristiques électriques des composants, nous avons analysé l'évolution de $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction de la durée du stress.

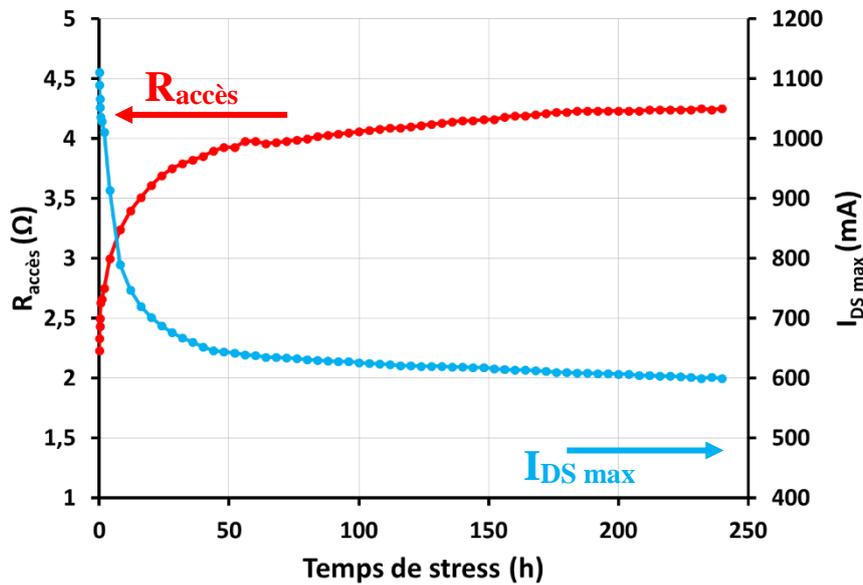


Figure 14 : Evolution des paramètres $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ en fonction du temps accumulé de stress

La figure 14 montre que $I_{DS\ max}$ chute de 1072 à 643 mA très rapidement lorsque la durée de stress varie de 0 à 50 h, puis $I_{DS\ max}$ diminue lentement jusqu'à 603 mA lorsque la durée de stress augmente de 50 à 240 heures. Dans le même temps, $R_{accès}$ augmente rapidement de 2,2 à 4,0 Ω lorsque la durée de stress augmente jusqu'à 50 h puis croit lentement jusqu'à 4,3 Ω pour une durée de stress variant de 50 à 240 h.

Afin de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu durant les tests de vieillissement, l'impact des effets du sens de polarisation sur les caractéristiques électriques des transistors AlGaN/GaN avant et après stress a été analysé (figure 15).

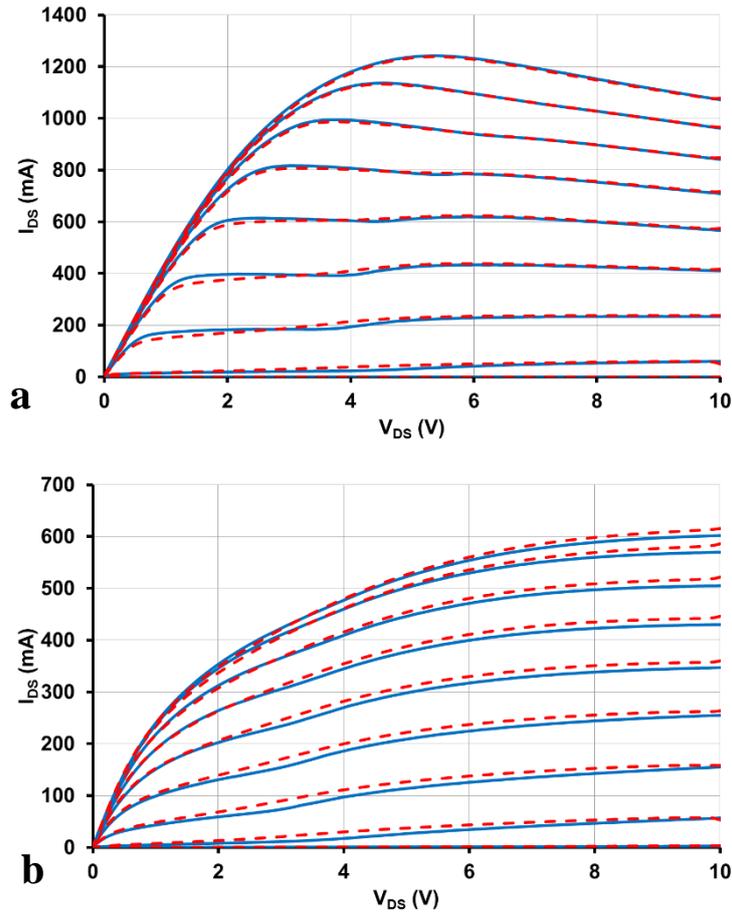


Figure 15 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (a) et après (b) un stress à canal ouvert de 240 h mesurées dans les configurations C1 (trait plein bleu) et C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

Une légère augmentation du courant de drain est observée lorsque V_{DS} varie de 10 à 0 V quelles que soient les valeurs de V_{GS} . De plus, la figure 15 montre qu'un effet kink anormal reste visible lorsque le transistor stressé est mesuré dans la configuration C1 contrairement à la configuration C2. L'augmentation du courant de drain observée dans la configuration C2 pour les transistors AlGaN/GaN stressés peut être induite par une libération d'électrons par des pièges donneurs et/ou accepteurs remplis. Il est indéniable que l'augmentation de I_{DS} observée lorsque les composants stressés sont caractérisés en C2 par rapport aux mesures effectuées en C1 est liée à une libération des électrons provenant des pièges induits par le vieillissement mais également de ceux existant initialement dans les transistors, c'est-à-dire avant le stress. Cela est en accord avec l'impact plus important du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors, observé après le stress.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature [38] [86] [162]. En effet, toutes ces publications ont mis en évidence une dégradation du courant de drain et des résistances d'accès après un stress à canal ouvert.

Nous pensons que la diminution de $I_{DS\ max}$ et l'augmentation de $R_{accès}$ après ce stress (figure 13) sont expliquées par la création de pièges accepteurs. En effet, les stress électriques provoquent la création de pièges électriques qui induisent une capture d'électrons et ainsi une chute de I_{DS} et une élévation de $R_{accès}$. De plus, la légère augmentation de $I_{DS\ max}$ et la faible diminution de $R_{accès}$ observées après deux mois de repos à l'obscurité (figure 13) confirment cette affirmation. En effet, cela signifie que certains pièges ou défauts libèrent des porteurs lorsqu'aucun champ électrique n'est appliqué au composant. Cependant, les caractéristiques électriques des composants stressés restent nettement inférieures à celles des composants non stressés, même deux mois après la fin du stress électrique. Cela nous permet de conclure que les dégradations induites par un stress électrique à canal ouvert sont quasi-irréversibles.

Nous pouvons noter, sur la figure 13 présentant les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant et après un stress à canal ouvert, que la chute de $I_{DS\ max}$ induite par le stress est maximale à V_{GS} élevé et à faible V_{DS} . Ce comportement a déjà été constaté par Meneghesso et al. pour des transistors AlGaIn/GaN non passivés après un stress à canal ouvert de 150 h [141]. Ce phénomène est généralement attribué à l'augmentation de la résistance d'accès du drain R_D , résultant du piégeage des électrons dans la région grille-drain, à la surface du transistor et/ou dans les couches sous le canal. Il a déjà été constaté pour des transistors AlGaAs/GaAs [159]. Le fait que l'impact de R_D soit plus important à V_{GS} élevé est la conséquence de la réduction de la résistance du canal et de l'augmentation de la chute de la tension à travers la région d'accès. Dans la zone de saturation, le fort champ électrique longitudinal masque presque totalement l'effet de l'augmentation de la résistance d'accès et cette explication justifie la réduction de la dégradation de $I_{DS\ max}$ observée à V_{DS} élevé [141].

Nous avons également mis en évidence que le stress à canal ouvert induit une diminution de $I_{DS\ max}$ et une augmentation de $R_{accès}$ principalement durant les 50 premières heures. Ce phénomène a déjà été observé par Malbert et al [38] et les dégradations n'étaient pas totalement réversibles dans ce cas. Ces effets seraient liés, en partie, à la présence de pièges électriques dans le composant avant stress et non à la création de nouveaux pièges. En effet, des mesures de bruit réalisées à basse fréquence sur des composants stressés durant 2000 h ont confirmé cette hypothèse [38].

Afin d'étudier la fiabilité de la grille vis-à-vis du stress à canal ouvert, nous avons comparé les caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ mesurées avant et après 240 h de stress à canal ouvert (figure 16). Nous constatons également que le stress induit une nette augmentation du courant de grille en régime direct et une faible élévation en régime inverse. Dans le même temps, la hauteur de barrière diminue de 0,7 à 0,5 eV.

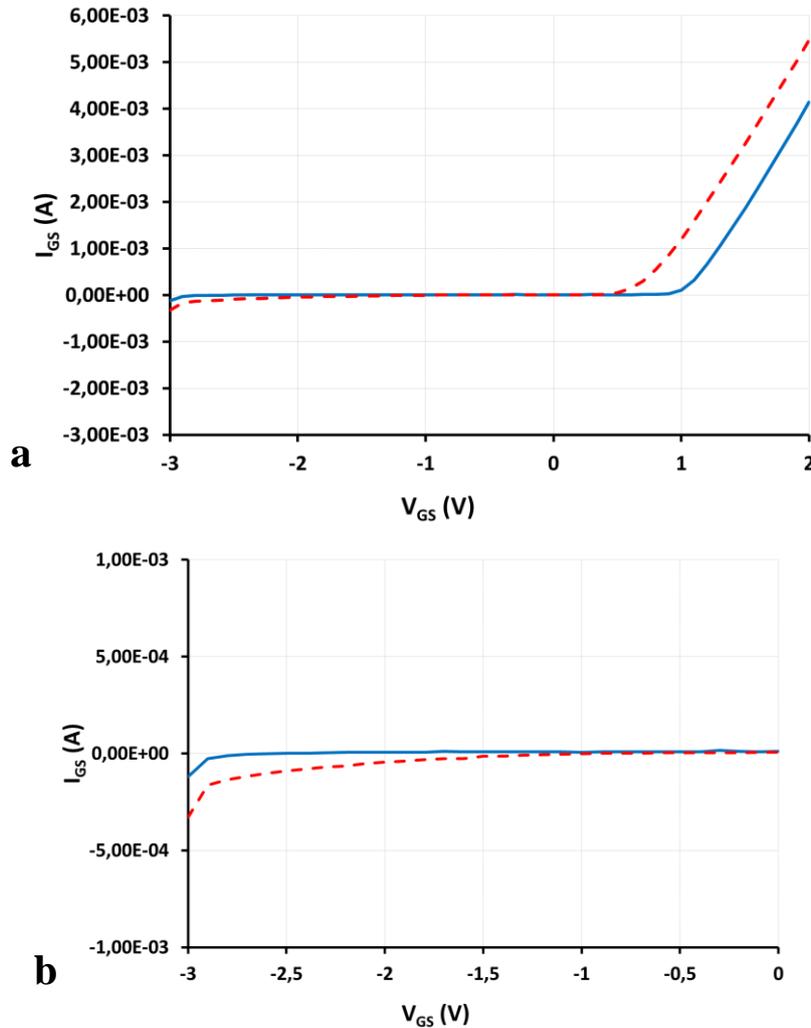


Figure 16 : a : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après (tirets rouges) 240 h de stress à canal ouvert, b : zoom $I_{GS}(V_{GS})$ pour V_{GS} variant entre -3 et 0 V

Ainsi, nous pouvons conclure que le stress à canal ouvert semble dégrader la grille des transistors.

Une dégradation du g_m est observée sur la figure 17 après un stress à canal ouvert. En effet, le $g_{m \max}$ diminue de 615 à 246 mS après l'irradiation. Dans le même temps, un décalage de la tension de pincement de -1,8 à -2 V est observé.

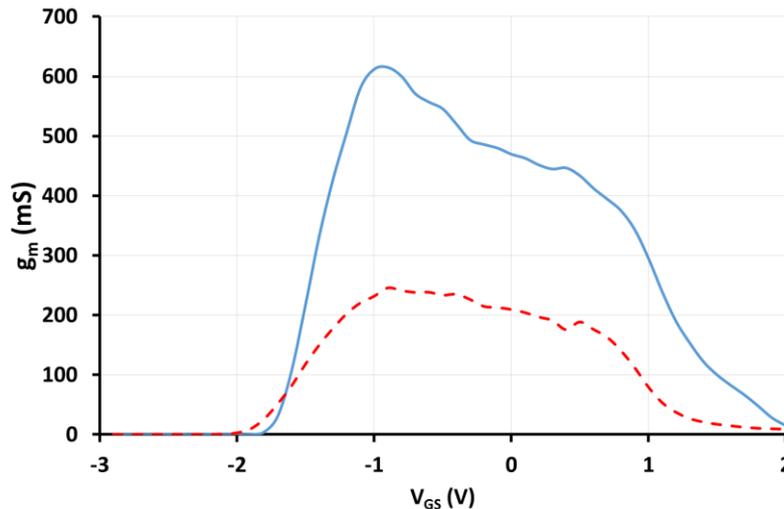


Figure 17 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 après un stress à canal ouvert et avant irradiation (courbe bleue) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

Nos résultats ne sont pas en accord avec ceux rapportés par Meneghesso et al. En effet, ils ont mis en évidence un décalage positif de la tension de pincement et une diminution du courant de grille d'un transistor AlGaIn/GaN après 150 h de stress à canal ouvert [141]. Ainsi, ils pensent que ces phénomènes peuvent être engendrés par une dégradation thermique du contact Schottky et/ou par un piégeage des électrons sous la grille ou par une combinaison de ces deux effets [141]. Nous pensons que ces différences sont liées à la technologie des composants. En effet, Meneghesso et al. ont utilisé, notamment, des composants AlGaIn/GaN non passivés alors que les transistors Nitronex sont passivés. D'autre part, Berthet et al. [86] ont montré que η , Φ_b et le courant de grille en inverse sont restés constants après 98 h stress à canal ouvert. Il est possible que ces évolutions soient dues aussi à la métallisation utilisée pour réaliser le contact Schottky. En effet, nous pensons que la grille des composants Nitronex n'est pas en Mo/Au contrairement à celle des composants analysés par F. Berthet. De même, Malbert et al. ont confirmé la bonne fiabilité du contact Schottky Mo/Au vis-à-vis des stress électriques [38].

Le décalage de la tension de pincement observée vers les potentiels négatifs après 240 h de stress est cohérent avec la diminution de Φ_b et l'augmentation du courant de grille. Effectivement, le pincement du canal se révèle être plus difficile avec une grille endommagée. La figure 17 montre également une chute importante de la transconductance après le vieillissement qui peut être expliquée par une diminution de la concentration et de la mobilité

des électrons du canal. Cependant, cette dégradation peut également être liée à une dégradation des résistances d'accès des composants.

Les dégradations provoquées par les stress à canal ouvert pouvant être lié à un effet de champ électrique et/ou à un effet thermique, nous avons décidé d'analyser l'influence d'un stress à canal pincé sur les performances électriques des transistors AlGaIn/GaN Nitronex. En effet, le courant délivré par les composants est nul dans ces conditions et ainsi il n'y a pas d'effet thermique.

C. Influence du stress à canal pincé sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaIn/GaN

Nous avons étudié l'influence des stress électriques réalisés à canal pincé sur 5 transistors. Dans ce cas, les transistors ne sont soumis qu'à un effet de champ électrique. Les stress à canal pincé ont été effectués avec une tension drain-source de 20 V et une tension grille-source de -3 V durant 240 h. Nous avons choisi une valeur de $V_{GS} = -3$ V pour être sûr que le canal du transistor soit pincé.

La figure 18 présente les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un transistor AlGaIn/GaN avant et après 240 h de stress à canal pincé.

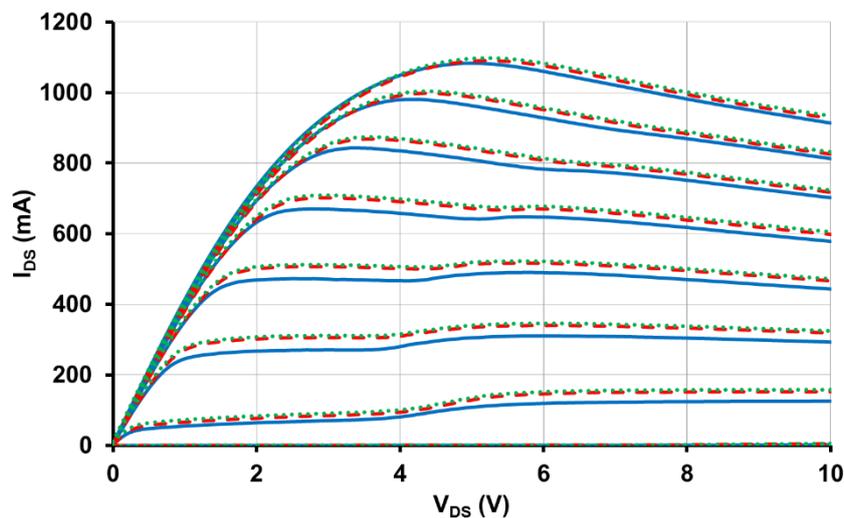


Figure 18 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 avant stress (courbe bleue), après 240 h de stress à canal pincé (tirets rouges) et après 2 mois de repos (pointillés verts). V_{DS} varie de 0 à 10 V et V_{GS} varie de -2 à 1,2 V par pas de 0,4 V

Nous observons que le courant de drain $I_{DS\ max}$, augmente légèrement de 914 à 926 mA (+ 1%) tandis que la résistance d'accès reste constante à 2,4 Ω . L'effet kink anormal semble

toujours visible sur les caractéristiques électriques des transistors stressés. Nous pouvons affirmer que les effets induits par le stress à canal pincé sont irréversibles car les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) obtenues après 240 h de vieillissement (tirets rouges sur la figure 18) sont identiques à celles obtenues 2 mois après la fin du stress (pointillés verts sur la figure 18). De plus, un stress à canal pincé avec une tension V_{GS} de -8 V montre les mêmes évolutions. A ce jour, c'est la première fois à notre connaissance qu'une augmentation du courant de drain est observée lors d'un stress à canal pincé sur des HEMTs AlGaIn/GaN. En effet, d'autres études présentent une diminution de courant de drain de 37% pour un HFET AlGaIn/GaN non passivé et 16% pour un HFET AlGaIn/GaN passivé après un stress réalisé à $V_{DS} = 20$ V et à $V_{GS} = -8$ V durant 12 h [163]. Les mêmes tendances ont été rapportées dans plusieurs publications [48] [86] [98] [99] [141].

Afin de quantifier l'augmentation du courant de drain induit par le stress, nous avons calculé ΔI_{DS} pour V_{GS} variant entre -1,2 et 1,2 V et pour des valeurs de V_{DS} de 3,5 V et 8 V, c'est-à-dire soit avant, soit après l'effet kink.

$$\Delta I_{DS} = \frac{I_{DS} (\text{Après stress}) - I_{DS} (\text{Avant stress})}{I_{DS} (\text{Avant stress})} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

La figure 19 montre que ΔI_{DS} diminue rapidement de 19 à 3% lorsque V_{GS} varie de -1,2 à 0,4 V, puis diminue lentement jusqu'à 0% lorsque V_{GS} augmente jusqu'à 1,2 V.

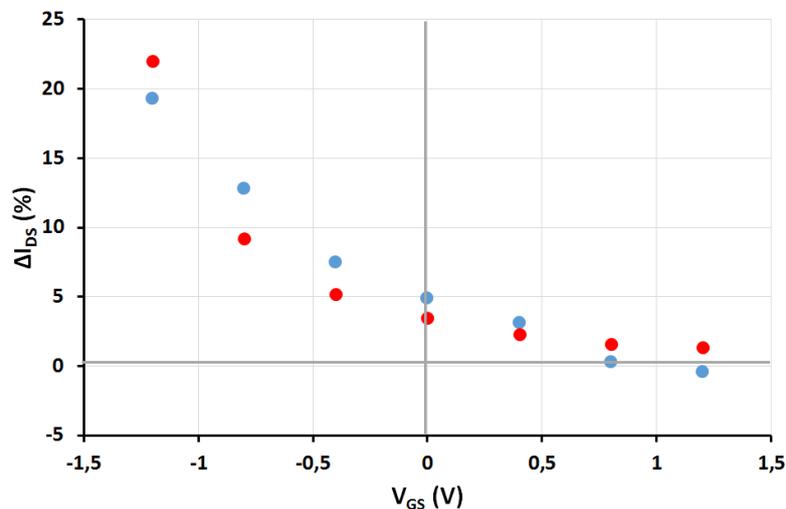


Figure 19 : Evolution de ΔI_{DS} en fonction de V_{GS} pour $V_{DS} = 3,5$ V (points bleus) et $V_{DS} = 8$ V (points rouges). V_{GS} varie entre -1,2 et 1,2 V par pas de 400 mV.

Cette tendance est la même que la valeur de V_{DS} soit égale à 3,5 ou 8 V. Nous observons que les valeurs ΔI_{DS} les plus importantes sont obtenues pour les $V_{GS} < 0$ V, c'est-à-dire lorsque

le canal est dépleté. Pour ces raisons, nous pensons que le stress à canal pincé engendre des modifications physiques des couches au niveau du canal, c'est-à-dire dans le buffer GaN.

La figure 20 montre que l'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors est quasiment identique avant et après 240 h de stress réalisé à canal pincé. Cela signifie que la densité de pièges électriques créée par le vieillissement est très faible.

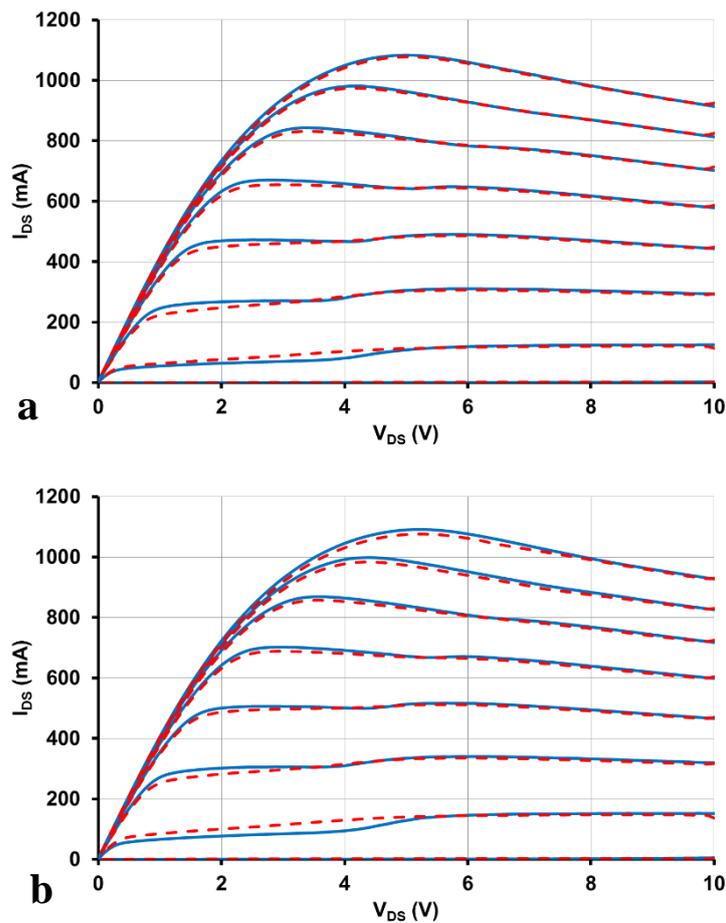


Figure 20 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (a) et après (b) un stress à canal pincé de 240 h mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV
C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de 1,2 à -2 V par pas de 400 mV

Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu durant le stress à canal pincé, nous avons étudié la fiabilité de la grille vis-à-vis de ce type de vieillissement. Ainsi, la figure 21 présente les caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ de la grille avant et après 240 h de stress. Nous pouvons donc observer que le courant de grille augmente en régime direct et diminue légèrement en

régime inverse après le stress. Dans le même temps, la hauteur de barrière diminue de 0,7 à 0,6 eV.

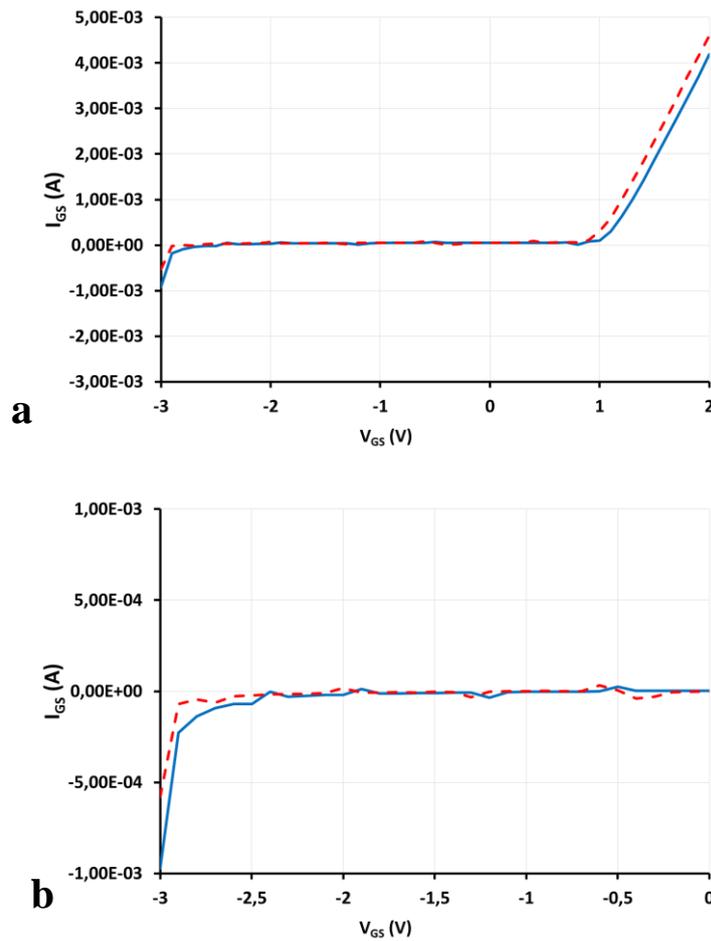


Figure 21 : a : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après (tirets rouges) 240 h de stress à canal pincé, b : zoom $I_{GS}(V_{GS})$ pour V_{GS} variant entre - 3 et 0 V

La figure 22, montre que la tension de pincement varie très légèrement de -1,4 à -1,5 V après le vieillissement alors que $g_{m \max}$ diminue légèrement de 571 à 531 mS. Nous pensons que cette faible chute de $g_{m \max}$ est liée à la légère dégradation de la grille qui implique une moins bonne modulation du canal. La faible dégradation du g_m à V_{GS} élevé montre que le test de vieillissement a peu d'influence sur les résistances d'accès.

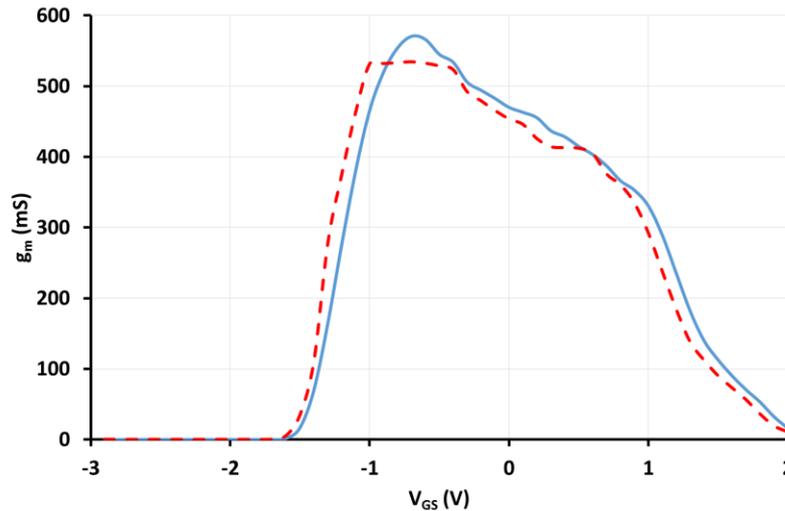


Figure 22 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après (courbe rouge) un stress à canal pincé de 240 h

La légère augmentation de I_{DS} observée après 240 h de stress, en particulier à faible V_{DS} , est assez surprenante car la majorité des publications répertoriées dans la littérature mettent en évidence une dégradation de I_{DS} [86] [141] [163]. Cependant, la dégradation du courant de grille observée est cohérente avec les résultats obtenus par Kim et al. [163]. En effet, ce phénomène a été expliqué par une dégradation du contact Schottky. Afin de comprendre les phénomènes physiques qui justifient l'augmentation du courant de drain des transistors AlGaN/GaN induite par un stress à canal pincé, nous avons analysé l'impact d'un stress NGB sur les caractéristiques électriques de ces composants.

D. Influence du stress NGB sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaN/GaN

Le stress NGB (Negative Gate Bias) ou stress de la grille, a été réalisé à $V_{DS} = 0$ V et $V_{GS} = -10$ V durant 240 heures sur 5 composants. Nous avons choisi de vieillir ces transistors à -10 V car les risques de dégradation des composants au-delà de cette valeur sont importants selon les données du fabricant.

La figure 23 présente les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un transistor AlGaN/GaN NPTB00004 avant et après 240 h de stress NGB.

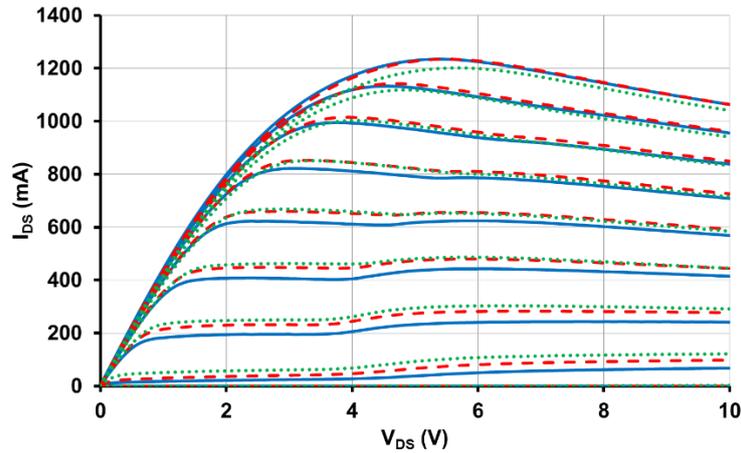


Figure 23 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant stress (courbe bleue), après 240 h de stress NGB (tirets rouges) et après 2 mois de repos (pointillés verts). V_{DS} varie de 0 à 10 V et V_{GS} varie de -2 à 1,2 V par pas de 0,4 V.

En effet, on constate que $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ restent constants à 1064 mA et $2,3\ \Omega$ après 240 h de stress NGB, respectivement. En revanche, une nette augmentation de I_{DS} est observée lorsque les courbes $I_{DS}(V_{DS})$ sont mesurées pour des valeurs de V_{GS} variant de -1,6 à 0,4 V. De plus, il semblerait que les effets du stress NGB soient quasi-irréversibles car peu d'évolution des caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors stressés n'a été constatée 2 mois après la fin du stress.

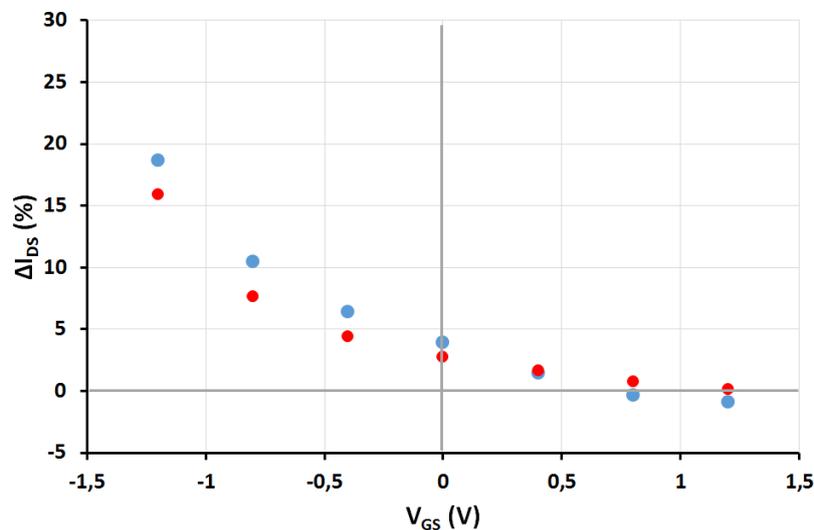


Figure 24 : Evolution de ΔI_{DS} en fonction de V_{GS} pour $V_{DS} = 3,5\ V$ (points bleus) et $V_{DS} = 8\ V$ (points rouges). V_{GS} varie entre -1,2 et 1,2 V par pas de 400 mV.

Afin de quantifier l'augmentation du courant de drain impliquée par le stress NGB, nous avons analysé l'évolution de ΔI_{DS} en fonction de V_{GS} pour des valeurs de V_{DS} de 3,5 et 8 V (i.e. avant et après l'effet kink anormal). Ainsi, la figure 24 montre que ΔI_{DS} décroît rapidement de

19 à 4% au fur et à mesure que V_{GS} augmente de $-1,2$ à 0 V puis diminue lentement jusqu'à une valeur proche de 0% lorsque V_{GS} varie de 0 à $1,2$ V. Cette tendance est observée, que ΔI_{DS} soit calculé à $V_{DS} = 3,5$ ou 8 V. Comme pour le stress à canal pincé, ces phénomènes sont expliqués par des modifications physiques engendrées par le stress NGB au niveau du buffer GaN. De plus, ΔI_{DS} est supérieur pour $V_{DS} = 3,5$ V que pour 8 V. Cela signifie que l'augmentation de courant induite par le stress NGB est plus importante avant l'effet kink anormal qu'après.

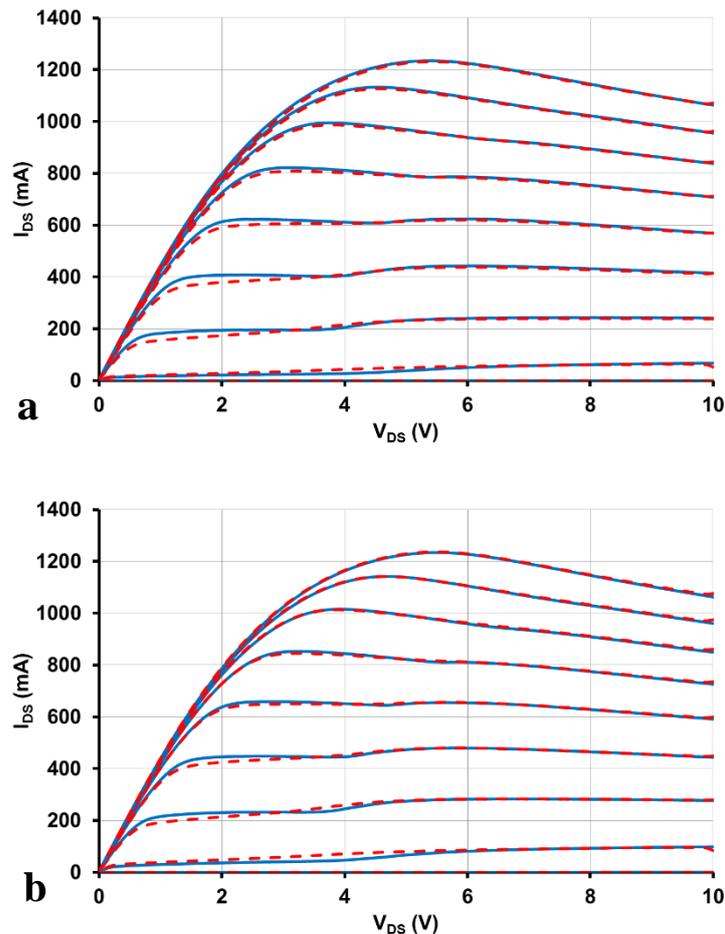


Figure 25 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 avant stress (a) et après un stress NGB de 240 h (b) mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu) et C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à -1,2 V par pas de 400 mV

Afin d'expliquer ces résultats, la figure 25 montre l'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors avant et après une durée de 240 h. La figure 25-a montre que les courbes I_{DS} (V_{DS}) sont confondues lorsque V_{DS} est supérieur à 4 V quelles que soient les valeurs de V_{GS} . Par contre, lorsque V_{DS} est inférieur à 4 V, le courant I_{DS}

est inférieur lorsque le composant est caractérisé dans la configuration 2 à celui obtenu dans la configuration 1 lorsque V_{GS} est négatif. Cet effet est moins marqué lorsque le transistor a été vieilli par un stress NGB durant 240 h.

La fiabilité de la grille vis-à-vis d'un stress NGB a également été étudiée. La figure 26 met en évidence une légère augmentation du courant de grille en régime direct alors qu'aucun changement n'est observé lorsque I_{GS} est mesuré en régime inverse. De plus, la hauteur de barrière varie de 0,65 à 0,58 eV après le stress.

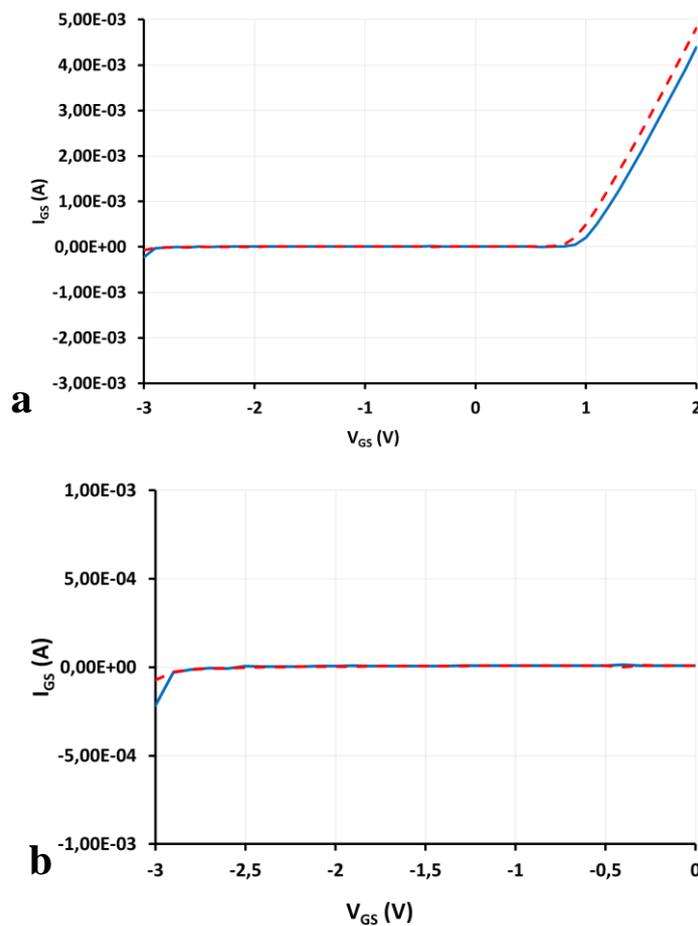


Figure 26 : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après (tirets rouges) 240 h de stress NGB

Dans le même temps, la figure 27 montre que le stress n'a aucune influence sur la transconductance.

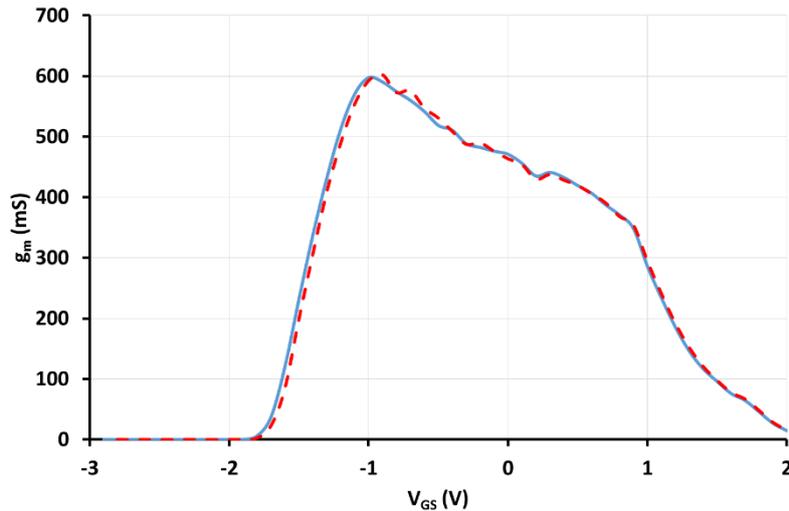


Figure 27 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après (tirets rouges) un stress NGB de 240 h

Nous avons donc étudié les effets du stress NGB sur les transistors HEMTs AlGaN/GaN du commerce. Nous avons observé une augmentation du courant de drain après le stress. De plus, il ne semble pas y avoir de créations de pièges sensibles au sens de polarisation. Enfin, nous avons constaté une légère dégradation de la grille.

E. Comparaison des effets des trois types de stress

Nous allons maintenant comparer les trois types de stress.

Paramètres	Stress à canal ouvert	Stress à canal pincé	Stress NGB
$I_{DS \max}$	- 44 %	+ 1 %	=
$R_{\text{accès}}$	+ 95 %	=	=
Φ_b	- 29 %	- 14 %	- 29 %
V_p	-	-	=
Evolution des effets de polarisation	+	=	=

Table 1 : Récapitulatif des évolutions des paramètres électriques en fonction du stress appliqué

Cette étude a mis en évidence qu'un stress à canal ouvert dégrade fortement les performances électriques des transistors NPTB00004. En effet, une diminution de $I_{DS \max}$ de 44% et une augmentation de $R_{\text{accès}}$ de 95% ont été observées après 240 h de stress. Cependant, une légère augmentation de $I_{DS \max}$ (1%) et de $R_{\text{accès}}$ a été observée après 240 h des stress à canal pincé et aucune évolution n'a été constatée après 240 h de stress NGB.

Ces résultats sont surprenants car de nombreuses études mettent en évidence que les dégradations observées pour $I_{DS\ max}$ et $R_{accès}$ sont plus importantes après un stress réalisé à canal pincé qu'après un stress effectué à canal ouvert [39] [86] [141]. Nous pensons que les différences entre le procédé technologique utilisé pour réaliser les transistors AlGaN/GaN Nitronex et celui utilisé pour la fabrication des composants utilisés dans les publications [39] [86] [141] peuvent expliquer ces résultats contradictoires. En effet, la structure des hétérostructures AlGaN/GaN, le taux d'Al, la nature du substrat, la nature des métallisations des contacts ohmiques et Schottky, la nature et la méthode de dépôt de la couche de passivation peuvent être complètement différents. De plus, il ne faut pas omettre que certaines technologies de composants utilisent des couches de passivation et des « field plate » et d'autres pas.

Nous pensons que les mécanismes de dégradation mis en jeu lorsque les transistors AlGaN/GaN Nitronex sont soumis à un stress à canal ouvert peuvent être liés aux effets d'électrons chauds. Effectivement, les stress à canal ouvert impliquent non seulement un auto-échauffement des composants important mais induit également une densité élevée d'électrons chauds dans le canal des transistors [164]. Ainsi, ces électrons chauds peuvent être piégés et/ou contribuer à la formation de pièges électriques dans la couche barrière AlGaN, dans le buffer GaN, à l'interface AlGaN/couche de passivation et/ou dans la couche de passivation [39] [99] [160] [165]. Il est important de rappeler que certaines structures de composants possèdent un cap layer en GaN qui se trouve entre la couche d'AlGaN et la couche de passivation, comme cela est le cas pour les transistors Nitronex. Dans ces conditions, les électrons chauds peuvent également être piégés ou contribuer à la formation de pièges électriques dans le caplayer GaN et/ou à l'interface caplayer GaN/couche de passivation. De plus les contacts ohmiques ne semblent pas être impactés par ce vieillissement puisque les caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) ne montrent que peu d'évolution alors que les contacts ohmiques sont sollicités lors de ces caractérisations.

Les transistors AlGaN/GaN se caractérisent par la présence de charges positives en surface lorsqu'ils ne sont pas passivés [58]. Ainsi, des électrons peuvent être piégés dans les états de surface dits « donneurs » et provoquer une réduction de la quantité de charges positives. Par conséquent, la formation d'une grille virtuelle, se plaçant en série avec la grille principale est favorisée. Le courant de drain est donc dépendant de la grille principale mais va également dépendre de la grille virtuelle.

La solution permettant d'éviter la formation de cette grille virtuelle consiste à passiver le composant. En général, la couche de passivation est une couche de SiN_x . Dans ces conditions, soit la couche de SiN_x réduit le piégeage des électrons provenant de la grille métallique par les sites donneurs ionisés [58], soit le dépôt de SiN_x est accompagné d'une incorporation de Si qui se comporte comme des sites donneurs présents à la surface de la couche caplayer GaN en quantité suffisamment importante pour augmenter la densité surfacique des charges positives [58].

Quand la qualité de la passivation est excellente, l'influence de la lumière sur les caractéristiques électriques du composant est faible en opposition aux composants non passivés parce que les états de surface jouant le rôle de « donneurs » sont recouverts par la couche de passivation [166].

Cependant, nous pensons que les électrons chauds peuvent acquérir une énergie suffisante pour être piégés à l'interface GaN/couche de passivation ou dans la couche de passivation elle-même. Dans ce cas, l'effet bénéfique de la couche de passivation est perdu. Par conséquent, la grille virtuelle peut à nouveau se former et ainsi provoquer une diminution du courant de drain. Dans ces conditions, les pièges seraient dans une zone comprise entre le drain et la grille. Cette dégradation de la couche de passivation est cohérente avec l'augmentation du courant de grille observée lorsque les composants sont stressés à canal ouvert durant 240 h. Ainsi, une conduction par « hopping » peut-être favorisée. Cette augmentation du courant de grille peut également être liée à un effet tunnel assisté par des pièges électriques induits par les tests de vieillissement.

Cependant, Syaranamual et al. [167] ont récemment montré que la dégradation des caractéristiques électriques des transistors AlGaIn/GaN induite par un stress à canal ouvert est plus importante que celle créée par les stress à canal pincé. Ils ont justifié cela par un mécanisme de dégradation basé sur une oxydation électrochimique de la couche d'AlGaIn. En effet, les électrons ayant une énergie élevée sont expulsés du canal vers la surface des composants et réduisent les molécules d'oxygène présentes en ions O^{2-} . Les électrons dans le canal possèdent ainsi une énergie suffisamment élevée pour favoriser un phénomène d'ionisation par impact et ainsi créer des trous nécessaires à l'oxydation électrochimique de la couche d'AlGaIn. Bien sûr, nous ne pouvons pas exclure la possibilité que le stress à canal pincé puisse impliquer la création de pièges accepteurs qui seraient ainsi responsables de la chute de courant.

Nous avons mis en évidence une légère augmentation de I_{DS} des composants après un stress à canal pincé. Dans ce cas, il n'y a aucun effet thermique lié au passage du courant électrique dans le composant et la densité d'électrons chauds est beaucoup plus faible que pour un stress à canal ouvert [164]. De plus, le champ électrique a une composante verticale qui a tendance à confiner les électrons chauds vers le buffer GaN et ainsi il est fortement probable que la couche de passivation et l'interface caplayer GaN/couche de passivation ne soient pas dégradées. Nous pensons que l'augmentation de I_{DS} peut être liée à une légère modification de la contrainte piézoélectrique qui pourrait impliquer une légère augmentation de courant. De plus, nous avons montré également que l'augmentation de I_{DS} est plus importante pour $V_{GS} < 0$. Nous pouvons penser que le stress à canal pincé implique une libération de porteurs provenant de pièges préexistants. Afin de confirmer cela, les composants ont également été vieillis par un stress NGB. Les mêmes tendances ont été observées qu'après un stress à canal pincé. Cependant, nous pouvons noter une légère différence. En effet, l'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) est légèrement plus faible après le stress. Cela confirme que le champ vertical pourrait favoriser la libération de porteurs provenant des pièges préexistants dans les composants.

Nous avons aussi mis en évidence que la dégradation de la grille est plus prononcée après un stress à canal ouvert, qu'après un stress à canal pincé et NGB. Pour ces raisons, nous pensons que la dégradation de la grille est liée à un mécanisme thermique [141] [157]. En effet, la température peut provoquer une diffusion des métaux constituant la grille, ainsi que la diffusion de l'or contenu dans la grille [157] [168].

Ces composants étant destinés aux applications spatiales et militaires, nous allons maintenant étudier l'impact d'irradiations par des neutrons thermalisés sur le comportement électrique des transistors AlGaIn/GaN Nitronex.

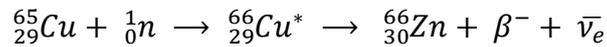
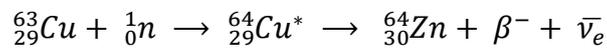
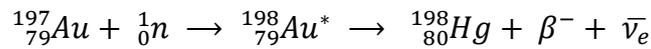
V. Influence d'irradiations neutroniques sur les caractéristiques électriques de transistors AlGaIn/GaN de la marque Nitronex®

A. Influence des irradiations sur des transistors non stressés

Durant sa thèse, Fanny Berthet a montré que l'impact des irradiations par des neutrons sur les caractéristiques électriques de HEMTs AlGaIn/GaN dépendait non seulement de la fluence et de l'énergie des neutrons mais aussi du procédé technologique utilisé lors de la réalisation des transistors et de la présence ou non de pièges électriques dans les

composants [75]. Cependant, ces résultats ont été obtenus avec des composants réalisés avec un procédé technologique non optimisé. Pour ces raisons, nous avons décidé d'effectuer les mêmes types d'études avec des transistors AlGaN/GaN du commerce afin de confirmer ou non les résultats obtenus durant la thèse Fanny Berthet [75]. Ainsi, nous allons analyser les effets d'irradiations par des neutrons thermalisés sur des transistors non stressés et stressés afin de déterminer leur fiabilité dans des milieux où règne une atmosphère radioactive. Une dizaine de composants non stressés ont été irradiés avec la source Américium-Béryllium, présentée dans le chapitre 2, durant 11 mois et ont donc reçu une fluence de $1,7 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻². Les composants stressés étudiés et dont les résultats sont présentés au début de ce chapitre 3 ont reçu une fluence de $2 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻². De même que dans le chapitre 2, nous parlerons d'« irradiation » pour « irradiation neutronique » et de « neutrons » pour « neutrons thermalisés » dans un souci de simplification.

Afin de déterminer les transmutations ayant lieu dans les transistors durant les irradiations, nous avons caractérisé les transistors irradiés avec une fluence de $8 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² par spectrométrie gamma durant 4000 s (figure 28). Nous observons donc les transmutations suivantes [137] :



Ces réactions mettent donc en évidence la présence de ¹⁹⁷Au, ⁶³Cu, ⁶⁵Cu et ¹⁰⁹Ag avant transmutation. En réalité, seule la transmutation de ¹⁹⁷Au, contenu dans la grille et les contacts ohmiques, en ¹⁹⁸Hg a lieu dans le transistor. En effet, le cuivre provient d'une plaquette se trouvant entre le transistor et le board de mesures. En ce qui concerne le ¹⁰⁹Ag, il s'agit de la pâte thermique utilisée pour coller le composant dans le packaging et qui permet d'assurer un contact thermique entre le transistor et le pad sous le composant. De plus, même si elles n'apparaissent pas sur ce spectre, nous pouvons supposer que d'autres transmutations (telles que ⁷¹Ga en ⁷²Ge) se produisent tout de même (cf. chapitre 2) mais qu'elles sont « noyées » dans le bruit du spectre car la masse de GaN dans l'échantillon est trop faible pour être détectée.

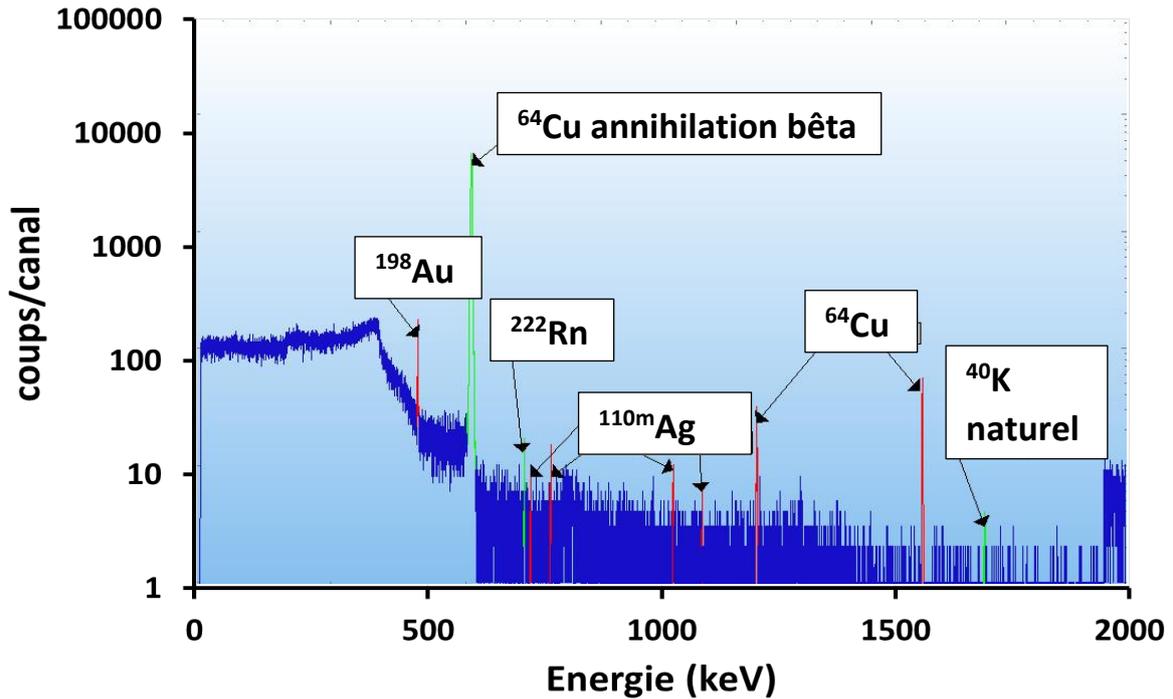


Figure 28 : Spectrométrie gamma d'un transistor NPTB00004 après une irradiation de 8.10^{11} neutrons.cm⁻². Le temps de comptage est de 4000 secondes.

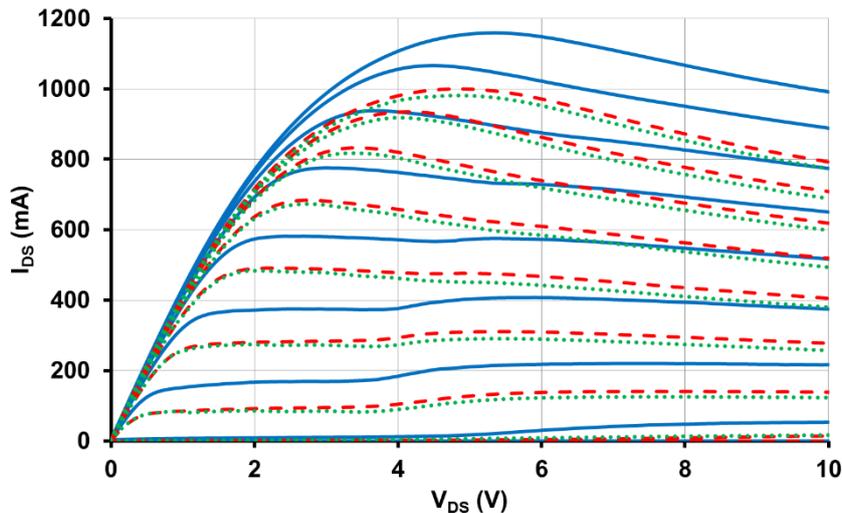


Figure 29 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant irradiation (courbe bleue), après irradiation de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² (tirets rouges) et 2 mois après l'irradiation (pointillés verts). V_{DS} varie de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} évolue de -2 à 1,2 V par pas de 0,4 V.

La figure 29 présente les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors AlGaIn/GaN avant et après une irradiation avec une fluence de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻². Nous constatons que les irradiations induisent une diminution du courant de drain. En effet, $I_{DS \text{ max}}$ diminue de 991 à 793 mA (-20%) tandis que $R_{\text{accès}}$ reste proche de 2,3 Ω . Nous pouvons donc en déduire que les irradiations ont provoqué la création de pièges accepteurs. De plus, ces effets sont quasiment

irréversibles car les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors irradiés sont quasiment identiques à celles obtenues 2 mois après la fin du stress.

Nous remarquons également que la conductance négative est plus forte après irradiation. Cette conductance négative résulte en général d'un effet thermique et/ou d'un effet de pièges. Dans notre cas, l'irradiation a impliqué une diminution du courant de drain et par conséquent, l'effet thermique engendré par le courant est moins important après l'irradiation. Nous pensons donc que ce phénomène est lié à la création de pièges accepteurs par les irradiations neutroniques. En effet, il est possible que les électrons du canal soient capturés au fur et à mesure que la valeur de V_{DS} augmente. Cet effet de conductance négative est surtout visible sur les courbes $I_{DS}(V_{DS})$ mesurées lorsque V_{GS} varie de -0,4 à 1,2 V. Dans ces conditions, nous supposons que ces pièges sont plutôt localisés dans le haut du composant puisque le phénomène de conductance négative n'est observé que lorsque le canal est fortement déplété ($V_{GS} < -0,4$ V). Cette dégradation du courant de drain peut être liée à une diminution de la mobilité des électrons du canal à cause de l'apparition de défauts dans le buffer GaN induits par les neutrons [80].

Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons étudié l'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des transistors avant et après irradiation. La figure 30 met en évidence que les différences entre les caractéristiques électriques mesurées dans la configuration 2 et celles obtenues dans la configuration 1 sont plus faibles après une dose d'irradiation de $1,7 \cdot 10^{12}$ neutrons/cm² (figure 30-b) qu'avant (figure 30-a). Nous pouvons donc en déduire que les irradiations ont « guéri » les pièges sensibles au sens de polarisation présents initialement dans le transistor. En effet, nous pensons que les pièges accepteurs induits par les irradiations ont créé des structures complexes en se combinant avec les pièges sensibles au sens de polarisation qui existaient initialement dans les composants.

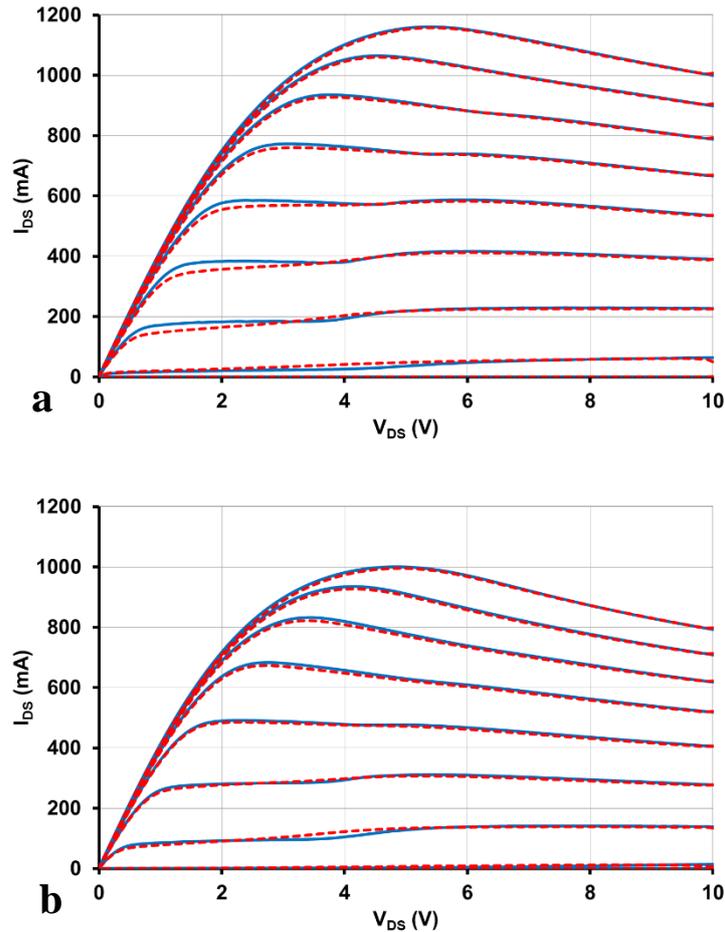


Figure 30 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (a) après irradiation de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² (b) mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu), C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à -1,2 V par pas de 400 mV

Afin d'analyser la stabilité de la grille vis-à-vis des irradiations, l'influence des irradiations sur la courbe $I_{GS}(V_{GS})$ est présentée sur la figure 31. Ainsi, une fluence de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² implique une augmentation du courant de grille en régime inverse (faible) et en régime direct, ce qui montre une dégradation du contact Schottky. Dans le même temps, la hauteur de barrière diminue de 0,7 de à 0,3 eV après l'irradiation. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature. En effet, Petrosky et al. [85] ont montré que les irradiations par des neutrons rapides dégradent le courant de grille car elles entraînent la formation de défauts dans la couche d'AlGaN et ainsi favorisent la conduction par effet tunnel assisté par les pièges électriques. Ling et al. [83] ont mis en évidence que des irradiations par des neutrons rapides impliquent la création de défauts près de l'interface métal/AlGaN qui favorisent la conduction par effet tunnel et ainsi provoquent une augmentation du courant de grille. Les mêmes conclusions ont été faites par McClory et al. [42].

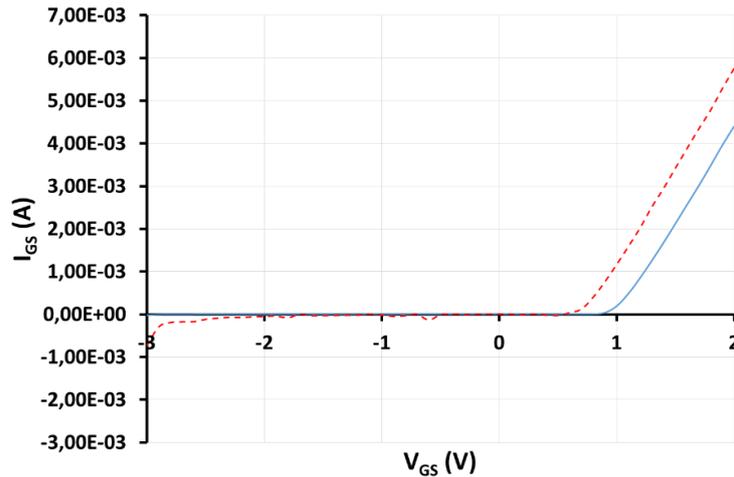


Figure 31 : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après (tirets rouges) irradiation de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻²

Pour ces raisons, nous pensons également que la dégradation des grilles des composants AlGaIn/GaN est liée à la création de défauts dans la couche AlGaIn par les neutrons.

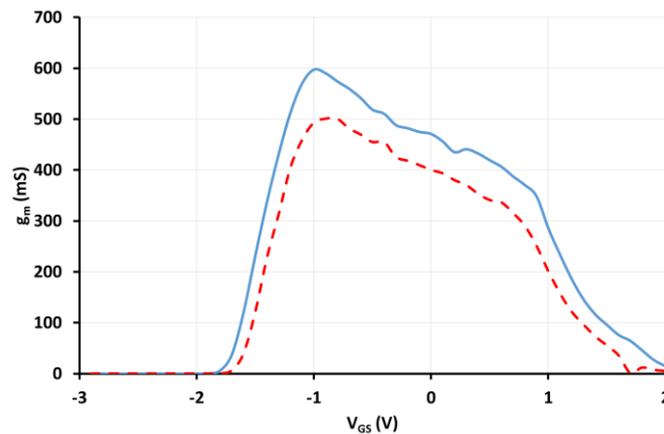


Figure 32 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 avant (courbe bleue) et après irradiation de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

Une dégradation du g_m est observée sur la figure 32 après une irradiation de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻². En effet, le $g_{m \max}$ diminue de 597 à 501 mS après l'irradiation. Dans le même temps, un décalage de la tension de pincement de -1,8 à -1,6 V est observé.

Nous pensons que la diminution du courant de drain et de la transconductance, l'augmentation de la résistance d'accès et le décalage positif de la tension de pincement peuvent être expliqués par la création de pièges accepteurs par les irradiations.

B. Influence des irradiations sur des transistors stressés à canal ouvert

Comme nous l'avons vu précédemment, le stress à canal ouvert a fortement dégradé les performances électriques des transistors AlGaN/GaN. Cet effet est lié à la création de pièges électriques par les tests de vieillissement. F. Berthet a montré qu'il était possible d'améliorer les performances électriques de transistors stressés en les irradiants par des neutrons thermalisés [135]. Pour ces raisons, nous avons décidé d'irradier les composants qui ont été vieillis par un stress à canal ouvert.

Ainsi, la figure 33 met en évidence une chute du courant de drain et une augmentation de la résistance d'accès après irradiation. En effet, $I_{DS\ max}$ diminue de 652 à 627 mA (-4%) et $R_{accès}$ augmente de 3,6 à 3,8 Ω (+6%).

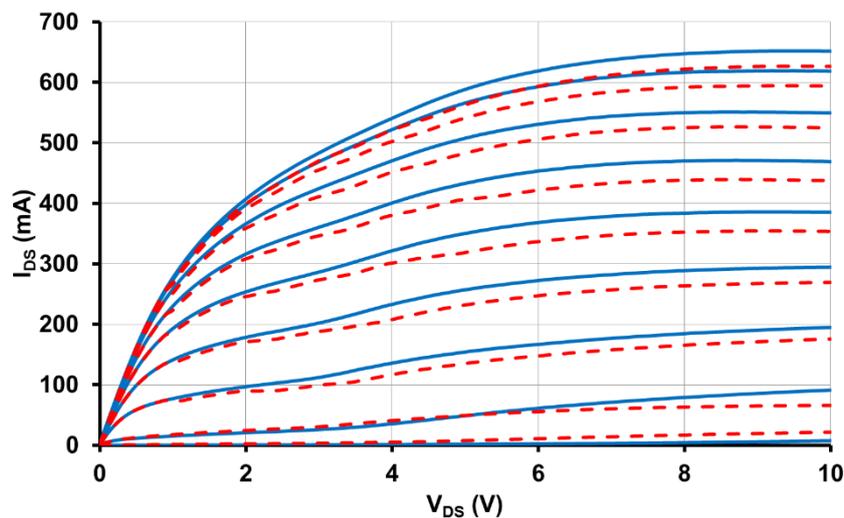


Figure 33 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 après un stress à canal ouvert et avant irradiation (courbes bleues) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

Dans le même temps, la figure 34 montre une augmentation du courant de grille en régime inverse et en régime direct. Cela est cohérent avec la diminution de la hauteur de barrière de 0,5 à 0,3 eV constatée après une dose d'irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻².

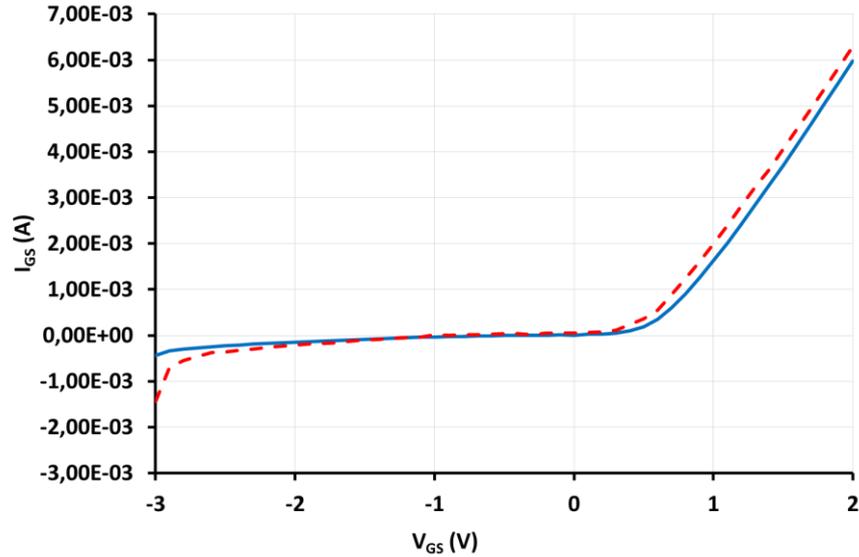


Figure 34 : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 après un stress à canal ouvert et avant irradiation (courbes bleues) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

La figure 35 montre l'impact d'une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² sur la transconductance d'un transistor AlGaIn/GaN. Nous constatons que $g_{m\max}$ décroît légèrement de 246 à 243 mS après 240 h de stress et que la tension de pincement reste constante à -2 V.

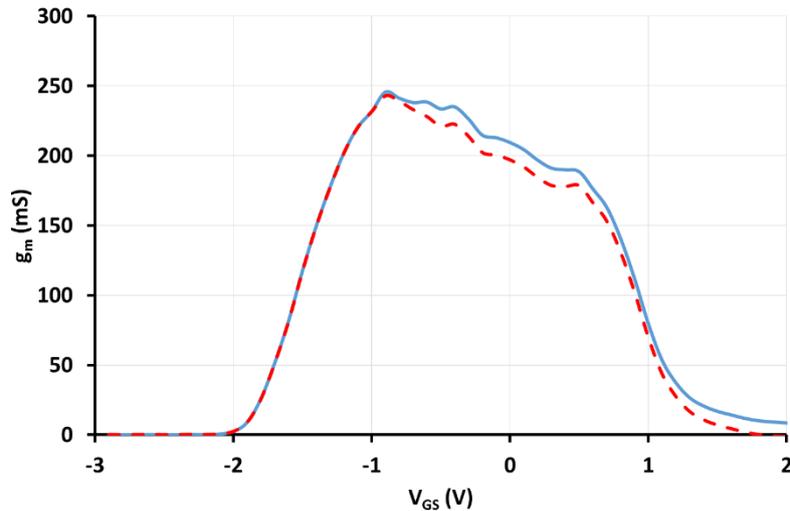


Figure 35 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 après un stress à canal ouvert et avant irradiation (courbe bleue) et après irradiation (tirets rouges)

L'influence du sens de polarisation sur les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ est la même que le composant soit irradié (figure 36-b) ou non (figure 36-a). Cela montre que l'irradiation ne crée quasiment pas de pièges sensibles au sens de polarisation.

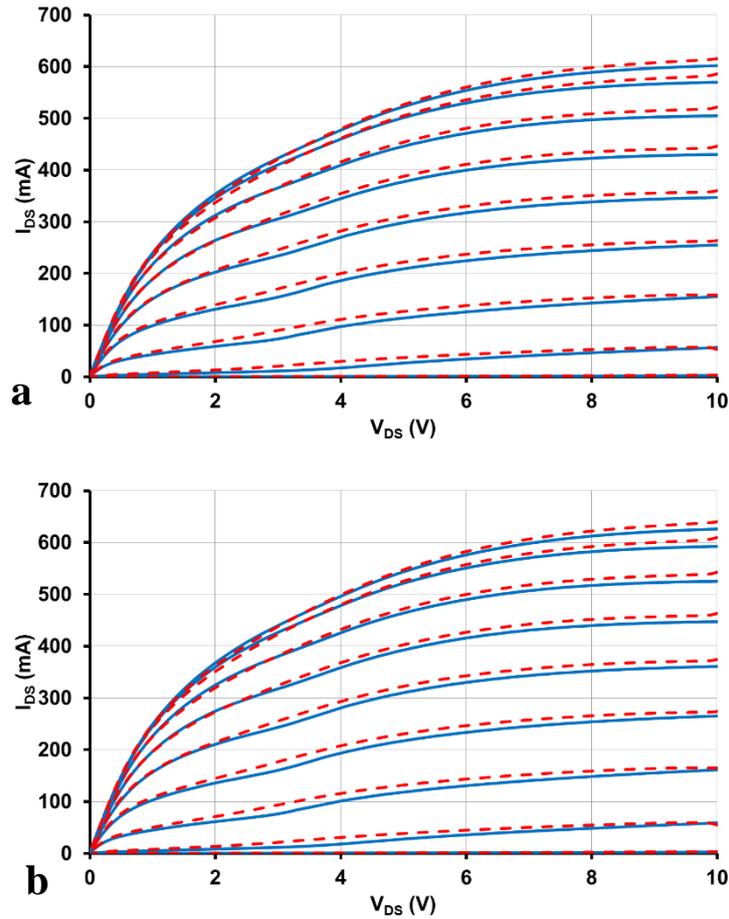


Figure 36 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 avant (a) et après irradiation de $2 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² (b), mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu) et C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV
 C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à -1,2 V par pas de 400 mV

Ces résultats montrent qu'une irradiation avec une fluence de $2 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² ne permet pas d'améliorer le courant de drain ni la résistance d'accès des transistors stressés à canal ouvert durant 240 h.

C. Influence des irradiations sur des transistors stressés à canal pincé

Précédemment, nous avons mis en évidence qu'un stress à canal pincé exercé sur un transistor AlGaIn/GaN durant 240 h induit une augmentation du courant de drain. Pour ces raisons, nous avons choisi de vérifier la stabilité de ces transistors stressés vis-à-vis des irradiations par les neutrons thermalisés.

La figure 37 présente les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) avant et après une fluence d'irradiation de $2 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻². Ainsi, on constate une baisse de $I_{DS \max}$ de 934 à 903 mA

(-3%) tandis que $R_{\text{accès}}$ reste constant à $2,6 \Omega$ après irradiation. Ainsi nous pouvons dire qu'il y a eu création de pièges accepteurs créés au sein du transistor. Ces résultats sont différents de ceux rapportés par F. Berthet et al. [75] [135]. En effet, elle avait montré qu'une fluence d'irradiation de 6.10^{11} neutrons.cm⁻² provoque une augmentation du courant de drain de 8% et une diminution de la résistance d'accès de 6%. Effectivement, le stress à canal pincé avait induit une dégradation des performances électriques des transistors AlGaN/GaN et les irradiations avaient provoqué la création de pièges accepteurs qui s'étaient combinés avec ceux induits par le stress électrique et par conséquent cela avait contribué à l'amélioration des caractéristiques électriques des transistors stressés. Dans notre cas, le stress à canal pincé n'a pas entraîné une dégradation du comportement électrique mais une amélioration, notamment au niveau du courant de drain. Dans ces conditions, les pièges accepteurs induits par les irradiations ne se combinent pas avec les pièges créés par les stress électriques. Par conséquent, une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² implique une dégradation du courant de drain et de la résistance d'accès des composants stressés.

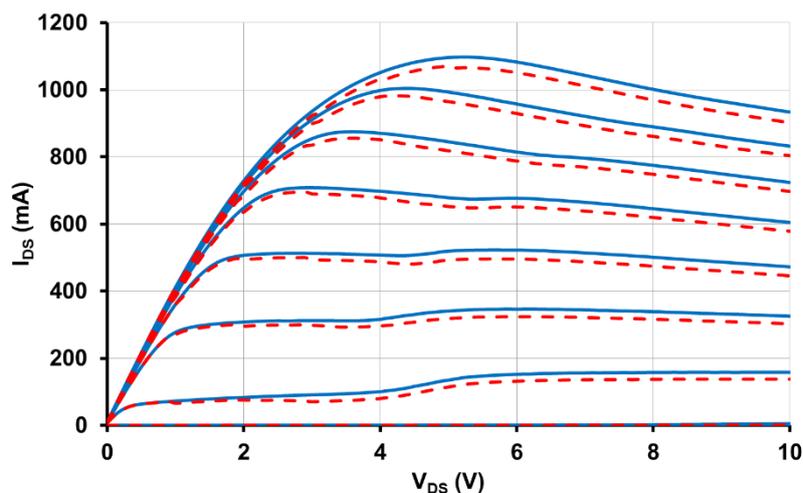


Figure 37 : Caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) d'un HEMT NPTB00004 après un stress à canal pincé et avant irradiation (courbes bleues) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

La figure 38 montre que la grille n'est pas dégradée par l'irradiation avec des neutrons thermalisés. La hauteur de barrière reste constante à 0,6 eV.

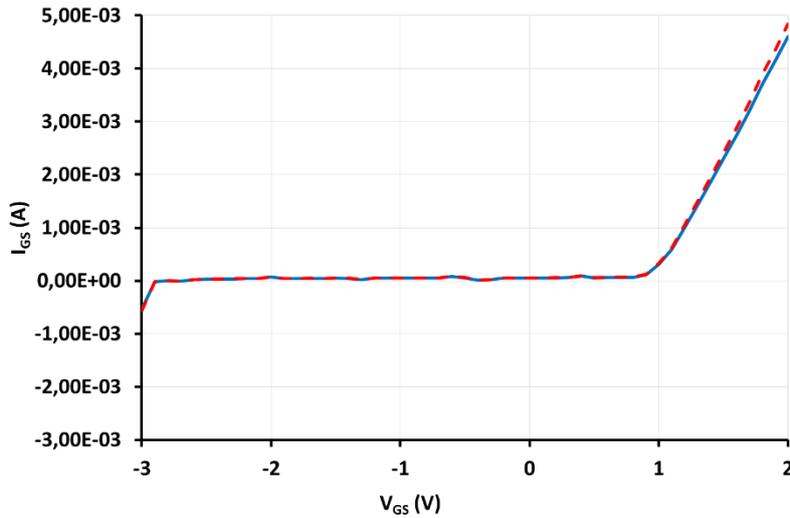


Figure 38 : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (courbes bleues) et après irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

Une légère dégradation du g_m est observée sur la figure 39 après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻². En effet, le $g_{m \max}$ diminue de 631 à 621 mS après l'irradiation. Dans le même temps, la tension de pincement reste constante à -1,6 V.

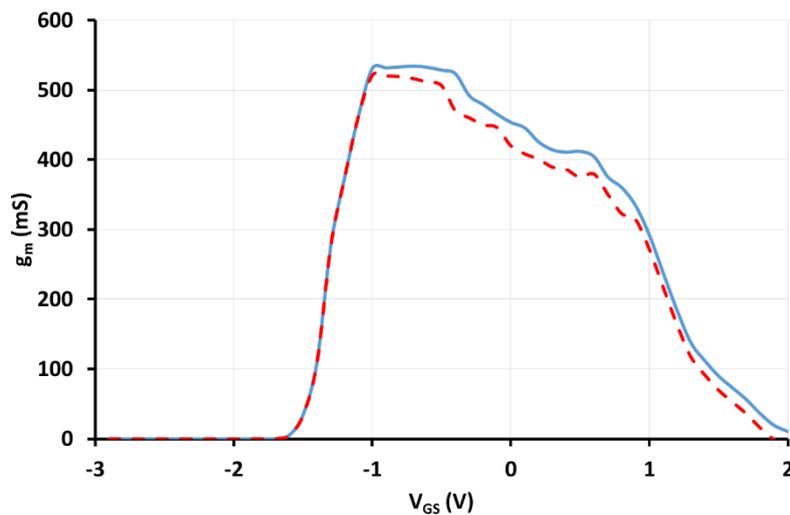


Figure 39 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 après un stress à canal pincé et avant irradiation (courbe bleue) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

Comme précédemment, les irradiations ne modifient pas les différences entre les caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ des composants stressés mesurés en configuration 2 et 1. Ainsi, nous pouvons conclure qu'aucun piège sensible au sens de polarisation n'est créé par les irradiations par des neutrons thermalisés (figure 40).

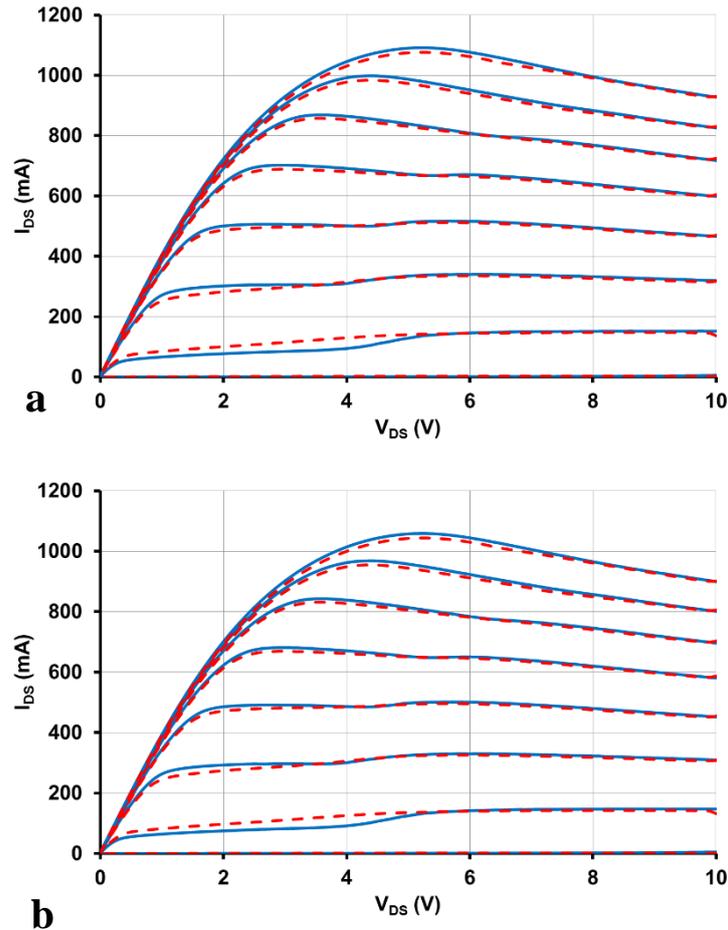


Figure 40 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 avant (a) et après irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (b), mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu) et C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV
 C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV

D. Influence des irradiations sur des transistors ayant subi un stress NGB

Après le stress NGB, nous avons constaté que le courant de drain avait augmenté lorsque les courbes $I_{DS}(V_{DS})$ étaient mesurées pour des V_{GS} variant entre -1,6 et 0,8 V. Afin de tester la fiabilité de ces composants stressés vis-à-vis des environnements radioactifs, nous avons étudié l'impact des irradiations par des neutrons thermalisés sur leurs caractéristiques électriques.

Après une fluence d'irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻², nous constatons que $I_{DS \max}$ diminue de 1041 à 1010 mA (-3%) et que $R_{\text{accès}}$ reste constant à 2,4 Ω (figure 41). Comme pour

les composants stressés à canal ouvert ou pincé, nous pouvons dire que les irradiations ont provoqué la création de pièges accepteurs.

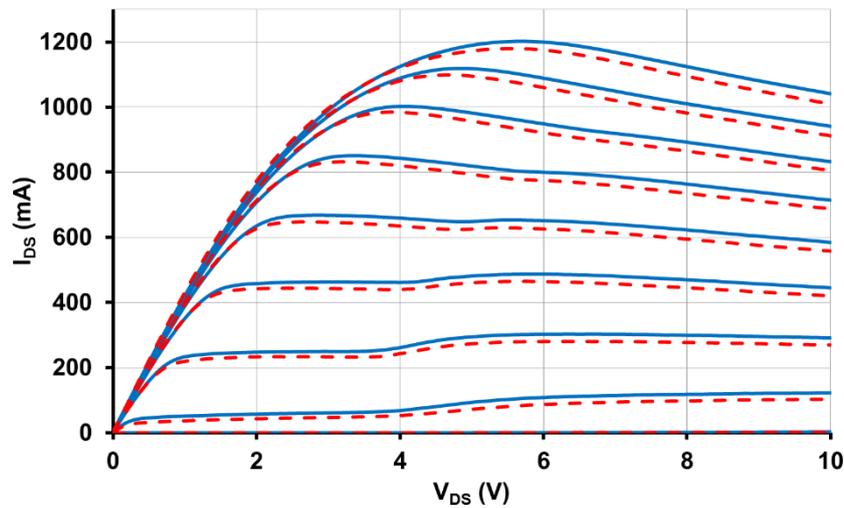


Figure 41 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 après un stress NGB et avant irradiation (courbes bleues) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

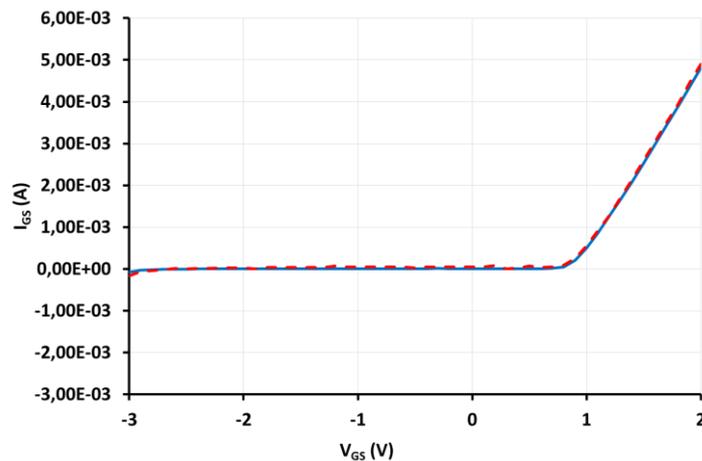


Figure 42 : Caractéristiques $I_{GS}(V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 après un stress NGB et avant irradiation (courbes bleues) et après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

Sur la figure 42, nous pouvons voir que les irradiations n'ont aucune influence sur le courant de grille en régime direct et en régime inverse caractérisant le contact Schottky des composants vieillis par 240 h de stress NGB. De plus, la hauteur de barrière reste constante à 0,5 eV après irradiation.

Une dégradation du g_m est observée sur la figure 43 après une irradiation de 2.10^{11} neutrons.cm⁻². Cependant, le $g_{m \max}$ et la tension de pincement restent constants à 605 mS

et -1,8 V respectivement. Néanmoins, une légère dégradation de la transconductance est observée lorsque $V_{GS} > -1$ V.

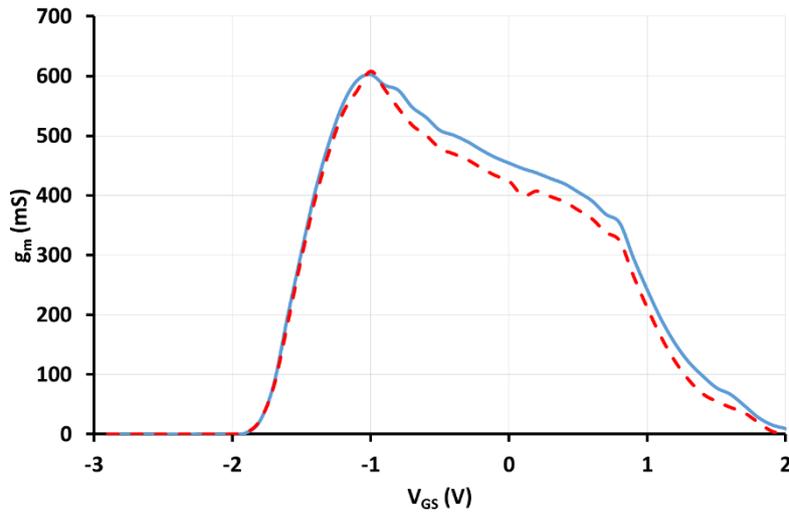


Figure 43 : Transconductance d'un HEMT NPTB00004 après un stress NGB et avant irradiation (courbe bleue) et après une irradiation de $2 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² (tirets rouges)

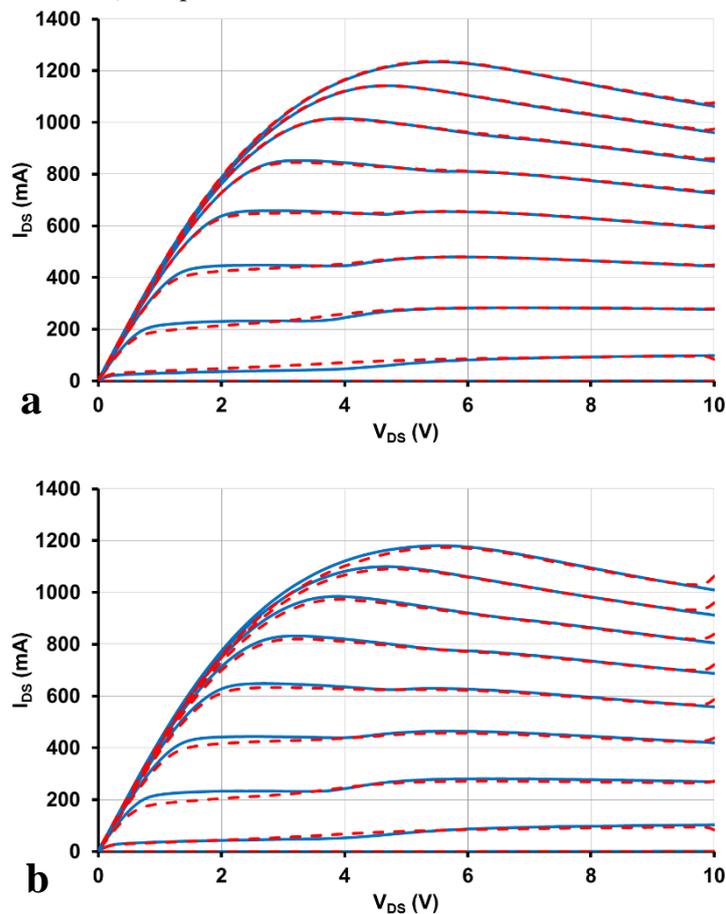


Figure 44 : Caractéristiques $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$ d'un HEMT NPTB00004 après un stress NGB et avant irradiation (a) et après une irradiation de $2 \cdot 10^{11}$ neutrons.cm⁻² (b), mesurées avec les conditions C1 (trait plein bleu) et C2 (tirets rouges)

C1 : V_{DS} de 0 à 10 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à 1,2 V par pas de 400 mV
 C2 : V_{DS} de 10 à 0 V par pas de 100 mV et V_{GS} de -2 à -1,2 V par pas de 400 mV

De la même façon que les composants stressés à canal pincé, les différences entre les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) mesurées dans la configuration 2 et celles obtenues dans la configuration 1 sont similaires avant (figure 44-a) et après irradiation (figure 44-b).

Ainsi, les irradiations ont provoqué une dégradation du courant de drain alors qu'aucune évolution de la résistance d'accès ou du courant de grille n'a été constatée.

E. Conclusion sur l'influence des irradiations neutroniques sur les transistors NPTB00004

En résumé, nous avons montré qu'une irradiation avec une fluence de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² provoque une diminution de $I_{DS\ max}$ (-20%) qui peut être liée à la création de pièges accepteurs dans les composants. D'ailleurs, ces pièges accepteurs sont responsables de la conductance négative observée sur les caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des composants irradiés. De plus, des défauts peuvent être induits dans le buffer GaN et ainsi entraîner une diminution de la mobilité des électrons du canal. Une augmentation du courant de grille et une diminution de la hauteur de barrière ont été constatées après l'irradiation, ce qui met en évidence une dégradation du contact Schottky. La création de défauts par les neutrons dans la couche d'AlGaN est à l'origine de cette détérioration du contact Schottky. Par contre, il est important de signaler que les irradiations ont induit une diminution de la sensibilité vis-à-vis du sens de polarisation des caractéristiques I_{DS} (V_{DS} , V_{GS}) des transistors AlGaN/GaN. Ce phénomène a été expliqué par une « guérison » des pièges existants initialement dans les composants. Ainsi, nous pensons que les pièges accepteurs induits par les irradiations se sont combinés avec les pièges préexistants sensibles au sens de polarisation afin de former un défaut complexe.

Cependant, les pièges créés par le stress électrique à canal ouvert ne sont pas « guéris » par les irradiations neutroniques. En effet, une dégradation de $I_{DS\ max}$ (-4%) et une augmentation de $R_{accès}$ (+6%) ont été évaluées après une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻². Dans le même temps, une hausse du courant de grille et une baisse de la hauteur de barrière ont été observées. Nous pensons que les mécanismes physiques provoqués par les irradiations des composants stressés à canal ouvert sont similaires à ceux impliqués lors de l'irradiation des transistors non stressés.

Néanmoins, les irradiations des composants vieillissés par un stress à canal pincé et NGB impliquent une dégradation de $I_{DS\ max}$ de (-3% dans les deux cas) alors qu'aucun changement de $R_{accès}$ n'est observé. De plus, le courant de grille et la hauteur de barrière sont restés identiques après une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻². De même, les contacts ohmiques ne

semblent pas être impactés par ces irradiations puisque les caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) ne montrent pas d'évolution alors que les contacts ohmiques sont sollicités durant la caractérisation électrique de la grille.

Tous les phénomènes impliqués par les irradiations neutroniques semblent irréversibles.

VI. Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons étudié les transistors NPTB00004 de la marque Nitronex®. Nous avons d'abord présenté le banc de caractérisation de ces transistors et montré les étapes de sa conception.

Nous avons ensuite observé les effets des stress à canal ouvert, canal pincé ou NGB (Negative Gate Bias).

Le stress à canal ouvert est celui qui implique les dégradations des caractéristiques électriques des composants les plus prononcées. Nous avons notamment observé une diminution de $I_{DS\ max}$ de l'ordre de 55% due à une augmentation de la densité de pièges au sein du transistor. Nous avons également observé une forte dégradation de la grille. Nous pensons que ces dégradations sont dues aux électrons chauds qui sont piégés ou induisent la création de pièges électriques dans la zone d'accès drain source. Ces pièges peuvent être localisés dans le buffer GaN, dans la couche barrière AlGa_N, dans le GaN cap layer, à l'interface caplayer GaN/couche de passivation et/ou dans la couche de passivation. Cependant, les pièges électriques semblent être majoritairement situés dans la couche de passivation et/ou dans une zone proche de celle-ci.

Pour les stress à canal pincé et NGB, nous avons observé une augmentation du courant de drain pour des tensions V_{GS} entre -1,2 et 1,2 V et entre -1,6 et 0,4 V respectivement, tandis que la résistance d'accès est restée constante. De plus, une légère dégradation de la grille a été observée. Nous avons déduit de ces résultats que les effets observés avaient pour origine une libération des porteurs de pièges préexistants sous l'action du champ électrique vertical.

Ensuite, nous avons étudié les effets des irradiations sur les transistors NPTB00004 pour une fluence de $1,7 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻². Une dégradation des transistors qui se traduit par une diminution du courant de drain de l'ordre de 20% a été observée. Néanmoins, nous avons montré que les transistors non stressés avaient moins de pièges sensibles au sens de polarisation après les irradiations ce qui peut être expliqué par la guérison de ces pièges par les neutrons thermalisés. La dégradation des transistors est due à la création de pièges accepteurs et de

Chapitre 3 : Influence de stress électriques et d'irradiations neutroniques sur des transistors du commerce de la filière GaN

défauts dans le buffer GaN et la couche d'AlGaN. Enfin, nous avons irradié les transistors ayant été préalablement stressés électriquement avec des neutrons thermalisés d'une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻². Nous avons observé que dans tous les cas les neutrons dégradent les transistors et par conséquent diminuaient le courant de drain. En revanche, il semble que les neutrons n'aient pas d'influence sur les pièges sensibles au sens de polarisation. De plus, le contact Schottky est dégradé pour les composants non stressés et stressés à canal ouvert mais pas pour ceux stressés à canal pincé et NGB.

Conclusions et perspectives

L'objectif de cette thèse était d'étudier l'influence de stress électriques et d'irradiations avec des neutrons thermalisés sur les performances électriques dc de transistors HEMTs de la filière GaN. Ces études sont d'autant plus justifiées que ces transistors sont destinés aux applications militaires et spatiales, nécessitant donc de résister à des conditions extrêmes de vieillissement et d'irradiation. C'est pourquoi dans cette thèse nous avons découplé ces deux effets en observant d'abord les effets de stress électriques puis les effets d'irradiations avec des neutrons thermalisés et enfin l'influence d'irradiations sur des transistors ayant été stressés électriquement.

Dans le chapitre 1, nous avons étudié l'évolution des paramètres électriques de HEMTs AlInN/GaN durant des stress électriques afin d'analyser la fiabilité de ces transistors. Nous avons donc effectué trois types de stress ayant chacun des effets différents :

- Un stress à canal ouvert qui engendre une forte température et un fort champ électrique au sein du transistor
- Un stress à canal pincé qui provoque un fort champ électrique dans le transistor
- Un stress NGB (Negative Gate Bias) qui crée un champ électrique vertical dans le transistor

Le stress à canal ouvert a provoqué les dégradations les plus importantes dans le transistor. En effet, nous avons observé une diminution du courant de drain de l'ordre de 60% et une augmentation de la résistance d'accès de l'ordre de 400%. La diminution de ces performances est due à des pièges accepteurs. Nous avons également mis en lumière l'apparition d'un deuxième canal visible au bout de 4 mois après la fin du stress. Ce canal parasite pourrait venir du piégeage des porteurs chauds dans la zone d'accès grille-drain et par le confinement des électrons arrachés au canal dans le buffer GaN. Il pourrait également provenir d'une injection de porteurs chauds dans la couche de passivation et/ou à l'interface AlInN/couche de passivation. Enfin, lors d'une étude d'électroluminescence, nous avons pu déterminer que les dégradations des paramètres électriques induites par le stress à canal ouvert pouvaient être expliquées par la création des pièges électriques dans les couches d'AlN, d'AlInN et/ou dans la couche de passivation et/ou par le piégeage d'électrons dans des pièges préexistants qui sont activés à 1,6 et 1,8 eV. Il est possible que d'autres pièges soient créés mais ceux-ci ne peuvent pas être détectés avec notre matériel.

De même, les stress à canal pincé et NGB ont provoqué une diminution du courant de drain de 14 et 12% et une augmentation de la résistance d'accès de 43 et 36%, respectivement.

Lors des stress à canal ouvert, canal pincé et NGB nous avons montré que la densité de pièges donneurs et/ou accepteurs augmentait et que ces pièges étaient situés dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN et/ou dans la couche d'AlInN et/ou à l'interface couche de passivation/AlInN pour le stress à canal ouvert, dans le buffer GaN et/ou à l'interface AlInN/GaN pour le stress à canal pincé et dans le buffer GaN pour le stress NGB. Pour tous les stress, la grille n'a pas été impactée puisque les paramètres de grille (coefficient d'idéalité, hauteur de barrière et tension de pincement) restent constants après les stress. De même, le fait que les caractéristiques I_{GS} (V_{GS}) n'évoluent pas nous indique que les contacts ohmiques ne subissent pas de dégradation au cours du stress.

Dans le chapitre 2, nous avons étudié les effets de neutrons thermalisés sur des HEMTs AlInN/GaN non stressés et stressés. Pour cela nous avons irradié nos composants jusqu'à une fluence de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻².

Pour les composants non stressés, les irradiations par des neutrons thermalisés ont provoqué la dégradation des transistors. Ainsi, nous avons observé une diminution du courant de drain maximal de 5% et une légère augmentation de la résistance d'accès de 8%. Ces dégradations sont dues à la création de pièges accepteurs induits par les irradiations. Nous avons aussi montré la création de pièges donneurs et/ou accepteurs remplis se déchargeant sous l'effet d'un champ électrique ou d'une illumination. Ces pièges sont situés dans toute la structure du transistor. De plus, nous n'avons pas observé de dégradation de la grille par les irradiations et rien ne semble indiquer que les contacts ohmiques ont été impactés.

Les composants stressés à canal ouvert et à canal pincé, ayant donc déjà subi des dégradations, voient leurs performances continuer à se dégrader sous l'effet des neutrons thermalisés. En effet, le courant de drain maximal diminue encore de 9% tandis que la résistance d'accès n'évolue pas pour le stress à canal ouvert. De même, le courant diminue de 5% et la résistance d'accès augmente de 16% pour les stress à canal pincé. Nous avons également montré la création de pièges accepteurs ainsi que de pièges donneurs induits par les irradiations. Enfin, dans les deux cas, la grille a été dégradée durant l'irradiation car le courant de grille a augmenté et les paramètres η et Φ_b se sont détériorés.

Les dégradations observées dans les HEMTs AlInN/GaN non stressés et stressés à canal ouvert et pincé lors des irradiations par des neutrons thermalisés sont probablement dues à la création de pièges par des captures radiatives, entraînant la transmutation des atomes ayant capté un neutron, notamment le Ga en Ge. Ils peuvent provenir également de diffusions

élastiques et/ou inélastiques de neutrons sur les noyaux constituant les transistors et provoquant ainsi la création de défauts. De par la forte pénétration des neutrons dans la matière, il est possible que ces pièges soient situés dans toutes les couches GaN, AlN, AlInN et SiN_x constituant les HEMTs AlInN/GaN ainsi qu'aux interfaces situées entre ces couches semiconductrices. De plus, les dégradations observées sur les grilles peuvent être dues à une conduction par effet tunnel assisté par des pièges électriques se situant dans la barrière AlInN.

En revanche, pour des transistors ayant subi un stress NGB, nous avons observé une augmentation du courant de drain maximal de 9% après irradiation. De plus, nous avons remarqué que la densité de pièges sensibles à la lumière et au sens de polarisation a diminué. Les irradiations ont donc « guéri » des pièges créés durant le stress NGB. Nous avons également constaté une dégradation de la grille après l'irradiation puisque le courant de grille et le coefficient d'idéalité augmentent et la hauteur de barrière diminue.

Enfin, nous avons irradié des MOS-HEMTs AlInN/GaN afin de comparer leur robustesse vis à vis d'irradiations avec celle des HEMTs AlInN/GaN. Ainsi, après une irradiation de $1,2 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻², nous avons observé une diminution du courant de drain maximal de 13% et une augmentation de la résistance d'accès de 30%. De même, le courant de grille augmente fortement sous l'influence des neutrons et la hauteur de barrière diminue, signe de la dégradation de la grille. Nous avons donc pu en déduire que les MOS-HEMTs sont plus sensibles aux irradiations que les HEMTs. Cela peut être dû au fait que des pièges électriques sont créés dans la couche d'oxyde, augmentant ainsi la densité de pièges par rapport à des HEMTs.

Dans le chapitre 3, nous avons étudié des transistors HEMTs AlGaIn/GaN NPTB00004 de la marque Nitronex. Le LUSAC ne possédant pas de banc de caractérisation pour ce type de composant, nous avons dû le concevoir. Ce banc permet de caractériser les transistors et d'automatiser les stress électriques qui leur sont appliqués.

Nous avons ensuite étudié les effets des stress électriques sur ces transistors. De même que pour les transistors HEMTs AlInN/GaN, nous avons appliqué les stress à canal ouvert, à canal pincé et NGB. Nous avons ainsi observé une diminution du courant de drain maximal de 44% et une augmentation de la résistance d'accès de 55% après un stress à canal ouvert. Nous avons également mis en lumière la création de pièges donneurs et/ou accepteurs remplis. De plus, la grille a subi une légère dégradation avec une augmentation du courant de grille et une diminution de la tension de pincement.

Conclusions et perspectives

Les effets des stress à canal pincé et NGB sont similaires. En effet, dans les deux cas, une augmentation du courant de drain est visible après 216 h de stress. Pour un stress à canal pincé, le courant de drain augmente de 1% à $V_{GS} = 1,2$ V et de 13% lorsque $V_{GS} = -0,8$ V tandis que pour un stress NGB, le courant augmente de 11% pour $V_{GS} = -0,8$ V. Cependant, les stress ne semblent pas avoir d'influence sur la densité de pièges sensibles au sens de polarisation. En revanche, dans les deux cas, nous avons observé une légère dégradation de la grille avec une augmentation du courant de grille et une diminution de la tension de pincement.

Nous avons ensuite irradié ces composants stressés ainsi que d'autres non stressés pour effectuer une comparaison. Tout d'abord, les transistors non stressés ont subi une irradiation de $1,7.10^{12}$ neutrons.cm⁻² avec des neutrons thermalisés. Nous avons constaté une diminution du courant de drain maximal de 20% et une augmentation de la résistance d'accès de 4%. L'examen des caractéristiques du sens de polarisation a montré une diminution de la densité de pièges. En revanche, la grille a subi une dégradation lors de l'irradiation.

Les transistors stressés ont été irradiés par une fluence de 2.10^{11} neutrons.cm⁻². Après un stress à canal ouvert, les HEMTs se dégradent. Nous avons ainsi observé une diminution du courant de drain de 4% due à la création de pièges, tandis que la résistance d'accès reste constante. La grille est impactée également puisque le courant de grille augmente en direct et en inverse. Cependant, il ne semble pas y avoir de création de pièges sensibles au sens de polarisation durant les irradiations.

De même, les composants stressés à canal pincé et NGB se dégradent durant les irradiations par des neutrons thermalisés. En effet, nous avons constaté une diminution $I_{DS\ max}$ de 3% sans augmentation de $R_{accès}$ dans les deux cas. Des pièges accepteurs créés dans le buffer GaN et la couche d'AlGaIn sont à l'origine de ces dégradations. En revanche les irradiations ne semblent pas avoir créé de pièges sensibles au sens de polarisation ni avoir impacté la grille.

Cette thèse a permis d'étudier les effets des stress électriques et des irradiations par des neutrons thermalisés sur des HEMTs AlInN/GaN fabriqués en laboratoire et AlGaIn/GaN du commerce. C'est la première fois à notre connaissance que ces types de composants sont irradiés avec des neutrons thermalisés.

Cette thèse ouvre également des perspectives pour de futures études. Ainsi, afin de continuer à améliorer nos connaissances sur les HEMTs de la filière GaN, il nous semble important d'effectuer des études complémentaires :

- étudier l'impact des irradiations par des photons γ , par des neutrons thermalisés et par des neutrons rapides sur les performances rf et dc des composants,
- étudier l'influence des stress électriques sous irradiation par des neutrons rapides et thermalisés, et des photons γ sur des HEMTs. Avant cela, il faut concevoir un montage pour polariser les transistors alors qu'ils sont à proximité des sources radioactives dans une armoire forte, celle-ci devant rester fermée dans un souci de radioprotection. De même, la polarisation des transistors peut entraîner un échauffement avec un risque potentiel d'incendie à proximité d'une source radioactive.
- effectuer des mesures de DLTS et/ou des mesures de bruit avant et après irradiation afin de caractériser les pièges induits par ces irradiations,
- étudier l'impact des irradiations par des photons γ , par des neutrons thermalisés et par des neutrons rapides sur les performances électriques des composants réalisés en utilisant différents procédés technologiques (différentes structures de couches semiconductrices, différents éléments utilisés lors de l'isolation des transistors par implantation, différentes natures et conditions de dépôt de la couche de passivation...),
- faire des études sur les matériaux, par exemple par microscopie électronique par transmission, afin d'essayer de confirmer les hypothèses émises durant cette thèse,
- effectuer des études d'électroluminescence, de DLTS et sur les effets de lumière afin d'identifier les pièges présents dans des transistors du commerce permettant une ouverture facile du packaging,
- réaliser des mesures de température de fonctionnement des transistors du commerce grâce à la spectrométrie Raman, et ce lors de stress ou au cours d'irradiation afin d'étudier l'influence de ces agressions sur l'auto échauffement des transistors,
- étudier l'influence de la température sur les effets des irradiations sur des transistors de la filière GaN de laboratoire et du commerce,
- effectuer des simulations afin de confirmer les hypothèses émises dans cette thèse concernant les effets des stress électriques et des irradiations.

Références

Références

- [1] H. Mathieu,
«Physique des semiconducteurs et des composants électroniques»,
Edition DUNOD, 6e édition, p. 755-790.
- [2] I. Adesida, C. Youtsey, A. T. Ping, F. Khan, L. T. Romano et Bulman G.,
«Dry and wet etching for group III-nitrides»,
MRS Internet Journal Nitride Semiconductor Research 4S1, G1.4, vol. 537, 1999.
- [3] L. F. Eastman, V. Tilak, J. Smart, B. M. Green, E. M. Chumbes, R. Dimitrov, H. Kim, O. S. Ambacher, N. Weimann, T. Prunty, M. Murphy, W. J. Schaff et J. R. Shealy,
«Undoped AlGaIn/GaN HEMTs for microwave power amplification»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, n° 3, p. 479-485, 2001.
- [4] Y. F. Wu, D. Kapolnek, J. P. Ibbetson, P. Parikh, B. P. Keller et U. K. Mishra,
«Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, n° 3, p. 586-590, 2001.
- [5] C. Xie et A. Pavio,
«Development of GaN HEMT based High Power High Efficiency Distributed Power Amplifier for Military Applications»,
IEEE Military Communications Conference, p. 1-4, 2007.
- [6] R. Juza et H. Hahn,
«Metallic amides and metallic nitrides V Crystal structures of Cu₃N, GaN and InN»,
Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie, vol. 239, p. 282-287, 1938.
- [7] J. I. Pankove, E. A. Miller et J. E. Berkeyheiser,
«GaN blue light-emitting diodes»,
Journal of Luminescence, vol. 5, n° 1, p. 84-86, 1972.
- [8] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu et I. Akasaki,
«P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam»,
Japanese Journal of Applied Physics, vol. 28, n° 12, p. L2112-L2114, 1989.
- [9] Z. Z. Bandić, E. C. Piquette, P. Bridger, R. A. Beach, T. F. Kuech et T. C. McGill,
«Nitride based high power devices: design and fabrication issues»,
Solid-State Electronics, vol. 42, n° 12, p. 2289 - 2294, 1998.
- [10] K. Makiyama, T. Ohki, M. Kanamura, K. Imanishi, N. Nara et T. Tikkaw,
«High-fmax GaN HEMT with high breakdown voltage over 100 V for millimeter-wave applications»,
Physica Status Solidi (a), vol. 204, n° 6, p. 2054 - 2058, 2007.
- [11] A. Minko, V. Hoel, E. Morvan, B. Grimbert, A. Soltani, E. Delos, D. Ducatteau, C. Gaquiere, D. Theron, J. C. De Jaeger, H. Lahreche, L. Wedzikowski, R. Langer et P. Bove,
«AlGaIn-GaN HEMTs on Si with power density performance of 1.9 W/mm at 10 GHz»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 25, n° 7, p. 453-455, 2004.

- [12] J. W. Chung, W. E. Hoke, E. M. Chumbes et T. Palacios,
«AlGaIn/GaN HEMT with 300-GHz f_{max} »,
IEEE Electron Device Letters, vol. 31, n° 3, p. 195-197, 2010.
- [13] L. F. Eastman, K. Chu, J. Smart et J. R. Shealy,
«GaN materials for high power microwave amplifiers»,
Material Research Society Symposium Proceedings, vol. 78, p. 3-7, 1998.
- [14] X. Ni, Y. Fu, Y. T. Moon, N. Biyikli et H. Morkoç,
«Optimization of View the MathML source (11 $\bar{2}$ 0) a-plane GaN growth by MOCVD on
View the MathML source (1 $\bar{1}$ 02) r-plane sapphire»,
Journal of Crystal Growth, vol. 290, n° 1, p. 166-170, 2006.
- [15] G. H. Jessen, R. C. Fitch, J. K. Gillepsie, G. D. Via, N. A. Moser, M. J. Yannuzzi, A. Crespo, J. D. Sewell, R. W. Dettmer, T. J. Jenkins, R. F. Davis, J. Yang, M. Asif Khan et S. C. Binari,
«High performance 0.14 μm gate-length AlGaIn/GaN power HEMTs on SiC»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 24, n° 11, p. 677-679, 2003.
- [16] J. W. Johnson, E. L. Piner, A. Vescan, R. Therrien, P. Rajagopal, J. C. Roberts, J. D. Brown, S. Singhal et K. J. Linthicum,
«12 W/mm AlGaIn-GaN HFETs on silicon substrates»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 25, n° 5, p. 459-461, 2004.
- [17] H. Morkoç, S. Strite, G. B. Gao, M. E. Lin, B. Sverdlov et M. Burns,
«Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device»,
Journal of Applied Physics, vol. 76, n° 3, p. 1363-1398, 1994.
- [18] J. Würfl, V. Abrosimova, J. Hilsenbeck, E. Nebauer, W. Rieger et G. Tränkle,
«Reliability considerations of III-nitride microelectronics devices»,
Microelectronics Reliability, vol. 39, n° 12, p. 1737-1757, 1999.
- [19] C. G. Van de Walle,
«Interactions of hydrogen with native defects in GaN»,
Physical Review B, vol. 56, n° 16, p. 56-59, 1997.
- [20] T. Suski, P. Perlin, M. Leszczyński, H. Teisseyre, I. Grzegory, J. Jun, M. Boćkowski, S. Porowski, K. Pakuła, A. Wyszomolek et J. M. Baranowski,
«Growth and properties of bulk single crystal of GaN»,
Material Research Society Symposium Proceedings, vol. 395, p. 15, 1995.
- [21] A. E. Wickenden, D. D. Koleske, R. L. Henry, M. E. Twigg et M. Fatemi,
«Resistivity control in unintentionally doped GaN films grown by MOCVD»,
Journal of Crystal Growth, vol. 260, n° 1-2, p. 54-62, 2004.
- [22] Y. Guhel,
«Réalisation de transistors à effet de champ à base de GaN pour l'amplification de puissance en gamme d'onde millimétriques et à haute température»,
Thèse de doctorat, Lille, 2002.

- [23] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh et N. Iwasa,
«Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films»,
Japanese Journal of Applied Physics, vol. 31, n° 2B, p. L139-142, 1992.
- [24] Z. H. Zaidi, K. B. Lee, I. Guiney, H. Qian, S. Jiang, D. J. Wallis, C. J. Humphreys et P. A. Houston,
«Enhancement mode operation in AlInN/GaN (MIS)HEMTs on Si substrates using a fluorine implant»,
Semiconductor Science and Technology, vol. 30, n° 10, p. 105007-1-105007-5, 2015.
- [25] J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck et U. K. Mishra,
«Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors»,
Applied Physics Letters, vol. 77, n° 2, p. 250-252, 2000.
- [26] J. Kuzmik,
«Power electronics on AlInN/(In)GaN: Prospect for a record performance»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 22, n° 11, p. 510-512, 2001.
- [27] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weiman, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger et J. Hilsenbeck,
«Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization»,
Journal of Applied Physics, vol. 85, n° 6, p. 3222-3233, 1999.
- [28] O. Lancry,
«Etude par microspectroscopie Raman de matériaux et de composants microélectroniques à base de semi-conducteurs III-V grand gap»,
Thèse de doctorat, Lille 1, 2009.
- [29] A. Ilgaz, S. Gödken, R. Tülek, A. Teke, S. Özçelik et E. Özbay,
«Temperature dependent hot electron transport in slightly lattice mismatched AlInN/AlN/GaN heterostructures»,
Journal of optoelectronics and advanced materials, vol. 16, n° 9-10, p. 1008-1014, 2014.
- [30] M. Tapajna, N. Killat, V. Palankovski, D. Gregusova, K. Cico, J. F. Carlin, N. Grandjean, M. Kuball et J. Kuzmik,
«Hot-Electron-Related Degradation in AlInN/GaN High-Electron-Mobility Transistors»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 61, n° 8, p. 2793-2801, 2014.
- [31] J. Kuzmik, G. Pozzovivo, C. Ostermaier, G. Strasser, D. Pogany, E. Gornik, J. F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin et N. Grandjean,
«Analysis of degradation mechanisms in lattice-matched AlInN/GaN high-electron-mobility transistors»,
Journal of Applied Physics, vol. 106, n° 12, p. 124503-1-124503-7, 2009.

- [32] N. Sarazin, E. Morvan, M. A. di Forte Poisson, M. Oualli, C. Gaquière, O. Jardel, O. Driss, M. Tordjman, M. Magis et S. L. Delage,
«AlInN/AlN/GaN HEMT Technology on SiC with 10 W/mm and 50% PAE at 10 GHz»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 31, n° 1, p. 11-13, 2010.
- [33] A. Soltani, A. BenMoussa, S. Touati, V. Hoël, J. C. De Jaeger, J. Laureyns, Y. Cordier, C. Marhic, M. A. Djouadi et C. Dua,
«Development and analysis of low resistance ohmic contact»,
Diamond and Related Materials, vol. 16, n° 2, p. 262-266, 2007.
- [34] Z. F. Fan, S. N. Mohammad, W. Kin, O. Aktas, A. E. Botchkarev et H. Morkoç,
«Very low resistance multilayer ohmic contacts to n-GaN»,
Applied Physics Letters, vol. 68, p. 819-824, 1996.
- [35] M. Werquin, N. Vellas, Y. Guhel, D. Ducatteau, B. Boudart, J. C. Pesant, Z. Bougrioua, M. Germain, J. C. De Jaeger et C. Gaquière,
«First results of AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire substrate using an argon-ion implant»,
Microwave and Optical Technology Letters, vol. 46, n° 3, p. 311-315, 2005.
- [36] N. Defrance, V. Hoel, Y. Douvry, J. C. De Jaeger, C. Gaquière, X. Tang, M. Rousseau, M. A. di Forte-Poisson, J. Thorpe, H. Lahreche et R. Langer,
«AlGaIn/GaN HEMT high power densities on SiC/SiO₂/poly-SiC substrates»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 30, n° 6, p. 596-598, 2009.
- [37] A. Chini, R. Coffie, G. Meneghesso, E. Zanoni, D. Buttari, S. Heikman, S. Keller et U. K. Mishra,
«2.1 A/mm current density AlGaIn/GaN HEMT»,
IEEE Electronics Letters, vol. 39, n° 7, p. 625-626, 2003.
- [38] N. Malbert, N. Labat, A. Curutchet, C. Sury, V. Hoel, J. C. de Jaeger, N. Defrance, Y. Douvry, C. Dua, M. Oualli, C. Bru-Chevallier, J. M. Bluet et W. Chikhaoui,
«Characterization and modeling of parasitic effects and failure mechanisms in AlGaIn/GaN HEMTs»,
Microelectronics Reliability, vol. 49, n° 9-11, p. 1216-1221, 2009.
- [39] H. Kim, A. Vertiatchikh, R. M. Thompson, V. Tilak, T. R. Prunty, J. R. Shealy et L. F. Eastman,
«Hot electron induced degradation of undoped AlGaIn/GaN HFETs»,
Microelectronics Reliability, vol. 43, n° 6, p. 823-827, 2003.
- [40] H. Pardeshi, S. K. Pati, G. Raj, N. Mohankumar et C. K. Sarkar,
«Effect of underlap and gate length on device performance of an AlInN/GaN underlap MOSFET»,
Journal of Semiconductors, vol. 33, n° 1, p. 124001-1-124001-7, 2012.

- [41] G. Pozzovivo, J. Kuzmik, S. Golka, W. Schrenk, G. Strasser, D. Pogany, K. Cicio, M. Tapajna, K. Fröhlich, J. F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin et N. Grandjean, «Gate insulation and drain current saturation mechanism in InAlN/GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistor», *Applied Physics Letters*, vol. 91, n° 4, p. 043509-1-043509-3, 2007.
- [42] H. Okita, K. Kaifu, J. Mita, T. Yamada, Y. Sano, H. Ishikawa, T. Egawa et T. Jimbo, «High transconductance AlGaIn/GaN-HEMT with recessed gate on sapphire substrate», *Physica Status Solidi (a)*, vol. 200, n° 1, p. 187-190, 2003.
- [43] F. Lecourt, N. Ketteniss, H. Behmungburg, N. Defrance, V. Hoel, M. Eickelkamp, A. Vescan, C. Giesen, M. Heuken et J. C. De Jaeger, «InAlN/GaN HEMTs on Sapphire Substrate With 2.9-W/mm Output Power Density at 18 GHz», *IEEE Electron Device Letters*, vol. 32, n° 11, p. 1537-1539, 2011.
- [44] Q. Chen, J. W. Yang, M. A. Kahn, A. T. Ping et I. Adesida, «High transconductance AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor on SiC», *IEEE Electronics Letters*, vol. 33, n° 16, p. 1413-1414, 1997.
- [45] X. L. Wang, T. S. Chen, H. L. Xiao, C. M. Wang, G. X. Hu, W. J. Luo, J. Tang, L. C. Guo et J. M. Li, «High-performance 2 mm gate width GaN HEMTs on 6H-SiC with output power of 22.4 W @ 8 GHz», *Solid-State Electronics*, vol. 52, n° 6, p. 926-929, 2008.
- [46] N. Miura, T. Nanjo, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, T. Ozeki, H. Ishikawa, T. Egawa et T. Jimbo, «Thermal annealing effects on Ni/Au based Schottky contacts on n-GaN and AlGaIn/GaN with insertion of high work function metal», *Solid-State Electronics*, vol. 48, n° 5, p. 689-695, 2004.
- [47] H. Sun, A. R. Alt, H. Benedickter, C. R. Bolognesi, E. Feltin, J.-F. Carlin, M. Gonschorek et N. Grandjean, «Ultrahigh-Speed AlInN/GaN High Electron Mobility Transistors Grown on (111) High-Resistivity Silicon with FT = 143 GHz», *Applied Physics Express*, vol. 3, n° 9, p. 094101-1-094101-5, 2010.
- [48] H. Kim et L. F. Eastman, «High-electric-field Induced Trap Generation in AlGaIn/GaN Heterostructure Field-effect Transistors», *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 55, n° 2, p. 666-670, 2009.
- [49] F. Medjdoub, D. Ducatteau, C. Gaquiere, J. F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, M. A. Py, N. Grandjean et E. Kohn, «Evaluation of AlInN/GaN HEMTs on sapphire substrate in microwave, time and temperature domains», *Electronics Letters*, vol. 43, n° 5, p. 71-72, 2007.

- [50] S. Bouzid, V. Hoel, N. Defrance, H. Maher, F. Lecourt, M. Renvoise, D. Smith et J. C. De Jaeger,
«AlGa_N/Ga_N HEMTs on Si (111) substrate for millimeter microwave power»,
8th International Conference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems,
p. 111-114, 25-27 octobre 2010.
- [51] Y. Yue, Z. Hu, J. Guo, B. Sensale-Rodriguez, G. Li, R. Wang, F. Faria, T. Fang, B. Song, X. Gao, S. Guo, T. Kosel, G. Snider, P. Fay, D. Jena et H. Xing,
«InAlN/AlN/GaN HEMTs With Regrown Ohmic Contacts and fT of 370 GHz»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 33, n° 7, p. 988-990, 2012.
- [52] S. Bouzid-Driad, H. Maher, N. Defrance, V. Hoel, J. C. De Jaeger, M. Renvoise et P. Frijlink,
«AlGa_N/Ga_N HEMTs on Silicon Substrate With 206-GHz F_{MAX}»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 34, n° 1, p. 36-38, 2013.
- [53] C. R. Bolognesi, H. Sun, S. Tirelli, A. R. Alt, H. Benedickter, J. F. Carlin, E. Feltin, M. Gonschorek, M. Py et N. Grandjean,
«High-Speed AlInN/GaN HEMTs on SiC and (111) HR-Si»,
CS MANTECH Conference, Palm Springs, California, USA, 16-19 mai 2011.
- [54] A. Chini, D. Buttari, R. Coffie, S. Heikman, S. Keller et U. K. Mishra,
«12 W/mm power density AlGa_N/Ga_N HEMTs on sapphire substrate»,
IEEE Electronics Letters, vol. 40, n° 1, p. 73-74, 2004.
- [55] H. Sun, A. R. Alt, H. Benedickter, C. R. Bolognesi, E. Feltin, J. F. Carlin, M. Gonschorek, N. Grandjean, T. Maier et R. Quay,
«102-GHz AlInN/GaN HEMTs on Silicon With 2.5-W/mm Output Power at 10 GHz»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 30, n° 8, p. 796 - 798, 2009.
- [56] N. Ismael,
«Etude des limites de fonctionnement des transistors hyperfréquences»,
Thèse de doctorat, Bordeaux I, 2006.
- [57] N. Vellas, C. Gaquiere, Y. Guhel, B. Boudart, E. Delos, M. A. Poisson et J. C. De Jaeger,
«Détermination de caractéristiques I(V) en régime dynamique grand signal de transistors HEMTs AlGa_N/Ga_N»,
12èmes Journées Nationales Microondes, Poitiers, 16-17-18 mai 2001.
- [58] R. Vetry, N. Q. Zhang, S. Keller et U. K. Mishra,
«The Impact of Surface States on the DC and RF Characteristics of AlGa_N/Ga_N HFETs»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, n° 3, p. 560-566, 2001.
- [59] G. Meneghesso, A. Chini, E. Zanoni, M. Manfredi, M. Pavesi, B. Boudart et C. Gaquiere,
«Diagnosis of trapping phenomena in GaN MESFETs»,
International Electron Devices Meeting, San Francisco, 10-13 décembre 2000.

- [60] J. Lim, Y. H. Choi, K. H. Cho, J. L. Jo et W. M. K. Han,
«1.4 kV AlGa_N/Ga_N HEMTs employing As⁺ ion implantation on SiO₂ passivation»,
Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 15-19 juin 2008.
- [61] C. F. Lo, T. S. Kang, L. Liu, F. Ren, S. J. Pearton, J. Kim, S. Jang, O. Laboutin, Y. Cao
et J. W. Johnson,
«Effects of silicon nitride passivation on isolation-blocking voltage in AlGa_N/Ga_N
high»,
*Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer
Structures*, vol. 29, n° 3, p. 031211 – 031211-5, 2011.
- [62] D. Ducatteau, M. Werquin, C. Gaquière, D. Théron, T. Martin, E. Delos, B. Grimbart,
E. Morvan, N. Caillas, V. Hoël, J. C. De Jaeger et S. Delage,
«Influence of passivation on high-power AlGa_N/Ga_N HEMT devices at 10 GHz»,
12th GAAS® Symposium, Amsterdam, 2004.
- [63] Y. Guhel, B. Boudart, N. Vellas, C. Gaquière, E. Delos, D. Ducatteau, Z. Bougrioua et
M. Germain,
«Impact of plasma pre-treatment before Si_Nx passivation on AlGa_N/Ga_N HFETs»,
Solid-State Electronics, vol. 49, n° 10, p. 1589-1594, 2005.
- [64] A. Charbonniaud,
«Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de
champ Ga_N pour l'amplification de puissance micro-onde»,
Thèse de doctorat, Limoges, 2005.
- [65] D. Binder, E. C. Smith et A. B. Holman,
«Satellite anomalies from galactic cosmic rays»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 22, n° 6, p. 2675-2680, 1975.
- [66] T. C. May et M. H. Wood,
«A new mechanism for soft errors in dynamic memories»,
IEEE Reliability Physics Symposium (IRPS), 1978.
- [67] D. Munteanu et J. L. Autran,
«Modeling and simulation of single-event effects in digital devices and ICs»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 33, n° 1, p. 1831-1878, 2008.
- [68] D. V. Reames,
«Particle acceleration at the sun and in the heliosphere»,
Space Science Reviews, vol. 90, n° 3 et 4, p. 413-491, 1996.
- [69] S. S. Holt, R. B. Mendell et S. A. Korff,
«Fast neutron latitude variations in the atmosphere at solar minimum»,
Journal of Geophysics Research, vol. 71, n° 21, p. 5109-5116, 1966.
- [70] J. D. Dirk, M. E. Nelson, J. F. Ziegler, A. Thompson et T. H. Zabel,
«Terrestrial thermal neutrons»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 36, n° 6, p. 2275-2280, 2003.

- [71] E. Normand,
«Single-events effects in avionics»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, n° 2, p. 461-474, 1996.
- [72] E. Normand et A. H. Taber,
«Single-events upset in avionics»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 40, n° 2, p. 120-126, 1993.
- [73] M. C. Calvet, O. Feuillatre et R. Gaillard,
«Défauts sur les équipements électroniques à bord des avions, dus aux neutrons de la haute atmosphère (10 à 20 km)»,
Onde Electronique, vol. 75, n° 3, p. 31-37, 1995.
- [74] «<http://www2.cnrs.fr/journal/3866.htm>».
- [75] F. Berthet,
«Effet de rayonnements ionisants de faible dose et de stress électriques sur les performances électriques dc de HEMTs AlGaN/GaN»,
Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, 2011.
- [76] J. W. Johnson, F. Ren, K. K. Allums, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, A. M. Dabiran, A. M. Wowchack, C. J. Polley, P. P. Chow, D. Schoenfeld et A. G. Baca,
«Influence of ^{60}Co gamma-rays on dc performance of AlGaN/GaN high electron mobility transistors»,
Applied Physics Letters, vol. 80, n° 4, p. 604-606, 2002.
- [77] G. Wenping, C. Chi, D. Huantao, H. Yue, Z. Jincheng, W. Chong, F. Qian et M. Xiaohua,
« ^{60}Co γ -rays irradiation effect in DC performances of AlGaN/GaN high electron mobility transistors»,
Journal of Semiconductors, vol. 30, n° 4, p. 044002-1-044002-5, 2009.
- [78] O. Aktasa, A. K. V. Kulieva, R. Schwindt, S. Toshkov, D. Costescu, J. Stubbins et I. Adesida,
« ^{60}Co gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I–V characteristics of AlGaN/GaN HEMTs»,
Solid-State Electronics, vol. 48, n° 3, p. 471-475, 2004.
- [79] K. Kuriyama, T. Tokumasu, H. Sano et M. Okada,
«Ion channeling and Raman scattering studies of the lattice disorder and residual strain»,
Solid State Communications, vol. 131, n° 1, p. 31-35, 2004.
- [80] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, A. V. Markov, S. J. Pearton, N. G. Kolin, D. I. Merkurisov, V. M. Boiko, M. Skowronski et I. H. Lee,
«Neutron irradiation effects in AlGaN/GaN heterojunctions»,
Physica B : Condensed Matter, vol. 376-377, p. 523-526, 2006.

- [81] J. W. McClory et J. C. Petrosky,
«Temperature Dependent Electrical Characteristics of Neutron Irradiated AlGaIn/GaN HFETs»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 54, n° 6, p. 1969-1974, 2007.
- [82] B. J. Kim, H. Y. Kim, J. Kim et S. Jang,
«Neutron irradiation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on SiC substrates»,
Journal of Crystal Growth, vol. 326, n° 1, p. 205–207, 2011.
- [83] L. Ling, Z. Jin-Cheng, X. Jun-Shuai, M. Xiao-Hua, Z. Wei, B. Zhi-Wei, Z. Yue et H. Yue,
«Neutron irradiation effects on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors»,
Chinese Physics B, vol. 21, n° 3, p. 037104-1-037104-5, 2012.
- [84] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, E. A. Kozhukhova, S. J. Pearton, F. Ren, L. Liu, J. Johnson, J. W. Johnson, W. Lim, N. G. Kolin, S. S. Veryovkin et V. S. Ermakov,
«Comparison of neutron irradiation effects in AlGaIn/AlN/GaN, AlGaIn/GaN, and InAlN/GaN heterojunctions»,
Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 30, n° 6, p. 061207-1-061207-7, 2012.
- [85] J. C. Petrosky, J. W. McClory, T. E. Gray et T. A. Uhlman,
«Trap assisted tunneling induced currents in neutron irradiated AlGaIn/GaN HFETs»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 56, n° 5, p. 2905-2909, 2009.
- [86] F. Berthet, Y. Guhel, H. Gualous, B. Boudart, J. L. Trolet, M. Piccione, V. Sbrugnera, B. Grimbert et C. Gaquiere,
«Characterization and analysis of electrical trap related effects on the reliability of AlGaIn/GaN HEMTs»,
Solid-State Electronics, vol. 72, p. 15-21, 2012.
- [87] F. Berthet, S. Petitdidier, Y. Guhel, J. L. Trolet, P. Mary, C. Gaquière et B. Boudart,
«Influence of neutrons irradiation on electrical traps existing in GaN-based transistors»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 63, n° 3, p. 1918-1926, 2016.
- [88] X. Sun, O. I. Saadat, J. Chen, E. X. Zhang, S. Cui, T. Palacios, D. M. Fleetwood et T. P. Ma,
«Total-Ionizing-Dose Radiation Effects in AlGaIn/GaN HEMTs and MOS-HEMTs»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 60, n° 6, p. 4074-4079, 2013.
- [89] S. Petitdidier, F. Berthet, Y. Guhel, J. L. Trolet, P. Mary, C. Gaquière et B. Boudart,
«Characterization and analysis of electrical trap related effects on the reliability of AlInN/GaN HEMTs»,
Microelectronics Reliability, vol. 55, n° 9-10, p. 1719–1723, 2015.
- [90] G. A. Umana-Membreno, J. Dell, G. Parish, B. D. Nener, L. Faraone et U. K. Mishra,
«⁶⁰Co gamma irradiation effects on n-GaN Schottky diodes»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 80, n° 23, p. 4354-4356, 2003.

- [91] E. Arslan, S. Altindal, S. Özçelik et E. Ozbay,
«Tunneling current via dislocations in Schottky diodes on AlInN/AlN/GaN heterostructures»,
Semiconductor Science and Technology, vol. 24, n° 7, p. 075003-1-075003-6, 2009.
- [92] A. Ortiz-Conde, F. J. García Sánchez, J. J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada et Y. Yue,
«A review of recent MOSFET threshold voltage extraction methods»,
Microelectronics Reliability, vol. 42, n° 4-5, p. 583-596, 2002.
- [93] B. Boudart, S. Trassaert, X. Wallart, J. C. Pesant, O. Yaradou, D. Théron, Y. Crosnier,
H. Lahreche et F. Omnes,
«Comparison between TiAl and TiAlNiAu ohmic contacts to n-type GaN»,
Journal of Electronic Materials, vol. 29, n° 5, p. 603-606, 2000.
- [94] R. Gong, J. Wang, S. Liu, Z. Dong, M. Yu, C. P. Wen, Y. Cai et B. Zhang,
«Analysis of surface roughness in Ti/Al/Ni/Au Ohmic contact to AlGaIn/GaN high electron mobility transistors»,
Applied Physics Letters, vol. 97, n° 6, p. 062115-1-062115-3, 2010.
- [95] M. Montes Bajo, C. Hodges, M. J. Uren et M. Kuball,
«On the link between electroluminescence, gate current leakage, and surface defects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors upon off-state stress»,
Applied Physics Letters, vol. 101, n° 3, p. 0335081-033508-4, 2012.
- [96] G. Meneghesso, F. Zanoni, M. J. Uren et E. Zanoni,
«Anomalous Kink Effect in GaN High Electron Mobility Transistors»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 30, n° 2, p. 100-102, 2009.
- [97] M. Wang et K. J. Chen,
«Kink Effect in AlGaIn/GaN HEMTs Induced by Drain and Gate Pumping»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 32, n° 4, p. 482-484, 2011.
- [98] A. Sozza, C. Dua, E. Morvan, B. Grimbart et S. L. Delage,
«A 3000 hours DC life test on AlGaIn/GaN HEMT for rf and microwave applications»,
Microelectronics Reliability, vol. 45, n° 9-11, p. 1617-1621, 2005.
- [99] A. Sozza, C. Dua, E. Morvan, M. diForte-Poisson, S. Delage, F. Rampazzo, A. Tazzoli,
F. Danesin, G. Meneghesso, E. Zanoni, A. Curutchet, N. Malbert, N. Labat, B. Grimbart
et J. C. De Jaeger,
«Evidence of Traps Creation in GaN/AlGaIn/GaN HEMTs After a 3000 Hour On-state
and Off-state Hot-electron Stress»,
Electron Devices Meeting, IEDM Technical Digest. IEEE International, p. 590, 2005.
- [100] W. Chikhaoui, J. M. Bluet, M. A. Poisson, N. Sarazin, C. Dua et C. Bru-Chevallier,
«Current deep level transient spectroscopy analysis of AlInN/GaN high electron
mobility transistors: Mechanism of gate leakage»,
Applied Physics Letters, vol. 96, n° 7, p. 072107-1-072107-3, 2010.

- [101] J. Kuzmik, A. Kostopoulos, G. Konstantinidis, J. F. Carlin, A. Georgakilas et D. Pogany, «InAlN/GaN HEMTs: a first insight into technological optimization», *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 53, n° 3, p. 422-426, 2006.
- [102] F. Medjdoub, M. Alomari, J. F. Carlin, M. Gonschorek, E. Feltin, M. A. Py, N. Grandjean et E. Kohn, «Barrier-Layer Scaling of InAlN/GaN HEMTs», *IEEE Electron Device Letters*, vol. 29, n° 5, p. 422-425, 2008.
- [103] C. Y. Zhu, M. Wu, C. Kayis, F. Zhang, X. Li, R. Ferreyra, A. Matulionis, V. Avrutin, Ü. Özgür et H. Morkoç, «Degradation and phase noise of InAlN/AlN/GaN heterojunction field effect transistors: Implication for hot electron/phonon effects», *Applied Physics Letters*, vol. 101, n° 10, p. 103502-1-103502-3, 2012.
- [104] J. Kuzmik, S. Vitanov, C. Dua, J. F. Carlin, C. Ostermaier, A. Alexewicz, G. Strasser, D. Pogany, E. Gornik et N. Grandjean, «Buffer-Related Degradation Aspects of Single and Double-Heterostructure Quantum Well InAlN/GaN High-Electron-Mobility Transistors», *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, n° 5R, p. 054102-1-054102-5, 2012.
- [105] J. Xue, J. Zhang, K. Zhang, Y. Zhao, L. Zhang, X. Ma, X. Li, F. Meng et Y. Hao, «Fabrication and characterization of InAlN/GaN-based double-channel high electron mobility transistors for electronic applications», *Journal of Applied Physics*, vol. 111, n° 11, p. 114513-1-114513-5, 2012.
- [106] G. Meneghesso, F. Rossi, G. Salviati, M. J. Uren, E. Munoz et E. Zanoni, «Correlation between kink and cathodoluminescence spectra in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors», *Applied Physics Letters*, vol. 96, n° 26, p. 263512-1-263512-3, 2010.
- [107] N. Killat, M. Tapajna, M. Faqir, T. Palacios et M. Kuball, «Evidence for impact ionization in AlGaIn/GaN HEMTs with InGaIn back-barrier», *Electronic Letters*, vol. 47, n° 6, p. 405-406, 2011.
- [108] N. Shigekawa, K. Shiojima et T. Suemitsu, «Optical study of high-biased AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors», *Journal of Applied Physics*, vol. 92, n° 1, p. 531-535, 2002.
- [109] N. Shigekawa, K. Shiojima et T. Suemitsu, «Electroluminescence characterization of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors», *Journal of Applied Physics*, vol. 79, p. 1196-1198, 2001.
- [110] M. Meneghini, G. Meneghesso et E. Zanoni, «Analysis of the Reliability of AlGaIn/GaN HEMTs Submitted to On-State Stress Based on Electroluminescence Investigation», *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 13, n° 2, p. 357-361, 2013.

- [111] M. Meneghini, A. Stocco, N. Ronchi, F. Rossi, G. Salviati et G. Z. E. Meneghesso, «Extensive analysis of the luminescence properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors», *Applied Physics Letters*, vol. 97, n° 6, p. 063508-1-063508-3, 2010.
- [112] C. Zeng, Y. S. Wang, X. Y. Liao, R. G. Li, Y. .. Chen, P. Lai, Y. Huang et Y. F. En, «Reliability Investigations of AlGaIn/GaN HEMTs Based on On-State Electroluminescence Characterization», *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 15, n° 1, p. 69-74, 2015.
- [113] M. Meneghini, A. Stocco, R. Silvestri, G. Meneghesso et E. Zanoni, «Degradation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors related to hot electrons», *Applied Physics Letters*, vol. 100, n° 23, p. 233508-1-233508-3, 2012.
- [114] N. Killat, M. Tapajna, M. Faqir, T. Palacios et M. Kuball, «Impact ionisation in AlGaIn/GaN HEMTs with InGaIn Back-Barrier», *CS MANTECH Conference*, Palm Springs, California, USA, 2011.
- [115] B. Brar, K. Boutros, R. DeWames, V. Tilak, R. Shealy et L. Eastman, «Impact ionization in high performance AlGaIn/GaN HEMTs», *Proceedings, IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices*, p. 487-491, 2002.
- [116] B. Boudart, C. Gaquière et D. Théron, «Gate current analysis of the LT-GaAs passivated MESFETs», *Electronic Letters*, vol. 33, n° 17, p. 1496-1497, 1997.
- [117] J. W. Pomeroy, M. Kuball, M. J. Uren, K. P. Hilton, R. S. Balmer et T. Martin, «Insights into electroluminescent emission from AlGaIn/GaN field effect transistors using microRaman thermal analysis», *Applied Physics Letters*, vol. 88, n° 2, p. 023507-1-023507-3, 2006.
- [118] C. Hodges, N. Killat, S. W. Kaun, M. H. Wong, F. Gao, T. Palacios, U. K. Mishra, J. S. Speck, Wolverson et M. Kuball, «Optical investigation of degradation mechanisms in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors: Generation of non radiative recombination centers», *Applied Physics Letters*, vol. 100, n° 11, p. 112106-1-112106-3, 2012.
- [119] C. Hums, T. Finger, T. Hempel, J. Christen et A. Dadgar, «Fabry-Perot effects in InGaIn/GaN heterostructures on Si-substrate», *Journal of Applied Physics*, vol. 101, n° 3, p. 033113-1-033113-4, 2007.
- [120] A. Kretinin, R. Biro, D. Mahalu et H. Shtrikman, «Multimode Fabry-Perot Conductance Oscillations in Suspended Stacking-Faults-Free InAs Nanowires», *Nano Letters*, vol. 10, n° 9, p. 3439–3445, 2010.

- [121] T. H. Weber, H. Stolz, W. Von der Osten, M. Heuken et K. Heime,
«Fabry-Perot oscillations in epitaxial ZnSe layers»,
Semiconductor Science and Technology, vol. 10, n° 8, p. 1113-1116, 1995.
- [122] M. Bouya, N. Malbert, N. Labat, D. Carisetti, P. Perdu, J. Clément, B. Lambert et M. Bonnet,
«Analysis of traps effect on AlGaIn/GaN HEMT by luminescence techniques»,
Microelectronics Reliability, vol. 48, n° 8-9, p. 1366-1369, 2008.
- [123] P. Ivo, A. Glowacki, E. Bahat-Treidel, R. Lossy, J. Würfl, C. Boit et G. Tränkle,
«Comparative study of AlGaIn/GaN HEMTs robustness versus buffer design variations by applying Electroluminescence and electrical measurements»,
Microelectronics Reliability, vol. 51, n° 2, p. 217-223, 2011.
- [124] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, N. V. Pashkova, A. A. Shlensky, S. J. Pearton, M. E. Overberg, C. R. Abenathy, J. M. Zavada et R. G. Wilson,
«Deep traps in AlGaIn/GaN heterostructures studied by deep level transient spectroscopy: Effect of carbon concentration in GaN buffer layer»,
Journal of Applied Physics, vol. 93, n° 3, p. 5388-5396, 2003.
- [125] A. Y. Polyakov et I. H. Lee,
«Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices»,
Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 94, p. 1-56, 2015.
- [126] P. B. Klein, S. C. Binari, J. A. Freitas Jr et A. E. Wickenden,
«Photoionization spectroscopy of traps in GaN metal-semiconductor field-effect transistors»,
Journal of Applied Physics, vol. 88, n° 5, p. 2843-2852, 2000.
- [127] Z. Q. Fang, B. Claflin, D. C. Look, D. Green et R. Vetury,
«Deep traps in AlGaIn/GaN heterostructures studied by deep level transient spectroscopy: Effect of carbon concentration in GaN buffer layers»,
Journal of Applied Physics, vol. 108, n° 6, p. 063706-1-063706-6, 2010.
- [128] P. B. Klein, J. A. Freitas Jr, S. C. Binari et A. E. Wickenden,
«Observation of deep traps responsible for current collapse in GaN metal–semiconductor field-effect transistors»,
Applied Physics Letters, vol. 75, n° 25, p. 4016-4018, 1999.
- [129] M. J. Anand, I. N. Geok, S. Arulkumaran, B. Syamal et X. Zhou,
«Distribution of trap energy level in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors on Si under on-state stress»,
Applied Physics Express, vol. 8, n° 10, p. 104101-1-104101-4, 2015.

- [130] S. Arulkumaran, K. Ranjan, G. I. Ng, C. M. Manoj Kumar, S. Vicknesh, S. B. Dolmanan et S. Tripathy,
«High-Frequency Microwave Noise Characteristics of InAlN/GaN High-Electron Mobility Transistors on Si (111) Substrate»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 35, n° 10, p. 992-994, 2014.
- [131] J. H. Leach, M. Wu, X. Ni, X. Li, Ü. Özgür et H. Morkoç,
«Effect of lattice mismatch on gate lag in high quality InAlN/AlN/GaN HFET structures»,
Physica Status Solidi (a), vol. 207, n° 1, p. 211-216, 2009.
- [132] A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, A. V. Markov, S. J. Pearton, N. G. Kolin, D. I. Merkurisov et V. M. Boiko,
«Neutron irradiation effects on electrical properties and deep-level spectra in undoped n-AlGaIn/GaN heterostructures»,
Journal of Applied Physics, vol. 98, n° 3, p. 033529-1-033529-6, 2005.
- [133] F. Berthet, Y. Guhel, H. Gualous, B. Boudart, J. L. Trolet, M. Piccione, N. Vellas et C. Gaquière,
«Amélioration des performances électriques en régime statique et hyperfréquence de transistors HEMTs pseudomorphiques de la filière GaAs en utilisant des rayonnements ionisants»,
17èmes Journées Nationales Microondes, Brest, 18-20 mai 2011.
- [134] F. Berthet, Y. Guhel, B. Boudart, H. Gualous, J. L. Trolet, M. Piccione et C. Gaquière,
«Influence of thermal and fast neutron irradiation on dc electrical performances of AlGaIn/GaN transistors»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 59, n° 5, p. 2556-2561, 2012.
- [135] F. Berthet, Y. Guhel, H. Gualous, B. Boudart, J. L. Trolet, M. Piccione et C. Gaquière,
«Annihilation of electrical trap effects by irradiating AlGaIn/GaN HEMTs with low thermal neutrons radiation fluence»,
Microelectronics Reliability, vol. 52, n° 9-10, p. 2159–2163, 2012.
- [136] J. Foos,
«Manuel de radioactivité à l'usage des utilisateurs, tome 2 : les désintégrations radioactives, les interactions rayonnements/matière, les applications de la radioactivité»,
Edition Formascience, 1994.
- [137] G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius et W. Seelmann-Eggebert,
«Chart of the nuclides, Forschungszentrum Karlsruhe»,
Technik und Umwelt.
- [138] H. R. Vega-Carrillo, E. Manzanares-Acuna, A. M. Becerra-Ferreiro et A. Carrillo-Nunez,
«Neutron and gamma-ray spectra of $^{239}\text{PuBe}$ and $^{241}\text{AmBe}$ »,
Applied radiation and isotopes, vol. 57, n° 2, p. 167-170, 2002.

- [139] «JANIS, <http://www.oecd-nea.org/janis/>».
- [140] F. Berthet, S. Petitdidier, Y. Guhel, J. L. Trolet, P. Mary, C. Gaquière et B. Boudart, «Influence of Neutron Irradiation on Electrical Traps Existing in GaN-Based Transistors», *15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow*, p. 1-4, 2015.
- [141] G. Meneghesso, F. Rampazzo, P. Kordos, G. Verzellesi et E. Zanoni, «Current Collapse and High-Electric-Field Reliability of Unpassivated GaN/AlGaN/GaN HEMTs», *IEEE Transactions Electron Devices*, vol. 53, n° 12, p. 2932-2941, 2006.
- [142] Z. Ming-Lan, W. Xiao-Liang, X. Hong-Ling, W. Cui-Mei, R. Jun-Xue et H. Guo-Xin, «Neutron Irradiation Effect in Two-Dimensional Electron Gas of AlGaN/GaN Heterostructures», *Chinese Physics Letters*, vol. 25, n° 3, p. 1045-1048, 2008.
- [143] K. Kuriyama, T. Tokumasu, J. Takahashi, H. Kondo et M. Okada, «Lattice distortions and the transmuted-Ge related luminescence in neutron-transmutation-doped GaN», *Applied Physics Letters*, vol. 80, n° 8, p. 3328-3330, 2002.
- [144] K. Kuriyama, Y. Mizuki, H. Sano, A. Onoue, K. Kushida, M. Okada, M. Hasegawa, I. Sakamoto et A. Kinomura, «Lattice disorder in neutron irradiated GaN: nuclear reaction analysis and Rutherford backscattering studies», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 249, n° 1-2, p. 132-135, 2006.
- [145] R. X. Wang, S. J. Xu, S. Fung, C. D. Beling, K. Wang, S. Li, Z. F. Wei, T. J. Zhou, J. D. Zhang, Y. Huang et M. Gong, «Micro-Raman and photoluminescence studies of neutron-irradiated gallium nitride epilayers», *Applied Physics Letters*, vol. 87, n° 3, p. 03906-1-03906-3, 2005.
- [146] H. Pardeshi, «Analog/RF performance of AlInN/GaN underlap DG MOS-HEMT», *Superlattices and Microstructures*, vol. 88, p. 508-517, 2015.
- [147] H. Y. Kim, J. Kim, F. Ren et S. Jang, «Effect of neutron irradiation on electrical and optical properties of InGaN/GaN light-emitting diodes», *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 28, n° 1, p. 27-29, 2010.

- [148] F. A. Haider, F. P. Chee, H. Abu Hassan, S. Saafie et A. Afishah,
«Changes in electrical properties of MOS transistor induced by single 14 MeV neutron»,
Advancing Nuclear Science and Engineering for Sustainable Nuclear Energy Infrastructure, Negeri Sembilan, Malaysia, 17-19 août 2015.
- [149] H. Matzke,
«Radiation damage in crystalline insulators, oxides and ceramic nuclear fuels»,
Radiation Effects, vol. 64, n° 1-4, p. 3-33, 1982.
- [150] H. Kim, V. Tilak, B. M. Green, J. A. Smart, W. J. Schaff, J. R. Shealy et L. F. Eastman,
«Reliability evaluation of high power AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrate»,
Physica Status Solidi (a), vol. 188, n° 11, p. 203-206, 2001.
- [151] H. Kim, V. Tilak, B. M. Green, H. Cha, J. A. Smart, W. J. Schaff, J. R. Shealy et L. F. Eastman,
«Degradation characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors»,
The Technical Digest International Reliability Physical Symposium Orlando, Florida, 2001.
- [152] H. Kim, V. Tilak, R. M. Thompson, T. Prunty, J. R. Shealy et L. F. Eastman,
«Hot electron effects on undoped AlGaIn/GaN high electron mobility transistors»,
The Technical Digest GaAs Reliability Workshop. Monterey, CA, 2002.
- [153] S. H. Hsu, P. Valizadeh, D. Pavlidis, J. S. Moon, M. Micovic et D. Wong,
«Impact of rf stress on dispersion and power characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs»,
The Technical Digest GaAs IC Symposium. Monterey, CA, 2000.
- [154] J. A. Del Alamo et J. Joh,
«GaN HEMT reliability»,
Microelectronic Reliability, vol. 49, n° 9-11, p. 1200-1206, 2009.
- [155] J. B. Fonder, L. Chevalier, C. Genevois, O. Latry, C. Duperrier, F. Temcamani et H. Maanane,
«Physical analysis of Schottky contact on power AlGaIn/GaN HEMT after pulsed-RF life test»,
Microelectronics Reliability, vol. 52, n° 9-10, p. 2205–2209, 2012.
- [156] J. B. Fonder, O. Latry, C. Duperrier, M. Stanislawiak, H. Maanane, P. Eudeline et F. Temcamani,
«Compared deep class-AB and class-B ageing on AlGaIn/GaN HEMT in S-Band pulsed-RF operating life»,
Microelectronics Reliability, vol. 52, n° 11, p. 2561–2567, 2012.
- [157] F. Temcamani, J. B. Fonder, O. Latry et C. Duperrier,
«Electrical and Physical Analysis of Thermal Degradations of AlGaIn/GaN HEMT Under Radar-Type Operating Life»,
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, n° 3, p. 756-766, 2016.

- [158] «Open Classroom»,
<https://openclassrooms.com/courses/apprenez-a-developper-en-c>.
- [159] D. Dieci, G. Sozz, R. Menozzi, E. Tediosi, C. Lanzieri et C. Canali,
«Electric-Field-related reliability of AlGaAs/GaAs power HFETs: Bias dependence and correlation with breakdown»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, n° 9, p. 1929-1937, 2001.
- [160] P. Valizadeh et D. Pavlidis,
«Effects of RF and DC stress on AlGaN/GaN MODFETs»,
IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 5, n° 3, p. 555-563, 2005.
- [161] M. Faqir, M. Bouya, N. Malbert, N. Labat, D. Carisetti, B. Lambert, G. Verzellesi et F. Fantini,
«Analysis of current collapse effect in AlGaN/GaN HEMT: Experiments and numerical simulations»,
Microelectronics Reliability, vol. 50, n° 9-11, p. 1520-1522, 2010.
- [162] D. K. Sahoo, R. K. Lal, H. Kim, V. Tilak et L. F. Eastman,
«High-field effects in silicon nitride passivated GaN MODFETs»,
IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 50, n° 5, p. 1163-1170, 2003.
- [163] H. Kim, R. Thompson, V. Tilak, T. R. Prunty, J. R. Shealy et L. F. Eastman,
«Effects of SiN passivation and high-electric field on AlGaN-GaN HFET degradation»,
IEEE Electron Device Letters, vol. 24, n° 7, p. 421-423, 2003.
- [164] C. Y. Cheng, F. C. H. Hong et C. Y. Huang,
«Micro- and nanopatterned polymethylmethacrylate layers on plastic poly(ethylene terephthalate) substrates by modified roller-reversal imprint process»,
Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 28, n° 5, p. 921-925, 2010.
- [165] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zanon, A. Tazzoli, M. Meneghini et E. Zanoni,
«Reliability of GaN High-Electron-Mobility Transistors: State of the Art and Perspectives»,
IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 8, n° 2, p. 332-343, 2008.
- [166] S. Trassaert, B. Boudart, C. Gaquière, D. Théron, Y. Crosnier, F. Huet et M. A. Poisson,
«Trap effects studies in GaN MESFETs by pulsed measurements»,
IEEE Electronics Letters, vol. 35, n° 16, p. 1386-1388, 1999.
- [167] G. Syaranamual, W. Sasangka, R. I. Made, S. Arulkumaran, G. I. Ng, S. C. Foo, C. L. Gan et C. V. Thompson,
«Role of Two-Dimensional Electron Gas (2DEG) in AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistor (HEMT) ON-State Degradation»,
Microelectronics Reliability, vol. 64, p. 589-593, 2016.

Références

- [168] M. Dammann, M. Baeumler, P. Brückner, W. Bronner, S. Maroldt, H. Konstanzer, M. Wespel, R. Quay, M. Mikulla, A. Graff, M. Lorenzini, M. Fagerlind, P. J. van der Wel et T. Roedle, «Degradation of 0.25 μm GaN HEMTs under high temperature stress test», *Microelectronics Reliability*, vol. 55, n° 9-10, p. 1667–1671, 2015.

Annexe

GaN Essentials™



AN-009: Bias Sequencing and Temperature Compensation for GaN HEMTs

GaN Essentials: Bias Sequencing and Temperature Compensation of GaN HEMTs

1. Table of Contents

1.	TABLE OF CONTENTS.....	2
2.	ABSTRACT	3
3.	BIAS SEQUENCING	3
	3.1. BIAS SEQUENCING.....	3
	3.2. GATE POWER SUPPLY NEEDS.....	4
4.	TEMPERATURE COMPENSATION	5
5.	CONCLUSION.....	9

2. Abstract

This application note will discuss fundamental usage methodologies to design with GaN HEMT devices. Specifically, this discussion will center on proper biasing techniques as well as temperature compensation surrounding GaN HEMT technology. A bias sequencing circuit and a temperature compensation circuit will be presented.

The biasing of high power RF devices, especially GaN devices, requires special attention. The concerns are mainly for preventing instabilities or oscillations, maintaining large drain current with a small voltage drop, and bias decoupling circuits to reduce interference with the RF matching circuit as well as limiting its influence on the linearity of the device. Also, properly maintaining the device current over temperature improves the performance in multiple operating environments. This application note will address the issues associated with biasing, bias sequencing and temperature compensation of a Nitronex GaN HEMT.

3. Bias Sequencing

GaN HEMTs are depletion mode devices which require a negative voltage applied to the gate. Supplying a negative voltage on a lab bench is easily accomplished by either using a supply with negative voltage generation capability or by switching the leads between the ground node and the positive voltage node. In a typical application circuit the negative voltage comes from a regulator or a negative voltage generator.

3.1. Bias Sequencing

For GaN HEMT devices, the first and most important issue is the biasing sequence. The goal while biasing the device is to stay away from areas which are sensitive to the potential instability of the device, for instance, the area where V_{DS} is low and I_{DS} is high. Assuming that the device is properly connected to a regulated power supply and that the drain and the gate are sufficiently DC decoupled and connected to 50 ohm terminations, the recommended bias sequence is as follows:

- Set $V_{GS} = 0V$ (gate), and $V_{DS} = 0V$ (drain).
- Decrease V_{GS} to beyond the Pinch-off voltage (V_P), typically -1.8 to -2.2V for Nitronex's GaN devices.
- Increase V_{DS} up to the nominal voltage.
- Increase V_{GS} until the required quiescent current is reached.
- Apply the RF power.

Similarly, the recommended turn-off sequence is as follows:

- Turn off the RF power.
- Decrease V_{GS} down to V_P .
- Decrease V_{DS} down to 0V.
- Set V_{GS} to 0V

3.2. Gate Power Supply Needs

One needs to pay attention to how to deal with a positive gate current which will arise when the device is driven into saturation. Many commercial power supplies are not able to source and sink DC current through the same connector. One way to overcome this limitation is to use a resistor connected across the power supply terminals, this resistor will enable the power supply to always provide a negative current while allowing the device to source or sink current. The maximum value for this resistor is determined by the gate voltage and the amount of gate current required by the device. This can be calculated by the following:

$$R_{MAX} = \frac{-V_{GS_{MAX}}}{I_{GS_{MAX}}}$$

A 90W Nitronex device has nominal V_{GSQ} between -1.4V and -1.8V, and an $I_{GS_{MAX}} = 36\text{mA}$ (1mA/mm).

Moreover, the resistor's power rating also needs to be considered when selecting a gate resistor. For instance, with $V_{GSQ, MIN} = -2\text{ V}$, and 40 mA current a 50 Ohm gate resistor dissipates 0.08 W; therefore a 0.10 W resistor can be safely used.

Table 1. Quiescent and Saturated Gate Current vs Device Periphery

Nitronex Device	Device Periphery (mm of gate width)	$I_{GS,MAX}$ (mA) (Recommended Operating)	$I_{GS,MAX}$ (mA) (Absolute Maximum)	Recommended Resistor Value R_G (ohm)
NPTB00004	2	2	10	200
NPTB00025	8	8	40	50
NPTB00050	16	16	80	25
NPT25100	36	36	180	10

A series resistor (R_G) along the gate feed line is required to suppress oscillations; its value should be properly selected to keep the device stable as well as to limit the V_{GS} variation at the device versus the RF drive level. Table 1 lists the recommended minimum R_G for different devices based upon stability considerations. However, because the GaN HEMT's gate terminal is a Schottky diode its current draw will vary with RF drive level; at low drive levels the I_{GS} will be negative and in the mA range but as the device is driven into saturation I_{GS} will change polarity and increase to a maximum value of tens of mA's; see Table 1 for specific details. This change in I_{GS} will result in a voltage drop across the series gate resistor and a change in V_{GS} . To limit V_{GS} variation the gate resistor should not be too large; therefore the R_G values listed in Table 1 will be selected as the recommended values. The change in V_{GS} during device operation is therefore given by;

$$\Delta V_{GS} = R_G \Delta I_{GS} = -0.40V$$

It is interesting to note that V_{GS} will decrease (become more negative) as the device is driven into saturation such that the device will be pushed further into a pinch-off state when I_{GS} changes polarity.

Lumped capacitors can be used for DC blocking for applications at S Band and below to isolate the source and load from V_{GS} and V_{DS} . DC blocking capacitors are selected to have the series resonant frequencies in the band of interest to achieve low impedance as much as possible for these capacitors. They are also selected to have high Q so as to minimize insertion loss. The breakdown voltage of the DC blocking capacitors needs to cover the maximum voltage (DC + RF) they will be subjected to plus a little safety margin.

The drain bias line design criteria used for other high power RF devices can also be applied to GaN transistors. In order to accommodate high drain current and to achieve a low inductance a wide microstrip feed line is recommended. This will provide low power loss along the line as well as be a good starting point to providing adequate video bandwidth. The standard complement of bias line decoupling techniques can also be applied to GaN transistors.

4. Temperature Compensation

After making sure that the device is biased and operational, proper care must be taken to adequately maintain the bias of the device for consistent performance over temperature. The quiescent current of a GaN HEMT device is primarily a function of temperature and V_{GS} . Maintaining consistent performance can be accomplished by designing a bias circuit around the device so as to maintain a constant I_{DSQ} . As the graph shows below, V_{GS} changes proportionally to I_{DS} and temperature. For instance, a typical 90W GaN HEMT device, the NPT25100, needs $V_{GS} = -1.59V$ at a $-40C$ base plate, and $V_{GS} = -1.46V$ at a $+85 C$ baseplate to maintain $I_{DSQ} = 700 mA$.

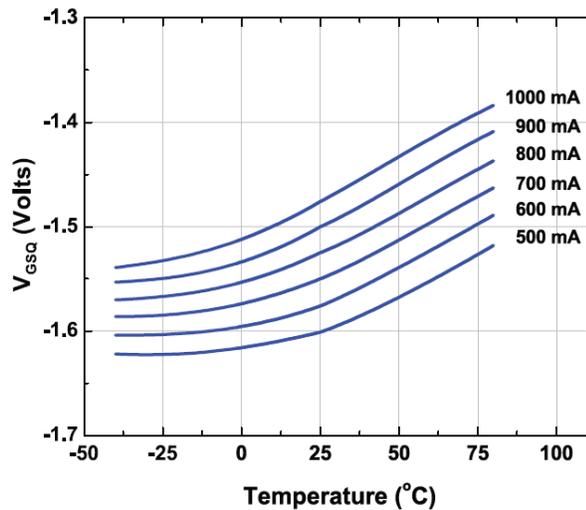


Figure 1. NPT25100 Quiescent Gate Voltage Required to Reach I_{DQ} as a function of Case Temperature

Given the above curves, a circuit needs to be developed to follow this shape as closely as possible in order to maintain constant I_{DSQ} . One such implementation for bias sequencing and gate bias control was built and tested and is shown in figure 2. The details of the design will be described in the sections to follow.

This circuit of figure 2 supplies a temperature compensated voltage to the gate to maintain a constant drain current. This circuit also includes the proper bias sequencing of gate and drain power supplies to operate the GaN device within a safe operating region to keep from damaging the device. The negative gate voltage is generated within the MAX881R bias sequencer so the gate bias network functions off a single +5V supply.

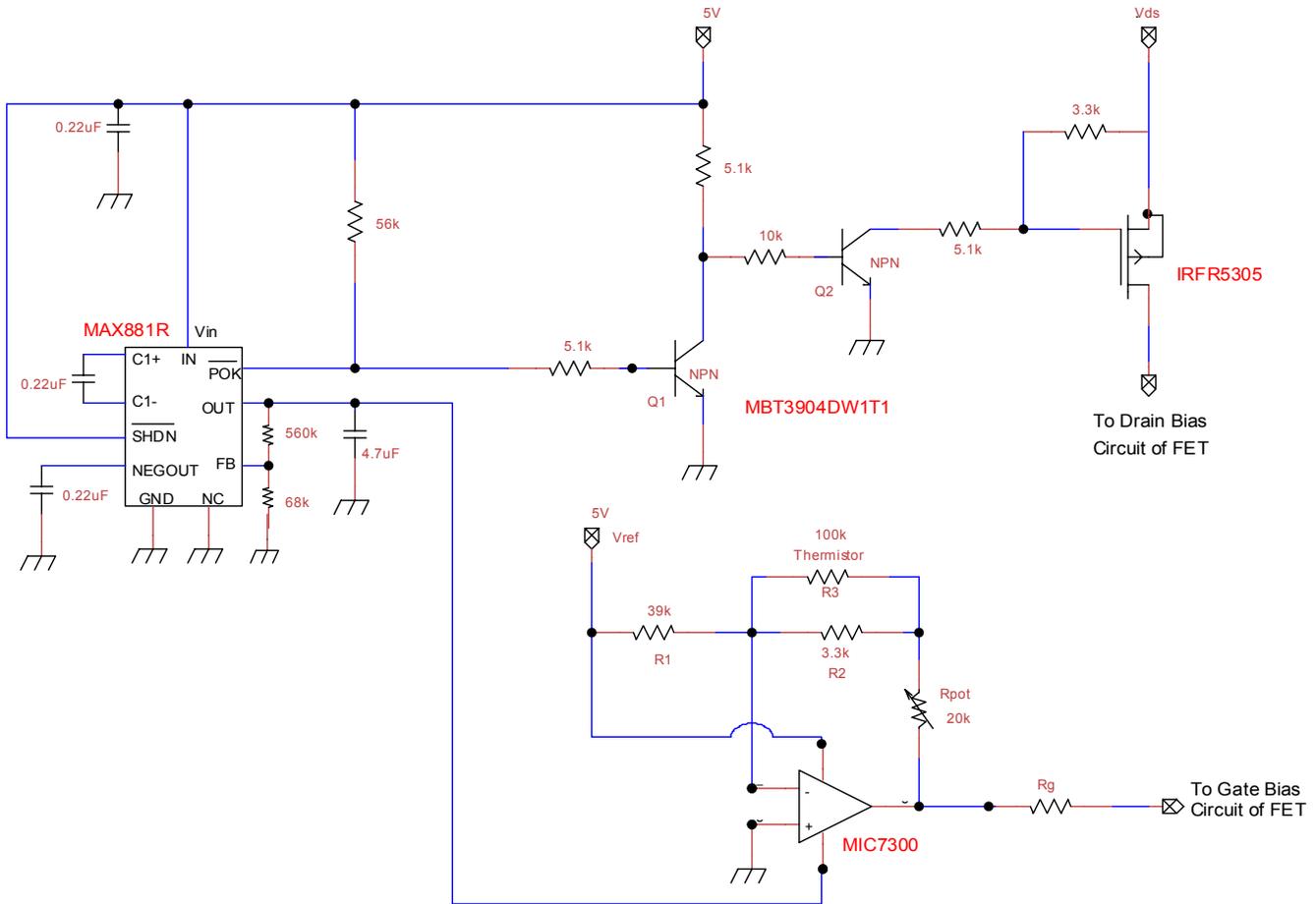


Figure 2. Recommended Bias Circuit for Temperature Compensation and Bias Sequencing

Table 2. Bill of Materials for Temperature Compensation and Bias Sequencing Circuit

Part Number	Description	Vendor
MAX881R	Bias Sequencer	Maxim
MIC7300	Operational Amplifier	Micrel
MBT3904DW1T1	Dual NPN	ON Semi
IRFR5305	HEXFET MOSFET	International Rectifier
ERT-J1VV104J	100k ohm 5%, 0603 Thermistor	Panasonic
3224W-1-203E	20k ohm Potentiometer	Bournes
Resistors	0603, 1%, Thin Film	Panasonic
Capacitors	0603, 10%, Ceramic	TDK

The circuit in Figure 2 uses a P-channel MOSFET as a high-side switch to deliver V_{DS} to the GaN HEMT. It is important to properly size this FET relative to the size of the HEMT being biased, in terms of $R_{DS(ON)}$, R_{TH} , and $V_{DS(MAX)}$. In general, smaller gate periphery HEMTs can be switched with smaller- and less expensive – MOSFETs. Specifically, $R_{DS(ON)}$ is selected to keep the voltage drop across the switch for a given maximum I_{DS} below a user-selected tolerance value:

$$R_{DS(ON)} < \frac{V_{drop}}{I_{DS\ max}}$$

Of course, $V_{DS(MAX)}$ must exceed the maximum switched drain supply voltage with margin. And finally the MOSFET should have an R_{TH} which ensures that its maximum junction temperature is not exceeded even when the HEMT is drawing its maximum current (and the MOSFET is experiencing maximum power dissipation). As examples, a small 2mm HEMT may be safely switched with a small, inexpensive MOSFET with $R_{DS(ON)}$ as high as 500 milliohms in a SOT223-4 package. Larger 8mm and 16mm devices should use MOSFETs which keep $R_{DS(ON)}$ below about 150 milliohms and be housed in a DPAK or similar package with sufficient heat sinking. Even larger 36mm devices require switches with sub-80 milliohm $R_{DS(ON)}$ and packaging that will dissipate several watts.

The above circuit utilizes the international rectifier IRFR5305 MOSFET for the drain switch which has an $R_{DS(ON)}=0.065$ ohms and a V_{DSS} of -55V. Since the NPT25100 can draw 6 amps of RMS drain current the maximum voltage drop across the MOSFET is 0.39V and will dissipate 2.34W of power.

The bias sequencer and negative voltage is generated via the Maxim MAX881R bias supply IC which contains an integrated charge pump to supply the necessary negative voltage rail to the operational amplifier (assuming that a suitable system negative voltage is not already available) and generates a power-ok signal used to turn on the drain switch after the negative supply is stable. The operational amplifier must be capable of supplying the maximum negative and positive gate current for the HEMT being biased, and the charge pump must be capable of supplying the maximum negative current needed for that circuit. The Micrel MIC7300 operational amplifier can source or sink up to 80mA of current into large capacitive loads.

The V_{GSQ} and temperature compensated gate voltage is provided via the operational amplifier. The V_{GSQ} is set via the potentiometer (Rpot) and the op-amp circuit will maintain the proper I_{DQ} over temperature. The op-amp is configured as an inverting amplifier with the positive terminal grounded while the negative terminal is fed from a +5V voltage reference and a feedback circuit. The feedback circuit was designed to provide a temperature dependent voltage which tracks the actual device V_{GS} required to maintain a constant drain current. In order to implement the voltage tracking a thermistor is used in the feedback network. The thermistor (R3) provides a temperature dependent resistance and with the proper selection of other resistors a circuit can be designed which will accurately track the temperature dependent V_{GSQ} of the GaN device. The thermistor must be mounted near the active GaN device so as to measure the baseplate temperature of the device and as the thermistor resistance changes, the transfer function and therefore the output voltage of the op-amp circuit is modified so as to maintain a near constant I_{DSQ} versus temperature.

The transfer function of the operational amplifier is given by the following equations:

$$V_0 = -\frac{V_{ref}}{R1} \left(R_{pot} + \frac{(R2 + R3)}{R2R3} \right)$$

$$V_{GSQ} = V_0 - I_g R_g$$

Under non-saturated conditions the gate current will be in the mA range so the voltage drop across the gate resistor will be in the tens of mV range.

Using the spreadsheet located on the GaN Essentials webpage, the values of resistors in the temperature compensation circuit can be determined for a particular V_{GSQ} at 25°C case temperature. (Click the link located at <http://www.nitronex.com/ganessentials.html> to open the file.). Table 3 lists some recommended resistor values for setting different V_{GSQ} levels from Class-AB operation (-1.6 V) through Class-C operation (-3 V). As evident from the above equation and from the table, Rpot is used to adjust the room temperature gate voltage.

Table 3. Resistor values for fixed V_{GSQ} at 25°C case temperature for the NPT25100

V_{GSQ} (V) at 25°C	R1(Ω)	R2(Ω)	Rpot(Ω)	Rg(Ω)
-1.6	40k	3.3k	9.5k	10
-1.8	40k	3.3k	11.2k	10
-2.5	40k	3.3k	16.8k	10
-3.0	40k	3.3k	21.0k	10

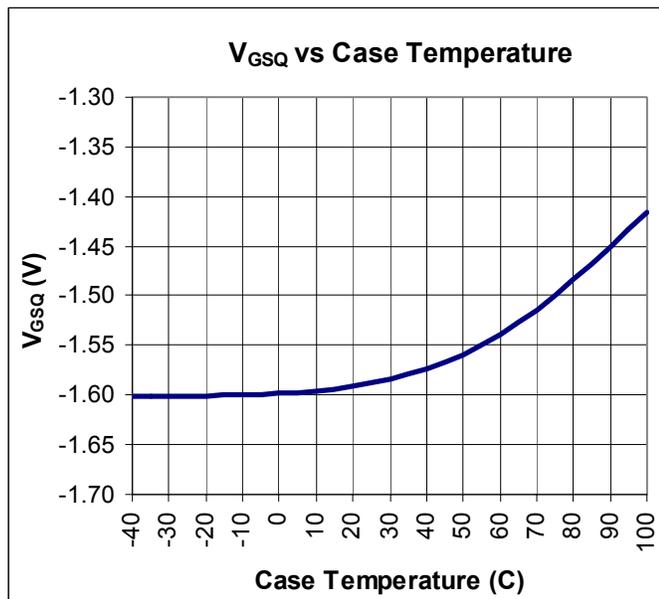


Figure 4. Modeled V_{GSQ} vs Case Temperature for Temperature Compensation Bias Circuit ($I_{DQ}=700mA$)

The graph in figure 4 was generated from the temperature dependent equation for V_{GSQ} , the shape of this curve tracks very closely with the actual NPT25100 device V_{GSQ} shown in figure 1.

5. Conclusion

In conclusion, this application note describes the proper bias sequencing necessary to safely turn on a GaN HEMT device and provides some discussion on selecting a gate resistor and operational details related to the gate terminal of the GaN HEMT. A bias sequencer and temperature compensation circuit was designed, built and tested. The schematic and BOM are provided so amplifier designers do not have to use valuable time in designing their own bias sequencer or temperature compensation circuit, others may wish to use this circuit as a starting point to create a different design.

Articles publiés durant cette thèse

S. Petitdidier, F. Berthet, Y. Guhel, J.L. Trolet, P. Mary, C. Gaquière, B. Boudart,
«Characterization and analysis of trap related effects on the reliability of AlInN/GaN HEMTs»,
Microelectronics reliability, vol. 55, n° 9-10, p. 1719-1723, 2015

F. Berthet, S. Petitdidier, Y. Guhel, J.L. Trolet, P. Mary, C. Gaquière, B. Boudart,
«Influence of neutrons irradiation on electrical traps existing in GaN-based transistors»,
IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 63, n° 3, p. 1918 – 1926, 2016

F. Berthet, S. Petitdidier, Y. Guhel, J.L. Trolet, P. Mary, A. Vivier, C. Gaquière, B. Boudart,
«Analysis of degradation mechanisms in AlInN/GaN HEMTs by electroluminescence
technique»,
Solid State Electronics, vol. 127, n° 3, p. 1918 – 1926, 2017

Articles en cours de reviewing

S. Petitdidier ; Y. Guhel ; J. L. Trolet ; P. Mary ; C. Gaquière ; B. Boudart
“Parasitic channel induced by an on-state stress in AlInN/GaN HEMTs”

S. Petitdidier ; Y. Guhel ; G. Brocero ; P. Eudeline ; J. L. Trolet ; P. Mary ; C. Gaquière ; B.
Boudart
“Influence of neutron irradiation on electron traps induced by ageing test in AlInN/GaN
HEMTs”

Participations à des conférences

Conférences internationales :

RADECS 2015 (RADiation Effects on Components and Systems) du 14 au 18 septembre 2015
à Moscou, Russie

ESREF 2015 (European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and
Analysis) du 5 au 9 octobre 2015 à Toulouse, France

RADECS 2016 du 19 au 23 septembre 2016 à Brême, Allemagne

Conférences nationales :

JNM 2017 (Journées Nationales Microondes) du 16 au 19 mai 2017 à St Malo

Résumé

Les transistors HEMTs (High Electron Mobility Transistors) de la filière GaN sont destinés à des applications dans les domaines militaire et spatial. C'est pourquoi nous avons étudié l'influence de trois types de stress électriques : à canal ouvert, à canal pincé et NGB (Negative Gate Bias), ainsi que l'influence de neutrons thermalisés avec une fluence pouvant aller jusqu'à $1,7 \cdot 10^{12}$ neutrons.cm⁻², sur leurs performances électriques dc.

Dans un premier temps, nous avons étudié des HEMTs AlInN/GaN de laboratoire. Pour les trois stress, nous avons observé une diminution du courant de drain ainsi qu'une augmentation de la résistance d'accès dues à la création de pièges accepteurs et donneurs au cours des différents stress et à la présence de pièges préexistants. Les contacts ohmiques et Schottky n'ont pas été impactés. Nous avons ensuite irradié ces composants par des neutrons thermalisés et avons observé une légère dégradation des performances électriques des transistors non stressés et stressés à canal ouvert ou pincé. En revanche, nous avons mis en lumière une légère augmentation du courant de drain pour les transistors ayant subi un stress NGB. De plus, les contacts Schottky ont été dégradés pour les composants stressés. Nous avons également irradié des MOS-HEMTs AlInN/GaN et conclu que ceux-ci étaient plus sensibles vis à vis des irradiations que les HEMTs.

Dans un deuxième temps, nous avons stressé de manière analogue des HEMTs AlGaN/GaN du commerce grâce à un banc de caractérisation et de stress automatique développé durant cette étude. Dans le cas du stress à canal ouvert, nous avons observé une diminution importante du courant de drain tandis que pour les stress à canal pincé et NGB le courant de drain augmente légèrement à cause d'une libération de pièges préexistants sous l'action du champ électrique vertical. Pour les trois stress le contact Schottky est dégradé. Lors des irradiations avec des neutrons thermalisés, ces transistors, stressés ou non, subissent là encore des dégradations traduites notamment par une faible diminution du courant de drain. Cependant le contact Schottky n'est impacté que pour les composants non stressés et stressés à canal ouvert.

Abstract

The GaN based HEMTs (High Electron Mobility Transistors) are excellent candidates for military and spatial applications. That's why we have analysed the influence of three different types of bias stress: on-state stress, off-state stress and NGB (Negative Gate Bias), and the influence of thermalized neutrons with a fluence up to 1.7×10^{12} neutrons.cm⁻², on their dc electrical performances.

First, we have studied laboratory AlInN/GaN HEMTs. For the three conditions of stress, we have observed a decrease in the drain current and an increase in the access resistance due to pre-existing traps and to the creation of acceptor and donor traps during the stress. The ohmic and Schottky contacts were not impacted. Then, we have irradiated these components with thermalized neutrons and we have found a small degradation of the electrical performances of unstressed and on-state stressed and off-state stressed transistors. On the other hand, we have highlighted a slight increase in the drain current for NGB stressed components. Moreover, the Schottky contact of the stressed components was deteriorated. We have also irradiated AlInN/GaN MOS-HEMTs and we have concluded that they are more sensible to irradiation than HEMTs.

In a second time we have stressed in the same way commercial AlGaN/GaN HEMTs with an ageing bench build during this study. For the on-state stress, we have observed an important increase in the drain current. However, the drain current increases for the on-state and NGB stressed components due to a release of electrons from pre-existing traps under vertical electrical field. The Schottky contact was degraded for the three types of stress. During the irradiation with thermalized neutrons, the unstressed and stressed transistors are degraded and a small decrease in the drain current is visible. However, the Schottky contact was only degraded for unstressed and on-state stressed components.