



Caractérisation au sol de la sensibilité aux radiations des composants GaN avant leur utilisation dans l'espace.

# Fiabilité des composants GaN de puissance en environnement radiatif

## Méthodes de caractérisation par impulsions laser et rayons X focalisés

**Catherine NGOM**

Docteure en Electronique,

Post-doctorante à l'IRT Saint-Exupéry et à l'Institut d'Electronique et des Systèmes (UMR 5214)

Lauréate du prix de thèse Ampère-SEE 2022

Les composants GaN de puissance peuvent subir des défaillances destructives induites par les particules présentes dans l'environnement radiatif spatial et atmosphérique. Afin de contribuer à répondre à cette problématique industrielle, nous avons exploré de nouvelles méthodes de caractérisation de la fiabilité des composants GaN sous radiations.

### Introduction

L'optimisation de l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie électrique est indispensable pour l'amélioration des performances dans la plupart des applications. Lors de la sélection des compo-

sants de puissance, les transistors ayant une faible résistance à l'état passant  $R_{ON}$  ainsi qu'une faible capacité de grille sont privilégiés afin de minimiser les pertes d'énergie. En plus de cela, les composants doivent répondre à des critères de tension et de température élevées.

### Composants de puissance à base de nitrure de gallium (GaN)

L'émergence de technologies de composant de puissance à base de semi-conducteurs à grande bande interdite (WBG : *wide band-gap*) tels que le nitrure de

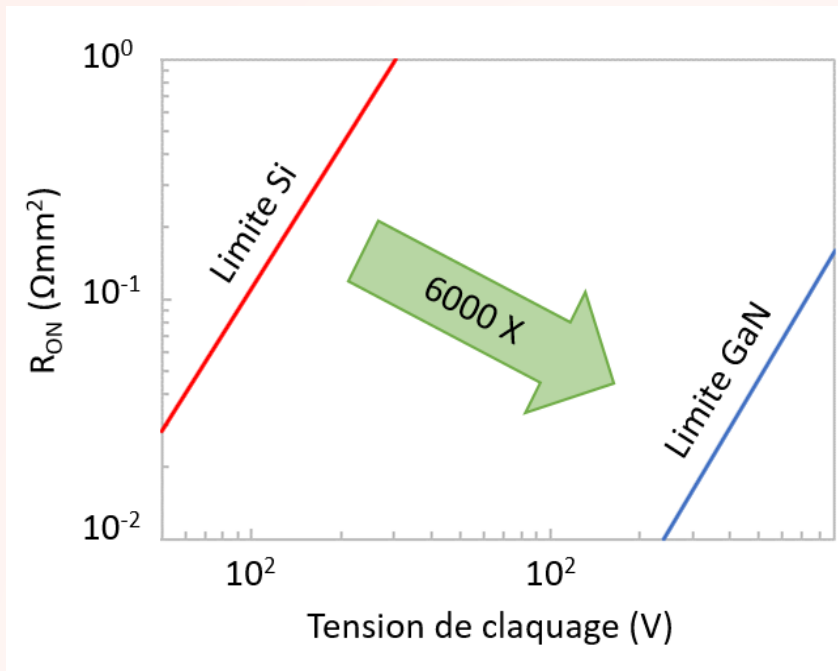


Figure 1 : Résistance à l'état passant en fonction de la tension de claquage pour les composants Si et GaN.

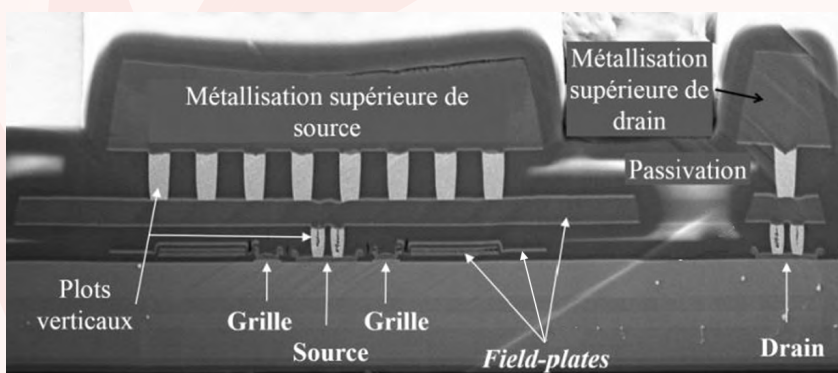


Figure 2 : Vues en coupe d'un composant de puissance GaN (crédit : A. Duarte Thèse 2018).

gallium constitue une avancée significative pour répondre à l'augmentation des besoins en courant forts et en tenue en tension et température. Leurs excellentes propriétés physiques permettent de prévoir une limite de performances 6000 fois supérieure à celle des technologies silicium (figure 1).

Les transistors à haute mobilité d'électrons (HEMT : *High Electron Mobility Transistor*) à base de matériau GaN sont particulièrement prometteurs. Cela a suscité un intérêt considérable pour l'industrialisation de ces composants dont la maturité technologique progresse rapidement. Il existe aujourd'hui différentes

filières commerciales qui ont trait à diverses applications.

Les composants de puissance GaN commerciaux présentent généralement une puce avec une structure inter-digitée, c'est-à-dire qu'il y a plusieurs transistors connectés en parallèle (figure 2). En effet, la structure élémentaire qui forme un transistor est répétée avec une symétrie par rapport au contact de source ou de drain. Deux transistors voisins partagent le même contact de source ou de drain. En outre, de nouvelles structures de boîtier ont été développées, dont certaines comprennent des interconnexions métalliques épaisses au-dessus de la puce.

### Effets singuliers des radiations sur les composants de puissance

Dans les domaines spatial et aéronautique, les composants et systèmes électroniques sont exposés aux radiations de l'environnement radiatif naturel (figure 3) et doivent répondre à des exigences de haute fiabilité. Différents types de particules et rayonnements tels que les ions lourds, les protons et les neutrons peuvent interagir avec les composants et générer des défaillances telles que les effets singuliers qui sont des perturbations dues au passage d'une particule unique à travers la zone active d'un composant.

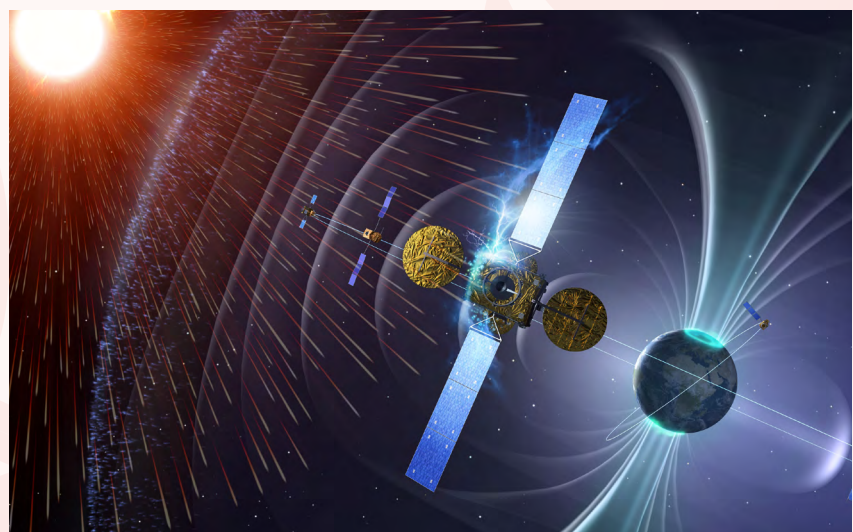


Figure 3 : Environnement radiatif spatial (crédit : ESA).

## “L'évaluation des effets destructifs des radiations s'effectue classiquement par des essais sous faisceau de particules accélérées pour reproduire l'environnement radiatif. Cette méthode est efficace pour la sélection de composants, cependant elle présente des limites.”

●●● En effet, l'énergie déposée par la particule à travers le composant a pour effet de créer une importante densité de paires électron-trou le long de la trace d'ionisation (figure 4). Dans le cas du passage d'un ion lourd, l'ionisation des semiconducteurs se fait par interaction coulombienne. Une partie de ces paires électron-trou est collectée par les électrodes, créant un courant qui peut avoir différents effets électriques transitoires ou destructifs sur les composants de puissance. Dans le cas des MOSFET Silicium, nous avons une bonne compréhension des mécanismes de défaillance. Dans le cas des HEMT GaN, la compréhension de ces phénomènes reste encore très limitée. Il est donc nécessaire de développer des méthodologies afin d'étudier les ef-

fets des radiations sur les composants utilisant ces nouvelles technologies.

### Méthode de caractérisation des effets singuliers des radiations

L'évaluation des effets destructifs des radiations s'effectue classiquement par des essais sous faisceau de particules accélérées pour reproduire l'environnement radiatif. Cette méthode est efficace pour la sélection de composants, cependant elle présente des limites. Les informations issues de ce type de test ne permettent pas une compréhension approfondie des mécanismes de dégradation. En effet, l'ensemble du composant sous test est irradié par le faisceau de particules

et il est donc impossible d'identifier les zones sensibles du composant. De plus, la technique est complexe à mettre en œuvre et les disponibilités des accélérateurs de particules pour ces expériences sont limitées.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent nos travaux de thèse, menés en collaboration entre l'Institut de Recherche Technologique Saint Exupéry à Toulouse et l'Institut d'Electronique et des Systèmes à Montpellier dans le cadre du projet FELINE impliquant de nombreux partenaires industriels, utilisateurs potentiels des technologies GaN. Dans notre étude, nous avons exploré l'utilisation de techniques de test complémentaires pour évaluer la sensibilité de composants commerciaux HEMT GaN sur substrat Si face aux effets singuliers induits par les radiations. La première technique, dont l'efficacité a été démontrée sur les technologies silicium, consiste à injecter transitoirement de la charge à l'aide d'une impulsion laser. La seconde technique, d'émergence récente, consiste à réaliser cette injection de charge par une impulsion de rayons X focalisés.

### Caractérisation par impulsions laser focalisées

La technique de caractérisation par impulsion laser focalisée a été développée afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes qui sont à l'origine des effets singuliers des radiations. La technique consiste à focaliser des impulsions laser de courte durée dans le composant pour ioniser localement les couches semiconducteurs afin de reproduire l'injection de charge transitoire induite par le passage d'une particule unique. Ainsi, en faisant varier la localisation de l'impact de l'impulsion laser sur le composant, nous pouvons identifier les zones sensibles des composants de puissance.

Les paramètres expérimentaux pour ce type de test sont la largeur de l'impulsion au point de focalisation, la longueur d'onde et la durée d'impulsion. La taille

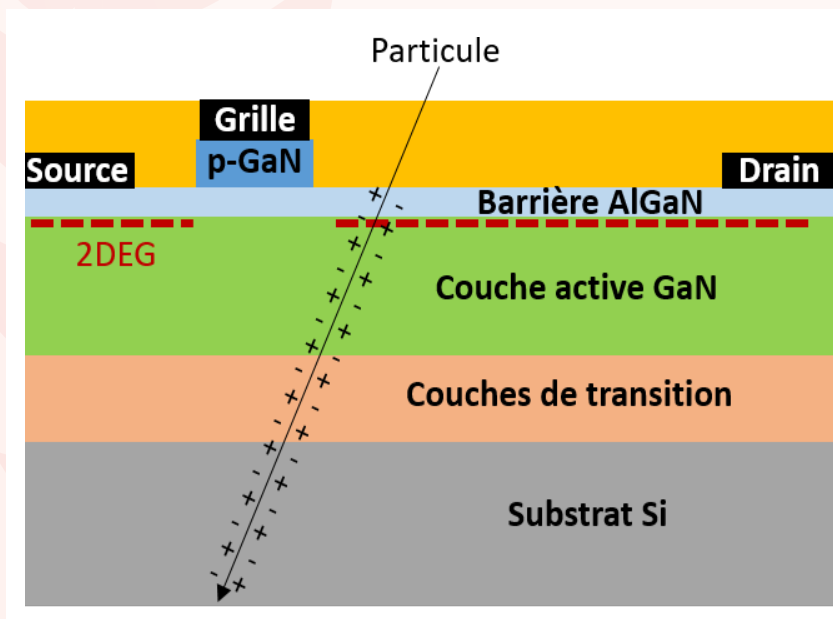


Figure 4 : Passage d'une particule à travers un HEMT GaN et ionisation des semiconducteurs le long de la trace d'ionisation.

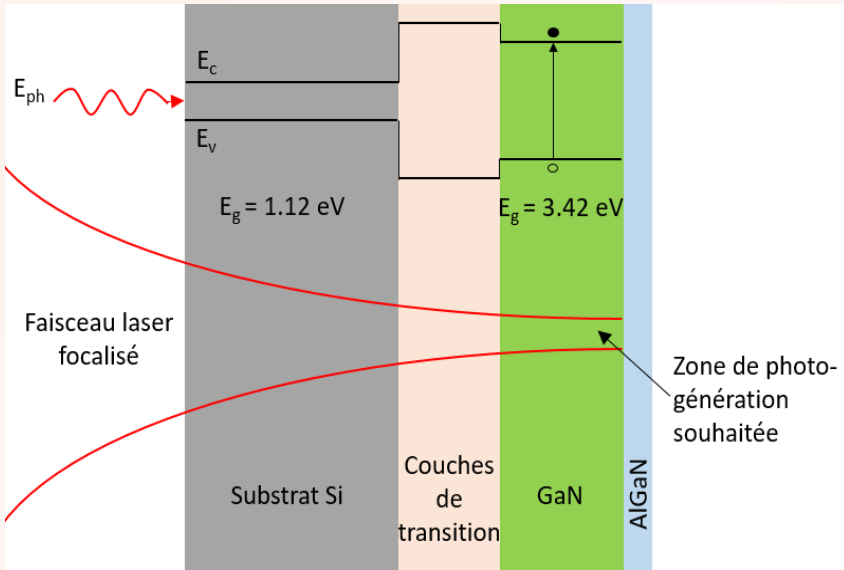


Figure 5 : Principe du test laser d'un HEMT GaN par la face arrière.

du spot laser doit être aussi proche que possible de celle de la trace d'ionisation d'un ion lourd dans le volume sensible, soit à la limite de diffraction. Les longueurs d'onde utilisées se trouvent généralement dans le domaine du visible et du proche infrarouge. L'impulsion doit être de courte durée, généralement inférieure à 100 ps, afin de reproduire le caractère transitoire du passage d'une seule particule. L'énergie de l'impulsion, qui est liée au nombre de photons, permet de moduler la quantité de charge injectée. L'interaction entre les photons et les semiconducteurs est basée sur un mécanisme d'absorption photoélectrique. Le régime d'interaction peut être linéaire ou non-linéaire (absorption multiphotonique). Les deux mécanismes communément exploités pour tester les technologies silicium sont l'absorption 1-photon (SPA) et l'absorption 2-photons (2PA).

Dans notre étude, nous avons cherché à injecter de la charge principalement dans la couche active GaN et, pour cela, un accès optique pour l'impulsion laser est requis (figure 5). Pour éviter le masquage du laser par les couches métalliques sur la face avant de la puce, nous avons focalisé l'impulsion laser dans la couche active en passant par la face arrière du composant. Le faisceau traverse

donc le substrat silicium et les couches de transition avant d'atteindre la couche GaN. Cependant, le silicium, qui a une énergie de bande interdite inférieure à celle du GaN absorbe des photons et, donc, atténue le faisceau. Des paramètres optiques adaptés devaient être utilisés pour que d'une part, une quantité

suffisante de photons atteigne la couche GaN et d'autre part, que l'absorption du faisceau permette de générer des paires électron-trou dans le GaN.

Nous avons donc adapté la technique de test par impulsion laser aux spécificités des composants commerciaux GaN sur substrat Si. Nous avons en particulier identifié et modélisé les mécanismes d'absorption exploitables parmi lesquelles l'absorption multiphotonique 3-photons (3PA). En effet, les mécanismes SPA et 2PA dans le GaN ne sont pas exploitables car, aux longueurs d'onde requises par ces mécanismes, la totalité des photons seraient absorbés dans le substrat Si. Nous avons alors mis en place un banc expérimental (figure 6) au laboratoire IES et réalisé des campagnes de tests laser qui nous ont permis d'obtenir les premiers résultats expérimentaux par absorption 3-photons dans ce type de composant.

Les résultats démontrent la capacité du test laser à induire des événements destructifs et non-destructifs dans ces composants

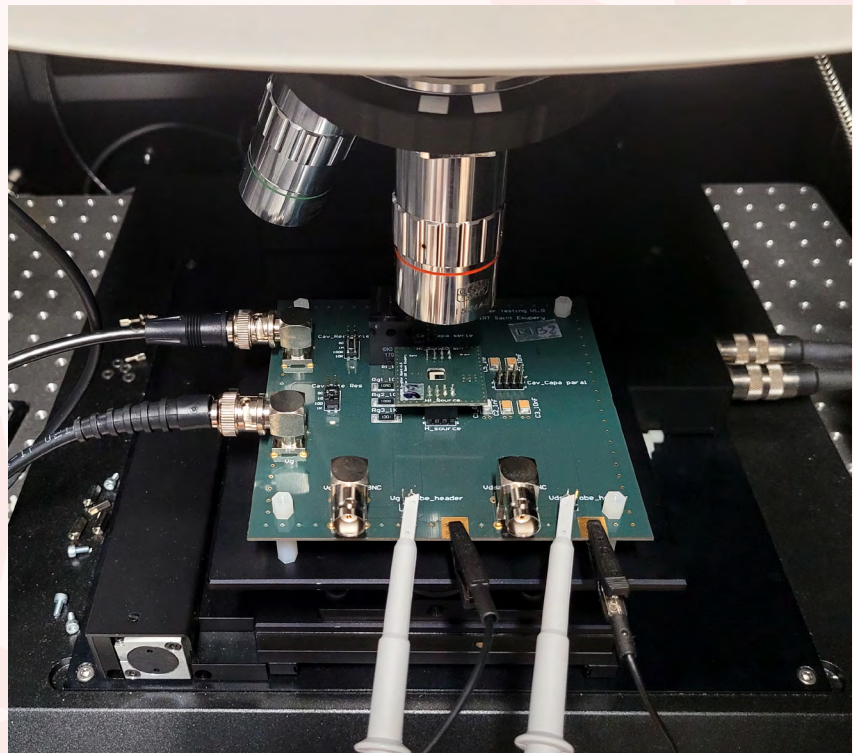


Figure 6 : Photographie du composant GaN monté sur la carte de test sous l'objectif du banc laser de l'IES de Montpellier.

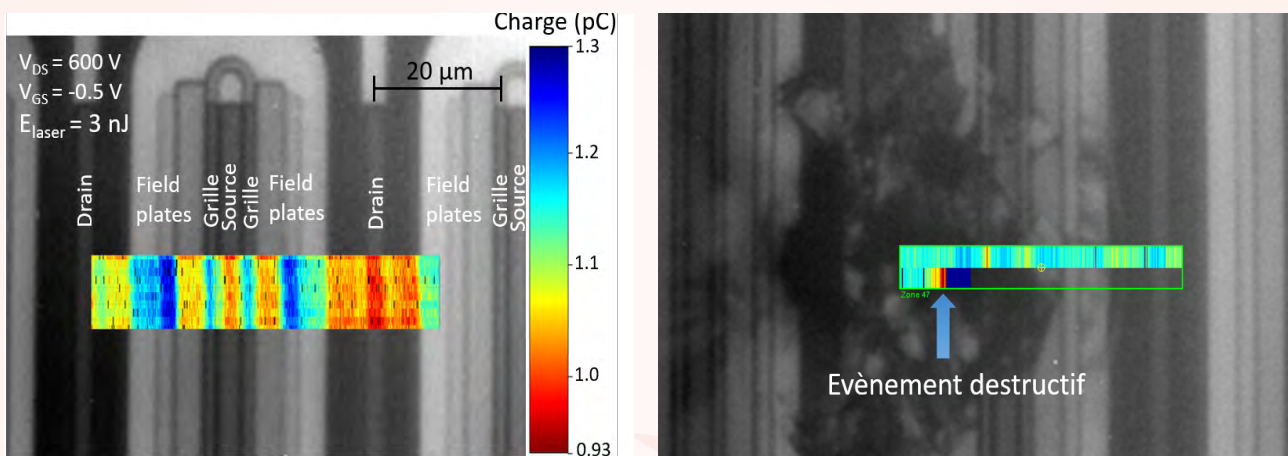


Figure 7 : Cartographie de la charge collectée des signaux transitoires montrant les zones de forte sensibilité (gauche) et évènement destructif visible induit par l'impulsion laser (droite).

avec une excellente résolution spatiale permettant de cartographier les zones de forte sensibilité (figure 7). L'utilisation de cette nouvelle technique pour l'analyse des mécanismes de collection de charge et de défaillance dans ces composants peut ainsi être envisagée dans le contexte d'une méthodologie de caractérisation des effets singuliers. L'observation d'évènements destructifs permet également d'envisager la détermination de l'aire de fonctionnement sous contrainte radiative<sup>1</sup>.

tons X utilisée est souvent de quelques keV, ce qui leur donne la capacité de traverser le boîtier et les interconnexions métalliques pour atteindre la zone active. C'est un avantage majeur pour l'évaluation des effets singuliers sur les composants GaN commerciaux car cela permet d'injecter de la charge par la face avant des composants, ce qui rend la préparation d'échantillons beaucoup moins complexe que pour le test laser.

Il est toutefois nécessaire de prendre en compte l'atténuation du faisceau de rayons X par les métallisations qui va dépendre de la position d'impact sur le composant. En effet, il apparaît des inhomogénéités cachées dans l'empilement des niveaux de métallisation dans le boîtier ce qui risque de produire une variabilité sur la charge déposée en fonction de la position de l'impact (figure 8). Il est donc important d'éva-

### Caractérisation par impulsions de rayons X focalisées

La caractérisation par impulsion de rayons X focalisés est une technique d'apparition récente qui permet également d'injecter de la charge de manière locale et transitoire afin de simuler le passage d'une particule. Elle fournit donc également une résolution spatiale et temporelle. Ce type de test est réalisé dans des installations de type synchrotron.

De même que pour le test laser, la largeur de focalisation doit être proche de la trace d'ionisation de l'ion lourd et la durée d'impulsion doit être courte. L'énergie des pho-

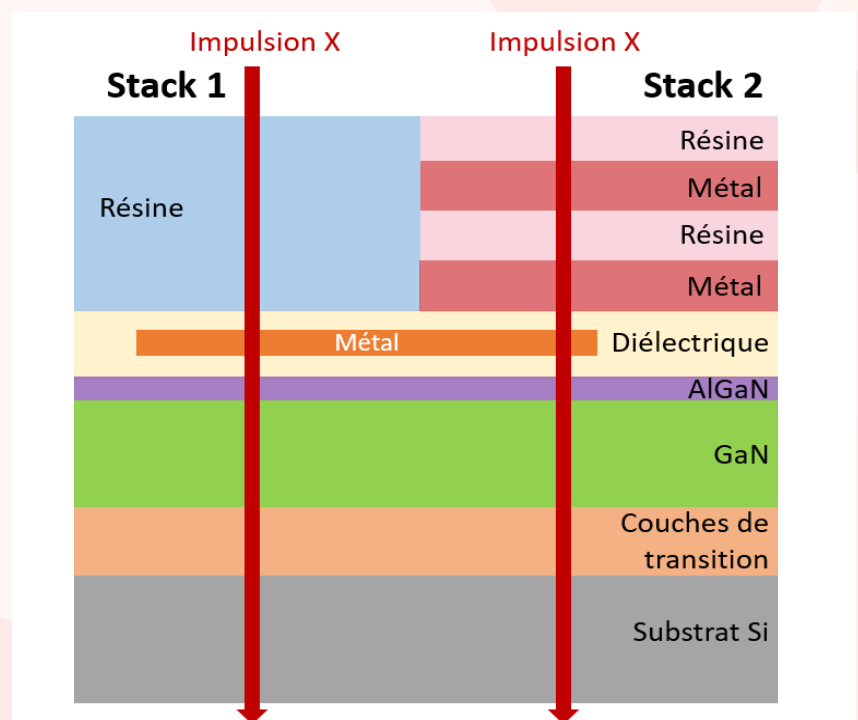


Figure 8 : Principe de l'injection de charge par impulsion de rayons X par la face avant sur des zones avec et sans métallisations dans le boîtier.

<sup>1</sup> C. Ngom, V. Pouget, M. Zerarka, F. Coccetti, A. Touboul, M. Matmat, O. Crepel, S. Jonathas, and G. Bascoul, 'Backside Laser Testing of Single-Event Effects in GaN-on-Si Power HEMTs', IEEE Transactions on Nuclear Scienc, vol. 68, no. 8, pp. 1642–1650, 2021.

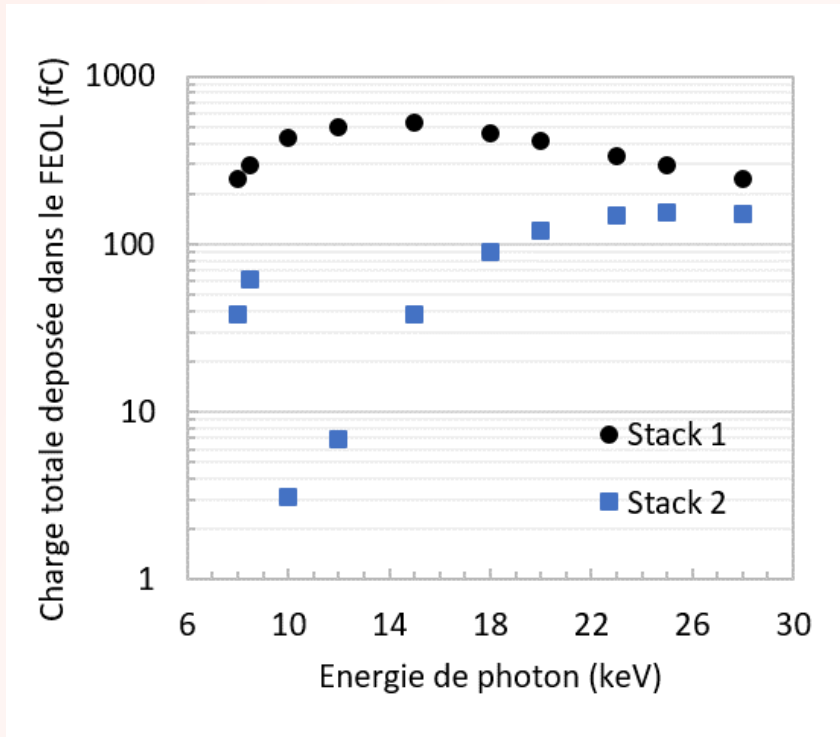


Figure 9 : Charge totale déposée dans les couches de semiconducteur pour différentes énergies de photon X par une impulsion de 1500 photons.

### L'auteure

**Catherine Ngom** a obtenu son Doctorat en électronique de l'Université de Montpellier en 2021. Elle est spécialisée dans l'étude des effets des radiations dans les composants électroniques. Elle travaille actuellement en tant qu'ingénieur de recherche en post-doctorat à l'IRT Saint Exupéry de Toulouse en collaboration avec l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) de Montpellier. Elle étudie les mécanismes à l'origine des défaillances sous contrainte radiative des composants à base de GaN.



luer d'une part, l'influence des couches métalliques épaisses sur la quantité de charge générée dans les couches actives du composant et d'autre part, leur impact sur le choix de l'énergie des photons X optimale.

Nous avons modélisé par méthode Monte-Carlo la physique de l'injection de charge dans des composants GaN par impulsion de rayons X focalisés. Cela nous a permis d'une part, d'identifier les énergies de photon X exploitables pour le test des composants GaN, d'autre part de quantifier la charge déposée dans les couches actives du composant (figure 9). Nous avons confirmé que les énergies de photon les plus élevées sont moins sensibles aux inhomogénéités du boîtier.

Une campagne expérimentale a alors été mise en place en collaboration avec le synchrotron de l'ESRF (Grenoble) (figure 10) qui a permis de valider la possibilité de tester les composants GaN commerciaux sans ouverture de boîtier.

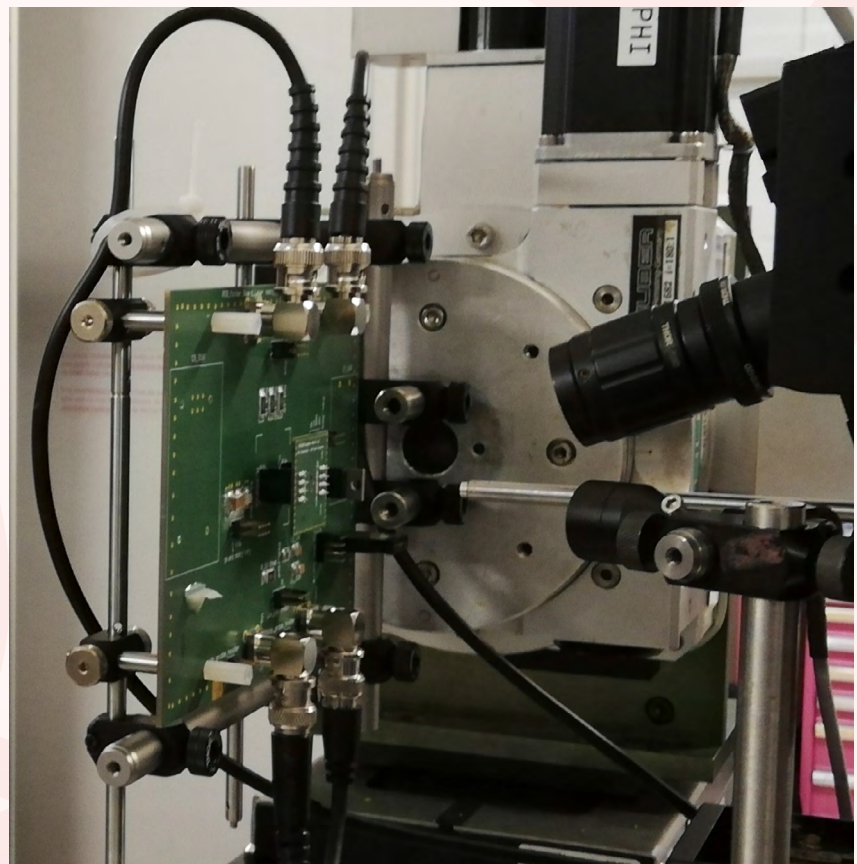


Figure 10 : Photographie du composant GaN monté sur la carte de test en face du faisceau X à l'ESRF de Grenoble.

- Nous avons également pu observer des signaux transitoires induits par les impulsions de rayons X (figure 11) et démontrer qu'il est possible de générer des effets singuliers avec cette méthode de test.

## Comparaison des différentes méthodes de caractérisation

### Corrélation laser/ion lourd et rayon X/ion lourd

La possibilité de reproduire qualitativement les effets singuliers des radiations à l'aide des techniques décrites ci-dessus n'est pas suffisante pour en faire des techniques alternatives aux tests classiques en accélérateur de particules. En effet, une corrélation quantitative doit également être recherchée.

Cette corrélation s'appuie sur une hypothèse d'équivalence des effets lorsqu'un ion lourd et une impulsion de photons génèrent la même quantité de charge dans le volume sensible

du composant. Cependant, les mécanismes d'interaction sont différents et donc, par conséquent, les distributions de charge injectée. En l'état actuel de la compréhension des mécanismes conduisant à la défaillance, un premier niveau de correspondance quantitative peut être établi, mais des modélisations et des expériences complémentaires restent nécessaires pour confirmer cette corrélation. Un effort important de modélisation est ainsi en cours dans le cadre du projet GaNRET porté par l'IRT Saint Exupéry.

**“ La possibilité de reproduire qualitativement les effets singuliers des radiations à l'aide des techniques décrites ci-dessus n'est pas suffisante pour en faire des techniques alternatives aux tests classiques en accélérateur de particules. En effet, une corrélation quantitative doit également être recherchée. ”**

### Complémentarité des techniques

Nos travaux ont démontré la possibilité de créer le même type d'événements dans les composants de puissance GaN avec chaque méthode de test (ions lourds, laser, rayons X), chacune ayant des avantages et des limitations.

La technique de *caractérisation par ions lourds*, pour laquelle des standards existent, permet d'avoir une bonne représentativité de l'environnement radiatif spatial et est mieux adaptée pour obtenir des statistiques de défaillance. En termes de limitations, cette technique ne permet pas l'identification des zones sensibles du composant et, dans certains cas, les ions ne peuvent atteindre la zone sensible du composant. Notons que les ions lourds peuvent également créer des défauts dans le réseau cristallin à l'origine de mécanismes de dégradation cumulative (effets de dose non-ionisante).

Le *test par impulsion laser* offre une excellente résolution spatiale permettant la cartographie des zones sensibles du composant. Il est plus accessible car les tests ont l'avantage de se faire en laboratoire, il ne produit pas de dégradation cumulative, mais les résultats restent qualitatifs pour les technologies GaN. Tout comme pour les ions lourds, une contrainte majeure est la préparation d'échantillons qui consiste notamment à l'ouverture du boîtier et à l'amincissement de l'épaisseur du substrat.

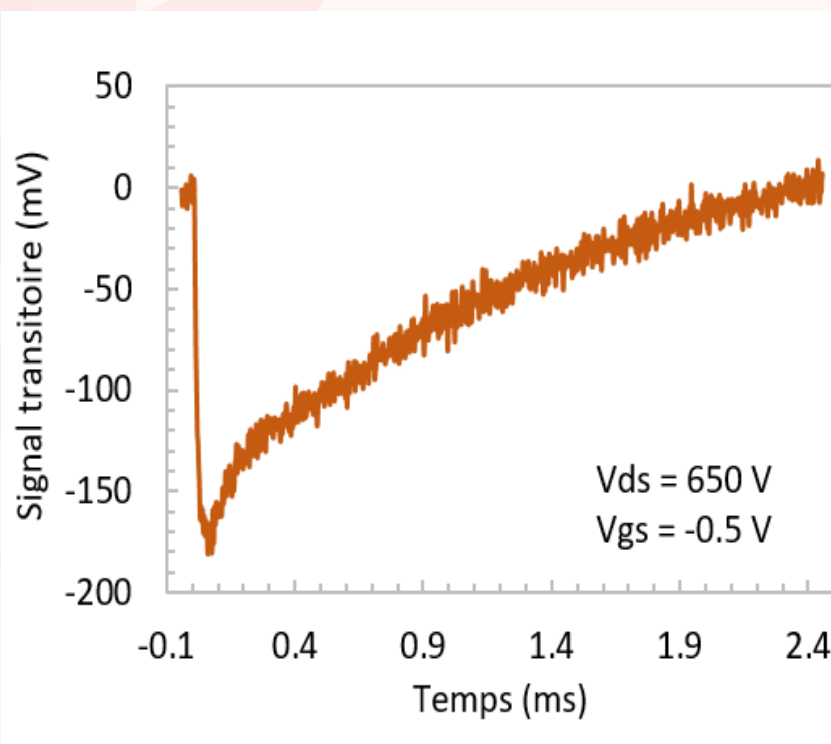


Figure 11 : Signal transitoire de tension observée sous impulsions de rayons X.

**“ Le choix de la technique de caractérisation des effets singuliers peut dépendre de plusieurs critères notamment l’objectif du test et les ressources disponibles. Le test laser est conseillé en priorité si nous souhaitons identifier les zones sensibles du composant. ”**

Le test par impulsion de rayons X donne également des résultats qualitatifs et permet une profondeur de pénétration plus importante que celle des ions, simplifiant ainsi la préparation d'échantillons. La résolution spatiale accessible est à l'heure actuelle moins bonne que celle du test laser ce qui rend l'identification des zones sensibles difficile. Les rayons X induisent également un effet de dégradation cumulative par piégeage de charge dans les diélectriques (effet de dose ionisante).

Le choix de la technique de caractérisation des effets singuliers peut dépendre de plusieurs critères notamment l'objectif du test et les ressources dispo-

nibles. Le test laser est conseillé en priorité si nous souhaitons identifier les zones sensibles du composant. Le test sous ions lourds est préférable pour réaliser une étude paramétrique non destructive, déterminer l'aire de fonctionnement et la probabilité des événements destructifs. Dans le cas où les ions ne peuvent pas atteindre la zone active et qu'une préparation d'échantillons n'est pas envisageable, le test sous rayons X peut constituer une solution intéressante.

### Conclusion

Les travaux réalisés nous ont permis de démontrer la faisabilité de l'injection de charge dans les composants commer-

ciaux GaN sur substrat Si avec des impulsions laser par absorption 3-photons et avec des impulsions de rayons X focalisés. Nous avons montré la complémentarité des techniques et cela nous a amenée à proposer une méthodologie de choix de la technique la mieux appropriée en fonction des objectifs dans un contexte industriel <sup>2</sup>.

A terme, les méthodes de test proposées pourront d'une part, contribuer à l'élaboration de futurs standards industriels de test permettant la maturation et la qualification des technologies GaN en vue de leur intégration dans des applications de haute fiabilité en environnement radiatif, et d'autre part conduire à la mise au point de nouveaux équipements de test à destination des laboratoires d'analyse, des fabricants de semi-conducteurs et des équipementiers du spatial et de l'aéronautique. ■

<sup>2</sup> Catherine Ngom, 'Développement d'une Méthodologie Par Rayons X et Laser Impulsionnel Pour l'évaluation Des Effets Des Radiations Sur Les Composants Semiconducteurs Avancés.', Thèse en Electronique de l'Université Montpellier, 2021. Français.

## Résumé

Les composants de puissance en technologie GaN évoluant en environnement radiatif peuvent subir des défaillances dues aux effets singuliers des radiations. Nous avons étudié deux méthodes de caractérisation basées sur l'utilisation d'impulsions laser et d'impulsions de rayons X et nous avons démontré leur faisabilité dans le cas de composants GaN commerciaux. Avec ces deux méthodes, nous avons généré le même type d'événements observés lors de tests standards en accélérateur de particules. Toutefois, le test laser présente un intérêt supplémentaire qui est la possibilité de cartographier les zones sensibles du composant et le test par rayons X permet d'atteindre la zone active du composant dans le cas où la profondeur de pénétration des ions est limitée. Le choix de la méthode la plus appropriée va ainsi dépendre du résultat recherché. ■

## Abstract

GaN-based power devices operating in a radiative environment can suffer failures due to radiation-induced single event effects. We have studied two characterization methods based on the use of laser pulses and X-ray pulses and we have demonstrated their feasibility in the case of commercial GaN components. With these two methods, we generated the same type of events as the ones observed during standard tests using particle accelerators. However, the laser test has an additional interest, namely the possibility of mapping the sensitive areas of the device and the X-ray test allows to reach the active area of the device in the case where the penetration depth of the ions is limited. The choice of the most appropriate method will then depend on the desired result. ■