

Etude de la stabilité de la résistance à l'état passant $R_{DS(on)}$ sur des composants GaN en fonctionnement

Lucas Moreau ¹, Marc Orsatelli ¹, Emmanuel Marcault ¹, Cyril Chabot ¹, Alonso Gutierrez-Galeano ¹,

Mathieu Gavelle ¹, Valéria Rustichelli ², Mohamed Matmat ², Laurent Guillot ³

¹ CEA, Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, 51 rue de l'Innovation, 31670 Labège

² IRT Saint Exupéry, 3 rue Tarfaya, 31400 Toulouse

³ STMicroelectronics Toulouse, 51 rue de l'Innovation, 31670 Labège

RESUME – Cet article présente l'évolution de la résistance dynamique à l'état passant $R_{DS(on)}$ de transistors en Nitrure de Gallium en fonctionnement. La résistance dynamique à l'état passant ($R_{DS(on)}$) est déterminée à partir des signaux de tension drain-source ($V_{DS(on)}$) et de courant drain-source (I_{DS}), mesurés à l'aide de sondes de courant et d'un circuit de clamp sur un banc de test développé, appelé « Multipulse ». Les mesures ont été réalisées sur 2 types de composants GaN/Si HEMT pGaN du commerce : les composants 1 (650V-30A-50mΩ) et les composants 2 (200V-14A-15mΩ). 20 puces différentes ont été testées par type de composant soit un total de 40 puces pour lesquelles des variations ont été appliquées concernant les paramètres de fréquence de commutation (100 kHz et 500 kHz) et de température (Température ambiante et 125°C). Les résultats montrent une faible évolution du $R_{DS(on)}$ dans le temps et au fur et à mesure des impulsions ainsi qu'une assez faible dispersion entre les différentes puces et une augmentation du $R_{DS(on)}$ avec la température, comme prévu par la datasheet.

Mots-clés— Transistors GaN ; banc « Multipulse » ; $R_{DS(on)}$ dynamique

1. INTRODUCTION

Les composants à grand gap, tels que le nitrure de gallium, sont de plus en plus adoptés dans les systèmes d'électronique de puissance pour leur capacité à fonctionner à haute température, à haute fréquence et à haut rendement [1]. Par conséquent, il est crucial de comprendre les caractéristiques intrinsèques de ces composants en fonctionnement et dans le temps. Il est notamment important d'étudier la stabilité de la résistance à l'état passant en conduction ($R_{DS(on)}$ dynamique), qui est un facteur de mérite important pour les interrupteurs de puissance. Un faible $R_{DS(on)}$ dynamique permet de minimiser les pertes de puissance et améliore l'efficacité énergétique du système.

Le $R_{DS(on)}$ dynamique est une mesure de résistance effective entre le drain et la source d'un transistor lorsqu'il est en conduction. Il se distingue du $R_{DS(on)}$ statique, mesuré en régime permanent. Les $R_{DS(on)}$ dynamiques dépendent des tensions drain-source $V_{DS(on)}$ et des courants drain-source I_{DS} lorsque le composant est en conduction, selon la formule $R_{DS(on)} = V_{DS(on)} / I_{DS}$ [2]. L'évolution de ces $R_{DS(on)}$ en fonction de la température a déjà été étudié en [3][4][5].

L'objectif est ici d'utiliser une nouvelle méthode de mesure décrite dans le paragraphe 2.1 dans la suite de cet article. Une quantité suffisante de données avec différents paramètres variables, tels que la fréquence de commutation et la température, est nécessaire pour permettre de faire des

statistiques et d'avoir une idée plus précise sur la fiabilité des composants du commerce et leur stabilité. Deux références de transistors distincts seront étudiées dans cet article.

2. EXTRACTION DES VALEURS DE $R_{DS(on)}$ DYNAMIQUES A L'AIDE D'UN BANC « MULTIPULSE » ET ANALYSE STATISTIQUE

2.1 Présentation du banc « Multipulse »

Le banc de test développé a pour but d'évaluer les performances des transistors de puissance dans des conditions proches de leur application, en suivant les recommandations de la norme JEDEC JEP173. [6]

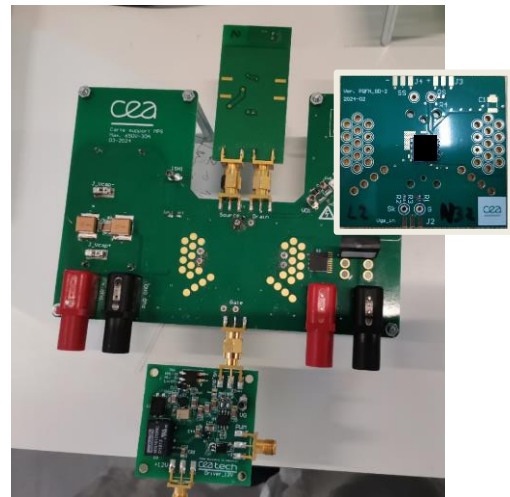
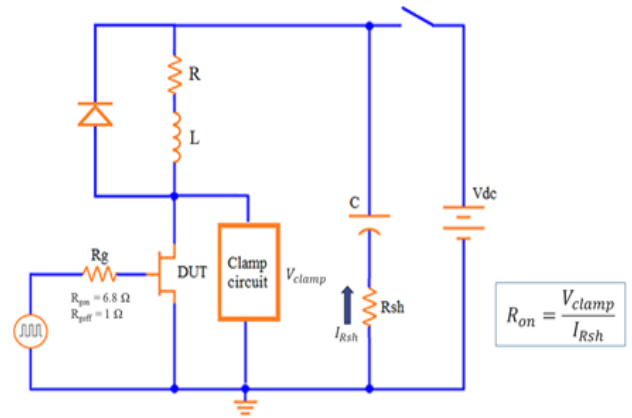


Figure 1: Banc « Multipulse » conforme à la norme JEDEC JEP 173

Basé sur une architecture demi-pont, le dispositif à tester est placé en low side avec une diode de roue libre et une charge inductive-résistive en high side pour la régulation du courant (voir Figure 1). Le signal de grille est généré par un gate driver conçu pour envoyer des impulsions d'amplitude égale à 10V (de -4V à +6V) lorsqu'il est piloté par un générateur basses fréquences. Un circuit de clamp est intégré pour extraire la tension résiduelle $V_{DS(on)}$ et déterminer la résistance à l'état passant ($R_{DS(on)}$) du dispositif sous test (DUT). Le banc de test offre un contrôle optimisé des boucles de commande et de puissance, et est conçu pour évaluer les améliorations des dispositifs, les évolutions technologiques et les prototypes. Un capteur de courant est intégré avec une bande passante de 500 MHz, optimisant la mesure du courant I_{DS} avec un impact limité sur les performances.

Sur ce banc, une température allant de -50°C jusqu'à 175°C peut être appliquée au DUT grâce à une station de régulation thermique (voir Figure 2). Pour assurer une bonne conduction thermique, de la pâte thermique est appliquée entre la station de régulation thermique et le composant. La température du composant est régulièrement vérifiée à l'aide de thermocouples.

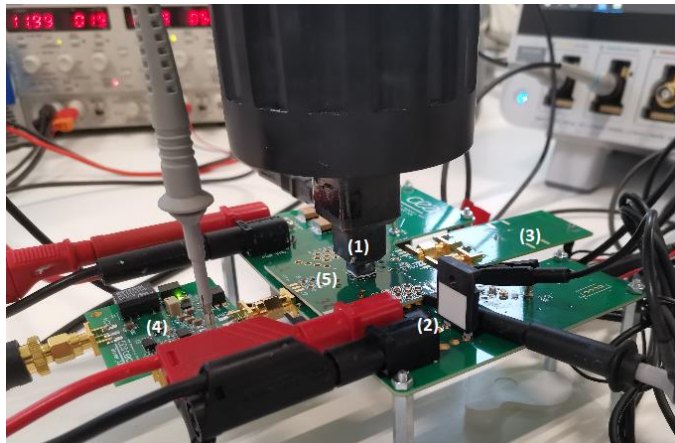


Figure 2 : Photo du banc « Multipulse » avec régulation en température

Sur cette Figure 2, on peut voir les différents éléments qui composent le banc « Multipulse » :

- (1) : Station de régulation thermique
- (2) : Charges inductive et résistive
- (3) : Circuit de clamp pour extraire les signaux $V_{DS(on)}$ avec une sonde différentielle de bande passante 1 GHz
- (4) : Gate driver (-4 V à 6 V)
- (5) : Coupon de test (carte fille de stress) développé afin de pouvoir tester plusieurs composants sur le même banc.

A partir de ce banc et des signaux extraits (voir Figures 3 et 4), il est possible de mesurer plusieurs paramètres, tels que la tension de seuil (V_{th}), les temps de mise en conduction et de blocage du transistor ($t_{d(on)}$ et $t_{d(off)}$), les énergies de commutation ou encore les résistances à l'état passant ($R_{DS(on)}$). C'est uniquement ce dernier paramètre qui va nous intéresser dans cet article.

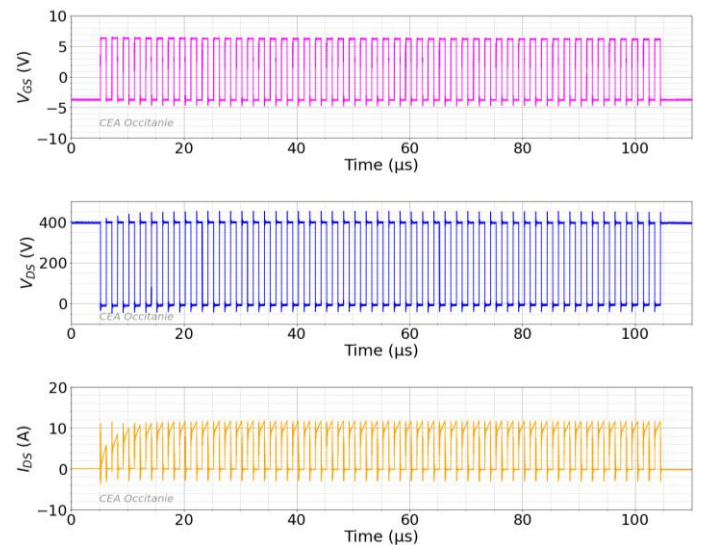


Figure 3 : Formes d'onde des tensions et courants V_{GS} , V_{DS} et I_{DS} obtenus avec le banc développé avec une fréquence de découpage 500kHz et pour une durée de 100 μ s

2.2 Plan de test

Pour cette étude nous avons choisi d'analyser 2 composants GaN/Si HEMT pGaN du commerce :

- Les composants 1 dont le $R_{DS(on)}$ typique en mesure statique est de 50 m Ω (max 68 m Ω) à 25°C et de 127 m Ω à 125°C, d'après la datasheet.
- Les composants 2 dont le $R_{DS(on)}$ typique en mesure statique est de 15 m Ω (max 22 m Ω) à 25°C et de 25 m Ω à 125°C, d'après la datasheet.

Ici, l'objectif est de mesurer les variations des paramètres $V_{DS(on)}$ et I_{DS} à l'aide de ce banc afin d'extraire les variations de $R_{DS(on)}$ dynamique et estimer sa stabilité dans un environnement d'opération représentatif du cas applicatif. Pour cela, on réalise 50 commutations du composant en envoyant des impulsions sur la grille (V_{GS} allant de -4 à 6V) et on mesure $V_{DS(on)}$ et I_{DS} grâce à des sondes différentielles et passives respectivement. La Figure 3 montre les formes d'onde d'un test de commutation « Multipulse » réalisé à 400 V et 10 A, avec une fréquence de commutation de 500 kHz et une durée totale de 100 μ s pour minimiser l'auto-échauffement et garantir, lors du stress, un impact négligeable de la température sur les variations potentielles des paramètres observés.

Les signaux V_{GS} , V_{DS} et I_{DS} sont mesurés avec une bande passante de 500 MHz, afin d'extraire des résultats avec une fréquence d'échantillonnage suffisante pour une bonne résolution des mesures. Ainsi, la bande passante et la résolution temporelle d'acquisition (200ps) permettent d'observer les transitions ON et OFF de façon plus précise et de vérifier la qualité des signaux (voir Figure 4).

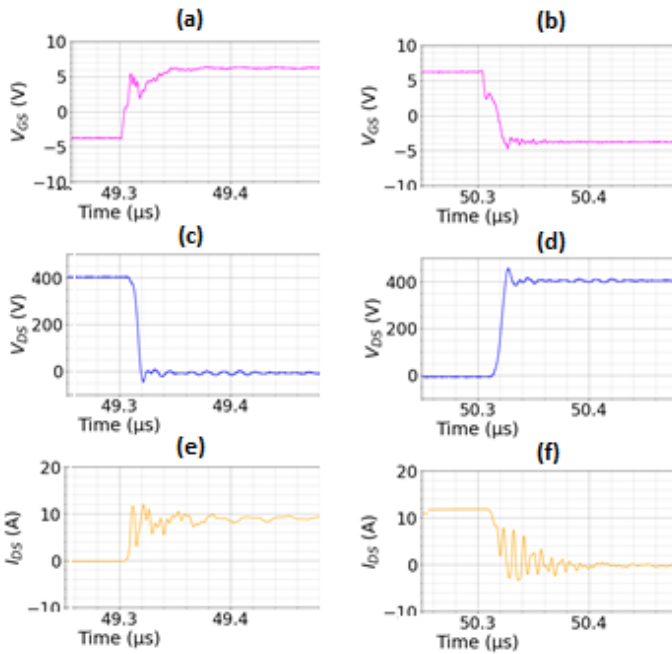


Figure 4 : Signaux du banc « Multipulse » lors de la mise ON et OFF du composant

- (a): V_{GS} lors de l'amorçage du DUT
- (b): V_{GS} lors du blocage du DUT
- (c): V_{DS} lors de l'amorçage du DUT
- (d): V_{DS} lors du blocage du DUT
- (e): I_{DS} lors de l'amorçage du DUT
- (f): I_{DS} lors du blocage du DUT

Pour chaque impulsion, l'évolution des $R_{DS(on)}$ est extraite. La Figure 5 représente de façon superposée les $R_{DS(on)}$ durant les états passants de chacune des 50 impulsions de l'essai « Multipulse ».

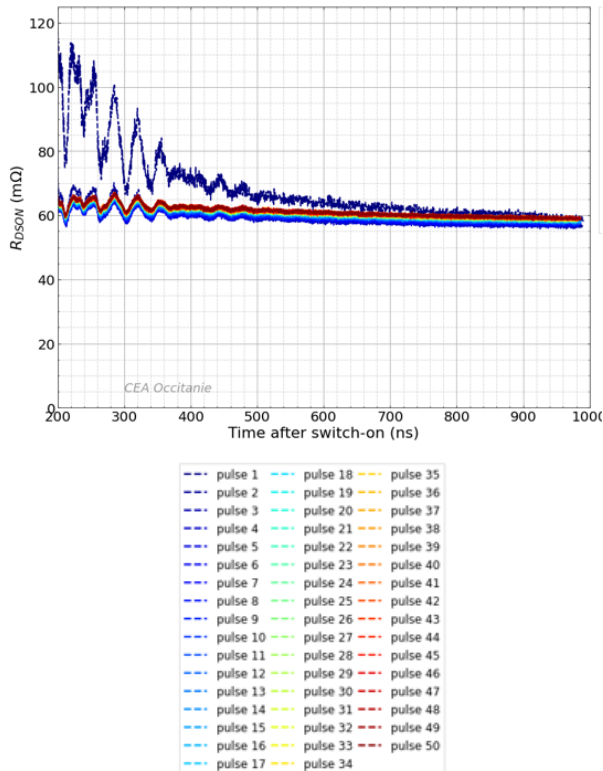


Figure 5 : Evolution du $R_{DS(on)}$ 200ns après la commutation pour chacune des 50 impulsions

On observe une stabilisation des signaux au bout de quelques centaines de nanosecondes, due à la dynamique de circuit de clamp. Les oscillations observées en début d'impulsions sont principalement dues à la réponse dynamique du circuit de clamp et à la configuration de test. En effet, les composants sont soudés sur des coupons de tests pour faciliter la mise en œuvre de mesures sur des composants multiples, mais cela peut ajouter des parasites qui peuvent légèrement affecter les formes d'ondes (voir Figure 4). C'est pourquoi les valeurs de $R_{DS(on)}$ seront relevées 500 nanosecondes après la mise ON du circuit.

Afin d'évaluer l'influence de la fréquence et de la température sur ces résultats, le plan de test détaillé dans le tableau 1 a été défini. Il permet de tester 5 puces par condition de test, soit 40 puces au total afin de pouvoir réaliser une analyse statistique et estimer les dispersions.

Reference	DUT	V_{DS} (V)	Fréquence (kHz)	Température (°C)
Composant 1 650V / 30A	5 DUT	400 V	100 kHz	25 °C
	5 DUT	400 V	500 kHz	25 °C
	5 DUT	400 V	100 kHz	125 °C
	5 DUT	400 V	500 kHz	125 °C
Composant 2 200V / 14A	5 DUT	160 V	100 kHz	25 °C
	5 DUT	160 V	500 kHz	25 °C
	5 DUT	160 V	100 kHz	125 °C
	5 DUT	160 V	500 kHz	125 °C
Total	40 DUT			

Tableau 1 : Plan de test des composants pGaN sur le banc « Multipulse »

2.3 Résultats

Un programme développé spécialement pour ce banc de test récupère toutes les données acquises par l'oscilloscope et permet de les traiter afin d'observer l'évolution des $R_{DS(on)}$ entre chaque pulse comme montré en Figure 6. Ce programme permet aussi de comparer les composants entre eux, de faire de la statistique, et de traiter les données de façon cohérente par rapport à la dynamique des signaux observés pour extraire des résultats en adéquation avec ce que nous souhaitons analyser. Tout cela contribue au tri des composants pour pouvoir les associer avant leur utilisation dans une application par exemple, en écartant les composants ayant une trop grande dispersion.

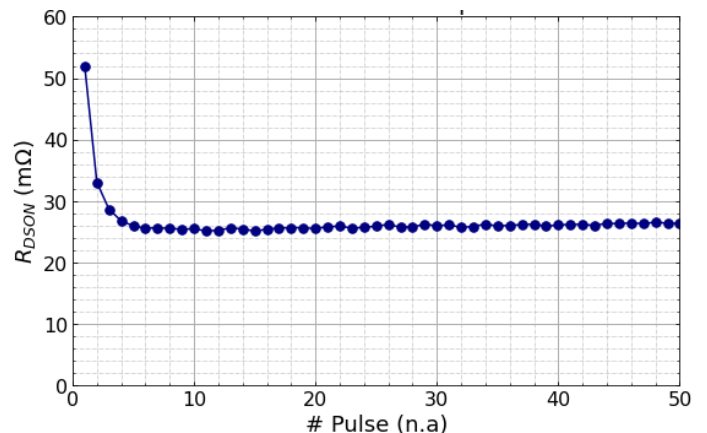


Figure 6 : Evolution du $R_{DS(on)}$ pour une puce du composant 2 sur l'ensemble des 50 impulsions

Pour chaque puce, le $R_{\text{DS(on)}}$ moyen a aussi été calculé sans prendre en compte les 10 premières impulsions. En effet, durant ces premières impulsions, le courant n'a pas encore atteint sa valeur nominale, ce qui rend incohérent la comparaison du $R_{\text{DS(on)}}$ extrait avec les valeurs suivantes.

Les résultats obtenus dans chaque condition sont résumés sous forme de « boxplots » dans les Figures 7 et 8. Pour le composant 1 (Figure 7), on observe tout d'abord que ces mesures sont proches de celles fournies en statique par la datasheet. En effet, le $R_{\text{DS(on)}}$ est inférieur au maximum donné (68 mΩ) à température ambiante par exemple. La légère augmentation par rapport à la valeur typique de 50mΩ peut s'expliquer par un léger auto-échauffement du composant et par le fait qu'on applique un courant I_{DS} plus élevé que dans la datasheet (10A contre 5.5A).

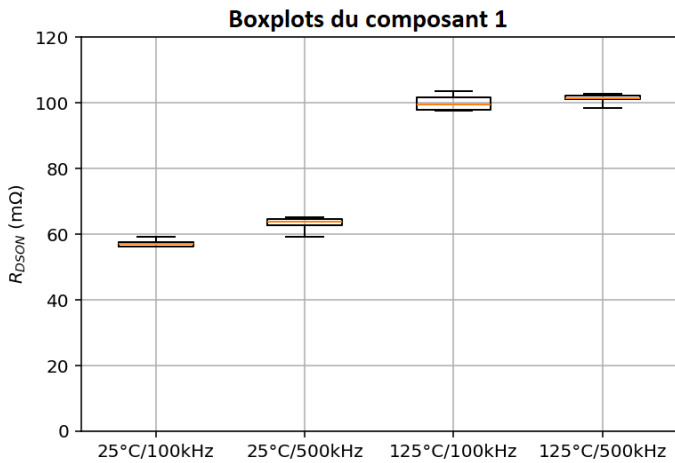


Figure 7 : Evolution du $R_{\text{DS(on)}}$ pour les 20 puces du composant 1, en fonction des différents paramètres

De plus, il n'est pas forcément judicieux de comparer les valeurs de $R_{\text{DS(on)}}$ en statique et en dynamique car les méthodes d'extraction sont très différentes et les effets de piègeages observés uniquement en dynamique peuvent faire augmenter ces résistances à l'état passant. C'est le cas par exemple avec le composant 2 (Figure 8). Ces mesures supérieures à la datasheet (environ 25 mΩ en dynamique contre 22 mΩ maximum donnés par la datasheet à 25°C) peuvent aussi s'expliquer par la difficulté d'assemblage sur coupons pour ce type de composant,

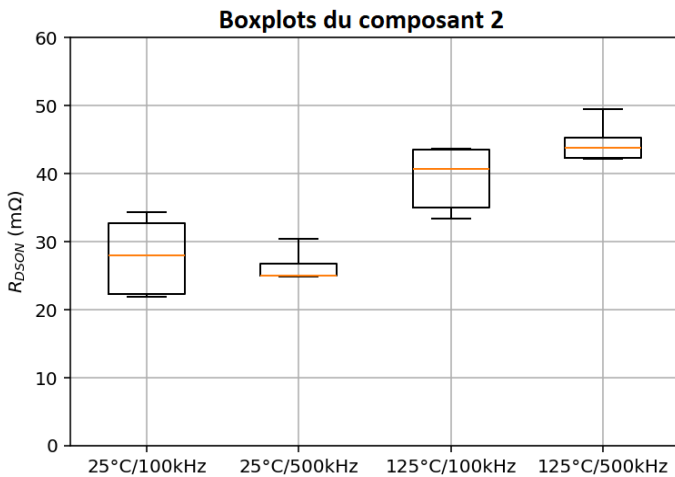


Figure 8 : Evolution du $R_{\text{DS(on)}}$ pour les 20 puces du composant 2, en fonction des différents paramètres

ce qui peut engendrer une résistance parasite supplémentaire. A 100kHz, la dispersion est également plus importante. Cela peut s'expliquer, en plus des éventuels problèmes d'assemblage, par un possible auto-échauffement sur certaines puces, en raison de la fréquence de commutation qui est plus faible, ce qui entraîne des durées d'impulsions plus longues.

Par rapport aux paramètres que nous avons fait varier, pour les 2 types de composants, la fréquence a assez peu d'influence sur les mesures de la résistance à l'état passant $R_{\text{DS(on)}}$ tandis qu'une augmentation de la température jusqu'à 125°C entraîne une augmentation de ce $R_{\text{DS(on)}}$. Cela semble assez logique au vu des données fournies en statique par la datasheet et des mesures déjà étudiées par le passé [3][4].

La faible dispersion des résultats (hormis pour les composants 2 à 100kHz) permet également de valider la stabilité des $R_{\text{DS(on)}}$ dans un même lot de composants, en plus de la stabilité de ces résistances à l'état passant observées précédemment sur chaque impulsion d'un même composant.

3 CONCLUSION

Une méthodologie d'extraction de la stabilité des $R_{\text{DS(on)}}$ sur des composants en fonctionnement a été décrite.

Les résultats montrent, pour la plupart, une faible dispersion entre les composants. Aucune variation significative des $R_{\text{DS(on)}}$ n'a été montrée en changeant la fréquence des tests alors qu'une augmentation de la température a pour conséquence d'augmenter ce $R_{\text{DS(on)}}$ de façon importante, comme attendu. Les résultats montrent également la montée en maturité des composants GaN pour des applications industrielles plus robustes qu'auparavant.

Les prochaines étapes de cette étude consisteront à effectuer de nouveaux tests en commutations sur d'autres composants du commerce, différents de ceux testés ici. Des composants en carbure de Silicium (SiC) pourraient par exemple être étudiés. La variation d'autres paramètres pourra être extraite, tel que la tension de seuil V_{th} pendant le fonctionnement des composants, ou les énergies de commutation. En effet, certaines données étant déjà acquises, de nouvelles fonctionnalités pourraient être ajoutées au programme de traitement de données réalisé pour étudier ces autres paramètres, importants pour la compréhension de ces dispositifs GaN et l'étude de leur fiabilité.

4 REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet GANRET (GaN Reliability Evaluation for Transport) porté par l'IRT Saint Exupéry.

Nous remercions les membres industriels et académiques du projet GANRET pour leur soutien financier, ainsi que l'Etat français pour son appui financier via le programme France 2030 référencé ANR-10-AIRT-01.

Membres industriels de GANRET : ALTER Technology, STMICROELECTRONICS, AIRBUS DEFENCE AND SPACE, AIRBUS SAS, SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE, THALES ALENIA SPACE FRANCE, SCHAEFFLER (VITESCO), TRAD, NUCLETUDES, WISE INTEGRATION.

Membres académiques de GANRET : AMPERE, LAAS, IES, SATIE, CEA, ICAM, DGA, CNES, ESRF.

5 REFERENCES

- [1] A. I. Emon, Mustafeez-ul-Hassan, A. B. Mirza, J. Kaplun, S. S. Vala and F. Luo, "A Review of High-Speed GaN Power Modules: State of the Art, Challenges, and Solutions," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 3, pp. 2707-2729, June 2023
- [2] B. Lu, T. Palacios, D. Risbud, S. Bahl and D. I. Anderson, "Extraction of Dynamic On-Resistance in GaN Transistors: Under Soft- and Hard-Switching Conditions," *2011 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, Waikoloa, HI, 2011, pp. 1-4
- [3] Manuel Antero Gonzalez Sentis. Caractérisation des mécanismes de défaillance des transistors de puissance en GaN en régime de commutation. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2020.
- [4] Cyrille Gautier, Lionel Hoffmann, Francois Costa, Stéphane Lefebvre. Étude du comportement thermique d'un composant GaN de puissance. Symposium de Génie Électrique 2014, Juillet 2014, Cachan, France.
- [5] R. Hou and J. Lu, "The Effect of Dynamic On-State Resistance to System Losses in GaN-based Hard-Switching Applications," *PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, 2019, pp. 1-7.
- [6] JEDEC JEP173, "Dynamic ON-Resistance Test Method Guidelines for GaN HEMT based Power Conversion Devices", Version 1.0, Janvier 2019.