

Étude des variations des caractéristiques I - V des diodes de puissance à températures cryogéniques : Influence du boîtier

Yasmine BAAZIZI^{1,2}, Lauro FERREIRA^{1,2}, Simon MEUNIER^{1,2}, Tanguy PHULPIN^{1,2}, Loïc QUÉVAL^{1,2}

¹ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, 91192, Gif-sur-Yvette, France.

² Sorbonne Université, CNRS, GeePs, 75252, Paris, France.

RESUME - Dans cet article, nous étudions les variations des caractéristiques I - V des diodes de puissance à température ambiante (293 K) et à température cryogénique (77 K). Cette étude exploratoire se concentre sur deux phénomènes observés lors de la caractérisation à 77 K : le zigzag et l'auto-échauffement. Une approche expérimentale est utilisée pour examiner l'influence du boîtier, en comparant deux diodes, chacune dans trois boîtiers différents. Les résultats révèlent des différences significatives dans les caractéristiques I - V en fonction du boîtier, tant à température ambiante qu'à température cryogénique. L'analyse montre que l'auto-échauffement ne semble pas être le facteur principal de ces variations, bien qu'il diffère selon les boîtiers. En outre, le motif en zigzag observé à 77 K ne semble pas non plus lié au type de boîtier. D'autres possibilités, telles que la technologie des diodes ou les niveaux de tension et de courant, demeurent à étudier afin d'expliquer ces phénomènes.

Mots-clés— *Diodes de puissance, température cryogénique, boîtier, caractéristique I - V .*

1. INTRODUCTION

Face aux exigences croissantes de certaines applications telles que l'énergie éolienne [1], l'aviation électrique [2], le transport maglev [3] ou encore les sous-stations de traction basées [4][5], les convertisseurs cryogéniques suscitent un intérêt croissant. Dans ce contexte, nous avons caractérisé des dizaines de diodes de puissance à la fois à 293 K et à 77 K. Les résultats sont disponibles dans notre base de données qui sera prochainement en libre accès en ligne [6]. Ces diodes présentaient des technologies, des tensions/courants nominaux et des types de boîtiers différents.

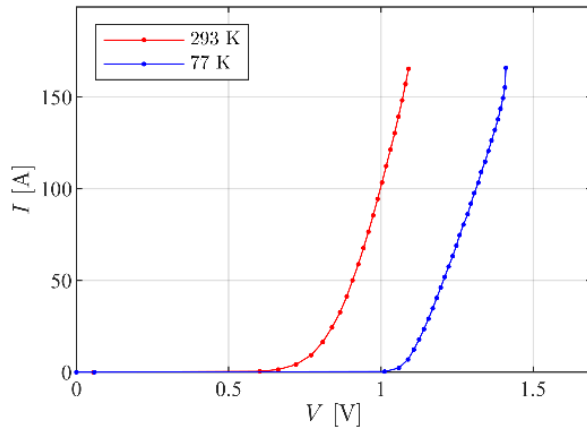
Les caractéristiques I - V d'une diode dépendent de la température. En général, la caractéristique directe I - V à 77 K

est translatée, affichant une tension de seuil supérieure par rapport à la caractéristique à 293 K, alors que la résistance reste relativement inchangée (voir Fig. 1a).

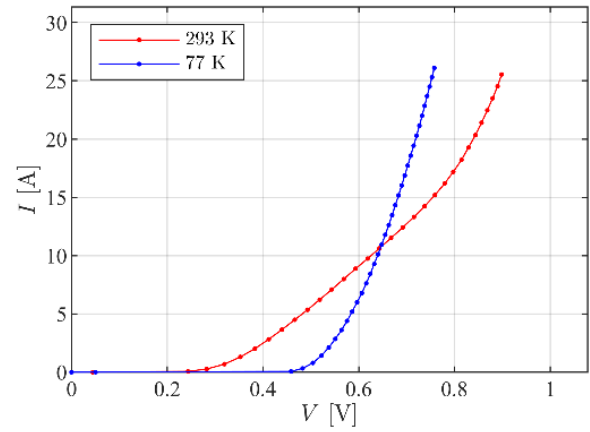
Cependant, nous avons observé pour certaines diodes des variations particulières des caractéristiques I - V à 77 K, notamment avec la présence de distorsions (Fig. 1b), d'un motif en zigzag (Fig. 1c) ou d'une inflexion (Fig. 1d).

Très peu d'études ont explorés ces phénomènes. Concernant la distorsion, la littérature ne propose pas, à notre connaissance, d'interprétation de ce phénomène. Concernant le motif en zigzag, selon [7], il peut être attribué au « gel des porteurs de charges » dans la région de drift mais le phénomène ne semble pas avoir été investigué davantage. Concernant l'inflexion, elle peut possiblement être expliquée par un auto-échauffement du composant, tel que discuté dans [8], qui serait alors lié à la capacité thermique réduite du silicium à 77 K. Ce phénomène est cohérent avec le modèle de Debye, qui suggère que la capacité thermique des matériaux diminue de manière significative à mesure que la température s'approche du zéro absolu. Pour le silicium, la capacité thermique diminue d'un facteur d'environ trois entre 300 K et 100 K [9]. Cette réduction de la capacité thermique se traduit par une augmentation plus importante de la température au cours d'un processus adiabatique pour la même quantité de chaleur dégagée.

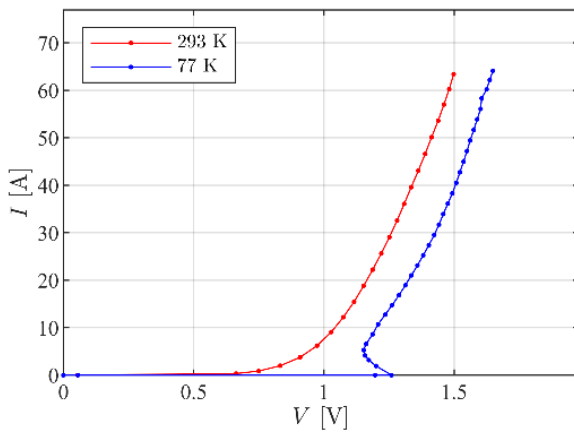
Dans cet article, nous explorons l'origine des variations observées entre les différentes caractéristiques I - V de diodes à 293 K et 77 K par une approche expérimentale. La section 2 analyse l'effet du boîtier, tandis que la section 3 examine l'impact de la durée de l'impulsion de courant, et compare les résultats à température ambiante et à température cryogénique.



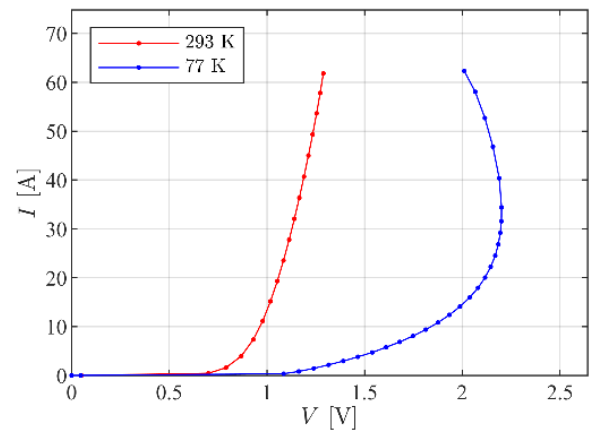
a) 45L120



b) FERD20H100STS



c) EPU6006_N3



d) 1N3913

Fig. 1. Caractéristique I - V de certaines diodes [1].

2. IMPACT DU BOITIER

2.1. Hypothèse

Une diode est constituée d'une jonction PN, intégrée sous forme de puce (ou die) fixée sur un substrat. Cette puce est connectée aux électrodes par des fils de liaison (ou fils de bonding) puis encapsulée dans un matériau de protection, le tout étant ensuite intégré dans un boîtier. Le refroidissement d'une diode peut induire deux effets : (i) une contraction thermique, qui crée des contraintes mécaniques, et (ii) un changement des propriétés électriques des composants (par exemple, la résistance des fils de liaison varie avec la température). L'hypothèse est que la combinaison de ces deux effets (i et ii) peut conduire aux variations observées de la caractéristique I - V à 77 K.

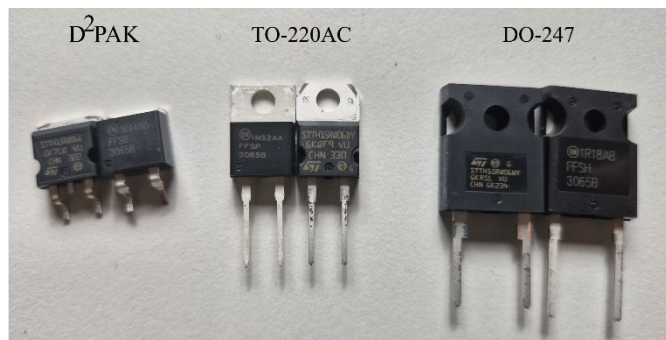


Fig. 2. Diode STTH15RQ6 et FFSH3065B dans différents boîtiers.

2.2. Protocole expérimental

Nous considérons deux types de diodes dans cette étude, dont les paramètres sont donnés dans le Tableau 1 :

- FFSH3065B – une diode Schottky en carbure de silicium (SiC) produite par Onsemi [10].
- STTH15RQ06 – une diode Si de redressement automobile turbo à haute vitesse produite par STMicroelectronics [11].

Tableau 1- Paramètres des diodes

Diode	Courant direct	Tension directe	Tension inverse
FFSH3065B	30 A	1.72 V	650 V
STTH15RQ06	15 A	1.45 V	600 V

Pour chaque diode, nous évaluons trois boîtiers différents : TO-220AC, DO-247 et D²PAK (Fig. 2). De cette manière, la même jonction PN est testée dans différents boîtiers à la fois à 293 K et à 77 K.

Pour obtenir les caractéristiques I - V , des mesures quatre fils sont effectuées à l'aide du Keithley 2651A Source Meter Unit (SMU) [12], qui permet des mesures pulsées avec une plage de durée d'impulsion de 100 μ s à 1000 μ s. Le SMU est contrôlé par un ordinateur utilisant le logiciel Keithley KickStart [13]. Pour tracer la caractéristique I - V en tension directe, 50 impulsions de courant d'amplitude croissante sont appliquées, avec un pas fixe. La valeur maximale de courant ou de tension sont définis à l'avance. Chaque impulsion fournit un point sur la caractéristique I - V . Suivant les recommandations de la fiche

technique de STMicroelectronics, la durée t_p et la période T de l'impulsion sont sélectionnées afin d'avoir un rapport cyclique $\delta = \frac{t_p}{T}$ égal à 2%. Dans cette section, nous avons sélectionné $t_p = 380 \mu s$ et $T = 19 ms$, comme spécifié dans la majorité des fiches techniques de STMicroelectronics. Le dispositif expérimental est illustré sur la Figure 3.

Les mesures sont d'abord effectuées à la température ambiante (293 K) puis à température cryogénique (77 K). Pour les mesures à 77 K, le processus de refroidissement se déroule en deux étapes : une phase initiale de pré-refroidissement de 20 minutes à l'aide d'azote gazeux, suivie d'une phase de refroidissement de 10 minutes avec le composant immergé dans un bain ouvert d'azote liquide.

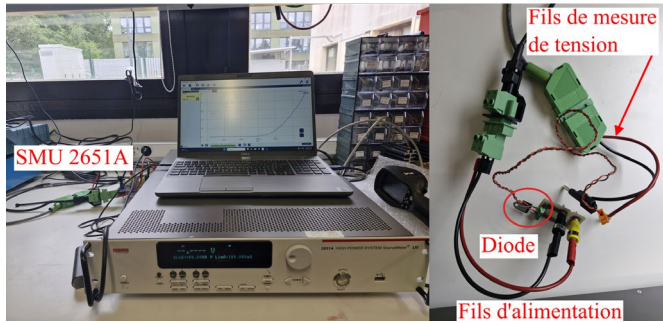


Fig. 3. Dispositif expérimental : SMU 2651A et câblage pour mesure de la diode.

2.3. Résultats

La Figure 4 montre les résultats pour la diode FFSH3065B. Nous constatons que la caractéristique $I-V$ à 293 K est quasiment identique pour tous les types de boîtiers. À 77 K, la caractéristique $I-V$ est translatée vers des tensions plus élevées, mais il n'y a pas de distorsion, de motif en zigzag ni d'inflexion. Cependant, la caractéristique $I-V$ à 77 K varie légèrement entre les différents boîtiers. Cette variation est donc à priori due aux effets (i et ii). Cependant on ne peut pas à ce stade écarter la possibilité d'un auto-échauffement, effet qui sera examiné à la section 3.

La Figure 5 montre les résultats pour la diode STTH15RQ06. La caractéristique $I-V$ à 293 K est similaire pour les boîtiers TO-220AC et DO-247, mais diffère légèrement pour le boîtier D²PAK. Cet effet est inattendu : nous l'attribuons à priori à un auto-échauffement limité (voir section 3). La caractéristique $I-V$ à 77 K est très similaire pour tous les boîtiers, mais montre un motif en zigzag. Nous en concluons que le motif en zigzag observé lors du refroidissement n'est à priori pas dû au boîtier, du moins pour cette diode, ce qui renforce l'hypothèse du gel des porteurs de charge.

3. IMPACT DE LA DUREE DE L'IMPULSION

3.1. Hypothèse

La caractéristique $I-V$ est, comme son nom l'indique, une caractéristique de la diode. Elle est valide à une température donnée et doit donc être mesurée en régime isotherme. Or, pour mesurer la caractéristique $I-V$ d'une diode, on applique une succession d'impulsions de courant qui créent des pertes Joule dans la diode et ont tendance à augmenter sa température. L'hypothèse est que cet auto-échauffement conduit à une variation de la caractéristique $I-V$, qui pourrait expliquer les écarts constatés entre les caractéristiques à une même température pour différents boîtiers.

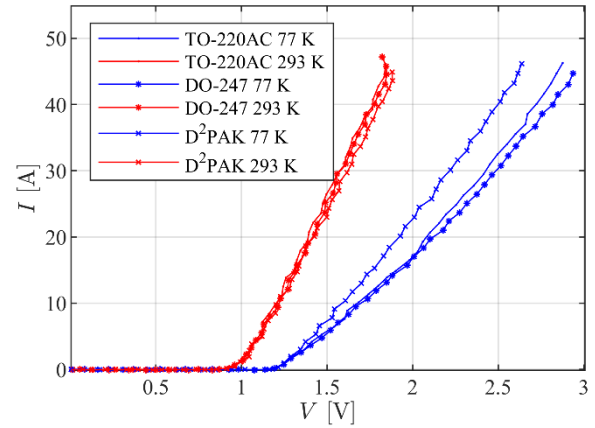


Fig. 4. Caractéristiques $I-V$ mesurées de la diode FFSH3065B à température ambiante (293 K) et à température cryogénique (77 K).

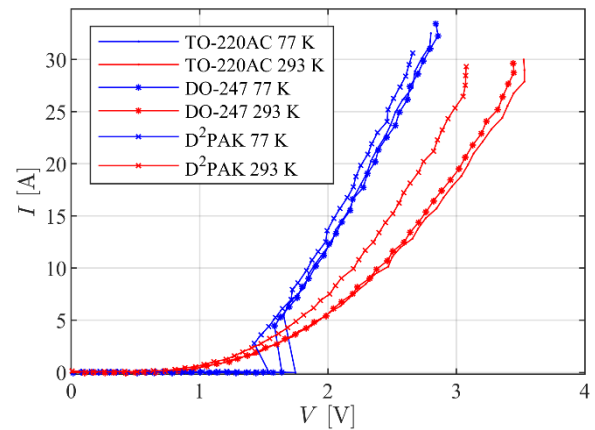


Fig. 5. Caractéristiques $I-V$ mesurées de la diode STTH15RQ06 à température ambiante (293 K) et à température cryogénique (77 K).

3.2. Protocole expérimental

On considère les mêmes diodes dans les mêmes boîtiers qu'à la section 2, et le même protocole pour la mesure de la caractéristique $I-V$. Cependant ici on varie la durée d'impulsion t_p entre $150 \mu s$ et $1000 \mu s$, pour voir si cela influence la forme de la caractéristique $I-V$.

3.3. Résultats

La Figure 6 présente les caractéristiques $I-V$ pour la diode FFSH3065B pour différentes durées d'impulsion, pour les 3 boîtiers. À partir de ces caractéristiques, on a tracé sur la Figure 7 la tension normalisée en fonction de la durée de l'impulsion.

À 293 K, pour un même boîtier, les caractéristiques sont identiques. Cela met en évidence que la caractéristique $I-V$ est indépendante de la durée de l'impulsion pour cette diode. En revanche, à 77 K, des différences apparaissent selon le type de boîtier. Pour le boîtier TO-220AC, les caractéristiques $I-V$ présentent une légère déformation à fort courant, avec une tension qui diminue lorsque la durée de l'impulsion augmente. Cet effet devient particulièrement marqué pour des durées supérieures à $550 \mu s$, alors que pour des durées inférieures, les caractéristiques évoluent très peu. On s'attendrait à une convergence des caractéristiques à mesure que la durée d'impulsion diminue, qui n'a pas pu être observée en raison de la durée minimale d'impulsion imposée par le SMU. Les boîtiers DO-247 et D²PAK montrent un comportement similaire, mais moins prononcé. Puisque la durée de l'impulsion est la seule grandeur modifiée entre les différentes

mesures, ces variations sont attribuées à un échauffement thermique. Cet effet dépend du type de boîtier, mais suit globalement la tendance suivante : pour des impulsions courtes, le composant reste à la température initiale, tandis que pour des impulsions longues, l'auto-échauffement devient significatif.

On conclut que même avec de courtes impulsions, les caractéristiques I - V à une même température de la diode FFSH3065B dans différents boîtiers ne tendent pas à converger entre elles. Cela montre que l'auto-échauffement a un impact limité et ne suffit pas à expliquer les différences importantes observées dans les Figures 4 et 5.

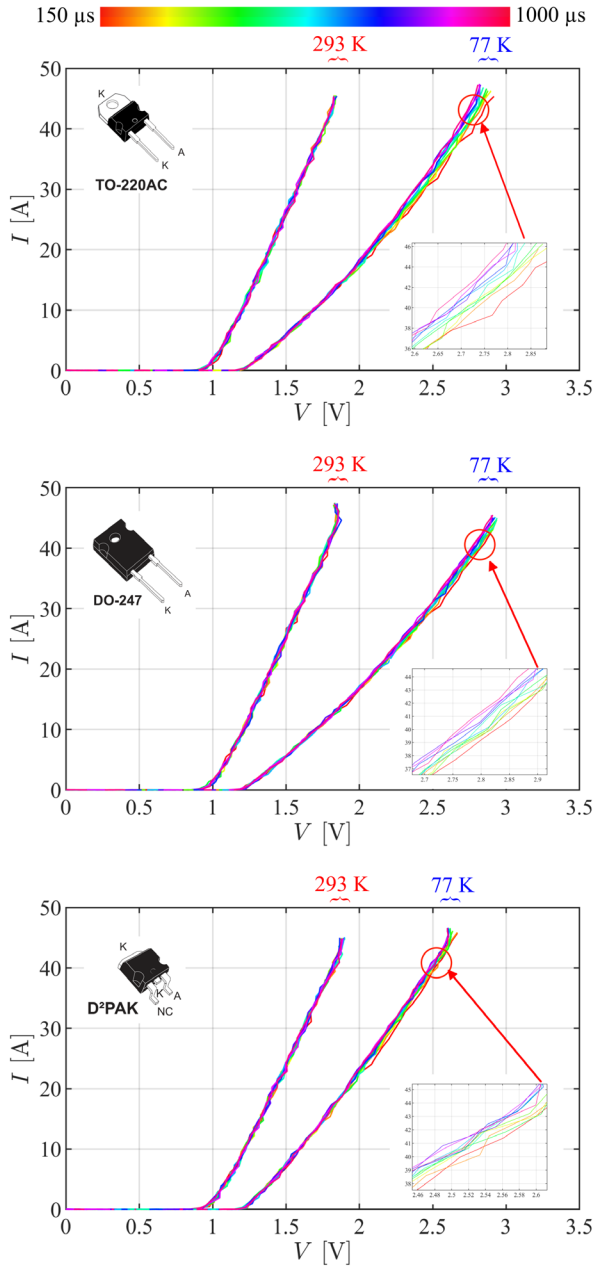


Fig.6. Caractéristiques I - V mesurées de la diode FFSH3065B pour différents boîtiers et différentes durées impulsions t_p allant de 150 μ s à 1000 μ s.

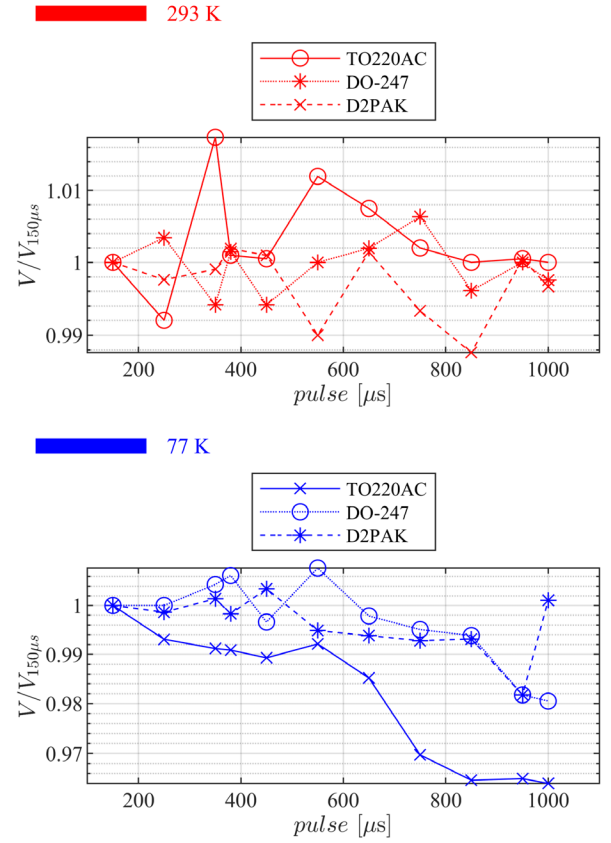


Fig. 7. Tensions normalisées de la diode FFSH3065B pour $I = 43$ A. La tension est normalisée par la tension à une durée d'impulsion de 150 μ s.

Les Figures 8 et 9 présentent les résultats obtenus pour la diode STTH15RQ06. Pour chacun des trois boîtiers, les caractéristiques I - V à fort courant sont identiques pour toutes les durées d'impulsion, aussi bien à 293 K qu'à 77 K. Aucune variation significative n'est observée, ce qui met en évidence le régime isotherme des mesures.

La variation observée à 293 K pour le boîtier D²PAK (Figure 5) n'est donc pas liée à l'auto-échauffement. L'origine de ce comportement n'est pas clairement établie, mais une relation avec la structure interne du boîtier peut être envisagée. Une hypothèse est qu'à 293 K, la résistance des fils de bonding dans les boîtiers TO-220AC et DO-247 serait plus élevée que dans le D²PAK. À 77 K, cette différence pourrait possiblement s'atténuer, ce qui pourrait expliquer l'alignement des caractéristiques.

Cependant, le phénomène de zigzag apparaît toujours à 77 K, quelle que soit la durée de l'impulsion. Dans cette zone, les caractéristiques ne sont pas superposées. La variation observée ne présente pas de tendance claire permettant d'avancer une explication à ce sujet.

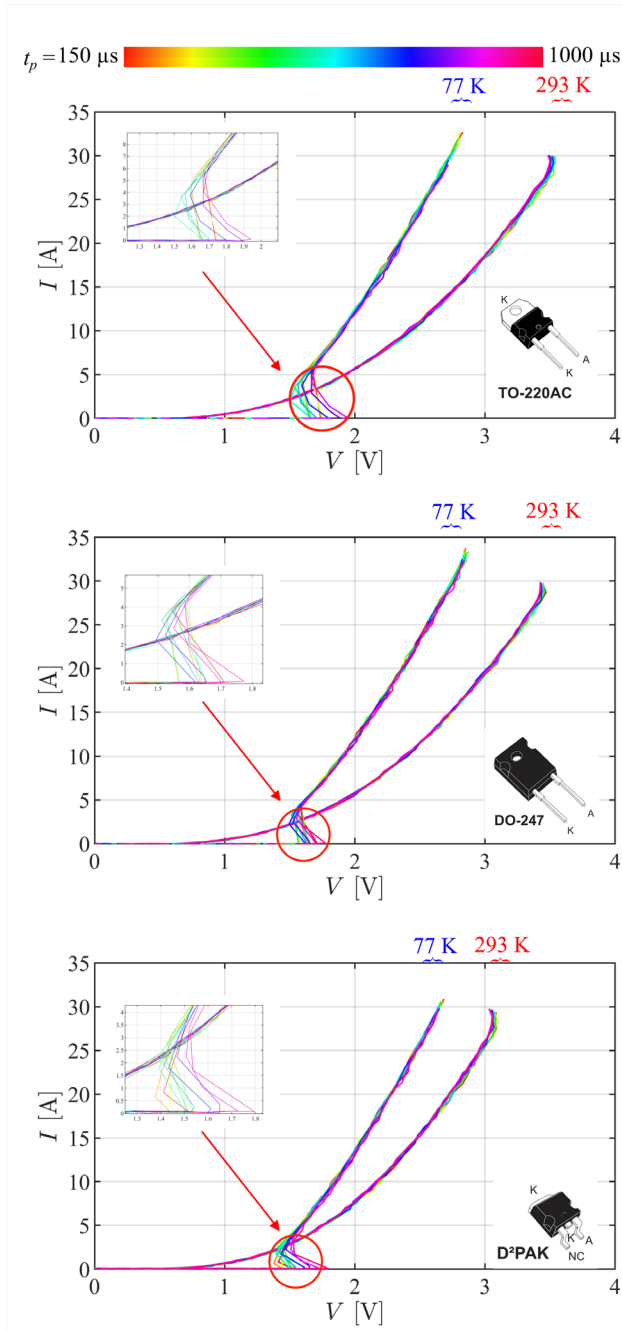


Fig. 8. Caractéristiques I - V mesurées de la diode STTH15RQ06 pour différents boîtiers et différentes durées impulsions t_p allant de $150 \mu s$ à $1000 \mu s$.

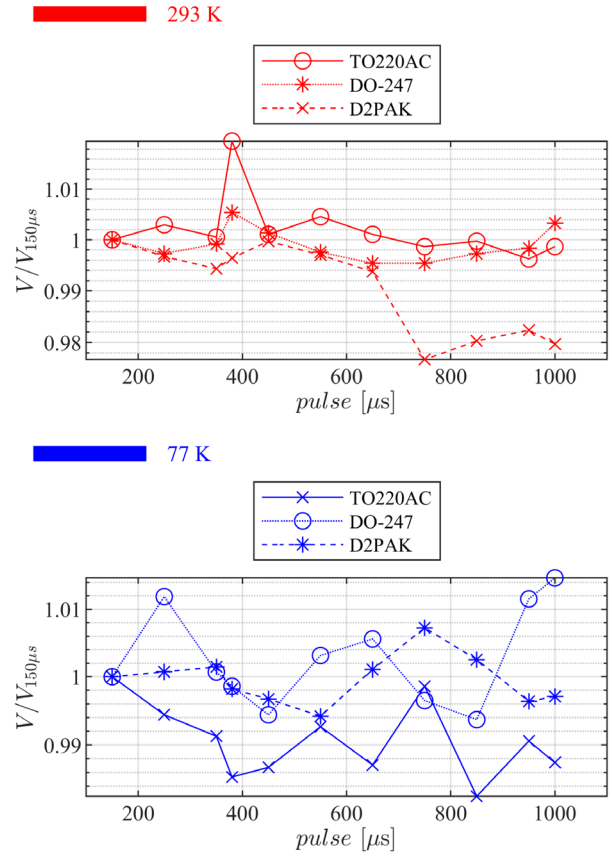


Fig.9. Tensions normalisées de la diode STTH15RQ06 pour $I = 25$ A. La tension est normalisée par la tension à une durée d'impulsion de $150 \mu s$.

4. CONCLUSIONS

Les mesures des caractéristiques I - V des diodes de puissance à 293 K et 77 K révèlent des variations encore peu documentées dans la littérature. Dans cette étude exploratoire, nous avons cherché à comprendre l'origine de ces variations, en nous concentrant sur l'influence du boîtier. Pour ce faire, une approche expérimentale a été adoptée. Nous considérons deux types de diodes. Pour chaque diode, nous évaluons trois boîtiers différents : TO-220AC, DO-247 et D²PAK. Les différentes caractéristiques I - V ont été mesurées à la fois à 293 K et à 77 K. La variation des caractéristiques I - V constatée s'explique principalement par le type de boîtier, aussi bien à 293 K qu'à 77 K. L'auto-échauffement ne semble jouer qu'un rôle très marginal et ne permet pas de justifier les écarts significatifs mesurés.

Par ailleurs, le motif en zigzag observé à 77 K n'est pas lié au boîtier pour la diode testée. D'autres facteurs, tels que la technologie des diodes ou les niveaux de tension et de courant appliqués, restent à investiguer.

5. REFERENCES

- [1] T.K. Hoang, L. Quéval, C. Berriaud, L. Vido, "Design of a 20 MW fully superconducting wind turbine generator to minimize the levelized cost of energy," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, Jun. 2018.
- [2] Airbus UpNext "ASCENDING to new heights with cryogenic superconductivity," 2023. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-12-ascending-to->

new-heights-with-cryogenic-superconductivity [Accessed: 30- May- 2025]

- [3] M. Uno, "Chuo Shinkansen project using superconducting maglev system," *Japan Railway & Transport Review*, no. 68, Oct. 2016.
- [4] A. Allais *et al.*, "SuperRail—world-first HTS cable to be installed on a railway network in France," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 3, pp. 1-7, id. 4802207, May 2024.
- [5] L. Ferreira, Y. Baazizi, S. Meunier, T. Phulpin, L. Quéval. "Feasibility of superconducting DC railway traction substations," *Symposium on Advanced Technologies in Electrical Systems (SATES 2025)*, Nancy, France, Apr. 2025.
- [6] Y. Baazizi, A.L.H. Bezerra, L. Ferreira, S. Meunier, T. Phulpin., L. Quéval, "Base de données publique des caractéristiques des diodes de puissance à température cryogénique," *Conférences des jeunes chercheurs en génie électrique (JCGE 24)*, Le Croisic, France, Jun. 2024.
- [7] R.R. Ward, W.J. Dawson, L. Zhu, R.K. Kirschman, O. Mueller, M.J. Hennessy, E. Mueller, R.L. Patterson, J.E. Dickman, A. Hammoud, "Power diodes for cryogenic operation," *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist (PESC '03)*, Acapulco, Mexico, Jun. 2003.
- [8] M.A. Ostapchuk, N.S. Ivanov, D.M. Shishov, "Evaluation of the self-heating effect in the static characterization of cryo-cooled power diodes," *IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, pp. 760-763, Novosibirsk, Russia, Oct. 2023.
- [9] C. Marchbanks, Z. Wu, "Reduction of heat capacity and phonon group velocity in silicon nanowires," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 8, p. 084305, Feb. 2015.
- [10] Onsemi "Diode FFSH3065B datasheet," 2023. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/ffsh3065b-d.pdf>. [Accessed: 30- May- 2025]
- [11] STMicroelectronics "Diode STTH15RQ06 datasheet," 2018. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stth15rq06.pdf> [Accessed: 30- May- 2025]
- [12] Tektronix "Keithley 2651A high current sourceMeter SMU instrument," 2015. [Online]. Available: <https://www.tek.com/fr/video/product-demo/keithley-2651a-high-current-sourcemeter-smu-instrument-overview> [Accessed: 30- May- 2025]
- [13] Tektronix "logiciel Kickstart de Keithley," 2024. [Online]. Available: <https://www.tek.com/fr/products/keithley/keithley-control-software-bench-instruments/kickstart> [Accessed: 30- May- 2025]