

Caractérisation à température cryogénique d'un MOSFET de puissance par la méthode du Double Pulse

Yanis LAÏB, Kévin BERGER, Stéphane RAËL, Jean LÉVÊQUE

Université de Lorraine, GREEN, F-54000, Nancy, France

RESUME – Le développement des technologies cryogéniques dans l'aéronautique permet d'améliorer l'efficacité des systèmes embarqués, notamment dans le cadre de la propulsion électrique. Cependant, la caractérisation des composants électroniques de puissance à des températures cryogéniques reste peu documentée. Cette étude vise à explorer le comportement dynamique et les pertes par commutation des MOSFET de puissance dans la plage de 10 K à 300 K. Un banc expérimental a été conçu, comprenant une cellule de commutation avec un MOSFET au Silicium (Si) placée sur la plaque froide d'un cryocooler. La mesure en double pulse a été employée pour évaluer les pertes par commutation, mais plusieurs défis sont imposés par l'environnement cryogénique, comme les effets des inductances dus aux longs fils nécessaires pour atteindre les températures les plus basses ou le gel des condensateurs à basse température. Des solutions ont été mises en œuvre, notamment l'utilisation d'un transformateur de courant adapté aux températures cryogéniques. Les résultats montrent une variation notable du comportement et des pertes du composant à l'ouverture et la fermeture en fonction de la température. Nous souhaitons que ces travaux permettent de mieux comprendre et d'optimiser les performances des MOSFET de puissance pour des applications cryogéniques.

Mots-clés – Cryogénie, double pulse, électronique de puissance, MOSFET de puissance.

1. INTRODUCTION

Le développement des applications supraconductrices a permis de montrer leur intérêt en tant que système embarqué, en particulier dans le domaine de l'aéronautique, en améliorant l'efficacité de la chaîne de propulsion et en diminuant les contraintes en termes d'encombrement. En ajoutant à cela la volonté de décarboner l'aviation, Airbus a développé les premières briques technologiques d'une propulsion électrique cryogénique [1]. En parallèle, la volonté d'utiliser la cryogénie pour extraire plus de pertes au niveau des convertisseurs d'électronique de puissance s'est aussi développée [2]. Cependant, il existe relativement peu de littérature sur la caractérisation des composants de puissance aux températures cryogéniques. Il est évident que le comportement des semi-conducteurs dépend fortement de la température. Ainsi, lors de l'édition 2023 de SGE, nous avons présenté la caractérisation statique d'un MOSFET de puissance qui présentait un fonctionnement optimal avec un minimum de pertes à 80 K [3]. Aujourd'hui, dans le but de renforcer cette hypothèse, le comportement dynamique et les pertes par commutation se doivent d'être caractérisés.

Dans un premier temps, le banc expérimental cryogénique est présenté. Puis, la méthode de mesure par double pulse ainsi que les difficultés et les défis associés à la caractérisation de composants d'électronique de puissance aux températures cryogéniques sont détaillés.

2. BANC EXPÉRIMENTAL CRYOGÉNIQUE

Le système cryogénique est composé d'un cryocooler à deux étages ARS DE-202 avec une plaque froide en cuivre sur laquelle le système à tester est thermalisé. Pour éliminer les pertes par convection, l'ensemble est dans un cryostat qui est maintenu sous un vide de 10^{-7} mBar. Enfin, pour limiter le rayonnement thermique et atteindre une température de fonctionnement minimale aux alentours de 10 K, plusieurs couches de super-isolant ont dû être ajoutées autour du système à caractériser.

Ainsi, les principaux composants du montage sont donc refroidis par l'intermédiaire de la plaque froide comme illustré sur la Figure 1. Un contrôleur de température Lakeshore est utilisé en combinaison avec une chaufferette et deux sondes de température Cernox pour réguler la température de la plaque froide. La première sonde est directement placée sur la tête froide pour la régulation, tandis que l'autre est placée sur le composant afin de contrôler sa température en fonctionnement.



FIG. 1. Composants de puissance sur la tête froide du cryocooler.

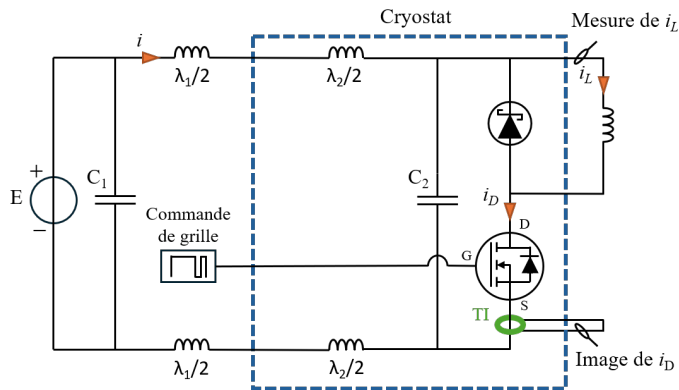


FIG. 2. Schéma électrique de la cellule de commutation utilisée pour la caractérisation par double pulse d'un MOSFET Si IXFN140N30P.

3. MESURE EN DOUBLE PULSE

3.1. Principe de la mesure

La mesure en double pulse consiste à mesurer les pertes par commutation d'un composant de puissance à l'aide de deux échelons de commande sur la tension de grille. Lors de nos essais pour une fréquence de fonctionnement de 10 kHz, un premier échelon d'une durée de l'ordre de 0.5 à 1 ms charge le courant dans le circuit à la valeur souhaitée en fermant le composant. Lorsque le courant souhaité est atteint, une tension négative est appliquée sur la grille pendant 50 μ s, ce qui provoque l'ouverture du composant, et les pertes ou plutôt l'énergie à l'ouverture du composant sont calculées durant cette phase en mesurant $i_D(t)$ et $v_{DS}(t)$. En appliquant ensuite un deuxième échelon de tension positif sur la grille pendant la même durée de 50 μ s, le composant se ferme et l'énergie à la fermeture peut alors être obtenue.

3.2. Défis liés à l'environnement cryogénique

Pour mesurer les pertes par commutation, il faut un circuit permettant au composant de puissance de commuter. Pour cela, un hacheur série composé du composant à caractériser, un MOSFET au Silicium (Si) IXFN110N60P3 600 V 90 A, ainsi qu'une diode Schottky Si STPS200170TV1 200 A 170 V de roue libre fut réalisé comme indiqué sur la Figure 2. Le condensateur C_1 sert à fournir le courant nécessaire étant donné la limitation de notre alimentation à 10 A. Tous les composants à l'intérieur du rectangle en pointillés bleus sont dans le cryostat, à température cryogénique. Le refroidissement par conduction impose de thermaliser les fils au premier étage du cryocooler et, de façon inhabituelle pour un électronicien, d'avoir de grandes longueurs de fils pour atteindre les températures les plus basses.

En effet, en électronique de puissance, la longueur des fils doit souvent être la plus courte possible pour limiter les effets inductifs. En cryogénie, c'est l'inverse, les fils doivent être de faible section et les plus longs possible, environ 2 mètres dans notre cas, pour éviter de ramener des pertes par conduction, ce qui limiterait la puissance fournie par le cryocooler.

Ces grandes longueurs de fils engendrent des inductances parasites représentées par λ_1 et λ_2 sur la Figure 2, qui, à cause de la diminution rapide du courant, peuvent engendrer des surtensions importantes à l'ouverture sur v_{DS} (1) si le condensateur C_2 n'est pas actif.

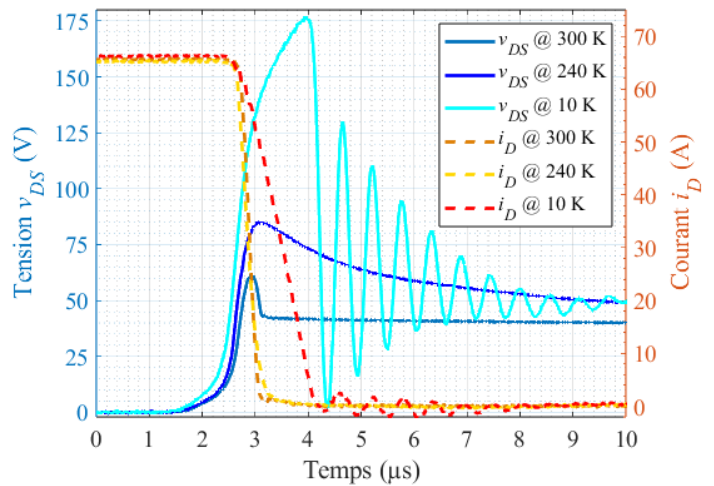


FIG. 3. Tension v_{DS} entre Drain et Source et courant de Drain i_D lors de l'ouverture du MOSFET Si à 300 K, 240 K et 10 K.

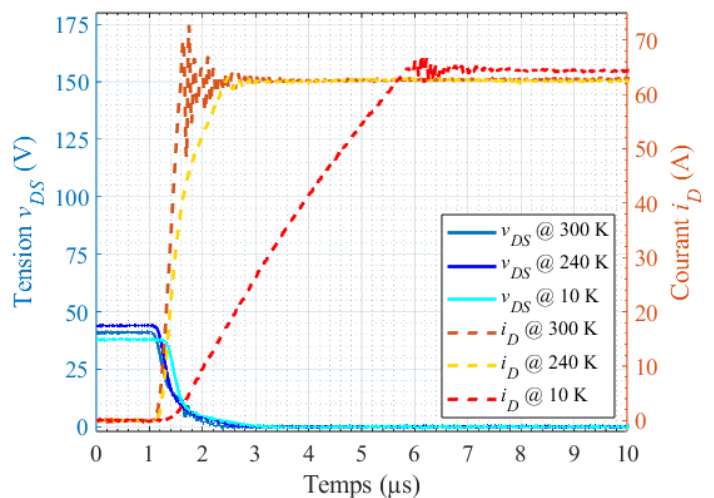


FIG. 4. Tension v_{DS} entre Drain et Source et courant de Drain i_D lors de la fermeture du MOSFET Si à 300 K, 240 K et 10 K.

$$v_{DS} = E - (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Les figures 3 et 4 montrent l'évolution à 300 K, 240 K et 10 K de la tension v_{DS} entre Drain et Source du MOSFET de la Figure 2 et du courant de Drain i_D lors de l'ouverture et de la fermeture du composant, respectivement. Sur ces figures, l'instant initial est similaire pour toutes les températures et correspond au déclenchement de la commande de la tension de Grille v_{GS} . On observe ainsi des différences notables de comportement du MOSFET dès 240 K et à 10 K.

Cependant, les oscillations observées à l'ouverture sur la tension v_{DS} à 10 K ne sont pas dues au composant lui-même mais au condensateur C_2 qui ne présentait pas les caractéristiques escomptées. Il comportait notamment un électrolyte liquide qui gèle autour de 240 K d'après nos résultats.

Pour pallier ce problème, un condensateur à film fut choisi. En effet, les condensateurs à film sont supposés très peu varier avec la température, la variation étant seulement liée à la contraction des matériaux avec la température. Le condensateur à couche mince KEMET R60 100 μ F fut donc choisi. Pour s'assurer de son bon fonctionnement à température cryogénique,

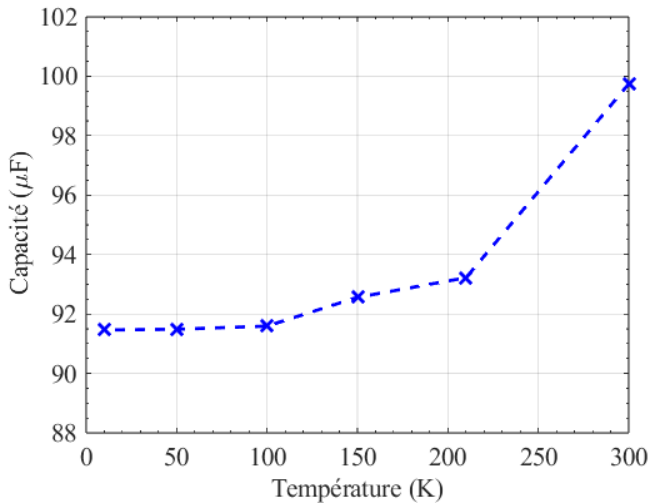


FIG. 5. Évolution de la capacité du condensateur à film KEMET R60 100 μF en fonction de la température.

une caractérisation pour quelques températures allant de 10 K à 300 K fut réalisée, Figure 5. Cette caractérisation a permis de démontrer une faible variation de la capacité d'environ 8% sur la plage de fonctionnement visée. Quatre condensateurs ont été mis en parallèle dans l'enceinte cryogénique pour obtenir la valeur de capacité désirée.

L'ajout du condensateur C_2 engendre une difficulté supplémentaire car il empêche la mesure à température ambiante du courant i_D . Plusieurs solutions furent étudiées comme la remontée des fils à température ambiante, l'utilisation d'une bobine Rogowski ou d'un transformateur de courant (TI) avec un tore à forte perméabilité magnétique. En vérifiant le changement de comportement du TI à la température de l'azote liquide, nous avons pu confirmer qu'il offrait le meilleur compromis en termes de précision et d'insensibilité aux évolutions de la température et il fut donc retenu pour la mesure du courant i_D aux températures cryogéniques.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1. Définition des pertes par commutation

D'après la norme IEC 60747-8 :2010 pour calculer les pertes par commutation dans un MOSFET Si par la méthode du double pulse, t_{on} est défini comme étant le temps pour passer de 10% de la valeur pic de v_{GS} à 10% de la valeur pic de v_{DS} , et réciproquement, t_{off} comme étant le temps entre 90% de la valeur pic de v_{GS} et 90% de la valeur pic de v_{DS} . Cependant, cette norme est établie pour des températures usuelles de fonctionnement et elle n'est donc pas nécessairement adaptée aux comportements des composants d'électronique de puissance aux températures cryogéniques. En particulier, lorsqu'on regarde les évolutions de v_{DS} et i_{DS} entre t_{off1} et t_{off2} sur Figure 6, il nous paraît difficile de parler de pertes par commutation car le courant n'est pas encore descendu à zéro et la tension reste également constante sur une part importante de l'intervalle, alors que la norme considère cette partie. Dans le cas des courbes présentées en Figure 6 correspondant à l'ouverture du MOSFET Si à 10 K, comme la tension v_{DS} avant fermeture est non nulle, cela se traduirait par des pertes que nous ne souhaitons pas attribuer à la commutation mais plutôt aux pertes statiques du composant.

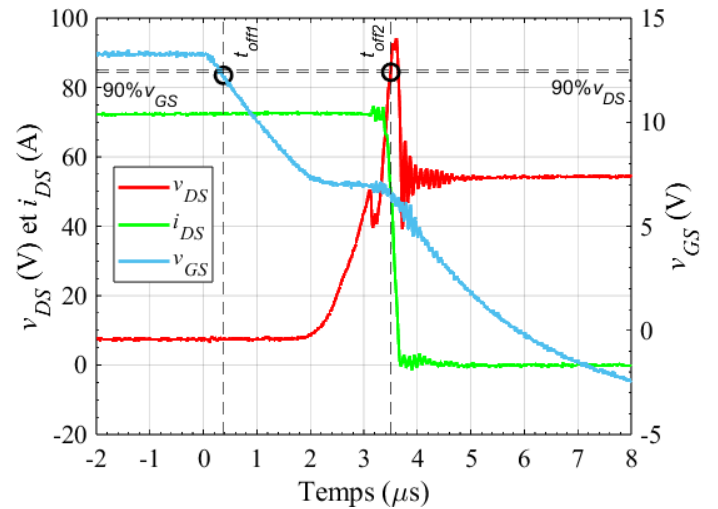


FIG. 6. Évolution de v_{GS} , v_{DS} et i_{DS} à l'ouverture du MOSFET Si à 10 K et définition des instants t_{off1} et t_{off2} d'après la norme IEC 60747-8 :2010.

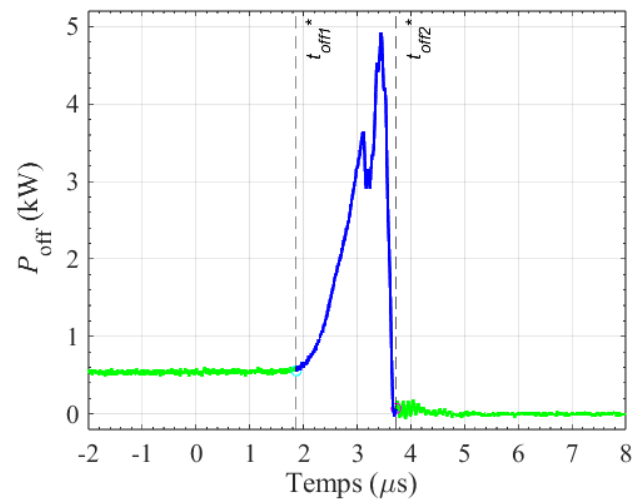


FIG. 7. Puissance dissipée à l'ouverture du MOSFET Si à 10 K.

Dans le cadre de l'étude des composants d'électronique de puissance aux températures cryogéniques, nous proposons de définir le temps de la commutation comme l'intervalle où une variation de puissance notable est observée. De façon quantitative, cela va correspondre à une variation de la puissance supérieure à deux fois l'écart-type mesuré sur la puissance en régime statique, i.e. la partie constante illustrée en vert sur la Figure 7. De cette façon, dans la zone comprise entre t_{off1}^* et t_{off2}^* , nous sommes certains de caractériser uniquement les pertes par commutation du composant, celles qui correspondent à la partie en bleu de la courbe des pertes.

Maintenant que les pertes par commutation ont été définies pour l'étude et la caractérisation des composants de puissance aux températures cryogéniques, les résultats vont être présentés dans la section suivante.

4.2. Énergie dissipée à la commutation

En traçant l'énergie dissipée lors des commutations en fonction de la température, il est notable de constater sur la Figure 8, que même si les allures sont similaires, ce sont bien les pertes à l'ouverture qui sont majoritaires lors de nos mesures par double

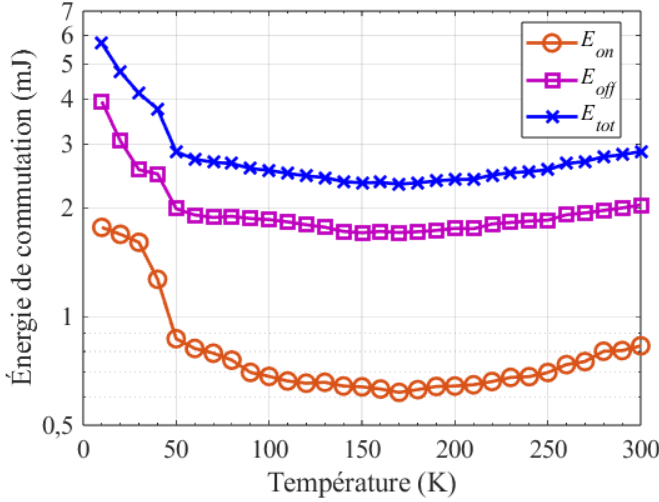


FIG. 8. Énergie dissipée lors de la commutation en fonction de la température. E_{on} à la fermeture, E_{off} à l'ouverture, E_{tot} pour l'énergie totale.

pulse avec le MOSFET Si 600 V. En outre, le minimum de pertes par commutation se situe autour de 150 K avec une réduction des pertes d'environ 18 %. Lors des essais permettant de caractériser les pertes statiques de ce même MOSFET, le minimum se situait à 80 K avec une réduction des pertes de 79 % par rapport à la température ambiante [3]. En se plaçant à cette même température, la réduction des pertes par commutation est de 7,5 %. Ainsi, en dessous de 300 K et jusqu'à 50 K, le MOSFET Si 600 V présente des pertes statiques et par commutation inférieures à celles mesurées à température ambiante, permettant ainsi d'affirmer que le MOSFET est un excellent candidat pour les applications aux températures cryogéniques.

4.3. Temps caractéristiques de commutation

Les temps de commutation t_{on*} et t_{off*} représentés sur la Figure 9 ne varient presque pas en fonction de la température, permettant ainsi de diminuer les risques liés à l'empiétement et facilitant la commande des convertisseurs aux températures cryogéniques.

Nous nous sommes tout de même intéressés à l'évolution des temps caractéristiques de la commutation selon la norme, i.e. t_{on} , t_{off} , t_r et t_f . Pour rappel, t_r est défini comme le temps à la fermeture nécessaire pour passer de 90 % de la valeur max de v_{DS} à 10 % de cette même valeur et réciproquement pour t_f de 10 % à 90 % v_{DS} lors de l'ouverture. Leur évolution avec la température est représentée sur la Figure 10. Sur t_r et t_f , on constate une légère tendance à la baisse de 300 K jusqu'à environ 150 K, puis une stagnation, avant de repartir à la hausse pour les températures inférieures à 60 K. On constate la même évolution entre t_r et t_{on} avec un temps t_{on} supérieur d'environ 50 % à t_r . L'évolution est clairement différente pour t_{off} qui ne fait globalement que baisser lorsque la température diminue. Le temps t_{off} à l'ouverture selon la norme est nettement plus grand que les autres temps de commutation et environ 2 fois plus grand que t_f .

5. CONCLUSION

La mesure en double pulse est une mesure de caractérisation courante pour les composants d'électronique de puissance

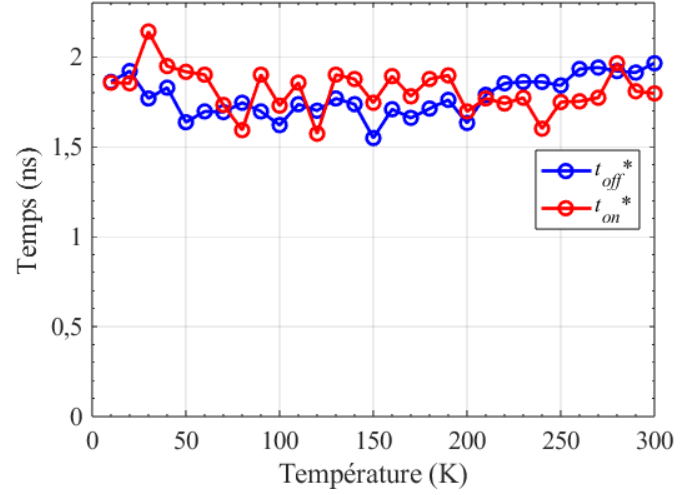


FIG. 9. Évolution des temps de commutation en fonction de la température. t_{on*} à la fermeture et t_{off*} à l'ouverture, définis en suivant la méthode présentée en section 4.3 et sur la Figure 7.

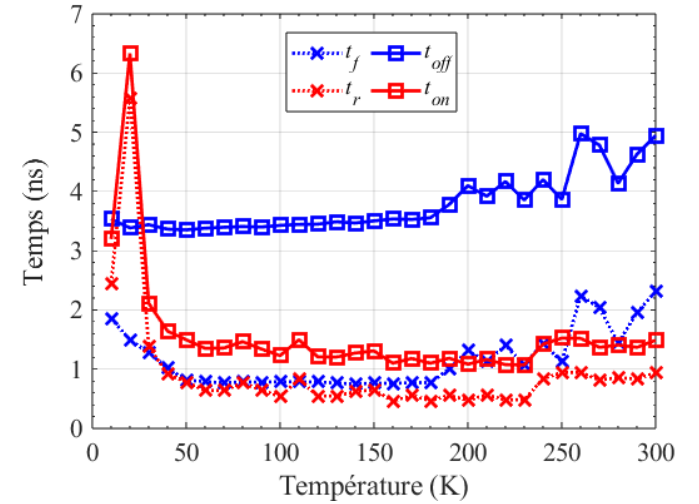


FIG. 10. Évolution des temps de commutation définis selon la norme IEC 60747-8 :2010 en fonction de la température. t_{on} et t_r à la fermeture, t_{off} et t_f à l'ouverture.

à température ambiante mais elle reste un défi complexe à relever lorsque l'on veut caractériser ces composants à température cryogénique. Néanmoins, plusieurs solutions ont été apportées et testées sur notre banc expérimental. Le comportement dynamique et l'évolution des énergies dissipées à l'ouverture et à la fermeture d'un MOSFET Si de puissance dans la plage de 10 K à 300 K ont été présentés, permettant de confirmer la pertinence de l'utilisation des MOSFET Si dans des applications cryogéniques.

6. RÉFÉRENCES

- [1] L Ybanez, A Colle, E Nilsson, F Berg, G Galla, M Tassisto, J Rivenc, F Kapaun, and G Steiner. Ascend : The first step towards cryogenic electric propulsion. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 1241(1) :012034, may 2022.
- [2] Hendrik Schefer, Wolf-Rüdiger Canders, Jan Hoffmann, Regine Mallwitz, and Markus Henke. Cryogenically-cooled power electronics for long-distance aircraft. *IEEE Access*, 10 :133279–133308, 2022.
- [3] Yanis Laïb, Kévin Berger, Stéphane Raël, Jean Lévêque, Christophe Vi-guier, Abdelrahman El-Wakeel, and Min Zhang. Static characterization on-state of an industrial si power mosfet at cryogenic temperature. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34(3) :3800505, 2024.