

Impact des cycles de puissance à hautes fréquences sur la durée de vie des modules de puissance SiC pour le domaine automobile

Bernardo COUGO¹, Israel DIVAN^{1,2}, Duc-Hoan TRAN¹, Lenin M. F. MORAIS², Vitor ARAUJO², Renata O. DE SOUSA³, Marina LABALETTE¹, Caio C. O. MENDES⁴, Bruno CONDAMIN⁵, Fabio COCCETTI¹

¹IRT Saint Exupéry, Toulouse, France, ²UFMG, Belo Horizonte, Brazil, ³UTFPR, Curitiba, Brazil, ⁴ST Microelectronics, Toulouse, France, ⁵Valeo, Erlangen, Germany.

Les MOSFET en SiC ont une très faible capacité thermique par rapport à leurs homologues en silicium. Pour cette raison, lorsqu'ils sont utilisés dans des applications AC/DC ou DC/AC, ils subissent des variations de température pouvant aller jusqu'à 40 K à des fréquences proches de 50 Hz. Cette variation de température, également appelée Cyclage de Puissance ou Power Cycling, peut réduire la durée de vie des modules de puissance utilisant des transistors SiC, ce qui n'était pas le cas pour les modules de puissance à base de silicium. Ces cycles de puissance à haute fréquence sont en effet mal modélisés, voire pas du tout pris en compte dans les modèles d'estimation de la durée de vie actuellement disponibles pour les modules de puissance SiC. Cet article présente la procédure à suivre pour prendre en compte ces cycles de puissance à haute fréquence lors de l'estimation de la durée de vie des modules de puissance SiC en utilisant des profils de mission automobile. Le profil de mission est utilisé pour créer des formes d'onde de courant représentatives traversant le module de puissance pour l'ensemble de la mission. Ainsi, la température instantanée de la puce SiC (moyennée sur chaque période de commutation) est calculée, sur la base d'une estimation précise des pertes instantanées couplée à un modèle d'impédance thermique précis. Le résultat est un profil de température de jonction qui contient des cycles de puissance à la même fréquence que le courant sinusoïdal traversant la puce SiC. L'influence de ces cycles de puissance "haute fréquence" sur la durée de vie totale d'un module de puissance SiC est ensuite démontrée en utilisant des modèles de durée de vie trouvés dans la littérature.

Mots-clés – Cycles de puissance, durée de vie, fiabilité, MOSFET SiC.

1. INTRODUCTION

Les convertisseurs de puissance AC/DC ou DC/AC à haute performance sont fabriqués à l'aide de transistors haute performance tels que les MOSFET SiC ou les HEMT GaN. Dans les applications de véhicules électriques, le groupe motopropulseur est généralement composé d'un onduleur triphasé 400 ou 800 V utilisant des modules de puissance SiC. Ces composants ont de faibles pertes (par rapport aux modules de puissance classiques à base d'IGBT), ce qui permet d'économiser de l'énergie et d'augmenter l'autonomie de la batterie. Cependant, les modules de puissance contenant des MOSFET SiC ont une fiabilité inférieure à celle des modules fabriqués avec la technologie IGBT classique, principalement en raison des cycles thermiques [1].

Une température moyenne élevée peut réduire considérablement la fiabilité des modules de puissance [2]. Cependant, les cycles thermiques sont le facteur de stress le plus critique réduisant la durée de vie des modules de puissance [3], principalement en raison des pertes à l'intérieur des semi-conducteurs [4]. Ces gradients thermiques répétitifs engendrent une contrainte mécanique au niveau de l'interconnexion de la puce, ce qui finit par entraîner une défaillance mécanique [4]. Ce phénomène est

exacerbé dans les MOSFET SiC où les puces sont significativement plus petites que les IGBT Si (pour le même courant et la même tension nominaux), comme le montre [5], présentant ainsi une capacité thermique inférieure et donc des amplitudes de variation de température plus élevées.

Dans des travaux antérieurs, il a été démontré que la variation de température dans les puces SiC utilisées dans un onduleur triphasé est significativement élevée (25 K ou plus) pendant la période fondamentale du courant de sortie de l'onduleur [6]. Cette variation de température se produit très fréquemment (quelques dizaines de Hertz) et peut réduire considérablement la durée de vie d'un module de puissance contenant des transistors SiC.

Cependant, dans différentes applications telles que les groupes motopropulseurs dans les applications automobiles, cette variation de température «haute fréquence» n'est pas prise en compte lors de l'estimation de la durée de vie du module de puissance. La Fig. 1 montre la procédure classique pour estimer la durée de vie des modules de puissance utilisés dans les groupes motopropulseurs des véhicules électriques.

Le profil de mission, tel que le bien connu WLTP, montre comment le couple et la vitesse du moteur varient en fonction du temps, associé au modèle de la voiture. Ces données, qui ont généralement un échantillon de temps de 0,1 à 1 s, sont ensuite utilisées avec un modèle de moteur électrique pour calculer la valeur RMS du courant nécessaire à ce moteur et fourni par le module de puissance. Disposant d'un modèle électro-thermique approprié du module de puissance, les pertes moyennes de conduction et de commutation, ainsi que la température de la puce, peuvent être calculées à chaque point (échantillonné tous les 0,1 s). Ce profil de température de la puce est ensuite utilisé avec un algorithme de comptage de cycle (rainflow counting) pour compter le nombre de cycles thermiques à différentes amplitudes, et parfois à différentes températures moyennes et fréquences [7]. En utilisant le modèle de durée de vie du module de puissance (généralement dans l'équation de Coffin-Manson) et le nombre de différents cycles comptés, l'endommagement total dans le cycle du profil de mission en utilisant la règle de Miner [7] et ainsi la durée de vie totale d'un tel module de puissance peuvent être calculés pour le profil de mission donné.

Notez que cette procédure classique est réalisée en calculant la variation de température à des intervalles de temps de 0,1 s, en utilisant la valeur RMS du courant du module de puissance. Ainsi, elle ne prend pas en compte les cycles thermiques à la même fréquence que celle du courant sinusoïdal circulant dans le moteur et dans le module de puissance. Comme le montrent [6, 7], ces cycles thermiques, qui correspondent à la fréquence du courant du moteur, peuvent être importants pour les modules de puissance SiC et peuvent notamment réduire la durée de vie du module de puissance.

Cet article propose comment modifier la procédure présentée à la Fig. 1 afin de prendre en compte ces cycles thermiques à

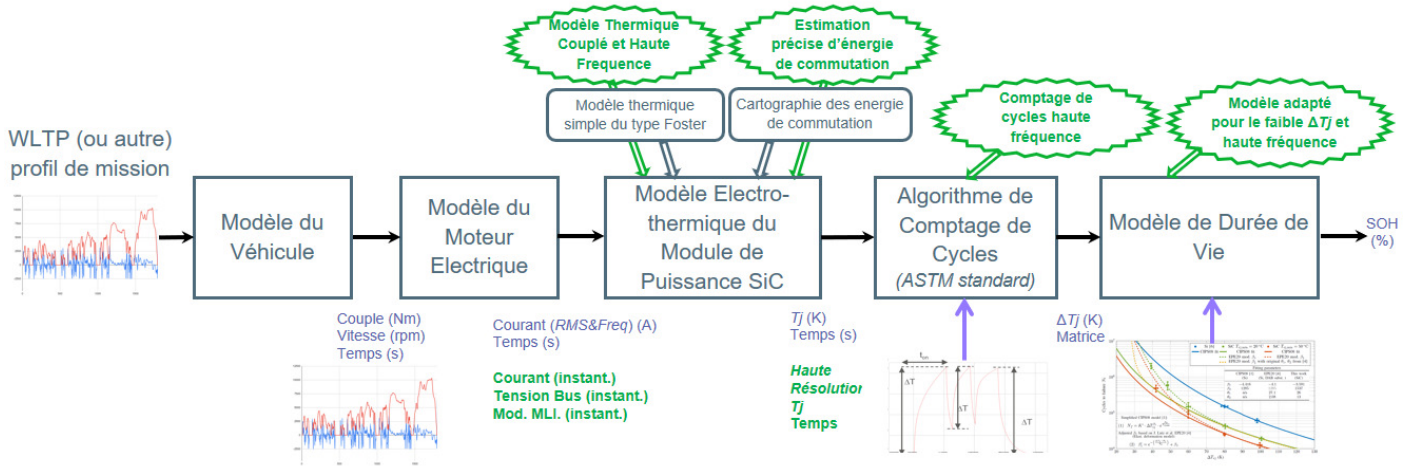


FIG. 1. Procédure d'estimation de la durée de vie des modules de puissance SiC utilisant un profil de mission classique dans les véhicules électriques, et amélioration proposée (en vert).

haute fréquence lors de l'estimation de la durée de vie du module de puissance. La Section 2 montre comment calculer la forme d'onde réelle du courant (et non sa valeur RMS) en fonction du profil de mission. Ainsi, les pertes instantanées peuvent être calculées avec précision dans les puces SiC à l'intérieur du module de puissance et, par conséquent, une évaluation plus précise des cycles thermiques à haute fréquence dans ces composants.

Dans la Section 3, l'algorithme de "Rainflow Counting" utilisé pour prendre en compte ces cycles thermiques à haute fréquence est présenté. Enfin, la Section 4 montre l'impact de l'approche proposée sur l'estimation de la durée de vie du module de puissance. Bien que les modèles de durée de vie des modules de puissance actuellement disponibles (basés sur Coffin-Manson) ne soient pas précis pour les cycles thermiques de faible amplitude (<40 K) et de haute fréquence (>10Hz), les résultats montrent clairement l'impact significatif de ces conditions sur la durée de vie du module.

2. PROFIL DE TEMPÉRATURE HAUTE RÉOLUTION BASÉ SUR LE PROFIL DE MISSION DE L'APPLICATION

Comme le montre la Fig. 1, la procédure classique utilise les courbes de vitesse et de couple du profil de mission dans le modèle de moteur électrique pour calculer les valeurs RMS du courant moteur I_{mRMS} . Ce modèle de moteur électrique donne également la vitesse du moteur et par conséquent la fréquence du courant moteur F_m , comme le montre la Fig. 2. Notez que les valeurs de F_m sont étroitement liées à la vitesse du moteur et I_{mRMS} est principalement lié aux valeurs du couple moteur. L'idée est d'utiliser les informations de I_{mRMS} et F_m pour créer la forme d'onde du courant moteur sinusoïdal $I_{inst}(t)$ en fonction du temps (t), afin de pouvoir calculer les pertes instantanées ($P_{loss}(t)$) dans les puces SiC à l'intérieur du module de puissance utilisé dans l'onduleur triphasé entraînant ce moteur. L'équation 1 montre le calcul de la valeur instantanée du courant moteur :

$$I_{inst}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{m,RMS} \cdot \sin \left(\int 2\pi \cdot F_m(t) dt \right) \quad (1)$$

Les courbes à gauche de la Fig. 2 sont données à un temps d'échantillonnage t_{lf} de 0,1 s. Cependant, la fréquence du courant moteur dans cet exemple peut aller jusqu'à 600 Hz. Pour cette raison, le courant instantané doit être calculé à un temps d'échantillonnage plus rapide t_{hf} d'au moins 10 à 20 fois inférieur à la période minimale du courant moteur. Plus le temps

d'échantillonnage rapide t_{hf} est élevé, plus la précision du calcul est faible, mais plus le temps de calcul est rapide. Pour un calcul numérique pratique, la fréquence d'échantillonnage F_{hf} pourrait être la même que la fréquence de commutation du convertisseur de puissance F_{sw} , qui sera utilisée pour calculer les pertes instantanées des transistors. Le courant instantané synthétisé I_{inst} au temps d'échantillonnage t_{hf} (égal à 1/10 kHz dans cet exemple), basé sur les courbes I_{mRMS} et F_m est montré dans la partie droite de la Fig. 2. Notez que l'enveloppe de la courbe de la Fig. 2 est égale à la courbe I_{mRMS} multipliée par $\sqrt{2}$. Cependant, comme le montre la partie zoomée de la Fig. 2, I_{inst} est sinusoïdal mais sa valeur de crête et sa fréquence changent continuellement.

Comme le montre [8], les pertes en conduction ($P_{cond}(t)$) dans une puce SiC, qui sont moyennées sur une période de commutation, ne peuvent être calculées que si l'on connaît le rapport cyclique instantané ($D(t)$) à chaque période de commutation. De plus, pour calculer les pertes en commutation ($P_{sw}(t)$) moyennées sur une période de commutation, il faut connaître la valeur instantanée de la tension commutée (qui est généralement égale à la tension du bus $V_{DC}(t)$) ainsi que le courant commuté instantané, qui est donné par l'équation. Le rapport cyclique instantané $D(t)$ dépend de l'indice de modulation instantané de l'onduleur $M_i(t)$ qui dépend de la vitesse du moteur. $D(t)$ dépend également du facteur de puissance à la sortie de l'onduleur, c'est-à-dire de l'angle $\theta(t)$ entre le courant et la tension imposée à la sortie de l'onduleur. Les variables M_i et θ sont également données dans le modèle de moteur électrique, de la même manière que I_{mRMS} et F_m montrés ci-dessus. Par conséquent, ces valeurs peuvent être utilisées pour estimer les valeurs instantanées du rapport cyclique :

$$D(t) = (1 + M_i(t) \cdot \sin \left(\int 2\pi \cdot F_m(t) dt + \theta \right)) / 2 \quad (2)$$

Avec les valeurs instantanées du courant et du rapport cyclique, les pertes instantanées, moyennées sur chaque période de commutation, peuvent être calculées comme indiqué dans [8]. Cependant, les énergies de commutation et la résistance à l'état passant (qui dépendent de la température, de la tension et du courant) doivent être modélisées avec précision.

Le calcul des pertes instantanées dépend de la température des composants et vice versa, ce qui en fait un problème thermoélectrique couplé. Pour cette raison, un modèle thermique est nécessaire. Un modèle thermique précis pour les puces SiC à l'intérieur du module de puissance peut être trouvé dans [5]. Cependant, pour la présente étude, les courbes d'impédance thermique de la fiche technique sont extraites et converties en valeurs RC d'un réseau FOSTER.

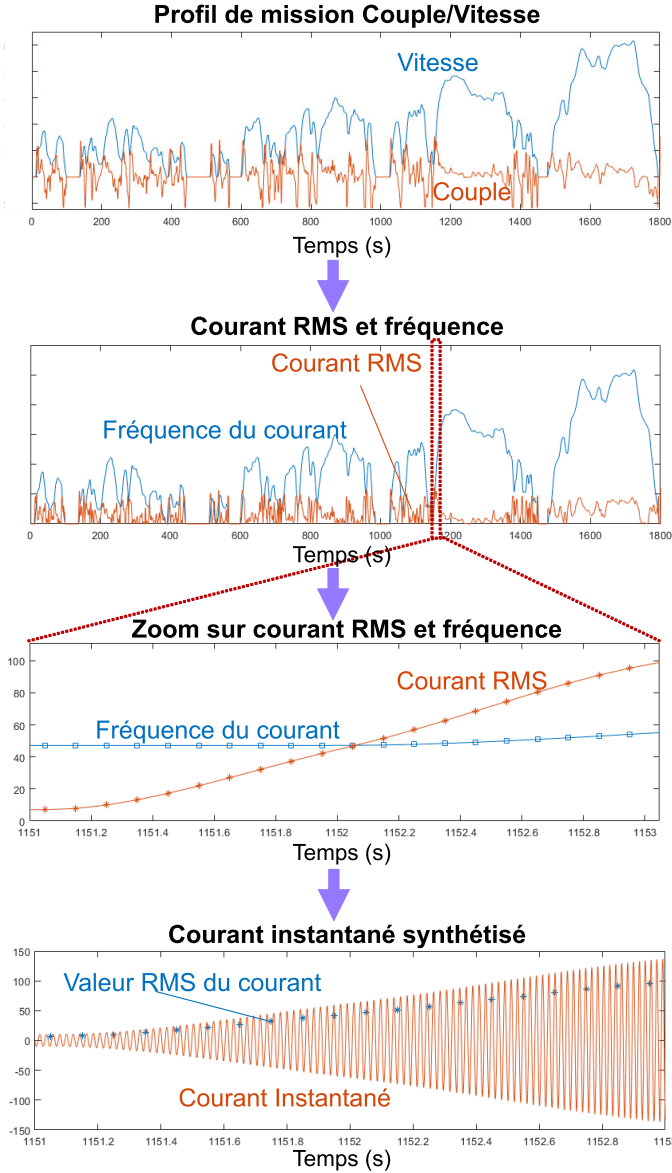


FIG. 2. Illustration de la manière d'utiliser le profil de mission basse résolution pour trouver la valeur instantanée du courant de sortie afin de trouver la température instantanée du SiC.

Il existe différentes manières de résoudre le problème thermo-électrique et de trouver la température de jonction instantanée de chaque puce à l'intérieur du module de puissance. Cependant, à titre de simplicité, la plus simple, un bien que ce ne soit pas assez rapide pour être utilisée dans un processus d'optimisation de convertisseur, sera utilisée ci-après. Une simulation PLECS est utilisée où nous insérons le modèle de composants SiC (module de puissance de référence ADP480120W3 dans cet exemple) en utilisant les courbes $R_{DS,on}(I, T_j)$, $E_{on}(I, T_j, V)$, $E_{off}(I, T_j, V)$ et le modèle d'impédance thermique Z_{th} .

Le courant instantané $I_{inst}(t)$ (comme le montre la Fig. 2) est imposé en sortie de chaque bras de commutation, ainsi que les valeurs instantanées du rapport cyclique $D(t)$ au niveau de la commande de grille connectée à chaque bras de commutation. Les résultats sont les pertes instantanées dans chaque interrupteur ($P_{tot}(t)$) et la température de jonction instantanée ($T_j(t)$).

Les résultats de cette simulation sont présentés dans la Fig. 3. Elle montre la température de jonction instantanée pour l'interrupteur du haut (HS) d'un bras. Notez que les courbes montrent les valeurs calculées pour l'ensemble du profil de mission, mais aussi un zoom montrant comment la température change à la

même fréquence que la fréquence du courant moteur. La Fig. 3 montre également la température calculée de manière classique, en utilisant uniquement la résolution de fréquence inférieure (à un temps d'échantillonnage de 0,1 s). L'analyse de la Fig. 3 permet de tirer trois conclusions principales :

1. La température de jonction Haute Résolution présente une moyenne (sur une période égale à celle du courant moteur) égale à la température de jonction Basse Résolution. Cela montre que les modèles de pertes et de température moyennes sont très proches en haute et basse résolution.
2. La température de jonction Haute Résolution présente de nombreux cycles haute fréquence. Ces cycles sont à la même fréquence que la fréquence du courant moteur. Par conséquent, le profil Haute Résolution aura beaucoup plus de cycles thermiques compté par l'algorithme de comptage Rainflow.
3. Les cycles de puissance haute fréquence présentent généralement de faibles variations de température. Cependant, au-delà de 2000 s dans le profil de mission, le véhicule se trouve dans une situation où le couple moteur est élevé, mais la vitesse du moteur est faible. Dans cette situation, comme le montre la partie en zoom de la figure 3, la température de jonction présente des cycles d'amplitude allant jusqu'à 16 K, mais à des fréquences comprises entre 5 et 25 Hz.

3. ALGORITHMES DE COMPTAGE RAINFLOW POUR LES CYCLES DE PUISSANCE À HAUTE FRÉQUENCE

Les algorithmes Rainflow sont utilisés pour compter et classer les cycles thermiques. Ils sont appliqués uniquement aux points extrêmes (pics et vallées) des températures pour calculer les boucles d'hystérésis. Dans un profil de mission classique (comme celui de la Fig. 2), le profil de mission a un pas de 0,1 s et par conséquent seuls les cycles thermiques "basse fréquence" sont comptés et utilisés pour déterminer la durée de vie des composants. Une modification de l'algorithme rainflow classique est ici proposée afin de l'appliquer à un profil de température haute résolution ayant des cycles thermiques de fréquences allant jusqu'à 1 kHz. A ces hautes fréquences (> 10 Hz), deux défis principaux doivent être résolus : 1 - Les cycles doivent être classés non seulement par leur amplitude et leur température moyenne, mais aussi par leur fréquence. 2 - Les données haute résolution et l'approche algorithmique doivent être fortement simplifiées afin que les résultats puissent être trouvés dans un délai raisonnable.

Les températures basse résolution et haute résolution (instantanées) représentées à la Fig. 3 ont été utilisées pour calculer le nombre de cycles classés par température moyenne, amplitude de température et fréquence. Le résultat est présenté Fig. 4, montrant le nombre de cycles comptés pour chaque plage d'amplitude de cycle (et en ignorant la température moyenne et la fréquence), pour les profils de mission basse et haute résolution. Notez que le nombre de cycles comptés pour une faible amplitude de cycle est beaucoup plus élevé (jusqu'à 1000 fois plus élevé) dans le profil haute résolution, ce qui indique que ces cycles haute fréquence peuvent avoir une grande influence sur la durée de vie du module de puissance.

4. INFLUENCE DES CYCLES DE PUISSANCE À HAUTE FRÉQUENCE SUR LA DURÉE DE VIE DES MODULES DE PUISSANCE SiC

Le modèle de durée de vie utilisé pour calculer la durée de vie du module de puissance SiC est le modèle de [1] démontré dans l'équation 3, qui a été développé pour un module de puissance SiC.

$$N_f = K' \cdot \Delta T_j^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_{j,min}}} \quad (3)$$

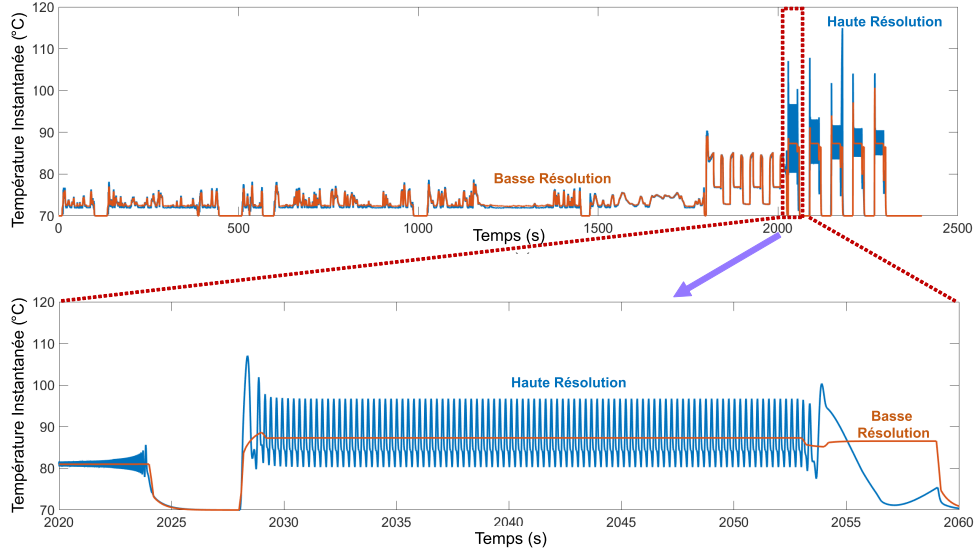


FIG. 3. Température de jonction instantanée du composant HS pour le profil de mission donné (et zoom), à basse (ligne orange) et haute (ligne bleue) résolution.

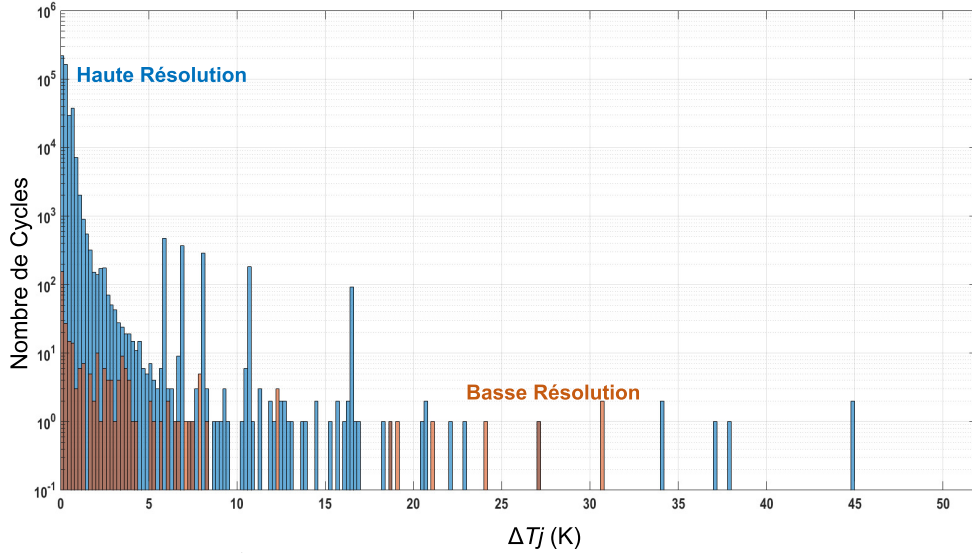


FIG. 4. Nombre de cycles comptés pour différents ΔT_j en utilisant le profil basse résolution (orange) et en tenant compte des cycles haute fréquence (bleu).

Où $K' \cdot \Delta T_j^{\beta_1}$ représente le terme de Coffin-Manson, et $e^{\frac{\beta_2}{T_{j,min}}}$ représente le terme d'Arrhenius. Les paramètres K' , β_1 et β_2 , définis précédemment dans [1], sont utilisés comme paramètres de sensibilité pour évaluer l'influence des régimes plastique et élastique sur le vieillissement du module SiC. Cependant, ce modèle et tous les autres de la littérature ne sont pas précis pour les amplitudes de cycle inférieures à 40 K. Pour cette raison, une étude de sensibilité a été appliquée en modifiant les paramètres du modèle de durée de vie (comme le montre la Fig. 5), afin de prendre en compte la déformation élastique pour une faible amplitude de cycle (variation du paramètre β' de -10 à -4). Plus la valeur absolue de β' est élevée, plus l'influence de la déformation élastique est importante et moins l'est la déformation plastique et, par conséquent, plus le nombre de cycles jusqu'à la défaillance est élevé pour les faibles amplitudes de cycle. La Fig. 6 indique le nombre d'occurrences du profil de mission illustré à la Fig. 2 que le module de puissance SiC peut supporter jusqu'à la défaillance. La ligne orange montre le résultat en utilisant le profil de mission basse résolution et la ligne bleue celui qui tient compte des cycles haute fréquence. Notez que si les cycles haute fréquence (à la fréquence du courant moteur) sont pris en compte, le nombre de profils de mission jusqu'à la défaillance est divisé par 30 (en ne considérant que la déforma-

tion plastique, ce qui est représenté par les lignes pointillées) et jusqu'à 10 (en considérant la déformation élastique comme dans [1], lorsque $\beta' = -10$). Ce graphique montre que, même si le modèle de durée de vie du module de puissance est inexact, les cycles de puissance à haute fréquence doivent être pris en compte dans l'estimation de la durée de vie. Ne pas le faire entraînera une sous-estimation de la durée de vie d'un facteur 10.

5. CONCLUSIONS

Cet article propose une procédure pour prendre en compte les cycles thermiques à haute fréquence dans l'estimation de la durée de vie des modules de puissance SiC. Pour ce faire, une méthodologie de calcul de la température de jonction instantanée du module de puissance SiC basée sur des profils de mission automobile a été introduite. Le résultat de cette méthodologie est un profil de température de jonction contenant des cycles thermiques longs et courts. L'impact des cycles thermiques à haute fréquence sur l'estimation de la durée de vie du module de puissance SiC a été démontré. De plus, une étude de sensibilité des paramètres empiriques du modèle de durée de vie a été menée pour assurer une application précise des modèles de durée de vie utilisés pour les dispositifs de puissance conventionnels afin d'estimer la durée de vie des modules de puissance SiC. Les ré-

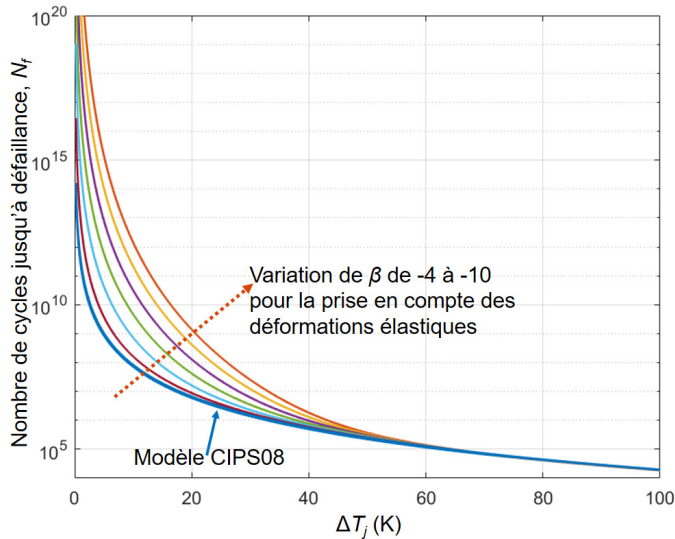


FIG. 5. Modèle de durée de vie considérant la déformation élastique.

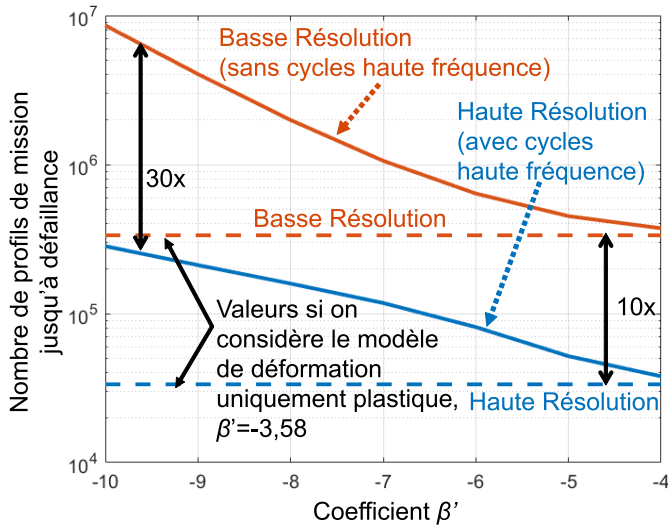


FIG. 6. Nombre de profils de mission jusqu'à la défaillance pour différentes valeurs des coefficients du modèle de vie (β') et pour l'utilisation du profil basse fréquence (ligne orange) et en considérant les cycles haute fréquence (lignes bleues).

sultats ont indiqué que négliger les cycles thermiques à haute fréquence pourrait conduire à une sous-estimation de la durée de vie des modules de puissance SiC de plus d'un facteur 10.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été soutenu par Key Digital Technologies Joint-Undertaking, projet ARCHIMEDES, dans le cadre d'Horizon Europe et des autorités nationales sous la convention de subvention numéro 101112295.

7. RÉFÉRENCES

- [1] F. Hoffmann, S. Schmitt and N. Kaminski, "Lifetime Modeling of SiC MOSFET Power Modules During Power Cycling Tests at Low Temperature Swings," 2023 35th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Hong Kong, 2023, pp. 294-297.
- [2] Laurent Dupont, Gérard Coquery, Kai Kriegel, Ashot Melkonyan. "Accelerated Active Ageing Test on SiC JFETs Power Module with Silver Joining Technology for High Temperature Application". ESREF 2009 - 20th European Symposium on the Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, Oct 2009, Bordeaux, France. pp. 1375-1380.
- [3] J. Falck, C. Felgemacher, A. Rojko, M. Liserre and P. Zacharias, "Reliability of Power Electronic Systems : An Industry Perspective," in IEEE In-

dustrial Electronics Magazine, vol. 12, no. 2, pp. 24-35, June 2018.

- [4] U. Scheuermann and M. Junghaenel, "Limitation of Power Module Lifetime Derived from Active Power Cycling Tests," CIPS 2018 ; 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Stuttgart, Germany, 2018, pp. 1-10.
- [5] A. Teixeira, B. Cougo, G. Segond, L.M.F. Morais, M. Andrade, D.H. Tran, "Precise estimation of dynamic junction temperature of SiC transistors for lifetime prediction of power modules used in three-phase inverters", Microelectronics Reliability, Volume 150, 2023, 115137.
- [6] B. Cougo, H.H. Sathler, M. Andrade, A. Teixeira, F. Coccetti, "Reliability-Oriented Optimization of High Performance SiC-Based Power Drive Systems for Aircraft Applications". 2024 , International conference proceedings , International Conference on More Electric Aircraft (MEA2024) , 2024-02-07 , 2024-02-08 , Toulouse , France.
- [7] Barbagallo, C., Rizzo, S. A., Scelba, G., Scarcella, G., Cacciato, M. (2021). On the Lifetime Estimation of SiC Power MOSFETs for Motor Drive Applications. Electronics, 10(3), 324.
- [8] B. Cougo, L.M. F. Morais, G. Segond, R. Riva, D.H. Tran, "Influence of PWM Methods on Semiconductor Losses and Thermal Cycling of 15-kVA Three-Phase SiC Inverter for Aircraft Applications". Electronics 2020, 9(4), 620.