

Evaluation de paramètres thermosensibles basés sur la mesure de la tension directe de composants IGBT pour une utilisation dans des conditions d'usage

Laurent Dupont¹, Yvan Avenas²

¹ IFSTTAR, COSYS-LTN, 25 allée des Marronniers, F-78000 Versailles, France, laurent.dupont@ifsttar.fr

² Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

RESUME -La température des composants à semi-conducteurs est l'un des principaux facteurs qui affectent les performances et la fiabilité des convertisseurs de puissance. L'estimation de cette température est aujourd'hui principalement réalisée grâce à des paramètres électriques thermosensibles, mais ces derniers sont encore peu ou pas adaptés aux conditions fonctionnelles des convertisseurs. Cet article présente l'évaluation de nouveaux indicateurs, basés sur des mesures de la tension directe des composants, permettant une mesure indirecte de la température durant le fonctionnement d'un convertisseur de puissance. Les résultats obtenus apportent une information complémentaire sur la robustesse de ces indicateurs par rapport à certains mécanismes d'endommagement dus au vieillissement des modules de puissance.

Mots-clés—Température, Composant de puissance, Paramètre électrique thermosensible (PETS), Vieillessement, Caractérisation.

1. INTRODUCTION

La température de jonction est un paramètre qui affecte fortement les performances électriques et la durée de vie des modules à semi-conducteurs de puissance. L'estimation de cette température est essentielle pour évaluer notamment leurs performances thermiques, mais aussi pour quantifier les contraintes et les niveaux des endommagements révélés lors de vieillissements accélérés conduits en laboratoire [1,2]. Toutefois, les moyens permettant d'accéder à cette grandeur restent relativement restreints en raison de l'environnement contraignant en partie lié à une forte intégration fonctionnelle. Cependant, différentes solutions permettent de répondre à cette attente [3].

Ainsi, des fabricants proposent des solutions avec un capteur de température reporté au sein du module de puissance. Avec l'aide d'un modèle thermique précis, il est ainsi possible d'évaluer les températures des parties actives situées dans l'environnement proche de ce capteur. Toutefois, les modèles d'intégration des fonctions de conversion de puissance sont de plus en plus complexes. De plus, les performances thermiques d'un système de conversion d'énergie (convertisseur, système de refroidissement...) ne sont pas stables tout au long de la vie

du système. Ce facteur conduit alors à une divergence du modèle initial qui peut être difficile à corriger [4]. D'autres approches proposent d'intégrer un capteur thermosensible dans le composant semi-conducteur [5]. Au-delà de la spécificité de ces puces instrumentées, nécessairement plus coûteuses, l'information recueillie est une donnée locale qui ne peut rendre compte à elle seule de la réelle contrainte thermique. En effet, la topologie d'intégration et les fortes densités de puissance mises en jeu renforcent la distribution intrinsèquement inhomogène de la température au sein d'un composant de puissance [6].

Enfin, de façon plus largement répandue, l'usage des caractéristiques électriques thermosensibles des composants de puissance permet d'acquérir une information sur la température des parties actives. Sans détailler l'ensemble des Paramètres Electriques ThermoSensibles (PETS), cette solution repose sur une campagne de calibration du paramètre thermosensible pour obtenir une mesure électrique représentative de la température du composant. Il est possible de classer les paramètres électriques thermosensibles en deux grandes familles. La première famille regroupe ceux qui sont exploitables dans des conditions éloignées des conditions réelles d'usage des composants dans un convertisseur (i.e. hors ligne). Dans certains cas, les PETS hors-ligne peuvent néanmoins être intégrés dans des convertisseurs fonctionnels sous réserve de définir des instants où la configuration du convertisseur permet de se rapprocher des conditions de la calibration [7]. La deuxième famille comprend les PETS pouvant être exploités dans les conditions opérationnelles des convertisseurs de puissance (i.e. en-ligne). Cette solution fait l'objet de nombreuses recherches afin de répondre aux besoins de nouveaux indicateurs permettant de renforcer principalement trois axes de recherches intimement liés. Le premier axe porte sur l'évaluation en laboratoire des modes et mécanismes physiques d'endommagement des composants de puissance soumis à des contraintes représentatives de l'usage. Le second axe propose d'informer le système sur des événements erratiques qui entraineraient le module de puissance à devoir fonctionner dans des conditions trop sévères vis-à-vis de son dimensionnement. Enfin, le dernier axe porte sur le diagnostic

des modules à semi-conducteur de puissance afin de satisfaire un besoin grandissant de disponibilité du système.

Au regard de ce contexte, les solutions actuellement disponibles ne sont pas encore totalement satisfaisantes. Cet article présente les résultats issus de l'évaluation de nouveaux indicateurs électriques de la température des composants silicium (IGBT). Ces PETS sont basés sur la mesure de la tension directe afin de s'affranchir du besoin de capteurs spécifiques. Notons que l'objectif principal de cet article n'est pas de proposer des moyens d'implémentation de ces PETS dans un convertisseur, mais de valider que ces indicateurs permettent bien d'évaluer de manière assez précise la température de jonction des semi-conducteurs.

Après avoir décrit les PETS choisis, le banc de caractérisation électrique sera présenté en détaillant l'utilisation de la caméra infrarouge pour contrôler la température des composants. Ce banc sera utilisé pour, dans un premier temps, caractériser les PETS choisis puis, dans un second temps, pour faire des mesures de température dans des conditions de dissipation. D'autres facteurs seront pris en compte dans la perspective d'une mesure de la température lors du fonctionnement d'un convertisseur. Ainsi, devant les besoins de robustesse de ces indicateurs vis-à-vis de l'endommagement, une étude complémentaire permettra d'évaluer leurs comportements face à la dégradation des fils de bonding.

2. CHOIX DES PETS

2.1. PETS usuellement utilisés pour la mesure de température dans des conditions fonctionnelles

Deux types de PETS sont essentiellement étudiés pour effectuer des mesures de température indirectes lors du fonctionnement du convertisseur [8] :

- la variation des grandeurs temporelles lors des commutations (délais de la fermeture ou de l'ouverture [9,10,11], pente du courant [9,10], pente de la tension [12]...)
- la variation de la tension directe [13,14,15].

Dans le premier cas, la mesure du PETS est difficile en raison de sa très faible sensibilité (au maximum quelques ns/°C pour les mesures de temps) et de sa dépendance à de nombreux facteurs extérieurs comme la tension de commande et les différents paramètres de la maille de commutation. Pour le deuxième cas, il a été montré que l'un des principaux défauts de cette méthode est la forte dépendance de la mesure avec les mécanismes d'endommagement conduisant notamment à une augmentation de la résistance électrique (levé de fil de bonding par exemple). Dans certains cas, cette méthode se révèle très imprécise même dans le cas de composants sains [13].

La raison de cette imprécision est toutefois assez simple à expliquer. En effet, la tension directe mesurée aux bornes d'un composant est la somme de la tension propre du composant semi-conducteur et de celle des interconnexions électriques. Après quelques hypothèses simplificatrices, il est ainsi possible d'écrire pour un composant IGBT :

$$V_{CE,mes} = V_{CE}(T_j, I_C, V_{GE}) + R_{con}(T_{con})I_C \quad (1)$$

où $V_{CE,mes}$ est la tension mesurée, V_{CE} la tension au niveau de la puce semi-conductrice, I_C le courant dans l'IGBT, V_{GE} la tension grille-émetteur, R_{con} , la résistance des interconnexions, T_j la température de jonction du composant semi-conducteur et T_{con} la température des interconnexions. Pour une température de jonction T_j donnée, la température T_{con} des connexions n'est pas la même pendant la phase de calibration que dans les conditions fonctionnelles. En conséquence, pour une même température T_j , un même courant I_C et une même tension V_{GE} , la tension mesurée aux bornes de l'IGBT n'est pas la même lors du fonctionnement de l'IGBT que lors de la calibration du paramètre thermosensible ce qui crée inévitablement des erreurs de mesures pouvant être très importantes. Par ailleurs, lors du vieillissement du composant de puissance, la tension directe peut varier pour les mêmes conditions de température et de courant en particulier en raison de la dégradation des fils de bonding. Ce type de mesure semble finalement peu adapté à une mesure dans des conditions fonctionnelles tout au long de la vie du convertisseur.

Toutefois, même si l'utilisation de la tension directe est peu précise, elle reste attractive, car elle est relativement simple à mettre en œuvre. De plus, elle peut être utilisée avec tous types de composants et sa sensibilité peut être relativement grande (quelques mV/°C). Nous proposons donc dans cet article d'étudier des PETS basés sur la mesure de la tension directe, mais en essayant d'introduire des modifications pour les rendre moins sensibles à la variation de la résistance des interconnexions.

2.2. PETS retenus

Le premier PETS proposé est noté $\Delta V_{CE, \Delta V_{GE}}$. Il peut être utilisé avec des composants commandés bipolaires (IGBT) ou unipolaires (MOSFET). Dans le cas de l'IGBT, le principe est de mesurer la tension directe en utilisant séquentiellement deux niveaux de tension de commande V_{GE1} et V_{GE2} sous le même niveau de courant. Le délai entre deux mesures doit être suffisamment court pour supposer que T_j et T_{con} ont peu varié. Dans ces conditions, deux tensions peuvent être mesurées aux bornes de l'IGBT :

$$V_{CE,mes1} = V_{CE}(T_j, I_C, V_{GE1}) + R_{con}(T_{con})I_C \quad (2)$$

$$V_{CE,mes2} = V_{CE}(T_j, I_C, V_{GE2}) + R_{con}(T_{con})I_C \quad (3)$$

Le nouveau PETS peut ensuite être défini comme :

$$\begin{aligned} \Delta V_{CE, \Delta V_{GE}} &= V_{CE,mes1} - V_{CE,mes2} \\ &= V_{CE}(T_j, I_C, V_{GE1}) - V_{CE}(T_j, I_C, V_{GE2}) \end{aligned} \quad (4)$$

où l'influence de la résistance des interconnexions n'est plus présente. Il faut toutefois bien noter que cette équation n'est valable que sous certaines hypothèses simplificatrices fortes : on suppose ici que le potentiel de métallisation en face avant de la puce est uniforme et que la répartition du courant dans le composant est toujours identique ce qui n'est pas forcément vrai. Ce point sera discuté plus tard.

La figure 1 présente le principe d'utilisation de ce PETS dans le cas d'un IGBT³ 600V-200A (INFINEON SIGC100T60R3) pour un courant de 60A et pour deux niveaux de tension de commande 12V et 15V. Nous voyons que, dans

ce cas, l'écart entre $V_{CE}(15V)$ et $V_{CE}(12V)$ dépend bien de la température ce qui permet d'utiliser ce critère comme paramètre thermosensible.

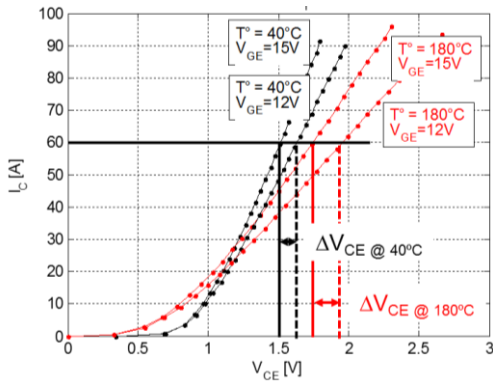


Fig.1 Illustration de l'utilisation de ΔV_{CE_AVGE} comme PETS

Le deuxième PETS est noté V_0 . Il peut être utilisé avec des composants bipolaires (diode, IGBT). Ici, la tension directe est mesurée pour deux niveaux de courant I_{C1} et I_{C2} . Dans le cas de composants IGBT, en maintenant constant la tension de commande V_{GE} , deux tensions directes sont ainsi mesurées :

$$V_{CE_mes1} = V_{CE}(T_j, I_{C1}, V_{GE}) + R_{con}(T_{con})I_{C1} \quad (5)$$

$$V_{CE_mes2} = V_{CE}(T_j, I_{C2}, V_{GE}) + R_{con}(T_{con})I_{C2} \quad (6)$$

Comme cela est présenté sur la figure 2, V_0 est défini à l'intersection entre la droite passant par les points (V_{CE1}, I_{C1}) et (V_{CE2}, I_{C2}) , et l'axe $I_C=0$. Il peut ensuite être montré que :

$$V_0 = \frac{V_{CE_mes2} I_{C1} - V_{CE_mes1} I_{C2}}{I_{C1} - I_{C2}} \quad (7)$$

$$= \frac{V_{CE}(T_j, I_{C2}, V_{GE}) I_{C1} - V_{CE}(T_j, I_{C1}, V_{GE}) I_{C2}}{I_{C1} - I_{C2}}$$

où l'influence de la résistance des interconnexions est annulée en faisant les mêmes hypothèses que celles discutées au-dessus. Notons également que ce paramètre thermosensible ne peut être utilisé que dans le cas où le courant varie périodiquement dans le composant avec une fréquence assez élevée pour supposer que la température du composant et des interconnexions ne varient pas de manière trop importante au cours de la mesure.

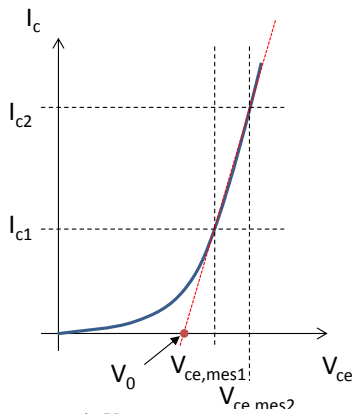


Fig.2 Principe de la mesure de V_0

Un problème lié à l'évaluation de ces deux PETS repose sur le fait qu'ils résultent d'une soustraction de deux valeurs assez proches l'une de l'autre. Afin de limiter les erreurs de mesure, le PETS V_0 sera ainsi caractérisé en utilisant plus de deux niveaux de courant. Nous utiliserons donc une fonction d'interpolation linéaire entre ces différents points afin de déterminer l'intersection avec l'axe des abscisses.

La partie suivante est consacrée aux outils et aux méthodes mis en œuvre pour la validation des PETS présentés.

3. METHODES ET OUTILS DE MESURE

3.1. Dispositif expérimental

Un banc spécifique a été développé permettant la caractérisation des PETS et l'évaluation de leur pertinence dans les conditions de fonctionnement d'un IGBT en dissipation. Le composant caractérisé est situé dans un module de puissance 1200V-100A modèle FS100R12PT4 (INFINEON) qui intègre un onduleur complet associant des composants silicium IGBT et diodes (figure 3).

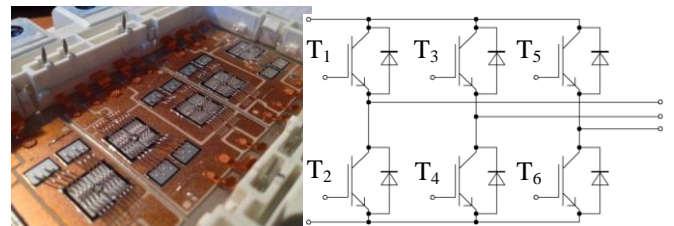


Fig.3 Photo et schéma électrique du module de puissance testé (INFINEON)

Les phases de caractérisation du composant reposent sur l'injection maîtrisée d'un courant I_C et sur la mesure simultanée de la tension directe V_{CE} sous l'effet de ce courant. La valeur de I_C étant élevée, il est nécessaire de limiter la durée de conduction afin de limiter l'auto-échauffement dans le composant IGBT sous test. Ce type de mesure aurait pu être réalisé avec un traceur de caractéristiques, mais il nous semblait important de bien maîtriser la forme des impulsions et de pouvoir contrôler l'auto-échauffement du composant testé. C'est la raison pour laquelle un dispositif dédié a été développé. La figure 4 présente le schéma électrique de la partie puissance de ce banc de test. Le niveau de ce courant est défini avec l'aide de la source de courant I_{P1} en série avec une inductance L_1 permettant de limiter les variations du courant dans le composant sous test. La durée d'injection dans l'IGBT est quant à elle ajustée en contrôlant les durées des séquences de commutations de deux interrupteurs $T_{a1.1}$ et $T_{a1.2}$. Le rôle du second aiguillage de courant (I_{P2} , $T_{a2.1}$, $T_{a2.2}$) sera présenté dans la section 5.

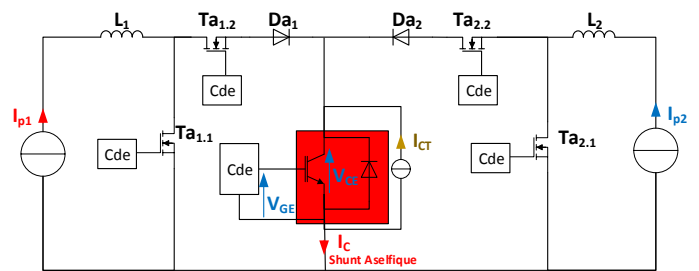


Fig.4 Schéma électrique du banc de test utilisé pour caractériser les PETS et évaluer leur pertinence lors de la dissipation d'un composant.

La commande des séquences de conduction des interrupteurs des deux aiguillages de puissance, le contrôle de la tension de commande V_{GE} , appliquée au composant sous test, sont assurés par un système temps réel Compact Rio (National Instruments).

Les conditions thermiques sont imposées par un système de thermorégulation qui alimente en fluide une boîte à eau sur laquelle le composant est reporté via une interface thermique en graphite de $100\mu\text{m}$ d'épaisseur (figure 5). Les mesures des grandeurs électriques sont réalisées à une fréquence d'échantillonnage de 500 kechs/s avec un système d'acquisition DEWETRON (DEWE800), associé à des conditionneurs isolés (DAQP-LV), permettant d'assurer des mesures des grandeurs électriques avec une incertitude faible ($\pm 0.02\%$ de la valeur mesurée + $\pm 0.05\%$ du calibre de mesure). Le contrôle permettant de satisfaire les besoins de synchronisation est assuré par le système temps réel.

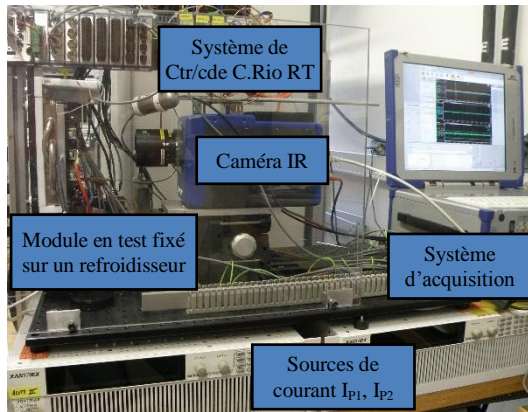


Fig.5 Banc de caractérisation électrothermique

La caractérisation des PETS consiste à tracer l'évolution de paramètres électriques mesurés en fonction de la température. Il est donc important de bien connaître la température de la puce semi-conductrice pour chaque mesure. Ce point est traité dans le paragraphe suivant.

3.2. Evaluation de la température du composant

Tout au long de cet article, trois méthodes distinctes seront utilisées pour évaluer la température du semi-conducteur :

- une mesure par un thermocouple ouvert type K classe 1, placé à proximité du semi-conducteur, permettant une mesure de la température du substrat en cuivre avec une incertitude inférieure à $\pm 1^\circ\text{C}$ après calibration de la chaîne de mesure,
- une mesure de la température de la surface active du composant par caméra infrarouge,
- une mesure réalisée par un PETS défini par la mesure de la tension directe sous un faible courant ($V_{CE\text{Ict}}$).

Ce dernier paramètre est en effet aujourd'hui bien maîtrisé et plusieurs études démontrent qu'il permet d'évaluer de manière robuste et assez précise la température moyenne des composants bipolaires [6,13,16].

Dans un premier temps, les mesures avec le thermocouple et avec la caméra infrarouge seront utilisées pour évaluer la température de la puce pendant la phase de caractérisation des PETS (section 4). Comme nous le verrons plus tard, le PETS

$V_{CE\text{Ict}}$ sera également utilisé afin d'évaluer l'auto-échauffement du composant lorsqu'il est soumis à une impulsion de courant. L'utilisation du PETS $V_{CE\text{Ict}}$ et de la caméra infrarouge permettront dans un deuxième temps d'évaluer la température du composant lorsqu'il dissipe (sections 5 et 6). La mesure réalisée avec la caméra infrarouge, permettant d'évaluer la distribution de la température, sera ensuite comparée aux résultats obtenus avec les PETS proposés dans cet article afin de juger de leur pertinence.

Le paragraphe suivant présente la méthodologie utilisée pour effectuer les mesures avec la caméra infrarouge.

3.3. Mesures avec la caméra thermique

La caméra infrarouge utilisée est de type CEDIP-FLIR SC7500. Après l'élimination par la voie chimique du gel de protection du module de puissance, une couche maîtrisée de peinture haute température (PYROMARK 1200), d'environ $15\mu\text{m}$ d'épaisseur, est déposée par micro pulvérisation. Cette pratique assure le contrôle du dépôt de peinture permettant de satisfaire le besoin d'une émissivité élevée en surface des parties actives. L'émissivité de cette peinture a été caractérisée pour des épaisseurs de dépôt de $14\mu\text{m}$ et $45\mu\text{m}$ et pour des températures comprises entre 23°C et 200°C . Les résultats ont ainsi permis de confirmer le comportement opaque de ce dépôt et la stabilité des caractéristiques dans la gamme de longueurs d'onde couvrant la majorité de la plage du capteur InSb utilisé (figure 6). L'intérêt principal de cette peinture est une faible variation de l'émissivité en fonction de l'épaisseur du dépôt (figure 6a) et de la température (figure 6b). Cela permet ainsi de garantir une mesure de température peu influencée par les conditions d'application de la peinture et par la température propre de l'échantillon à caractériser.

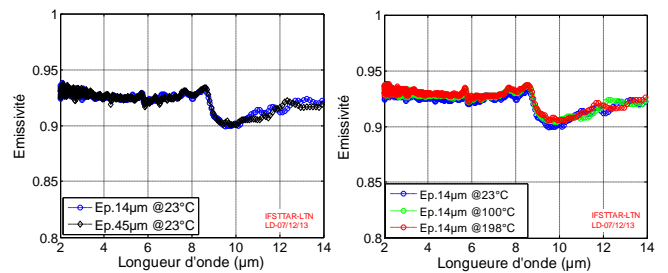


Fig.6 Caractéristiques de l'émissivité de la peinture PYROMARK 1200.

Il faut noter que les mesures de température par caméra infrarouge sont perturbées par des artefacts dus à des singularités géométriques localisées principalement au niveau des fils de bonding (figure 7a).

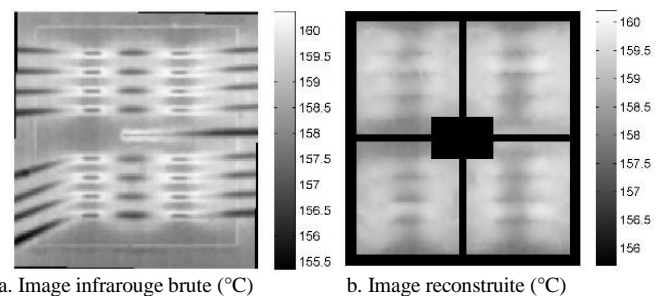


Fig.7 Mesure infrarouge à une température de consigne de 170°C et reconstruction avec correction des zones inactives et des artefacts.

Dans cette étude, ces artefacts sont donc masqués par un traitement numérique des images brutes. La température de la surface du composant est ensuite reconstruite (figure 7b) afin d'obtenir une mesure de température plus juste de la partie active du composant IGBT [17].

Afin de valider les mesures par caméra infrarouge, des mesures de température sont effectuées sans dissipation des composants de puissance et en faisant varier la température du fluide de refroidissement. La figure 8 présente la différence entre la température du composant mesurée par le thermocouple et la valeur moyenne calculée à partir des mesures obtenues par la caméra infrarouge. La différence reste inférieure à 1°C sur la plage comprise entre 20°C et 160°C.

Le banc de test étant décrit, nous allons maintenant présenter la caractérisation des PETS proposés en fonction de la température.

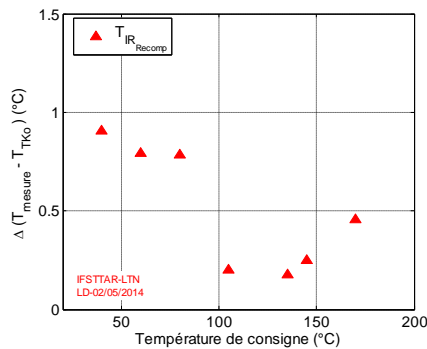


Fig.8 Evaluation des écarts entre les mesures par le les températures moyennes calculées à partir du traitement des mesures infrarouges ($T_{IR\ Recomp}$).

4. CARACTERISATION DES PETS

4.1. Méthode de caractérisation

La phase de caractérisation consiste à mesurer l'évolution de chaque PETS en fonction de la température mesurée avec le thermocouple. Concernant l'auto-échauffement du composant lors des caractérisations, celui-ci doit absolument être minimisé et quantifié afin de rapprocher les nouveaux PETS étudiés avec une estimation précise de la température de référence T_{JV} obtenue avec le PETS $V_{CE\ Ict}$. En effet, dans cet article les PETS étudiés reposent sur une mesure de tension directe sous un courant important avec une tension de commande V_{GE} variant de 11V à 15V. Ces conditions induisent une dissipation de puissance importante dans le composant IGBT. L'instant de la mesure des paramètres électriques doit donc être réduit. Il sera ici réalisé entre 50 et 100µs, après l'établissement du courant I_C , au cours d'une impulsion de courant d'une durée totale de 300µs.

La figure 9 présente une sollicitation électrique imposée au composant testé sous un courant de 180A, injecté durant 300µs, à une température de régulation de 170°C. Cette séquence de caractérisation est reproduite pour différents niveaux de courant I_C compris entre 10A et 190A, pour des tensions de commande V_{GE} comprises entre 11V et 15V et des températures de référence comprises entre l'ambient (20°C) et 170°C. Pour chaque palier de température, il est donc nécessaire de traiter 59 séquences d'injection de courant afin d'extraire les

caractéristiques d'un composant à une température de référence donnée.

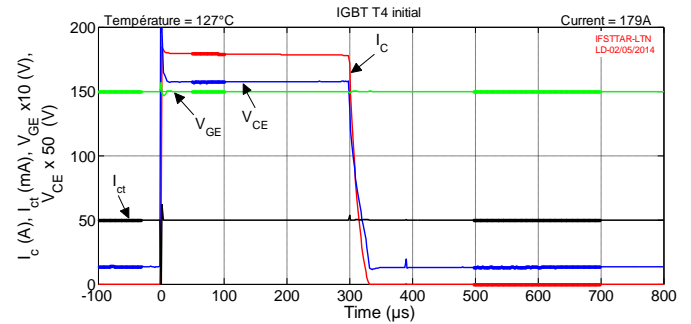


Fig.9 Evolution des sollicitations électriques imposées au composant ($T_{JV}=127^\circ\text{C}$, $I_C=180\text{A}$, $V_{GE}=15\text{V}$) pour permettre l'extraction de ses caractéristiques.

La séquence d'injection du courant dans le composant est composée de 3 phases distinctes, référencées avec l'instant correspondant au début de l'injection du courant I_C ($t_0=0\mu\text{s}$):

- Phase 1 entre $-100\mu\text{s}$ et $-30\mu\text{s}$, avant l'injection du courant dans le composant: l'extraction des points de la caractéristique du PETS $V_{CE\ Ict}$ à partir de la mesure moyenne des grandeurs électriques en rapport avec la mesure réalisée avec le thermocouple ouvert.
- Phase 2 entre $+50\mu\text{s}$ et $+100\mu\text{s}$, après le phénomène transitoire d'établissement du courant dans le composant sous test : l'extraction des points de la caractéristique directe du composant à partir de la mesure moyenne des grandeurs électriques V_{CE} et I_C .
- Phase 3 entre $+500\mu\text{s}$ et $+700\mu\text{s}$, après l'annulation du courant de puissance dans le composant sous test: réalisation de l'extraction, grâce à la mesure indirecte par le PETS $V_{CE\ Ict}$, de la température du composant à la fin de l'injection du courant de caractérisation.

L'élévation de la température au cours de l'injection du courant durant 300µs est estimée à plus de 15K dans les cas extrêmes caractérisés par un niveau de courant I_C élevé et une faible tension de commande V_{GE} . Une correction de la température du composant à laquelle est réalisée la mesure entre 50µs et 100µs est donc mise en œuvre pour chaque séquence d'injection. Cette correction est calculée grâce à une interpolation linéaire, en racine carrée du temps [8], à partir des deux mesures indirectes de la température du composant par le PETS $V_{CE\ Ict}$ avant l'injection (phase 1 à $t=0$) et à la fin de l'injection (phase 3 à $t=+300\mu\text{s}$).

Trois PETS seront caractérisés dans les paragraphes suivants : le PETS $V_{CE\ I_C}$ (tension directe) et ceux présentés dans la section 2 ($\Delta V_{CE\ AVGE}$ et V_0).

4.2. Résultats de la caractérisation du PETS $V_{CE\ I_C}$

La campagne de caractérisation des nouveaux PETS nous permet d'extraire facilement le PETS $V_{CE\ I_C}$ correspondant à la variation de la chute de tension V_{CE} en fonction de la température pour un niveau de courant et une tension V_{GE} donnés. Les résultats d'extraction du PETS $V_{CE\ I_C}$ démontrent une sensibilité extrêmement dépendante du courant I_C (figure 10).

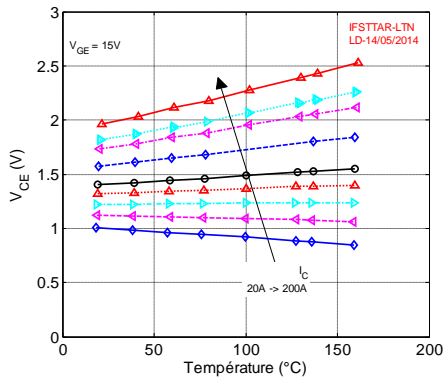


Fig.10 Caractéristiques du PETS $V_{CE_{Ic}}$ pour des niveaux de courant compris entre 20A et 200A et $V_{GE}=15V$.

La sensibilité de ce PETS, fonction du niveau du courant I_C , est comprise entre -1mV/K et +4mV/K pour une tension V_{GE} de 15V. Des conditions particulières d'exploitation de ce PETS peuvent donc entraîner une sensibilité nulle.

4.3. Résultats de la caractérisation du PETS $\Delta V_{CE_{\Delta V_{GE}}}$

Les caractéristiques du PETS $\Delta V_{CE_{\Delta V_{GE}}}$ sont présentées ci-après pour différents niveaux de courant compris entre 40A et 100A et pour deux valeurs de variation de la tension V_{GE} respectivement de 15V à 12V (figure 11a) et de 15V à 11V (figure 11b). Ces résultats démontrent une augmentation significative de la sensibilité pour des niveaux de courant élevés et pour une variation importante de la tension V_{GE} entre 15V et 11V.

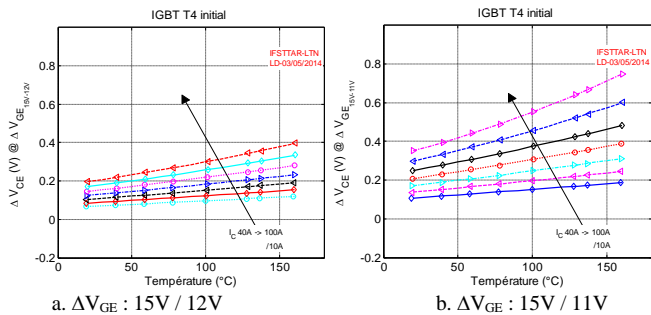


Fig.11 Caractéristiques du PETS $\Delta V_{CE_{\Delta V_{GE}}}$ pour des niveaux de courant compris entre 40A et 100A et deux amplitudes de variation de la tension V_{GE} .

La sensibilité est dépendante du niveau de courant et de l'amplitude de la variation de la tension V_{GE} . Il est important d'éviter l'utilisation de ce PETS à des niveaux de courant trop bas et pour des variations de la tension V_{GE} de trop faible amplitude. La sensibilité moyenne entre 40°C et 160°C est estimée à près de 2,5mV/K dans le cas d'une exploitation de ce PETS $\Delta V_{CE_{\Delta V_{GE}}}$ pour un courant de 90A et une variation de la tension V_{GE} entre 15V et 12V.

4.4. Résultats de la caractérisation du PETS V_0

Chaque tension V_0 est extraite, à l'aide d'une régression linéaire par la méthode des moindres carrés de la caractéristique directe, pour des niveaux de courant compris entre 30A et 120A (figure 12). La figure 13 présente, pour $V_{GE}=15V$, l'évolution du PETS V_0 pour des températures comprises entre 20 et 160°C. L'estimation des incertitudes sur les valeurs de V_0 est calculée avec la propagation des incertitudes

de mesure qui se reportent sur les coefficients de chaque régression linéaire.

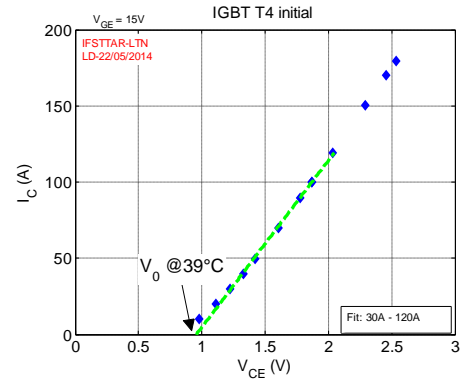


Fig.12 Principe de mesure de V_0

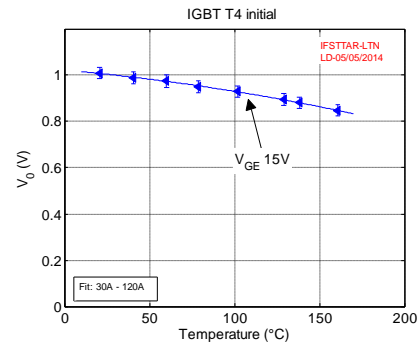


Fig.13 Caractéristiques du PETS V_0 pour une tension V_{GE} de 15V.

Sur la plage des températures comprises entre 20°C et 160°C, ces résultats démontrent des sensibilités de V_0 relativement faible avec, dans le cas d'une tension V_{GE} de 15V, un niveau d'environ -1mV/K.

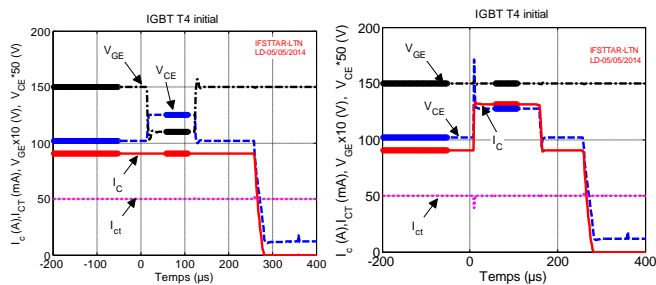
5. MESURES DE LA TEMPERATURE EN DISSIPATION

5.1. Conditions expérimentales

Durant toutes les campagnes de test en dissipation, la température de la boîte à eau est régulée à 40°C par le système de thermorégulation. Les niveaux de courant injecté (de 60A à 90A) sont imposés afin de conduire le composant sous test à différentes températures d'équilibre. La réalisation de la mesure permettant de qualifier la pertinence des nouveaux PETS ($\Delta V_{CE_{\Delta V_{GE}}}$ et V_0) dans des conditions de dissipation repose sur la mise en œuvre de séquences comprenant trois phases :

- Phase 1 : Injection d'un courant constant permettant d'élever la température du composant IGBT sous test en régime saturé à $V_{GE}=15V$ jusqu'à un régime stationnaire.
- Phase 2 : Modification transitoire des conditions de conduction du composant sous test (variation de la tension V_{GE} ou modification du niveau du courant I_C injecté).
- Phase 3 : Interruption de l'injection du courant de puissance dans le composant sous test pour une mesure indirecte par le PETS $V_{CE_{Ic}}$, puis retour dans les conditions de la phase 1 pour recouvrer le régime stationnaire.

La figure 14a présente un enregistrement des grandeurs électriques, réalisé sous un courant I_C de 90A, permettant d'extraire le PETS ΔV_{CE_AVGE} avec une variation de la tension V_{GE} de 15V à 11V en moins de 30 μ s et durant environ 100 μ s. La figure 14b présente, dans les mêmes conditions de dissipation, la variation de la valeur du courant injecté dans le composant de 90A à 130A en moins de 10 μ s et durant environ 100 μ s. Afin d'améliorer l'extraction du PETS ΔV_{θ} cette procédure est répétée, après un retour à l'équilibre thermique, pour des variations du niveau de courant de 10,20,30,40 et 50A. Enfin, pour chaque séquence, une estimation de la température du composant est réalisée par le PETS V_{CE_Ict} avec une régression linéaire en racine de temps permettant d'évaluer la température en fin d'injection.



a. Variation de la tension V_{GE} b. Variation du niveau de courant I_C
Fig.14 Présentation des enregistrements des grandeurs électriques, réalisés sous un courant I_C de 90A, permettant d'extraire les PETS ΔV_{CE_AVGE} et ΔV_{θ} .

Le contrôle de la température par la mesure infrarouge est réalisé régulièrement lors de la phase 1 au cours de la répétition des séquences permettant l'extraction des PETS (figure 15). Le traitement numérique des zones actives est analogue à celui présenté lors de la campagne de caractérisation des PETS.

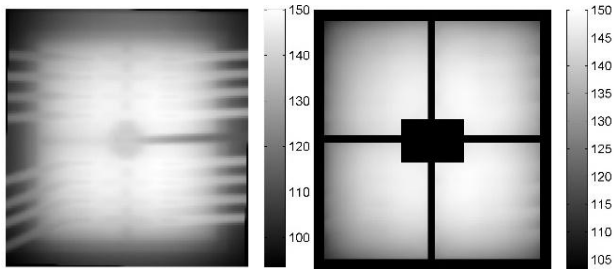


Fig.15 Présentation de la mesure infrarouge de la température ($^{\circ}$ C) en surface du composant IGBT sans dégradation pour un courant injecté I_C de 90A.

Le temps d'intégration de la caméra infrarouge est redéfini en fonction des températures maximales mesurées afin de maintenir une bonne précision de mesure. De plus, cette mesure permet de vérifier que la température maximale de l'IGBT ne dépasse pas la spécification du constructeur avec $T_{jv_max}=150^{\circ}$ C dans le cas d'un régime de fonctionnement en commutation.

Les mesures obtenues avec la caméra infrarouge, au cours de la phase 1, sont traitées pour extraire les températures moyennes, minimales et maximales de la partie active. Ces données sont confrontées aux mesures réalisées avec l'utilisation du PETS V_{CE_Ict} , rapprochées avec l'instant du début de la phase 3. Le tableau détaille la moyenne des résultats obtenus pour chaque niveau de courant imposé lors de la campagne en dissipation.

Tableau 1. Températures de IGBT en dissipation (sans dégradation)

I_C (A)	$T_{jv_V_{CE_Ict}}$ ($^{\circ}$ C)	$T_{IR_moyenne}$ ($^{\circ}$ C)	T_{IR_min} ($^{\circ}$ C)	T_{IR_max} ($^{\circ}$ C)
40	67,7	66,8	59,3	70,2
60	91,0	88,4	74,9	94,4
70	105,4	102,1	84,6	109,6
80	122,0	118,3	96,3	127,7
90	142,0	137,8	111,1	149,5

Ces résultats sont obtenus dans des conditions qui entraînent l'apparition de gradients de température importants à la surface de l'IGBT. Dans le cas où le courant injecté I_C est égal à 90A, l'écart atteint plus de 38K. Néanmoins, l'estimation de la température réalisée avec le PETS V_{CE_Ict} comparée à l'extraction de la valeur moyenne de la mesure infrarouge permet de confirmer leur bonne corrélation. L'écart est compris entre -0,9K et 4,5K pour les différentes conditions imposées.

Avant d'entreprendre les mesures en dissipation, une nouvelle caractérisation $I_C(V_{CE}, V_{GE})$ est réalisée à une température de référence de 40 $^{\circ}$ C. Cet essai permet de confirmer l'absence de dérive significative des PETS.

5.2. Résultats obtenus avec le PETS V_{CE_Ic}

Le principe de ce PETS est de réaliser une mesure de la tension V_{CE} pour un niveau de courant I_C et une tension V_{GE} . Afin de faciliter la présentation de ces résultats, nous limiterons l'exploitation de ce PETS à une valeur de tension V_{GE} constante égale à 15V (tableau 2).

Tableau 2. Evaluation de la pertinence du PETS V_{CE_Ic}

I_C (A)	$T_{jv_V_{CE_Ic}}$ ($^{\circ}$ C)	T_{IR_moy} ($^{\circ}$ C)	T_{IR_min} ($^{\circ}$ C)	T_{IR_max} ($^{\circ}$ C)	$T_{jv_V_{CE_Ic}}$ ($^{\circ}$ C)
40	69,7	66,8	59,3	70,2	32,5
60	90,54	88,4	74,9	94,4	71,7
70	105,1	102,1	84,6	109,8	88,7
80	121,7	118,3	96,3	127,8	106,7
90	141,6	137,8	111,1	149,6	127,2

Les écarts entre les mesures de la température avec le PETS V_{CE_Ic} et les autres mesures, dont celles infrarouges, démontrent des écarts importants et aléatoires, pouvant conduire à se rapprocher de la valeur minimale ou bien de la valeur moyenne, en fonction du niveau du courant de dissipation. Ces écarts peuvent en grande partie être expliqués par la contribution de la chute de tension dans les fils de bonding soumis à de l'auto-échauffement. Cette contribution ohmique supplémentaire induit des conditions électrothermiques éloignées de celles imposées lors de l'extraction de la caractéristique de ce PETS, empêchant une évaluation correcte de la température de l'IGBT.

5.3. Résultats obtenus avec le PETS ΔV_{CE_AVGE}

Les résultats de la campagne de caractérisation du PETS ΔV_{CE_AVGE} nous amèneraient à faire le choix d'une variation importante de V_{GE} afin de gagner en précision. Néanmoins, une tension V_{GE} trop faible est un problème dans le cas où la température du composant et le courant I_C sont élevés. Dans ce document, la variation de V_{GE} sera imposée entre 15V et 12V pour estimer la température du composant avec ce PETS. Le tableau 3 présente une synthèse de ces résultats en proposant une comparaison entre les mesures réalisées avec le

PETS

$V_{CE\ Ict}$, les valeurs des mesures infrarouges et enfin celles du PETS ΔV_{CE_AVGE} obtenus dans les conditions détaillées précédemment.

Tableau 3. Evaluation de la pertinence du PETS ΔV_{CE_AVGE}

I_C (A)	$T_{jv\ V_{CE\ Ict}}$ (°C)	T_{IR_moy} (°C)	T_{IR_min} (°C)	T_{IR_max} (°C)	$T_{jv\ \Delta V_{CE_AVGE}}$ AVGE 15V-12V (°C)
40	68,1	66,8	59,3	70,2	58,9
60	91,4	88,4	74,9	94,4	87,4
70	104,9	102,1	84,6	109,8	99,5
80	121,8	118,3	96,3	127,8	113,7
90	141,8	137,8	111,1	149,6	132,0

Les mesures réalisées avec le PETS $V_{CE\ Ict}$ demeurent tout à fait satisfaisantes avec des écarts inférieurs ou égaux à 4K entre la température estimée avec le PETS $V_{CE\ Ict}$ et la température moyenne estimée à partir des mesures infrarouges.

L'écart de 9K entre la mesure de la température par le PETS $V_{CE\ Ict}$ et le PETS ΔV_{CE_AVGE} est relativement important pour un courant de petite valeur $I_C=40A$. Ce résultat peut être expliqué par la caractéristique $I_C(V_{CE}, V_{GE})$ en rapport avec le calibre du composant IGBT 1200V-100A testé. Cette caractéristique conduit à une faible sensibilité du PETS comme nous avons pu le démontrer lors de la présentation des résultats de la campagne de caractérisation de ce PETS.

Pour des niveaux de courant de dissipation supérieurs ou égaux à 60A, les résultats sont meilleurs. Les écarts entre les mesures de la température par le PETS $V_{CE\ Ict}$ et le PETS ΔV_{CE_AVGE} sont contenus entre -4K et -10K pour des niveaux de températures comprises entre 90°C et 130°C. Une explication de cet écart qui amène à sous-évaluer la température moyenne du composant avec le PETS ΔV_{CE_AVGE} sera discutée dans la conclusion générale.

5.4. Résultats obtenus avec le PETS V_0

Le principe de ce PETS est de réaliser une régression linéaire à partir des mesures des couples I_C et V_{CE} pour une valeur constante de V_{GE} égale à 15V pour cette étude. Afin de gagner en précision, l'extraction de la valeur V_0 dans chacune des conditions de dissipation sera obtenue à partir de la régression linéaire sur l'ensemble des mesures réalisées lors des séquences de variation du courant au cours de la phase 2; soit un ensemble de 6 couples I_C et V_{CE} ($I_C, I_C+10A, I_C+20A, I_C+30A, I_C+40A$ et enfin I_C+50A).

Le tableau 4 présente une synthèse des résultats en proposant une comparaison entre la mesure réalisée avec le PETS $V_{CE\ Ict}$, les valeurs issues des mesures infrarouges et enfin les mesures obtenues avec le PETS V_0 tel que défini dans les conditions détaillées précédemment.

Tableau 4. Evaluation de la pertinence du PETS V_0

I_C (A)	$T_{jv\ V_{CE\ Ict}}$ (°C)	T_{IR_moy} (°C)	T_{IR_min} (°C)	T_{IR_max} (°C)	$T_{jv\ V_0}$ (°C)
40	67,9	66,8	59,3	70,2	64,9
60	90,9	88,4	74,9	94,4	98,3
70	105,7	102,1	84,6	109,8	107,7
80	122,1	118,3	96,3	127,8	129,6
90	142,3	137,8	111,1	149,6	151,3

Pour les niveaux de courant de dissipation I_C entre 60A et 90A, la température estimée par ce PETS semble suivre la valeur maximale obtenue par la caméra infrarouge. Ces résultats sont donc pour le moins satisfaisants avec des écarts strictement inférieurs à 4K.

Toutefois, les écarts entre la mesure de la température avec le PETS V_0 et les mesures infrarouges montrent une limite opérationnelle pour le cas d'un faible niveau de courant ($I_C=40A$). Ce résultat peut être en partie expliqué par la zone d'extraction de V_0 dans une partie non linéaire de la caractéristique $I_C(V_{CE}, V_{GE})$ de ce composant IGBT 1200V-100A.

6. INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT DU MODULE

6.1. Méthodologie

Le principe retenu pour évaluer partiellement la robustesse des PETS est d'imposer une dégradation mécanique des fils de bonding assurant les liaisons électriques d'émetteur à la surface du composant IGBT. La figure 16 présente une photo de cette dégradation réalisée en coupant deux des huit fils de bonding afin de reproduire l'impact électrique de la levée ou de la fissuration aux pieds des fils de bonding.

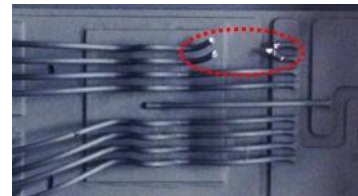


Fig.16 Présentation de la dégradation imposée aux liaisons électriques du transistor IGBT en coupant 2 des 8 fils de bonding.

Cette dégradation conduit à une modification des caractéristiques directes du composant. L'extraction de la caractéristique $I_C(V_{CE}, V_{GE})$ est réalisée à une température de refroidissement de 40°C. Comme le montre la figure 17, la chute de tension V_{CE} , mesurée pour un même courant et une même tension V_{GE} , se trouve alors augmentée.

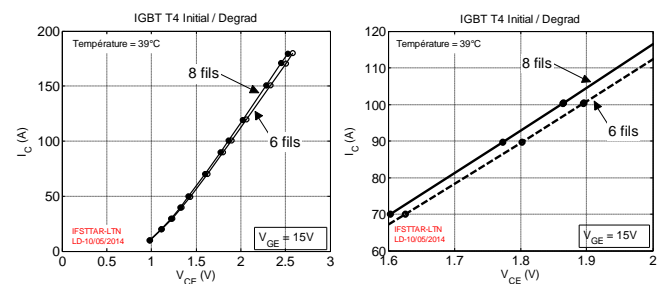


Fig.17 Effets de la dégradation des liaisons électriques sur les caractéristiques $I_C(V_{CE}, V_{GE})$ du transistor IGBT T_4 en coupant 2 des 8 fils de bonding à 40°C

6.2. Mesures de la température en dissipation

La modification du nombre de fils entraîne une élévation significative de la température des deux fils assurant à eux seuls la conduction des courants issus des zones actives correspondantes. Les deux figures 18a et 18b présentent la distribution de la température relevée par une mesure infrarouge dans le cas d'un courant de dissipation I_C de 90A.

Le tableau de synthèse 5 détaille la moyenne des résultats obtenus pour chaque niveau de courant I_C au cours de la campagne en dissipation. La comparaison porte sur la mesure réalisée avec le PETS V_{CE_Ict} et les valeurs relevées avec la mesure infrarouge.

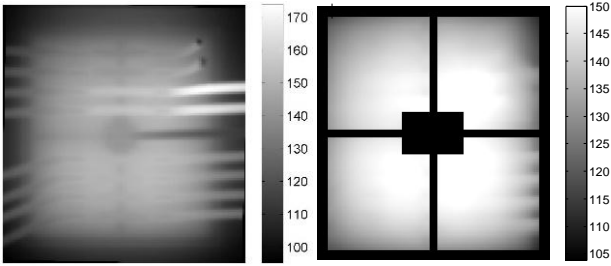


Fig.18 Présentation de la mesure infrarouge de la température (°C) en surface du composant IGBT avec dégradation pour un courant injecté I_C de 90A.

En comparant avec les résultats obtenus dans les mêmes conditions en l'absence de dégradation (tableau 1), on constate une faible augmentation de la température moyenne de la partie active en présence de la dégradation. Par contre, la température maximale, relevée avec la mesure infrarouge, est quant à elle significativement plus élevée.

Tableau 5. Températures de IGBT en dissipation (avec dégradation)

I_C (A)	$T_{jv} V_{CE_Ict}$ (°C)	T_{IR_moy} (°C)	T_{IR_min} (°C)	T_{IR_max} (°C)
40	68,0	67,4	59,7	70,6
60	91,8	90,1	76,1	95,9
70	106,5	104,3	86,3	111,8
80	123,4	121,2	97,4	130,6
90	144,0	141,2	111,1	153,0

Malgré la dégradation imposée, ces résultats confirment le maintien d'une bonne corrélation entre les estimations de la température réalisées avec le PETS V_{CE_Ict} et l'extraction de la valeur moyenne issue des mesures infrarouges. Les écarts demeurent strictement inférieurs à 3K pour l'ensemble des conditions imposées. Ces résultats démontrent la robustesse de cet indicateur permettant une estimation de la valeur moyenne de la température de la partie active malgré un gradient de température en surface ayant dépassé les 40K dans le cas où le courant injecté I_C est égal à 90A.

La configuration d'exploitation du PETS V_{CE_Ic} pour estimer la température du composant avec la dégradation est maintenue comme précédemment avec une tension V_{GE} de 15V. Le tableau 6 présente une synthèse des résultats en proposant toujours une comparaison entre les mesures réalisées avec le PETS V_{CE_Ict} , les valeurs des mesures infrarouges et enfin celles obtenues avec le PETS V_{CE_Ic} .

Tableau 6. Evaluation de la pertinence du PETS V_{CE_Ic} (avec dégradation)

I_C (A)	$T_{jv} V_{CE_Ict}$ (°C)	T_{IR_moy} (°C)	T_{IR_min} (°C)	T_{IR_max} (°C)	$T_{jv} V_{CE_Ic}$ (°C)
40	67,7	67,6	59,7	70,8	50,8
60	90,8	90,2	76,1	96,0	84,8
70	106,1	104,4	86,3	111,8	101,3
80	122,7	121,2	97,4	130,7	119,4
90	144,1	141,3	111,1	153,1	140,9

Les mesures indirectes obtenues avec le PETS V_{CE_Ic} se rapprochent de la valeur moyenne en raison de l'augmentation

de la chute de tension V_{CE} induite par la dégradation des liaisons électriques. Cette dérive s'explique par la caractéristique de ce PETS. Compte tenu de ce résultat, ce PETS ne permet pas de satisfaire le besoin de robustesse face à la dégradation des liaisons électriques.

La configuration de l'exploitation du PETS ΔV_{CE_AVGE} pour estimer la température du composant avec la dégradation est maintenue comme précédemment avec une variation de V_{GE} de 15V à 12V. Le tableau 7 présente une synthèse des résultats en proposant toujours une comparaison entre les mesures réalisées avec le PETS V_{CE_Ict} , les valeurs des mesures infrarouges et enfin celles obtenues avec le PETS ΔV_{CE_AVGE} dans les conditions détaillées précédemment.

Tableau 7. Evaluation de la pertinence du PETS ΔV_{CE_AVGE} (avec dégradation)

I_C	$T_{jv} V_{CE_Ict}$	T_{IR_moy}	T_{IR_min}	T_{IR_max}	$T_{jv} \Delta V_{CE}$ $\Delta V_{CE} 15V-12V$
(A)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
40	67,1	67,6	59,7	70,8	60,3
60	91,2	90,2	76,1	96,0	89,7
70	105,7	104,4	86,3	111,8	103,1
80	124,4	121,2	97,4	130,7	117,8
90	143,9	141,3	111,1	153,1	137,2

Tout comme dans le cas de la mesure de la température du composant avant dégradation, le courant de 40A ne permet pas des mesures indirectes satisfaisantes avec le PETS ΔV_{CE_AVGE} . Par contre, les résultats obtenus pour les niveaux de courant plus élevés sont tout aussi corrects avec ou sans dégradation des liaisons électriques. Les écarts entre les températures moyennes et les températures estimées par le PETS ΔV_{CE_AVGE} restent strictement inférieurs à 5K. Ces résultats semblent confirmer l'immunité de ce PETS ΔV_{CE_AVGE} à la composante ohmique qui caractérise la chute de tension V_{CE} du transistor.

Le tableau 8 présente les résultats obtenus avec le PETS V_0 , extrait dans les conditions détaillées précédemment, en proposant toujours une comparaison avec les mesures réalisées avec le PETS V_{CE_Ict} et les valeurs des mesures infrarouges. La méthodologie d'extraction de la valeur de V_0 en dissipation est maintenue analogue à celle précédemment utilisée en l'absence de dégradation.

Tableau 8. Evaluation de la pertinence du PETS V_0 (avec dégradation)

I_C	$T_{jv} V_{CE_Ict}$	T_{IR_moy}	T_{IR_min}	T_{IR_max}	$T_{jv} \Delta V_{CE}$ $\Delta V_{CE} 15V-12V$
(A)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
40	68,0	67,6	59,7	70,8	65,9
60	92,0	90,2	76,1	96,0	100,5
70	106,6	104,4	86,3	111,8	111,3
80	123,5	121,2	97,4	130,7	136,2
90	144,1	141,3	111,1	153,1	155,2

Les écarts entre la mesure de la température avec le PETS V_0 et les mesures infrarouges montrent, comme dans le cas sans dégradation, une bonne corrélation avec la température maximale estimée par la mesure infrarouge. Hormis les limites d'utilisation de ce PETS dans le cas d'un faible niveau de courant ($I_C=40A$), les résultats obtenus pour les niveaux de courant de dissipation I_C plus importants, entre 60A et 90A, sont satisfaisants. Une légère dégradation de la pertinence de ce PETS est observée. Néanmoins, les écarts entre les mesures par

le PETS V_0 restent strictement inférieurs à 5,5K vis-à-vis des températures maximales estimées avec l'aide des mesures infrarouges.

7. CONCLUSIONS

Les recherches menées sur l'évaluation de nouveaux PETS, adaptés à une utilisation en conditions fonctionnelles, reposent sur une confrontation expérimentale de différents moyens de mesures de la température des composants de puissance. Les moyens mis en œuvre ont permis de comparer les mesures de température obtenues par les nouveaux PETS, vis-à-vis d'une mesure indirecte (PETS $V_{CE_{Ict}}$) et de mesures par caméra infrarouge, en intégrant le phénomène d'auto-échauffement lors de la phase de caractérisation. Les résultats obtenus pour des transistors IGBT montrent que les PETS proposés permettent de suivre avec une relativement bonne précision la température du composant.

Il a été montré dans cet article que l'utilisation de la tension directe comme PETS n'était pas idéale et restait assez influencée par la dégradation des fils de bonding. Au contraire, il semble que le PETS $\Delta V_{CE_{AVGE}}$ sous-évalue légèrement la température moyenne et que le PETS V_0 donne une valeur de température proche de la température maximale du composant même après dégradation des fils. Une approche par la voie de la modélisation permettra de comprendre précisément la nature et la représentativité des températures obtenues avec ces différents PETS.

La validation de ces PETS n'est toutefois pas encore terminée. Il sera important de pouvoir améliorer la précision des estimations de température par une augmentation du nombre de points de mesure lors de la caractérisation des PETS. Il faudra également compléter notre étude sur l'influence des dégradations du composant vis-à-vis des mesures de température obtenues par ces PETS. Des prochains travaux chercheront notamment à étudier l'effet des dégradations du chemin thermique ou encore du vieillissement de l'oxyde de grille.

Afin de confirmer ces premiers résultats, il est essentiel de mettre en place un moyen de test permettant une utilisation des composants dans des conditions fonctionnelles et non seulement dans des conditions de dissipation en régime continu. Nous pourrions alors évaluer précisément la pertinence de ces PETS face aux difficultés inhérentes à une utilisation dans cet environnement bien plus contraignant.

Néanmoins, ces premiers résultats sont encourageants et nous permettent notamment d'envisager l'utilisation de ces PETS pour évaluer l'intégrité des modules de puissance au sein d'un convertisseur. Sur ce point, il est intéressant de noter que certains auteurs proposent déjà des méthodes de surveillance de la tension directe dans la perspective de suivre l'état de santé des convertisseurs [18,19]. Nous pourrions ainsi confronter les résultats de nos futurs travaux à ces recherches.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR (projet MEMPHIS ANR-13-PRGE-0005-01 PROGELEC) et le GdR SEEDS pour l'aide financière apportée pour ces recherches.

9. REFERENCES

- [1] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules", *Microelectronics Reliability*, vol. 42, no. 4-5, pp. 653-667, 2002.
- [2] M. P. Rodriguez, N. Y. A. Shammass, A. T. Plumptre, D. Newcombe, and D. E. Crees, "Static and dynamic finite element modelling of thermal fatigue effects in insulated gate bipolar transistor modules", *Microelectronics Reliability*, vol. 40, pp. 455-463, 2000.
- [3] D-L. Blackburn, "Temperature Measurements of Semiconductor Devices - A Review", 20th Annual Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, pp. 70-80, 2004.
- [4] D.C. Katsis, J.D. Van Wyk, "Void-induced thermal impedance in power semiconductor modules: some transient temperature effects", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.39, no.5, pp. 1239- 1246, Sept/Oct 2003.
- [5] E-R. Motto, J-F. Donlon, "IGBT module with user accessible on-chip current and temperature sensors", 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1-6.
- [6] R. Schmidt, U. Scheuermann, "Using the chip as a temperature sensor - The influence of steep lateral temperature gradients on the $V_{ce}(T)$ -measurement", *13th Europ. Conf. on Power Electronics and App.*, 2009.
- [7] V. Smeth, "Aging and failure modes of IGBT power modules undergoing power cycling in high temperature environments", PhD Thesis, Montpellier 2 University, France, 2010.
- [8] Y. Avenas, L. Dupont, Z. Khatir, "Temperature Measurement of Power Semiconductor Devices by Thermo-Sensitive Electrical Parameters - A Review", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no 6, pp. 3081-3092, 2012.
- [9] D. Barlini, M. Ciappa, M. Mermet-Guyennet, W. Fichtner, "Measurement of the transient junction temperature in MOSFET devices under operating conditions", *Microelectronics Reliability*, vol. 47, pp. 1707-1712, 2007.
- [10] H. Kuhn, A. Mertens, "On-line junction temperature measurement of IGBTs based on temperature sensitive electrical parameters", *13th Europ. Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, Barcelona, Spain, Sept. 8-10, 2009.
- [11] I. Bahun, N.C. Obanov, Ž. Jakopovic, "Real-Time Measurement of IGBT's Operating Temperature", *AUTOMATIKA*, vol. 52, no 4, pp. 295-305, 2011.
- [12] A. Bryant, S. Yang, P. Mawby, D. Xiang, Li Ran, P. Tavner, P-R. Palmer, "Investigation Into IGBT dV/dt During Turn-Off and Its Temperature Dependence", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no 10, pp. 3019, 3031, 2011.
- [13] X. Perpiñà, J. F. Serviere, J. Saiz, D. Barlini, M. Mermet-Guyennet, J. Millán, "Temperature measurement on series resistance and devices in power packs based on on-state voltage drop monitoring at high current", *Microelectronics Reliability*, vol. 46, pp. 1834-1839, 2006.
- [14] Y-S. Kim, S-K. Sul, "On-line estimation of IGBT junction temperature using on-state voltage drop", *The 1998 IEEE Industry Applications Conference*, pp. 853-859, St Louis, Missouri, USA, Oct. 12-15, 1998.
- [15] A. Koenig, T. Plum, P. Fidler, R-W. De Doncker, "On-line junction temperature measurement of CoolMOS devices", *7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 90-95, 2007.
- [16] Y. Avenas, L. Dupont, "Evaluation of IGBT thermo-sensitive electrical parameters under different dissipation conditions - Comparison with infrared measurements", *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, no 11, pp. 2617-2626, 2012.
- [17] L. Dupont, Y. Avenas, P-O Jannin, "Comparison of junction temperature evaluations in a power IGBT module using an IR camera and three thermo-sensitive electrical parameters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, Issue 4, April 2013.
- [18] J-M. Anderson, R-W. Cox, "On-line condition monitoring for MOSFET and IGBT switches in digitally controlled drives", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3920-3927, 2011.
- [19] M-A. Eleffendi, C-M. Johnson, "Thermal path integrity monitoring for IGBT power electronics modules", *CIPS*, pp.1-7, 2014.

