

Banc de test dédié au vieillissement accéléré de modules IGBT en cyclage thermique : Méthode, instrumentation, résultats

Amgad RASHED, François FOREST, Jean-Jacques HUSELSTEIN, Thierry MARTIRÉ, Philippe ENRICI

IES/Université Montpellier 2

RESUME - Dans les applications de transports, les composants de puissance sont fréquemment placés en régime de cyclage thermique actif et subissent de forts stress thermomécaniques. Les conséquences en sont maintenant bien connues et, dans le cas des modules de puissance IGBT, différentes dégradations peuvent survenir (wire bonds, métallisations d'émetteur,...). Une difficulté demeure qui est l'établissement de modèles de durée de vie utilisables dans des conditions d'usage variables. Des retours d'expérience et des tests sont nécessaires pour progresser dans ce sens. Le papier proposé présente une évolution majeure d'un banc de test développé depuis plusieurs années, évolution qui permet de mener des tests de cyclage actifs dans des gammes basses d'amplitudes thermiques, inaccessibles aux méthodes classiques et beaucoup plus représentatives des applications. Il décrira le principe du banc de test et de la méthode utilisée, l'instrumentation qui a été spécialement développée pour automatiser complètement les tests et les résultats obtenus sur près de trente échantillons.

Mots-clés— IGBT, durée de vie, Cyclage thermique, test de vieillissement, mesure de V_{CE} , mesure de température de jonction

1. INTRODUCTION

Afin d'étudier les mécanismes de vieillissement associés au cyclage actif et d'élaborer des modèles de durée de vie [1]-[7], un banc de vieillissement composés de plusieurs blocs de test a été mis en place depuis plusieurs années. Il a permis d'obtenir de nombreux résultats mais il utilisait, jusqu'à un passé récent, des protocoles de cyclage classiques à des fréquences de quelques dixièmes de Hertz, impliquant de longues durées de test, de surcroît dans des conditions de cyclage beaucoup plus sévères que celles imposées par les applications. L'objectif du papier est de présenter un nouveau mode de pilotage des blocs qui permet de réduire considérablement la durée des tests et donne accès à des amplitudes de cyclage beaucoup plus réalistes et que l'on ne trouve pas dans la littérature. A ce nouveau mode est associé un système de caractérisation automatique capable de suivre l'évolution de la chute de tension V_{CE} durant les tests de vieillissement. Il permet de réaliser un monitoring en temps réel pour arrêter les tests de vieillissement des modules IGBT avant défaillance. Basé sur le principe de la mesure indirecte de température, ce système permet également de mesurer l'évolution périodique de la température de jonction des échantillons et donc de maîtriser les conditions de contraintes pour garantir des tests correctement calibrés.

Dans un premier temps, cet article rappellera le principe de fonctionnement du banc de vieillissement et introduira le mode de cyclage retenu. La deuxième partie présentera le système de monitoring original développé pour l'occasion et qui pourrait préfigurer des dispositifs de supervision placés sur les composants de convertisseurs en opération. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus grâce à cet ensemble seront décrits et analysés.

2. BANC DE VIEILLISSEMENT ET MODES DE CYCLAGE

Le banc de vieillissement (Figure 1-a) a déjà largement été présenté dans des publications précédentes [8]-[10]. Il regroupe plusieurs blocs identiques dont le principe est basé sur la mise en opposition de deux bras d'onduleur PWM. Chaque bras est un module IGBT constituant un échantillon à deux puces IGBT (600V-200A). La Figure 2 permet de décrire brièvement les principaux aspects de son mode de fonctionnement.

Le pont ainsi constitué est piloté de façon à générer dans l'inductance constituant une charge artificielle un courant sinusoïdal à une fréquence imposée par l'utilisateur, recréant ainsi des conditions de fonctionnement que l'on retrouve dans de très nombreuses applications (donc très proches de la réalité). Les contraintes électriques appliquées aux composants correspondent à des régimes tout à fait standards par rapport à leurs caractéristiques. Une simulation du fonctionnement du dispositif est donnée sur la gauche du graphe. Elle utilise un modèle thermique très simplifié du module afin de mettre en évidence la nature du régime thermique imposé. Les pertes dans les IGBTs comportent alors deux composantes, l'une à la fréquence de découpage, l'autre à la fréquence de modulation. La valeur de fréquence de découpage utilisée ici est anormalement faible de façon à mieux montrer les tendances. Les variations de température résultant de ces conditions font également apparaître les deux composantes. Dans la réalité, la composante à la fréquence de découpage serait négligeable. Les seules variations notables seraient donc provoquées par la modulation et leur valeur peuvent elles mêmes tomber à des niveaux très faibles (quelques °C) si la fréquence de modulation est supérieure à quelques dizaines de Hz. Ce comportement est évidemment lié aux caractéristiques thermiques du module mais les résultats qualitatifs donnés ici sont représentatifs d'une réalité plus générale.

2.1. Modes de cyclage lents

Dans une première phase d'exploitation, ce banc de test a été utilisé pour produire un mode de cyclage thermique des échantillons à basse fréquence (quelques 0.01Hz), afin de pouvoir comparer les résultats de vieillissement à ceux obtenus avec des bancs classiques fonctionnant sans découpage et en basse tension. Des informations sur les travaux correspondant pourront être trouvées dans [9]. La technique employée à cette occasion est résumée par la Figure 3. La fréquence de modulation est suffisamment élevée pour ne pas induire de variations significative de température et le cyclage est produit par un régime "on-off" de l'onduleur, c'est-à-dire en activant et désactivant la modulation.

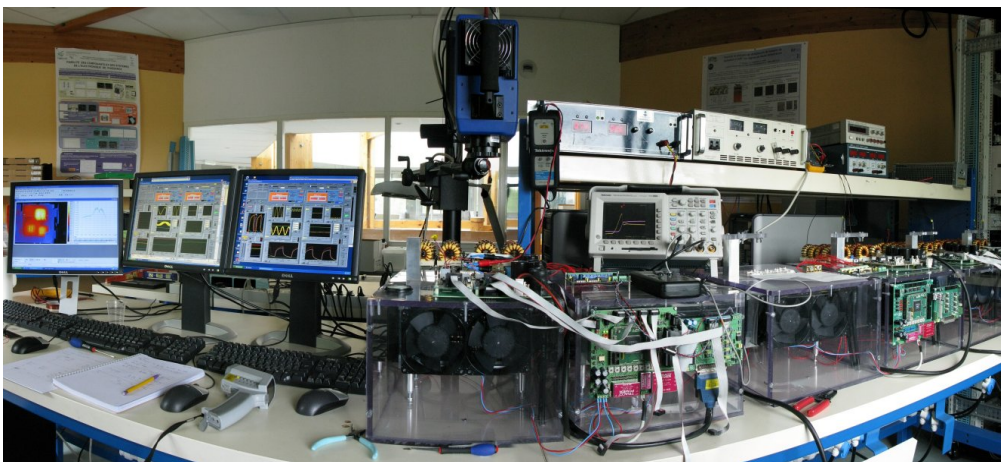
Dans ce cadre, les variations de température ΔT_J étaient comprises entre 60°C et 100°C, ce qui est très élevé en regard

des contraintes rencontrées dans les applications mais est rendu nécessaire par la durée des tests. Même dans ces conditions, les durées de vie sont comprises entre quelques 10 000 cycles et 700 000 cycles, ce qui peut conduire à plusieurs mois de cyclage 24 heures sur 24.

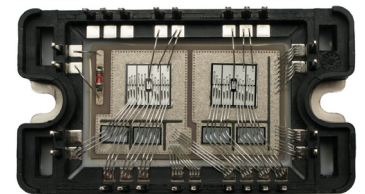
2.2. Modes de cyclage rapides

Les limitations précédentes et le potentiel du banc nous ont conduits à l'exploiter différemment pour être capable d'imposer des contraintes plus faibles donc plus réalistes aux échantillons (ΔT_J compris entre 30 et 50°C) tout en réduisant les durées de test.

Pour atteindre cet objectif, le mode "on-off" a été abandonné au profit d'une technique basée sur une majoration de l'influence de la modulation.



a - Vue du banc de test



b - Module IGBT Testé

Figure 1 : Banc de test et modules IGBT

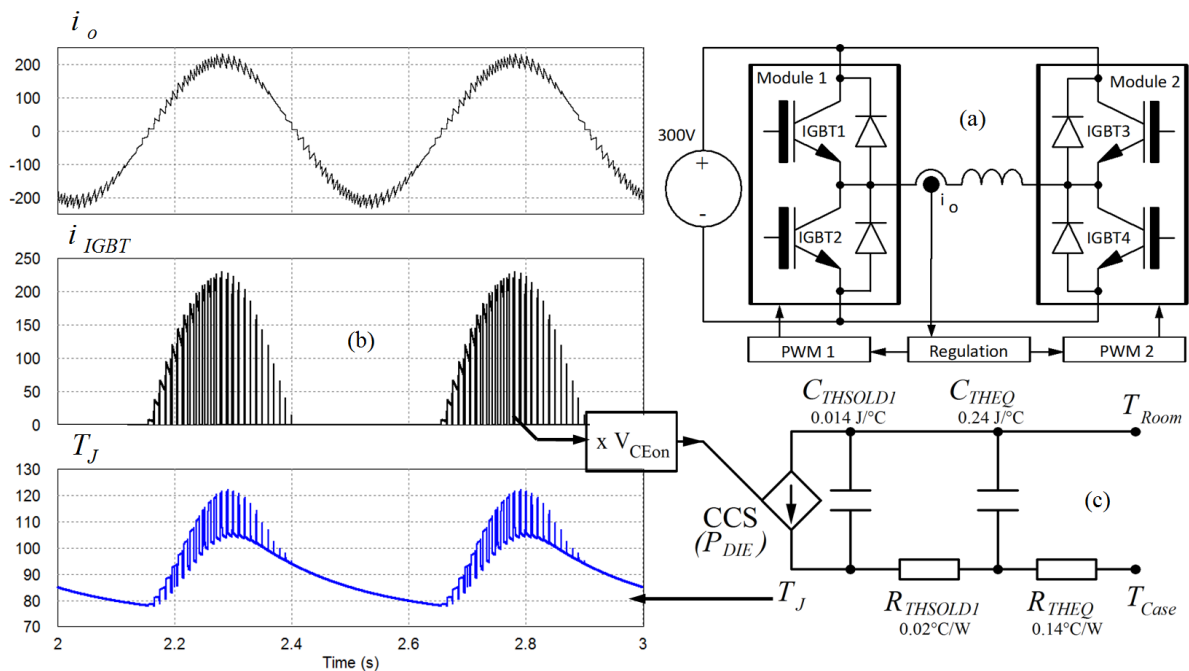


Figure 2 : Mode de fonctionnement du banc de test

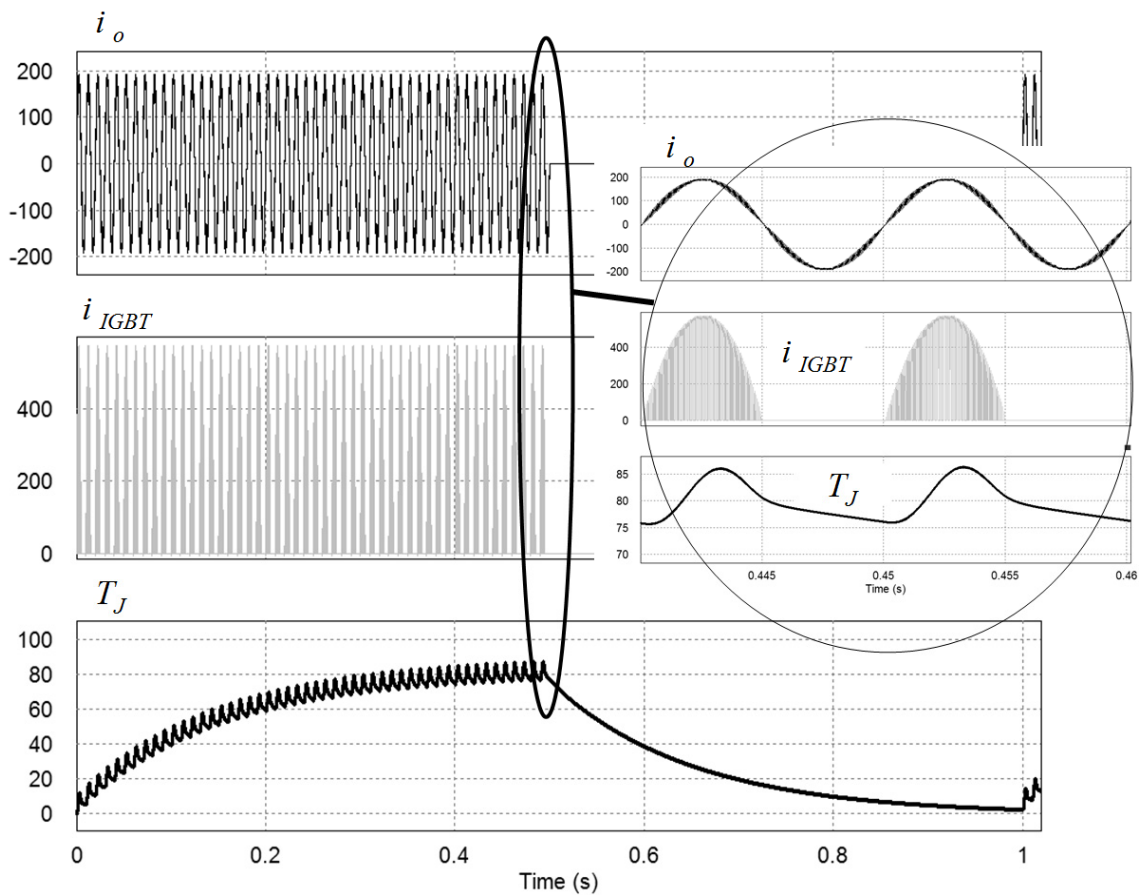
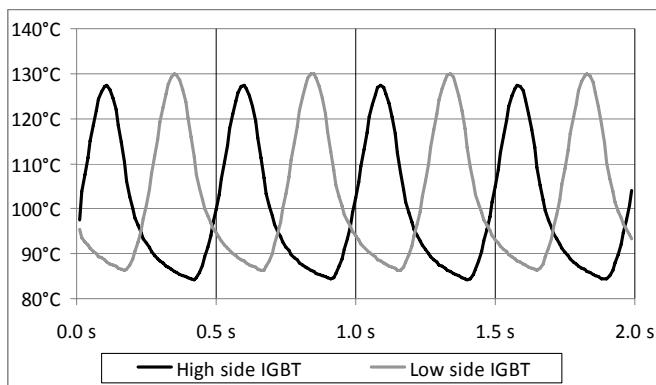
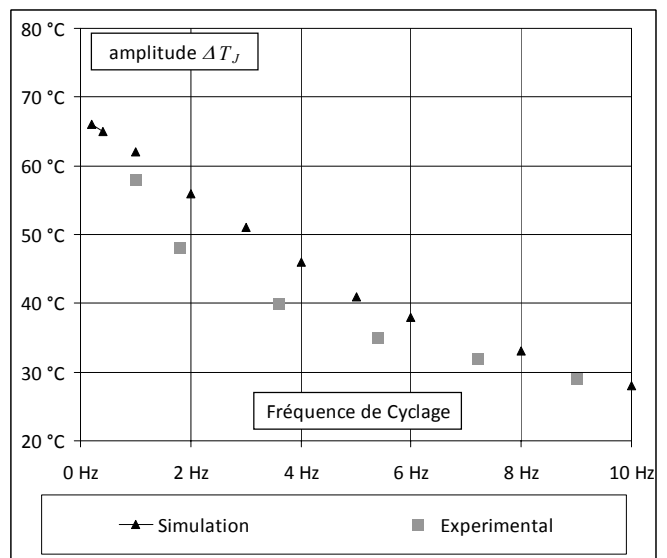


Figure 3 : Principe du cyclage thermique obtenu par un mode on-off de l'onduleur

Pour cela, il suffit de travailler avec des fréquences de modulation relativement basses (quelques Hz) mais qui restent très supérieures à celle utilisables en cyclage lent (facteur 10 à 100). Un exemple de résultats expérimentaux obtenus sur un échantillon est donné Figure 4-a. Différents résultats seront présentés plus en détail dans la dernière partie mais l'on peut déjà préciser que la durée de vie correspondant à ce régime de cyclage ($\Delta T_J = 41^\circ\text{C}$) est d'environ 1 500 000 cycles, ce qui nécessite une période de test de 8 jours à comparer aux 3 mois qui seraient nécessaires avec un test à 0.2Hz, considéré comme rapide dans le registre des tests classiques.



a – Exemple de cyclage obtenu avec une modulation à 2Hz



b – Régimes de cyclage accessibles

Figure 4 : Caractéristiques des tests rapides basés sur la modulation

La Figure 4-b montre les régimes accessibles avec ce mode de cyclage, obtenus par simulation puis identifiés expérimentalement.

La mise en œuvre de ce mode de cyclage permet donc de raccourcir de façon drastique les durées de test et d'explorer des domaines de vieillissement à faible cyclage, ce qui n'est pas envisageable avec des méthodes de type "on-off", pour les raisons de durées d'essais évoquées précédemment.

Si la mise en œuvre de tels protocoles est très intéressante, elle également exigeante en termes de suivi du vieillissement, complément indispensable à tout test de ce type. Ce suivi peut nécessiter plusieurs dizaines à centaines de mesures intermédiaires et ces dernières doivent donc être effectuées rapidement pour ne pas grever le gain en durée obtenus grâce à la méthode. Ceci suppose la mise en place d'une instrumentation à même d'effectuer automatiquement ce suivi. La partie suivante décrit l'instrumentation développée pour atteindre cet objectif.

3. MONITORING

Les tests de vieillissements présentés ici reproduisent des modes de cyclage actifs qui affectent principalement la métallisation de la face supérieure des puces et les fils de bonding assurant l'interconnexion de cette même face. Les dégradations qui y sont associées sont maintenant assez bien connues pour les modules classiques encore majoritairement utilisés et qui intègrent des fils de bonding en aluminium de quelques 100 μm de diamètre, soudés par ultra-sons sur la métallisation d'émetteur.

Le principal effet de la dégradation de ces parties est un accroissement de chute de tension à l'état passant, V_{CE} dans le cas des IGBT. C'est donc classiquement ce paramètre qui est surveillé lors des tests de vieillissement correspondant et c'est également celui qui a été retenu pour le présent système. Son suivi implique d'être également capable de mesurer la température de jonction, ce qui est de toute façon nécessaire pour ajuster les paramètres des essais.

3.1. Mesure de V_{CE}

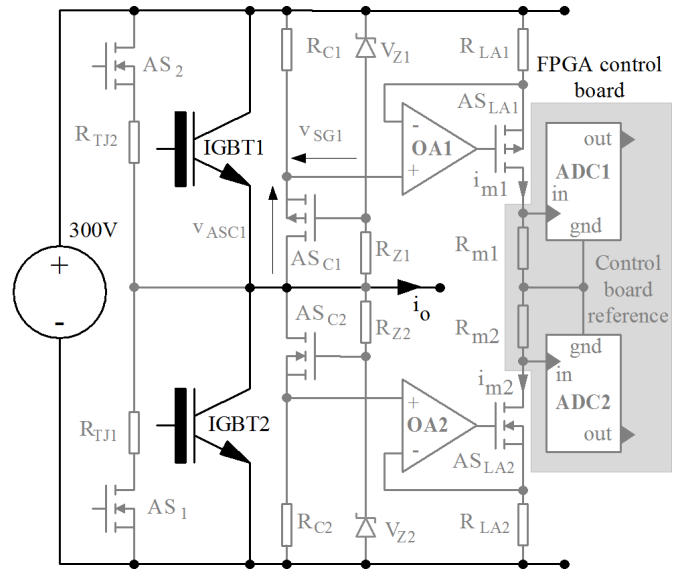
Pour constituer un paramètre de suivi pertinent, la mesure de V_{CE} doit toujours être effectuée dans les mêmes conditions de température et de courant. Le point caractéristique choisi systématiquement dans les essais présentés ici correspond à un courant de 100 A et une température de jonction de 125°C.

Le principe retenu utilise une mesure indirecte de la température de jonction par l'intermédiaire d'une mesure de V_{CE} à faible courant d'injection calibré (ici 100mA). Cette mesure est couplée à un ensemble de mesures de V_{CE} effectuées pour des courants encadrant la valeur visée de 100A. En effet, il est impossible d'obtenir le point recherché avec un seul tir. Ces opérations doivent être réalisées automatiquement en minimisant l'interruption du déroulement des tests. Les parties matérielles nécessaires à la mise en œuvre de cette technique sont représentés Figure 5.

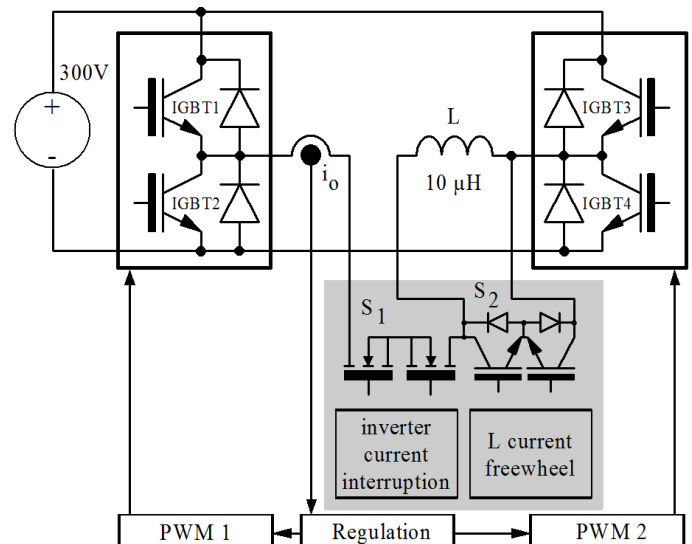
Le circuit de la Figure 5-a assure la mesure de V_{CE} à faible courant pour la mesure de température de courant indirecte et à fort courant pour le suivi de V_{CE} (100A, 125°C). Si l'on s'intéresse à l'IGBT 1, l'ensemble R_{C1} , V_{Z1} , R_{Z1} , AS_{C1} est un écrêteur qui évite de saturer le système de mesure lorsque la tension aux bornes du composant dépasse la dizaine de volt.

L'ensemble O_{A1} , R_{LA1} , AS_{LA1} , R_{m1} est un convertisseur courant-tension flottant qui permet de transmettre le signal au convertisseur analogique-numérique du système d'acquisition sans isolement galvanique. La conversion est réalisée sur 16 bit, ce qui permet la précision de mesure nécessaire à l'évolution recherchée, qui est de quelques 10 mV pour une chute de tension totale de l'ordre de 1.3 V à 100A. Le couple AS_2 , R_{TJ2} permet l'injection du courant de 100 mA nécessaire à la mesure indirecte de température.

Pour réaliser la séquence de mesure décrite plus loin, une modification de l'étage de puissance est indispensable (Figure 5-b). L'interrupteur S_1 permet d'interrompre très rapidement le courant conduit par les IGBT sous test tandis que S_2 permet la circulation du courant inductif lors de cette coupure.



a – Circuit de mesure de V_{CE}



b – Etage de puissance modifié

Figure 5 : Parties matérielles nécessaires au monitoring

La séquence complète permettant de réaliser une mesure de V_{CE} (100A, 125°C) est décrite sur les chronogrammes de la Figure 6. Pour la réaliser, le fonctionnement en modulation est interrompu et un mode hacheur ne faisant intervenir que les IGBTs d'une diagonale (ici, IGBT 1 et 4, Figure 2) est introduit. Ceci permet de créer des phases d'injection de courant dans l'IGBT caractérisé (ic l'IGBT 1) de l'ordre de quelques dizaines de ms, avec des valeurs encadrant les 100A visés.

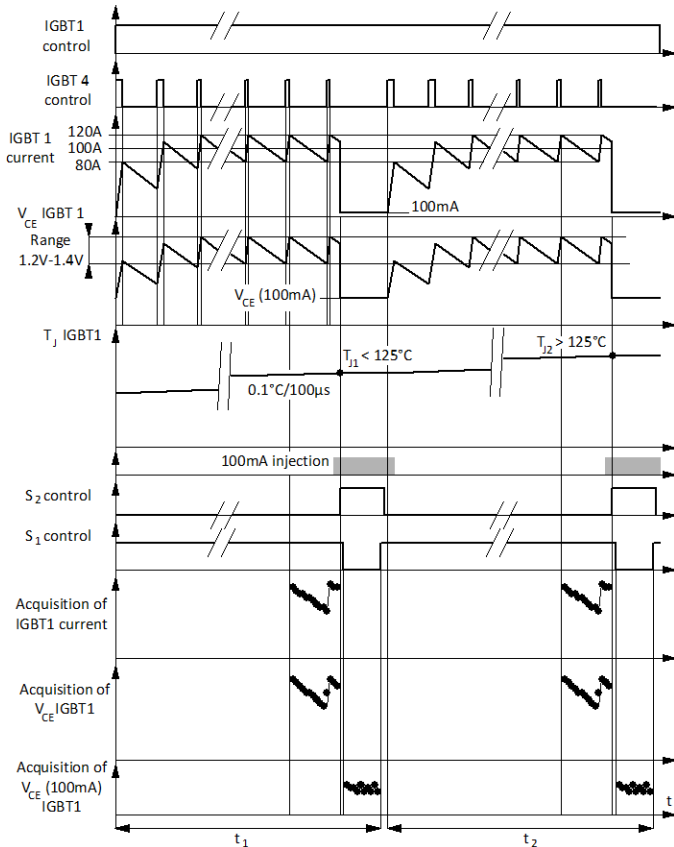


Figure 6 : Séquence d'acquisition pour la mesure de $V_{CE}(100A, 125^\circ C)$

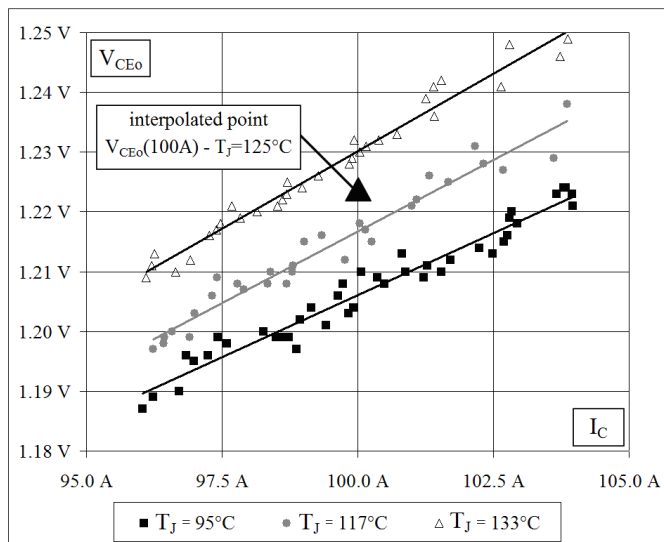


Figure 7 : Principe de la mesure finale de $V_{CE}(100, 125^\circ C)$

A la fin de chaque séquence, le courant est interrompu en utilisant l'ensemble S_1 - S_2 et une mesure de température indirecte est effectuée rapidement après la coupure. Les constantes de temps thermiques permettent de considérer que la température mesurée est celle de la jonction lors des dernières périodes de découpage de la séquence d'injection. Cette dernière permet d'obtenir une famille de points $V_{CE}(I_C)$ à une température donnée. A chaque nouvelle séquence, la température augmente et en réalisant trois séquences successives, on dispose de trois familles de points encadrant à la fois les valeurs 100A et 125°C. Une interpolation permet finalement d'extraire la valeur recherchée (Figure 7). L'ensemble de la mesure nécessite environ 0.5s, ce qui est complètement négligeable par rapport à la durée des tests.

L'ensemble des acquisitions et des traitements sont réalisés à l'aide d'une application Labview.

3.2. Mesure des évolutions de la température de jonction

Cette fonctionnalité permet de connaître à tout moment le profil thermique d'une puce IGBT. Elle est en particulier nécessaire pour régler l'amplitude du cyclage dans un protocole de test donné et pour la contrôler tout au long de l'essai de vieillissement.

Pour obtenir ce profil, plusieurs mesures indirectes de température par $V_{CE}(100mA)$, utilisant la même partie matérielle que précédemment, sont effectuées. La simulation de la Figure 8 montre à la fois le principe de mesure et son impact sur l'évolution de la température. Dans la configuration représentée, la fréquence de cyclage est de 2Hz et dix mesures de température, espacées de 50 ms, sont introduites. Chacune de ces mesures nécessite une interruption du courant principal de quelques centaines de μs , ce qui a impact négligeable sur le profil de température comme l'indique le zoom placé sur la droite de la simulation.

Si l'influence est négligeable dans l'exemple de régime présenté, une augmentation significative de la fréquence de modulation, nécessaire pour les protocoles à faible ΔT_J , risque d'induire une situation où l'impact sur le profil ne peut plus être négligé. Une deuxième technique peut alors être utilisée. Elle consiste à introduire un sous-échantillonnage en supposant que le profil ne varie pas sur plusieurs périodes de modulation, ce qui est une hypothèse raisonnable. Sur un groupe de dix périodes de cyclage, une seule mesure est effectuée à chaque période, décalée d'un dixième de période par rapport à la précédente. Ceci garantit le maintien de l'intégrité du profil et les dix températures ainsi obtenues permettent de le reconstituer. La Figure 9-a montre un résultat brut de l'échantillonnage direct avec plusieurs points de mesures pour chaque échantillon, une moyenne étant ensuite réalisée pour extraire la température de cet échantillon. La Figure 9-b compare le résultat de cette mesure avec celui de la caméra thermique, enfin la Figure 9-c compare les résultats des mesures directe et sous-échantillonnée.

Avant la mise en place de cette technique, les protocoles de vieillissement étaient calibrés à l'aide d'une caméra IR, avec ses limitations (préparation du module, bande passante < 20Hz). Désormais, chaque température de jonction peut être contrôlée en temps réel.

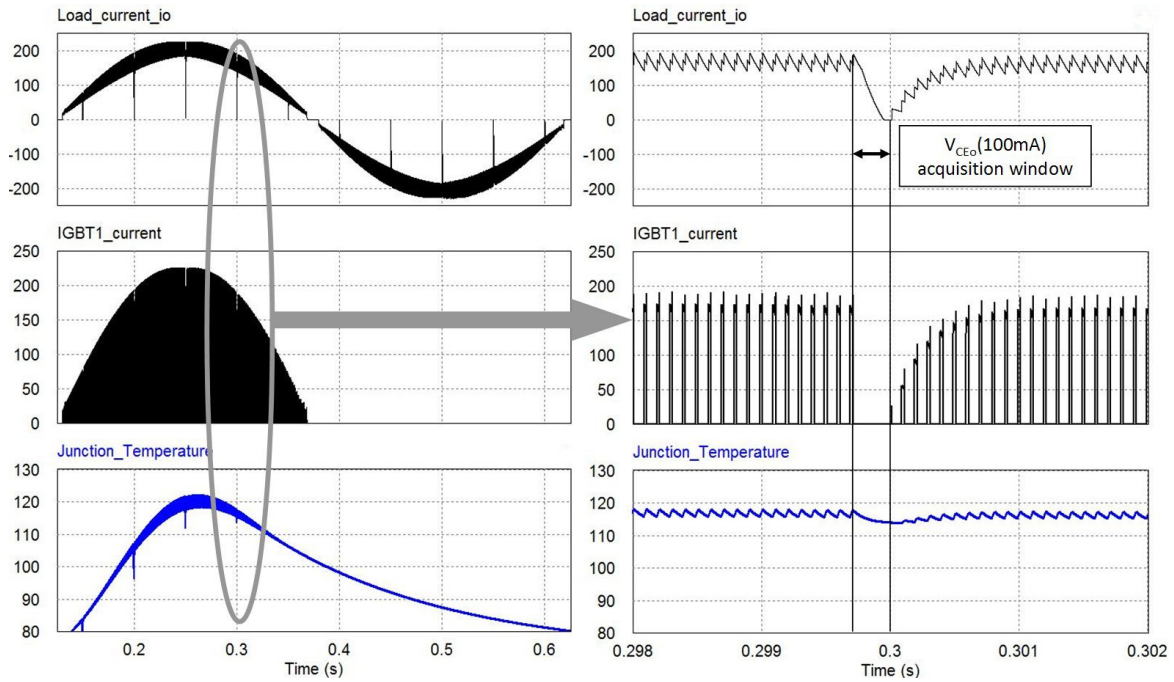


Figure 8 : Simulation de l'impact des mesures sur le profil de température

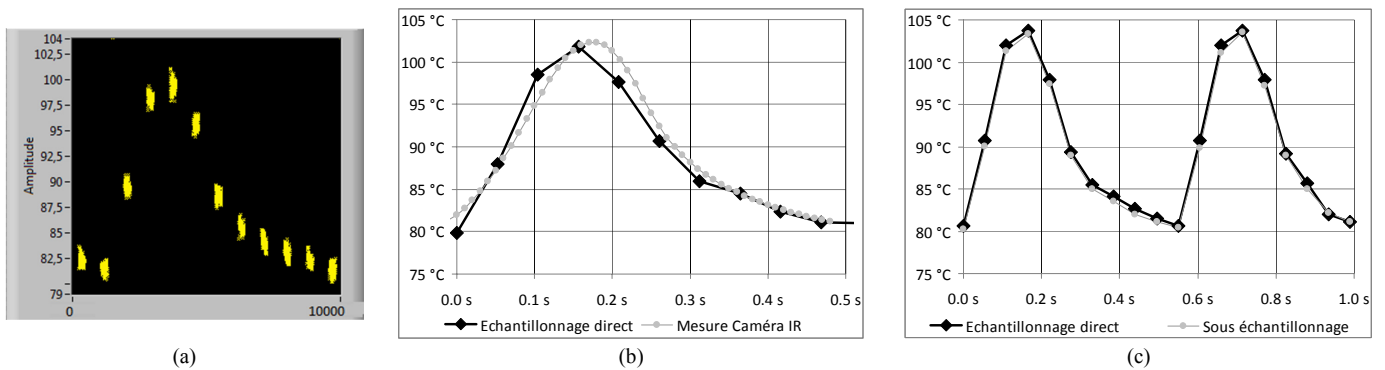


Figure 9 : Résultats des mesures de profil de température

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ce système de test, avec sa méthode accélérée et son environnement métrologique, a permis de vieillir un nombre très significatif d'échantillons en un temps très court pour de tels essais. La liste correspondante est donnée Tableau 1. Pour l'ensemble des modules, les dégradations observées touchent uniquement l'attache et vont fréquemment jusqu'au décollement complet du fil (lft-off). La Figure 10 montre un exemple d'une telle dégradation. Ces résultats sont assez différents de ceux obtenus dans les précédentes études avec des amplitudes de cyclage plus élevées [9]. Ainsi, on n'observe ici ni dégradation des métallisations, ni détériorations (fissures, cracks) des fils de bonding proprement dits. Pour confirmer, cette tendance et vérifier qu'elle n'est pas la conséquence du mode de cyclage rapide, des essais complémentaires ont été effectués. Le premier, non consigné dans le tableau, a consisté à vieillir un autre type de module issu d'un autre constructeur.

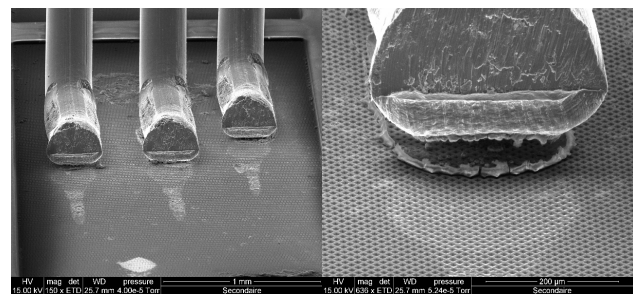


Figure 10 : Dégradation des attaches de bonding

Les résultats obtenus ont été identiques. Le second essai complémentaire a été réalisé en cyclage lent avec des amplitudes de température similaires à celles de la gamme haute du mode rapide. Les résultats apparaissent dans les cases grisées du tableau et sont très proches de ceux obtenus en cyclage rapide. L'état des puces est tout à fait similaire.

La conclusion qualitative et préliminaire de ces tests est une confirmation que les cyclages dans la gamme de quelques dizaines de degrés de variation induisent uniquement une dégradation des attaches de fils de bonding. Ce mécanisme est néanmoins tout à fait suffisant pour dégrader fortement le module et conduire à sa destruction lorsqu'un nombre significatifs d'attaches est détérioré.

Ces résultats ont été replacés dans un graphe de durée de vie mis en place lors de précédents projets utilisant le cyclage

lent (Figure 11). Ce graphe met en relation l'ensemble des résultats obtenus avec les courbes issus d'un modèle empirique, dit modèle de Held, qui permet de tenir compte de l'amplitude de cyclage mais également de la température de référence. Les paramètres de ce modèle ont été déterminés à partir des résultats des précédents essais à cyclage lent, donc avec les points pour lesquels $\Delta T_J \geq 60^\circ\text{C}$. Malgré la différence des mécanismes de vieillissement des fils de bondings, on constate que les points des mesures obtenus en mode rapide s'insèrent très correctement dans ce graphe.

Tableau 1. Liste des modules vieilliss

	Echantillon	ΔT_J	Durée de vie	Raison de l'arrêt
1	SAMP004	50.0 °C	713 906	Augmentation V_{CE} , 4%
2	SAMP005	50.0 °C	797 198	Augmentation V_{CE} , 4%-2%
3	SAMP006	50.0 °C	746 942	Augmentation V_{CE} , 1.5%-2%
4	SAMP007	50.0 °C	663 650	Augmentation V_{CE} , 4%-2.5%
5	SAMP008	50.0 °C	621 128	Augmentation V_{CE} , 2.5%
6	SAMP009	50.0 °C	621 128	Augmentation V_{CE} , 4%
7	SAMP010	50.0 °C	598 516	Destruction de la puce
8	SAMP011	50.0 °C	570 000	Destruction de la puce
9	SAMP012	50.0 °C	620 000	Destruction de la puce
10	SAMP018	41.0 °C	1 548 000	Augmentation V_{CE} , 4%-2.5%
11	SAMP025	41.0 °C	1 402 000	Augmentation V_{CE} , 1%-6.5%
12	SAMP024	40.0 °C	1 752 971	Augmentation V_{CE} , 5.5%-2.5%
13	SAMP026	40.0 °C	1 634 589	Augmentation V_{CE} , 1%-4%

	Echantillon	ΔT_J	Durée de vie	Raison de l'arrêt
14	SAMP021	39.5 °C	1 646 231	Augmentation V_{CE} , 3.5%-5%
15	SAMP027	39.5 °C	1 816 490	Augmentation V_{CE} , 5%-1%
16	SAMP028	39.5 °C	1 917 049	Augmentation V_{CE} , 2.5%-3%
17	SAMP029	39.0 °C	2 467 261	Augmentation V_{CE} , 5%-10%
18	SAMP016	38.5 °C	3 033 662	Augmentation V_{CE} , 5%-5%
19	SAMP019	38.0 °C	3 455 658	Augmentation V_{CE} , 5%-2.5%
22	SAMP031	35.0 °C	5 763 256	Destruction de la puce
23	SAMP032	35.5 °C	5 763 256	Augmentation V_{CE} , 5%-1.5%
24	SAMP036	31.5 °C	9 140 000	Augmentation V_{CE} , 4%
25	SAMP037	32.0 °C	9 140 000	Augmentation V_{CE} , 3.5%-2.5%
26	SAMP044	52.0 °C	550 000	Augmentation V_{CE} , 5%-6%
27	SAMP045	52.0 °C	550 000	Augmentation V_{CE} , 5%-6%

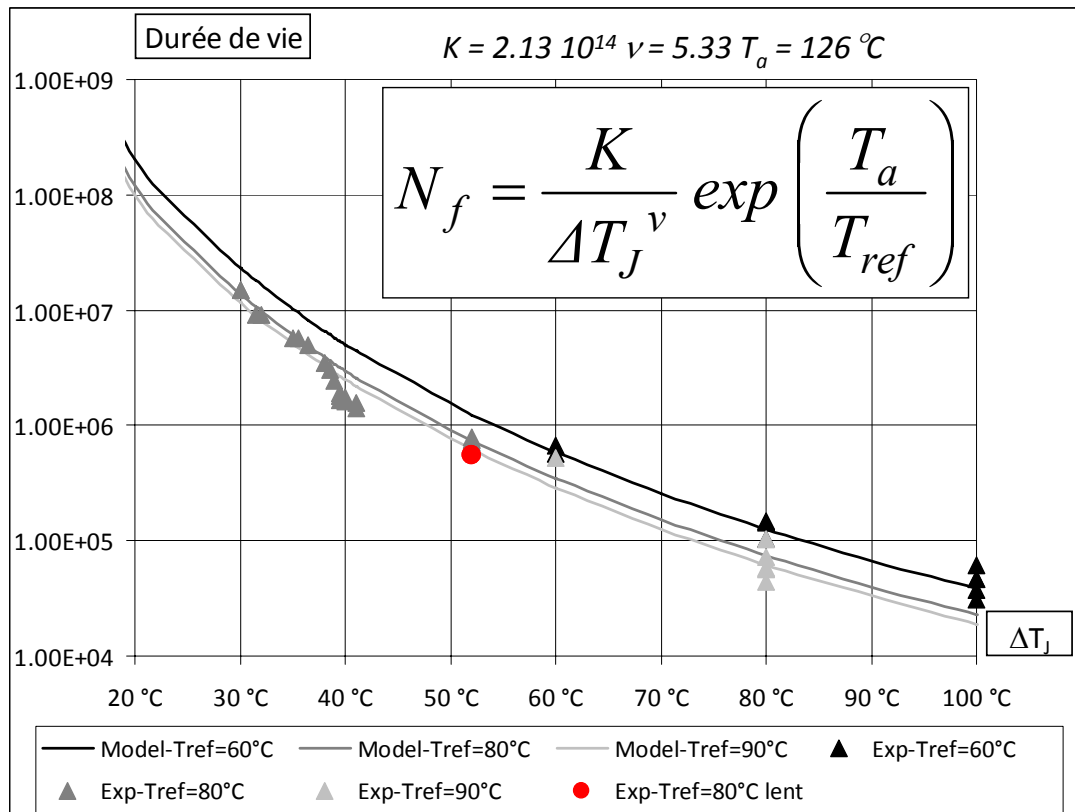


Figure 11 : courbes de durée de vie

5. CONCLUSION

La méthode de cyclage proposée a été validée par les différents essais. En particulier, elle n'induit pas de différence notable de comportement en termes de vieillissement par rapport à des tests plus classiques, malgré des variations de température beaucoup plus rapides. Elle est donc très intéressante à exploiter pour obtenir rapidement des résultats en ce qui concerne les fils de bonding, maillons faibles des modules modernes. D'autres techniques de connexion en face supérieure des puces sont en train d'émerger. Elles seront plus robustes mais nécessiteront toujours d'être caractérisées sur le plan de la durée de vie. Cette méthode est à même de produire un nombre élevé de cycle sur des durées raisonnables et pourra donc s'exprimer dans le test de ces structures à durée de vie élevée.

La validation de la méthode précédente a été accompagnée par le développement d'une chaîne de mesure et de suivi performante permettant d'ajuster les paramètres des protocoles et d'automatiser les phases de caractérisation intermédiaires. Le système d'acquisition de V_{CE} et de température de jonction mis au point à cette occasion constitue un premier pas vers le health-monitoring de composants intégrés dans des convertisseurs opérationnel. Un travail considérable reste à faire pour rendre la partie matérielle compatible avec un tel objectif et pour définir des séquences de mesures ne perturbant pas la mission de ces convertisseurs mais c'est clairement une voie à considérer très sérieusement.

6. RÉFÉRENCES

- [1] U. Scheuermann, "Reliability challenges of automotive power electronic", *Microelectronics Reliability*, vol. 49, No. 9-11, pp. 1319-1325, 2009.
- [2] Z. Khatir, J.P. Ousten F. Badel L. Dupont b, S. Lefebvre, M. Bouarroud, "Degradation behavior of 600 V-200 A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions", *Microelectronics Reliability*, Vol 47, pp 1719-1724, 2007
- [3] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules", *Microelectronics Reliability*, Vol 42, No. 4-5, pp. 653-667, 2002
- [4] Z. Khatir, S. Lefebvre, "Boundary element analysis of thermal fatigue effects on high power IGBT modules", *Microelectronics Reliability*, vol. 44, pp. 929-938, 2004
- [5] M. Bouarroud, Z. Khatir, J.-P. Ousten, and S. Lefebvre, "Temperature-Level Effect on Solder Lifetime During Thermal Cycling of Power Modules", *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 8, No. 3, pp 471-477, September 2008.
- [6] R. Bayerer, T. Licht, T. Herrmann, J. Lutz, M. Feller, "Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules – various factors influencing lifetime", *Proceedings of 5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, pp 37-42, november 2008
- [7] M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco, M.-H. Poech, "Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application", *Proceedings of Conference on Power Electronics and Drive Systems confer*, pp 425-430, Vol 1, may 1997
- [8] F. Forest, J.-J. Huselstein, S. Faucher, M. Elghazouani, P. Ladoux, T. Meynard, C. Turpin, J. Vallon, "Use of the Opposition Method in the Test of High Power Electronics Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, N°2, pp. 530-541, April 2006.V.
- [9] Smet, F. Forest, J.-J. Huselstein, F. Richardeau, Z. Khatir, S. Lefebvre, M. Berkani, "Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High Temperature Power Cycling", *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 58, N°10, pp. 4931-4941, october 2011.
- [10] V. Smet, F. Forest, J.-J. Huselstein, A. Rashed, F. Richardeau, "2013 Evaluation of V_{ce} Monitoring as a Real-Time Method to Estimate Aging of Bond Wire-IGBT Modules Stressed by Power Cycling" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 7, pp. 2760-2770, July 2013