

# Traction électrique automobile : convertisseur BOOST à base de composants silicium IGBT et CoolMOS<sup>TM</sup> fonctionnant à 200°C

Raphaël RODER<sup>1</sup>, Stéphane AZZOPARDI<sup>2</sup>, Olivier BRIAT<sup>1</sup>, François LE HENAFF<sup>1</sup>,  
Jean-Michel VINASSA<sup>1</sup>, Serge BONTEMPS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire IMS, Université de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

<sup>2</sup> Laboratoire IMS, Institut Polytechnique de Bordeaux, 351 Cours de la Libération, 33402 Talence Cedex

<sup>3</sup> Microsemi, 26 Rue de Campilleau, 33520 Bruges

**RESUME** - Ce papier présente une étude de faisabilité concernant l'utilisation des composants à semi-conducteur de puissance en silicium (Si-IGBT, Si-CoolMOS<sup>TM</sup>) à une température de jonction élevée dans un convertisseur BOOST (200V à 450V) pour l'application de traction électrique automobile. Le frittage par pâte d'argent a été utilisé pour le procédé de report des puces sur des substrats DBC afin de garantir la meilleure conduction thermique entre la puce et le substrat. Les caractéristiques électriques en régime statique (claquage, courant de fuite, tension de seuil et chute de tension à l'état passant) et les caractéristiques dynamiques (temps de commutation à l'ouverture, temps de commutation à la fermeture et pertes en commutation) de chaque composant sont étudiées sur une large gamme de température (de -50°C jusqu'à 200°C). Dans chaque cas, une comparaison est faite avec un composant SiC-MOSFET, pris comme composant de référence pour les hautes températures. Finalement chaque composant est testé dans un convertisseur BOOST 200V-450V@200W pour évaluer le rendement du convertisseur pour une température de jonction de 200°C.

*Mots-clés*— Frittage de pâte d'argent, application haute température, Si-IGBT, Si-CoolMOS<sup>TM</sup>, SiC-MOSFET, convertisseur BOOST, traction électrique automobile.

## 1. INTRODUCTION

Plusieurs applications dans l'aéronautique, l'automobile et les transports ferroviaires poussent les composants à semi-conducteur de puissance à être utilisés à haute température. Cependant, les Si-IGBT et Si-CoolMOS<sup>TM</sup> actuellement commercialisés ont une température de jonction spécifiée et estimée à 150°C et quelque fois à 175°C [1]. L'une des faiblesses des convertisseurs provient de la réduction du rendement avec l'augmentation de la température de jonction des composants à semi-conducteur de puissance qui peut amener à leur destruction. La solution serait d'utiliser des composants grand-gap (SiC, GaN), qui autorisent un fonctionnement à une température de jonction plus élevée ; mais ces technologies en plein essor ont un coût relativement élevé. Une solution alternative serait de faire fonctionner des composants en silicium à une température de jonction voisine de 200°C [2-7] afin de conserver l'un des principaux intérêts du silicium en termes de coût. Dans tous les cas, il est nécessaire d'optimiser la mise en boîtier et donc le transfert de

chaleur en utilisant des procédés de report optimum tel que le frittage par pâte d'argent [8-10].

Cette étude propose une analyse non exhaustive, vis-à-vis de la température, de différents types d'interrupteurs contrôlés à base de semi-conducteur de puissance en s'appuyant sur plusieurs caractérisations électriques. Chaque puce est reportée sur un substrat avec finition or en utilisant le procédé de frittage par pâte d'argent constituant ainsi un assemblage présentant une très faible résistance thermique. Les caractéristiques statiques représentées par les tests de claquage, de courant de fuite, de tension de seuil et de conduction, ainsi que les tests dynamiques mono-impulsion présentant le temps de commutation à l'ouverture, le temps de commutation à la fermeture et les pertes en commutation, sont étudiés en détail. Par la suite et pour éviter la destruction des composants, chaque composant est testé dans un convertisseur BOOST à échelle de puissance réduite (200V-450V@200W) dédié à la traction électrique automobile. La comparaison avec un SiC-MOSFET est faite pour pouvoir choisir le transistor silicium le plus approprié à ce type d'application et sous ces conditions.

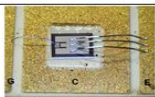
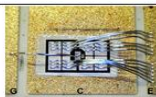
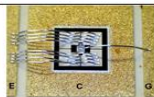
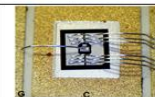
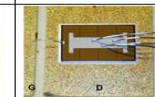
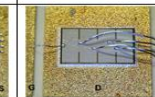

## 2. CHOIX DES COMPOSANTS ET DE L'ASSEMBLAGE

Le tableau 1 montre les puces semi-conductrices utilisées dans cette étude. Une sélection d'IGBT silicium utilisant la technologie Trench Field Stop (sauf pour l'IRGCC40 qui est un IGBT planar Punch Through) et de CoolMOS<sup>TM</sup> silicium haute tension permet de couvrir une large gamme de technologie. Une comparaison est aussi faite avec un composant grand gap (MOSFET SiC haute tension) utilisé comme composant de référence. Les interconnexions filaires de puissance sont réalisées avec des fils aluminium de 125µm de diamètre et celles de grille avec du fil qui dépend du plot de grille (50 µm ou 125 µm).

## 3. BANC DE TEST ELECTROTHERMIQUE

Un protocole de mesure électrique sous température contrôlée a été mis en place afin d'assurer une température de jonction du composant testé uniforme pour les essais statiques, dynamiques et pour l'essai utilisant le convertisseur BOOST. Une calibration initiale des paramètres thermosensibles de chaque composant [11-12] permet d'obtenir une valeur précise de la température de jonction. Pour ce faire, l'analyseur d'impédance thermique Anatech Phase 10 a été utilisé.

Tableau 1 : Si-IGBT, Si-CoolMOSTM et SiC MOSFET utilisés dans cette étude

Type de puce	Si-IGBT				Si-CoolMOS		SiC MOSFET
	IRGCC40	SIGC54T60R3	SIGC57T120R3	IGC50T120T6RL	IPC90R120C3	IPC60R045CP	CPMF1200S080B
Référence utilisé dans cette étude	A	B	C	D	E	F	G
Image de l'assemblage (avant dépôt gel)							
Tension de claquage	600 V	600 V	1200 V	1200 V	900 V	600 V	1600 V
Chute de tension ou $R_{DS(ON)}$	2,7 V	1,85 V	2,1 V	2,1 V	0,096 $\Omega$	0,046 $\Omega$	0,08 $\Omega$

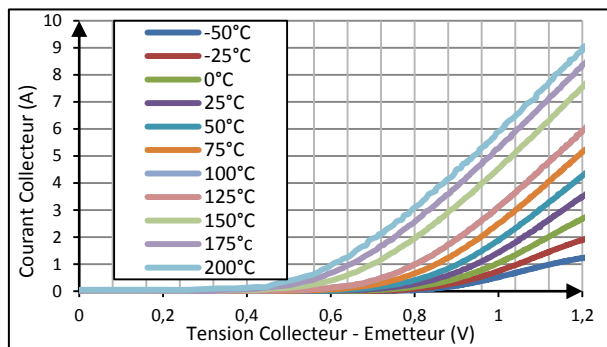
Les paramètres thermosensibles sont, pour les IGBTs, la chute de tension collecteur-émetteur à l'état passant (pour une tension grille émetteur de 15V) et pour les MOSFETs, la chute de tension à l'état passant de la diode de structure. Cette appareil fournis un courant de calibration (fixé à 1 mA) et mesure la chute de tension à plusieurs valeurs de température. Une fois la calibration finie, le système fournis la dépendance des paramètres thermosensibles vis-à-vis de la température de chaque composant. Cette dépendance est linéaire :  $-2,5\text{mV}/^\circ\text{C}$  pour le Si-IGBT,  $-2,5\text{mV}/^\circ\text{C}$  pour le Si-CoolMOS<sup>TM</sup> et  $-2,4\text{mV}/^\circ\text{C}$  pour le SiC-MOSFET.

Avant de commencer les différents tests en utilisant un conditionneur thermique, le composant est déconnecté du reste du circuit et une mesure de la chute de tension est effectuée

avec le même courant de calibration (dans notre cas 1 mA) afin de s'assurer de la bonne valeur de la température de jonction du composant.

#### 4. CARACTERISTIQUES STATIQUES

Les caractéristiques ont été obtenues en utilisant le traceur de caractéristiques TEKTRONICS 371A et le conditionneur thermique TEMPTRONIC TP04310A. Une caractéristique de chaque type de composant (Si-IGBT, Si-CoolMOS<sup>TM</sup> et SiC-MOSFET) sera présentée pour chaque test. Les premières caractéristiques présentées sont les tests de conduction (figure 1). Ces courbes ont été tracées pour  $V_{GE(\text{Si-IGBT})}=7,2\text{V}$ ,  $V_{GS(\text{Si-CoolMOS})}=10\text{V}$  and  $V_{GS(\text{SiC-MOSFET})}=7,2\text{V}$ .



(a) Transistor A : Si-IGBT (IRGCC40)

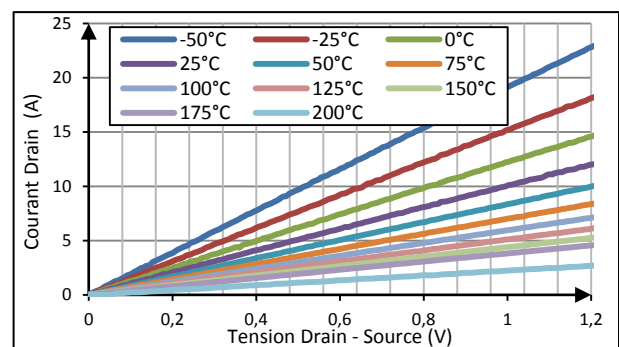
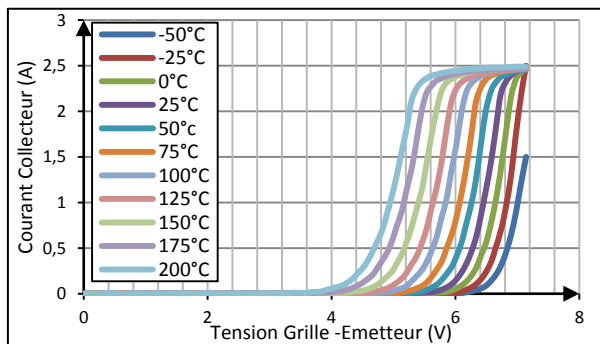

 (b) Transistor E : Si-CoolMOS<sup>TM</sup> (IPC90R120C3)

Figure 1 : Courant collecteur/tension collecteur-emetteur ou courant drain/tension drain-source à plusieurs températures



(a) Transistor A : Si-IGBT (IRGCC40)

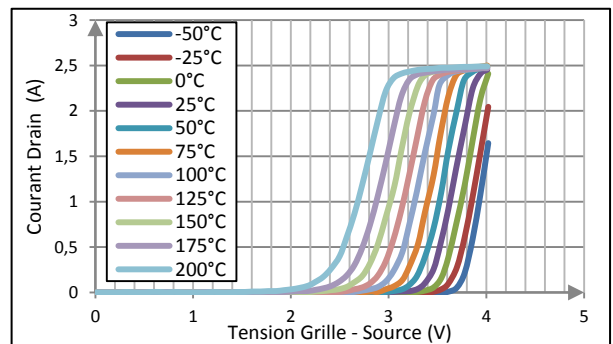

 (b) Transistor E : Si-CoolMOS<sup>TM</sup> (IPC90R120C3)

Figure 2 : Courant collecteur/tension grille-emetteur ou courant drain/tension grille-source à plusieurs températures

Ces tensions de grille sont différentes car pour le convertisseur BOOST, une source de tension suffisamment élevée pour saturer les transistors est requise surtout pour les Si-MOSFET afin de réduire l'influence de la résistance de canal. Il peut être observé sur la figure 1, pour les tensions de grille choisies, que les Si-IGBTs ont un coefficient en température positif ce qui signifie que, pour une chute de tension donnée, lorsque la température augmente, le courant de sortie augmente aussi (c'est pour cette raison que les Si-IGBTs sont sensibles à l'emballage thermique). L'opposé apparaît pour les Si-CoolMOS<sup>TM</sup>, ce qui les rend moins sensible à cette effet thermique.

La figure 2 montre l'influence de la température sur la tension de seuil. Comme nous pouvons le voir, la tension de seuil diminue avec l'augmentation de la température, et ceci quelque soit le composant considéré. Le composant D n'a pas été testé à 200°C pour éviter sa destruction (courant de fuite trop important à 175°C).

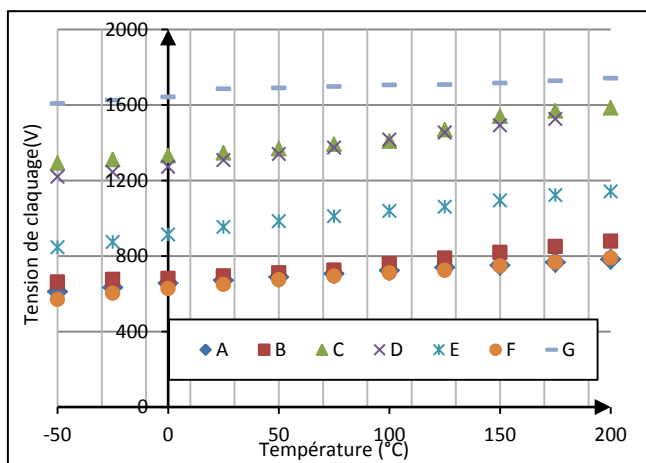


Figure 1 : Tension de claquage pour tous les composants en fonction de la température

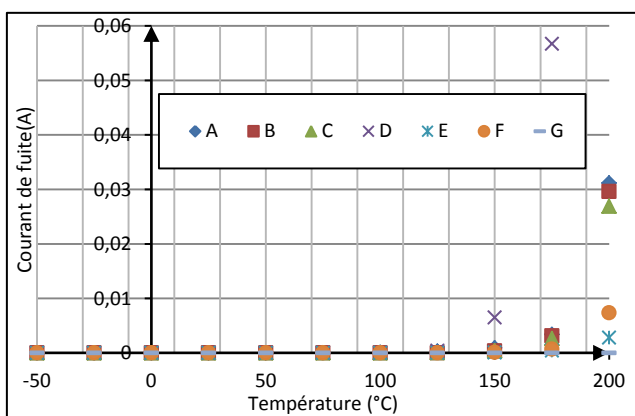


Figure 4 : Courant de fuite pour tous les composants en fonction de la température

Pour la tension de claquage et le courant de fuite montrés respectivement sur les figures 3 et 4, il est intéressant de souligner le fait qu'avec l'élévation de la température la tension de claquage augmente de façon similaire pour chaque type de composant. De plus, les composants en silicium sont plus sensibles à la température que le composant en carbure de silicium. Cependant, le courant de fuite du Si-CoolMOS<sup>TM</sup> est moins sensible en haute température comparé aux Si-IGBTs. En effet, le courant de fuite du Si-CoolMOS<sup>TM</sup> est huit fois supérieur au courant de fuite du SiC-MOSFET mais dix fois inférieur à celui du Si-IGBT. Ceci laisse présager un comportement remarquable du Si-CoolMOS<sup>TM</sup> à haute température.

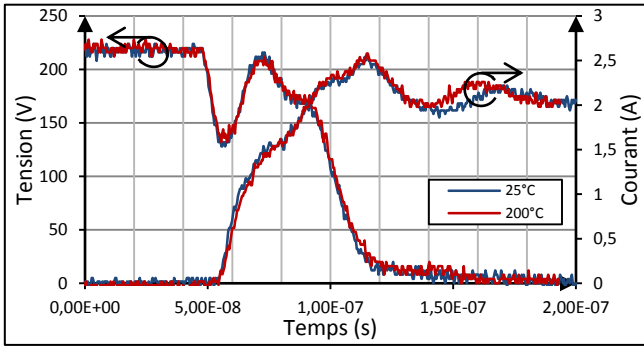
## 5. CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

Un circuit mono-impulsion dédié est utilisé pour analyser la commutation propre des transistors sur charge inductive en relevant les pertes en commutation et les temps à l'ouverture et à la fermeture sans aucune influence de recouvrement inverse. Les conditions de test permettent de faire commuter les composants sous 220 V @ 2A pour une gamme de température de jonction fixée et imposée successivement à 25°C, 100°C, 150°C, 175°C et 200°C. Un faible courant direct a été choisi afin d'assurer un fonctionnement non destructif du transistor à haute température. Comme précédemment, les formes d'ondes pour le temps de commutation à l'ouverture et pour le temps de commutation lors de la fermeture du composant seront relevées pour chaque type de composant.

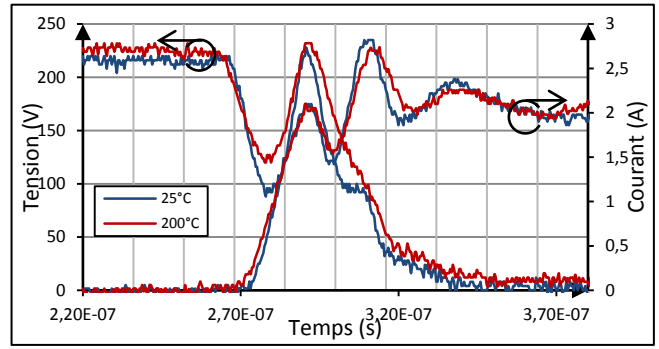
La figure 5 montre les formes d'ondes en courant et en tension lors de la fermeture du composant. La température n'a quasiment pas d'impact sur le temps de commutation lors de la mise en conduction de tous les composants. En effet, comme mentionné en [12, 15], la partie MOSFET contrôle la mise en conduction de l'IGBT et sa sensibilité vis-à-vis de la température est négligeable. Le Si-CoolMOS<sup>TM</sup> et le SiC-MOSFET ont un temps de commutation lors de la fermeture du composant assez similaire quelle que soit la température de jonction.

La figure 6 montre les formes d'ondes en courant et en tension lors de l'ouverture du composant, qui met en lumière plusieurs observations cruciales. La première est la haute sensibilité à la température du temps de commutation à l'ouverture des transistors Si-IGBTs. Les porteurs minoritaires sont responsables de la queue de courant et leurs durées de vie augmentent dramatiquement avec l'élévation de la température conduisant à une augmentation des pertes en commutations et à un temps de commutation important. Le deuxième est la faible influence de la température sur les composants Si-CoolMOS<sup>TM</sup> en commutation (figures 5(b) et 6(b))

Comme dit précédemment, le temps de commutation à la fermeture des composants reste relativement faible et constant quelle que soit la température comme indiqué par le tableau 2.

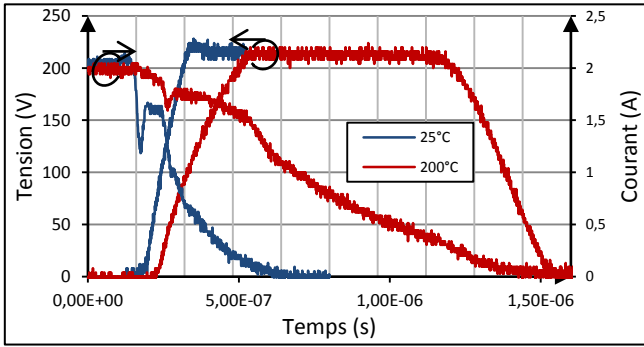


(a) Transistor A : Si-IGBT (IRGCC40)

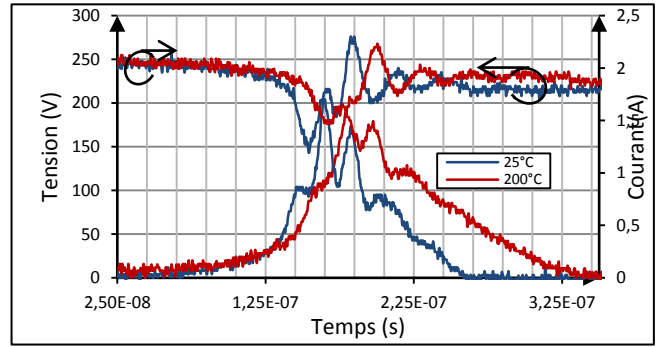


(b) Transistor E : Si-CoolMOS™ (IPC90R120C3)

Figure 5 : Temps de commutation lors de la fermeture du composant à 25°C et 200°C



(a) Transistor A : Si-IGBT (IRGCC40)



(b) Transistor E : Si-CoolMOS™ (IPC90R120C3)

Figure 6 : Temps de commutation lors de l'ouverture du composant à 25°C et 200°C

Tableau 2 : Temps de commutation à la fermeture pour 25°C et 200°C

	A	B	C	D	E	F	G
$t_{on}$ à 25°C (ns)	30,4	40,1	39,2	40	24,8	25,1	18
$t_{on}$ à 200°C (ns)	39,5	47,3	47,7	48,6	30,3	30,1	18,6

Tableau 3 : Temps de commutation à l'ouverture pour 25°C et 200°C

	A	B	C	D	E	F	G
$t_{off}$ à 25°C (ns)	275	184	283	184	83	56	51
$t_{off}$ à 200°C (ns)	840	432	402	288	117	128	73

Through » et que cette dernière est particulièrement sensible à la température.

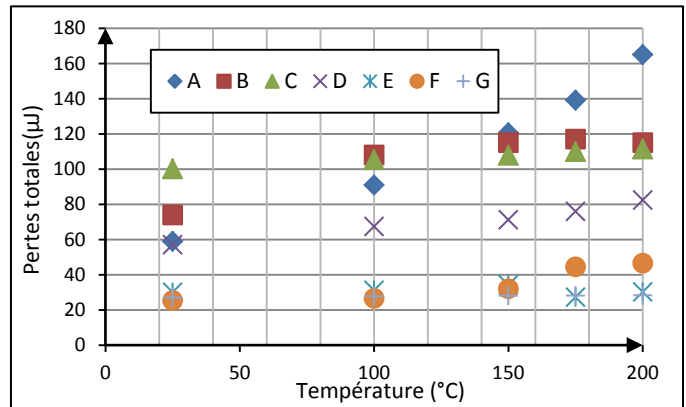


Figure 7 : Perte totale en commutation en fonction de la température

Les pertes totales en commutation sont représentées par la figure 7. Les résultats étaient prévisibles grâce au tableau 3. Les pertes du Si-CoolMOS™ sont très basses comparées aux Si-IGBT (environ deux à trois fois moins, cela dépend du composant Si-IGBT pris en référence). Ces pertes en commutations sont basses même à 200°C, seulement deux fois plus grandes que celles du SiC-MOSFET. Cela permet de confirmer l'excellent comportement du Si-CoolMOS™ qui aurait pu être prédit. En effet, la zone de conduction du Si-CoolMOS™ a un haut niveau de dopage qui autorise une

Pour le temps de commutation à l'ouverture, le tableau 3 montre clairement le comportement excellent des Si-CoolMOS™ comparé aux Si-IGBTs. Alors que la queue de courant pour l'IGBT l'amène à avoir un temps de commutation à l'ouverture important, ce n'est pas le cas pour le Si-CoolMOS™, composant unipolaire, qui présente un comportement similaire au SiC-MOSFET. Un point important à préciser est que les Si-IGBT B et C ont une structure « Field Stop » alors que le composant A est un Si-IGBT « Punch



température de jonction plus élevée comparé à des transistors silicium ayant la même tension de claquage.

6. COMPARAISON DES COMPOSANTS DANS UN CONVERTISSEUR BOOST A 200°C

Le convertisseur BOOST (figure 8) produit une tension de sortie plus grande que la tension d'entrée. Durant la phase 1 (le signal MLI est à l'état haut de 0 à  $\alpha T$ , avec  $0 < \alpha < 1$ ,  $\alpha$ : rapport cyclique), l'interrupteur de puissance T se ferme ce qui conduit à une augmentation linéaire du courant dans l'inductance L. Durant cette phase, l'énergie est stockée dans l'inductance et la tension aux bornes de cette dernière est égale à la tension d'entrée  $V_e$ . Durant la phase 2 (le signal MLI est à l'état bas de  $\alpha T$  à T), l'interrupteur de puissance est ouvert et l'énergie stockée dans l'inductance est transférée à la charge R et au condensateur de sortie  $C_s$  par conduction spontanée de la diode D. En mode de conduction continue (le courant ne s'annulant jamais dans l'inductance), il peut être démontré que le rapport entre la tension de sortie et la tension ne dépend uniquement que du rapport cyclique :  $V_S / V_E = 1 / (1 - \alpha)$ .

Une photographie du banc de test est montrée sur la figure 9. Elle montre le conditionneur thermique, le circuit de test et la charge résistive utilisée. Comme expliqué précédemment, la température de jonction de chaque puce est fixé à 200°C avant d'évaluer le rendement du convertisseur.

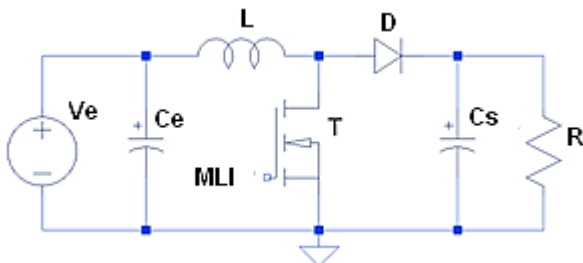


Figure 8 : Schéma du convertisseur BOOST

Les conditions de test sont présentées par le tableau 4. Comme étape de test préliminaire, le convertisseur BOOST utilisé pour les tests fonctionnera à puissance réduite (200V à 450V @ 200W) pour déterminer la tendance de chaque composant et d'éviter leur destruction.

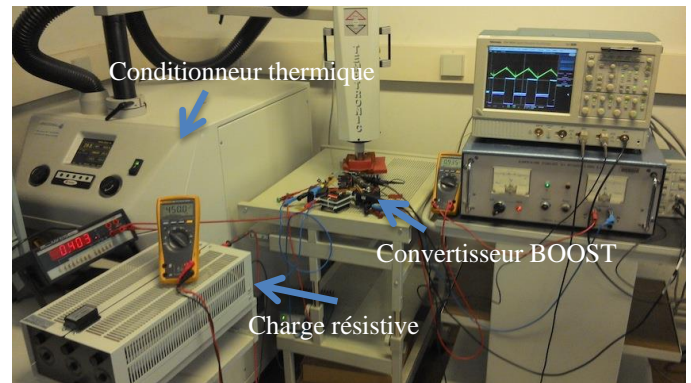


Figure 9 : photographie du banc de test à haute température

La figure 10 montre les oscillogrammes du courant et de la tension du convertisseur BOOST avec une tension d'entrée de 200V et une tension de sortie de 450V. Le courant de sortie a été limité à 400mA. Précisons que les formes d'onde du Si-IGBT n'ont pas pu être enregistrées à 200°C (destruction du composant et la température de jonction maximale retenue est  $T_{Jmax} = 175^\circ C$ ). De plus, le Si-CoolMOS™ et le SiC-MOSFET montrent une similitude dans leurs formes d'onde, ce qui prouve une fois de plus l'excellent comportement du Si-CoolMOS™ vis-à-vis de la température comme cela est illustré au travers du calcul du rendement à 200°C. L'évolution du rendement par rapport à la température pour chaque puce est représenté par la figure 11. Seuls les Si-CoolMOS™ et le SiC-MOSFET ont fonctionné à 200°C. Tout les Si-IGBTs se sont mis en défaillance pour une température de jonction de 200°C.

Tableau 4 Condition de test du convertisseur BOOST

	Condition de test
Tension d'entrée	200V
Tension de sortie	450V
Fréquence	30kHz
Courant dans la charge	400mA
Inductance	2,96mH

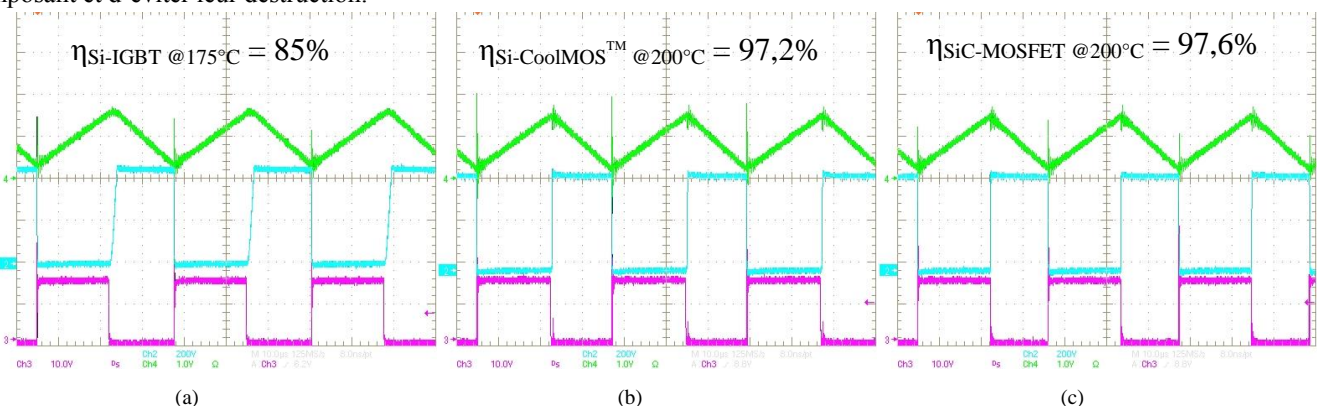


Figure 2 : Courant dans l'inductance (en vert), tension aux bornes du transistor (bleu), tension de grille (en violet) pour le (a) Si-IGBT @ 175°C, (b) Si-CoolMOS™ @ 200°C et (c) SiC-MOSFET @ 200°C (f = 30kHz)

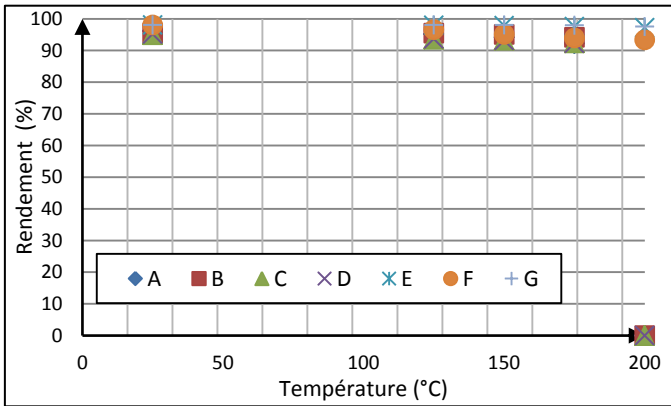


Figure 3 : Rendement du convertisseur BOOST en fonction de la température pour chaque composant testé

## 7. CONCLUSION ET FUTURS TRAVAUX

Cette étude a prouvé la possibilité d'utiliser des composants à semiconducteur de puissance en silicium, reportés par frittage de pâte d'argent sur un substrat céramique métallisé, fonctionnant à 200°C dans un convertisseur BOOST 200V – 450V dédié aux applications traction électrique automobile. Cependant, il a été montré que, dues aux fortes pertes en commutation et à l'augmentation du courant de fuite à 200°C, les Si-IGBT 600V et 1200V utilisés ont des comportements fortement pénalisants dans de telles conditions alors que les Si-CoolMOS™ 600V et 900V s'illustrent et leur comportement peut être comparé à celui du transistor SiC-MOSFET 1200V pris en référence.

Le travail en cours consiste d'une part à caractériser ces transistors de puissance à haute température sous des conditions de commutation extrêmes et de définir leur aire de sécurité de fonctionnement et d'autre part de dimensionner un convertisseur BOOST fonctionnant à 200°C de plus forte puissance.

## 8. REFERENCES

[1] C. Corvasce et al., *New 1700V SPT+ IGBT and diode chip set with 175°C operating junction temperature*, 14<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, 2011, pp.1-10  
 [2] C. Buttay et al., *State of the Art of High Temperature Power Electronics*, International Conference MicroTherm -

Microtechnology and Thermal Problems in Electronics, 2009, pp. 1-10.

[3] Z. Xu et al., *Si IGBT Phase-Leg Module Packaging and Cooling Design for Operation at 200°C in hybrid electrical Vehicle Applications*, 27<sup>th</sup> IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2012, pp. 483-490.

[4] R. Singh et al., *1200 V SiC Superjunction Transistors operating at 250°C with extremely low energy losses for power conversion applications*, 27<sup>th</sup> IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2012, pp. 2516-2520.

[5] B. Ray et al., *High Temperature Design and Testing of a DC-DC Power Converter with Si and SiC Devices*, in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2012, pp. 1261-1266.

[6] Z. Xu et al., *Investigation of Si IGBT operation at 200 °C for traction application*, 2<sup>nd</sup> IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011, pp.2397-2404

[7] U. Schlapbach et al., *1200V IGBTs operating at 200°C? An investigation on the potentials and the design constraints*, 25<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs.

[8] G. Bai, *Low-temperature sintering of nano scale silver paste for semiconductor device interconnection*, PhD thesis, 2005, Virginia Polytechnic Institute (USA).

[9] U. Scheuermann, *The road to the next generation power module: a 100% solder free design*, Conference on Integrated Power System, 2008, Nuremberg.

[10] F. Le Henaff et al., *A preliminary study on the thermal and mechanical performances of sintered nano-scale silver die-attach technology depending on the substrate metallization*, *Microelectronics Reliability*, vol. 52, pp. 2321-2325, 2012.

[11] J. W. Sofia, *Electrical Temperature Measurement Using Semiconductors*, *Electronics Cooling*, vol. 3, n°1, pp. 22-25, Jan. 1997

[12] D. Blackburn, *Temperature measurements of semiconductor devices - a review*, IEEE 20th Annual Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2004, pp.70-80

[13] B.J. Baliga, *Power Semiconductor Devices*, PWS Publishing Company, 1996.

[14] B. Callanan, *Application consideration for silicon carbide MOSFETs*, Cree note CPWRAN08, January 2011

[15] B. Wang, Y. Tong, C. Ming, *Study on Electric Characteristic of IGBT at Different Junction Temperature*, Conference in Power and Energy Engineering Conference, 2011, pp.1-4