

# Etude de différents transistors de puissance SiC 1.2kV des températures cryogéniques aux hautes températures

Thibaut CHAILLOUX, Cyril CALVEZ, Dominique PLANSON, Dominique TOURNIER  
Laboratoire Ampère, INSA de Lyon, 21 Av. J. Capelle, 69100 VILLEURBANNE, France

**RESUME** -Le but de cette étude consiste à comparer les effets de la température sur différents transistors de puissance en SiC (MOSFET, JFET, BJT). Leurs caractéristiques ont été mesurées pour des températures de 80K à 525K. Tous les composants sont fonctionnels à haute température et ont des caractéristiques supérieures aux composants conventionnels en Silicium. En haute température, le BJT en SiC se distingue par des pertes en conduction faibles et peu influencées par la température. Le SJT se démarque par des courants de fuite faibles et variant modérément avec la température. Le MOSFET a des pertes en commutation plus faible que les autres composants dans les conditions de test. Enfin les JFETs étudiés se caractérisent par une commande peu affectée par la température et des caractéristiques statiques et dynamiques moyennes, et représentent un bon compromis. A température cryogénique, le BJT se distingue car ses pertes en conduction, son gain et ses courants de fuite sont beaucoup moins affectés que les autres composants.

*Mots-clés*—SiC, BJT, MOSFET, JFET, température cryogénique, haute température.

## 1. INTRODUCTION

Le silicium a longtemps été le matériau dominant pour les composants de puissance haute tension. Mais grâce aux avancées significatives dans la filière SiC, ce matériau a atteint un bon niveau de maturité, qui a d'ailleurs été confirmé par de récentes études de fiabilité sur les transistors (JFET, MOSFET and BJT) ainsi que sur des modules de puissance. Dans la plupart des cas, les performances des composants SiC sous haute tension ou fort courant ont été prouvées pour des températures allant jusqu'à 450K [1-2]. Le fonctionnement des JFET verticaux (VJFET) en SiC a été prouvé à haute température [3] et à température cryogénique [4] et ceux-ci ont révélé avoir de bonnes performances entre 100K et 473K. Des transistors bipolaires (BJT) en 4H-SiC à 100K ont aussi été étudiés [5].

Récemment, quelques études comparatives entre JFET, MOSFET, et BJT sur une large gamme de température ont été menées [6-7]. Le but de ce travail est de poursuivre ces investigations, et d'étudier dans des conditions identiques, à température cryogénique et à haute température des composants de différentes natures.

## 2. DISPOSITIFS DE MESURE

Les caractérisations statiques et dynamiques ont été réalisées pour des températures allant de 80K à 525K sur des JFET, MOSFET et BJT 1,2kV. Un cryostat à azote liquide (point d'ébullition : 77.36K) a été utilisé pour fixer la température de 80K à 525K sous vide ( $2 \cdot 10^{-3}$  mbar). Les caractéristiques électriques ont été mesurées grâce à un traceur Agilent B1505A afin d'extraire les paramètres clés des composants de puissance ( $R_{ON}$ ,  $V_{th}$ ,  $I_{LEAK}$ ) et un oscilloscope Tektronix DPO4014B afin d'extraire les temps de commutation ( $t_{d(ON)}$ ,  $t_{d(OFF)}$ ) sur charge résistive (Figure 1). En particulier, la résistance spécifique à l'état passant est un paramètre très important sur lequel nous avons consacré la première partie de notre analyse car elle est responsable d'une partie non-négligeable des pertes du composant. Sa variation avec la température est fonction de différents phénomènes physiques liés à la nature unipolaire ou bipolaire des composants étudiés.

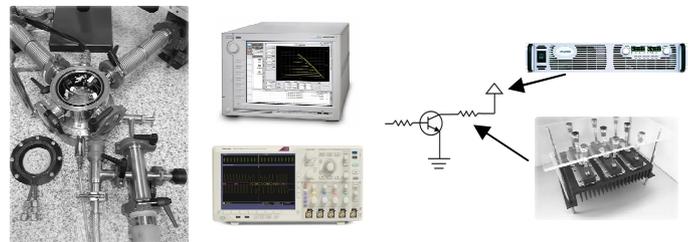


Fig.1: Dispositifs de mesure. De gauche à droite. Cryostat. Traceur Agilent B1505 (haut). Oscilloscope Tektronix DPO4014B (bas). Schéma de mesure en commutation sur charge résistive. Alimentation TDK Lambda 600V-5.5A (haut). Charge résistive modulable (bas).

## 3. COMPOSANTS CARACTERISES

Les tests sont réalisés sur différents transistors en SiC (BJT, JFET, MOSFET). Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 1. Le composant MOSFET choisi est un CMF20120D de CREE [8], mis en boîtier TO254 métallique (frittage Argent). Nous avons utilisé des JFETs Semisouth : SJEP120R050 (Normally-Off) en boîtier TO247 plastique [9] et SJDP120R045 (Normally-On) en boîtier TO254 métallique [10]. Enfin pour les BJTs, nous avons utilisé un BT1220AB de Fairchild en boîtier TO258 métallique [11]. Nous avons aussi

à notre disposition un transistor GA16JT17 de GeneSiC en boîtier TO247 plastique vendu sous le terme SJT (Super Junction Transistor) et capable de tenir 1.7kV [12], que nous avons choisi d'inclure dans l'étude.

Tableau 1. Caractéristiques de composants étudiés.

Composant	V <sub>max</sub> [V]	I <sub>max</sub> [A]	R <sub>on</sub> [mΩ] à 300K
MOSFET CREE CMF20120D	1200	42	80
JFET Normally Off Semisouth SJEP120R050	1200	38	40 (90 à 400K)
JFET Normally ON Semisouth SJDP120R045	1200	48	45
BJT Fairchild BT1220AB	1200	20	25 (50 à 525K)
SJT GeneSiC GA16JT17	1700	16	110 (280 à 450K)

## 4. MESURES ET RESULTATS

### 4.1. Caractérisations statiques

#### 4.1.1. Méthode

Les caractérisations statiques ont été obtenues grâce à un traceur Agilent B1505A par mesure Kelvin, tandis que l'échantillon était placé dans un cryostat. Une pompe cryogénique maintient un vide moyen ( $2 \cdot 10^{-3}$  mbar) dans l'enceinte du cryostat. L'échantillon est placé sur un support régulé en température grâce à un flux constant d'azote liquide et une résistance chauffante.

Le traceur nous permet de faire des mesures pulsées (100μs), ce qui limite grandement l'auto-échauffement.

Les caractéristiques électriques ( $I_{CE}-V_{CE}-I_{BE}$  pour les BJT/SJT et  $I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$  pour les autres) ont été mesurées de 80K à 525K par paliers de 25K. Les résistances à l'état passant, les tensions de seuil (pour les MOSFETs et les JFETs) et les gains en courant (pour les BJTs et SJTs) ont ensuite été extraits.

#### 4.1.2. Résistance à l'état passant

La résistance à l'état passant est une caractéristique importante à déterminer car elle donne les pertes en conduction. Etant donné que plus la taille de la puce est grande, plus sa résistance est faible, et puisque nous souhaitons comparer des puces de tailles différentes, nous nous sommes intéressés à la résistance spécifique, qui est le produit de la résistance à l'état passant par la surface active de la puce.

La figure 2 montre la résistance spécifique à l'état passant pour une tension de grille ou un courant de base donné, en fonction de la température. La valeur de tension ou du courant de polarisation est mentionné entre parenthèses sur le graphique.

La résistance spécifique du BJT est de loin la plus faible et la moins dépendante de la température. On peut l'expliquer par la modulation de la conductivité dans la zone de déplétion [13].

En revanche, celle du MOSFET est élevée et sensible à la température. La résistance spécifique des JFETs varie la plus fortement avec la température : elle augmente de 335% entre 200 et 525K pour le JFET Normally-Off. Cela peut être attribué à la diminution de la mobilité des porteurs due à la diffusion des phonons [6].

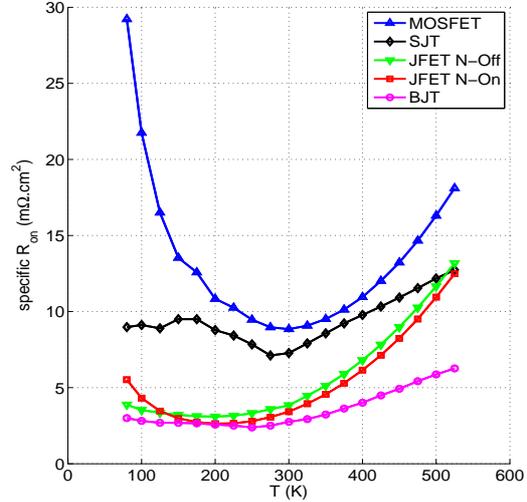


Fig.2: Résistance spécifique à l'état passant des 5 composants étudiés pour une température de 80K à 525K.

#### 4.1.3. Tension de seuil, transconductance et gain en courant

Connaitre la tension de seuil, la transconductance et le gain des transistors de puissance est essentiel pour les commander correctement. Nous avons mesuré ces grandeurs pour des températures allant de 80K à 525K. Pour cette étude nous avons défini la tension seuil comme la tension de grille pour laquelle le courant drain atteint 1mA

La figure 3 montre la variation de la tension de seuil pour les trois transistors à effet de champ et la figure 4 montre l'écart relatif de la tension de seuil des transistors à effet de champ par rapport à leur valeur à 300K (1). Ainsi la tension de seuil du MOSFET a un coefficient de température fortement négatif : elle diminue de 46% entre 300K et 525K et augmente de 197% entre 300K et 80K. Cette diminution de la tension de seuil pour une température croissante s'explique par l'augmentation de la densité de porteurs intrinsèques. La tension de seuil du JFET Normally-Off diminue linéairement avec une température croissante (54% entre 80K et 525K). La tension de seuil du JFET Normally-On ne semble varier que très légèrement et uniquement à très basse température.

$$\varepsilon(T) = \frac{V_{th}(T) - V_{th}(300)}{|V_{th}(300)|} \quad (1)$$

La transconductance du MOSFET (Figure 5) reste absolument stable sur toute la plage de température considérée, tandis que celle des deux JFETs sont sensiblement identiques

et diminuent linéairement avec la température (25% entre 80K et 525K).

Le gain en courant a été calculé pour une tension collecteur-émetteur de 4V et un courant collecteur de 10 A pour le BJT et 6A pour le SJT. Ces valeurs de courant ont été choisies afin d'être légèrement en dessous des spécifications du constructeur étant donné que les composants allaient fonctionner en dehors de leur plage d'utilisation recommandée. La figure 6 montre la variation du gain pour les deux transistors bipolaires. On constate que les gains en courant de ces deux composants ont un coefficient de température fortement négatif. Lorsque la température passe de 300K à 525K, le gain du BJT diminue de 43% tandis que le gain du SJT diminue de 30%. Cette diminution du gain lorsque la température croît est due à l'augmentation de l'ionisation des donneurs, ce qui réduit l'efficacité de l'émetteur. Ce coefficient de température négatif limite les risques d'emballement thermique.

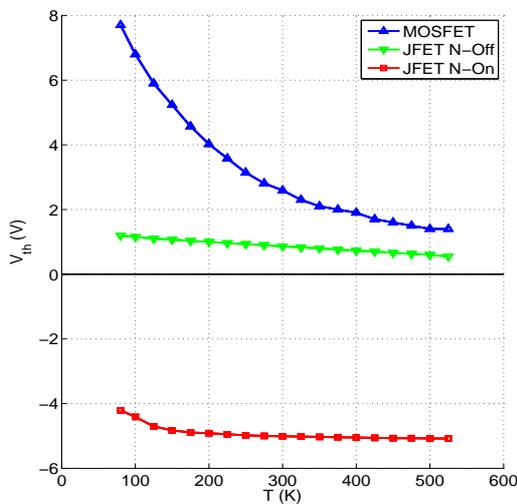


Fig.3: Tension de seuil des transistors à effet de champ.

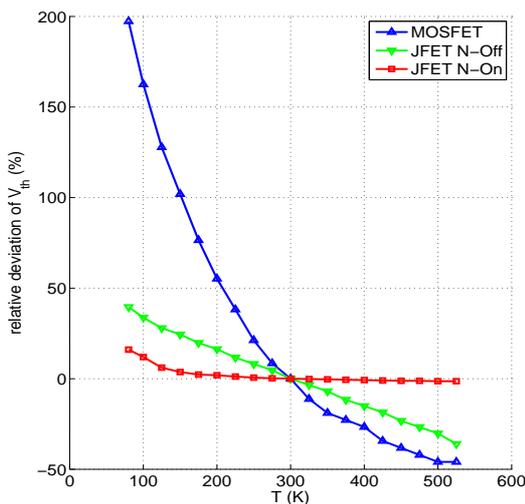


Fig.4: Ecart relatif de la tension de seuil des transistors à effet de champ par rapport à leur valeur à 300K.

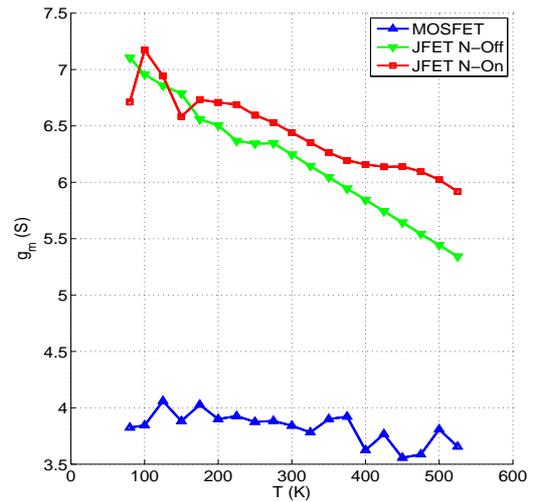


Fig.5: Transconductance des transistors à effet de champ.

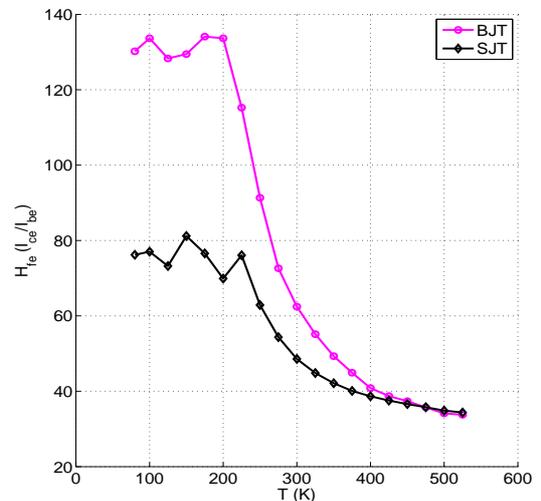


Fig.6: Gain en courant des transistors bipolaires.

#### 4.1.4. Courant de fuite

Les courants de fuite ont été mesurés pour le MOSFET, le BJT et le SJT.

Ces courants de fuite ont été obtenus en mesurant le courant drain (collecteur) lorsqu'on applique une tension drain-source (collecteur-émetteur) de 0 à 1200V, en maintenant une tension de grille nulle dans le cas du MOSFET et un courant de base nul dans le cas du BJT et du SJT.

Le courant de fuite du MOSFET est minimal aux alentours de 300K et augmente très graduellement entre 300K et 525K (Figure 7). Le courant de fuite du SJT augmente graduellement sur toute la plage de température considérée (Figure 9). Le courant de fuite du BJT que nous avons mesuré est minimal autour de 300K et augmente progressivement jusqu'à 500K (Figure 8). En revanche les dernières mesures révèlent une cassure dans la courbe, qui indique qu'un mécanisme de fuite

supplémentaire semble s'activer quand la température croit et provoque des fuites nettement plus importantes à 525K. Celui-ci est peut-être dû à un défaut de passivation.

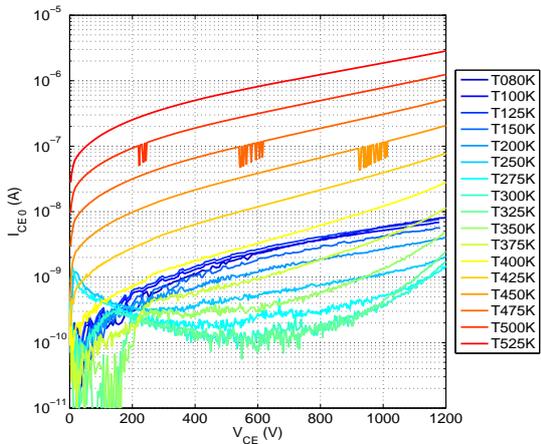


Fig.7: Courant de fuite du MOSFET pour différentes températures. La couleur de la courbe devient plus chaude à mesure que la température augmente.

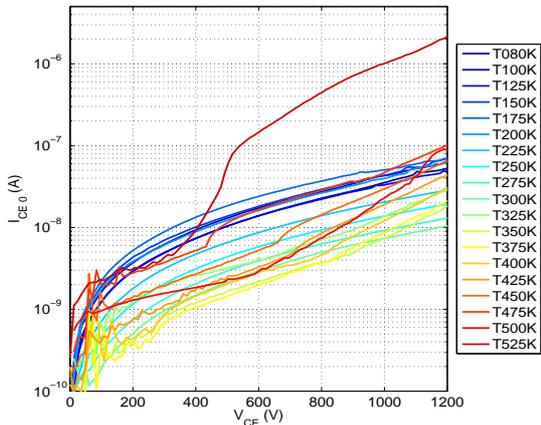


Fig.8: Courant de fuite du BJT pour différentes températures.

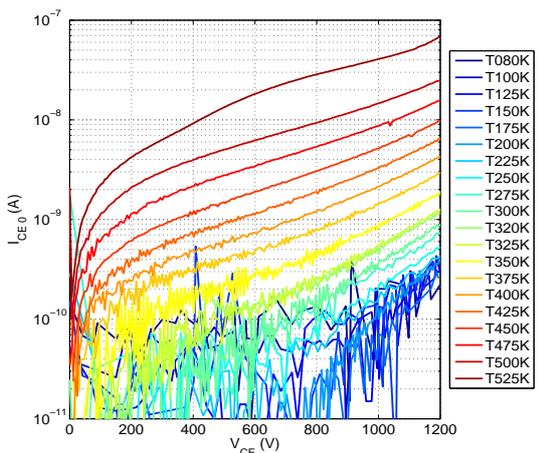


Fig.9: Courant de fuite du SJT pour différentes températures.

## 4.2. Caractérisations dynamiques

### 4.2.1. Méthode

Les temps de commutations ont été mesurés en commutant sur une charge résistive et en tachant de minimiser les inductances parasites du circuit. Nous avons utilisé une alimentation Genesys 3.3kW-600V-5.5A et un banc de résistances très faiblement inductives de 100Ω. La tension drain-source (collecteur-émetteur) appliquée était de 500V, pour un courant drain (collecteur) de 5A en conduction.

Les trois transistors à effet de champ étaient pilotés en tension par le même driver et une résistance de grille externe de 40Ω a été utilisée pour limiter l'ondulation. Les tensions de grille appliquées pour le MOSFET, le JFET Normally-Off et le JFET Normally-On, étaient respectivement de 20V, 20V et -15V. Le BJT et le SJT étaient pilotés en courant par un même driver et une résistance de base de 33Ω et un courant de 400mA était appliqué.

Nous avons utilisé un oscilloscope Tektronix DPO4014B afin d'extraire les temps de commutation ( $t_{d(ON)}$   $t_{d(OFF)}$ ). Une sonde haute tension était utilisée pour mesurer la tension drain-source (collecteur-émetteur), une sonde passive basse tension Tektronix TPP1000 pour mesurer la tension de grille et une sonde de courant à effet Hall Tektronix TCP202 pour mesurer le courant drain (collecteur).

Chaque temps de commutation a été calculé comme la différence entre l'instant où le courant est à 10% de sa valeur maximale et celui où la tension est à 10% de la sienne. Les pertes par commutation ont été calculées comme l'intégrale de la puissance instantanée entre ces deux instants.

### 4.2.2. Temps de commutation

Les figures 10 et 11 montrent la variation du temps de commutation des différents interrupteurs de puissance considérés pour une température allant de 80K à 525K.

Nous pouvons constater que le temps de commutation à l'ouverture du MOSFET diminue quand la température augmente de 300K à 525K, tandis que le temps de commutation à la fermeture augmente. Par ailleurs, d'après les temps de commutation que nous avons relevés pour ce composant, le MOSFET semble être le plus rapide des composants que nous avons étudiés.

Pour les 4 autres composants, les temps de commutation semblent assez stables lorsque la température évolue entre 300K et 525K.

En revanche autour de 80K, les temps de commutation ont fortement augmenté pour tous les composants, ce qui est probablement dû à une diminution de la mobilité des porteurs.

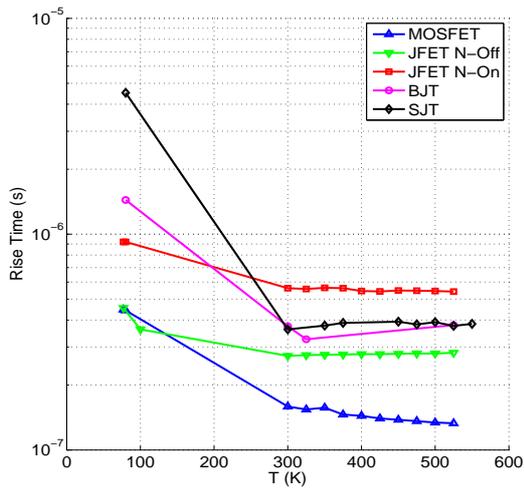


Fig.10: Temps de montée mesuré entre les instants suivants : 10% de la valeur finale en courant et 10% de la valeur finale en tension.

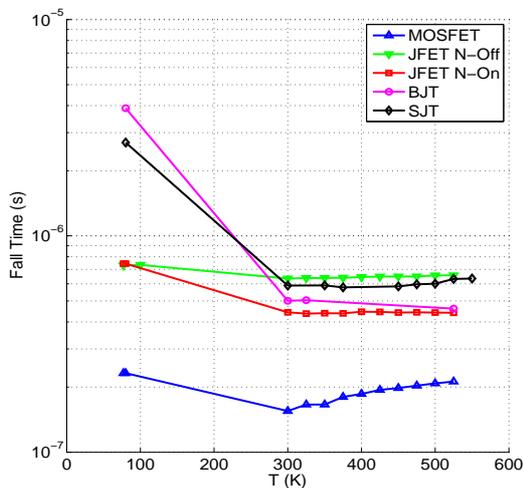


Fig.11: Temps de descente mesuré entre les instants suivants : 10% de la valeur finale en tension et 10% de la valeur finale en courant.

#### 4.2.3. Pertes par commutation

Les figures 12, 13 et 14 montrent les pertes en commutation pour respectivement la fermeture, l'ouverture et les pertes totales pour des températures allant de 80K à 525K.

On peut remarquer sur la figure 12 que les pertes à la fermeture du MOSFET diminuent légèrement de 96.3μJ à 91.6μJ quand la température augmente de 300 à 525K. A l'inverse les pertes à l'ouverture augmentent de 78.9μJ à 109μJ (Figure 13), ce qui fait que les pertes totales par commutation varient peu (+8.8%) lorsque la température augmente (Figure 14). Par ailleurs, les pertes relevées sont comparables à celles indiquées par le fournisseur [8]

De 300K à 525K, les pertes à la fermeture du BJT diminuent de 200μJ à 188μJ, les pertes à l'ouverture diminuent

de 260μJ à 235μJ et ainsi le total des pertes en commutation du BJT diminue de 460μJ à 425μJ (-7.6%).

Entre 300K et 525K, les pertes à la fermeture du SJT restent quasiment constante à 188μJ, les pertes à l'ouverture augmentent de 292μJ à 324μJ et les pertes en commutation du SJT augmentent au total de 480μJ à 512μJ (+6.7%).

Entre 300K et 525K, les pertes à la fermeture du JFET Normally-On diminuent de 285μJ à 275μJ, les pertes à l'ouverture restent constantes à 214μJ. Au total, les pertes du JFET Normally-On diminuent de 501μJ à 489μJ (-2.4%).

Et enfin entre 300K et 525K, les pertes à la fermeture du JFET Normally-Off augmentent très légèrement de 152μJ à 154μJ, les pertes à l'ouverture augmentent de 320μJ à 330μJ. Ses pertes totales en commutation augmentent de 472μJ à 484μJ (+2.54%).

On peut enfin constater que le MOSFET a le moins de pertes grâce à sa vitesse de commutation rapide. On remarque aussi que d'une manière générale tous les composants voient leurs pertes augmenter grandement à température cryogénique.

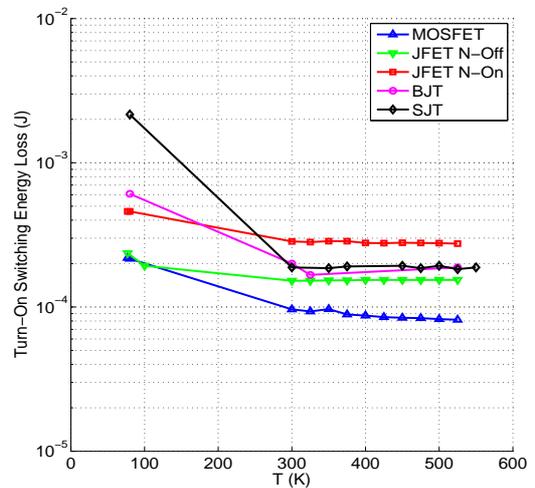


Fig.12: Pertes en commutation pendant la fermeture du composant.

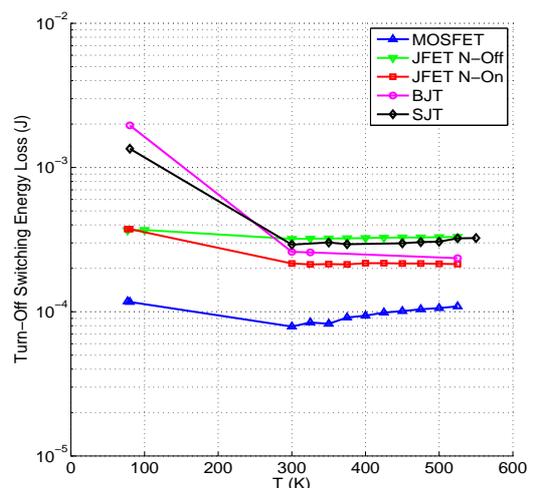


Fig.13: Pertes en commutation pendant l'ouverture du composant.

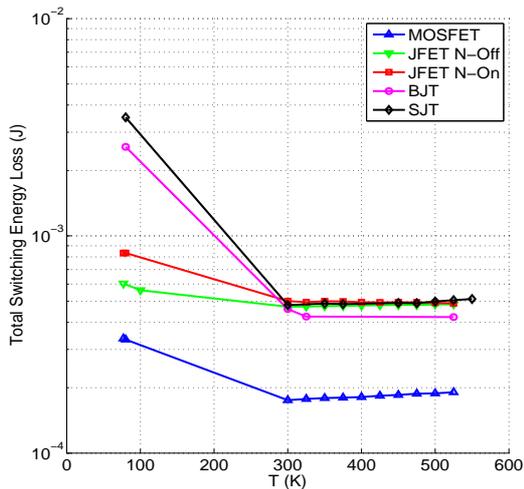


Fig.14: Total des pertes en commutation.

## 5. CONCLUSIONS

Cet article a présenté des caractérisations statiques et dynamiques de différents transistors SiC (MOSFET, JFET, BJT) pour des températures allant de 88K à 525K.

Il s'est avéré que le MOSFET CREE a la résistance spécifique à l'état passant la plus élevée et celle-ci est très dépendante de la température tandis que celle du BJT Fairchild est la plus faible et la moins sensible à la température.

Concernant le pilotage de ces composants, les JFETs Semisouth sont ceux dont la tension de seuil est la moins dépendante de la température et la transconductance varie assez modérément. Le MOSFET a une tension de seuil variant beaucoup avec la température mais sa transconductance est absolument identique quelle que soit la température. Enfin les BJT et SJT GeneSiC voient leur gain en courant évoluer fortement avec la température mais rester malgré tout supérieurs aux composants conventionnels en Silicium. De plus, à basse température, le gain de ces transistors est maximal.

Le SJT est le composant étudié ayant le courant de fuite le plus faible et le plus stable avec la température.

Enfin, concernant les caractérisations dynamiques, le MOSFET est le composant ayant commuté le plus efficacement. A haute température, ses pertes à la fermeture diminuent légèrement et ses pertes à l'ouverture augmentent légèrement avec la température, ce qui fait que ses pertes globales sont relativement constantes. Les pertes à l'ouverture, les pertes à la fermeture et les pertes totales en commutation

des autres composants sont stables à haute température. En revanche à température cryogénique, les composants commutent très lentement et génèrent beaucoup de pertes, étant donné que la mobilité des porteurs diminue fortement.

La prochaine étape de ce travail consistera à compléter la caractérisation dynamique des composants, d'une part en améliorant le driver et la connectique du circuit de mesure et d'autre part en effectuant plus de mesures à basse température afin d'évaluer plus finement la plage d'utilisation optimale de ces composants et identifier les phénomènes physiques mis en jeu.

## 6. REFERENCES

- [1] R. Green, A. Lelis, D. Habersat, "Application of reliability test standards to SiC power MOSFETs", Reliability Physics Symposium (IRPS), 2011 IEEE International, pages EX.2.1 –EX.2.9, april 2011.
- [2] A. Lelis, D. Habersat, R. Green, A. Ogunniyi, M. Gurfinkel, J. Suehle, N. Goldsman, "Time Dependence of Bias-Stress-Induced SiC MOSFET Threshold-Voltage Instability Measurements", IEEE Trans. On Elec. Dev., Vol. 55, No. 8, August 2008.
- [3] J. Merrett, W. Draper, J.R.B. Casady, J. B. Casady, I. Sankin, R. Kelley, V. Bondarenko, M. Mazzola, D. Seale, "SiC VJFETs Operated at Junction Temperatures Exceeding 300 °C", Proceedings of IMAPS-HiTEC 2004, May 17-20, 2004, Santa Fe, NM, USA.
- [4] L. Cheng, I. Sankin, N. Merrett, V. Bondarenko, R. Kelley, S. Purohit, Y. Koshka, J. Casady, M. Mazzola, "Cryogenic and high temperature performance of 4H-SiC vertical junction field effect transistors (VJFETs) for space applications", ISPSD, 2005.
- [5] S. Balachandran, T. P. Chow, A. Agarwal, "Low and High Temperature Performance of 600V 4H-SiC Epitaxial Emitter BJTs, ECSCRM2004, Aug. 31-Sept. 4, 2004, Bologna, Italy.
- [6] C. DiMarino, Z. Chen, D. Boroyevich, R. Burgos, P. Mattavelli, "High-temperature characterization and comparison of 1.2kV SiC power semiconductor devices", Proceedings of IMAPS-HITEN 2013, Oxford, United Kingdom.
- [7] T. Chailloux, C. Calvez, N. Thierry-Jebali, D. Planson, D. Tournier, "SiC power devices operation from cryogenic to high temperature: investigation of various 1.2kV SiC power devices", Proceedings of ICSCRM 2013, Kyoto, Japan.
- [8] Datasheet "CMF2012D - Silicon Carbide Power MOSFET", CREE Inc., Rev. D, 2012.
- [9] Datasheet "SJEP120R050 - High Temperature Normally-OFF Trench Silicon Carbide Power JFET", SemiSouth Laboratories, Inc., Rev. 3.0, 2012.
- [10] Datasheet "SJDP120R045 - Normally-On Trench Silicon Carbide Power JFET", Semisouth Laboratories Inc., Rev. 3.0, 2012.
- [11] Datasheet "BT1220AB-P1", TranSiC AB, Rev. F, 2010.
- [12] Datasheet "GA16JT17-247 - Normally-OFF Silicon Carbide Junction Transistor", GeneSiC Semiconductor Inc., Rev. 4, 2013.
- [13] P. Leturcq, "Composants semi-conducteurs de puissance : caractères propres", Techniques de l'ingénieur Composants actifs en électronique de puissance, TIB245DUO, 1999.