



Convertisseur DC-DC à transistors GaN entrelacé couplé par TICs monolithiques frittés par SPS

Adrien Mercier, Fabien Adam, Denis Labrousse, Bertrand Revol, Oleksandr Pasko, Frederic Mazaleyrat

► To cite this version:

Adrien Mercier, Fabien Adam, Denis Labrousse, Bertrand Revol, Oleksandr Pasko, et al.. Convertisseur DC-DC à transistors GaN entrelacé couplé par TICs monolithiques frittés par SPS. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361617

HAL Id: hal-01361617

<https://hal.science/hal-01361617>

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Convertisseur DC-DC à transistors GaN entrelacé couplé par TICs monolithiques frittés par SPS

Adrien Mercier², Fabien Adam², Denis Labrousse³, Bertrand Revol², Alexandre Pasko¹, Frédéric Mazaleyrat²
SATIE, UMR 8029, CNRS¹, ENS de Cachan², Cnam³, 61 avenue du président Wilson 94230 Cachan

RESUME – Cet article présente la mise en œuvre d'un convertisseur DC-DC de type VRM fonctionnant à 2 MHz à commande entrelacée et dont les sorties sont couplées magnétiquement par TICs (Transformateurs InterCellules) monolithiques. Ces derniers ont été réalisés par frittage SPS et les procédés de fabrication sont détaillés dans cet article. Le fonctionnement haute fréquence a été permis grâce à la mise en œuvre de composants GaN.

Mots-clés—*Frittage flash, TIC, Convertisseur VRM entrelacé*

1. INTRODUCTION

Depuis l'émergence de l'électronique de puissance, une partie des enjeux technologiques s'est orchestrée autour de l'augmentation des densités de puissance en se focalisant aujourd'hui sur l'intégration. Le principal facteur déterminant est de toujours augmenter la fréquence de travail des composants actifs pour avoir l'opportunité de réduire en taille et en masse les composants passifs tant que les contraintes thermiques sont respectées. On peut aujourd'hui trouver des convertisseurs utilisant des semi-conducteurs grand gap de type GaN qui ont l'avantage de présenter des temps de commutation très faibles, réduisant ainsi les pertes par commutation, et permettant un fonctionnement à haute fréquence de découpage - de l'ordre du mégahertz. Par ailleurs, de nouvelles technologies permettent d'entrevoir une nouvelle approche pour la conception des composants passifs [1].

Nous avons réalisé dans cette étude un convertisseur statique DC-DC de type VRM (Voltage Regulator Module) entrelacé et couplé à trois phases. Ce convertisseur est composé de trois cellules de commutation dont les sorties sont couplées à l'aide de coupleurs ou transformateurs intercellules (TIC) selon un agencement « cascade cyclic » [2]. Le schéma de principe est rappelé sur la figure 1.

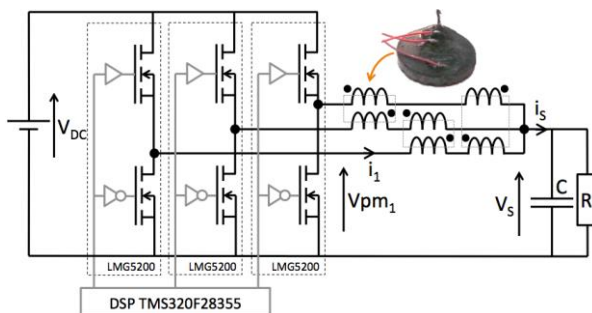


Figure 1 : Structure VRM entrelacée couplée.

L'originalité de cette étude vient du fait que des TICs monolithiques ont été réalisés par cofrittage SPS. Cette technologie de réalisation de composants magnétiques est récente, et le protocole a été décrit pour la première fois dans [3], et amélioré dans [4]. Les inductances propres et mutuelles de ces coupleurs ont une valeur constante dans la bande de fréquence comprise entre 10 kHz et 10 MHz. En conséquence, nous avons mis en œuvre des cellules de commutation à base de composant GaN fabriqués par Texas Instruments fonctionnant à une fréquence de découpage de 2 MHz (LMG5200).

Nous présenterons dans un premier temps le procédé de fabrication des coupleurs par frittage SPS ainsi que leurs caractéristiques. Nous montrerons dans un deuxième temps des résultats de simulation de la structure. Enfin, nous aborderons la réalisation du prototype de la structure.

2. PROCEDE DE FABRICATION ET CARACTERISATION DES TICs

Les TICs sont réalisés de manière monolithique grâce à la technologie SPS (Spark Plasma Sintering), aussi appelée PECS (Pulsed Electric Current Sintering). Une vue éclatée et une vue en coupe sont montrées sur les figures 2 et 3 afin d'illustrer la morphologie et le fonctionnement du composant.

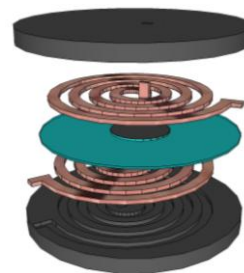


Figure 2 : Vue éclatée d'un coupleur monolithique.

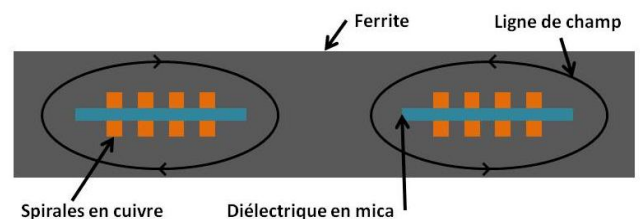


Figure 3 : Vue en coupe.

Dans un premier temps, nous avons choisi de la poudre de ferrite spinelle de formule chimique $\text{Ni}_{0,27}\text{Zn}_{0,57}\text{Cu}_{0,16}\text{Fe}_2\text{O}_4$, et nous l'avons broyée afin de réduire la taille des particules. Cette étape est primordiale afin d'augmenter la réactivité de la poudre pour obtenir un meilleur frittage. Le broyage est effectué dans un broyeur planétaire, modèle Pulverisette 6 de marque Fritsch. La vitesse de rotation est de 450 tr/min pendant 3 heures. Pour chaque broyage, nous avons utilisé une jarre de 45 mL, dans laquelle nous avons mis 5,5 g de poudre et 18 billes d'acier chromé de diamètre 7 mm et de masse 1,4 g. Nous avons en plus ajouté 55 mg de V_2O_5 , correspondant à 1 % de la masse de poudre de ferrite. Le pentoxyde de vanadium a une température de fusion de 680 °C, il joue ici le rôle de fondant qui permettra de passer d'un frittage en phase solide à un frittage en phase liquide [5]. Ceci aura pour effet d'améliorer la mobilité des ions durant le frittage, et ainsi d'obtenir une densité proche de la densité théorique.

Dans un deuxième temps, nous avons utilisé des spirales de cuivre comme bobinage. Nous avons usiné ces spirales par électro-érosion à partir d'une plaque de cuivre d'épaisseur 0,45 mm. La machine de découpe est le modèle Robofil 300 de marque Charmilles Technologies. Chaque spirale est constituée de 4 tours. La largeur de la spirale est de 0,5 mm, et la distance entre chaque tour est de 0,5 mm également. Deux formes ont été créées, correspondant aux deux enroulements (supérieur et inférieur) des TICs.



Figure 4 : Spirales usinées par électro-érosion.

Dans un troisième temps, il faut procéder à l'assemblage des spirales, et du diélectrique. Ce dernier est sous forme de feuillet de mica, et se présente sous l'aspect d'une rondelle, comme illustré sur la figure 2. Nous avons donc placé les spirales de cuivre de part et d'autre de la rondelle de mica, et nous avons plié les extrémités des contacts vers le haut. Par ailleurs, il est nécessaire d'apporter ici une paroi dans le but d'éviter que le cuivre soit en contact avec le ferrite. En effet, le procédé de frittage SPS est réducteur, dans le sens où la concentration en ion O^{2-} diminue dans le ferrite durant le frittage. En conséquence, une réorganisation électronique s'opère, et il apparaît des ions Fe^{2+} qui vont considérablement diminuer la résistivité du ferrite. La résistivité de ferrite fritté par SPS est d'environ 50 $\Omega\cdot\text{m}$, alors qu'un ferrite de Ni-Zn fritté classiquement peut atteindre des résistivités de l'ordre de $10^8 \Omega\cdot\text{m}$. C'est la raison pour laquelle il faut isoler le cuivre du ferrite. Pour cela, nous avons enduit manuellement l'assemblage cuivre-mica de peinture à base de céramique en alumine ; cette application reste à améliorer.



Figure 5 : Spirales et rondelle ensevelies de peinture céramique.

Dans un quatrième temps, il faut procéder à l'assemblage des différents matériaux dans le moule de frittage. Ce moule est constitué d'un cylindre creux en graphite de diamètre interne 20 mm, et de deux pistons en graphite également. La nature de ce matériau favorise la réduction du ferrite. Deux stratégies sont alors envisageables.

2.1. La première fabrication des TICs

Pour cette première stratégie, il faut remplir le moule comme suit. Il faut d'abord insérer 2 g de poudre, puis l'ensemble spirales-rondelle-peinture, puis à nouveau 2 g de poudre. Lors du frittage, une pression uniaxiale est appliquée, il faut donc protéger les quatre extrémités des spirales qui sont redressées. Pour cela, nous les avons ensevelies sous de la poudre d'alumine, qui a une température de frittage bien supérieure à celle du ferrite. Une coupe du moule rempli avant frittage est montrée sur la figure suivante.

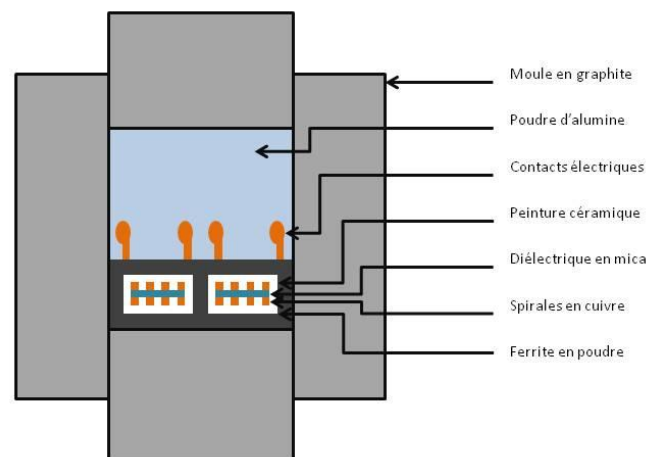


Figure 6 : Moule avant frittage.

Par la suite, nous avons effectué le frittage par le procédé SPS. Une montée en température de 5 min permet d'atteindre 800 °C. Un palier de frittage est maintenu à cette température pendant 10 min. Puis, une descente en température est effectuée pendant 5 min. Par ailleurs, une pression uniaxiale de 50 MPa est maintenue durant la totalité de l'opération. Ces paramètres de frittage sont liés à la nature du ferrite à fritter, et ont déjà fait l'objet d'études antérieures [6].

Après frittage, il suffit de retirer la poudre d'alumine pour obtenir le composant. Les contacts électriques ont été soudés afin d'effectuer les mesures.



Figure 7 : Coupleur (TIC). Diamètre 20 mm.

Pour effectuer les mesures sur le coupleur, le composant est ici vu comme un transformateur. La première mesure est celle du rapport de transformation en fonction de la fréquence afin de déterminer la bande fréquentielle utile. Les relevés expérimentaux sont effectués avec l'analyseur d'impédance HP4194A en mode gain-phase.

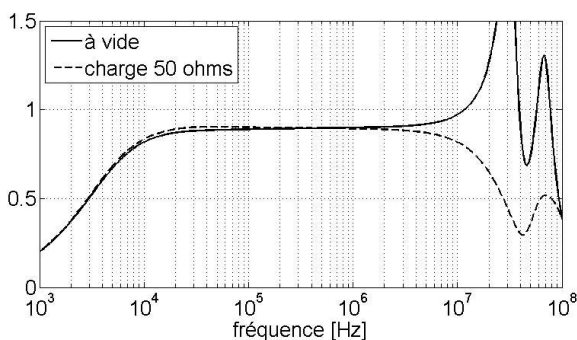


Figure 8 : Rapport de transformation.

On relève que le rapport de transformation est quasi-constant dans la bande allant de 10 kHz à 10 MHz, et prend une valeur d'environ 0,9. On observe aussi une résonance lorsque le transformateur est à vide, qui est due à la surface en regard des deux spirales, et qui est amortie lorsque le transformateur est chargé par 50 ohms. A 2 MHz, ce rapport est respectivement de 0,902 et 0,888 pour le transformateur à vide et chargé.

Par ailleurs, pour l'application visée qui est l'alimentation VRM, il est nécessaire de mesurer les valeurs des inductances propres et mutuelles.

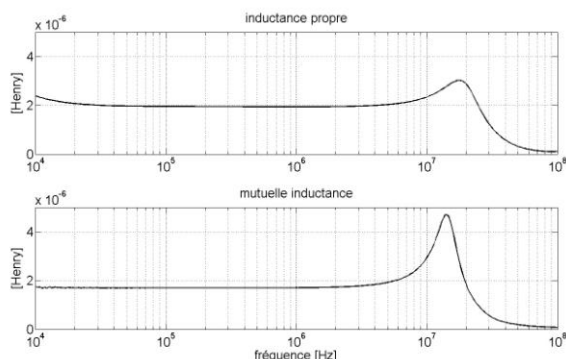


Figure 9 : Inductances propre et mutuelle.

La faible valeur de ces inductances s'explique par les faibles dimensions des coupleurs, ainsi que du nombre de tour des deux enroulements qui est de 4. Cependant, ces valeurs d'inductances sont suffisantes pour l'application, car la fréquence de découpage est de 2 MHz.

Enfin, la dernière mesure effectuée a été celle de la résistance d'isolation entre les enroulements. La résistance DC mesurée à l'ohmmètre varie de 150 Ω à 2800 Ω selon les échantillons fabriqués – cette dispersion ne se retrouvent pas

sur les valeurs d'inductances ni sur la valeur du rapport de transformation. Ces valeurs sont bien trop faibles et risquent de dégrader le fonctionnement de l'alimentation. Pour connaître la raison de ces faibles valeurs, nous avons eu recours à la tomographie. Cette technologie d'imagerie est utilisée en tant que contrôle non destructif et permet de visualiser l'intérieur des composants.

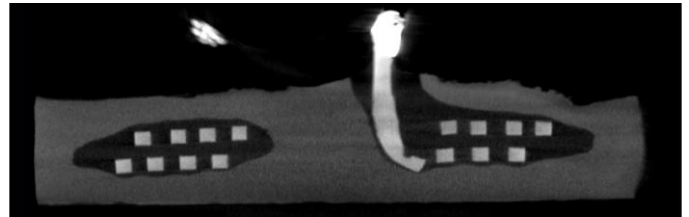


Figure 10 : Tomographie d'un coupleur.

Sur la tomographie, les matériaux apparaissent selon différents niveaux de gris. Il est possible de visualiser les spirales de cuivre, et on note qu'elles ne se sont pas déformées durant le frittage. On devine la présence du diélectrique entre les deux enroulements. Enfin, on remarque que la peinture céramique est bien restée tout autour des spirales. Cependant, l'épaisseur de la couche de peinture n'est pas homogène et semble trop fine par endroit, notamment au niveau de l'extrémité remontante de la spirale inférieure. Un courant électrique peut alors s'établir entre les deux enroulements, ce qui explique la faible résistance d'isolation. De plus, l'application de la peinture se faisant pour l'instant à la main, il est difficile d'obtenir une répartition identique d'un échantillon à l'autre, c'est pourquoi on observe une disparité dans les valeurs d'isolation.

Par ailleurs, la surface supérieure n'est pas plate. Cela provient de la poudre d'alumine, qui lors de l'application de la pression uniaxiale, vient chasser la poudre de ferrite. En conséquence, l'épaisseur du circuit magnétique n'est pas homogène, ce qui favorise la saturation magnétique du matériau par endroit, et conduit à une augmentation des pertes magnétiques. Il est donc nécessaire de fritter le composant par une autre stratégie.

2.2. La seconde fabrication des TICs

Pour cette seconde stratégie, nous avons commencé par augmenter l'épaisseur de la couche de peinture enrobant les spirales, afin de mieux isoler les enroulements du ferrite. De plus, nous avons placé deux rondelles en alumine, une au-dessus et une au-dessous du coupleur. Ces rondelles permettent d'obtenir une surface supérieure plate, et aussi de limiter le contact entre le moule en carbone et le ferrite lors du frittage – car le carbone est en partie responsable de la réduction du ferrite, donc de sa faible résistivité.



Figure 11 : Rondelles en alumine. Diamètre 20 mm.

Nous avons pris soin de percer la rondelle supérieure afin de laisser passer les contacts. Pour fabriquer les coupleurs, la procédure à suivre est proche de la précédente. Il faut commencer par placer la rondelle inférieure en alumine. Puis, il faut insérer 2 g de poudre, puis l'ensemble spirales-rondelle-peinture, puis à nouveau 2 g de poudre. Ensuite, il faut placer la

deuxième rondelle en alumine. Enfin, pour protéger les contacts, il faut les ensevelir avec de la poudre en alumine. Une coupe du moule rempli avant frittage est montrée sur la figure suivante.

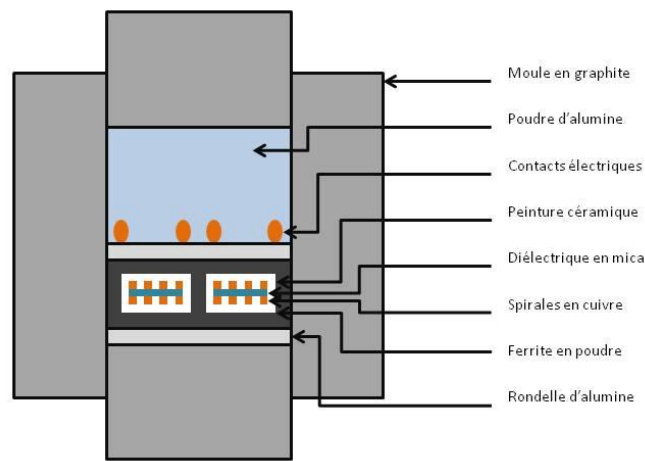


Figure 12 : Moule avant frittage.

Le frittage s'effectue également à 800 °C pendant 10 min sous une pression uniaxiale de 50 MPa. Durant le traitement thermique, la poudre en ferrite a cofritté avec les rondelles en alumine, et il n'est plus possible de les séparer. Cependant, afin de limiter l'encombrement du composant, il est possible par la suite de réduire le volume des rondelles par un simple polissage.



Figure 13 : Coupleur (TIC). Diamètre 20 mm.

Une série de quatre coupleurs a été fabriquée. Les mêmes mesures que précédemment sont effectuées, en commençant par le rapport de transformation, puis en relevant les inductances propre et mutuelle.

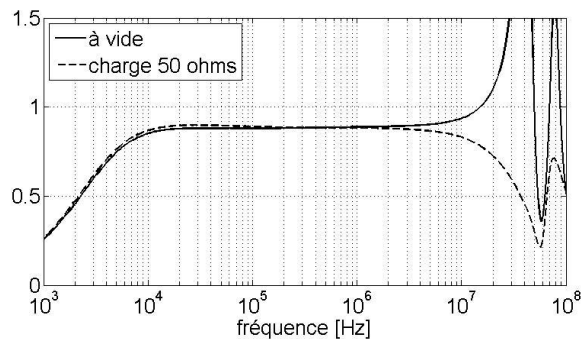


Figure 14 : Rapport de transformation.

La bande passante utile est toujours comprise entre 10 kHz et 10 MHz, et que le rapport des tensions est d'environ 0,9. A 2 MHz, ce rapport est respectivement de 0,891 et 0,879 pour le transformateur à vide et chargé. Sur la figure 15, les inductances propre et mutuelle sont tracées pour un des coupleurs.

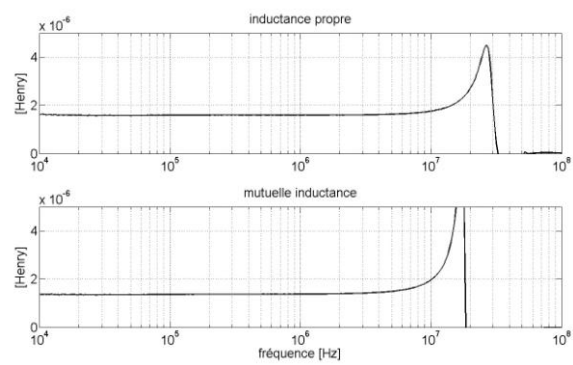


Figure 15 : Inductances propre et mutuelle.

Selon les échantillons, la mesure directe à l'ohmmètre indique que la résistance d'isolation DC varie entre 10,6 kΩ et 1,20 MΩ. Cette disparité s'explique en partie par la difficulté de peindre les enroulements de manière identique d'un coupleur à l'autre. Une fois encore, la tomodensitométrie permet un contrôle non destructif pour comprendre la disparité des résistances.

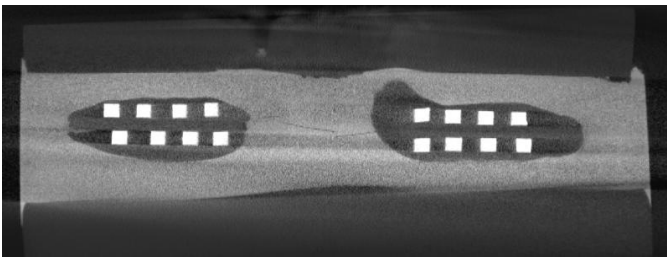


Figure 16 : Tomographie d'un coupleur.

Sur cette tomographie, et en comparaison avec la précédente, on observe que l'augmentation du volume de peinture se traduit bien par une augmentation de la distance entre le ferrite et le cuivre. On distingue aussi les deux rondelles en alumine de part et d'autres du composant. Cependant, comme le ferrite a cofritté avec les rondelles, des contraintes résiduelles apparaissent durant la descente en température. Cela provoque des fissures horizontales dans le matériau magnétique. Sur la figure 16, elles sont visibles sur la jambe centrale.

Ces fissures jouent le rôle d'entrefer, ce qui explique la diminution des inductances par rapport au coupleur précédent. Elles peuvent cependant aussi participer à une meilleure résistance d'isolation. Le tableau suivant indique les caractéristiques des quatre coupleurs de cette série et illustre la disparité des grandeurs électriques.

Tableau 1 : Caractéristiques des coupleurs.

Coupleur	Résistance d'isolation (kΩ)	Inductance propre à 2 MHz (μH)	Mutuelle inductance à 2 MHz (μH)
#1	31,8	1,60	1,39
#2	1200	1,37	1,21
#3	10,6	1,85	1,71
#4	138	1,64	1,48

En conséquence, nous avons décidé de conserver les coupleurs fabriqués avec les rondelles en alumine pour la réalisation de l'alimentation, car il est préférable d'avoir une bonne résistance d'isolation même si elle se fait au détriment des valeurs des inductances.

3. SIMULATION ELECTRIQUE

Les équations décrivant le fonctionnement de la structure VRM entrelacée couplée sont complexes, principalement à cause du couplage entre les branches issues des cellules de commutation. Nous avons donc eu recours à la simulation pour prédire le comportement des grandeurs physiques, notamment des courants dans chaque phase et la tension dans la charge.

Cette simulation a été réalisée sous Matlab Simulink et les résultats sont présentés sur la figure 17. La structure a été alimentée par une tension d'entrée V_{DC} de 24V, le rapport cyclique α est fixé à 0.5 et la fréquence de découpage est à 2 MHz. La résistance de charge R est de $2\ \Omega$ et le condensateur de sortie est de $1\ \mu F$.

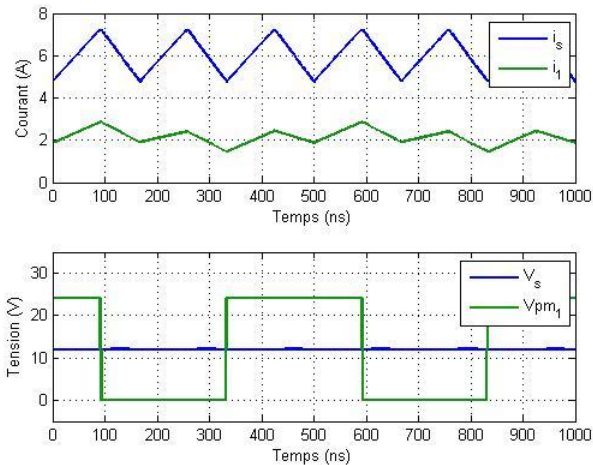


Figure 17 : Formes d'ondes simulées de la stucture.

On rappelle que la nomenclature des grandeurs électriques correspond à celle de la figure 1 : le courant dans un des TIC est i_l , le courant total en sortie des TICs est i_s , la tension de sortie d'une cellule de commutation est V_{pm1} , et la tension de sortie est V_s . Comme attendu, la fréquence apparente du courant de sortie est de 6 MHz (3×2 MHz). Toujours sur les simulations, on note que l'ondulation du courant est de 2,5 A, ce qui correspond à 42 % de la valeur moyenne du courant. Ceci est principalement lié aux faibles valeurs d'inductances des coupleurs.

4. REALISATION DE LA STRUCTURE

Afin de valider les résultats obtenus, nous avons mis en œuvre une structure VRM couplée à trois phases.

Les cellules de commutation sont réalisées à partir de composants GaN commercialisés par Texas Instruments (LMG5200). Il s'agit de composants 80 V, 10 A. La particularité de ce composant est que les drivers (de type bootstrap) sont directement intégrés dans le même boîtier facilitant ainsi la mise en œuvre. Une gestion des temps mort est cependant nécessaire. Une photo d'un bras est représentée sur la figure 18 sur laquelle on peut voir les composants GaN et leur driver intégré (LMG5200), le circuit de réglage des temps morts et le circuit de filtrage de l'alimentation du driver. Les condensateurs de découplage du bus DC sont des composants CMS montés en traversant afin de minimiser au maximum l'inductance de la maille de commutation.

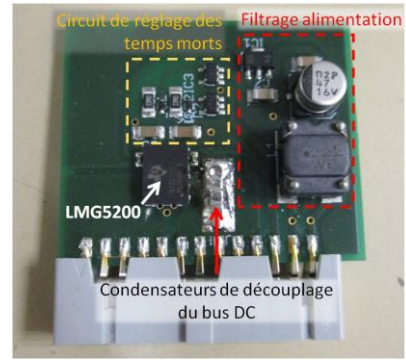


Figure 18 : Cellule de commutation avec driver.

Dans un premier temps, nous avons mesuré tensions et courants dans le but de les comparer avec la simulation dans les mêmes conditions ($V_{DC} = 24V$, $\alpha = 0,5$, $f_d = 2$ MHz). On précise qu'il est difficile d'accéder au plus près du potentiel de sortie de la cellule de commutation, et que la mesure est inévitablement dégradée par les inductances parasites liées au point d'insertion de la sonde.

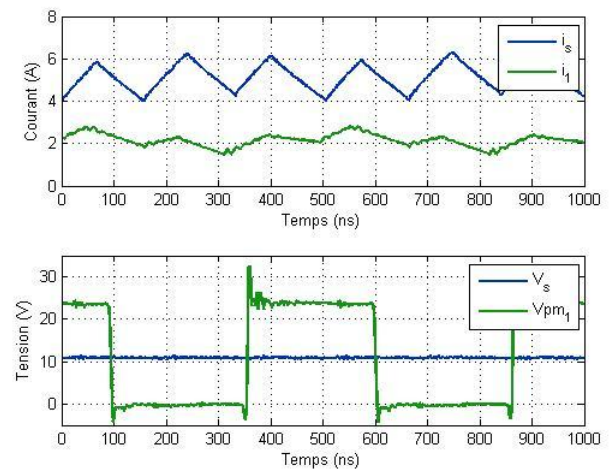


Figure 19 : Formes d'ondes mesurées de la structure.

En comparant les figures 17 et 19, nous observons une bonne concordance entre les simulations et les mesures. La tension de sortie et le courant moyen de sortie sont cependant plus faibles que prévus. En effet, la simulation étant idéalisée elle n'intègre pas les pertes dans les différents composants qui entraînent ces modifications sur le point de fonctionnement. On relève aussi les courants dans les trois bras.

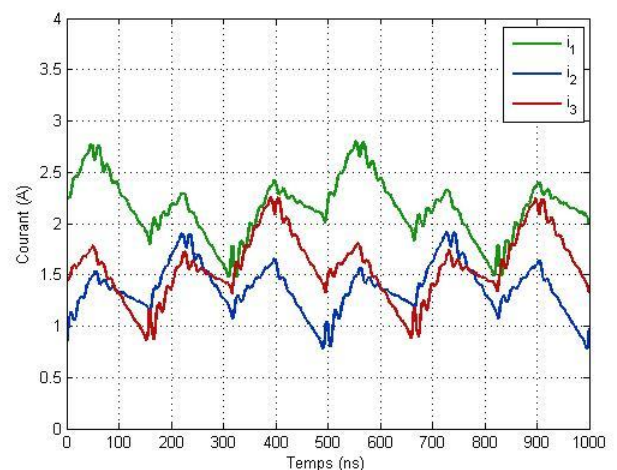


Figure 20 : Visualisation du déséquilibre dans les phases.

Sur la figure 20, il est nécessaire de noter que les courants sont quelque peu déséquilibrés car les TICs ne sont pas rigoureusement identiques du fait de la dispersion liée à la position des enroulements dans le composant et des fissures présentes dans le ferrite. L'équilibrage par régulation du rapport cyclique est rendue difficile dû aux hautes fréquences de découpage. On précise que les courants i_1 des figures 19 et 20 sont issus de la même mesure.

Par la suite, d'autres mesures ont été réalisées pour caractériser l'alimentation. Les courants et tensions d'entrée et de sortie ont été mesurés par des multimètres de marque Meteix. Notamment, des mesures du rendement total en fonction du rapport cyclique dans les cellules de commutation se trouvent sur la figure 21 pour des tensions d'entrées de 12 V et 24 V, et pour des fréquences de découpages de 1 et 2 MHz.

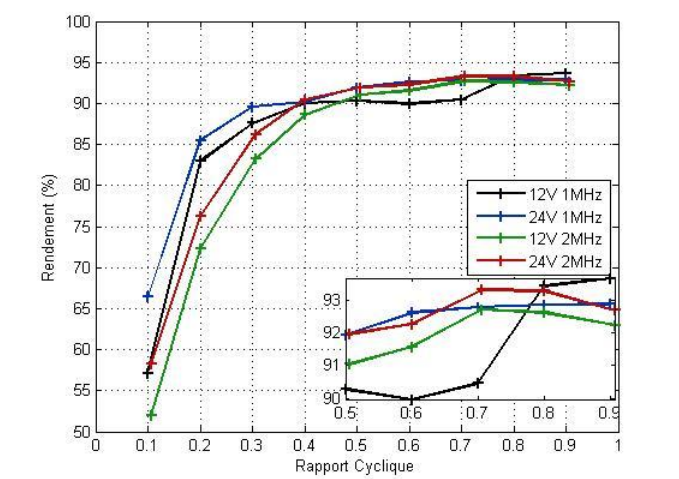


Figure 21 : Rendement de la structure - 1.

Le rendement atteint la valeur maximale de 93,7 % pour une tension de 12 V et une fréquence de découpage de 1 MHz.

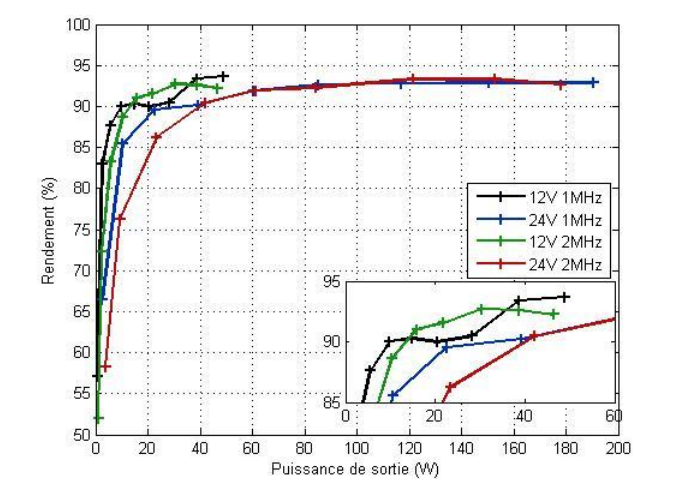


Figure 22 : Rendement de la structure - 2.

Pour les mesures effectuées, la puissance maximale en sortie du convertisseur est de 191 W, pour une tension de 20 V et un courant de 9,55 A.

Enfin, sur la figure 23, nous avons mesuré les pertes totales pour plusieurs fréquences pour un rapport cyclique fixé à 0,75. Cette mesure permet d'obtenir une première estimation des pertes statiques (pertes DC + pertes par conduction dans les transistors) en extrapolant linéairement les pertes jusqu'à une

fréquence nulle. Cette valeur est ici estimée à 2,33 W pour une puissance de sortie de 31 W.

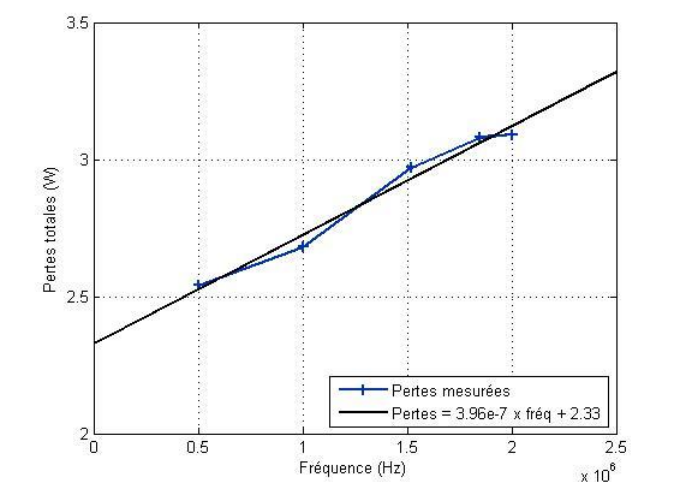


Figure 23 : Pertes en fonction de la fréquence.

Enfin, un dernier résultat mais qui est des plus importants, concerne la densité de puissance. Nous avons conservé la plus forte valeur de puissance de sortie mesurée qui est de 191 W, puis deux mesures de volumes sont réalisées. La première prend en compte l'encombrement total des composants, où on considère que chaque partie de l'alimentation est encapsulée dans un parallélépipède rectangle. Par exemple, pour les cartes contenant les cellules de commutation, l'encombrement correspond au produit de la largeur de la carte par la longueur de la carte par la hauteur du plus grand composant. Ceci a pour but de donner un ordre de grandeur pour une alimentation réelle. La deuxième mesure du volume se limite à la somme des volumes des composants (avec leur volume de PCB associé). Ceci a pour but de donner un ordre de grandeur d'une alimentation idéale, où chaque espace serait occupé.

Tableau 2 : Densités de puissance.

	Filtrage alimentation circuit de commande	Composants de puissance	Coupleurs magnétiques	Condensateurs de sortie	Densité de puissance (kW/litre)
Volume réel (cm ³)	2,6	4,5	4,8	0,7	15,2
Volume idéal (cm ³)	1,2	1,5	3	0,7	29,8

Il est à noter que ces densités de puissance peuvent être ici améliorées. En effet, les transistors GaN sont spécifiés pour 80 V 10 A, et nous nous sommes limités dans cette étude à une tension de 24 V et un courant maximal par cellule de 2,85 A. Il est donc envisageable d'augmenter ces grandeurs pour augmenter la densité de puissance.

5. CONCLUSION

Cet article présente la mise en œuvre d'un convertisseur DC-DC entrelacé couplé par TICs monolithiques. Les procédés de frittage des TICs ainsi que la mise en œuvre des composants GaN ont été montrés. Un prototype modulaire de VRM à trois cellules a permis de valider les aspects fonctionnels de la structure. Ces résultats sont très encourageant et nous permettent d'envisager une réalisation intégrée de l'ensemble du convertisseur soit en conservant des TICs soit en réalisant un coupleur monolithique multiphase qui devrait permettre de gagner d'avantage sur la densité de puissance.

6. REFERENCES

- [1] F. Forest *et al*, «Design and comparison of inductors and intercell transformers for filtering of PWM inverter output », IEEE Trans. Power Electronics 24 (3) 2009.
- [2] I. G. Park *et al*, «Modeling and analysis of multi-interphase transformers for connecting power converters in parallel», PESC'97 Record., 28th Annual IEEE, 2:1164–1170, 1997.
- [3] K. Zehani, « Etude du ferrite NiZnCu nanostructuré produit par SPS », manuscrit de thèse, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00840216> .
- [4] A. Mercier *et al*, « SPS co-sintered monolithic transformers for power electronic », IEEE Trans. Magn. 52, 2016.
- [5] R. Lebourgeois *et al*, « Influence of V2O5 on the magnetic properties of nickel-zinc-copper ferrites », J. Magn. Magn. Mater. 312, 2007.
- [6] K. Zehani *et al*, « Effect of temperature and time on properties of spark plasma sintering sintered NiCuZn: Co ferrite », J. Appl. Phys. 109, 2011.