



HAL
open science

Convertisseur multicellulaire "Tsooboost" non réversible à grand rapport d'élévation

François Forest, Jean-Jacques Huselstein, Thierry Martiré, Didier Flumian,
Thierry Meynard, Youcef Abdelli, Anne-Marie Lienhardt

► **To cite this version:**

François Forest, Jean-Jacques Huselstein, Thierry Martiré, Didier Flumian, Thierry Meynard, et al..
Convertisseur multicellulaire "Tsooboost" non réversible à grand rapport d'élévation. Symposium de
Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361707

HAL Id: hal-01361707

<https://hal.science/hal-01361707>

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 multicellulaire "Tsooboo" non réversible à grand rapport d'élévation

F. Forest*, J.-J. Huselstein*, T. Martiré*, D. Flumian**, T. Meynard**, Y. Abdelli*** et A.-M. Lienhardt***

* Institut d'Électronique et des Systèmes, UMR CNRS 5214, Montpellier

** Laboratoire Plasmas et Conversion d'Energie, UMR CNRS 5213, Toulouse

*** LIEBHERR Aerospace, 408 Avenue des Etats Unis Toulouse

RESUME – Le convertisseur présenté s'inscrit dans la logique de développement de l'avion plus électrique. Il a pour fonction de générer un bus 300V à partir du réseau de bord 28V. Le design des "systèmes avion" prévus pour une alimentation par ce réseau 28V est grandement facilité par cette élévation de tension intermédiaire. La puissance du convertisseur considéré est de 10kW, ce qui induit des courants très importants sur le côté "basse tension" et nécessite une architecture adaptée.

La solution proposée utilise une cellule de base "boost" dont on associe six exemplaires pour constituer une architecture multicellulaire dite "Tsooboo". Elle réduit significativement le surdimensionnement inhérent à la cellule boost classique. L'interconnexion des cellules est réalisée à l'aide d'un coupleur monolithique à six phases pour minimiser la "masse magnétique". L'article rappellera les propriétés de cette architecture, présentera son design puis les résultats obtenus.

Mots-clés— Avion plus électrique, Convertisseur "Tsooboo", convertisseur multicellulaire, coupleur magnétique.

1. INTRODUCTION

Le réseau de bord 28V présent dans la définition de nombreux aéronaves actuels ou futurs implique de mettre en place des fonctions de conversion à même d'opérer directement sous cette tension d'alimentation, ce qui est très contraignant en particulier pour les chaînes d'actionnement, ou d'introduire des étages intermédiaires élévateurs recréant un bus moyenne tension. Le convertisseur décrit dans cet article correspond à cette seconde option. Il doit alimenter, à partir du 28V, un onduleur 270V-10kW, qui pilote lui-même un moteur de compresseur. Les objectifs primordiaux de sa conception sont la minimisation de masse et la maximisation du rendement afin de limiter autant que possible son empreinte sur la chaîne de conversion complète. L'isolement galvanique n'est pas requis pour ce convertisseur dont la vocation est de permettre la validation du principe de cette chaîne : il constitue en fait une source d'essai préliminaire. L'étude ayant conduit à la réalisation du prototype qui sera décrit dans la suite s'est donc orientée sur le choix d'une structure de base très simple, à savoir une cellule boost. Les limitations intrinsèques de cette cellule à de tels rapports d'élévation (>10) ont été repoussées par l'emploi d'une architecture multicellulaire à coupleur magnétique. La présentation de cette architecture, du design et de la réalisation d'un prototype, enfin, des résultats expérimentaux obtenus constitue la trame de cet article.

2. ARCHITECTURE RETENUE

2.1. Principe de la structure Tsooboo

La classique cellule boost, si elle est très simple, est aussi connue pour ses médiocres performances à fort rapport d'élévation, du fait de la combinaison des contraintes électriques maximales d'entrée (courant) et de sortie (tension) sur les composants. Une première étape dans la définition du présent convertisseur a été de retenir une association de deux cellules boost, baptisé en interne "boost-miroir" ou "Tsooboo" [1][2], dans un agencement représenté Figure 1.

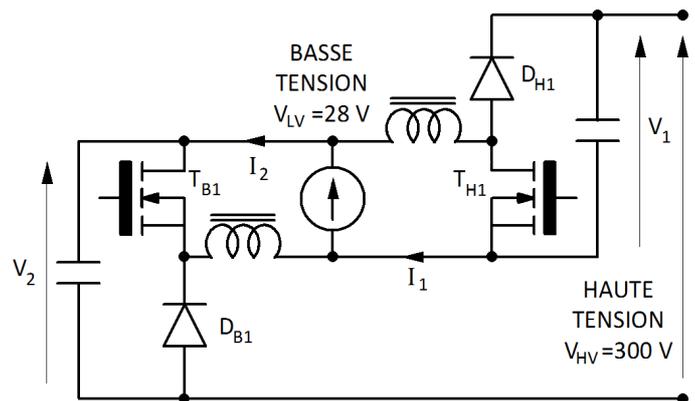


Figure 1 : Cellule boost miroir ou Tsooboo

Si l'on considère un rapport cyclique D commun aux deux cellules, les relations aux tensions moyennes sont :

$$V_1 = V_2 = \frac{V_{LV}}{1 - D} \quad (1)$$

Dont on déduit :

$$V_{HV} = V_1 + V_2 - V_{LV} = \frac{1 + D}{1 - D} V_{LV} \quad (2)$$

Les tensions vues par chaque cellule sont donc :

$$V_1 = V_2 = \frac{V_{HV}}{1 + D} \quad (3)$$

Les relations aux courants moyens sont :

$$I_{LV} = \frac{1+D}{1-D} I_{HV} \quad (4)$$

$$I_1 + I_2 = \frac{2}{1+D} I_{LV} \quad (5)$$

Si les courants sont équilibrés, on obtient :

$$I_1 = I_2 = \frac{I_{LV}}{1+D} \quad (6)$$

Pour des valeurs élevées de D , donc dans le cas de grands rapports d'élévation, la tension de sortie est sensiblement deux fois celle d'une cellule. Inversement la valeur du courant d'une cellule tend vers la moitié du courant total absorbé sur la source basse tension. Le principal avantage par rapport à la mise en série classique de deux cellules est la symétrie de l'association avec un fonctionnement qui s'apparente à une mise en série sur la haute tension et une mise en parallèle sur la basse tension.

2.2. Forme multicellulaire avec coupleur magnétique

Malgré les améliorations apportées par l'usage de la cellule précédente, des limitations demeurent, telle la contrainte en courant sur chaque cellule boost (environ 200A crête), qui imposerait une parallélisation massive de MOSFETs, ou encore la masse des inductances d'entrées. Une seconde évolution a donc consisté à introduire le principe maintenant très classique de "fragmentation" pour passer à une structure multicellulaire dont le schéma est donné Figure 2. Le nombre de cellules Tsoboost parallélisées est de trois, nombre retenu dans la phase de conception et qui correspond au meilleur compromis de performances entre semi-conducteurs et coupleur (cf paragraphe 3).

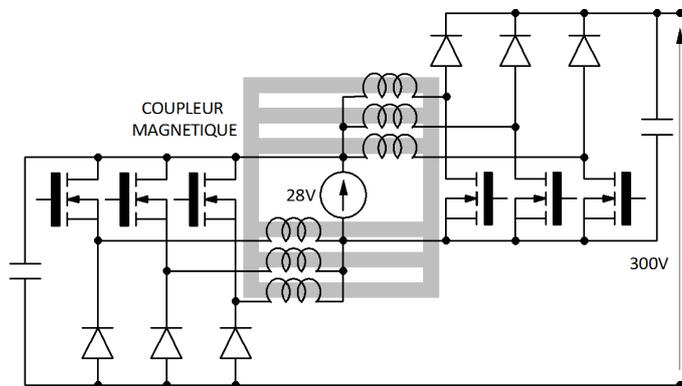


Figure 2 : Architecture Tsoboost multicellulaire

Pour fixer des ordres de grandeurs, à la puissance de 10kW sous 300V en sortie, les courants dans chaque cellule sont de l'ordre de 65A et les tensions V_1 et V_2 avoisinent 170V.

L'introduction d'un coupleur induit plusieurs avantages que nous allons préciser ci-après. Nous n'allons pas revenir ici dans le détail sur la comparaison coupleur-inductance. Nous rappellerons simplement les différences majeures qui sont à l'origine du gain de performances

2.2.1. gain de masse et de pertes

Le principe de fonctionnement des coupleurs magnétiques et l'optimisation de leurs modes d'alimentation ont été largement présentés dans [3][4]. Leur construction peut être basée sur l'emploi de transformateurs séparés, approche permettant d'utiliser des composants standards, ou sur l'usage d'un noyau magnétique unique spécialement réalisé pour l'application.

Dans ce deuxième cas, auquel correspond la présente réalisation, on obtient un gain substantiel en volume (absences des jambes de retour des transformateurs séparés, noyau type E, planar ou non). Il faut préciser que cette forme monolithique, bien adaptée ici, est difficilement utilisable pour des coupleurs isolés ou les courants harmoniques sont beaucoup plus importants dans les bobinages : la structure de ces derniers dans la forme monolithique induit d'importantes pertes Joule HF.

L'origine du gain de masse se trouve principalement dans la différence d'impact des composantes continues de courants sur le point de fonctionnement magnétique. La figure ci-dessous et les relations 7 à 12 permettent d'éclairer cet aspect essentiel.

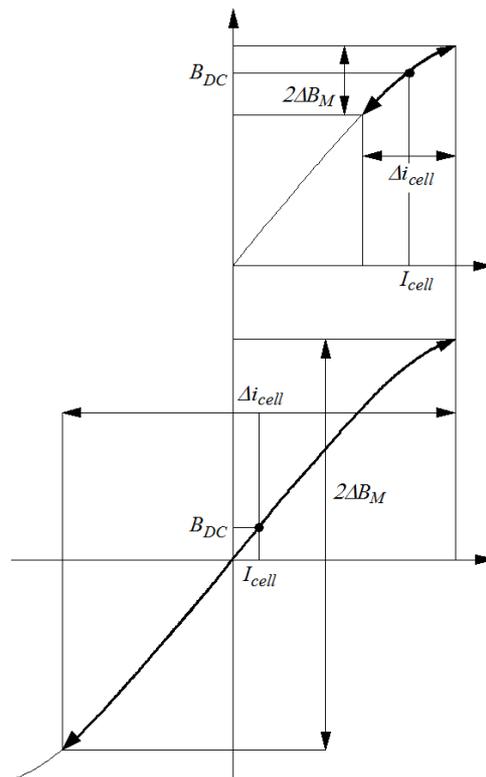


Figure 3 : Points de fonctionnement magnétiques

Dans le cas des inductances, il y a un lien direct entre l'induction créée dans le noyau magnétique et le courant circulant dans le bobinage. Les composantes continue et alternative de courant génèrent respectivement les composantes continue et alternative d'induction avec la même échelle relative (équations 8 et 9). A faible ondulation de courant, c'est principalement la composante continue qui fait la taille du noyau et les pertes fer sont faibles.

$$\Delta i_{cell} = \frac{V_{1,2}}{4 L F} \quad (7) \quad B_{DC} = \frac{L}{N A_c} I_{cell} \quad (8)$$

$$\Delta B_M = \frac{L}{2 N A_c} \Delta i_{cell} \quad (9)$$

avec :

- I_{cell} , courant moyen par cellule
- Δi_{cell} , ondulation de courant crête-à-crête par cellule
- k , nombre de cellules
- F , fréquence de découpage
- ΔB_M , ondulation crête de l'induction
- L , valeur de l'inductance d'une cellule
- A_c , section du noyau magnétique
- N , nombre de spires

Dans le cas des coupleurs, la composante continue de l'induction dépend également des composantes continues de courant dans les enroulements mais à travers les fuites entre phases. La composante alternative, quant à elle, est imposée par les tensions appliquées aux enroulements, comme dans un transformateur.

$$\Delta i_{cell} = \frac{V_{1,2}}{4 k^2 l_{fphase} F} \quad (10) \quad B_{DC} = \frac{l_{fphase}}{N A_c} I_{cell} \quad (11)$$

$$\Delta B_M = \frac{V_{1,2}}{8 N A_c F} = \frac{k^2 l_{fphase}}{2 N A_c} \Delta i_{cell} \quad (12)$$

avec, l_{fphase} , inductance de fuite par phase du coupleur

Si l'on raisonne à ondulation de courant donnée dans les cellules, le coupleur nécessite une inductance de fuite par phase k^2 fois plus faible que l'inductance classique et l'induction continue créée dans les branches du noyau est $k^2/2$ fois plus faible que la composante alternative ΔB_M . De fait, cette structure magnétique permet d'utiliser toute la dynamique du matériau magnétique (Figure 3) avec comme conséquence un réduction sensible de la section du noyau, donc de sa masse. La taille du bobinage est également réduite et globalement, tout ces éléments entraînent une diminution des pertes.

2.2.2. Réduction de l'ondulation de courant par cellule

Les contraintes de design évoquées précédemment conduisent classiquement à retenir des ondulations de courant élevées dans le cas des solutions à inductances. Les coupleurs laissent une plus grande liberté de manœuvre de ce point de vue. Pour donner une tendance qualitative, avec une réduction par k de l'inductance par phase ($l_{fphase} = L/k$) on obtient une réduction d'un facteur k aussi bien sur l'induction continue que sur l'ondulation de courant.

2.2.3. Performances dynamiques

Dans le comportement dynamique d'une structure boost, l'inductance équivalente vue par la source basse tension intervient évidemment directement. La réduire permet d'améliorer la "rapidité" intrinsèque de la structure lors de variations de consigne ou de charge. Dans le cas de convertisseurs multicellulaires, ces inductances équivalentes sont :

- L/k pour la solution à inductances
- l_{fphase}/k pour la solution à coupleur

Nous avons vu que la valeur de l_{fphase} pouvait être beaucoup plus faible que la valeur de L . De fait, l'inductance équivalente de la solution à coupleur sera donc également beaucoup plus faible que celle de son homologue.

3. DESIGN ET IMPLANTATION DES ÉTAGES DE PUISSANCE

3.1. Choix du nombre de cellules et des composants

Le choix du nombre de cellule est un exercice difficile, forcément empreint d'une part de subjectivité. En réalité, la marge de manœuvre est relativement limitée. La conception et la réalisation d'un tel convertisseur multicellulaires sont grandement facilitées par la symétrie associée à un nombre pair de cellules, option qui a donc été retenue. Pour vraiment bénéficier des avantages du coupleur, on estime qu'un nombre minimal de six cellules est nécessaire. Inversement, un nombre beaucoup plus élevé entraîne une augmentation considérable de la complexité sans induire véritablement de gain en performances.

Dans les faits, ce sont les configurations à 6 et 8 cellules qui sont les plus appropriées à cette gamme de puissance. Dans le cas présent, nous avons figé de façon relativement arbitraire la variable "fréquence de découpage", pour simplifier encore la démarche. La justification est la suivante : Les composants les mieux adaptés à la structure sont des MOSFETs silicium avec une tenue en tension dans la gamme standard 250V (pour une tension d'environ 170V appliquée sur les cellules). De par son fonctionnement, la cellule à fort rapport d'élévation induit de fortes pertes par commutation. Les fréquences de découpage doivent donc être relativement modestes si on veut limiter ces pertes à des valeurs "raisonnables". Le compromis retenu ici après quelques calculs préliminaire est de 25 kHz.

Ce périmètre étant fixé, une analyse plus approfondie a été menée pour réaliser le choix final du nombre de cellules. En termes de pertes, le convertisseur se résume finalement à l'association d'un coupleur avec du "silicium". Ce sont donc différentes variantes de ces deux parties qui ont été examinées.

En ce qui concerne la partie silicium, il a été décidé d'associer des composants discrets en boîtier "plastique" (type TO 247), ce qui donne une grande souplesse d'implantation. Les MOSFETs les plus performants de la gamme 250V dans ce packaging ont été retenus. En complément, une diode PIN ultra-rapide 300V a été sélectionnée pour compléter la cellule. Les différentes configurations analysées sont résumées dans le Tableau 1. Si le convertisseur finalement réalisé est non-réversible, des cellules réversibles ont néanmoins été considérées. Pour calculer les pertes dans chaque cas un modèle de pertes par commutation des composants utilisés a été exploité. Il est déduit de mesures réalisées sur un banc dédié à cet usage. On constate rapidement que les cellules réversibles sont peu performantes du fait de la mise en œuvre des diodes intrinsèques dont les caractéristiques sont très médiocres dans cette gamme de tension. Pour obtenir des performances acceptables, il faut associer au moins 24 composants et sur cette base, la meilleure option nécessite 3 cellules constituées chacune de 3 MOSFETs en parallèle et d'une diode.

Pour compléter ce premier pan de l'analyse, plusieurs "design" de coupleurs ont été réalisés. Ils utilisent un outil de conception développé pour cette usage [7] et incluant une procédure d'optimisation basée essentiellement sur des modèles analytique dont les résultats sont vérifiés par une simulation EF. La Figure 4 montre l'interface de cet outil avec les résultats d'un coupleur à six cellules optimisé pour cette application. Les principales caractéristiques ce composant sont les suivantes :

- Noyau ferrite, bobinages en aluminium
- Poids, 1300 g
- Pertes, environ 65 W
- Ondulations de courant maximales à kF (150 kHz), 5A
- Élévation de température, 50°C

Les autres "design" réalisés sur des variantes à 6 et 8 cellules ont donné des résultats très similaires en termes de performances. De fait, le passage à huit phases n'apporte pas d'amélioration significative.

Cette dernière observation, mise en perspective des résultats obtenus sur la partie "semi-conducteurs", a confirmé la configuration à 6 cellules comme le meilleur compromis dans le périmètre imposé initialement.

	Ncell	NSC_HS	NSC_LS	NSC_T	Icell	Rdson @ 150°C	Pcond_HS	Pcond_LS	Psw_on	Psw_off	Pertes totales	Rendement "silicium"
MOS + MOS	4	1	1	16	48.8 A	0.048	19.5 W	94.8 W	30.8 W	1.8 W	1176 W	89.5%
MOS + DIODE	4	1	1	16	48.8 A	0.048	8.1 W	94.8 W	21.0 W	1.8 W	1006 W	90.9%
MOS + MOS	4	1	2	24	48.8 A	0.048	19.5 W	47.4 W	30.8 W	1.8 W	796 W	92.6%
MOS + DIODE	4	1	2	24	48.8 A	0.048	8.1 W	47.4 W	21.0 W	1.8 W	626 W	94.1%
MOS + MOS	3	1	3	24	65.1 A	0.048	34.7 W	56.2 W	40.7 W	2.6 W	805 W	92.6%
MOS + DIODE	3	1	3	24	65.1 A	0.048	11.3 W	56.2 W	30.0 W	2.6 W	600 W	94.3%

Ncell, Nombre de cellules – ,NSC_HS, nombre de composants "high-side" – NSC_LS, nombre de composants "low-side" NSC_T, Nombre total de composants – Icell, courant maximal par cellule à 28V-300V-10kW.

Tableau 1 : Analyse de différentes configurations d'association de composants

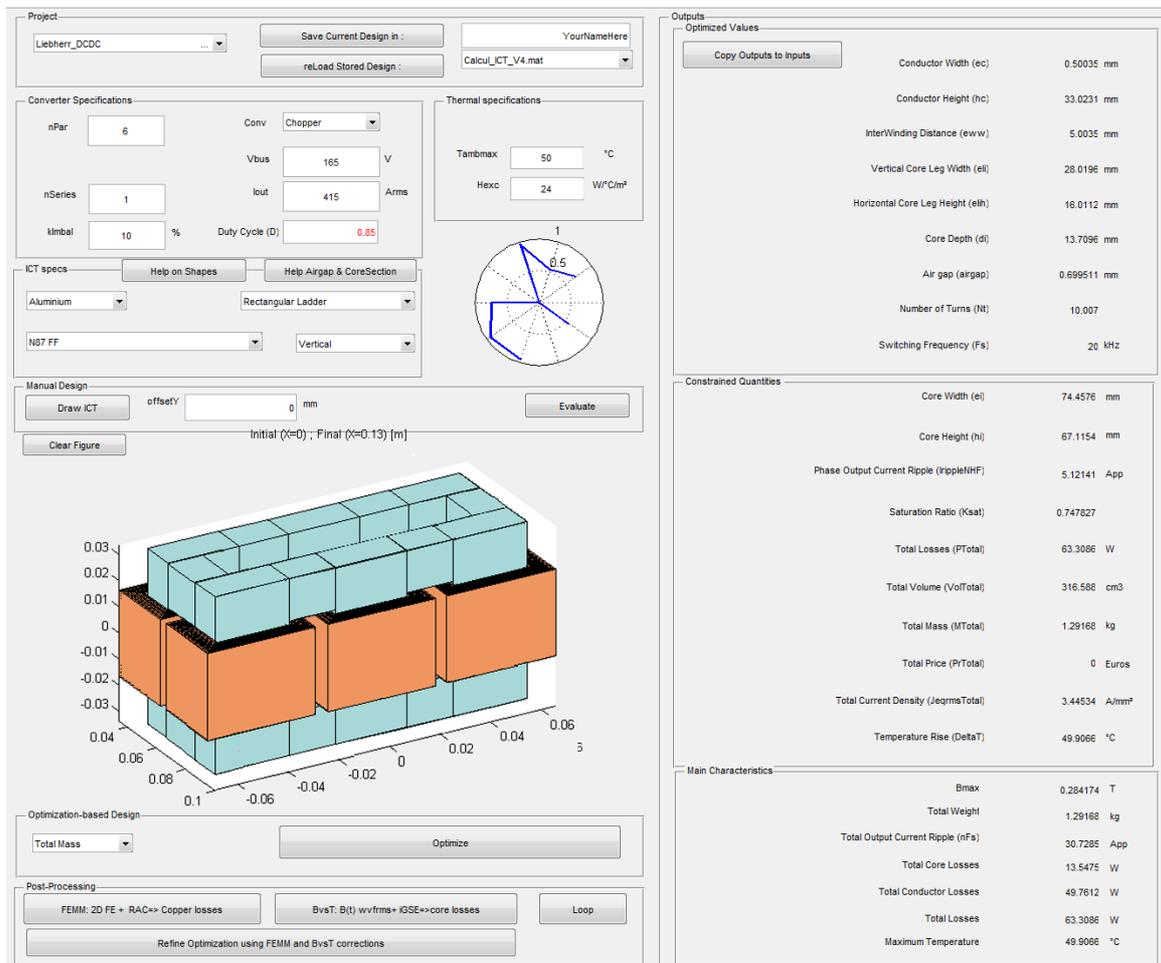


Figure 4 : Feuille de résultat correspondant à la conception du coupleur par optimisation

3.2. Gestion thermique

La spécification du système imposait un refroidissement à air avec possibilité de ventilation. Un outil de calcul basé sur des méthodes largement décrites dans la littérature [5][6] a été utilisé. Il a permis d'optimiser un profilé relativement classique à ailettes planes mais exploitant les finesses maximales accessibles en fabrication à la demande (800µm). Le design a été effectué pour une cellule avec des pertes estimées à 100-120W par cellule (cf. partie précédente) et une élévation de température du radiateur d'environ 25°C. Ceci conduit à une température de jonction de l'ordre de 100°C pour une température ambiante de 50°C.

La forme du profilé obtenu est donnée Figure 5. Ses caractéristiques calculées sont les suivantes :

- Dimensions : 40 x 40 x 100mm
- Épaisseur semelle : 8mm
- Nombre d'ailettes : 17
- Épaisseur des ailettes : 800µm
- Espace inter-ailettes : 1.5mm
- Matériau : aluminium
- Masse : 233gr
- R_{TH} : 0.23°C/W pour une vitesse d'air de 8.5m/s

Ce profilé a été réalisé sur mesure puis testé en vrai grandeur. La résistance thermique finalement obtenue est de 0.21°C/W avec un flux de chaleur de 100W. Pour l'implantation du convertisseur complet (cf. partie suivante), il a finalement été décidé de réaliser un seul profilé pour deux cellules. Il correspond simplement à la superposition verticale de deux "motifs" identiques avec deux ventilateurs.

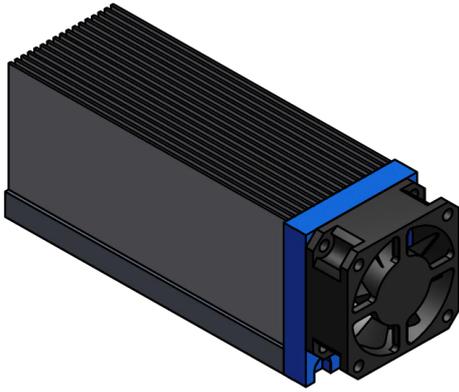


Figure 5 : Forme du profilé de refroidissement

3.3. Implantation de l'ensemble du convertisseur

Cette implantation est articulée autour des deux ensembles mécaniques principaux qui constituent les profilés d'une part et le coupleur d'autre part. Les zones de connexions à la source basse tension, qui portent les différents capteurs de courant et de tension, sont également des éléments critiques dont le design a été réalisé avec une attention particulière. Les différents constituants sont portés par une armature en résine chargée, réalisée par impression 3D.

La Figure 6 montre la disposition générale du convertisseur mise en place à partir d'un outil de CAO 3D. Cette implantation ne préfigure pas celle d'un véritable système embarqué sur avion, qui doit obéir à de nombreuses contraintes non-prises en compte ici, mais permettra d'intégrer ce prototype dans une chaîne complète de conversion de démonstration. Cette dernière sera bientôt mise en place pour valider le principe de l'association de différents étages.

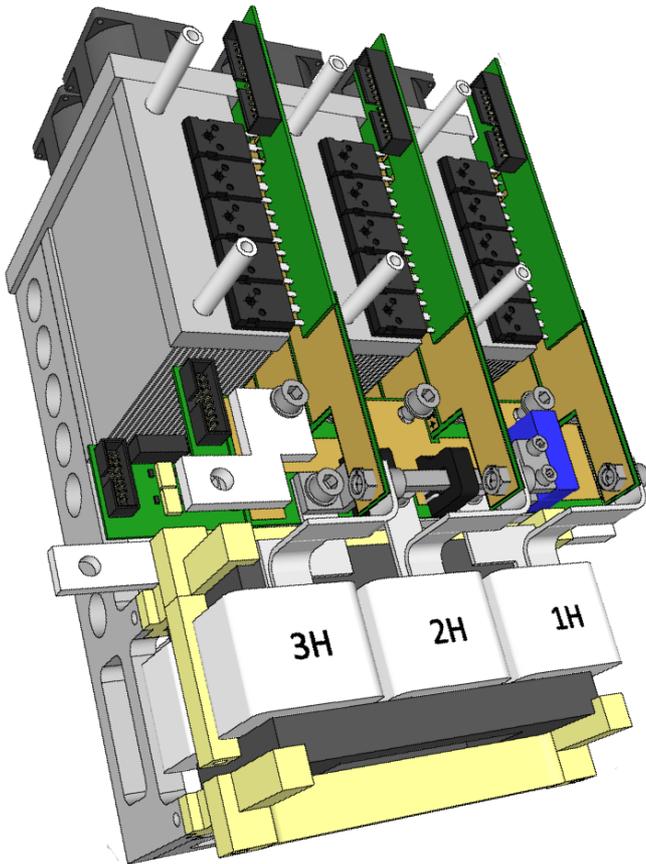


Figure 6 : CAO 3D du prototype

3.3.1. Cellules

Les cellules de commutation sont implantées par couple, conformément au schéma de la Figure 1. Les composants des deux cellules sont portés par un PCB de puissance (Cu 400µm) et montés sur un radiateur unique, comme décrit précédemment. Les ventilateurs associés sont placés sur le châssis qui supporte ces blocs "cellules". Le découplage est réalisé par l'association de condensateurs céramiques de petit format, ce qui a un double intérêt : Ce sont des composants tout à fait standards et ils offrent une grande souplesse d'implantation, avec la possibilité de constituer des macro-condensateurs performants (ici 60µF, 70Aeff, côté HT).

Leur tenue en tension est de 250V sur le côté haute tension et de 50V sur le côté basse tension. La Figure 7 montre une vue des deux faces du bloc ainsi réalisés. Trois blocs identiques sont ensuite associés sur le support.

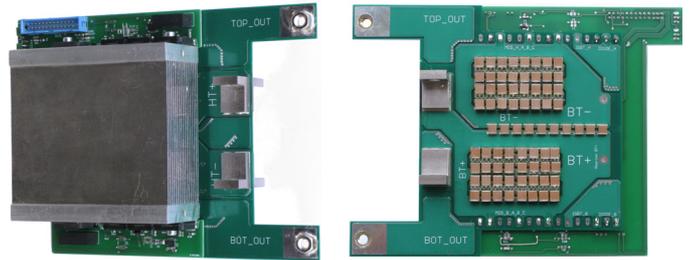


Figure 7 : Réalisation des cartes "cellule"

3.3.2. Coupleur

Le coupleur magnétique monolithique à six phases résulte de l'assemblage d'un circuit magnétique réalisé avec les moyens de la plate-forme 3DPHI et de bobines dont la construction a été sous-traitée, sur la base de carcasses réalisées en interne par impression 3D. Le circuit magnétique est obtenu par découpe puis collage de circuits standards en U et I. Il est constitué de deux parties, une culasse et un bloc principal portant les six colonnes. L'ensemble est maintenu grâce à un système de brides associé au support mécanique. La Figure 8 montre les différentes pièces constitutives.



Figure 8 : Réalisation du coupleur

3.3.3. Points de connexions "basse tension"

Ces points correspondent aux nœuds électriques présents sur les deux pôles de l'alimentation basse tension. Ces points concentrent la moitié du courant total "basse tension", soit près de 200A, intègrent les différents capteurs de courant d'un bloc, doivent permettre la connexion commune de trois phases du coupleur et supportent enfin les points d'accès de la basse tension et de la haute tension. Ils sont réalisés à partir de deux PCBs de puissance (Cu, 400µm), placé orthogonalement aux cartes "cellule". La photo de la Figure 9 montre la disposition finale d'une de ces deux cartes.

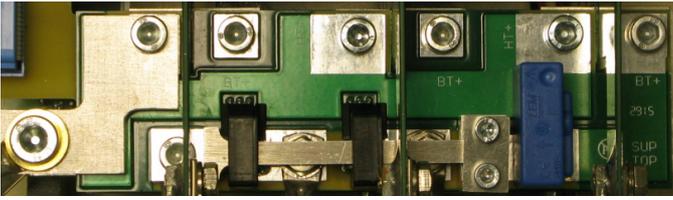


Figure 9 : Réalisation des points de connexion basse tension

4. COMMANDE ET RÉGULATIONS

Le cœur de la commande du convertisseur est une carte FPGA qui assure l'intégralité du pilotage, de la génération des MLI jusqu'aux boucles de régulation. Un ensemble de convertisseurs analogiques-numériques permet de digitaliser toutes les mesures permettant de mettre en œuvre ces régulations. L'échantillonnage des différentes grandeurs est effectué à kF , i.e. 150kHz.

Le contrôle des différents paramètres de fonctionnement est réalisé à travers une interface Labview qui dialogue avec la carte numérique par l'intermédiaire d'une interface USB/SPI. L'organisation de l'ensemble est illustrée par le synoptique de la Figure 10.

Sur cette même figure, un schéma du convertisseur fait apparaître les différents capteurs implantés :

- quatre capteurs de courant différentiels, deux sur chaque bloc, qui sont destinés à la régulation de l'équilibrage des courants des différentes cellules.
- Deux capteurs de courants absolus, un sur chaque voie, qui sont destinés à la régulation du courant d'entrée.
- Deux capteurs de tension, l'un donnant une image de la tension totale V_{HV} , l'autre indirectement l'image de la tension V_1 . Cette disposition, avec une référence commune, permet de simplifier l'électronique de ces capteurs de tension.

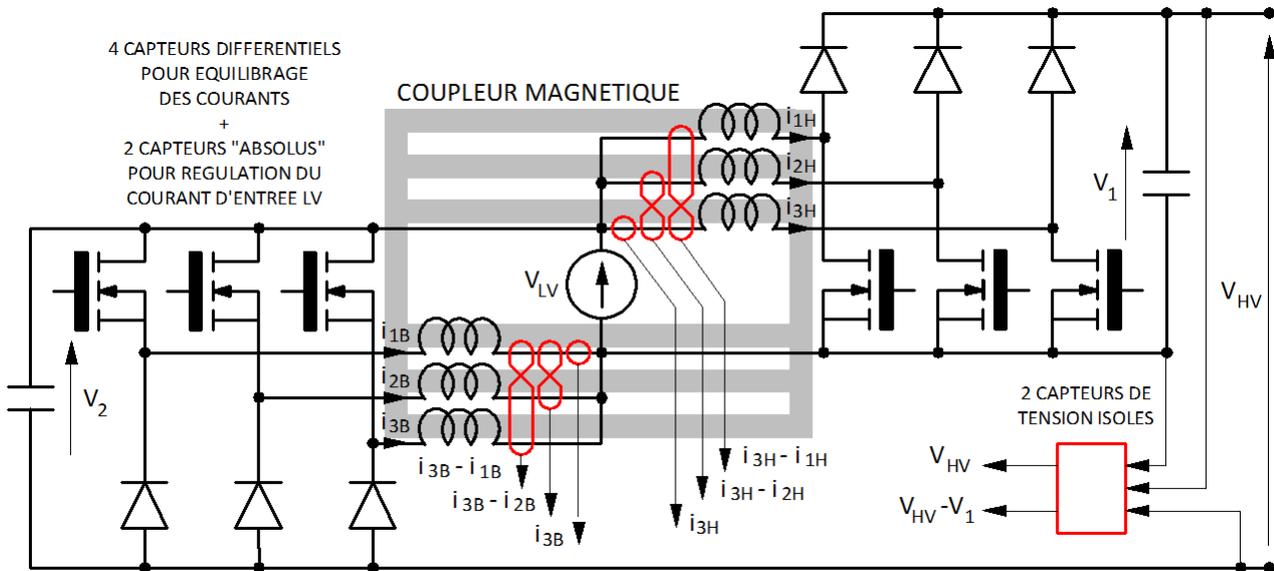
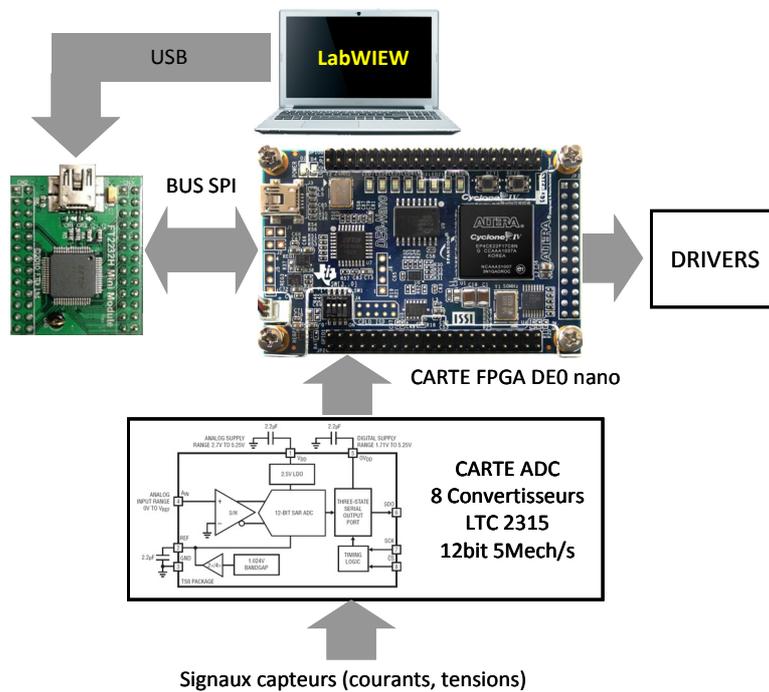


Figure 10 : Architecture de la commande et disposition des capteurs

Trois niveaux de régulations sont implantés et imbriqués, quatre boucles d'équilibrage des courants du coupleur, deux boucles de régulation des courants d'entrée de chaque bloc et une boucle de régulation de la tension de sortie (assurant également l'équilibrage des deux tensions flottantes). Toutes ces boucles sont munies de correcteurs PI, dont les paramètres sont ajustables via l'interface Labview.

5. RÉSULTATS EXPERIMENTAUX

Un prototype complet a été réalisé selon la projection précédente (Figure 11). Il est complètement autonome, l'énergie auxiliaire étant prélevée sur le 28V, avec une organisation des alimentations auxiliaires et une programmation permettant la mise sous tension directe.

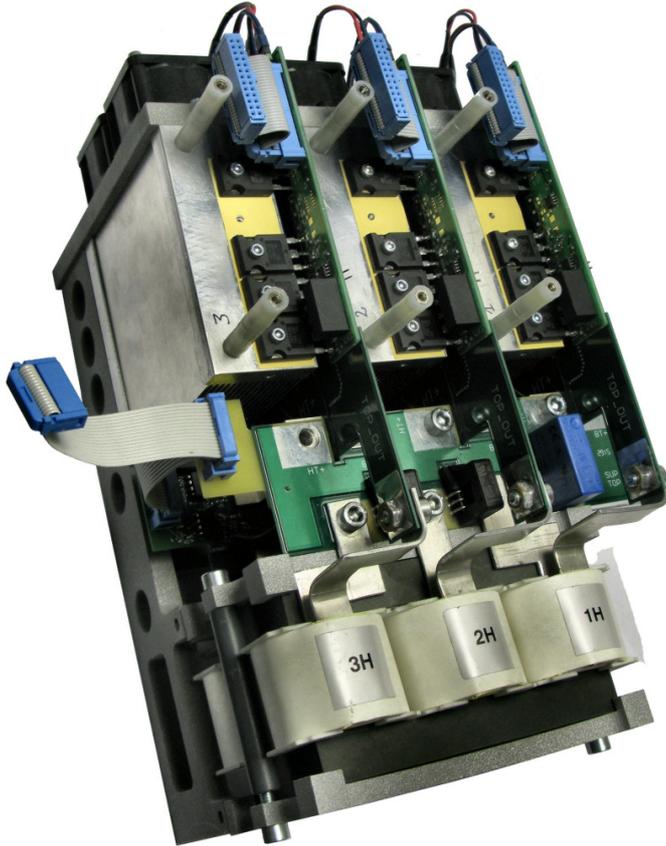


Figure 11 : Prototype réalisé

Testé pour l'instant sur charge résistive, il fournit 10kW sous 28V avec un rendement compris entre 94% et 95%. Les oscillogrammes de la Figure 12 montrent quelques aspects du fonctionnement électrique. Le premier contient la tension aux bornes d'une cellule et trois courants différentiels. On peut noter l'efficacité de l'équilibrage basé sur cette méthode différentielle qui conduit à une très grande précision. Le déséquilibre entre phase est inférieur à l'ampère pour le courant de cellule nominal (65A).

Le second oscillogramme fait toujours apparaître la tension d'une cellule comme référence et trois courants de phase. On reconnaît les formes caractéristiques obtenues dans des convertisseurs entrelacés utilisant des coupleurs, à savoir une composante à la fréquence de découpage F (inductance propre d'une colonne) et une composante à la fréquence kF induite par le couplage. On notera que la composante à F est ici majoritaire. Ceci résulte de l'introduction d'un entrefer dans le coupleur qui permet d'augmenter très sensiblement la robustesse de ce dernier aux déséquilibres de courant, en particulier en régime transitoire.

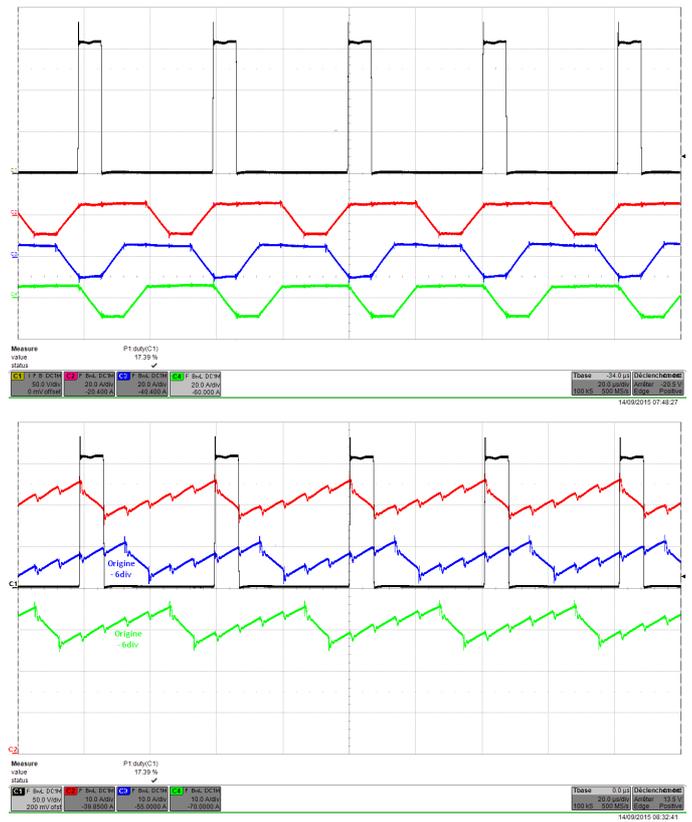


Figure 12 : Relevés expérimentaux

6. CONCLUSION

Cet article présente un exemple de transfert avancé de la technologie multi parallèle à coupleur magnétique, développée au sein des laboratoires et dont l'intérêt a été clairement démontré dans des applications très diverses, de quelques 100W jusqu'à près de 200kW. Ce dispositif original se situe au milieu de cette gamme. Son potentiel d'évolution est encore important et diverses solutions sont envisageables pour diminuer sa masse et accroître sensiblement son rendement.

7. REFERENCES

- [1] Dang Bang Viet, Y. Lembeye, J.-P. Ferrieux, J. Barbaroux, Y. Avenas, "New High Power - High Ratio Non Isolated DC-DC Boost Converter For Fuel Cell Applications" Power Electronics Specialists Conference, PESC'06, 7p, 2006.
- [2] N. Videau, "Convertisseurs continu-continu non isolés à haut rapport de conversion pour Piles à Combustible et Electrolyseurs - Apport des composants GaN", Thèse de l'INP Toulouse, 2014.
- [3] F. Forest, T. Meynard, E. Labouré, V. Costan, A. Cunière, T. Martiré, Optimization of the Supply Voltage System in Interleaved Converters Using Intercell Transformers, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, N° 3, pp. 934-942, May 2007.
- [4] E. Labouré, A. Cunière, T. Meynard, F. Forest, E. Sarraute : A Theoretical Approach to InterCell Transformers, Application to Interleaved Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, N°1, pp. 464-474, janvier 2008.
- [5] Culham, J.R., and Muzychka, Y.S. "Optimization of Plate Fin Heat Sinks Using Entropy Generation Minimization," IEEE Trans. Components and Packaging Technologies, Vol. 24, No. 2, pp. 159-165, 2001.
- [6] U. Drogenik, A. Stupar, J.W. Kolar, "Analysis of Theoretical Limits of Forced-Air Cooling Using Advanced Composite Materials with High Thermal Conductivities", IEEE Transactions On Components Packaging And Manufacturing Technology, Vol. 1 Issue: 4, pp. 528-535, 2011.
- [7] F. Forest, T. A. Meynard, J.-J. Huselstein, D. Flumian, C. Rizet, A. Lacarnoy, "Design and Characterization of an Eight-Phase-137-kW Intercell Transformer Dedicated to Multicell DC-DC Stages in a Modular UPS, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, N° 1. pp. 45-55, January 2014.