

Solutions d'isolation innovantes pour les busbars laminés grâce à l'utilisation de nouveaux procédés

Stéphane Duchesne, Ousama Rahmouni, Sonia Aït Amar, Jean François Wecxsteen

Univ. Artois, UR 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE), Béthune, F-62400, France.

Dept. of innovation Amphenol Auxel Gondrecourt, France

RESUME -Les busbars Laminés sont utilisés dans une large gamme d'applications, depuis, le câblage des convertisseurs de puissance jusqu'à l'interconnexion des puces au cœur des modules de puissance. Ce papier propose un ensemble de nouveaux procédés de fabrication permettant d'améliorer la classe thermique ou les performances diélectriques du busbar.

Mots-clés—*Classe thermique, Décharges Partielles, SADP, Polymérisation UV, Micro-pulvérisation, Fabrication additive.*

1. INTRODUCTION

Un busbar laminé est un composant électrique passif constitué de plusieurs couches de métal conducteur séparées par de minces matériaux diélectriques. Sa très faible inductance lui donne la possibilité de commuter des courants élevés en fréquence. Par rapport aux PCB (Printed Circuit Board) classiques, il est capable de commuter une puissance allant jusqu'à quelques MW. Les domaines d'application incluent les convertisseurs statiques pour les énergies renouvelables, le contrôle de la vitesse des moteurs, les systèmes automobiles, ferroviaires, aériens commerciaux, maritimes et militaires... [1-2]

Les films minces thermocollés (PET, PEN, ...) sont largement utilisés pour les busbars dédiés aux applications de haute puissance et de haute tension en particulier. Il offre des caractéristiques intéressantes en termes de résistance à la température (jusqu'à 125°C), de commutation de courant à haute fréquence et de tension de fonctionnement (jusqu'à 6 kV). Cependant, les busbars à base de film thermocollé sont coûteux en termes d'investissement en équipement (presse chauffante), limités aux petites et moyennes séries et ont un rendement énergétique désastreux (seulement 1% de l'énergie dépensée est réellement utilisée pour l'assemblage par thermocollage) De plus, les Systèmes d'isolation Électriques (SIE) doivent faire face à de sérieux défis tels que :

- une fréquence de commutation plus élevée due à l'apparition des composants à grand-gaps de (de qq 10 kHz à qq 100 kHz) ;
- des températures de fonctionnement plus élevées (300°C) ;
- une tension de travail plus élevée qui durcit les contraintes sur les couches isolantes, notamment en termes de Décharges Partielles (DP) [3-4] ;
- une augmentation de la durée de vie des composants (30 ans) ;
- des contraintes accrues en termes de compacité et de poids.

Le travail présenté ici propose une solution à base de vernis polymères isolants adaptée aux busbars laminés offrant, grâce au processus de dépôt sur le conducteur, une souplesse de fabrication permettant d'améliorer chacun des points cités précédemment.

De plus, la simplicité des étapes de fabrication permet d'envisager une industrialisation rapide du procédé sur des produits de petites ou moyennes séries

2. SOLUTION PROPOSEE

La solution proposée est dérivée du même type de vernis que ceux utilisés pour l'isolation des fils émaillés des machines électriques. Elle présente l'avantage d'être peu coûteuse et plus respectueuse de l'environnement que l'isolation à base de film. Cependant leur utilisation dans le cadre de conducteurs plans de grandes dimensions est délicate, car il est difficile de maîtriser la régularité des couches déposées, leur bonne polymérisation ainsi que la bonne couverture des zones singulières telles que les bords vifs. Les solutions classiques utilisées pour les fils sont rendues impossibles par la complexité des formes géométriques des conducteurs (pour l'extrusion ou le trempage), d'une part et d'autre part, par la nécessité d'avoir une couche d'isolation de grande épaisseur dans un contexte viable industriellement (émaillage en couches minces).

La solution proposée ici repose sur la mise en œuvre de la conjonction de plusieurs processus de fabrication inédits dans le contexte de ce type de busbar.

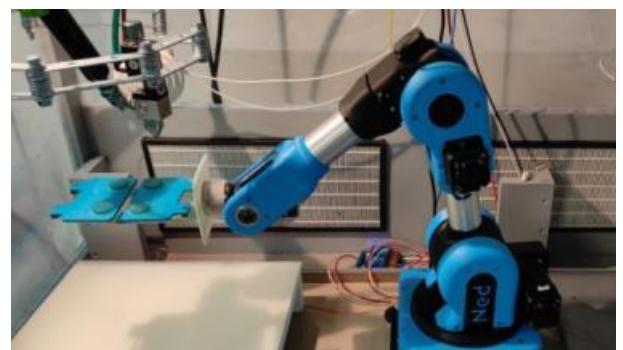


Fig. 1. Micro-pulvérisation.

2.1. La micro-pulvérisation

Ce procédé permet de déposer de manière très précise et homogène des couches de vernis sur le conducteur grâce à l'action conjuguée d'un bras robotisé et d'une buse de pulvérisation, tous deux asservis en position et en pression

(Fig. 1). L'épaisseur déposée ainsi que la zone visée peuvent être ajustée de manière fine dans une large gamme de valeurs (depuis qq μm jusque plusieurs dizaines de μm). Par ailleurs, cette solution permet également de mieux couvrir les bords du conducteur et de garantir une isolation de bonne qualité, même sur les arêtes vives.

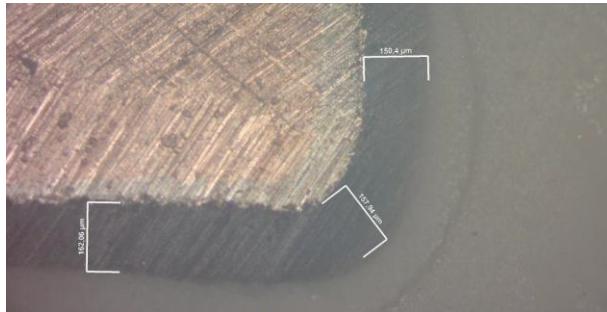


Fig. 2. Régularité des couches déposées, même sur les arêtes vives.

2.2. Polymérisation par UV (Fig. 2)

L'utilisation de principe de polymérisation par UV (rayonnement UltraViolet) permet de réduire drastiquement la consommation énergétique de la phase de polymérisation des produits isolants. En effet, on peut se passer de four, dont le rendement est très faible, et concentrer l'énergie lumineuse dans des zones très précises.

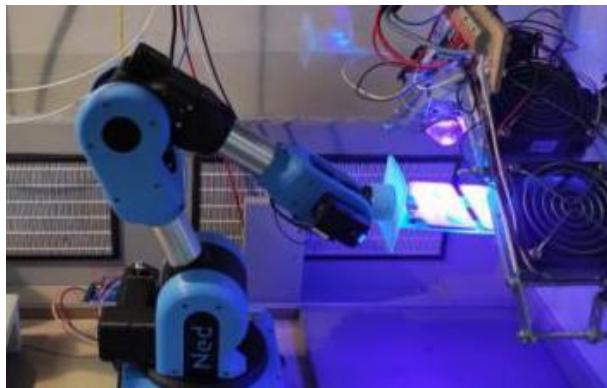


Fig. 3. Polymérisation par UV

Ce procédé permet également d'utiliser des résines polymères non-solvantées réduisant l'empreinte écologique de la méthode développée. La contrepartie, est que les résines de ce type possèdent généralement des classes de températures faibles ($< 180^\circ\text{C}$) et qu'elles doivent être enrichies de charges micro ou nanométriques [5].

La souplesse de ces deux procédés permet l'utilisation d'un large de panel de produits chargés, ce qui permet d'envisager, à terme, un grand nombre d'applications spécifiques telles que l'amélioration des transferts thermiques, de la tension d'apparition des DP ou de la résistance aux décharges partielles.

2.3. Fabrication additive

La phase de micro-pulvérisation peut également être remplacé par une phase de fabrication additive utilisant la technologie SLA-LCD. Le même type de résine (chargées ou non) est polymérisée par UV en couche fine. Ce procédé permet de travailler sur des conducteurs plans, dont l'enduction des bords reste difficile par la technique du micro-pulvérisation, tels que les éléments utilisés dans les transformateurs planars (Fig.4).

Cela permet d'obtenir une encapsulation complète du conducteur qui garantit le meilleur compromis entre la compacité, distance de creepage et tension d'apparition des DP.

3. RESULTATS

3.1. Formulation des vernis

La formulation définitive du mélange appliquée est le résultat d'un grand nombre d'essais sur lesquels différents tests et observations ont été réalisés. La base choisie est un vernis acrylique couplé avec du THEIC afin d'améliorer les caractéristiques thermiques. Les tests sur la formulation visaient à obtenir le meilleur compromis entre les performances finales du produits (mécaniques, thermiques et diélectriques), la facilité de production et enfin maintenir le coût dans une fourchette raisonnable. Pour cela plusieurs problèmes ont dû être abordés :

- les problèmes d'applications ;
- les problèmes de polymérisation ;
- les problèmes de tenue thermique ;
- les problèmes de tenue diélectrique.

3.1.1. Problèmes d'application et de polymérisation

Le premier problème est d'obtenir la bonne viscosité pour les opérations de micro-pulvérisation. Pour cela, nous avons choisi d'ajouter un diluant IBOA (Isobornyl Acrylate) particulièrement adapté aux vernis d'isolation. Ceci permet de réduire et de stabiliser la viscosité du vernis de base tout en permettant d'améliorer la flexibilité et la plasticité du résultat final. A la différence d'un solvant, le diluant va s'intégrer aux chaînes polymères créées durant les étapes de polymérisation et de réticulation, ce qui permet de l'utiliser de manière efficace pour améliorer les performances finales en y ajoutant d'autres produits préalablement, ce qui est très difficile dans le vernis de base. Cependant, ces diluants tendent à réduire la tenue thermique et à limiter la réaction des photo-initiateurs.

Les photo-initiateurs assurent que l'étape de polymérisation soit la plus efficace possible en jouant le rôle de catalyseur vis-à-vis des rayons UV. Un faible pourcentage d'oxyde de bisacylphosphine (BAPO) a donc été ajouté à la formulation. Ce dernier permet de centrer la fenêtre d'activation de la polymérisation dans une gamme de 365 à 395 nm, ce qui correspond à l'émission des diodes UV les plus courantes comme le montre la figure 5. Cependant l'ajout doit rester inférieur à 5 % pour éviter une réaction trop rapide à la lumière ambiante et pour permettre une dilution homogène dans le mélange final.

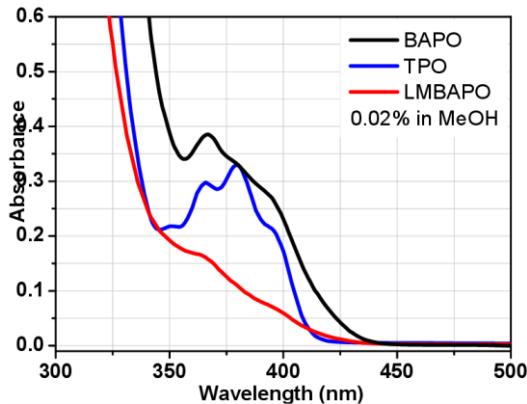


Fig. 4. Comparaison des fenêtres de réaction de différents photo-initiateurs.

Une autre problématique est de s'assurer de l'adhésion de la couche de vernis déposée sur la surface du cuivre, il est pour cela nécessaire d'utiliser un promoteur d'adhésion. Ce dernier est indispensable pour s'assurer de la cohésion du vernis sur le cuivre durant toutes les opérations mécaniques du processus de fabrication, puis pendant toute la vie du busbar ; il doit donc résister à de nombreux cycles thermiques (figure 6). Le choix s'est porté sur un promoteur inorganique, qui a donné de meilleurs résultats que d'autres promoteurs, notamment vis-à-vis de la tenue en température.



Fig. 5. Comparaison de la tenue thermique avec et sans promoteur d'adhésion.

L'action de ce promoteur d'adhérence est cependant fortement liée au dosage choisi. En excès, ce dernier risque de réduire les performances diélectriques et mécaniques. Les tests ont montré que quelques % permettaient d'obtenir le meilleur compromis (figure 7).

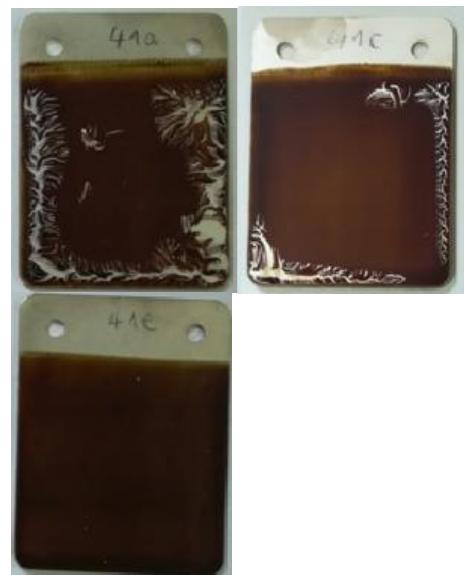


Fig. 6. Comparaison de la tenue thermique avec différents pourcentages de promoteur d'adhésion (0,5,1 et 2 %) – Vieillissement à 200°C / 8h.

Il faut enfin contrôler la thixotropie du produit, notamment afin de garantir la bonne couverture des bords de la plaque de cuivre. Pour cela, on ajoute un agent thixotrope qui va permettre de contrôler la viscosité statique du mélange et prévenir le phénomène de reflux du vernis liquide depuis les arêtes vives de la plaque de cuivre. On peut contrôler ceci à l'aide de 2 paramètres :

- Le taux d'agent thixotrope ajouté dans le mélange
- L'épaisseur unitaire des couches de vernis déposées

La figure 8 présente l'évolution de la couverture du bord pour différentes configurations et taux de d'agent thixotrope. La surépaisseur est calculée vis-à-vis de l'épaisseur dans la partie plane. Une valeur négative indique un manque de vernis une valeur positive un excès de celui-ci.

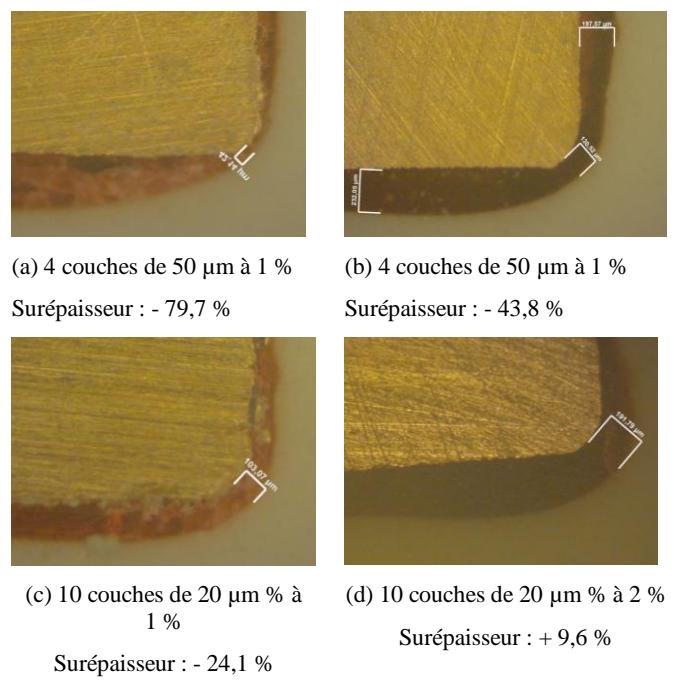


Fig. 7. Comparaison de la tenue thermique avec différents pourcentages de promoteur d'adhésion (0,5,1 et 2 %) – Vieillissement à 200°C / 8h.

On constate que les configurations utilisant des couches plus fines, mais en plus grand nombre permettent d'obtenir une meilleure homogénéité du recouvrement des arêtes. On peut aussi remarquer qu'avec un fort taux d'agent thixotrope il peut y avoir un excès de matière au niveau des bords. Il faut donc adapter le taux d'agent thixotrope au cas d'application, au nombre et à l'épaisseur des couches à déposer sur le cuivre. Dans le cas général, ce taux n'excède que rarement les quelques % car le choix de couches fines est préférable pour des questions de tenues diélectriques également comme nous le verrons un peu plus loin.

La formulation est également enrichie d'un colorant permettant une identification visuelle de la couche isolante, même lorsqu'elle est en couche très fine. Les pigments bleus ont été privilégiés pour leur capacité à mieux supporter les UV et à moins perturber l'activation de la réaction de polymérisation.

Une fois le vernis déposé, une opération de recuit est appliquée afin de finaliser les étapes de réticulation de l'ensemble. Ce procédé est réalisé à une température relativement basse ($\approx 130 / 140^\circ\text{C}$) afin de limiter la perte de masse globale.

3.1.2. Formulation finale

La formulation finale est proposée au tableau 1. On y retrouve les 6 éléments détaillés précédemment ainsi que leur taux d'implication dans le vernis.

Tab. 1. Formulation du vernis

Composant	Taux
Vernis Acrylique	> 40 % & < 50 %
Diluant	> 40 % & < 50 %
Photo-initiateur	< 4 %
Promoteur d'adhésion	< 3 %
Agent thixotrope	< 5 %
Colorant	< 1 %

3.2. Essais thermiques

Les essais thermiques ont été menés en parallèle des différentes opérations de formulation car certains résultats ont parfois nécessité des ajustements de l'implication de certains composants, voir dans certains cas à la substitution d'un composant par un autre possédant la même fonctionnalité.

C'est le cas du promoteur d'adhésion qui a dû être choisi soigneusement car son efficacité se dégradait rapidement avec la température. Le premier produit testé conduisait même à des résultats meilleurs sans promoteur d'adhésion (Figure 9).



Fig. 8. Vieillissement 2h à 200°C avec promoteur d'adhésion A (gauche) et sans promoteur d'adhésion (droite)

Les essais finaux ont montré la bonne tenue mécanique globale du vernis sur des essais de vieillissement à température élevées sur plusieurs heures (Figure 10). Un test de coupe transversale (IS 2409) classe ces échantillons à 2 sur une échelle de 5, le plus petit chiffre correspondant au meilleur résultat (Les échantillons non vieillis sont classés 0).



Fig. 9. Vieillissement à 200°C de la formulation finale sur une couche de 150 μm à 8, 16 et 24 h.

3.3. Essais diélectriques

Une série d'essais diélectriques ont également été menés pour différents cas de déport de vernis en faisant varier l'épaisseur totale et le nombre de couche mais aussi certains paramètres de la formulation. La figure 12 résume les résultats obtenus sur la formulation finale pour une rupture de surface ou une rupture sur les bords (Figure 11).

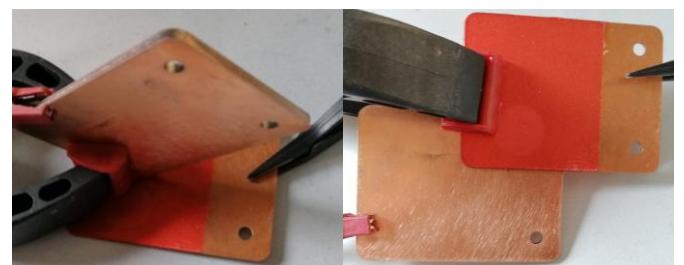


Fig. 10. Tests de rupture diélectrique : en surface (gauche), sur les bords (droite)

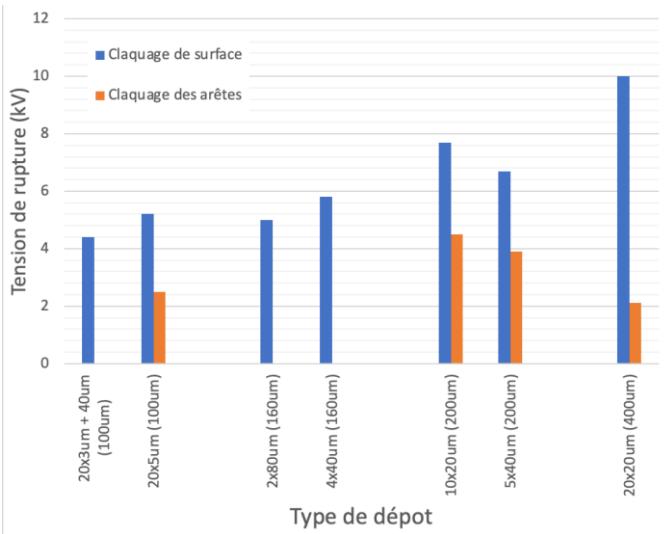


Fig. 11. Evolution de la tension de rupture pour différents type de dépôt de vernis

Les résultats montrent clairement que les configurations composées des couches les plus fines permettent d'obtenir les meilleures tensions de claquage. Parallèlement, on peut constater que les résultats obtenus sont les faibles aux niveaux des arêtes à cause du phénomène de renforcement du champ. Cependant les niveaux de tension de rupture obtenus sont corrects pour ce type d'application. Ces observations sont cohérentes avec celles observées sur d'autres matériaux et dans des conditions comparables [6]

On peut également noter que certains tests voient l'apparition d'un courant de cheminement (Figure 13) qui se développe bien avant la rupture de l'isolant. Ces phénomènes sont principalement dus à l'état de la surface de la couche isolante qui reste difficile à contrôler à ce stade de l'étude.

3.4. Décharges partielles

Une simulation électrostatique des conditions d'utilisation d'un busbar classique montre qu'il existe une concentration du champ électrique dans l'air sur les arêtes de ce dernier. Ce phénomène favorise l'apparition de décharge partielles et différentes stratégies [7] existent pour contrôler le phénomène (figure 14). La méthode de dépôt employée permet d'envisager l'ajout d'une couche additionnel (figure 15).



Fig. 12. Apparition de courant de cheminement.

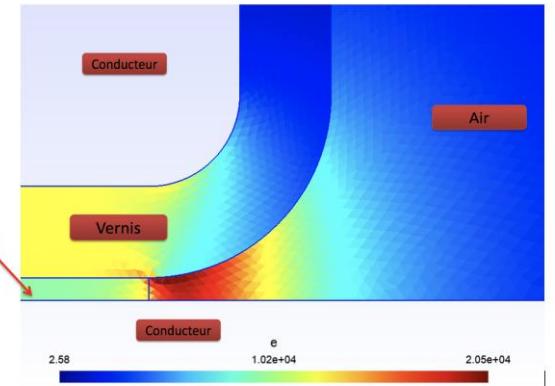


Fig. 13. Distribution du champ électrique dans un busbar usuel

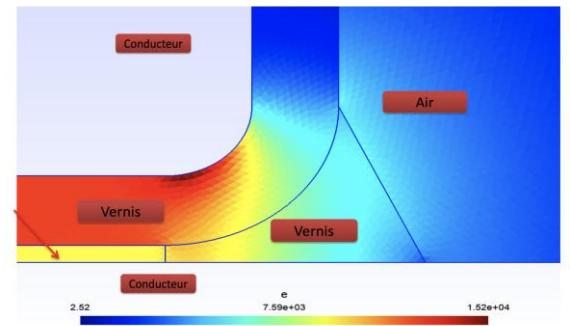


Fig. 14. Distribution du champ électrique dans un busbar modifié

La couche ajoutée possédant une permittivité équivalente à celle de la couche isolante permet de distribuer le champ de manière plus homogène tout en faisant diminuer son intensité maximale. La difficulté réside alors dans l'homogénéité de la couche isolante et dans l'absence de microbulles dans la zone critique (figure 16).

On constate que l'amélioration obtenue sur la tension d'apparition des décharges partielles est significative. Le dépôt du vernis en une série de couches fine permet de prévenir l'apparition de bulles comme c'est le cas pour un fil émaillé classique.

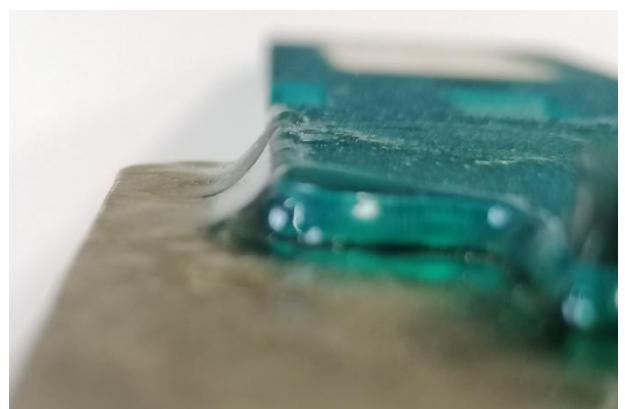


Fig. 15. Ajout d'une couche de vernis additionnelle au niveau des arêtes.

La Fig. 17 présente l'amélioration importante, à différentes températures, du SADP (Seuil d'Apparition des Décharges Partielles) obtenue grâce à la micro-pulvérisation d'une couche additionnelle de vernis dans les zones critiques du busbar.

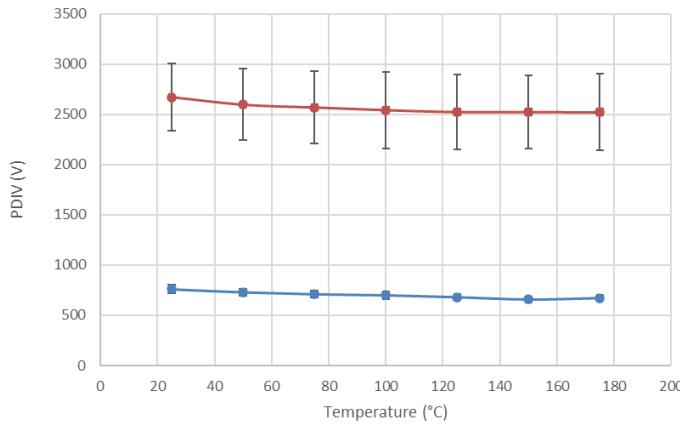


Fig. 16. Amélioration du SADP par dépôt de couche de vernis additionnelle dans les zones critique par micro-pulvérisation.

Ce procédé de fabrication permet également l'utilisation de vernis plus performants encore permettant d'améliorer la tenue en température, les performances diélectriques ou les caractéristiques thermiques. Pour cela on pense à l'emploi de charges dans le vernis. Des essais ont été menés avec une sélection de charges minérales. Les résultats n'ont pas été présentés dans cet article, mais offre une amélioration notable de la tenue en température du busbar.

Une seconde voie envisagée consiste à hybrider le vernis avec des produits de type sol-gel qui ont montré des résultats prometteurs sur les fils émaillés [8].

4. PERSPECTIVES PAR FABRICATION ADDITIVE

Le vernis proposé est parfaitement compatible avec une autre technique de dépôt qui est la fabrication additive par stéréolithographie LCD (SLD-LCD). Cette technique consiste à venir déposer par couche successive le vernis en plongeant un conducteur dans du vernis liquide et en polymérisant par UV la couche ainsi déposée.

Plusieurs avantages peuvent être envisagés avec la fabrication additive en utilisant la formulation de vernis développée :

- Une encapsulation complète du conducteur, y compris sur les arêtes ;
- une solution sans bulle puisque le conducteur est immergé dans un réservoir de vernis liquide pour un dépôt en couche mince (qq um) ;
- la forme géométrique du conducteur peut être complexe et même en 3D (paroi isolante supplémentaire, support mécanique,...)
- il n'y a pas d'outils nécessaires ;
- le coût est abordable ;
- la formulation du vernis et de ses additifs est parfaitement maîtrisée, ce qui permet de l'adapter, éventuellement aux performances recherchées.

Les principales contraintes techniques liées à l'utilisation de ce procédé sont :

- l'adaptation de la viscosité du vernis. Les vernis résistants aux hautes températures ont une chaîne moléculaire particulière qui se traduit par une viscosité élevée. Cela ne favorise pas la fabrication additive.
- Il faut, de plus, une puissance lumineuse suffisante pour réticuler le revêtement sur l'ensemble du conducteur en un seul passage, ainsi que la diffraction des rayons lumineux. Une épaisseur de conducteur de 0,5 à 1 mm est tout à fait confortable. Une épaisseur de 3 mm (cas plus classique) est possible mais plus délicate.

Les figures 17 et 18 montrent 2 exemples d'applications de la couche isolante par le procédé de fabrication additive. Ces prototypes sont en cours de caractérisation.

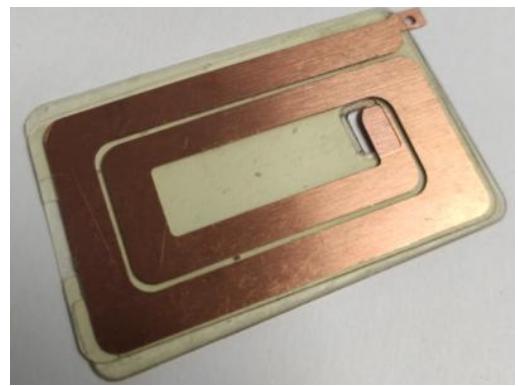


Fig. 17. Dépot d'isolant par fabrication additive.



Fig. 18. Dépot d'isolant par fabrication additive.

5. CONCLUSIONS

L'utilisation de procédés alternatifs dans le contexte des busbars laminés permet d'envisager des améliorations significatives de leurs performances. Le développement d'une formulation de vernis d'isolation adapté à ce nouveau procédé a permis d'agir de manière ciblée pour améliorer les performances thermiques et électrique d'un busbar. Ce procédé est utilisé pour la production de petites séries de pièces. Les travaux s'orientent à présent vers un procédé alternatif de dépôt par fabrication additive. Ce dernier est compatible avec les formulations mise au point et permet d'envisager un process plus rapide et des performances encore accrues.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la Convention de subvention n° 821065 de Clean Sky 2. <https://cordis.europa.eu/project/id/821065>

7. REFERENCES

- [1] Serhiy Bozhko, Christopher Ian Hill, Tao Yang, « More- Electric Aircraft: Systems and Modeling » Juin 2018 Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, pp.1-31
- [2] Y. Xuet al., “Medium-voltage SiC-based converter laminated bus insulation design and assessment”, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 7, no. 3, pp. 1715–1726, Sep. 2019.
- [3] M. Sellah, J. Wecxsteen, S. Ait-Amar, and D. Roger, “Partial dischargeinvestigations in laminated busbars,” inProc. IEEE 2nd Int. Conf. Dielectr.,Budapest, Hungary, Jul. 2018, pp. 1–4.
- [4] Xu, R. Burgos, and D. Boroyevich, “Insulation design and evaluation via partial discharge (PD) test for power electronics application,” inProc. IEEE Electr. Ship Technol. Symp., Arlington, VA, USA, Aug. 2017, pp.394–400.
- [5] Liang, Mu, and Khoi Loon Wong. "Electrical performance of epoxy resin filled with micro particles and nanoparticles." *Energy Procedia* 110 (2017): 162-167.
- [6] Min, D., Li, Y., Yan, C., Xie, D., Li, S., Wu, Q., & Xing, Z. (2018). Thickness-dependent DC electrical breakdown of polyimide modulated by charge transport and molecular displacement. *Polymers*, 10(9), 1012.
- [7] Hourdequin, H., Laudebat, L., Locatelli, M. L., Valdez-Nava, Z., & Bidan, P. (2019). Metallized ceramic substrate with mesa structure for voltage ramp-up of power modules. *The European Physical Journal Applied Physics*, 87(2), 20903.
- [8] Pereira dos Santos Lima, G., Ait-Amar, S., Velu, G., Frezel, P., Boudiba, A., Poelman, M., ... & Herze, P. Y. (2022). Performance Analysis Based on Thermal Aging Tests of Sol-Gel and Polymer Insulated Wires by Enameling and Extrusion Technology. *Energies*, 15(14), 5164.