

# Solutions d'isolation électrique pour les machines fonctionnant à Hautes Températures

Vasile MIHAILA<sup>1,2</sup>, Manh Quan NGUYEN<sup>3</sup>, Stéphane DUCHESNE<sup>1,2</sup>, Gabriel VELU<sup>1,2</sup>, Daniel ROGER<sup>1,2</sup>, David MALEC<sup>3</sup>, Jean Pascal CAMBRONNE<sup>3</sup>

1 UArtois, LSEE, F-62400 Béthune France

2 Univ. Lille Nord de France, F-59000Lille, France

3 Université Paul Sabatier, UPS, CNRS, Laboratoire Laplace, 31062 Toulouse, FRANCE

**RESUME** – Les nouvelles contraintes imposées par les applications mobiles des machines électriques, telles que l'automobile ou l'aéronautique, amène de nouvelles voies de recherche afin d'améliorer la masse volumique des actionneurs électriques. L'une d'elles est d'augmenter la température de fonctionnement en utilisant de nouveaux matériaux isolants plus à même de supporter cette nouvelle contrainte. Pour cela différentes technologies peuvent être envisagées en lieu et place des polymères organiques employés habituellement. L'originalité de cette étude repose sur une campagne de test de solutions actuellement très matures, pour l'utilisation au sein d'une machine comme les polymères nano-chargés, et de solutions plus avancées comme l'emploi de céramiques. Les résultats obtenus permettent d'ouvrir d'intéressantes perspectives sur le développement des systèmes d'isolation électrique des machines de demain.

**MOTS-CLES** – Système d'Isolation Electrique – Haute Température – Polymères Nano-chargés - Céramique.

## 1. Introduction

L'objectif de cette étude concernait l'évaluation de la fiabilité des technologies de bobinages permettant de réaliser des machines électriques capables de fonctionner à des températures plus élevées que celles qui sont actuellement utilisées tant dans le domaine de l'aéronautique que pour d'autres applications. Pour atteindre cet objectif la décision a été prise de s'appuyer sur des technologies existantes, qui offrent des possibilités de mise en œuvre rapide sur des machines conventionnelles, tout en ouvrant des perspectives vers des températures plus élevées avec des technologies innovantes. Trois registres technologiques ont été étudiés:

- Les technologies utilisant des fils émaillés et des imprégnations avec des vernis à base de polymères. Ces technologies sont classiques pour fabriquer des machines électriques de petites et moyennes puissances qui fonctionnent à des températures définies par les normes actuelles.
- Les technologies à base de fils guipés de tissus de verre et des imprégnations faites avec des résines époxy. Ces technologies sont actuellement utilisées pour fabriquer les grandes machines.
- Les technologies d'isolation à base de céramiques qui offrent potentiellement des perspectives de montée en température plus importantes mais qui sont plus difficiles à mettre en œuvre à très court terme.

Ces trois registres technologiques ont été testés à des températures croissantes sur des bobines en associant des systèmes de mesure capables d'acquérir les principaux paramètres du système d'isolation réalisé. L'analyse des variations des paramètres enregistrés lors des campagnes d'essais permet d'estimer la température maximale admissible au cœur du bobinage. Dans un premier temps, nous présenterons un état de l'art succinct des technologies d'isolation permettant une augmentation de la température de fonctionnement des machines, puis nous présenterons le dispositif expérimental étudié. Enfin nous donnerons quelques résultats.

## 2. Etat de l'art

Les machines électriques utilisent des isolations à 3 niveaux de leur construction :

- L'isolation du stator et des bobines au sein du circuit magnétique. Cela implique une isolation inter-spire dans la bobine et une isolation spire-masse entre la bobine et le circuit magnétique.
- L'isolation du rotor
- L'isolation des tôles du circuit magnétique statorique ou rotorique.

Les études menées sur les causes de défaillances dans les machines électriques montrent que près de 40% des défauts sont liés à une rupture d'un élément de l'isolation statorique [1-2]. L'ouvrage de référence [3] donne des éléments d'explications physiques quant aux problèmes de vieillissement des isolants polymère qu'on utilise largement dans les Systèmes d'Isolations Electrique (SIE) des machines. Les mécanismes de vieillissement sont multiples (électriques, thermique, chimique,...) et agissent principalement sur les liaisons de valence entre les macromolécules [4] fragilisant ainsi la structure du polymère. Cela place la limite de fonctionnement des polymères en température aux alentours de 230°C. Des études récentes montrent qu'il est tout de même possible d'étendre la gamme de fonctionnement du polymère au delà [5-6] en y ajoutant des nano-charges.

En haute température, un problème important de migration du cuivre dans la couche isolante demeure très pénalisant [7]. En effet, à température ambiante, l'oxydation du cuivre reste négligeable, lorsque la température dépasse 200°C ce n'est plus le cas [5]. Pour résoudre ce problème de diffusion de cuivre, il est possible d'enrober le cuivre dans un autre métal moins sensible à l'oxydation tel que le nickel, le titane ou le platine. En réalité le matériau le plus couramment utilisé pour cela est le nickel pour ses propriétés mécaniques et d'alliage avec le cuivre.

Pour les températures les plus extrêmes (au delà de 300°C) l'isolation non-organique semble rester la solution la plus prometteuse pour le moment pour une utilisation longue [8]. Les composés inorganiques sont à même de conserver leurs caractéristiques mécaniques dans des environnements très sévères et dans des conditions opérationnelles, et ce, même sur de longues périodes de fonctionnement. Les meilleurs candidats inorganiques sont le mica, les fibres de verre, les résines à base de silicone et enfin les composés de céramique.

- Le mica est un minéral caractérisé par sa très grande capacité de résistance aux hautes températures. Il a également l'avantage de résister aux phénomènes de décharges partielles.
- Les fibres de verres sont des matériaux amorphes qui sont capables de fonctionner jusqu'à des températures inférieures à 500°C puisqu'au delà il deviennent conducteurs [9]. Associées à des matrices époxy [10] ou sous forme de guipage, elles présentent des avantages indéniables pour une utilisation au sein d'une machine. Les recherches menées sur les résines époxy montrent de bonnes caractéristiques mécaniques jusque 300°C [11].
- Les matériaux céramiques sont réputés pour leurs très bonnes caractéristiques thermiques et leur très bonne résistance aux conditions très sévères. Le process de dépôt sur le fil de cuivre est très différent du process classique et les performances des fils isolés céramiques restent encore limité pour le moment. Deux process sont très exploités le CVD (Chemical Vapor Deposition) et l'EPD (Electrophoretic Deposition) ils restent cependant très onéreux pour des applications à large diffusion [12].

Dans cette étude, nous avons choisi d'étudier et de tester le comportement en température de 4 solutions principales :

- Polymère (PI)
- Polymère nano-chargé
- Silicone / Fibre de verre
- Céramique

## 3. Dispositif expérimental

Les tests ont été menés parallèlement sur des éprouvettes torsadées et un véhicule de test analogue à une dent de machine (Figure 1a et 1b)

### 3.1 Véhicule de test

Nous avons choisi un design simple capable s'adapter à toutes les solutions testées. Les bobines sont bobinées autour d'une dent réalisée avec un acier standard. L'extrémité de chaque dent est arrondie de manière à permettre un bobinage plus facile des solution mécaniquement les moins fiables (céramiques,...). Les dents sont associées par 3 afin de pouvoir multiplier les essais. La figure 1b présente le véhicule de test.

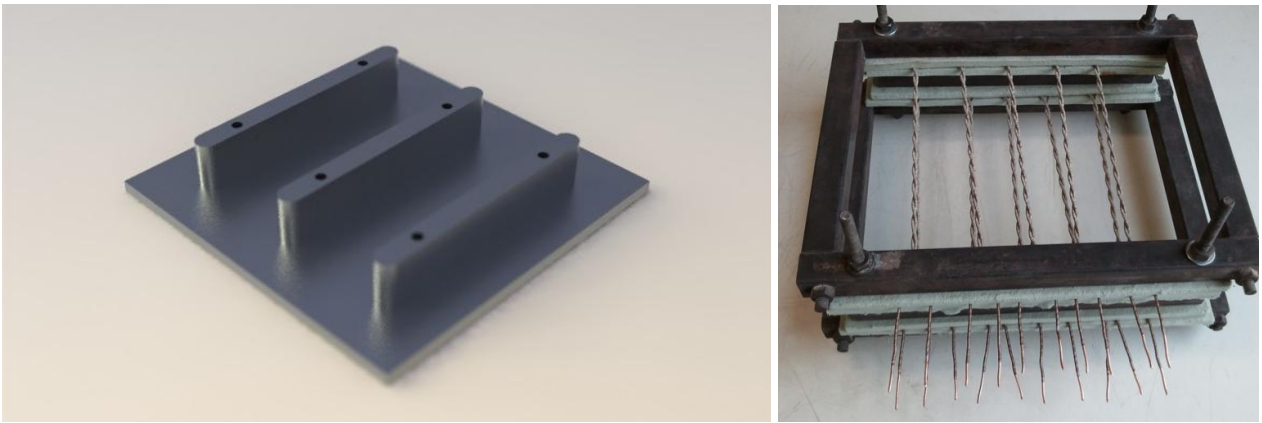


Figure 1 : (a) Eprouvetttes torsadées (b) Véhicule de test

### 3.2 Tests en température

Les éprouvettes ainsi que les véhicules de tests sont placés dans un four afin de réaliser les tests à différentes températures. Chaque véhicule de test est relié à l'extérieur du four à l'aide de câbles hautes températures. La figure 2 présente une vue de véhicules de test placés dans le four. De cette manière les mesures peuvent être réalisées à température contrôlée.

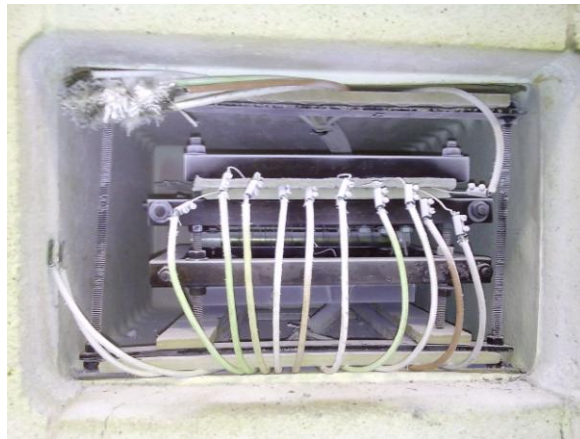


Figure 2 : Positionnement des véhicules de test dans le four.

Les mesures seront faites sur un cycle montant et descendant de la température de manière à détecter d'éventuel vieillissement prématuré des éprouvette. Le PDIV (Partial Discharge Inception Voltage), l'angle de perte ( $\tan \delta$ ), la résistance parallèle ainsi que la capacité des éprouvettes ont été mesurés. Les essais ont été fait sur une gamme de température allant jusque 300°C pour les matériaux tels que le polymère nano-chargé et jusque 500°C pour les composés céramiques.

## 4. Résultats

La figure 3 présente les évolution du PDIV, de l'angle de perte et du la résistance parallèle pour 3 échantillons différents.

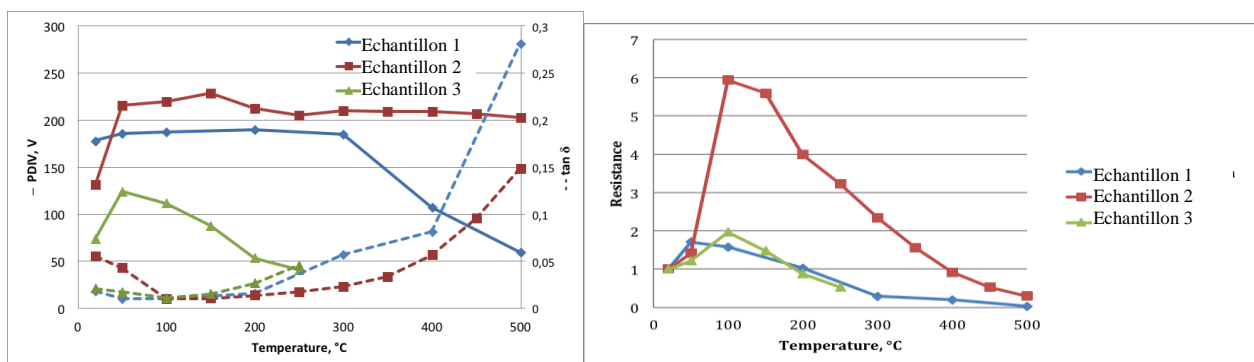


Figure 3 : (a) Evolution du PDIV et de l'angle de perte (b) Evolution de la résistance parallèle (MΩ)

Les évolutions montrent de bonnes stabilités du PDIV pour certaines solutions et une augmentation systématique de l'angle de perte. De même, la résistance parallèle des échantillons tend à diminuer avec l'augmentation de la température. On remarque que l'échantillon 3 semble présenter des phénomènes de conduction à des tensions qui restent très basses et sans élévation notable de la température. La compréhension des mécanismes liés à ces phénomènes doit encore être approfondie. Dans le cas des composés de céramiques, l'information liée au PDIV est moins pertinente puisque ces matériaux sont insensibles aux phénomènes de Décharges Partielles. La version complète de cet article développera et analysera les différents résultats obtenus plus en détail.

## 5. Conclusion

Cette étude a permis de faire une large campagne d'essai sur différents matériaux à même de mieux fonctionner sous des températures accrues. Des essais menés sur des polymères nano-chargés, des fibres de verre, des résines silicones et des composés de céramiques ont permis de juger de la maturité industrielle de chacune des solutions. A partir de ces conclusions il est possible d'esquisser de nouvelles voies d'étude pour les machines électriques afin d'adapter la conception de la machine au SIE.

## 6. Références

- [1] P. Mighdoll, R. P. Bloss, F. Hayashi, "Improved motors for utility applications - Industry assessment study", Electric Power Research Institute, Cleveland, OH, Report EL-2678, October.
- [2] H. A. Toliyat, G. B. Kliman, *Handbook of Electric Motors*, Edition 2 Revised and Expanded, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2004.
- [3] L. A. Dissado, J. C. Fothergil, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Edition 1, London: Peter Peregrinus Ltd., 1992.
- [4] E. Richaud, J. Verdu, "Vieillesse chimique des polymères - Mécanismes de dégradation", *Techniques de l'ingénieur, référence AM3151*, 10 Janvier 2011.
- [5] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. S. Michel, A. Anton, A. Gimenez, "Degradation and dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)", *IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD '07*, Winchester, United Kingdom, 2007, pp. 130-133.
- [6] F. Aymonino, "Contribution à l'étude du comportement des systèmes d'isolation des machines tournantes à courant alternatif fonctionnant sous très hautes températures (200-400°C)", thèse, U.F.R. Physique Chimie Automatique, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, 2008.
- [7] S. Mrowec, A. Stokłosa, "Oxidation of copper at high temperatures", *Oxidation of Metals*, Volume 3, Issue 3, 1971, pp. 291-311.
- [8] H. Mitsui, "Progress in Japan in electrical insulation at high temperatures", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume 12, Issue 3, 1996, pp. 16-27.
- [9] J. F. Shackelford, W. Alexander, *CRC Materials Science and Engineering Handbook*, Edition 3: CRC Press, 2000.
- [10] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines*, Edition 1: Wiley Interscience, 2004.
- [11] A. Takahashi, Y. Satsu, A. Nagai, M. Umino, "Heat-resistant epoxy-silicon hybrid materials for printed wiring boards", *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Volume 28, Issue 2, April 2005, pp. 163-167.
- [12] E. R. Kreidler, V. P. Bhallamudi, "Research on high temperature ceramic insulation for electrical conductors", The Ohio State University, Ohio, USA, Report NAG 3-2090, 6 June 2001.