



HAL
open science

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

Vasile Mihaila, Manh Quan Nguyen, Stéphane Duchesne, Gabriel Velu, Daniel
Roger, David Malec, Jean-Pascal Cambronne

► **To cite this version:**

Vasile Mihaila, Manh Quan Nguyen, Stéphane Duchesne, Gabriel Velu, Daniel Roger, et al.. Solutions d'isolation électrique pour les machines fonctionnant à Hautes Températures. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065229

HAL Id: hal-01065229

<https://hal.science/hal-01065229>

Submitted on 18 Sep 2014

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.

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

Vasile MIHAILA^{1,2}, Manh Quan NGUYEN³, Stéphane DUCHESNE^{1,2}, Gabriel VELU^{1,2}, Daniel ROGER^{1,2}, David MALEC³, Jean Pascal CAMBRONNE³

1 UArtois, LSEE, F-62400 Béthune France

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

3 Université Paul Sabatier, INPT, 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, amènent de nouvelles voies de recherche afin d'améliorer la puissance volumique des actionneurs électriques. L'une d'elle 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. L'originalité de cette étude repose sur une campagne de tests comparatifs de solutions actuellement suffisamment matures 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-clés—*Système d'Isolation Electrique – Haute Température – Polymères Nano-chargés – Céramique.*

1. INTRODUCTION

Réalisée dans un contexte lié à l'apparition d'avions de plus en plus électrique, cette étude concerne 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. Classiques pour fabriquer des machines électriques de petites et moyennes puissances fonctionnant à des températures limitées à 240°C par les normes actuelles.
- Les technologies à base de fils guipés de tissus de verre et des imprégnations faites avec des résines adaptées. 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 évalués à des températures croissantes sur des bobines en associant des systèmes de mesure capables d'acquérir les principaux paramètres du système d'isolation. 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 les solutions que nous avons sélectionnées sur la base de ces informations. Les essais expérimentaux se sont effectués en deux temps. Dans un premier temps nous avons évalué les propriétés diélectriques vis à vis de la température de chacun des matériaux choisis sur un dispositif de test simple (éprouvettes torsadées ou éprouvettes enroulées) puis dans un second temps nous avons défini un véhicule de test assez proche d'une machine réelle sur lequel nous avons pu tester la mise en œuvre globale du système d'isolation à l'aide des nouveaux matériaux retenus.

2. PROBLEMATIQUES DE MONTEE EN TEMPERATURE ET CHOIX DES SOLUTIONS TESTEES

Les machines électriques utilisent des isolations à 3 niveaux de leur construction. Tout d'abord, l'isolation du stator et des bobines au sein du circuit magnétique qui implique une isolation inter-spires dans la bobine et une isolation spire-masse entre la bobine et le circuit magnétique. Viennent ensuite, l'isolation du rotor ainsi que 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 polymères utilisés largement dans les Systèmes d'Isolation Electrique (SIE) des machines. Les mécanismes de vieillissement sont multiples (électriques, thermique, chimique,...) comme le montre la figure 1. Ces contraintes 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 240°C (classe thermique la plus haute). Des études récentes montrent qu'il est tout de même

possible d'étendre la gamme de fonctionnement du polymère [5-6] en y ajoutant des nano-charges.

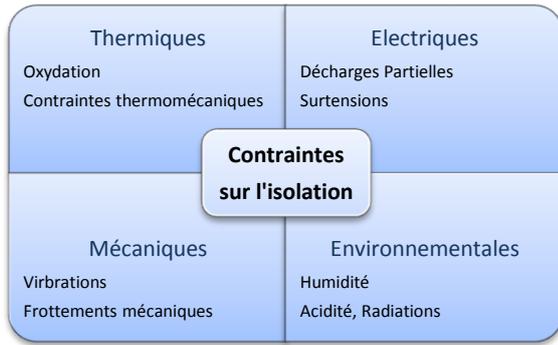


Fig.1 Contraintes appliquées aux SIE des machines électriques

2.1. Le problème de la montée en température

Pour un environnement à haute température, le système d'isolation, en plus des contraintes présentées à la figure 1, sera assujéti à des contraintes plus spécifiques qui doivent être analysées plus en détail. Plusieurs problèmes apparaissent lorsque les températures augmentent.

2.1.1. La diffusion

La température maximale admissible pour une bobine d'une machine électrique et la machine elle-même n'est pas imposée par le système d'isolation seulement, mais aussi par le métal utilisé comme conducteur. Le cuivre est le métal le plus utilisé dans la fabrication de bobines électriques du fait de sa faible résistivité et lorsque la température est élevée, le problème majeur associé à l'utilisation de cuivre est son oxydation [5]. A température ambiante, l'oxydation du cuivre est négligeable; ce n'est pas le cas pour une température supérieure à 200°C, où le phénomène apparait, tout d'abord sous sa forme Cu₂O (oxyde cuivreux) et ensuite sous sa forme CuO (Oxyde de cuivre) [6]. L'oxyde de cuivre (CuO) est formé par oxydation de l'oxyde cuivreux (Cu₂O) et jamais par l'oxydation du cuivre lui même. La seule configuration possible pour une couche d'oxyde à la surface d'une plaque de cuivre est donc: Cu-Cu₂O-CuO-Air. A haute température, le métal conducteur se diffuse dans la couche d'isolation de manière à former un matériau d'oxyde semi-conducteur à l'intérieur de la couche d'isolation qui dégrade les caractéristiques générales de l'isolant. Sous l'influence de la température, dans des conducteurs en cuivre avec des isolants organiques ou inorganiques, la diffusion du cuivre dans la couche d'isolation se produit de manière plus ou moins sensible [7-9]. Ceci diminue l'épaisseur effective de la couche d'isolation ce qui peut provoquer la formation de canaux conducteurs et par conséquent de courts-circuits entre des spires adjacentes. La référence [10] montre que la profondeur de diffusion du cuivre dans la couche d'isolation dépend de la température; une température plus élevée correspond à une plus grande profondeur de diffusion. Pour éviter le problème de la diffusion du cuivre d'autres métaux peuvent être utilisés comme couche de prévention de la diffusion, par exemple, le nickel (Ni), le titane (Ti) ou le platine (Pt). L'alliage de cuivre et de nickel est le plus utilisé car ce sont des éléments voisins dans le tableau périodique, il est donc facile de les associer.

2.1.2. La dilatation thermique différentielle

La dilatation thermique est la tendance des matériaux à changer de volume en réponse à un changement de température. Le degré d'expansion est représenté par le coefficient de dilatation thermique. Les valeurs du coefficient de dilatation thermique doivent être considérées avec attention lorsqu'on assemble des matériaux possédant des coefficients de dilatation différents, voire très différents. Pour les isolants inorganiques (silice, verre, céramique...) le coefficient de dilatation thermique est de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ à $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, bien inférieur à celui des métaux et alliages principalement utilisés dans les applications à haute température (Cu : $16,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Ni : $13,4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Des fissures ou des crevasses peuvent donc apparaître après plusieurs cyclages thermiques. Les polymères qui sont largement utilisés dans les machines électriques actuelles (polyesters, polyamides, polyimides) ont une souplesse naturelle qui s'adapte parfaitement à la dilatation du cuivre. Les problèmes de dilatation seront donc plus critiques avec les isolants inorganiques car l'expansion plus importante du métal conducteur risque de créer des contraintes importantes sur les couches d'isolation.

2.1.3. La conductivité thermique

La valeur de la conductivité thermique des isolations influence directement l'évacuation de l'énergie dissipée dans les conducteurs et, par conséquent, la température atteinte par l'isolant. La chaleur est difficilement évacuée à travers les couches isolantes du fait de leur faible conductivité thermique. Pour les isolants électriques usuels, les valeurs les plus élevées de conductivité thermique sont obtenus pour les isolants minéraux (céramique : 2 à 4W/m.°K, mica : 0,4 à 0,8W/m.°K) par rapport à Cu : de 300 à 400W/m.°K; pour des polymères : 0,2W/m.°K.

2.1.4. La résistivité électrique

La conductivité électrique est également affectée par la montée en température. En effet, chaque matériau possède un coefficient de température qui indique l'augmentation de la résistance lorsque la température augmente. Le tableau 1 donne quelques exemples de résistivité et de coefficient de température pour différents métaux.

Tableau 1. Evolution de la resistance de différents métaux

Métal	Résistivité à 300°K	Coefficient de température
Argent	$15 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	$3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Cuivre	$18 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	$3,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Aluminium	$26 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	$4,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Nickel	$70 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	$5,37 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Fer	$104 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	$6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Ce tableau montre que pour les applications à températures élevées le cuivre et l'argent restent les meilleurs choix, même si la résistance augmente fortement. A 400°C la résistance du cuivre ou de l'argent sera multipliée par environ 2,5. On note que outre une résistivité moins bonne à température ambiante le nickel possède également un coefficient de température

moins bon qui aura un impact important sur les fils isolés avec de la céramique.

2.2. Isolation organique classique

2.2.1. Isolation des fils émaillés

Les fils émaillés organiques utilisés dans les moteurs électriques sont composés d'un noyau conducteur constitué de cuivre ou d'aluminium entouré par une couche isolante mince. Cette couche est constituée de plusieurs couches de vernis d'émaillage de nature similaire ou différente. Elles sont nécessaires pour assurer les différentes fonctions demandées à un fil émaillé : adhérence sur le fil de cuivre, résistance électrique, stabilité thermique, adhérence de l'isolant secondaire (imprégnation). Ces solutions d'émaillages ont la plupart du temps des formulations complexes qui regroupent un ou plusieurs solvants, des pré-polymères ainsi que des agents de réticulation. Selon la nature chimique de l'émail et le diamètre des fils, le vernis d'émaillage représente entre 18 et 40 % de la partie utile, le complément étant constitué de solvants qui sont brûlés dans un four à haute température pendant le processus de polymérisation. Néanmoins, la nature du solvant joue un rôle important dans la qualité finale des fils.

Il existe de nombreux types de fils émaillés disponibles sur le marché. Différentes normes, (CEI 60 317-38, NEMA MW 1000 ou JIS C 3202 [25-27]) décrivent en détail les conducteurs émaillés (diamètre, épaisseur d'isolante, présence ou non d'une couche thermo-adhérente,...). La nature chimique des émaux diffère par leur indice thermique et par les conditions de fonctionnement du moteur. La figure 2 présente un comparatif détaillant les températures de ramollissement et l'indice de température des différents polymères utilisables au sein d'une machine électrique (AFP= ; PUR=Polyuréthane, PEI'THEIC'= Polyester-imide avec THEIC; PES'THEIC'=Polyester avec THEIC ; PEI=Polyester-imide, PAI= Polyamide-imide, PI=Polyimide).

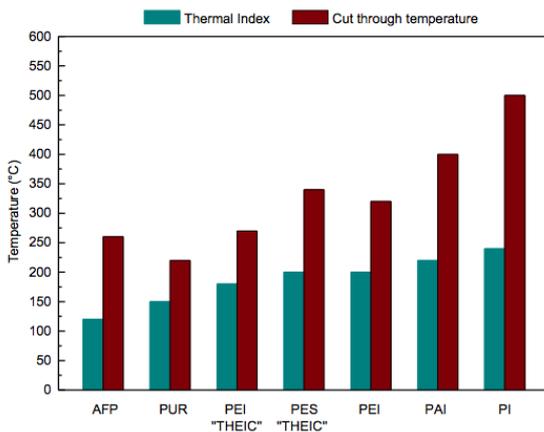


Fig.2 Indice thermique et température de ramollissement des principaux polymères utilisés pour l'isolation des moteurs électriques [11]

Le polyimide (PI) qui reste pour le moment un des matériaux organiques les plus performants du point de vue de la montée en température présente un indice de température de 240°C. Les fils à base de PI sont en revanche très coûteux en raison du coût des matériaux et des conditions spécifiques de

l'émaillage. Ils possèdent de plus des propriétés thermiques et électriques fortement dépendantes des conditions d'humidité. Par exemple, la rigidité diélectrique du PI baisse d'environ 25% à température ambiante lorsque le taux d'humidité relative est augmenté de 0 à 100% [22]

2.2.2. Polymères nano-chargés

Les solutions nano-chargées conduisent à des durées de vie plus importantes des machines électriques grâce à des caractéristiques diélectriques sensiblement améliorées mais surtout à l'aide d'une meilleure résistance aux phénomènes de décharges d'où leur appellation plus courante de fils « corona résistant » [29-30]. L'adjonction de particules inorganiques (quelques % en masse) dans une résine organique classique permet de réduire notablement (jusqu'à un facteur 1000) la sensibilité de la couche isolante aux DP en réduisant l'énergie des collisions, en améliorant la résistance à la diffusion des gaz [31] et en augmentant localement la résistance thermique. Différents types de particules peuvent être utilisés pour améliorer les caractéristiques de la résine : Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 [31] ou plus récemment des composés synthétiques de mica [32].

Ces solutions sont utilisables sous 3 formes pour une amélioration de la durée de vie des machines fortement contraintes par les DP :

- Fils émaillés corona résistant associés à un vernis d'imprégnation classique ;
- Fils émaillés standards associés à un vernis d'imprégnation nano-chargé ;
- Fils émaillés corona résistant associés à un vernis d'imprégnation nano-chargé.

2.2.3. Vernis d'imprégnation

La fonction principale du vernis d'imprégnation est de renforcer mécaniquement l'enroulement pour le protéger de l'humidité, des agressions environnementales et d'améliorer sa conductivité thermique. En fonction de leur composition, les vernis d'imprégnation peuvent être divisés en deux catégories :

- les vernis à base de solvants : le solvant est présent de manière à obtenir une viscosité plus faible permettant une application plus efficace et plus aisée ; il s'évapore pendant le séchage ou la phase de polymérisation. Les solvants utilisés peuvent être complètement organiques ou avoir une partie aqueuse. Ces vernis présentent l'inconvénient d'émettre de grandes quantités de composés organiques volatiles (COV) qui entraînent un risque pour la santé et l'environnement (N-méthyl pyrrolidone, solvants aliphatiques et aromatiques tels que le naphte, le xylène, le toluène, etc...).
- Les vernis sans solvant: ils contiennent un diluant réactif (typiquement un monomère) permettant d'abaisser la viscosité et possède également le plus souvent un catalyseur accélérant le durcissement.

Le vernis d'imprégnation et la technique d'imprégnation utilisée pour son application sont intimement liés. Le vernis doit être appliqué de manière à supprimer au mieux les zones d'air au sein du bobinage. La technique traditionnelle consiste à immerger la machine dans un vernis d'imprégnation ou à

utiliser le processus VPI (Imprégnation sous vide-pression) pour une meilleure pénétration au cœur des enroulements.

Une seconde option consiste à utiliser des fils dit « thermo-adhérents ». Ces fils spéciaux sont émaillés avec un adhésif supplémentaire placé au dessus de l'émail classique. Cet adhésif a une fonction de liaison qui s'active par la chaleur (air chaud, four, courant électrique) ou par l'action de solvants. Une fois cette fonction activée, les spires se retrouvent liées les unes aux autres dans une bobine compacte. L'utilisation de fils thermo-adhérents peut offrir des avantages de coût et de fabrication dans certaines applications de bobinage ou de réduction de l'impact sur l'environnement [mettre les 2 publiés CONFREGÉ LSEE+LAPLACE en 2010]).

2.3. Isolation inorganique

Dans un environnement atteignant des températures supérieures à 300 °C, les isolants minéraux sont les mieux adaptés pour de longues périodes d'exploitation [12]. Cependant, en plus de la température, ces matériaux doivent également supporter sans défaillance les contraintes électriques et mécaniques. Dans cette section, une étude sur l'isolation non-organique est présentée. Les matériaux non-organiques privilégiés dans notre étude sont le mica, la fibre de verre, le silicone et la céramique.

2.3.1. Les solutions disponibles sur le marché

2.3.1.1 Le Mica

Le mica est un minéral composé principalement de silicate d'aluminium et de potassium. Le mica est stable lorsqu'il est exposé à un champ électrique, la lumière, l'humidité et les températures extrêmes. Il est thermiquement stable et il est résistant aux décharges partielles. Les principales catégories de mica utilisées en génie électrique sont le mica phlogopite et le mica muscovite. Le mica muscovite est principalement utilisé dans les condensateurs, mais sa stabilité en température est plus faible que celle du mica phlogopite. Le mica phlogopite reste stable à des températures plus élevées (jusqu'à 900°C) et est utilisé dans des applications dans lesquelles une combinaison de stabilité à haute température et de propriétés électriques est nécessaire.

2.3.1.2 La fibre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, cassant et transparent à la lumière visible. Dans la plupart des cas, le verre est constitué de dioxyde de silicium (SiO_2 -silice) auquel sont ajoutés des fondants. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (non cristallin) comportant un phénomène de transition vitreuse. A température ambiante le verre est un bon isolant avec une résistivité électrique de l'ordre de $10^{17} \Omega \cdot \text{m}$, mais à des températures élevées, il devient conducteur. Ainsi à 500°C sa résistivité électrique tombe à $6,3 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ [23]. Le verre présente de bonnes propriétés thermiques mais il est fragile et il est difficile d'utiliser du verre pour faire des isolations présentant de bonnes propriétés mécaniques en termes de flexibilité. Par conséquent, le verre est transformé en fibres flexibles. Ces fibres de verre sont utilisées pour fabriquer des tissus qui sont enroulés autour des câbles. Comme tout matériau inorganique, le verre a une résistance élevée à la contrainte électrique en termes de décharges partielles. L'examen de composites d'isolation

verre et polymères après une période d'exposition à des décharges partielles révèle l'érosion des matériaux polymères, mais pas de dommage au verre [24].

2.3.1.3 Les résines silicones

Les silicones sont des composés inorganiques contenant un silicium-oxygène de la chaîne (-Si-O-...) sur lequel sont fixés des groupes sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques (carbone, hydrogène et parfois d'autres éléments chimiques) peuvent être utilisés pour relier plusieurs de ces chaînes. Certaines des propriétés les plus utiles des résines silicones comprennent : la stabilité thermique, la température élevée de la dégradation et les bonnes caractéristiques d'isolation électrique. Dans la plupart des exemples de systèmes d'isolation, le silicone est utilisé comme liant car le silicone se transforme en un matériau inorganique lorsqu'il est chauffé à des températures élevées [12]. Dans de nombreux cas, des charges minérales peuvent être incluses dans ces liants. Les céramiques étant naturellement poreuses et hydrophiles elles sont parfois consolidées avec du silicone pour mieux résister à l'humidité.

2.3.1.4 Les céramiques

Les céramiques sont essentiellement des substances inorganiques et non métalliques avec d'excellentes propriétés thermiques. Les céramiques ont généralement une inertie chimique très élevée et une bonne résistance à l'attaque par des substances agressives, à l'oxydation et aux dommages dus aux intempéries. Les céramiques conservent leur solidité même à des températures très élevées et sont capables de résister aux chocs thermiques, elles ont un faible coefficient de dilatation thermique et une faible conductivité thermique. Les céramiques techniques sont divisées en trois catégories différentes :

- oxydes : Al_2O_3 (oxyde d'aluminium), ZrO_2 (dioxyde de zirconium), ... ;
- non-oxydes : carbure, borure, nitrure, céramique composée de silicium et de tungstène, magnésium, platine ou titane ;
- composites céramiques qui sont la combinaison d'oxydes et de non oxydes.

Pour la fabrication de fils à haute température, on utilise généralement les oxydes parce qu'une couche mince d'isolant peut être déposée sur le conducteur tout en maintenant de bonnes propriétés mécaniques et thermiques. Le dépôt d'une couche de céramique sur des conducteurs est très différent de celui d'autres matériaux isolants traditionnels tels que des polymères. La procédure de production est difficile et donc coûteuse. Il existe différents procédés de fabrication qui vont de la pulvérisation thermique où des peintures inorganiques sont déposées et cuites à des températures élevées à la méthode le CVD (dépôt chimique en phase vapeur). Il existe également un procédé plus spécifique, dans lequel un coulis composé de verre, de céramique, d'un liant organique et de solvants est cuit entre 700 et 800°C. Une autre méthode appelée EPD (dépôt électrophorétique), a été développée par [13].

La céramique placée sur les fils reste passablement poreuse de sorte que les fils restent sensibles à l'humidité. Ils possèdent également une résistance mécanique assez faible qui les rend cassants. Dans ces conditions, une contrainte fondamentale dans l'utilisation de ce type de fils est le rayon de courbure. Les

Les fils de céramique sont limités en termes de rayon de courbure à ≈ 10 fois le diamètre du fil. Cette contrainte doit impérativement être prise en compte dans la conception des bobinages. De plus, la rigidité diélectrique des couches isolantes de céramique dépend de nombreux facteurs tels que la porosité, la taille et l'uniformité des grains utilisés lors du processus de dépôt, la présence de défauts dans la microstructure,.... La rigidité diélectrique est d'autant plus grande que l'épaisseur de la couche de céramique est faible car un volume croissant de matériau augmente la probabilité de présence de défauts aléatoires [14]. Les études menées par [15-16] montrent que le champ de rupture diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche isolante et avec la diminution de la pureté de l'alumine.

Les mécanismes de défaillance dans les céramiques ne sont pas encore entièrement connus. La rupture diélectrique est le résultat d'une série de processus complexes. Comme dans le cas des isolants organiques, on distingue la rupture intrinsèque du matériau et la rupture pratique qui se produit à proximité d'un défaut ou en raison d'une dégradation progressive de la matière [17]. Il convient également de mentionner la dégradation thermique qui est habituellement attribuée à un échauffement local du matériau, par exemple, en raison des pertes par conduction [18]. Les mécanismes de dégradation par ionisation peuvent également apparaître dans les céramiques principalement à cause des phénomènes de décharges partielles dans les porosités et les fissures. Quant à la rupture électromécanique, elle est le résultat de la création d'une force électrostatique qui tend à compresser la couche isolante.

2.3.1.5 Les résines époxy

La résine époxy, également connue sous le nom polyépoxyde, est un polymère thermodurcissable obtenu par polymérisation de monomères époxy à l'aide d'un agent de réticulation qui peut être un anhydride d'acide, un phénol, ou plus souvent une fonction amine. Il s'agit de polymères à deux composants. Les résines époxy durcissent de manière irréversible à la suite d'une montée en température ou par addition d'un catalyseur. Pour les applications à températures élevées les résines époxy sont utilisées en tant que matrice de structure renforcée à l'aide de fibre de verre, de mica ou de céramiques. Pour les isolants en céramique, la résine imprègne les porosités de la céramique, renforçant la résistance mécanique [19].

Les études menées sur les résines hybrides époxy-silicium par [20] montrent d'excellentes propriétés mécaniques et un coefficient de dilatation thermique plus élevé à des températures élevées (jusqu'à 300°C). Des essais expérimentaux ont également été effectués sous régime de DP dans le vide sur des matériaux époxy [21]. Les auteurs indiquent que l'activité de décharge change fortement avec l'augmentation de la température.

2.3.2 Problèmes liés à l'isolation inorganique

Une brève comparaison entre les propriétés principales des isolants organiques et inorganiques est présentée au tableau 2. Pour la tenue en température, le système d'isolation inorganique est généralement meilleur. Cependant, les propriétés mécaniques et électriques des isolants inorganiques

sont plus faibles, de plus, à l'exception du mica, les matériaux inorganiques ne sont pas les plus recommandés pour une augmentation de la tension nominale en raison de leur porosité. En haute température, le problème de migration du cuivre dans la couche isolante demeure très pénalisant [5] et oblige à utiliser des conducteurs utilisant des barrières de migration en métaux tels que le Nickel. L'adjonction de ces métaux dont les caractéristiques électriques et magnétiques sont souvent moins bonnes que celles du cuivre impacte le comportement général des bobines ainsi réalisées.

Tableau 2. Comparaison des isolants Organiques et Inorganiques

	Isolants Organiques	Isolants Inorganiques
Mécaniques	+	-
Électriques	+	-
Thermiques	-	+

2.4 Synthèse des solutions choisies

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. TESTS MENES SUR DES ECHANTILLONS SIMPLES

Cette partie de l'étude nous a permis de déterminer les propriétés diélectriques de chacun des matériaux sélectionnés.

3.1 Echantillons

Pour les solutions polymères et fibre de verre des éprouvettes torsadées ont été réalisées de manière classique conformément à la norme EIC 60851-5 [28] (fig. 3).



Fig.3 Dispositif de tests diélectriques pour les fils émaillés polymères et guipés

Cependant les fils céramiques ne sont pas suffisamment souples pour pouvoir réaliser des éprouvettes torsadées sans détérioration de la couche isolante en céramique. Nous avons donc utilisé le second système de test proposé par la norme [28] qui consiste à enrouler le fil sur un mandrin en acier (Fig. 4).

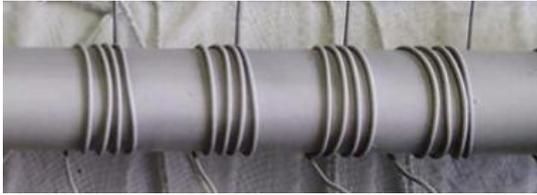


Fig.4 Dispositif de test diélectrique pour les fils céramiques

3.2. Essais en température

Les éprouvettes ainsi que les véhicules de tests ont été placés dans un four afin de réaliser les mesures à différentes températures. Chaque véhicule de test est relié à l'extérieur du four à l'aide de câbles haute température. La figure 5 présente une vue d'une série d'éprouvettes torsadées placée dans le four. De cette manière les mesures peuvent être réalisées à température contrôlée.



Fig.5 Dispositif de test diélectrique pour les fils céramiques

Les mesures ont été réalisées sur un cycle montant et descendant de la température de manière à détecter d'éventuel vieillissement prématuré des éprouvettes. 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 faits sur une gamme de température allant jusqu'à 300°C pour les solutions à base de matériaux organiques et jusqu'à 500°C pour les composés céramiques.

3.3. Caractéristiques diélectriques mesurées

Les caractéristiques mesurées ont été choisies afin de pouvoir évaluer au mieux les capacités de tenue thermiques de chaque matériau. En fonction des matériaux utilisés ces caractéristiques diffèrent car elles n'ont pas vocation à faire des comparaisons directes entre les matériaux mais à donner des indications quant au comportement thermique de chacun d'eux.

3.3.1. Polyimide

Les essais menés sur le PI ont été menés sur 3 références commerciales issues des catalogues Vonroll, Essex et Ederfil. Les fils utilisés sont des fils de 0,5mm de diamètre dont l'isolation est de grade 2. Les figures 6 et 7 présentent respectivement le PDIV et la tension de claquage de ces 3 références. On constate que les PDIV relevés sur les 3 références commerciales sont très similaires et de l'ordre de 500V. En revanche la figure 7 met en évidence une différence assez nette sur la tension de claquage. Les intervalles de confiance montrent bien que les 2 premières références ont des

comportements très proches mais que la dernière possède une tension de claquage sensiblement plus faible.

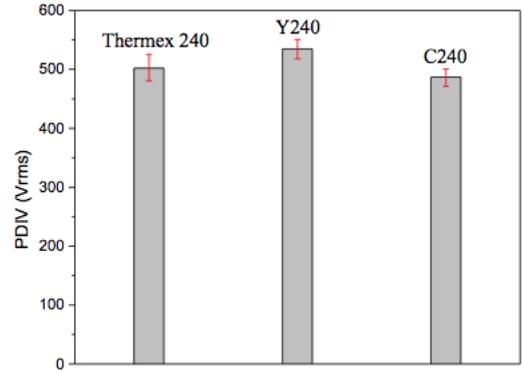


Fig.6 PDIV de 3 fils émaillés commerciaux en Polyimide

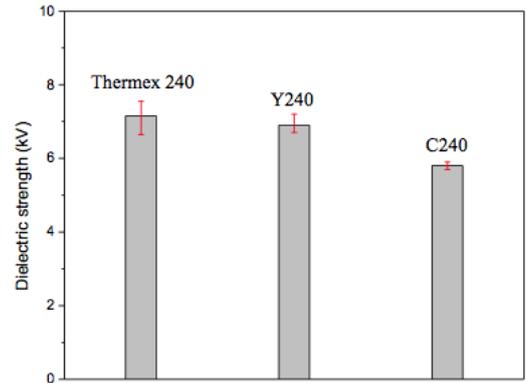


Fig.7 Tension de claquage (AC 50Hz) de 3 fils émaillés commerciaux en Polyimide

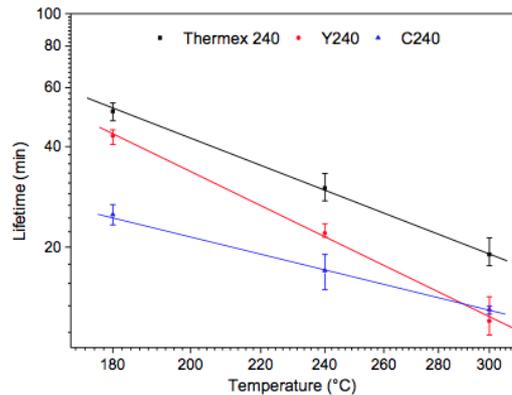


Fig.8 Relevés expérimentaux de la durée de vie en fonction de la température ($V = \pm 0.5kV$, $f=10$ kHz)

La figure 8 montre, quant à elle, l'évolution de la durée de vie des 3 références en fonction de la température. Ces essais ont été menés avec des créneaux rectangulaires de tension de ± 500 V à 10 kHz.

Ces essais mettent en évidence les capacités relativement intéressantes de certains polyimides pour une montée en température limitée à quelques dizaines de degrés au dessus de la classe thermique 240°C.

3.3.2. Polymères nano-chargés

Pour cette étude nous avons testé différents fils émaillés nano-chargés disponibles dans le commerce ayant une classe thermique de 180°C. La figure 9 présente la tension de claquage de ces différentes solutions (2-5) en comparaison d'une solution émaillée classique équivalente (1).

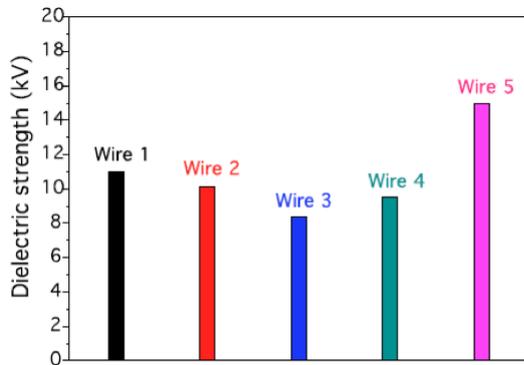


Fig.9 Tension de claquage des fils émaillés commerciaux nano-chargés testés ($f = 50\text{Hz}$, $dV/dt=1\text{kV/s}$)

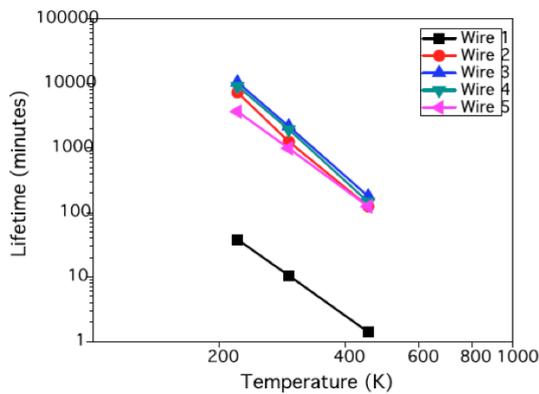


Fig.10 Relevés expérimentaux de la durée de vie en fonction de la température ($V = \pm 1\text{kV}$, $f=5\text{ kHz}$)

La figure 10 présente l'évolution de la durée de vie de chacune des solutions testées en fonction de la température. Les tests de vieillissement ont été menés avec des créneaux de tension de $\pm 1\text{kV}$ à une fréquence de 5 kHz.

Ces relevés expérimentaux montrent sans équivoque la meilleure durée de vie obtenue avec des solutions nano-chargés, même lorsque la température de fonctionnement augmente.

3.3.3. Fils guipés

Des essais préliminaires ont également été menés sur des solutions guipées avec de la fibre de verre. Dans ce cas le tissu de verre est encapsulé dans une résine organique classique. Ces essais ont pu être menés jusqu'à des températures très supérieures à la classe du fil. La figure 11 montre l'évolution du PDIV en fonction de l'augmentation de la température par paliers de 15 heures. Cette figure montre que les propriétés de la couche isolante qui conserve des caractéristiques d'isolation intéressantes jusque des températures de l'ordre de 300°C. En revanche on voit qu'au delà la dégradation s'accélère

rapidement à cause de l'évaporation rapide de la résine organique.

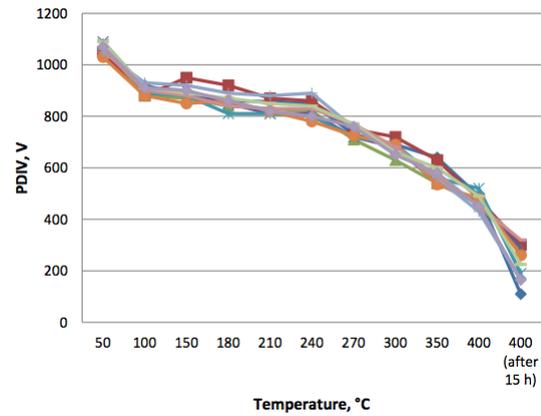


Fig.11 PDIV d'une série d'échantillons de fils guipés avec de la fibre de verre en fonction de la température

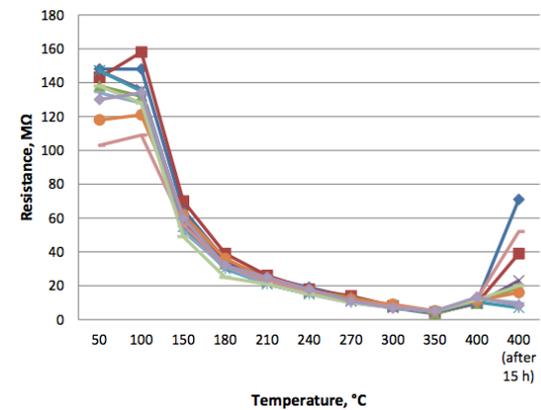


Fig.12 Evolution de la résistance parallèle des échantillons en fonction de la température

La figure 12 montre que la résistance de la couche isolante, même si elle diminue assez rapidement avec la température conserve des valeurs très acceptables.



Fig.13 Etat d'un fil guipé après vieillissement à 400°C

La résistance parallèle nous donne une indication indirecte sur les capacités de la solution considérée en fonction de la température. Ces relevés expérimentaux montrent que cette solution possède de très bonnes caractéristiques jusque à 300°C que ce soit du point de vue des décharges, puisque le PDIV reste assez élevé, ou des caractéristiques électriques. A cette

température la résine organique qui maintient la fibre de verre a disparu comme le montre la figure 13. Seule la fibre de verre reste autour de l'âme de cuivre. C'est elle qui continue d'assurer la fonction d'isolation dans ces conditions.

3.3.4. Fils céramiques

Les fils utilisés dans cette étude sont nommés W1, W2 et W3 et leurs propriétés, fournies par les fabricants, sont présentées au tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques des fils isolés céramiques utilisés

	Isolation	Conducteur	Température	diam	Épaisseur d'isolation
W1	céramique	Cuivre nickelé	500°C / 1000°C en pointe	0.5mm	inconnue
W2	céramique	Cuivre nickelé	500°C / 1000°C en pointe	1mm	inconnue
W3	MgO	Cuivre nickelé	537°C / 815°C en pointe	0.8mm	7-10µm

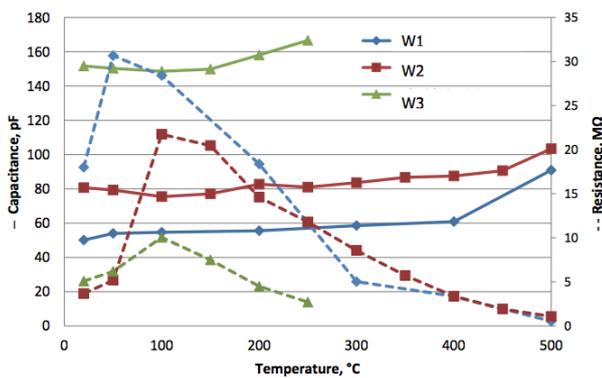


Fig.14 Evolution de la résistance parallèle des échantillons en fonction de la température

La figure 14 montre les variations de la capacité et de la résistance (valeurs absolues) en fonction de la température. Ces courbes représentent les valeurs moyennes obtenues à partir de 10 échantillons pour chacun des fils étudiés.

Ces courbes montrent un comportement assez différent des 3 solutions. On voit également une phase d'augmentation importante de la résistance pour les températures inférieures à 100°C due à une évaporation progressive de l'eau contenue dans la couche isolante en céramique qui est particulièrement hydrophile. On constate néanmoins une très bonne stabilité des solutions 1 et 2 jusqu'à 500°C. A titre d'information la figure 15 présente l'évolution du PDIV en fonction de la température, bien que les phénomènes de décharges dans la céramique soient très différents de ceux observés dans les isolants organiques. Cette figure montre l'évolution en valeurs relatives, il est tout de même à noter que les valeurs de PDIV relevées sur les isolants céramiques sont particulièrement faibles (de l'ordre de 100 à 200V). Ces valeurs faibles ne constituent pas un point bloquant pour ce type de matériaux dans la mesure où il se dégrade très peu sous l'action des décharges. Ces essais montrent que les fils isolés céramiques, bien qu'ils aient des caractéristiques thermiques et électriques plus faibles que les fils émaillés organiques possèdent des caractéristiques thermiques bien meilleures qui offrent des

possibilités très encourageantes de montée en température pour les machines électriques.

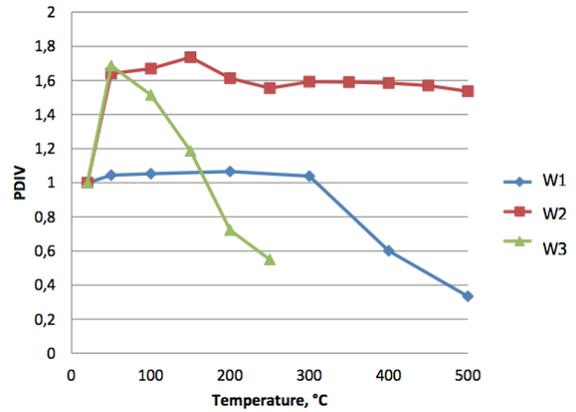


Fig.15 Evolution du PDIV des fils isolés céramiques

4. ESSAIS MENES SUR LES VEHICULES DE TEST

4.1. Définition des véhicules de test

Nous avons choisi un design simple capable de 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 solutions les plus fragiles (céramiques,...). La figure 16 présente le véhicule de test.

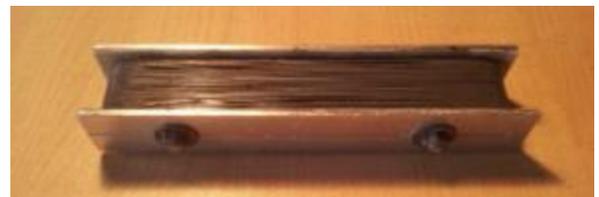


Fig.16 Véhicules de test utilisé

Nous avons choisi 4 solutions représentant des maturités technologiques décroissantes. La solution 0 est une solution polyimide classique qui se trouve déjà dans l'industrie. La solution 1 utilise des polymères nano-chargés ainsi qu'une imprégnation silicone ce qui est déjà moins habituel. La solution 2 est une solution reposant sur un fil céramique associé à une résine époxy. Enfin la dernière solution est la plus expérimentale puisqu'elle utilise une solution entièrement céramique. Chacune des solutions utilise également des solutions différentes pour l'isolation de fond d'encoche qui ne sont pas discutés dans cette publication. Le tableau 3 résume la composition de chacune des solutions.

Tableau 3. Résumé des solutions testées

Solution	Fils émaillé	Isolation de fond d'encoche	Imprégnation
0	PI	PI/Fibre de verre	PI
1	Polymère nano-chargé	Mica	Résine silicone
2	Céramique	Silicone/Fibre de verre	Résine Silicone
3	Céramique	Feuille de céramique	Ciment céramique

4.2. Essais menés sur les véhicules de tests

Pour chacune des solutions le PDIV entre spires a été mesuré pour évaluer la qualité de l'isolation des fils ainsi que de l'imprégnation. Une mesure similaire entre spire et masse permet également d'évaluer la qualité de l'isolation de fond d'encoche. Des relevés des tensions de claquages ont également été réalisés sur les solutions 0, 1 et 2. La solution 100% céramique n'a pas pu être testée de cette manière puisque les phénomènes de décharge et de claquage dans la céramique sont très différents des phénomènes observés dans les isolants organiques et apparaissent à des tensions relativement faible.

4.3. Résultats observés

La figure 17 présente les relevés expérimentaux réalisés sur les 4 solutions étudiées. On peut constater que la solution nano-chargée permet d'obtenir de manière assez logique un gain significatif sur le PDIV par comparaison à une solution classique. Cependant les courbes tendent à se rejoindre lorsque la température augmente. Dans ces conditions le matériau organique contenant les nano-charges subit les mêmes dégâts que la solution classique. En revanche il est assez net que les solutions 2 et 3 (fibre de verre/silicone et 100% céramique) montrent des PDIV bien plus faibles que les solutions organiques.

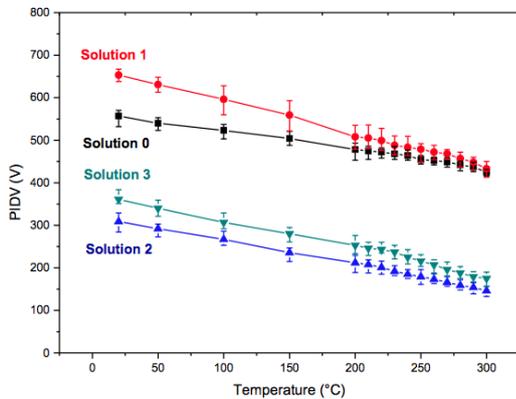


Fig.17 Evolution du PDIV des véhicules de test en fonction de la température

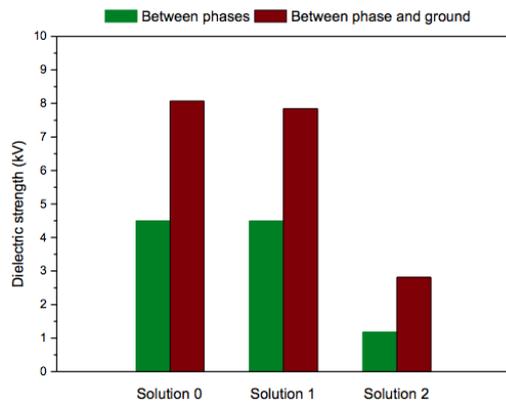


Fig.18 Evolution de la tension de claquage (f = 50Hz, dV/dt=1kV/s)

Cela n'est pas obligatoirement un point bloquant pour la conception d'une machine ; d'une part les matériaux utilisés dans les solutions 2 et 3 sont capables de résister aux

phénomènes de décharge, d'autre part il est possible d'adapter les bobinages de manière à limiter les contraintes inter-spores de manière à ne pas faire apparaître de décharges partielles ou autres. La figure 18 qui présente l'évolution des tensions de claquage inter-spore et spire/masse confirme les observations précédentes en montrant une tension de claquage nettement plus faible de la solution silicone/fibre de verre. La figure 19 présente quant à elle l'évolution du PDIV de la solution 3 au delà de 300°C. On constate qu'il continue à descendre puis vient se stabiliser. Cela tend à montrer que ce type de matériaux semble adapté pour les applications travaillant dans cette gamme de température.

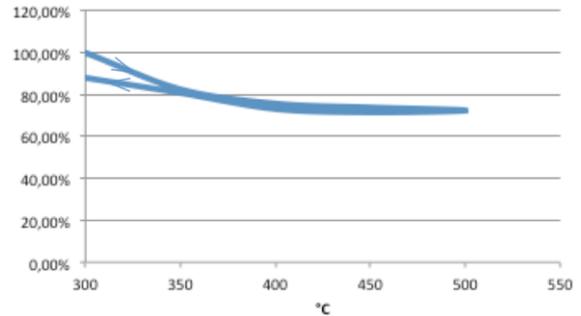


Fig.19 Evolution du PDIV de la solution 3 au delà de 300°C

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de faire une large campagne d'essais sur différents matériaux susceptibles 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.

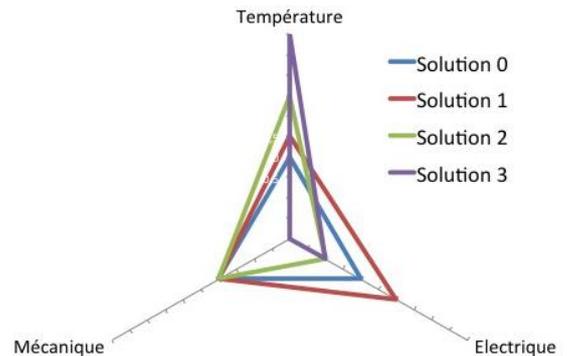


Fig.20 Comparatif des 4 solutions testées

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. En effet, ce dernier bien qu'il soit un point critique de la machine n'intervient que très peu dans la démarche de construction actuellement. L'utilisation de matériaux dont les caractéristiques électriques, mécaniques et thermiques très différentes impose de donner plus d'importance au SIE durant la démarche de conception. La figure 20 présente un

récapitulatif des 4 solutions testées permettant de mettre en évidence les plus adaptées à une montée en température en prenant en compte leurs propriétés thermiques, mécaniques et électriques. On constate que la solution 100% céramique est la plus apte aux températures les plus élevées mais que ses capacités mécaniques limitent les possibilités de bobinage pour une machine électrique et que ses propriétés électriques nettement moins bonnes que celles des matériaux organiques doivent être approvoisées.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs de cette étude tiennent à remercier l'Union Européenne qui a financé ces travaux par l'intermédiaire du projet Cleansky FP7.

7. REFERENCES

- [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] S. Mrowec, A. Stoklosa, "Oxidation of copper at high temperatures", *Oxidation of Metals*, Volume 3, Issue 3, 1971, pp. 291-311.
- [6] 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.
- [7] T. Heiser, A. Mesli, "Determination of the copper diffusion coefficient in silicon from transient ion-drift", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Volume 57, Issue 4, 1993, pp. 325-328.
- [8] K. Okamoto, T. Maeda, K. Haga, "Copper ion migration in insulated metal substrates", *Proceedings of Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, Rosemont, IL, USA, 1995, pp. 659-663.
- [9] S. X. Zhang, S.-W. R. Lee, L. T. Weng, S. So, "Characterization of copper-to-silicon diffusion for the application of 3D packaging with through silicon vias", *6th International Conference on Electronic Packaging Technology*, Dameisha, Shenzhen, China, 2005.
- [10] H. Mitsui, R. Kumazawa, R. Aizawa, T. Okamoto, T. Ito, M. Kanegami, "Investigation of the voltage life of mica-alumina composite insulation at high temperatures", *Electrical Engineering in Japan*, Volume 129, Issue 4, December 1999, pp. 24-31.
- [11] 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.
- [12] H. Mitsui, "Progress in Japan in electrical insulation at high temperatures", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Volume 12, Issue 3, 1996, pp. 16-27.
- [13] 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.
- [14] J.-M. Haussonne, "Céramiques pour composants électroniques", *Techniques de l'ingénieur, référence E1820*, 10 June 1996, p. 22.
- [15] D. Malec, V. Bley, T. Lebey, "Investigations on dielectric breakdown of ceramic materials", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP '05*, Tizi-Ouzou, Algeria, 2005, pp. 63-66.
- [16] J. F. F. Talbi, F. Lalam, D. Malec, "Dielectric breakdown characteristics of alumina", *10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Potstad, Germany, 2010.
- [17] C. Menguy, "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides", *Techniques de l'ingénieur, référence D2310*, 10 Août 1997, p. 31.
- [18] J.-M. Haussonne, *Céramiques pour l'électronique et l'électrotechnique*, Edition 1, Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2002.
- [19] J. A. Rice, P. E. Fabian, C. S. Hazelton, "Mechanical and electrical properties of wrappable ceramic insulation", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Volume 9, Issue 2, June 1999, pp. 220-223.
- [20] 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.
- [21] R. Schifani, R. Candela, P. Romano, "On PD mechanisms at high temperature in voids included in an epoxy resin", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 8, Issue 4, August 2001, pp. 589-597.
- [22] Dupont, *Technical Guide for NOMEX® Brand Fiber*, technical document H-52720
- [23] Shackelford, W. Alexander, *CRC Materials Science and Engineering Handbook*, Edition 3: CRC Press, 2000.
- [24] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines*, Edition 1: Wiley Interscience, 2004.
- [25] CEI 60317-38 : Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage - Fil de section circulaire en cuivre émaillé avec polyester ou polyesterimide et avec surcouche polyamide-imide, classe 200, avec une couche adhérente. CEI, 2000.
- [26] NEMA MW 1000 : Magnet Wire. ANSI/NEMA, 2012.
- [27] JIS C3202 : Enamelled winding wires. JIS, 1994.
- [28] *Winding wires - Test methods - Part 5: Electrical properties*, I. E. Commission, 1998.
- [29] P.C. Irwin, "Characterization of commercial corona resistant magnet wire enamels using nanoindentation techniques", *Proceeding on IEEE-Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference*, 2003, pp. 105-107.
- [30] T. Tanaka, G.C. Montanari and R. Mülhaupt, "Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 11, 2004, pp. 763-784.
- [31] H. Kikuchi, Y. Yukimori and S. Itonaga, "Inverter surge resistant enameled wire based on nanocomposite insulating material", *Hitachi Cable Review*, 21, 2002, pp. 55-62.
- [32] N. Fuse, Y. Ohki, M. Kozako and T. Tanaka, "Possible mechanisms of superior resistance of polyamide nanocomposites to partial discharges and plasmas", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 15, 2008, pp. 161-169.

