

# BOBINAGE A FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Gabriel VELU<sup>1,2</sup>, Stéphane DUCHESNE<sup>1,2</sup>, WalidBOUGHANMI<sup>1,2</sup>, Daniel ROGER<sup>1,2</sup>Ewa NAPIERALSKA<sup>1,2</sup>

1 UArtois, LSEE, F-62400 Béthune France

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

**RESUME** -L'étude d'un nouveau fil émaillé dont le procédé d'élaboration réduit fortement son impact environnemental est présentée. Cette étude est associée à celle d'un vernis dont la quantité de Composés Organiques Volatiles(COV) est très faible.Les nombreux essais tant mécaniques qu'électriques montrent que ce fil est aussi performant que le fil émaillé classique. Sur certaine caractéristique comme le PDIV il est même meilleur. Enfin la problématique de l'imprégnation, souvent faite sous vide et pression pour être performante, est abordée. L'emploi d'un vernis monomère réactif et d'une pré-gélification par lampe UV, permet de réduire fortement la perte de masse et d'améliorer toutes tes caractéristiques mécaniques exigée pour le fonctionnement des moteurs en milieu hostile.

*Mots-clés—impact environnemental, fils émaillés, polymérisation UV, Extrusion, sans COV, vernis d'imprégnation.*

## 1. INTRODUCTION

Le procédé classique d'émaillage consiste à appliquer successivement de très fines couches de vernis sur le fil de cuivre par des passages dans le bac de vernis et dans le four d'émaillage. Lapolymérisation des couches isolantes est obtenue par l'action combinée de la chaleur et de solvants inclus dans le vernis initial. Energétiquement, le procédé est coûteux malgré l'apport d'énergie due à la réaction chimique.Les bobinages des moteurs électriques réalisés avec le fil émaillé sont aussi, le plus souvent, imprégnés par des vernis. Ces vernis d'imprégnation utilisés sont des alkydes, polyester ou époxy en solution dans des solvants aromatiques, des polyesters en phase aqueuse ou des polyesters insaturés en solution dans le styrène, vinyltoluène.avec des vernis composés de 30 à 50 % d'extrait sec, les résidus gazeux dus aux solvants doivent être récupérés; cette opération est coûteuse et pas toujours facile à réaliser [1].

Une solution alternative, beaucoup moins polluante, a été mise au point ces dernières années. La fabrication du fil émaillé est alors basée sur un processus de polymérisation par UV qui n'utilise aucun solvant [2].Un nouveau vernis d'imprégnation est aussi développé à base de monomères réactifs qui ne s'évaporent pas au cours de l'étuvage grâce à une pré-gélification par lampe UV. Ce nouveau système d'isolation, sans COV (composé organique volatile), est un élément important qui permet de concevoir des moteurs électriques dont la construction a un impact environnemental réduit. Le fait de proposer un nouveau produit à hautes performances et à faible impact environnemental, compatible avec les nouvelles normes européennes, est, dans ce contexte économique un élément très important de son avenir industriel. L'imprégnation des

bobinages et la compatibilité chimique de tous les composants du moteur sont par conséquent deux facteurs essentiels. En effet, l'imprégnation des bobinages apporte des avantages significatifs au niveau de la tenue mécanique et donc de la résistance aux phénomènes vibratoires [3].

Ces travaux de recherche permettent de mieux appréhender le problème de l'isolation inter-spire mais aussi spire-masse dans sa globalité. Très souvent les études menées ciblent l'isolant du fil émaillé seul ou, à contrario, le vernis d'imprégnation seul. Ici notre démarche tient à globaliser les essais pour mieux évaluer les effets combinatoires de ces deux étapes du processus de fabrication des bobinages. Le véhicule électrique est un bon exemple: un gain, même faible, obtenu sur le coût environnemental de fabrication de chaque moteur électrique (propulsion et accessoires) correspond à une réduction de l'empreinte écologique globale importante. Le fil de bobinage à faible impact environnemental est fabriqué avec des isolants différents, par rapport au fil classique polymérisé à chaud par voie chimique. Il a par conséquent, des caractéristiques légèrement différentes.

Nous présentons les nombreux essais menés sur ces fils et leurs vernis d'imprégnations, ensuite nous détaillons les résultats intéressants obtenus en comparant à un fil et vernis classiquement employés dans l'industrie.

## 2. NOUVEAUX SYSTEME D'ISOLATION ESSAIS

### 2.1. Description

Le fil émaillé classique comporte deux couches isolantes : la première, en polyester imide assure l'isolation et la seconde en polyamide imide donne au fil émaillé les propriétés mécaniques nécessaires à sa mise en œuvre.

Les couches isolantes sont obtenues par une succession d'opérations chimiques de polymérisation qui sont faites dans des grands fours verticaux, contrôlés en température dont la hauteur peut atteindre 30m.

Le nouveau procédé est très différent, le fil émaillé est constitué d'une première couche de 20µm de Polyester acrylate qui assure l'adhérence au cuivre, au départ le monomère est contenu dans une solution, il est déposé sur le cuivre puis la polymérisation est obtenue par le rayonnement des lampes UV. Le fil passe ensuite dans une extrudeuse qui dépose une couche plus épaisse de PPS (poly-phenylene-sulfide) ou PPS/PPSU (Poly-phenyl-sulphone) porté à une température voisine de 400°C (Figure 2). Cette seconde opération se fait sans aucune réaction chimique, le polymère arrive dans l'extrudeuse sous forme de granulés. Le nouveau procédé ne nécessite qu'un seul

passage dans chaque filière, il peut fonctionner à grande vitesse; actuellement la machine prototype fonctionne à 300 m/min soit trois fois plus rapide que le procédé classique. La figure 1 schématise ces deux procédés.

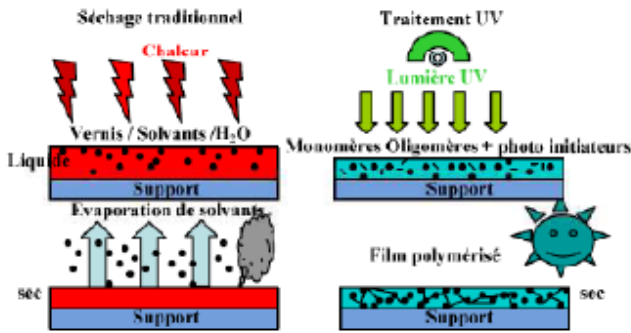


Fig.1 : Comparaison illustrative des procédés d'émaillage Mettre ici le titre de la figure

### 2.2. Etude du vernis d'imprégnation

Les vernis d'imprégnation actuellement utilisés sont principalement des alkydes, polyester ou époxy en solution dans des solvants aromatiques, des polyesters en phase aqueuse ou des polyesters insaturés en solution dans le styrène, vinyltoluène. Les vernis sont entre 30 et 50 % d'extrait sec et il est donc nécessaire de récupérer les solvants, opération très coûteuse et pastoujours facile à réaliser. Tandis que le vernis sans COV est un vernis acrylate à 100% d'extrait sec qui réagit par réaction radicalaire initiée par une voie photochimique ou/et par une voie thermique.

## 3. EXPERIMENTATION

### 3.1. Tension de claquage

Il s'agit de mesurer la tension de claquage d'isolant en appliquant une tension sinusoïdale aux bornes d'une paire torsadée de fil. Les éprouvettes torsadées qui subissent les tests, sont fabriquées selon des méthodes normalisées [4]. Une sonde HT est utilisée afin de relever la valeur de la tension qui crée un arc de claquage entre la paire torsadée.

Le Tableau 1 résume les résultats obtenus sur les différents types de fil. Pour chaque type de fil testé, la valeur obtenue est une valeur moyenne de dix échantillons. La vitesse de montée est conforme à celle indiquée dans la norme NF EN 60851[5], c'est-à-dire 100V/s pour les tensions inférieures à 2500V et 500V/s pour celles supérieures à 2500V. Les tests ont montré des fortes variations de diélectriques sur les différents types de fils fabriqués. En effet sur la même bobine et à plusieurs longueurs de fil, les comportements de diélectriques sont variables. Pour cela une étude d'analyse métallographique a été envisagée sur les plusieurs échantillons de fil émaillé afin de contrôler l'excentricité de la couche d'émail.

Tableau 1. . Tension de claquage des différents types de fils isolés

Type de fil émaillé	Description	Valeur en KV)
PE + PPS	PE(1,00mm) chargé	10
PE + PPS	PE (1,00mm) non chargé	6
PE + PPS	PE (1,00mm) chargé	3
PE + PPS	PE (1,01mm) chargé	3
PE + PPS	PE (1,00mm) chargé + PA1	5
PE + PPS	PE (1,00mm) chargé + PA préchauffage à 150°C/2H2	5,2
PE + PPS/PPSU	PE (1,00mm) chargé	5
PE + PPS/PPSU	PE (1,01mm) chargé	5
PE + PPS/PPSU	PE (1,01mm) chargé + PA	5
PE + PPS/PPSU	PE (1,00mm) chargé + Plasma <sup>3</sup>	6,5
PE + PPS/PPSU	PE (1,00mm) chargé + BV4	1,2

<sup>1</sup> PA : promoteurs d'adhésion (5 %) ajoutés dans le vernis UV

<sup>2</sup> Fil émaillé est préchauffé avant le test de diélectrique

<sup>3</sup> Plasma est placé avant la filière UV

<sup>4</sup> PPS/PPSU chargé par de billes de verres

### 3.2. Tenue aux contraintes thermiques

La Figure 2 représente les nombres d'éprouvettes non défaillantes après chaque d'épreuve en fonction de cycle à 250°C exprimés en jours pour les fils émaillés PE+PPS. D'après cette figure, les éprouvettes qui utilisent le fil PE non chargé + PPS et imprégnées par le vernis classique ISO800 commencent à vieillir plus rapidement que les autres. Au bout de trois cycles (9j), les éprouvettes défaillantes dépassent 50%. Les échantillons fabriqués à base de fil PE chargé + PPS et imprégnés par le GII370 tiennent jusqu'à 8 cycles (environ 24j). Ces échantillons possèdent la meilleure endurance thermique. On peut constater aussi que le fil non imprégné possède une tenue aux contraintes thermiques meilleure que celui imprégné par le vernis classique ISO800.

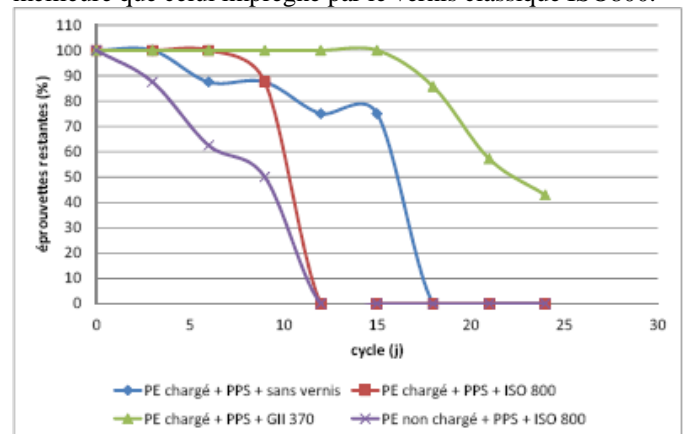


Fig. 2 : Cycle de vieillissement accéléré à 250°C/3j pour fil PE+PPS

Les essais de vieillissement thermique à 250°C/3j, appliqués cette fois sur le fil PE+PPS/PPSU montrent que les échantillons d'éprouvettes imprégnés par le vernis ISO800

tiennent 13 cycles (environ 40j), ils sont les premiers défaillants. D'après cette étude, le fil PE +PPS/PPSU que ce soit imprégné par le vernis GII370 ou non, possède une endurance thermique nettement meilleure que le fil standard. Après 20 cycles (60j), il reste encore plus de 80% des éprouvettes en vie.

### 3.3. Tenue aux contraintes mécaniques

L'essai Dexter est un test de compatibilité du vernis d'émaillage avec les vernis d'imprégnation. Pour les applications de moteurs imprégnés, le fil utilisé devra satisfaire à cet essai Dexter.

#### Procédure de préparation des échantillons :

Les éprouvettes sont constituées par des bobines hélicoïdales de fil qui sont enroulées à spires jointives sur 75 mm de long sur un mandrin de 6 mm de diamètre. Elles sont trempées dans le vernis pendant 10 s puis suspendues. Elles sont ensuite polymérisées en étuve à 90°C pendant 30 minutes, sorties et imprégnées de nouveau dans l'autre sens et remises en étuve à 90°C pendant 30 minutes puis 4h à 150°C. Toutes les éprouvettes sont ensuite testées sur une machine de traction par un système de flexion 3 points et une force est appliquée jusqu'à la rupture des éprouvettes (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**3).

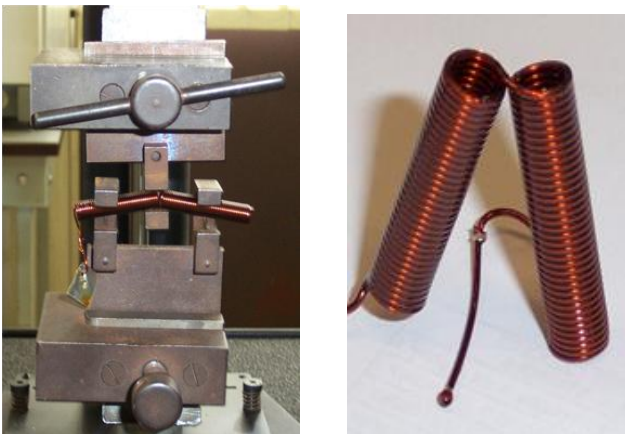


Fig.3. Machine de traction et éprouvette (bobine hélicoïdale jointive) après rupture.

Les éprouvettes sont ensuite observées, à l'œil nu, à l'endroit de la cassure et on ne doit observer aucune zone de cuivre nu (sans émail). Les tests sont effectués avec les vernis homologués suivants :

Isopoxy 800 utilisé à 20 ± 2 % d'extrait sec (fournisseur : Elantas Beck).

GII 368 ou 369 utilisé à 100 % d'extrait sec (fournisseur Green Isolight).

Pour chaque test, cinq éprouvettes sont soumises à l'essai Dexter, la valeur moyenne représente la force d'adhésion mécanique.

Les résultats de test Dexter sont résumés dans le Tableau 2 pour deux températures de test : 20°C et 180°C. Rappelons que le fil utilisé dans cet essai est un fil classique de type (PEI+

PAI).L'observation à l'œil nu des éprouvettes après la rupture montre que le décollement se produit entre l'émail de base et le vernis d'imprégnation. Cette observation permet de s'assurer que la force de collage du vernis d'imprégnation est mécaniquement suffisante (> 15kg @20°C) et pas trop forte ce qui entrainerai un décollement de vernis d'émaillage du cuivre.

Tableau 2. Test d'adhésion mécanique

TEST	20°C	180°C
ISO 800	22 kg	9,5 kg
GII 368	19,5 kg	11,5 kg
GII 369	27,5 kg	13 kg

### 3.4. Tenue aux contraintes électriques

Le fil émaillé utilisé dans une machine électrique alimentée par des convertisseurs statiques peut-être soumis à des contraintes électriques. Ces contraintes sont liées aux décharges partielles qui peuvent se produire dans l'émail isolant. Afin d'avoir une première idée comparative sur l'apparition de décharge partielle (DP), on a décidé de mesurer le PDIV qui représente le seuil d'apparition de DP, en fonction de la température. Des éprouvettes torsadées sont aussi utilisées pour réaliser des tests comparatifs en variant le type de fil et le vernis d'imprégnation. La Figure 3 illustre le résultat de mesure du PDIV en fonction de la température pour des éprouvettes non imprégnées à base du fil (PE+PPS), (PE+PPS/PPSU) et (PEI+PAI). La figure montre que peu importe quel type de fil, le PDIV diminue en fonction de la température. L'énergie apportée par chauffage donne plus de facilité aux atomes de gaz à être ionisés d'une manière générale. Cet apport énergétique baisse alors le seuil d'apparition des décharges en réduisant le libre parcours moyen des espèces mises en jeu. Le fil classique possède un PDIV moins élevé que celui du fil UV, que ce soit avec la surcouche PPS ou PPS/PPSU. Cette différence peut être expliquée par la nature différente des isolants mais aussi le procédé mis en œuvre sans solvant qui favorise l'absence de vacuole au sein même de l'émail obtenu.

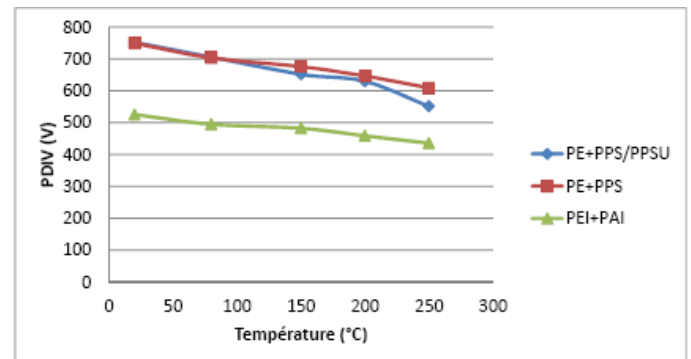


Figure 3 : PDIV mesuré sur paires torsadées (non imprégnées) en fonction de la température

#### 4. CONCLUSION

L'étude durant ce projet, a été focalisée sur la caractérisation de fil fabriqué par le nouveau processus de polymérisation UV en le comparant au fil émaillé standard. Plusieurs types de fil ont été fabriqués et testés, mais aussi intéressés dans ces différents vernis d'imprégnation. Les fils testés sont à base de PE (chargé ou non) + PPS ou PPS/PPSU avec des épaisseurs, à chaque fois, différentes.

Les essais de vieillissement thermique accéléré, démontrent que le fil PE+PPS/PPSU possède un indice de température beaucoup plus élevé que celui de fil PE+PPS. Le vernis GII370 est parfaitement compatible avec l'émail des fils testés. Par conséquent, il permet de prolonger la durée de vie des éprouvettes. Au contraire, le vernis standard Isopoxy800 n'apparaît pas d'après ces essais compatibles avec l'émail UV puisque les éprouvettes non imprégnées quel que soit le type de fil, tiennent mieux aux contraintes de chaleur que les éprouvettes imprégnées par le vernis ISO800. Une première explication peut être apportée par la présence de solvants dans le vernis pouvant dégrader la couche extrudée d'émaillage.

D'après tous les essais comparatifs menés dans cette étude, on déduit que le fil émaillé à base de PE (chargé) + PPS/PPSU offre un indice de température nettement élevé de 200°C. Il possède des meilleures propriétés mécaniques entre 20°C – 240°C. Sous des contraintes électriques, ce fil a un PDIV plus élevé en fonction de la température. Les fortes variations de diélectriques sont directement liées à la stabilité du processus

de fabrication. Le vernis d'imprégnation GII 370 offre une meilleure adhésion du bobinage. Ce vernis permet de réduire lors de polymérisation les pertes en masse grâce à la pré-gélification UV et les pertes énergétiques grâce à l'optimisation du couple « température/temps » d'exposition. Sous des contraintes thermiques, GII 370 a une endurance thermique nettement meilleure en comparaison aux autres types de vernis.

#### 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement le pôle de recherche régionale MEDEE pour son aide au financement de cette action menée entre le LSEE, Tecumseh Europe et Green Isolight International. Ils remercient aussi la région Nord Pas de Calais pour le financement au travers notamment de fonds FEDER.

#### 6. REFERENCES

- [1] W. Boughanmi, J.P. Manata, D. Roger et P.Frezel : "Analyse comparative de l'imprégnation d'un bobinage et de diverses solutions de Thermo collage", conférence CONFREGÉ 2010 Toulouse, (France).
  - [2] W. Boughanmi « éco-conception des motorisations électriques : application à la machine asynchrone », thèse doctorat, Université d'Artois, 2012.
  - [3] CEI61033 « Méthodes d'essai pour la détermination du pouvoir agglomérant des agents d'imprégnation sur fil émaillé » Avril 1991.
  - [4] CEI60172 « méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinages émaillés » Juin 1995.
  - [5] NF EN 60851-5 « fil de bobinage : méthodes essais , partie 5 : propriétés électriques » Indice : C31-0235 Fév. 1998
- Peut-on ajouter quelques références?