



Solutions busbars laminés pour diminution des décharges partielles

Présentation des résultats d'un projet européen de AUXEL sur une technologie de busbars laminés permettant la réduction des décharges partielles.

Jean-François WECXSTEEN – AUXEL (Responsable support innovation)
27/10/2020



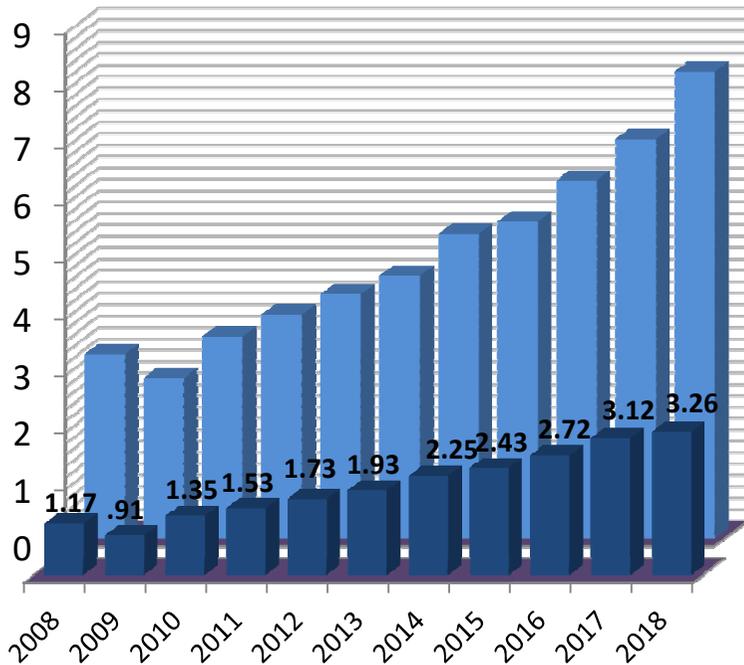
Sommaire

- La société AUXEL (Groupe AMPHENOL)
- Le busbar laminé
- Deux notions pour bien comprendre les décharges partielles
- V.I.L.B ?
- Perspectives de recherches autour de V.I.L.B
- Marchés
- Points clés - Conclusions

AMPHENOL AUXEL

About AMPHENOL

- Net Sales (\$ in billions) / EPS (\$ - dark blue)

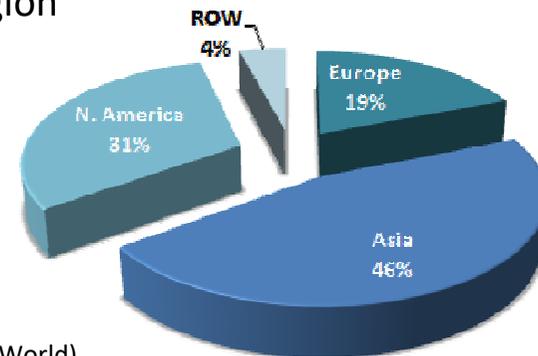


- 8,2B\$ revenue (≈7,4B€)
- 110 countries
- 78 000 Employees
- Successful acquisition program in consolidating industry
- Industry leading growth for over a decade >2X Industry Growth (CAGR)

- % Sales by Market

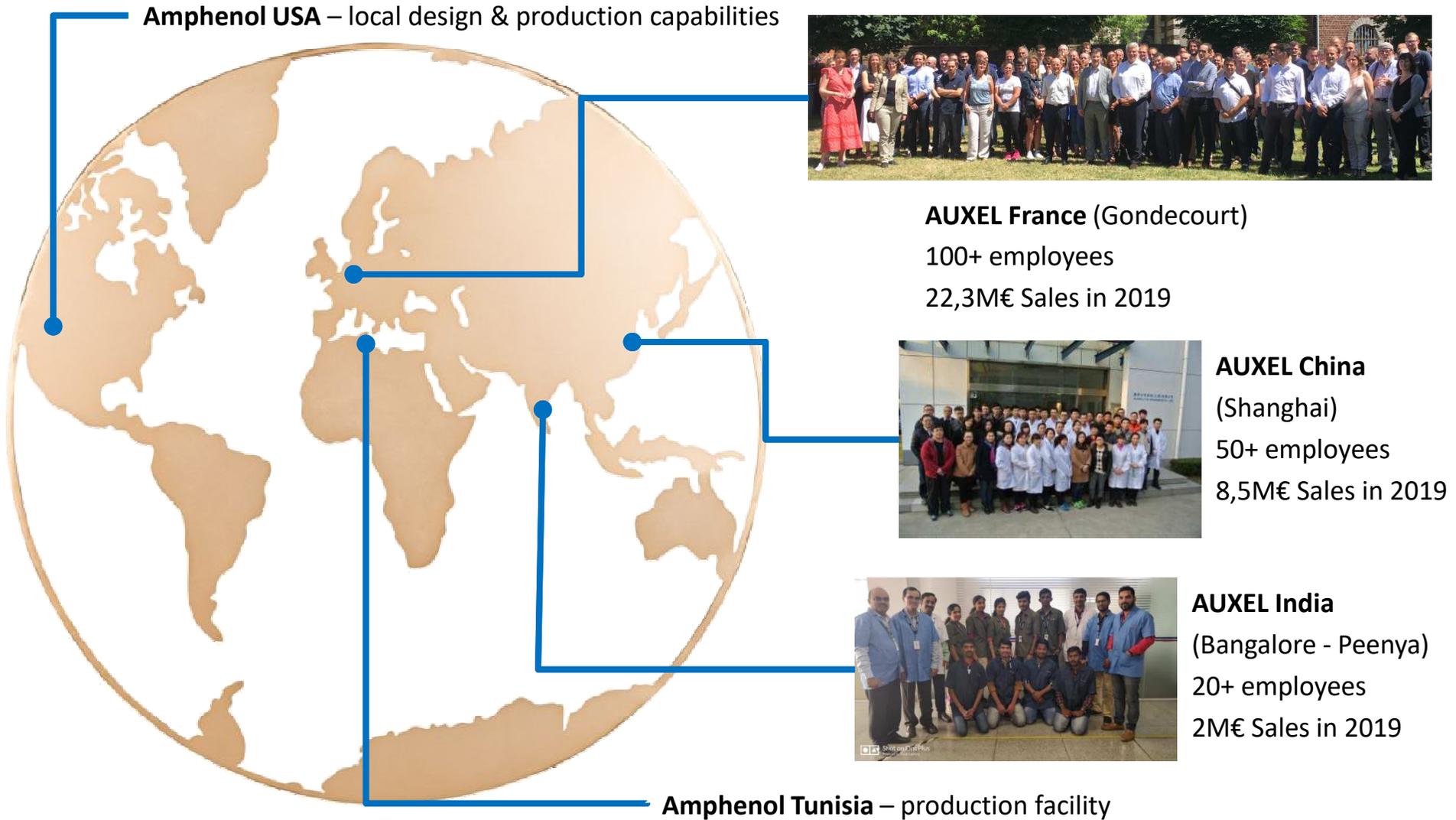


- % Sales by Region



(ROW = Rest Of the World)

Amphenol AUXEL Worldwide



Our Customers and Markets

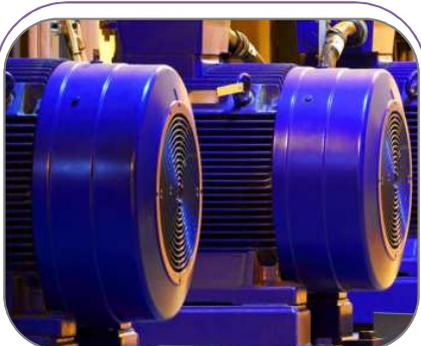
- Primary markets and customers



Renewable energy



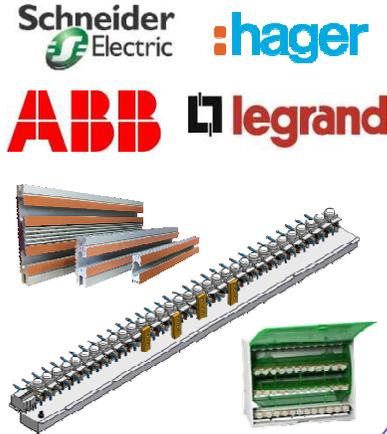
Traction



Industrial & OEM specific developments



LV panel boards & switchgears



Our Customers and Markets

- Diversification Initiatives...



Aircraft



Marine



IT Datacom

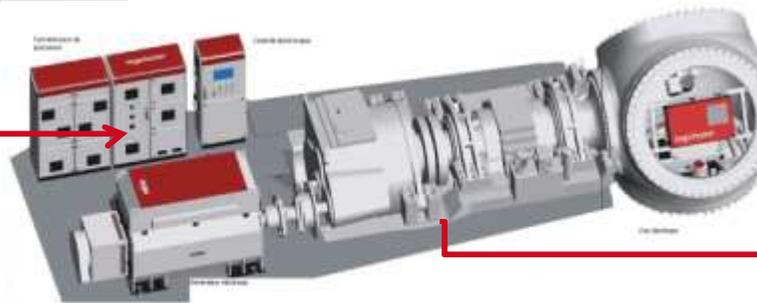
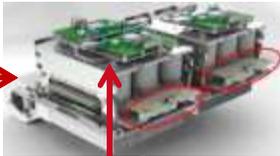


Electric Vehicles & infrastructures



Busbar laminé?

Le busbar laminé



Busbar laminé

- Circuit d'interconnexion pour l'électronique de puissance (composants passifs & actifs) (100kW => 8MW)
- empilement de conducteurs électriques **plats** avec isolation électrique mince
- **faible inductance**, aptitude à commuter des courants forts en fréquence (effet de peau), bonne dissipation thermique

Technologies d'isolation électrique des busbars laminés

(1) Poudrage époxy

(2) Enrobage silicone

(3) Film isolant souple non collé

(4) Film isolant souple collé à chaud sous pression

...

(5) *V.I.L.B*

(1) Poudrage époxy

Avantages

- Epaisseur typique 50-200 microns
- Très bonne tenue mécanique
- Bonne tenue à la température (150-180°C)
- Bonne résistance électrique
- Du prototype à la grande série

Neutre

- Coût

Limites

- Revêtement dur, mais peut être cassant et fissurable,
- Difficulté d'obtention d'épaisseurs constantes et régulière,
- Nécessite du masquage,
- Précautions si niveau d'exigence en décharge partielle,
- Assemblage ultérieur possible, mais plutôt pour des conducteurs isolés unitaires
- Parfois sécurisation de l'isolation électrique par ajout d'un film PET entre deux conducteurs



Crédit photo : Methode Electronics

(2) Enrobage silicone

Avantage

- Tenue en température ($> 180^{\circ}$)
- Résistance au choc
- Bonne isolation électrique

Limites

- Ne convient pas pour épaisseur faible (1 \Rightarrow 5 mm)
- Nécessite un masquage
- Plutôt pour des conducteurs isolés unitaires. Assemblage ultérieur possible,



Crédit photo : Thermoresine S.r.l

(3) Busbar à film isolant non collé

(Busbar laminé « stacké »)

Avantages

- Faible épaisseur de l'isolation => Circuit de faible inductance
- Bonne tenue en température (suivant nature du film)
- Productivité élevée – faible coût

Limites

- Tension de service < 1000 V (lié à la faible résistance électrique de l'air)
- Non adapté si exigences en décharge partielle,
- limites de conception (distance d'isolement et de cheminement électrique)



Crédit photo : AMPHENOL

(4) Busbar laminé à film isolant souple thermocollé

Avantages

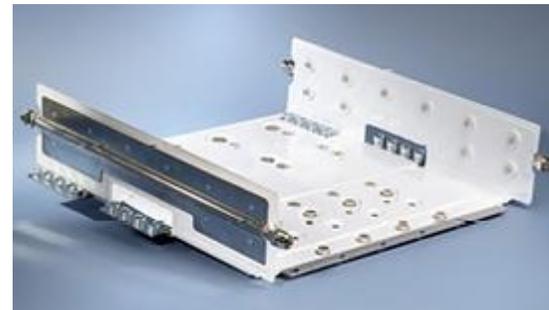
- Résistance électrique
- Faible épaisseur de l'isolation => Circuit de faible inductance
- Pas de masquage
- Seuil élevé d'apparition des décharges partielles (busbar laminé pour convertisseurs 6,6 kV)
- Désormais disponible pour des températures élevées (180°)

Limites

- Coûteux en version Hte T°
- Productivité faible (presses chauffantes et outils dédiés)
- Procédé énergivore



Crédit photo : AUXEL



Crédit photo : AUXEL

Deux notions pour comprendre
la décharge partielle dans
un busbar laminé

(1) Rigidité diélectrique (tension de claquage)

Rigidité Diélectrique : E

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). Elle s'exprime en Volt/mètre

Facteurs d'influence pour les isolants gazeux (air)

Loi de Paschen

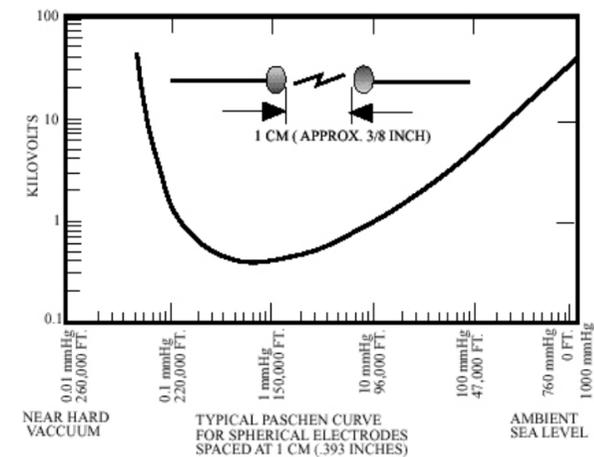
- température
- **pression** (3kV/mm niveau mer - 120V/mm à 13.000m)
- hygrométrie
- degré de pollution

Facteurs d'influence pour les isolants solide

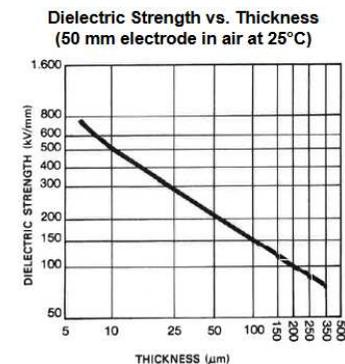
- température
- épaisseur de l'isolant

Rigidité diélectrique de certains matériaux :

- air sec (1 bar – 20 °C) : **3 kV/mm**
- Mylar (PET) : variable en fonction de l'épaisseur mais **100 kV/mm** à 200 μ
(tension de claquage de l'air \ll tension de claquage de l'isolant)



Crédit photo : TELEDYNE REYNOLDS



Crédit photo : Dupont Teijin

(2) Permittivité relative

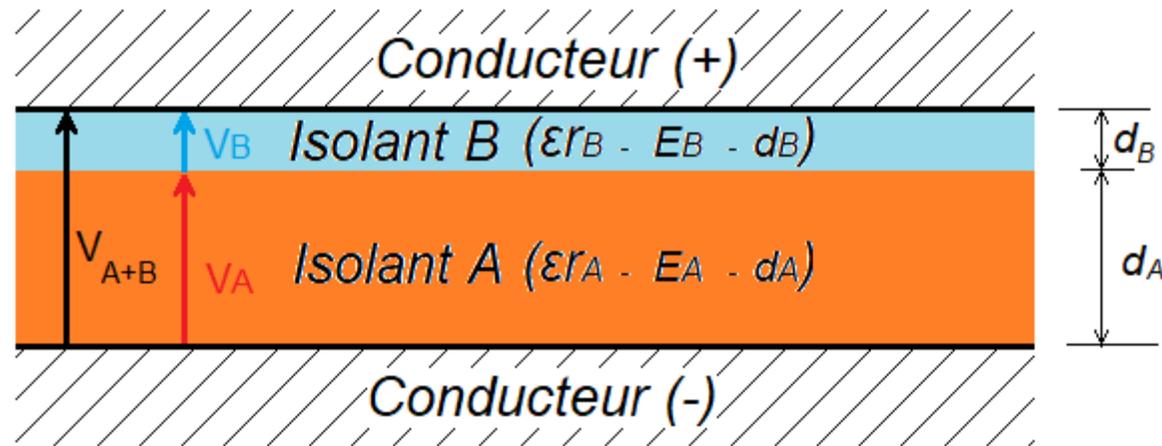
Permittivité relative : ϵ_r

La permittivité, est une propriété physique qui décrit la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué. Elle traduit la façon dont le champ électrique influe sur l'organisation des charges électriques dans un matériau donné.

*La permittivité **relative** est le ratio entre la permittivité du matériau et celle du vide*

- Permittivité relative de certains matériaux :
- air ou vide : 1
- Mylar (PET) : 3,3 (60Hz & 25°C) 3,7 (60 Hz – 150°C)
- verre (5 à 7)

Formulation d'un cas simple théorique



V : Tension d : épaisseur isolant E : rigidité dielectrique ϵ_r : permittivité relative

Crédit photo : AUXEL

$$V_A = \frac{V_{A+B}}{\left(1 + \frac{\epsilon_{rA} d_B}{\epsilon_{rB} d_A}\right)} \qquad V_B = \frac{V_{A+B}}{\left(1 + \frac{\epsilon_{rB} d_A}{\epsilon_{rA} d_B}\right)}$$

Le matériau qui a la permittivité relative la plus faible subira un champ électrique le plus intense...
(pas de chance ... c'est l'air!)

Exemples théoriques simples

Isolant A : MYLAR (PET) - Isolant B : air

V = 6000 volts

Ep PET Mylar : 5 mm

Ep air : 2 mm

V air = 3273 V pour 2mm soit 1636 V/mm

⇒ OK

V = 6000 Volts

Ep air : 0,05 mm (busbar plaqué non collé)

V air = 175 V pour 0,05mm soit 3495 V/mm

⇒ décharge dans l'air

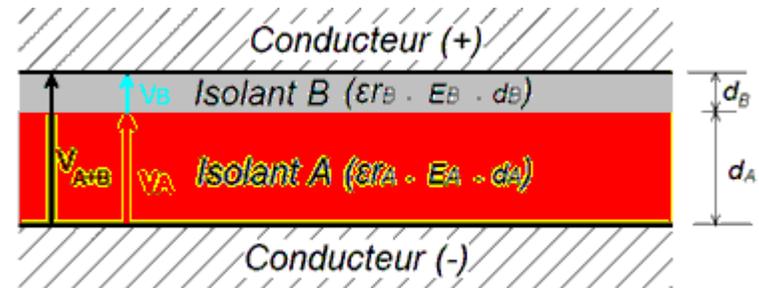
V = 1200 Volts

Epaisseur Mylar : 1mm

Ep air : 0,05 mm (busbar plaqué non collé)

V air = 157 V pour 0,05mm soit 3130 V/mm

⇒ décharge dans l'air



V : Tension d : epaisseur isolant E : rigidité dielectrique εr : permittivité relative

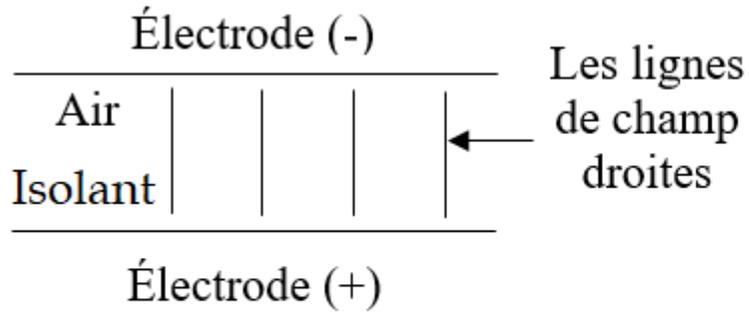
Crédit photo : AUXEL



V : Tension d : epaisseur isolant E : rigidité dielectrique εr : permittivité relative

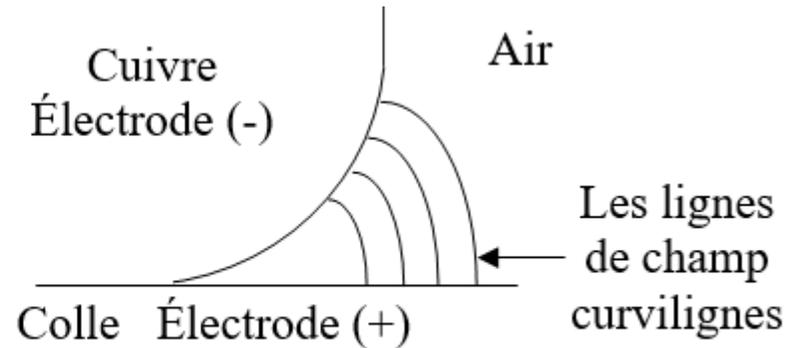
Crédit photo : AUXEL

Décharges partielles dans les busbars laminés



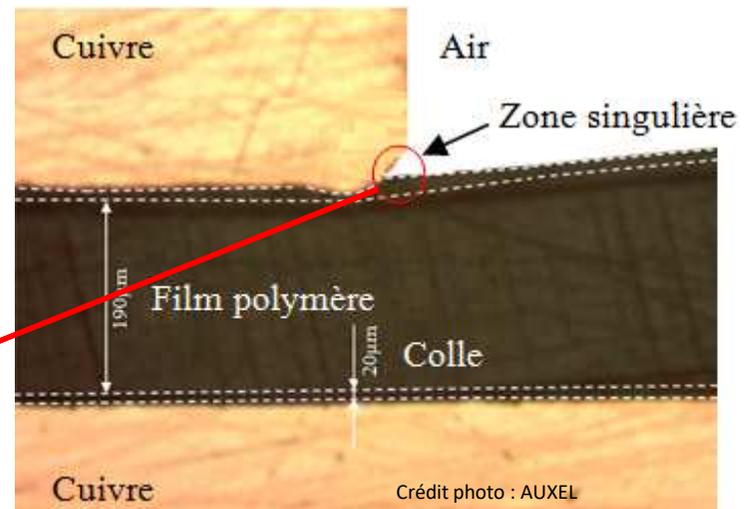
Crédit photo : AUXEL

Cas théorique simplifié

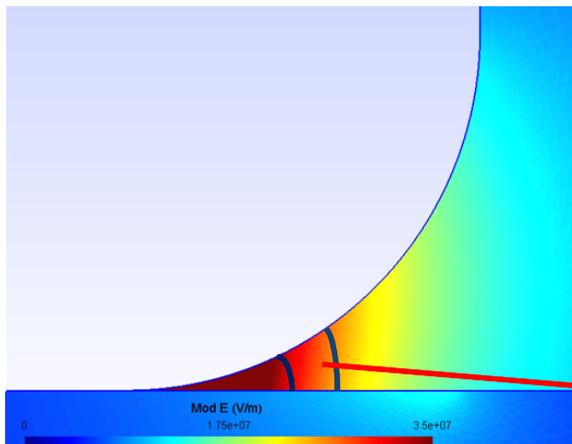


Crédit photo : AUXEL

Cas réel du busbar laminé : extrémités



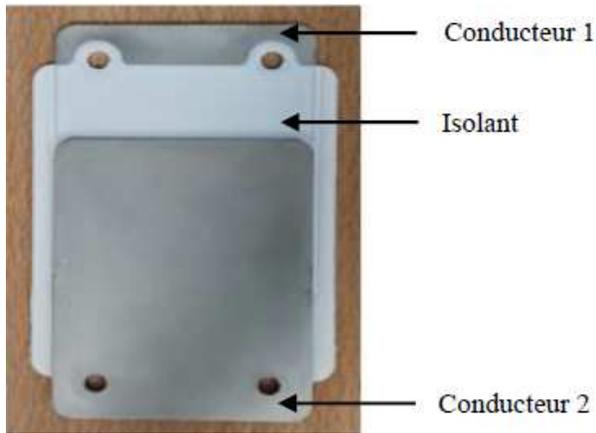
Crédit photo : AUXEL



Crédit photo : AUXEL

Distance critique dans l'air 5-15 microns
 - en deçà : distance trop courte pour apparition de DP
 - au-delà : possible apparition de DP
 (Cf courbe de Paschen)
 (thèse AUXEL & LSEE - Mahdi SELLAH)

Détection optique des DP avec caméra photomultiplicateur



Crédit photo :AUXEL

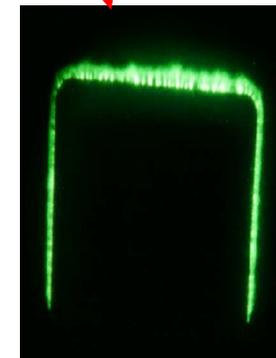
Localisation des DP via système optique
"Corona Finder" qui produit une image visible
à partir du rayonnement UV émis par les DP.

Les DP apparaissent dans la zone de triple
jonction où l'air est en contact avec le cuivre et
le polymère.



Crédit photo :AUXEL

(vue d'artiste – se fait dans le noir ...)



Crédit photo :AUXEL

Les effets de la décharges partielles

Vieillessement électrique accéléré avec machine de test dédiée

Application d'une tension alternative 50hz supérieur au seuil d'apparition des décharges partielles (env. 1,6 kV)

3kV – 20° => 350h (+/- 97 h)

3kV – 80° => 96h (+/- 7h)

3kV – 130° => 58h (+/- 7h)

4kV – 20° => 172h (+/- 20h)

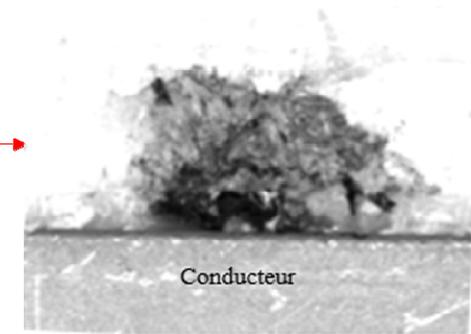
=> effets délétères rapides des DP et de la T°
=> seraient encore plus rapide en fréquence de commutation plus élevée

(thèse AUXEL & LSEE - Mahdi SELLAH)



Crédit photo :AUXEL

Zoom



Crédit photo :AUXEL



Crédit photo :AUXEL

Comment éviter les décharges partielles?

DP : micro décharges électriques localisée dans une cavité d'une isolation électrique sous un champ électrique. Ces micro-décharges vont provoquer une érosion progressive de l'isolant

(1) Eviter les zones d'air dans l'isolation:

- isolation collée au conducteur
- limiter la taille des zones d'air (< 10 microns)
- remplir les zones « singulières » par une matière isolante

(2) limiter l'intensité du champ électrique, là il y aurait présences de zones d'air (malgré le besoin de rapprocher les conducteurs pour réduire l'inductance):

- arrondir les arêtes des conducteurs (éviter les effets de pointes)
- réduire la permittivité relative de l'isolation
- réduire l'intensité du champ électrique (le déplacer),

(3) Vivre avec les DP...

- isolation résistante aux décharges partielles (incorporation de matière inorganique)

La technologie V.I.L.B va apporter des réponses à ces contraintes.

V.I.L.B ?

V.I.L.B ?

(**V**arnished **I**nsulated **L**aminated **B**usbar)

Remplacement du film souple collé ou d'un revêtement en poudre par un isolant utilisé dans le bobinage électrique: **le fil émaillé**

Le projet VILB est un **transfert technologique** entre l'industrie des transformateurs et machines tournantes électriques (fil émaillé) et les onduleurs statiques

Un concept qui ne part pas de zéro :

- de nombreux fournisseurs de vernis et de composants de base
- déjà largement utilisé dans le domaine électrique "Courant et tension élevés".
- les normes d'essai pertinentes disponibles

Des performances robustes pour répondre aux exigences croissantes de l'électronique de puissance

(l'intérieur d'un moteur électrique n'est pas spécialement un havre de paix : vibrations, température, décharge partielle, rigidité diélectrique, pollution ; . .)

Caractéristiques innovantes développées pour le projet :

- Basé sur un vernis sans solvant,
- Assemblage possible avec de la colle thermo-adhésive UV, ou imprégnation VPI
- Technologie de micro-pulvérisation (=> multicouches fines)
- Réticulation rapide sous UV LED



Crédit photo :AUXEL

©2018 AUXEL S.A.S
www.auxel.com

V.I.L.B pour busbar laminé

Conducteur isolé

Chaque conducteur est isolé individuellement par de multiples couches fines de vernis sans solvant et réticulation UV entre chaque couche (couches de 5-20 microns pour obtenir 200 μ)

Confection du busbar laminé par assemblage des conducteurs:

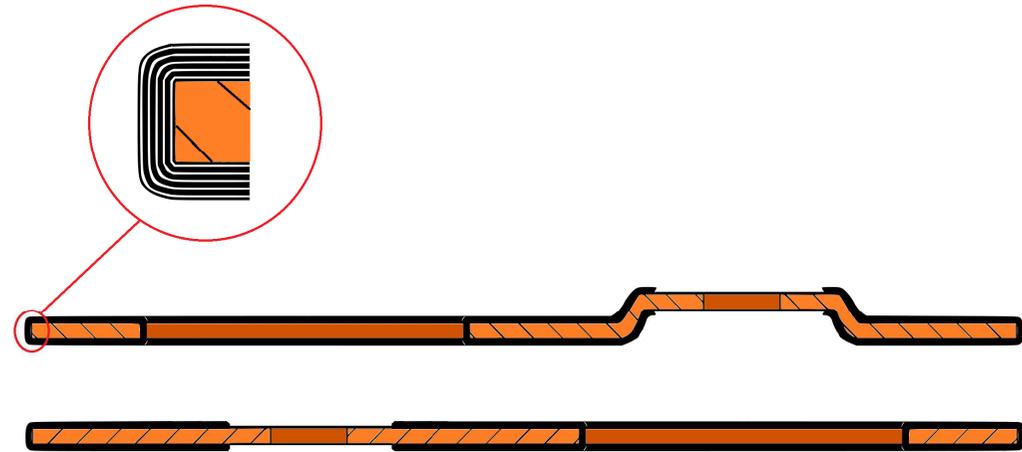
- assemblage mécanique
- collage par thermoadhérent UV
- assemblage par VPI (imprégnation sous vide)

À base de vernis

- base acrylique non aqueuse
- sans solvant
- mais avec diluant (pour baisser la viscosité)
- avec agent photo-initiateur pour réticulation aux UV LED (365-395 nm)
- avec adjuvant thixotrope et promoteur d'adhérence
- possibilité de charges inorganiques pour améliorer les performances électriques

Conducteurs en cuivre ou aluminium

Traitement de surface : sans, étamage, nickelage, argenture,...



Crédit photo :AUXEL



Crédit photo :AUXEL

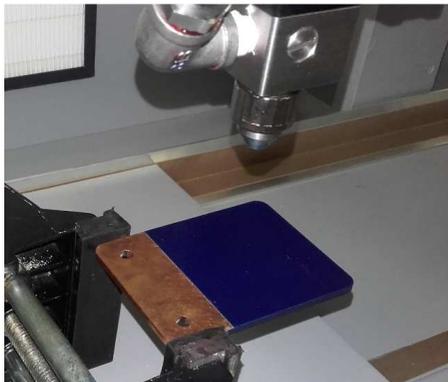
Notre mini-laboratoire VILB

- Equipement de micro-pulvérisation (surface de projection : dia 15mm)
- Mini robot cartésien à 3 axes
- 4 x 100 Watts LED UV (longueur d'onde 395 nm)
- Armoire avec filtration HEPA et aspiration par cartouche de charbon actif
- Petit chariot interne entre la zone de pulvérisation et la zone de séchage
- Taille maximale des conducteurs : 200 x 100 x 50 mm
- Armoire avec aspiration par cartouche de charbon actif pour le nettoyage et la préparation du mélange
- Mini réchauffeur d'air comprimé (50-60°)
- Réservoir à vide de 12 litres avec pompe à double étage,
- Peintures et vernis - Essai de coupe transversale (EN ISO2409)
- ...

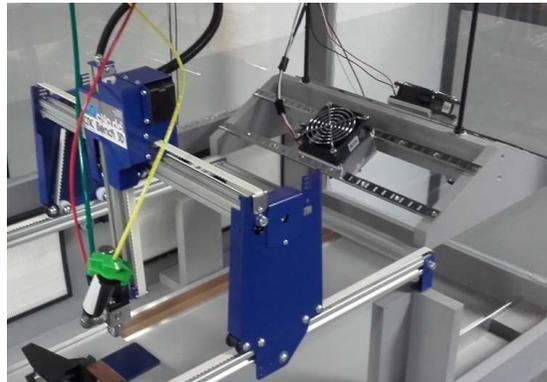


Crédit photo :AUXEL

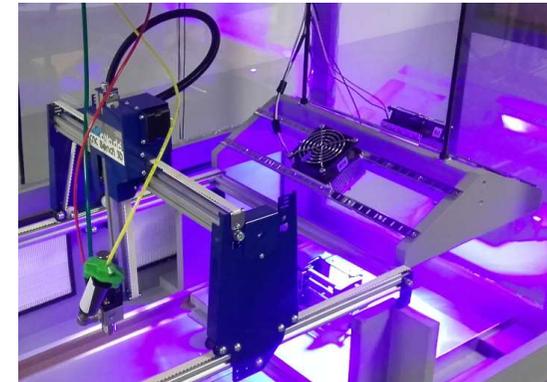
Et bien sûr tous les moyens d'essais d'AUXEL et du laboratoire LSEE (Métallographie, test diélectrique, Décharge Partielle, etc.)



Crédit photo :AUXEL



Crédit photo :AUXEL



Crédit photo :AUXEL

Brevets – Promotion de la technologie VILB

4 inventeurs :

Pour LSEE : Daniel ROGER - Gabriel VELU - Stéphane DUCHESNE

Pour l'AUXEL : Jean-François WECXSTEEN

La propriété intellectuelle partagée équitablement (50-50) entre l'AUXEL et l'Université d'Artois

Demande de brevets en cours (à partir du 6/10/2017)

- premier brevet pour LBB empilé ou collé

- deuxième brevet pour le procédé LBB & VPI

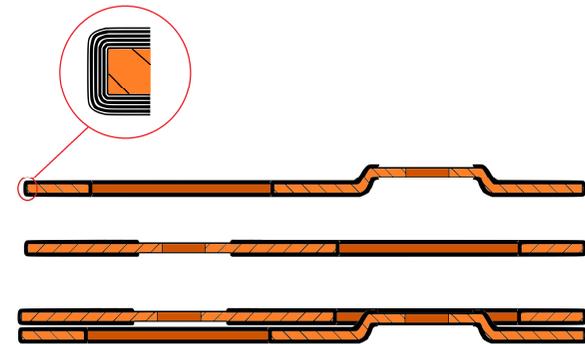
Contrat d'exclusivité attribué à AUXEL pour l'exploitation commerciale (12/2017)

Extension du PCT (Patent Cooperation Treaty) pour les pays étrangers : EUR, USA, CN, IN

Nous prévoyons d'obtenir TRL6-7 (avec fonds européens) dans les 12 mois

Présentation de la technologie VILB à nos clients privilégiés et pour travaux de recherche collaborative
=> Q1-2021

Présérie à partir de 2022?



Crédit photo : AUXEL

Des résultats ...

Dépose de vernis en multiple couche fine (15-20 μ) pour épaisseur finale de 150-200 μ , y compris sur les arêtes

Tenue en T° à 180° en continue => OK

Très haute température : essais à **280°C** plusieurs heures sans décollement

Rigidité diélectrique: 10kV AC sous 400 μ (8,5 kV sur arêtes)

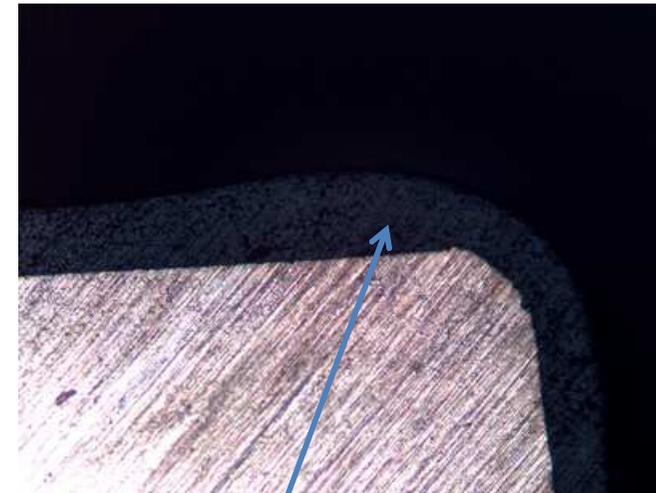
Seuil d'apparition des décharges partielles (conducteur seul isolé) : 2,2 kVAC

Estimation prudente prix de revient "série"

- compétitif/ busbar laminé à film thermocollé classe 105°
- moins cher (-25%) que busbar laminé film thermocollé classe 180°

Suite à donner

- Amélioration de la dépose par automatisation du procédé (robot 6 axes):
 - couche plus fines,
 - meilleur traitement des arêtes,
 - réduction temps opératoire
- confirmer les résultats en très haute température
- vieillissement
- essais complémentaires (ajouts de charges inorganiques)



Crédit photo :AUXEL

Vernis épaisseur: 150 μ

R&D context: one european project (CleanSky2)

Subject : Design and Development of a high temperature HVDC busbar for commercial aircraft (JTI-CS2-2017-CfP07-SYS-02-43) –

Duration : 36 months (nov 2018 => oct 2021)

Staff

- 1 x Project manager : JF WECXSTEEN (half time)
- 1 x Quality & testing Technician
- 1 x Process Design Technician

Topic Leader : ZODIAC AERO ELECTRIC (Subsidiary of SAFRAN Group)



Budget : Estimated budget : 650 k€
European grant : 497 k€

Other grants : 30 -100 k€ (?) *French Gouvernement helps (Research Tax Credit – C.I.R in french)*

Consortium

- AUXEL, as consortium leader
- LSEE (Electrotechnical Systems and Environment Research Lab – Artois University - France)



Perspectives de recherches autour de V.I.L.B

Amélioration déjà effective de la technologie V.I.L.B

Utilisation d'agent de couplage (type silane SiH_4)

=> additif utilisable dans le vernis

=> procure une très bonne adhérence du vernis sur le conducteur

(facteur clé : tant que le vernis est adhérent, l'isolation électrique est préservée)

=> aide à la dispersion de micro et de nano poudres



Après vieillissement:

sans silane

avec silane

Crédit photo :AUXEL

Utilisation de charges inorganiques (micro & nanométriques)

Charge inorganiques - Intérêts

- renforcement de la tenue à l'érosion électrique par décharges partielles
- augmentation de conductivité thermique de l'isolation électrique
- réduction des décharges partielles de contournement
- amélioration de la tenue en température,
- stabilité du revêtement, résistance mécanique,
- amélioration possible du CTI (Comparative Tracking Index - Résistance au courant de cheminement)

Sous forme de micro particules (MP) et/ou de nano-particules (NP)

Alumine (Al₂O₃, Silicium (SiO₂), Sulfate de baryum (BaSO₄), . . .

Challenges

- taux élevé nécessaire de MP (viscosité du mélange, transparence au UV)
- taux faible nécessaire en NP, mais conditions particulières pour disperser les NP dans le vernis (séchage, mélange, dégazage, adjuvant de couplage,...)

Bibliography

State of the art: insulating materials for HV, HT applications (Margarita RUEDA – AMPHENOL Internal study – 2019)

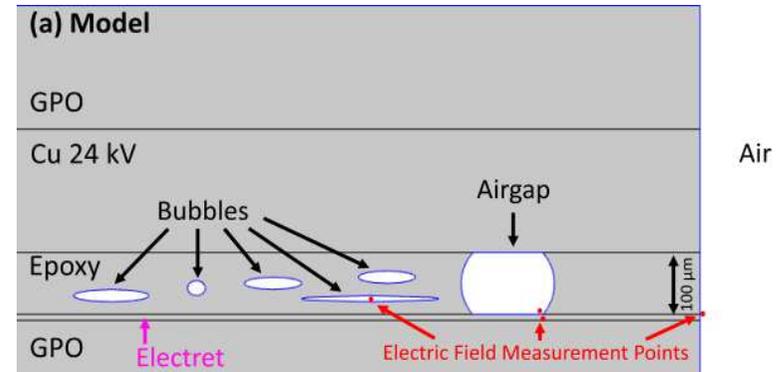
Thesis - Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques haute tension : influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage
Adnane Douar 2014

Electrical performance of epoxy resin filled with micro particles and Nanoparticles Mu Liang, K L Wong 2016

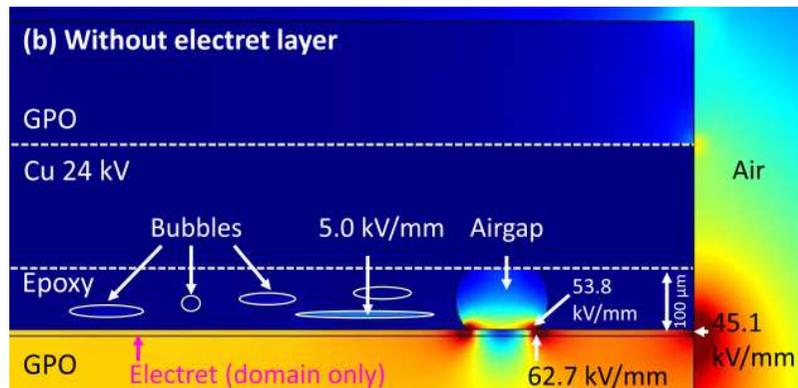
Réduction de la concentration du champ électrique

Utilisation de poudre ferroïque (électret) pour réduire la concentration du champ électriques (et les DP...)
(matériau : PVDF, BaTiO3,...)

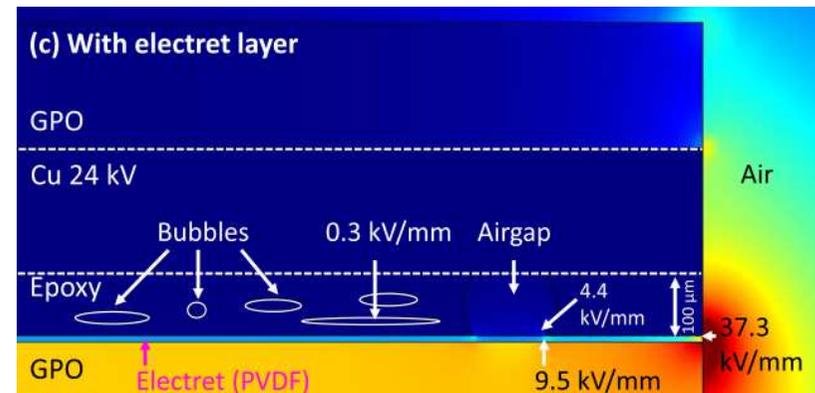
- Intérêt de la poudre ferroïque pour VILB
- capacité à mélanger la poudre d'électret avec le vernis
 - capacité de placer une fine couche d'électret dans n'importe quel niveau d'isolation
 - *mais très prospectif*



Crédit photo : cf bibliographie



Crédit photo : cf bibliographie



Crédit photo : cf bibliographie

Bibliographie

Electret: An Entirely New Approach of Solving Partial Discharge Caused by Triple Points, Sharp Edges, Bubbles, and Airgaps CHANYEOP PARK – April 2020

Couches fines multiples => couche finale épaisse

Utilisation de couches minces pour former une couche épaisse finale

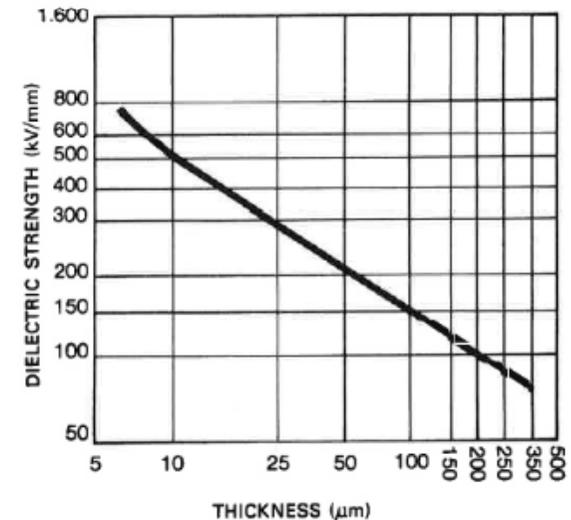
Avec la technologie VILB, nous avons la possibilité de réaliser l'isolation à partir d'un ensemble de plusieurs couches minces. Nous pensons que nous pouvons ainsi augmenter considérablement la résistance électrique.

Le concept de transport de charge et de déplacement moléculaire, explique une meilleure résistance diélectrique d'une couche isolante mince par rapport à une couche épaisse.*

Nos tests préliminaires montrent des résultats cohérents.

- 2 couches de 80 microns => 5 kV AC
- 4 couches de 40 microns => 5,8 kV AC

**Dielectric Strength vs. Thickness
(50 mm electrode in air at 25°C)**



Crédit photo :DUPONT TEIJIN

Bibliographie

*Thickness-Dependent DC Electrical Breakdown of Polyimide Modulated by Charge Transport and Molecular Displacement
Daomin Min , Yuwei Li, Chenyu Yan, Dongri Xie , Shengtao Li , Qingzhou Wu and Zhaoliang Xing - 2018

Marchés

Débouchés de la technologie VILB

VILB s'insère dans le marché dynamique du busbar laminé (progression annuelle supérieure à 6 %)

Nouvelle offre produit complémentaire au busbar laminé à film thermocollé

Basée sur une technologie d'isolation électrique plus performante que film thermocollés sur busbar laminés

=> 180° C continu. Prometteur en 240°C

=> Haut niveau de PDIV capable (x2)

=> moins cher (-23%) que busbars laminés Ht T° (180°). Compétitif/busbar standard

=> aptitude busbar grande longueur, busbar volumique non plat,

=> solution respectueuse de l'environnement (sans solvant, non énergivore, faible empreinte)

=> pas ou peu d'outil,

=> souplesse (pièce unitaire possible)

Offre produit exclusive

2 brevets internationaux (Europe – USA – Chine – Inde)

Réseaux

- réseau AMPHENOL pour la dissémination,
- réseau universitaire pour la recherche et l'amélioration de la technologie (L2EP, LSEE) & future thèse
- poles de recherche technologique (NAE, MEDEE...)

Marché des busbars "Techniques"

Marché des busbars haute température et /ou haute niveau de PDIV

- MEA – Avion plus électrique
- busbar interne pour modules de puissance SiC

Les points clés - Conclusion

VILB – Les points clés

- (1) Nouveau concept d'isolation haute température, et haut PDIV à structure de coût avantageuse.
- (2) Marchés de niches et influencés par rupture technologique (SiC, MEA, EV).
Haute valeur ajoutée.
- (3) Risque technologique mesuré car basé sur des technologies éprouvées dans des domaines électriques connexes (fils émaillés & moteurs électriques)
- (4) Stratégie de protection intellectuelle engagée.
- (5) Support financier important par un financement européen. Egalement lancement d'une thèse chez AUXEL (avec le LSEE) sur la thématique de la décharge partielle.
- (6) Potentiel d'amélioration important et prometteur en R&D

Questions ?