Nouveau matériau autocicatrisant pour la fabrication de PCB haute performance et haute fiabilité

ARATI Baptiste

BLEY Vincent, Pichon Pierre-Yves, TEYSSEDRE Gilbert

MFR2022-ARC-1279

MITSUBISHI ELECTRIC R&D CENTRE EUROPE

Export Control: NLR

Non-Confidential

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

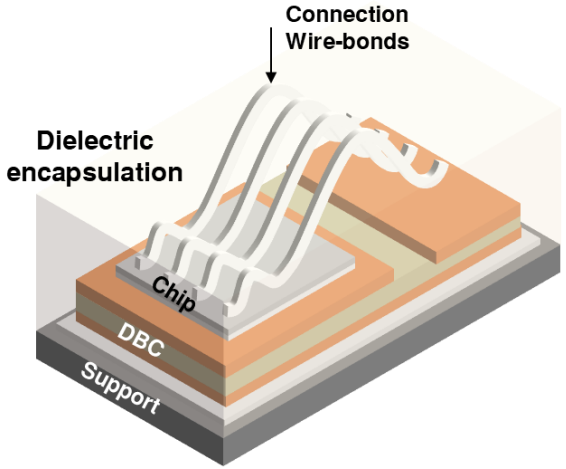
Agenda

- **Introduction :** Problématique et objectif principal
- **Réseaux Covalent Adaptables :** Concept chimique et impact sur le matériau
- **Compatibilité avec le domaine :** Propriétés pour l'électronique de puissance
- **Fabrication de PCB autocicatrisants :** Versus avec un standard commercial
- **Démonstration de cicatrisation :** Recouvrement mécanique et électrique
- **Conclusion et perspectives**

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

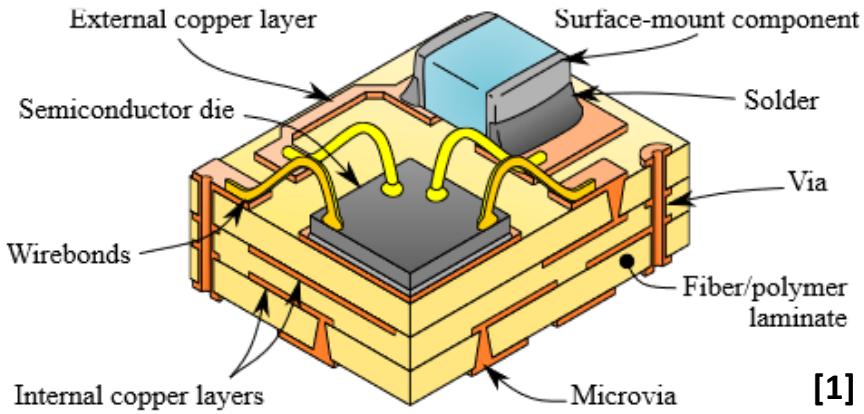
INTRODUCTION

Conditionnement habituel d'une puce



Isolant
(Electrique)

Puce montée sur PCB



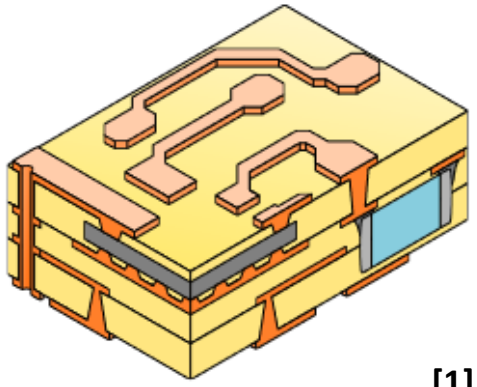
[1]

Substrat
(Mécanique)

Conducteur
(Thermique)

*vu depuis la puce

Puce enfouie dans le PCB



[1]

Substrat
(Mécanique)

Isolant
(Electrique)

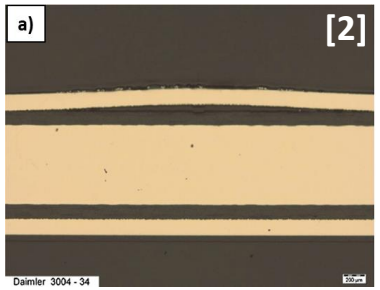
Conducteur
(Thermique)

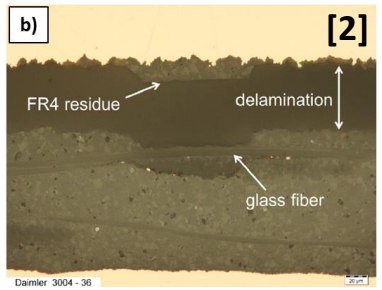
[1] C. Buttay et al., « *Application of the PCB-Embedding Technology in Power Electronics – State of the Art and Proposed Development* », 3D-PEIM,2018

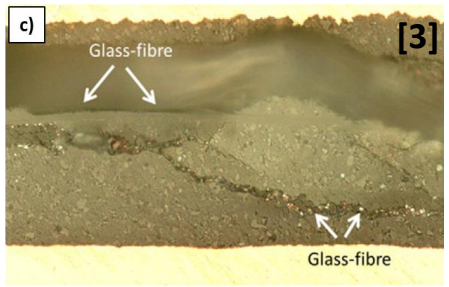
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

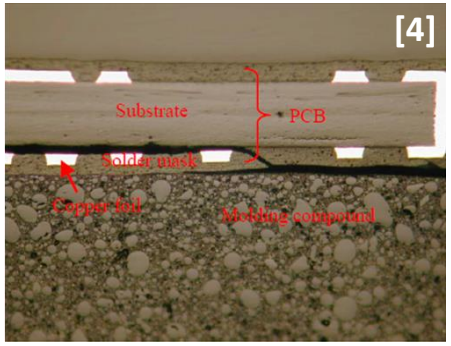
INTRODUCTION

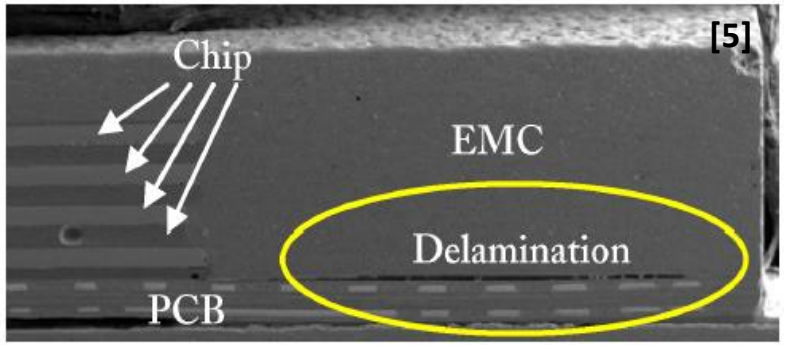
- **Plus de spécifications à garantir = Plus de possibilités de défaillance**
  - Directement (spécification/vieillissement) ou indirectement (renforcement positif des défauts)
  - Matériaux PCB (type FR4) n'ont pas été optimisés pour le domaine de la puissance



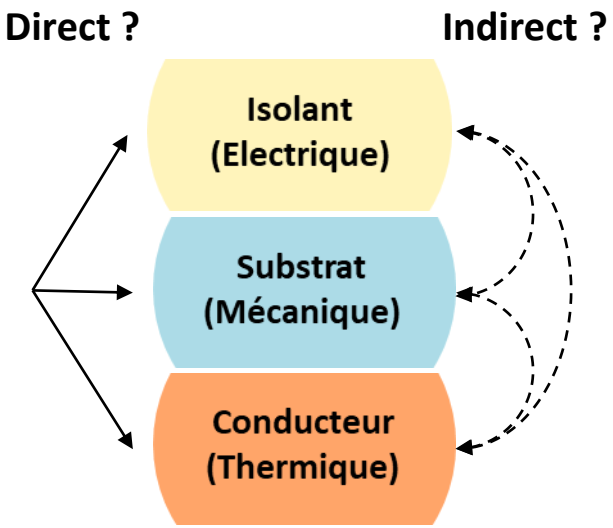








- Stress (statique)
- Chocs (dynamique)
- Cyclage thermomécanique
- Cyclage électrique
- Perte d'adhérence
- Prise en eau
- Etc…



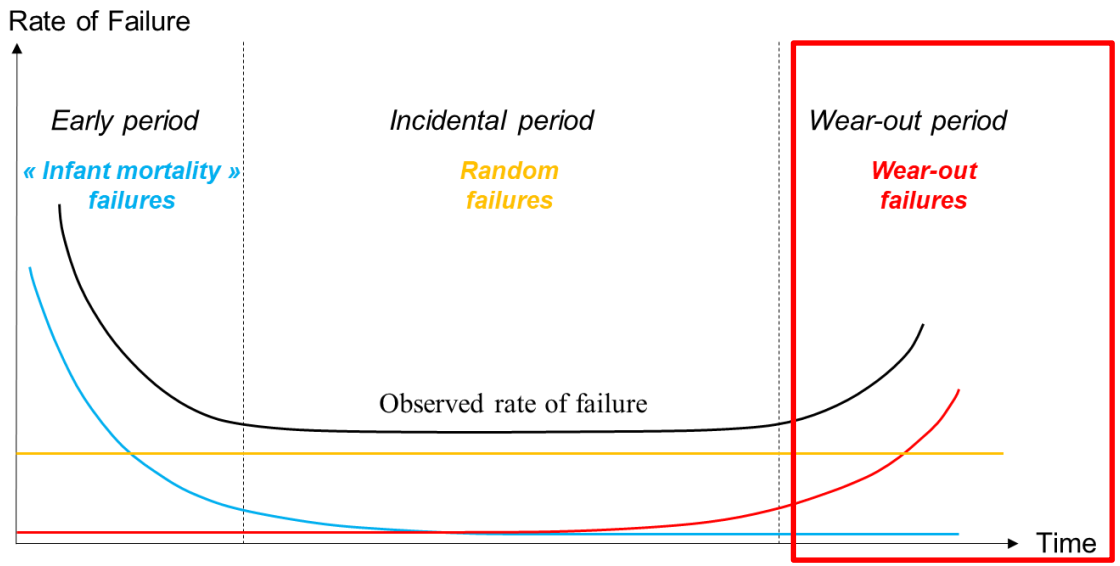
La question « matériau » pour les architectures PCB enfouies est un **problème composé** entre les **SPECIFICATIONS** et la **FIABILITE**

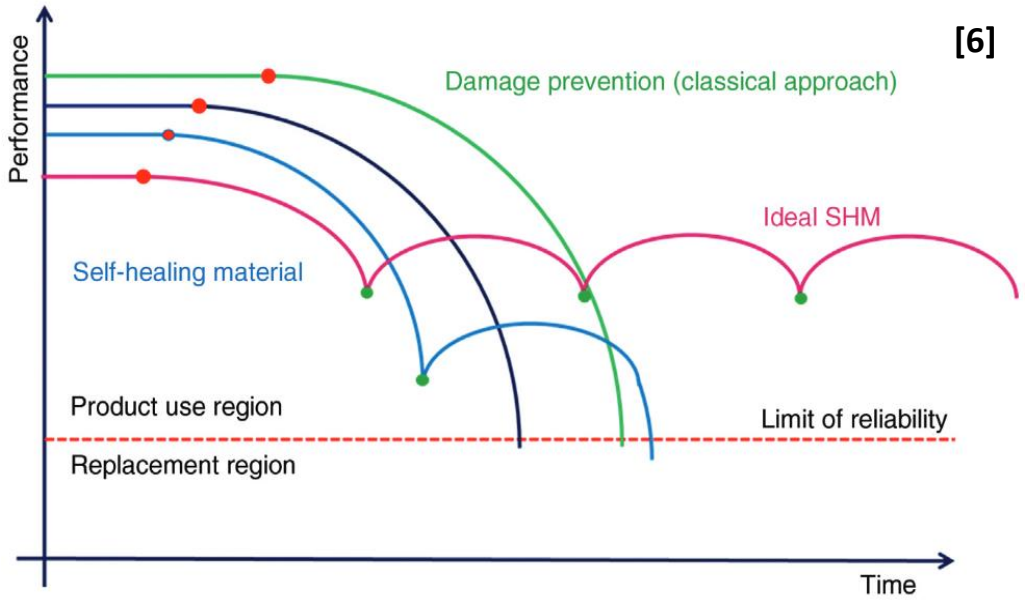
[2] R. Randoll et al., « *Dielectric strength and thermal performance of PCB-embedded power electronics* », Microelectronics Reliability, vol. 54, n° 9-10, p. 1872-1876, 2014
[3] R. Randoll, et al., « *Characteristics and aging of PCB embedded power electronics* », Microelectronics Reliability, vol. 55, n° 9-10, p. 1634-1639, 2015
[4] Y. Chen et al., « The popcorn effect of plastic encapsulated microelectronic devices and the typical cases study », Intern. Conf. on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, p. 482-485, 2011
[5] Dong Kil Shin et al., « *Effect of PCB Surface Modifications on the EMC-to-PCB Adhesion in Electronic Packages* », IEEE Trans. Comp. Packag. Technol., vol. 33, n° 2, p. 498-508, 2010

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

INTRODUCTION

- **Dimension temporelle de la fiabilité => Combien de temps peut-on garantir les specs?**
  - Relatif à la fin de vie du système (dégradations/défaillances accumulées critiques)
  - Stratégie classique = **Prévenir** l'accumulation des dommages (diminuer les stress, surdimensionner etc…)
  - Stratégie de rupture = **Restaurer** l'état de santé passé du système





Tentative d'implémentation d'un **matériau autocicatrisant** dans un PCB **destiné à l'électronique de puissance** avec pour objectif d'**augmenter la fiabilité** de ces systèmes

[6] M. D. Hager, « *Handbook of Solid State Chemistry* ». Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

LES RÉSEAUX ADAPTABLES COVALENTS

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

RESEAUX ADAPTABLES COVALENTS

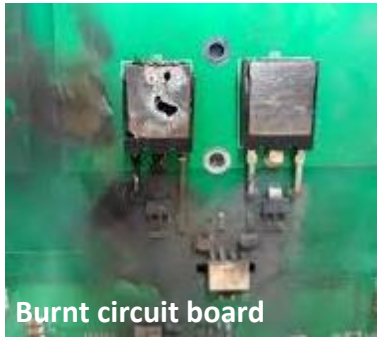
Deux familles « classiques »

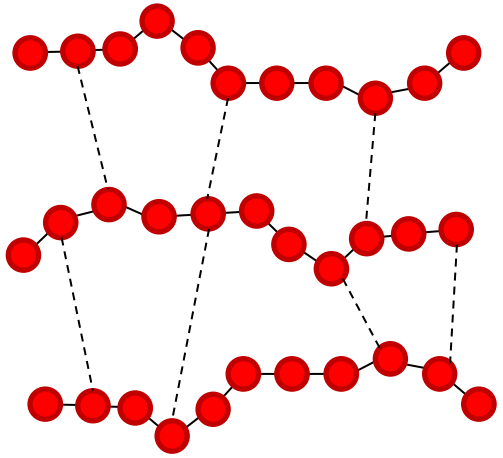
Thermo**plastiques**

- Fusion
- Cristallisation
- Viscoélastique
- Plusieurs chaines
  “noeuds moléculaires”

Thermo**durcissables**

- Degradation
- Amorphe
- Plutot élastique
- Une seule chaine
  “molécule infinie”

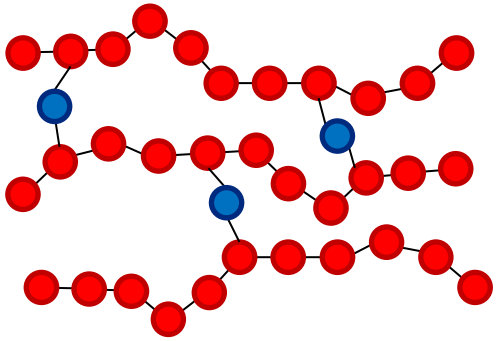




Liaisons « faibles »
Structure mobile →
Flexibilité/processabilité →
Recyclable →

Réseaux Covalents Adaptables

← **Liaisons covalentes**
Structure figée
← **Rigidité/Résistance**
Non-recyclable

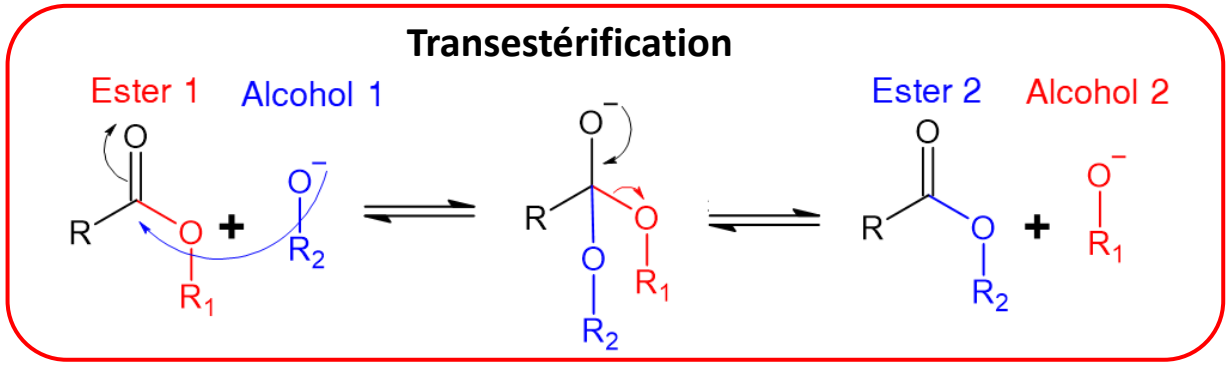


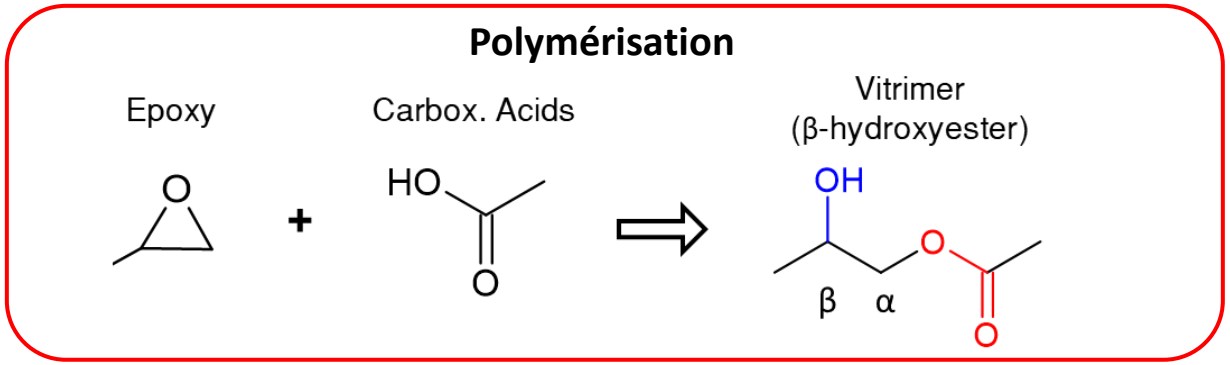
Unité élémentaire
Durcisseur

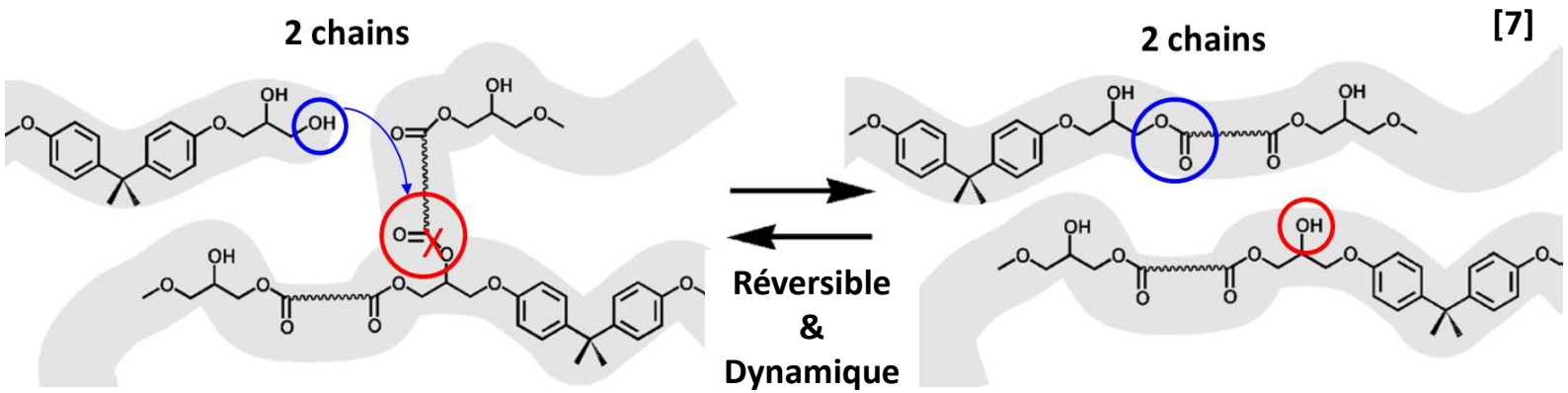
Les **Réseaux Covalent Adaptables : Changement de paradigme** dans la classification des polymères

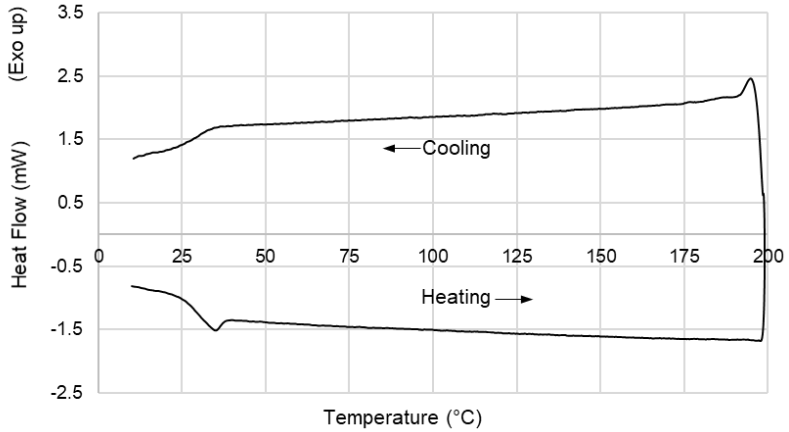
RESEAUX ADAPTABLES COVALENTS

- **Réseaux polymériques avec liens covalents mobiles (exemple : les vitrimères)**









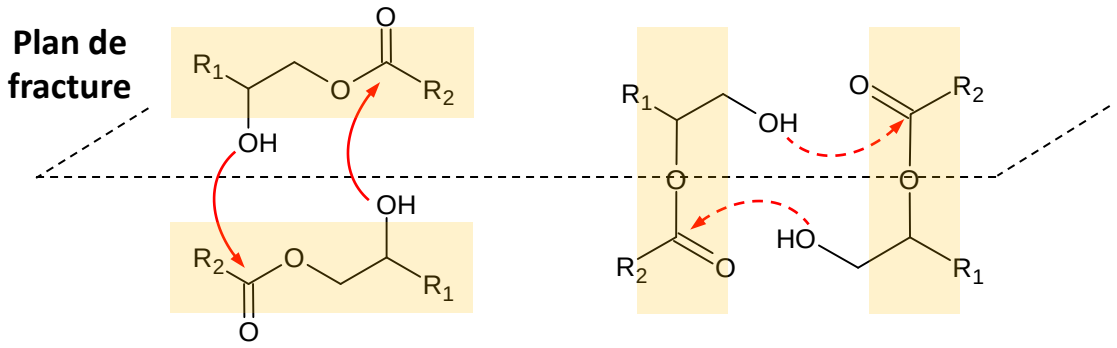
Taux de reticulation moyen conservé : Pas de dépolymérisation! <u>PAS DE FUSION</u>!
Facilement adaptable depuis une résine époxy commerciale

[7] D. Montarnal et al., « *Silica-Like Malleable Materials from Permanent Organic Networks* », Science, vol. 334, n° 6058, p. 965-968, 2011

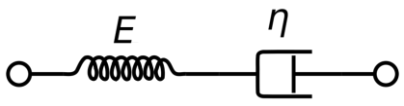
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

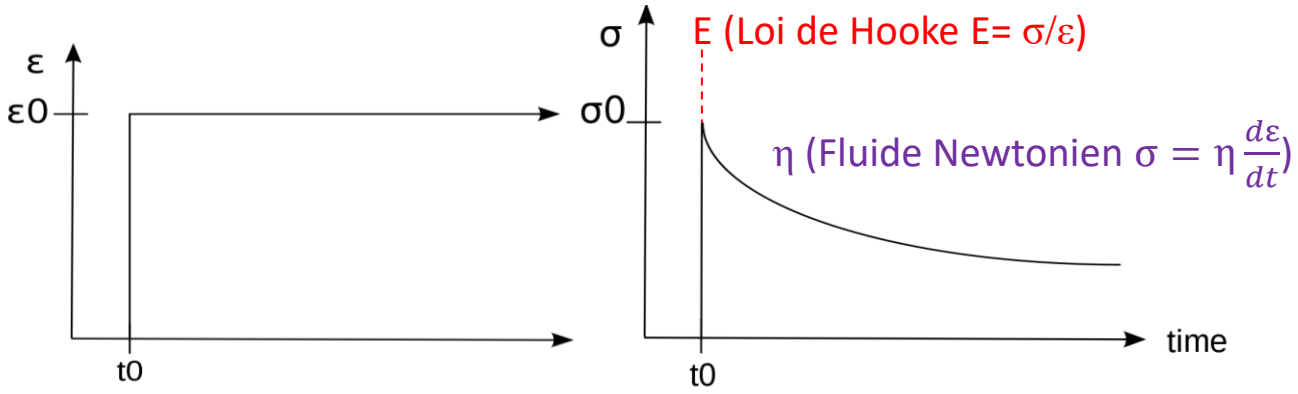
RESEAUX ADAPTABLES COVALENTS

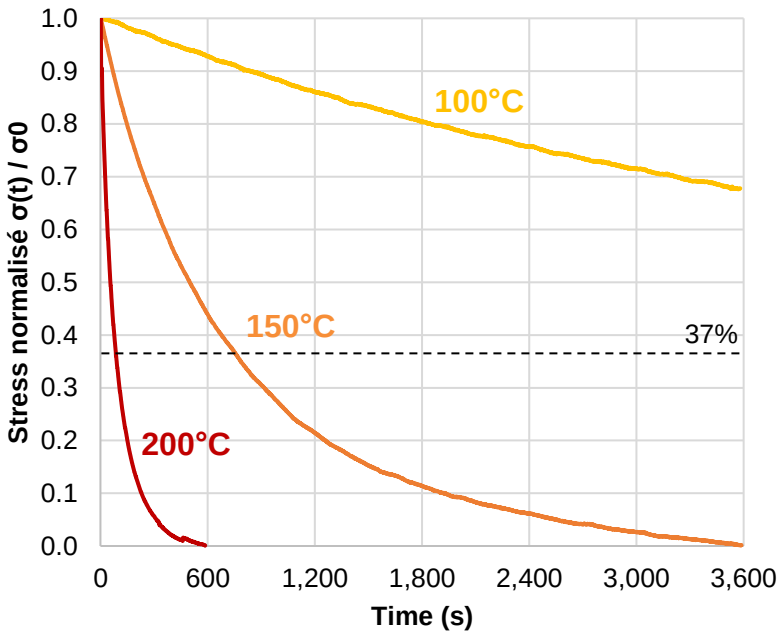
- **Intérêt multiples pour la fabrication de PCB**
  - **Autocicatrisation** : échanges chimique entre les plans de fracture



  - **Relaxation de contrainte (Modèle de Maxwell)**
    - Part élastique : Raideur instantanée (E)
    - Part visqueuse : Ecoulement temporel (η)



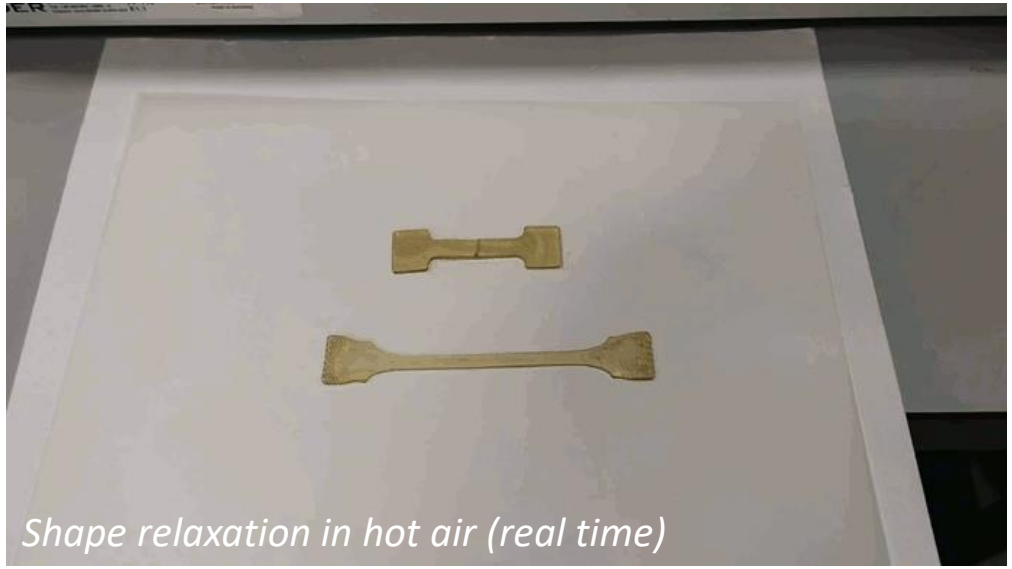


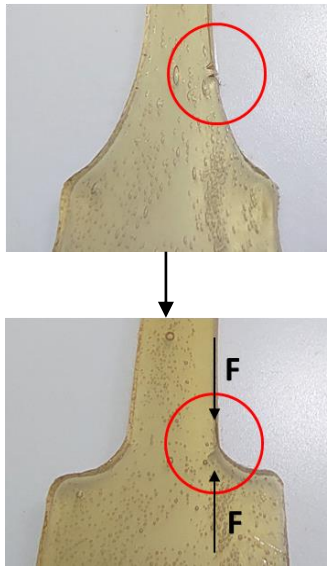


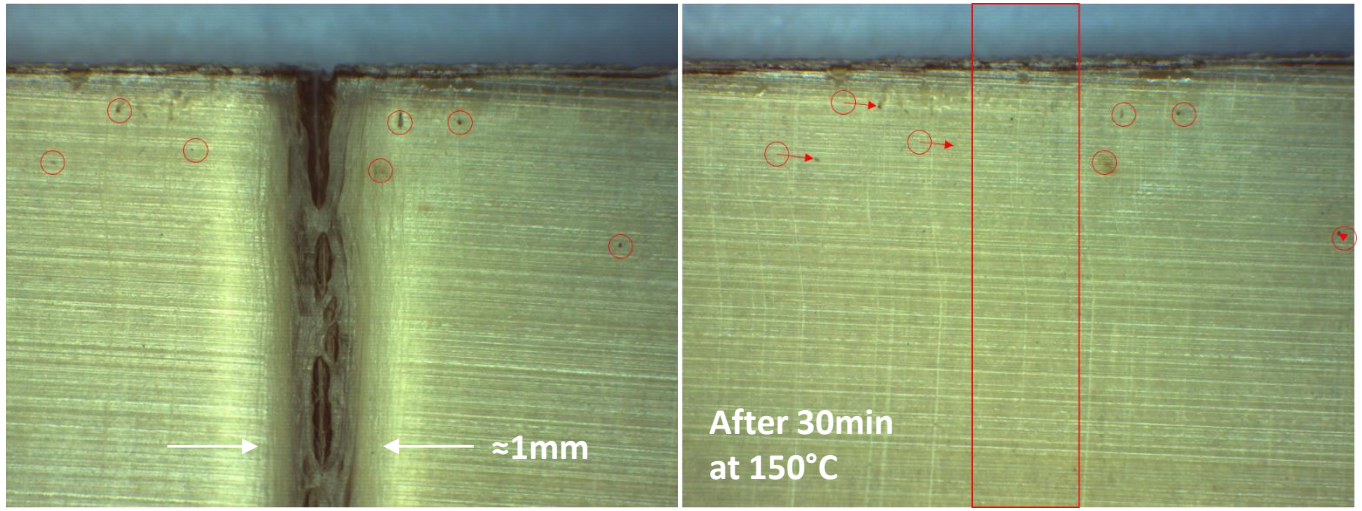
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

RESEAUX ADAPTABLES COVALENTS

- **Mobilités combinés = Cicatrisation +++**
  - **Mobilité macroscopique = Mémoire de forme**
    - Rapprochement des bords de fissure (contact)
    - Conformation des profils de fissure (surface de contact +++)
    - Apporte une forme de pression interne (diffusion favorisée)
  - **Mobilité microscopique = Transestérification**
    - Reformation du réseau (intégrité structurelle)
    - Relaxation de contrainte (pérennité du contact)



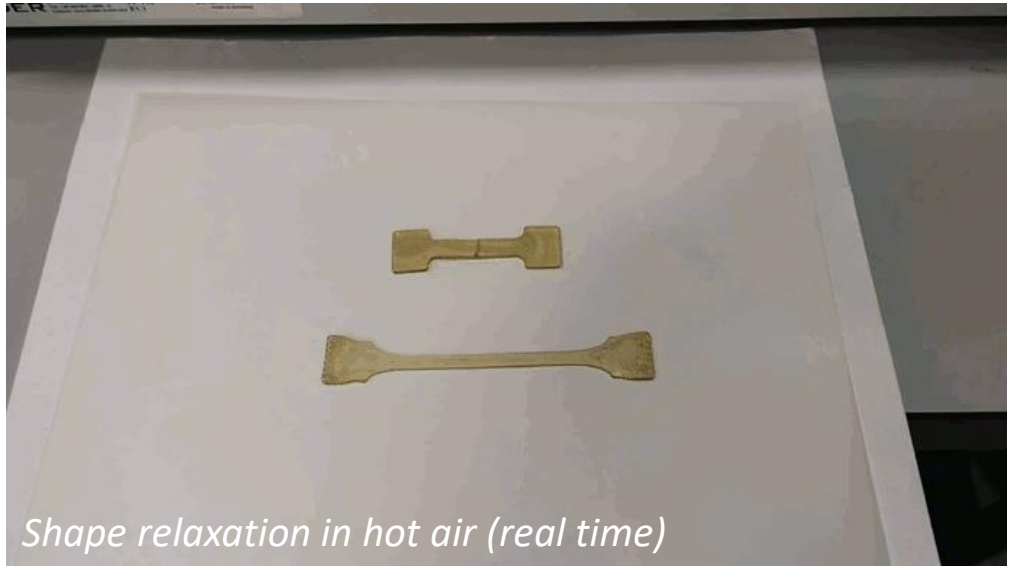


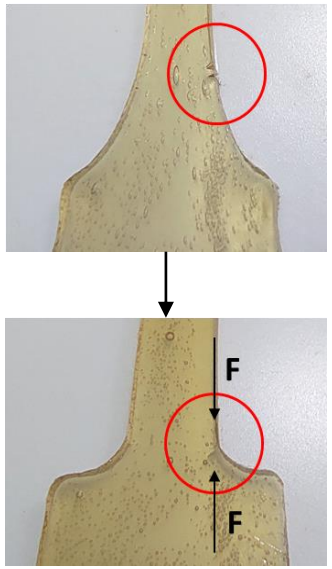


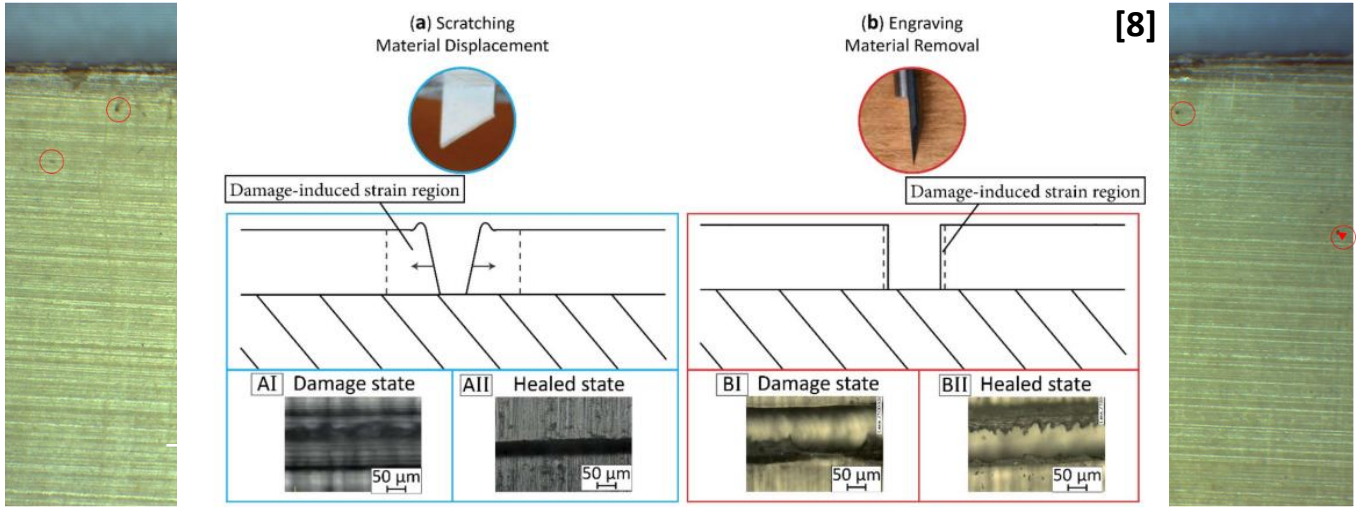
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

RESEAUX ADAPTABLES COVALENTS

- **Mobilités combinés = Cicatrisation +++**
  - **Mobilité macroscopique = Mémoire de forme**
    - Rapprochement des bords de fissure (contact)
    - Conformation des profils de fissure (surface de contact +++)
    - Apporte une forme de pression interne (diffusion favorisée)
  - **Mobilité microscopique = Transestérification**
    - Reformation du réseau (intégrité structurelle)
    - Relaxation de contrainte (pérennité du contact)







[8] Montano, et al., « *Local strain-induced energy storage as driving force for autogenous scratch closure* », *J. Mater. Chem. A*, vol. 10, nº 13, p. 7073-7081, 2022

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

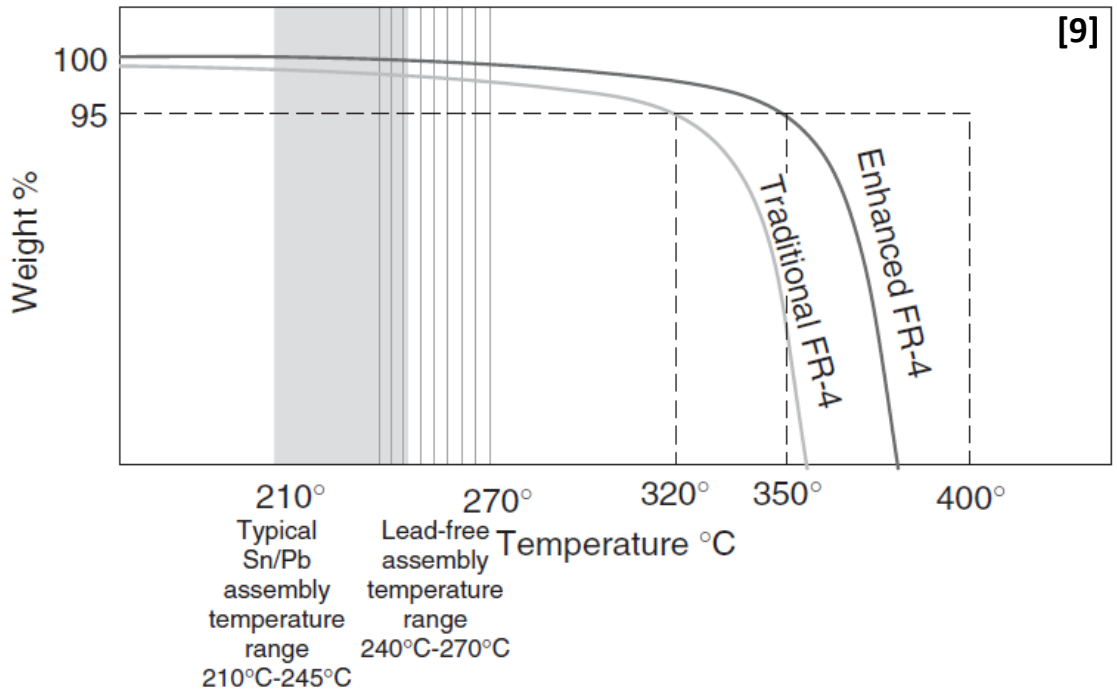
COMPATIBILITÉ AVEC LE DOMAINE

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

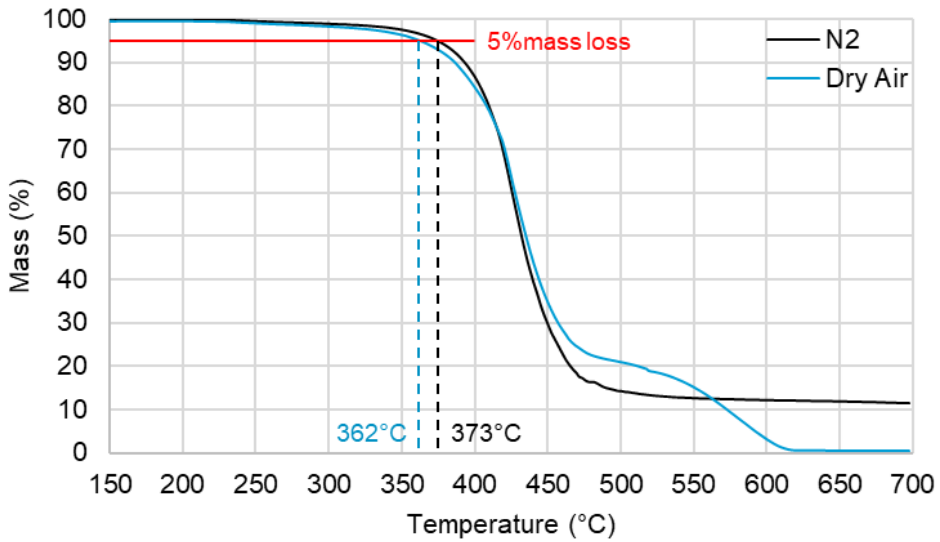
COMPATIBILITÉ AVEC LE DOMAINE

- **Stabilité thermique mesurée par Analyse ThermoGravimétrique (TGA)**
  - Rampe de 25 à 700°C à 10°C/min, 15min pause à 150°C (séchage) (ASTM D3850)
  - Température de dégradation mesurée à 5% de perte de masse

Courbe attendue pour un composite FR4



Courbe obtenue pour la résine seule



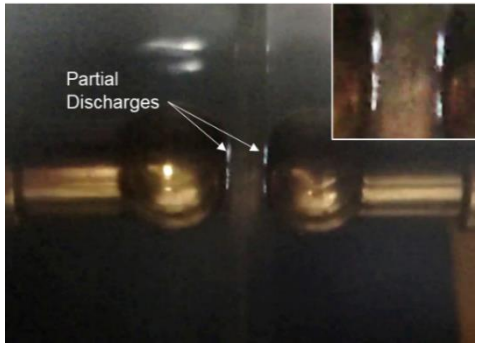
Haute stabilité thermique confirmée sur polymère seul (> 360°C)
Faible dégradation attendue aux temperature de fabrication et d'usage

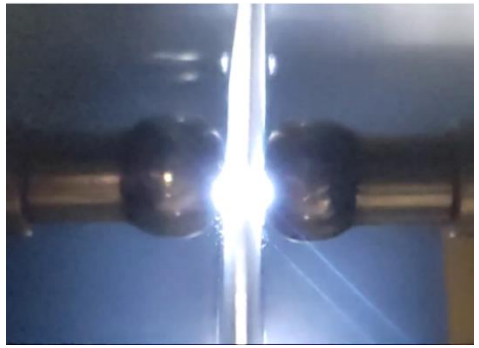
[9] C. F. Coombs, *Printed circuits handbook*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2008

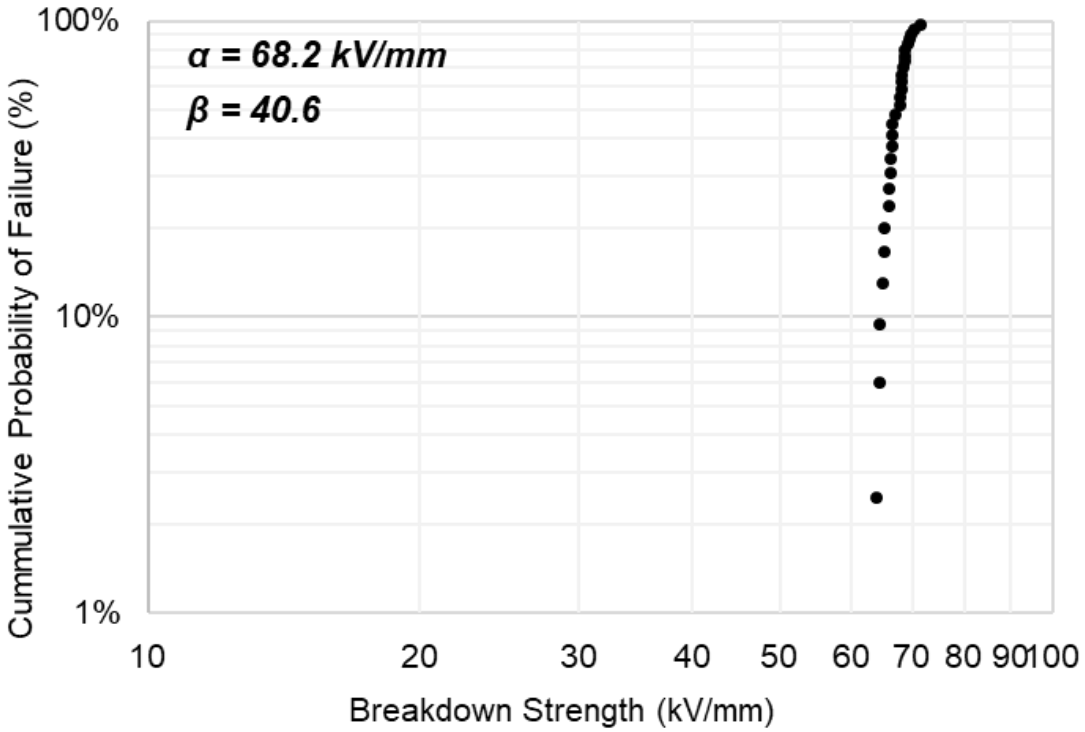
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

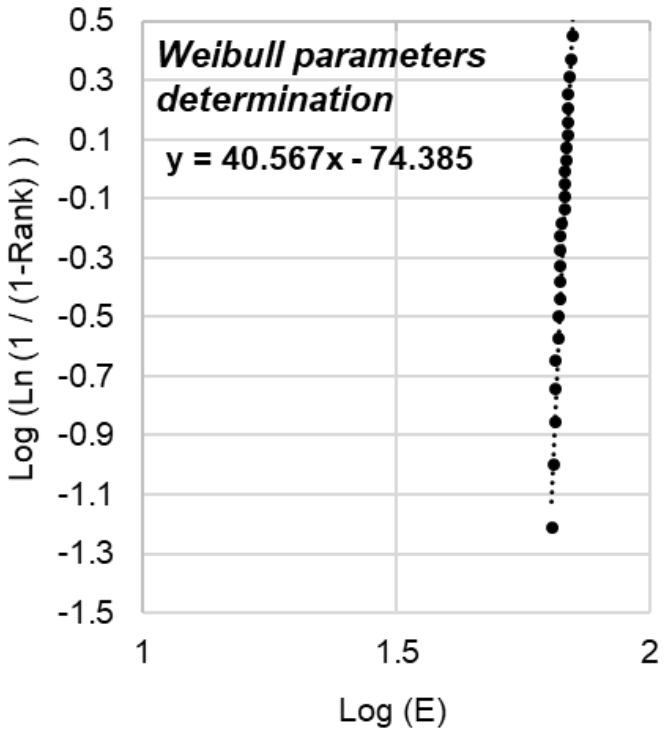
COMPATIBILITÉ AVEC LE DOMAINE

- **Résistance au claquage AC 50Hz**
  - Rampe de 2kV/s (configuration sphère-sphère) sur films de 300µm
  - Statistique de Weibull calculée pour un rang corrigé F(i,N) = (i-0.3)/(N+0.4)







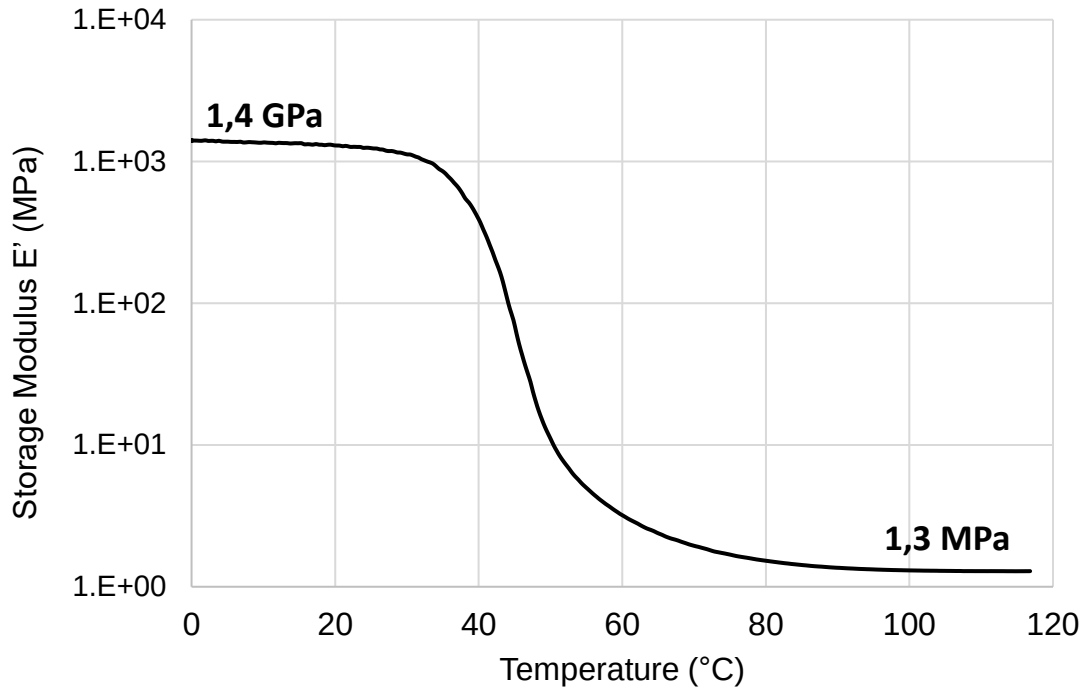


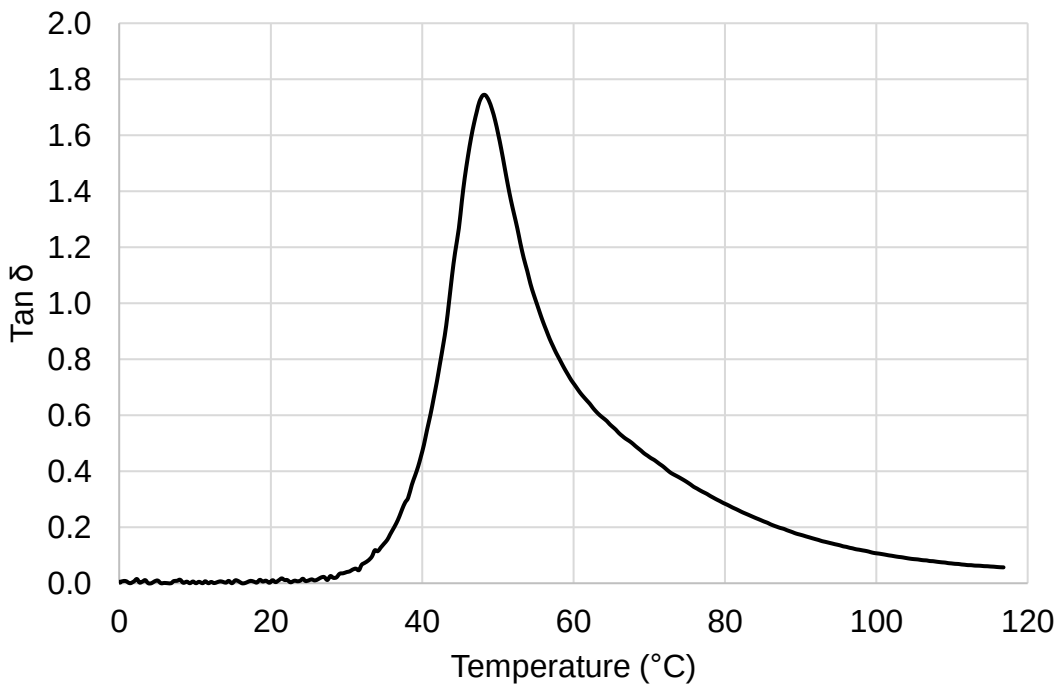
Tenue au claquage cohérente avec le domaine applicatif **aux épaisseurs d'usage** (ordre 10^2µm)
Test réalisé **sous régime de décharge partielle continu**

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

COMPATIBILITÉ AVEC LE DOMAINE

- **Module élastique en température par Analyse Mécanique Dynamique (DMA)**
  - Rampe de 2.5°C/min, sollicitation périodique en traction (1,5N amplitude, 10Hz)





Module élastique important sous Tg / **Chute d'un facteur 10^3** au passage de Tg
Pic **d'amortissement intense** et **fortement biaisé** vers les temperatures hautes

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

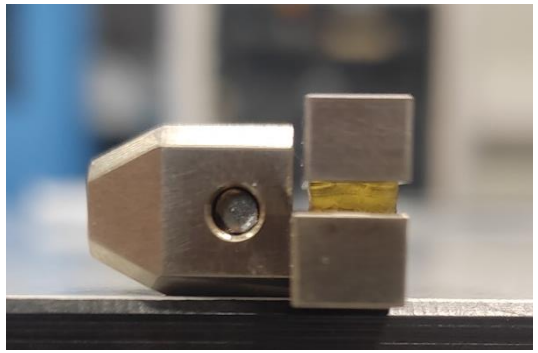
COMPATIBILITÉ AVEC LE DOMAINE

- **Force d'adhérence importante avec les métaux (pas évaluée quantitativement)**

Adhérence à des pièces d'acier oxydé
(non nettoyé, simple chauffage)

Attaque de l'oxyde naturel?
(adhésion par diffusion ++)

Mors de la DMA collés!
(rupture cohésive)



Conservation de la **très bonne adhérence avec les métaux** issue de la résine époxy
Possibilité de collage **même après le curing**!

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

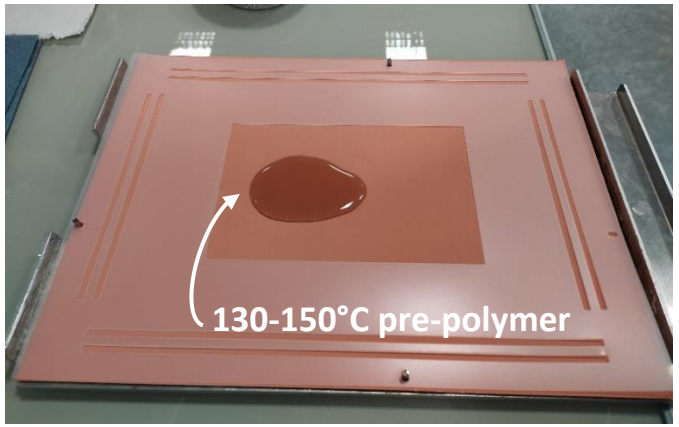
FABRICATION DE PCB AUTOCICATRISANTS

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

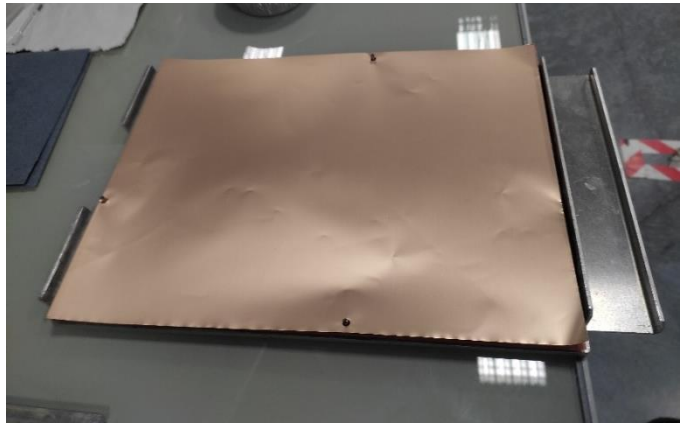
FABRICATION DE PCB AUTOCICATRISANT

- **Resin Coated Copper (RCC) manufacturing process**

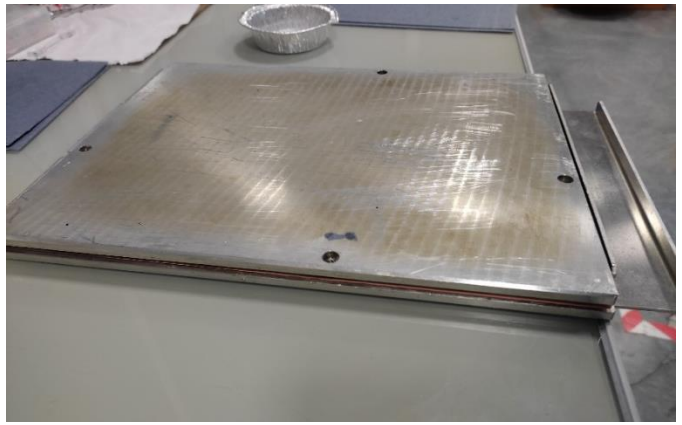
1. Moule sacrificiel personnalisable
(Cu 35µm + Espaceur 300µm + pre-polymère)



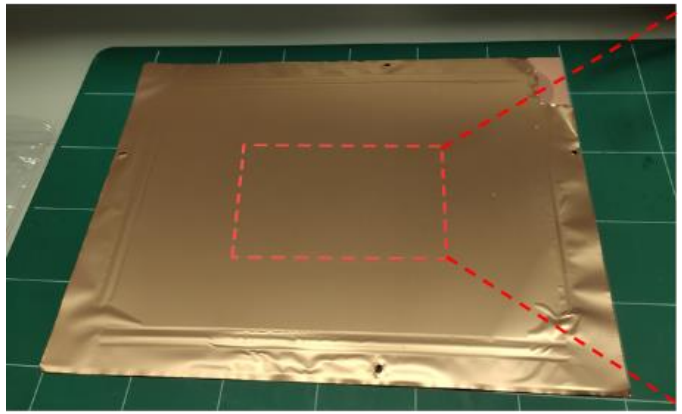
2. Fermeture du moule par le dessus
(Cu 35µm)



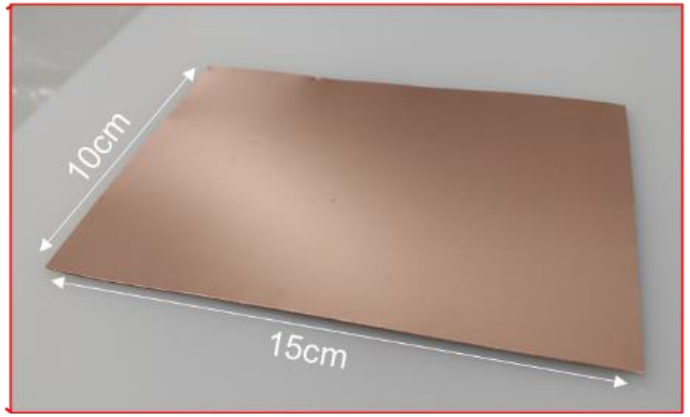
3. Plateau de presse (Al épais + Acier fin)
=> 150°C – 1h – 1MPa



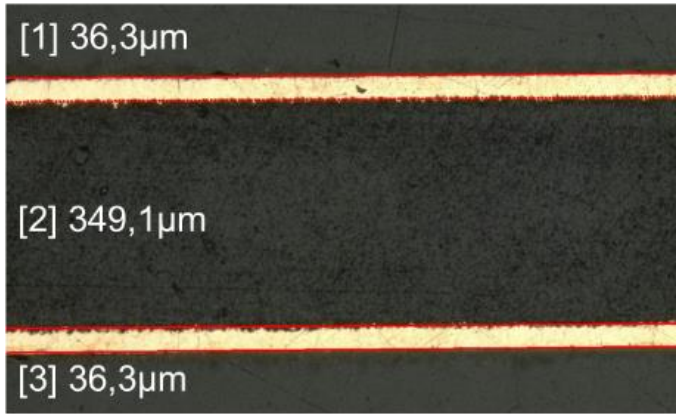
4. Pressage format A4
(RCC final + moule sacrificiel)



5. Découpe du RCC au massicot
(Cu / Vitrimère / Cu)



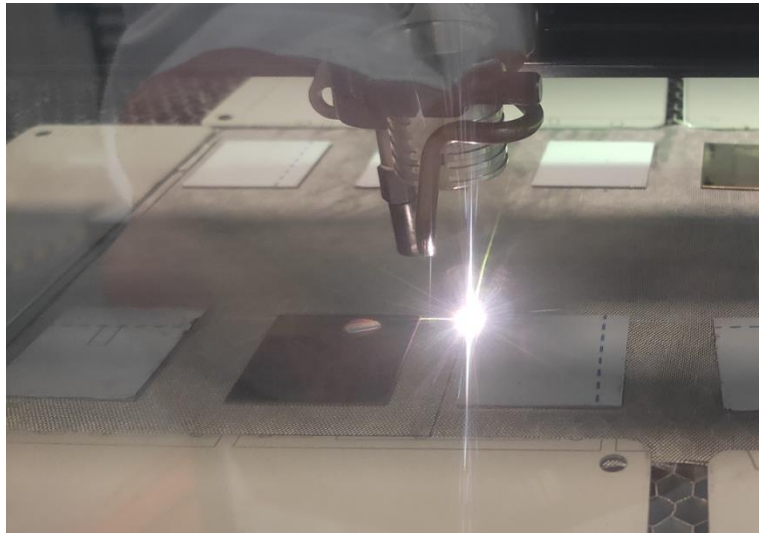
6. Control qualité
(Section uniforme sur toute la surface)

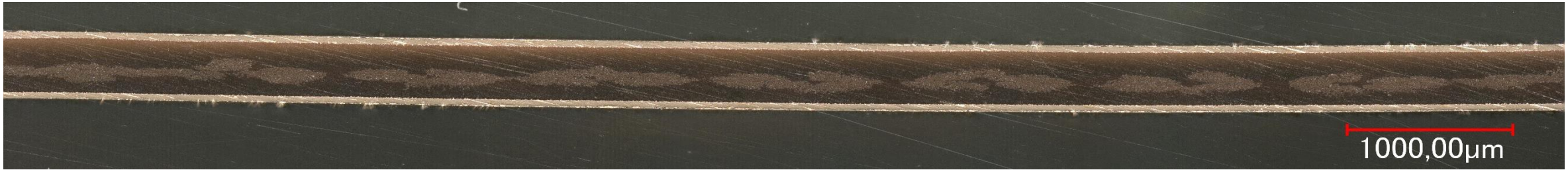


© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

FABRICATION DE PCB AUTOCICATRISANT

- **Possibilité d'utiliser des renforts =>Tissu Taffetas 1080 E-glass**
  - Coupé précisément au laser CO_2 (+ cautérisation des brins)
  - Implémentation dans la cavité du moule facile, excellente mouillabilité des fibres
  - Bonne distribution des fibres à grande distance

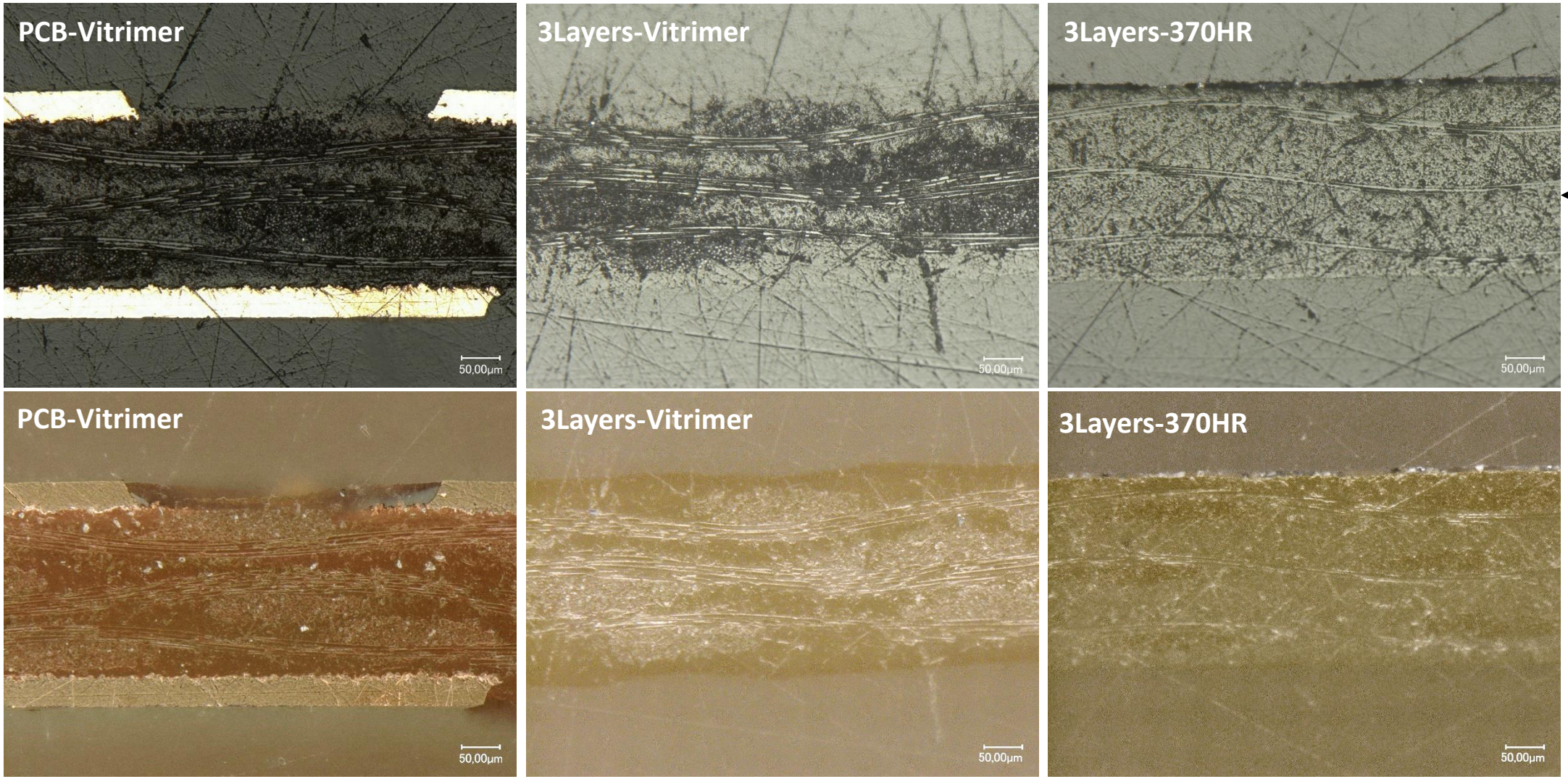




© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

FABRICATION DE PCB AUTOCICATRISANT

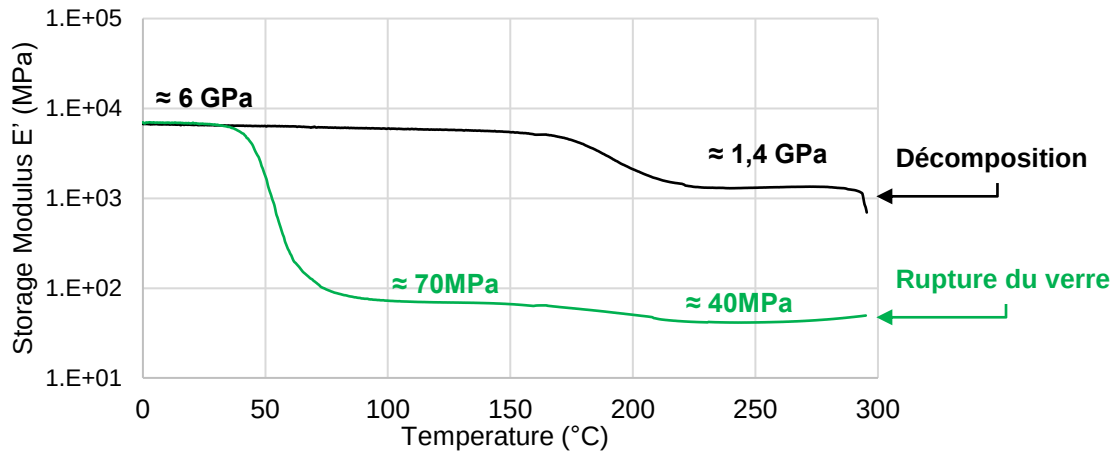
- **Possibilité de superposer les renforts => Comparable à un assemblage de 3 prepregs commerciaux**

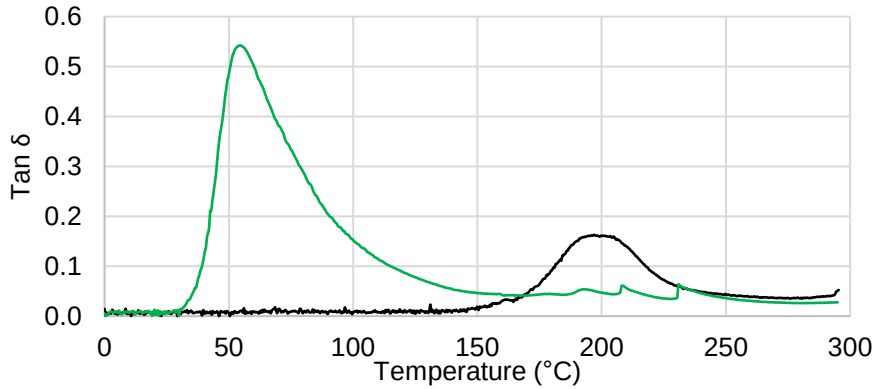


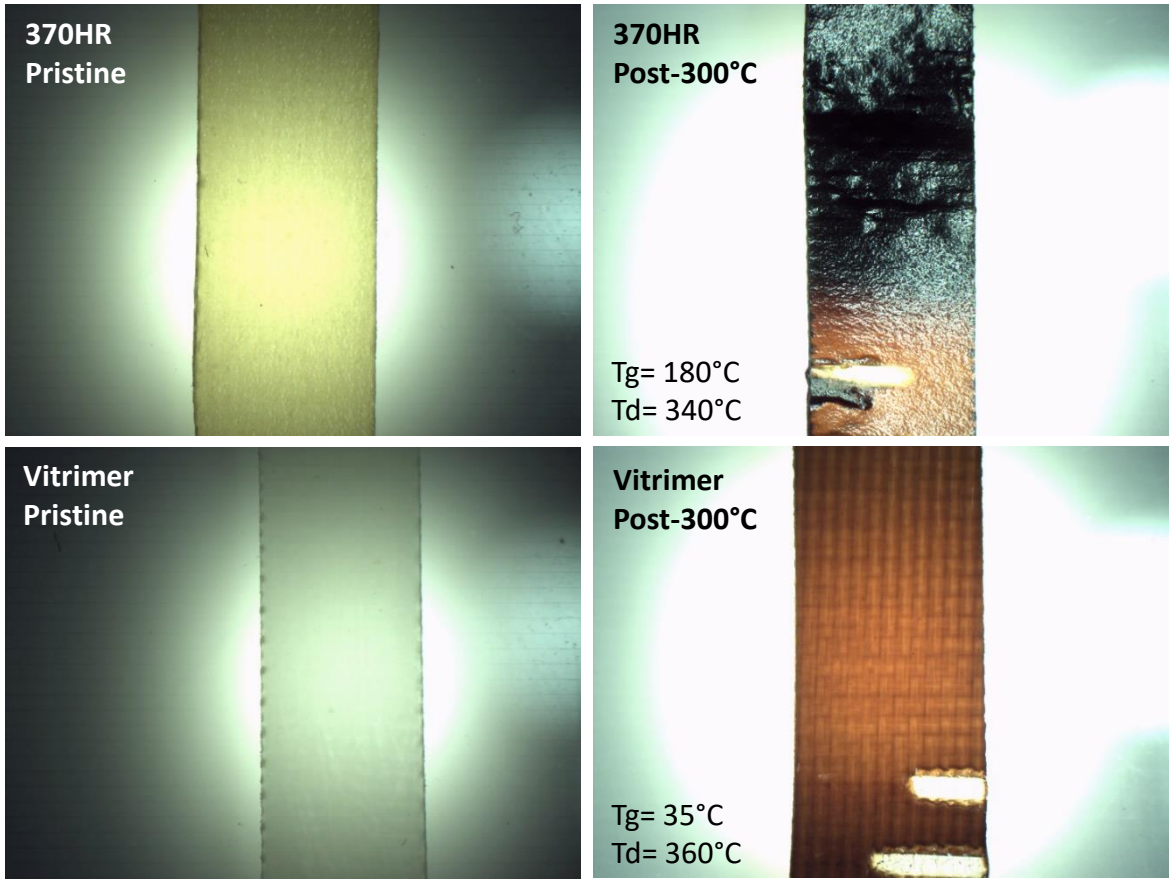
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

FABRICATION DE PCB AUTOCICATRISANT

- **Comparatif mécanique versus une référence commerciale**







Fort amortissement mécanique et **forte diminution du module** sous Tg (complaisance)
Excellente tenue thermique du composite vitrimère comparé au matériau de référence

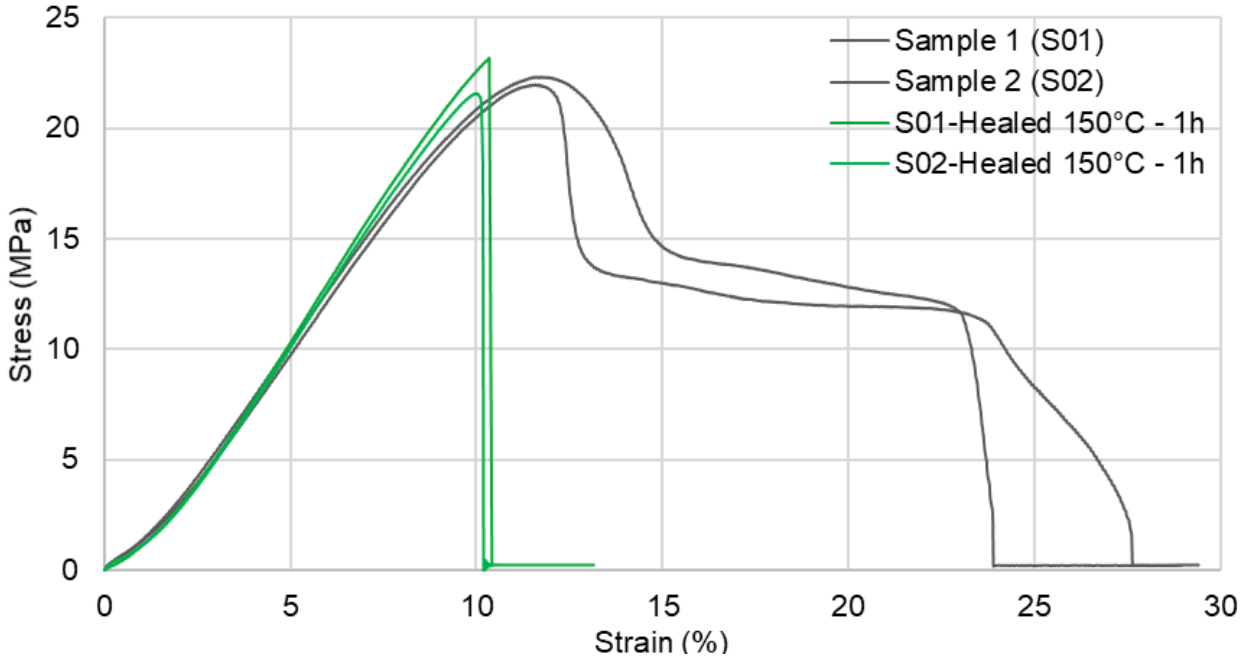
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

DÉMONSTRATION DE L'AUTOCICATRISATION

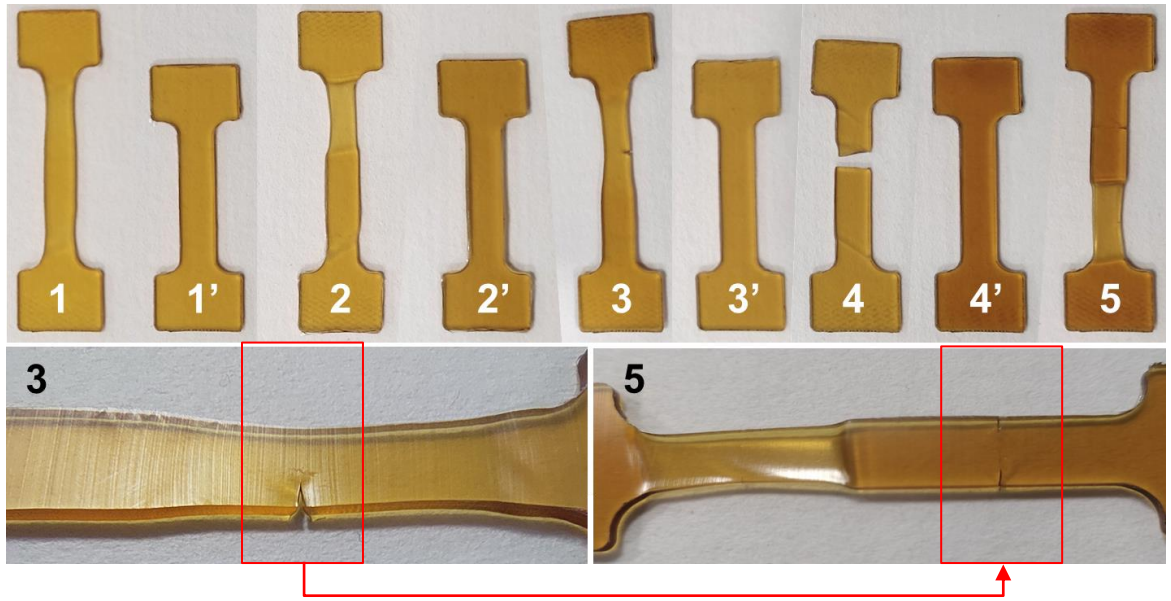
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

DEMONSTRATION DE L'AUTOCICATRISATION

- **Démonstration du recouvrement mécanique**
  - Endommagement d'éprouvettes de traction à 20mm/min
  - Remise en contact **<u>sans maintenir la pression</u>** puis **1h à 150°C**



Echantillon unique déformé/détruit (chiffre) cinq fois



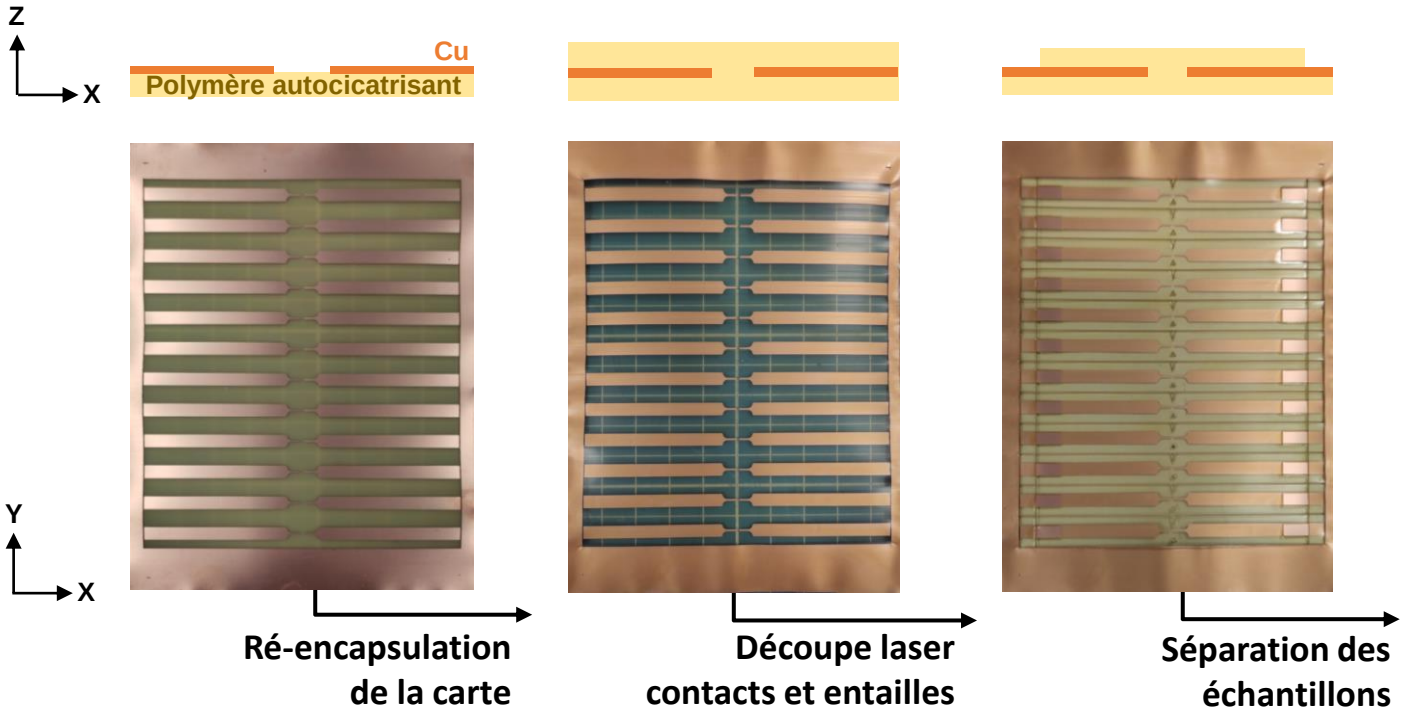
Même défaut réparé 2 fois

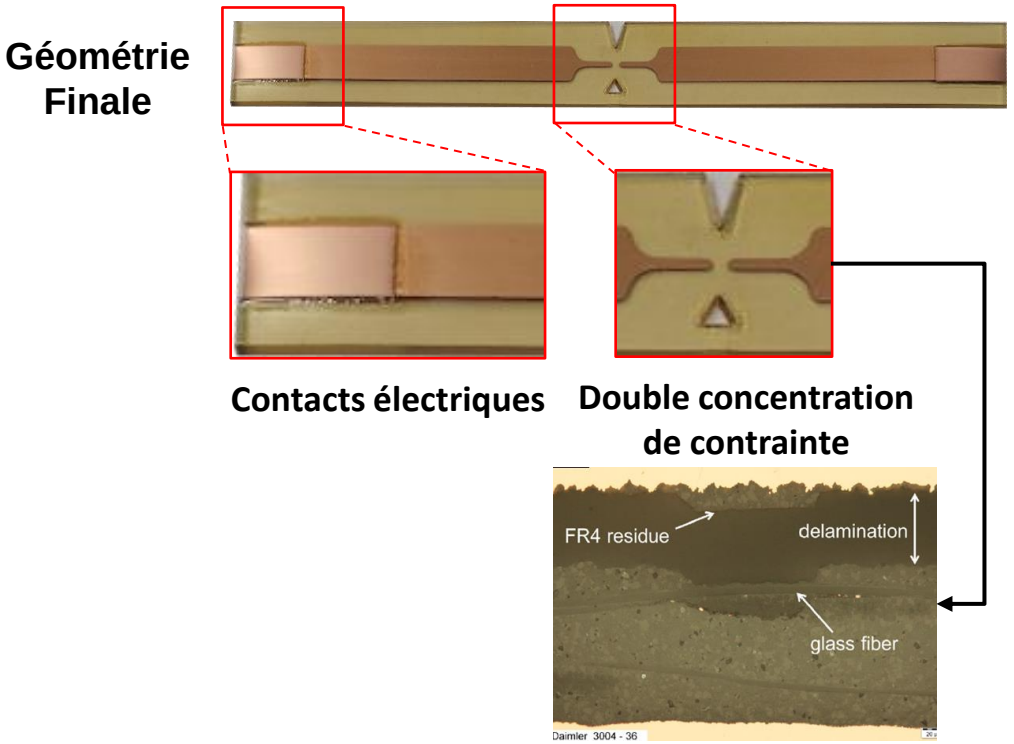
Recouvrement quasi-total des propriétés élastique (module élastique, limite d'élasticité = Contrainte à la rupture)
Changement du mode de défaillance (ductile -> fragile)
Possibilité d'obtenir de meilleurs résultats en adaptant le protocole de cicatrisation

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

DEMONSTRATION DE L'AUTOCICATRISATION

- **Conception d'échantillons simulant une défaillance mécanique entre deux conducteurs**
  - **Entailles ouverte/fermée = stress mécaniques** et guidage de la fissure (laser CO_2)
  - **Electrodes « en pointe » = stress électrique** (gravure PCB)



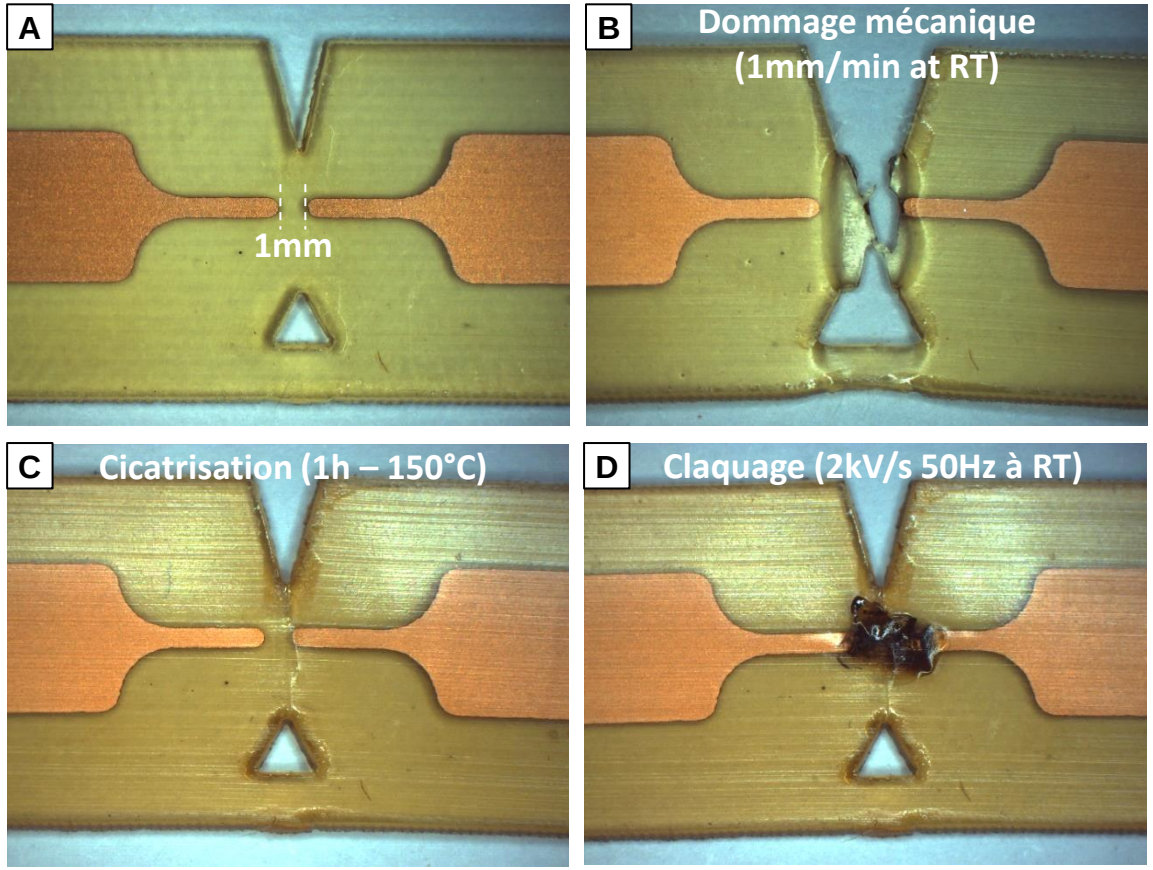


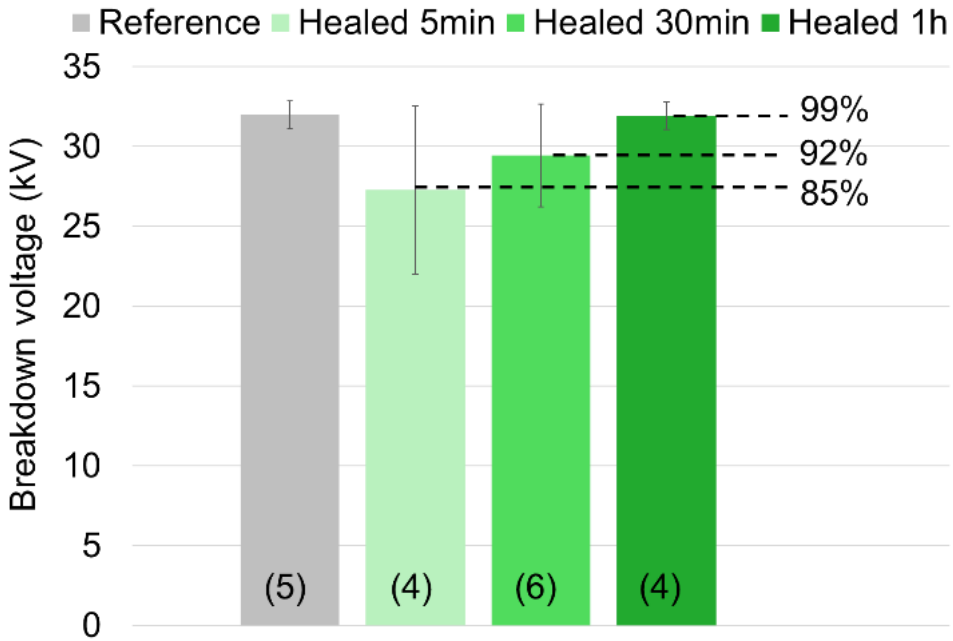
Validation des méthodes nécessaires aux **architectures HDI** (High Density Interconnect)
Etapes de fabrications mutualisées pour la création de **plusieurs objets complexes**

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

DEMONSTRATION DE L'AUTOCICATRISATION

- **Recouvrement de la resistance au claquage**





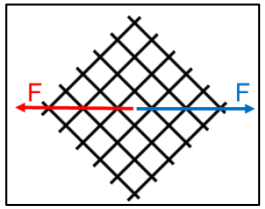
**entre parenthèse = nombre d'échantillons testés*

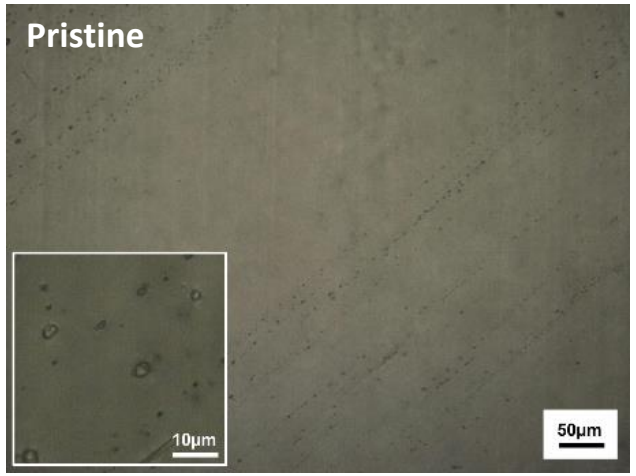
Recouvrement total de la tenue au claquage (défaut mécanique ↛ défaut électrique)
Augmenter le temps de reparation augmente le taux de recouvrement

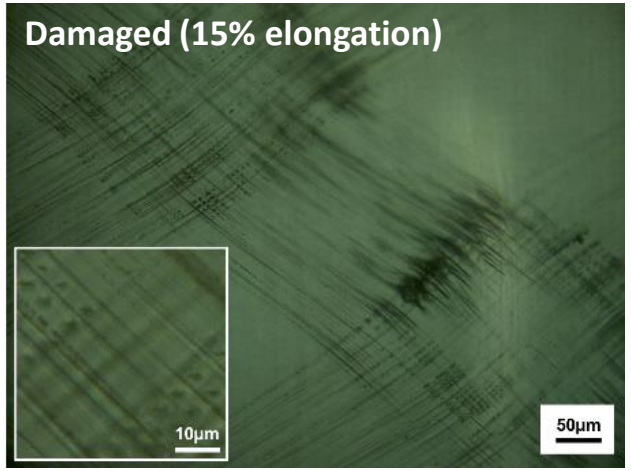
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

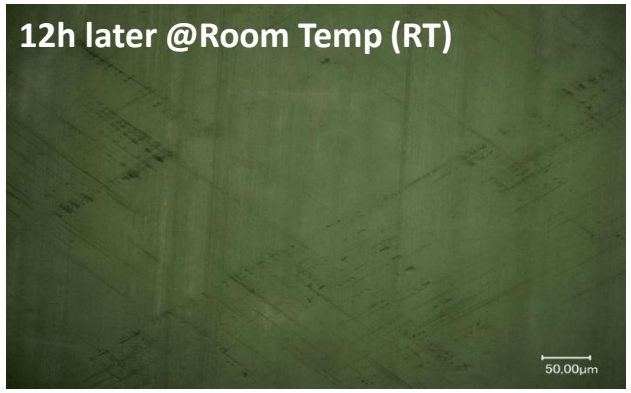
DEMONSTRATION DE L'AUTOCICATRISATION

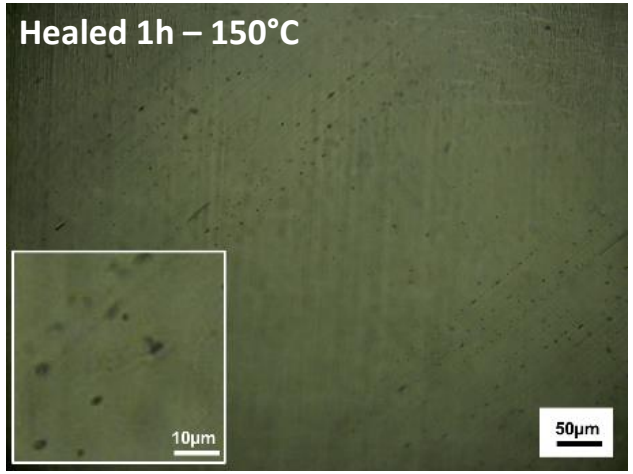
- **Tentative de dégradation plus "dans l'application" => Cisaillement de composites (Renfort orienté à 45°)**











Composites **extrêmement tenaces**, grande difficultés à endommager de manière représentative

Le recouvrement est en competition avec l'endommagement à tout instant (RT proche de Tg)

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

CONCLUSIONS

- **Réseaux Covalent Adaptables :** Concept matériau intéressant pour une cicatrisation efficace
  - Mémoire de forme = mobilité macroscopique
  - Transestérification = mobilité microscopique

- **Compatibilité avec le domaine :** Matériau compatible avec les specs du domaine
  - Haute stabilité thermique et haute tenue au claquage
  - Propriétés mécanique et d'adhérence appropriées

- **Fabrication de PCB autocicatrisants :** Possibilité de créer des PCB haute performance
  - Comparable à des références commerciales avec meilleure tenue en temperature
  - Complaisance mécanique intéressante mais à adapter à l'application (placement de Tg)

- **Démonstration de cicatrisation :** Recouvrement mécanique et électrique efficace
  - Propriété élastiques et tenue au claquage recouvrées après 1h à 150C = "*Confiance dans les volumes réparés*"
  - Possibilité d'améliorer le protocole de réparation

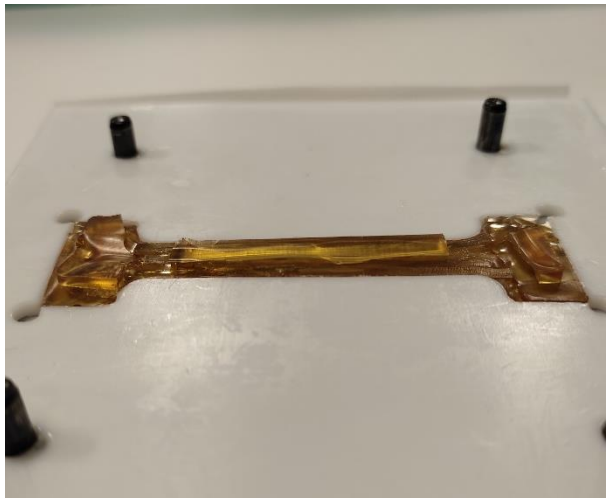
© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

PERSPECTIVES

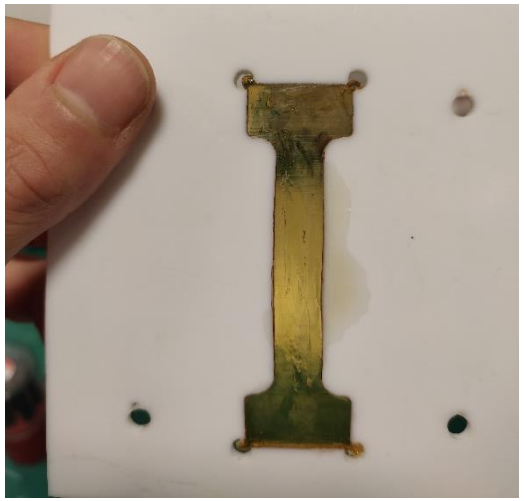
- **Recyclage des composites maintenant possible!**

Chutes de vitrimère entières (+ 150°C 1MPa)

Rajout de matière pour combler les vides

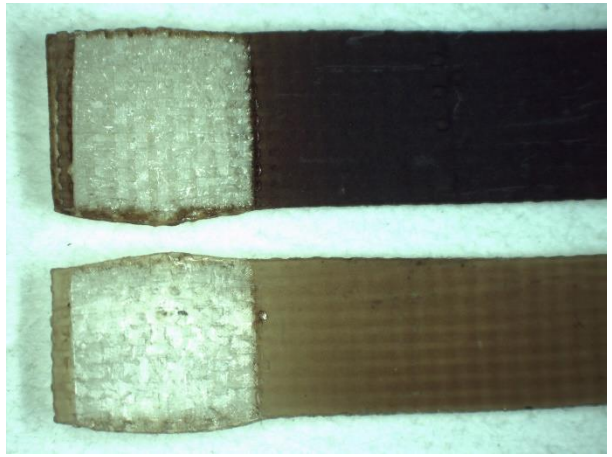


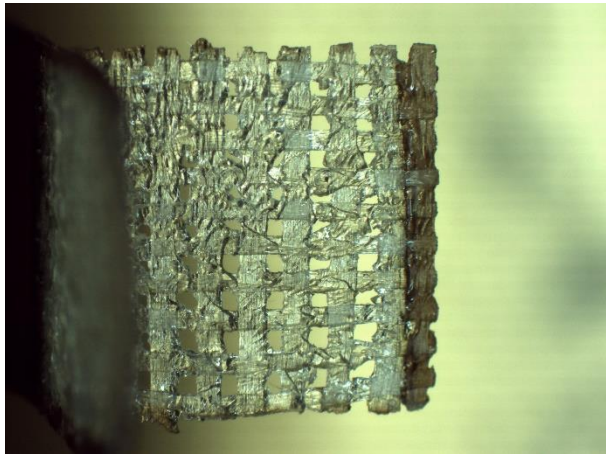
Pressage final à 180°C pendant 1h (1MPa)



Extrusion?
Injection / Transfert?
Impression 3D
Etc…

Eprouvettes après pressage dans les mors de traction
(mors plats)



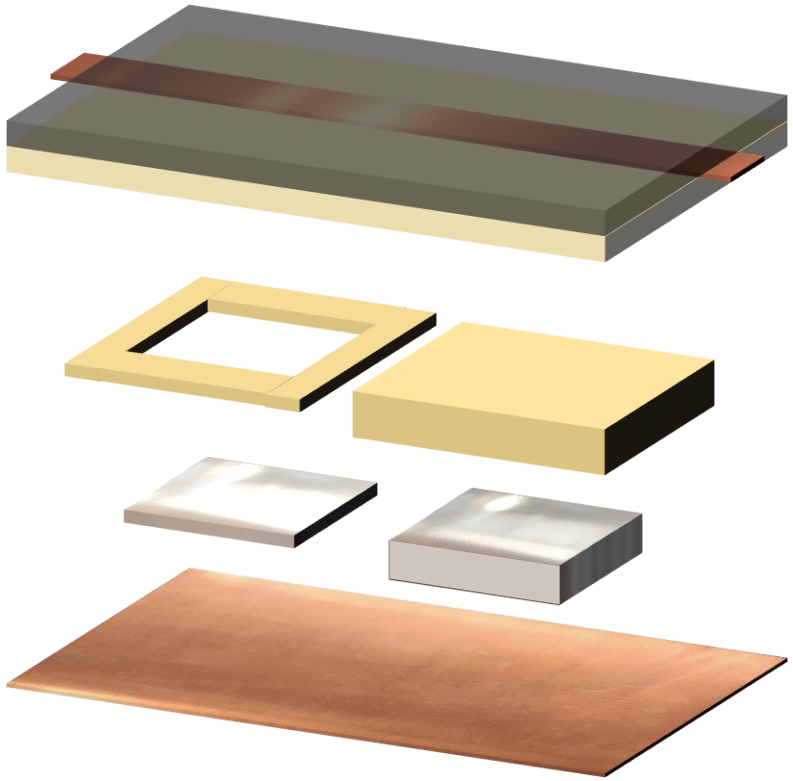


Possibilité de désimprégner le tissu par thermocompression

© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

PERPSECTIVES

- **Nouvelle manière de penser la fabrication**
  - Pressage de Stage C directement (déjà réticulé)
    - Stockage long terme / Collage à la demande
    - Possibilité d'assembler différents vitrimères ensembles (gradation de propriétés)
  - Pre-packaging de puce à façon
    - Découpe de préformes à assembler
    - Bulk conformant à chaud (accommodation suivant Δz)
  - Assemblage d'étages déjà réticulés
    - Puces pré-packagées en « *pick & place* »
    - « *Sous-circuits* » préfabriquées pour l'intégration modulaire (désassemblage?)



© Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

MITSUBISHI ELECTRIC

Changes for the Better