



Centre Français Fiabilité

SATIE

le cnam

école
normale
supérieure
paris-saclay

Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Said BENSEBAA
Laboratoire SATIE

Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB

Le mardi 9 novembre 2021

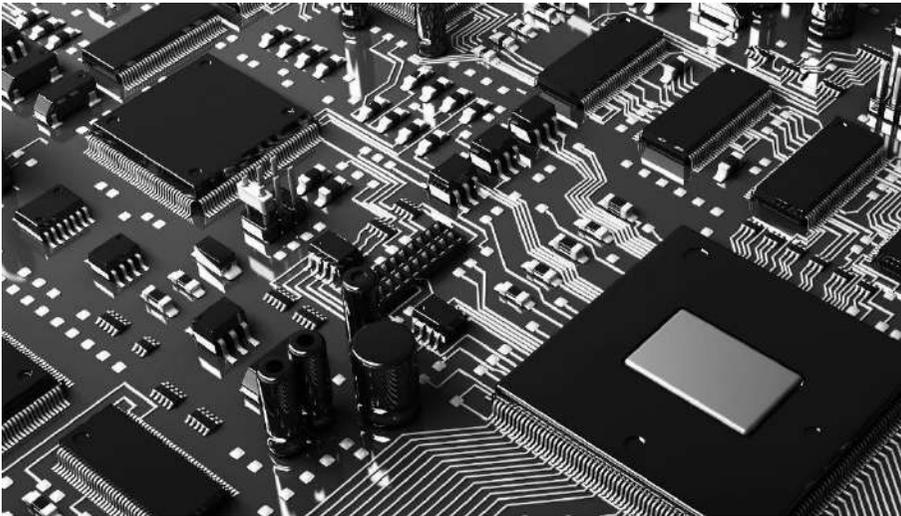


Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Le Centre Français de Fiabilité

Regroupement d'experts de la fiabilité des systèmes et des composants électroniques



ASTech Paris Region, pôle de compétitivité dans le domaine de l'aéronautique, de l'espace et de la défense.



NAE (Normandie AeroEspace), la filière d'excellence en Normandie dans l'aéronautique, le spatial, la défense et la sécurité.



Pôle de compétitivité européen, **NextMove** rassemble en Normandie et Île-de-France, la « Mobility valley » française, toutes les énergies de l'écosystème Automobile et Mobilités.

Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF sont un évènement mensuel, organisé en visioconférence sur des travaux en lien avec les thématiques du CFF.

Cette année, nous vous proposons un temps d'échanges sur des thèses en cours au sein de la communauté CFF, et en rapport avec la Fiabilité des Composants et Systèmes Electroniques.



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

DETAIL SUR LA THESE

Titre de la thèse		Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance dans un PCB		
Début	Fin	Doctorant	Structure	Financement
Octobre-2018	Janvier-2022	Said BENSEBAA	SATIE	Ecole doctorale EOBE
Directeur de thèse	Co-encadrant	Partenaires		
Mounira BERKANI	Mickael PETIT, Stephane LEFEBVRE			

PRESENTATION

- 1/ L'élaboration de nouvelles technologies d'intégration de composant de puissance dans du PCB (PCB packaging)
- 2/ L'estimation de la durée de vie des composants de puissance sous contraintes thermoélectriques. (Tests de vieillissement accélérés, à travers du cyclage thermique actif et passif).
- 3/ Caractérisation thermomécanique à travers d'essais expérimentaux.
- 4/ Modélisation multiphysique pour l'estimation des contraintes thermo-électro-mécanique dans les packagings PCB.

DETAIL SUR LA STRUCTURE D'ENCADREMENT :

Structure	Laboratoire SATIE		
Site web	http://satie.ens-paris-saclay.fr/		
Rue	AVENUE DES SCIENCES		
CP	91190	Ville	Gif sur yvette

PRESENTATION

Le SATIE est un laboratoire en sciences appliquées, qui se consacre aux systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie. Ses champs scientifiques sont ceux de l'électrical engineering et de la physique appliquée, de la physique des systèmes et des biomicrosystèmes. Ses recherches sont fortement connectées à des enjeux sociétaux comme la sécurité des systèmes industriels ainsi que des personnes, ou sur les véhicules autonomes. Le développement durable est également au cœur de ses préoccupations, avec le développement de solutions d'intégration des dispositifs électroniques de puissance, ou celui de systèmes de conversion d'énergie propres.

Type

- Académique
- Industriel
- Cluster
- Société savante

Domaines

- Modélisation et simulation
- Expérimental
- Cycle de vie

Thématiques :

- Fiabilité des composants électroniques de puissance et leur packaging
- Fiabilité des technologies liées à la connectique et à l'assemblage (connectiques, PCB, Busbars...)
- Fiabilité des systèmes mécatroniques

Expertises :

- Connaissances et moyens d'investigations sur les matériaux « électriques » et les composants
- Ingénierie de l'environnement (mécanique, climatique et Compatibilité électromagnétique [CEM])
- Management thermique
- DataScience, Statistique et IA
- Analyse de construction
- Analyse de défaillance



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

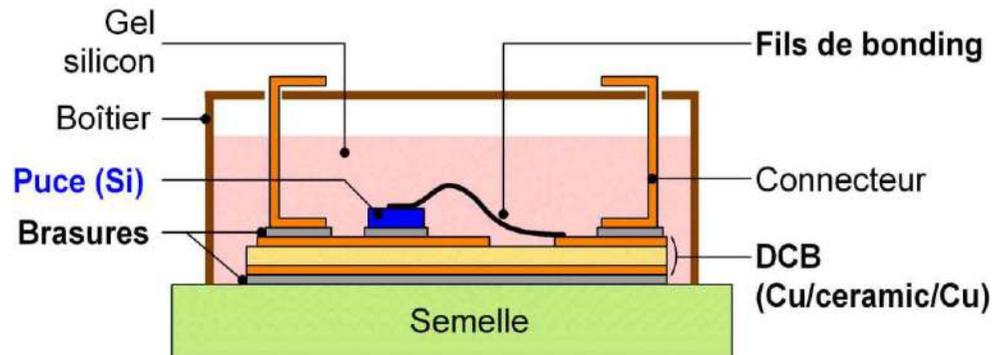
*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Sommaire

- Introduction
- Intégration de puces de puissance dans du PCB (PCB#1)
 - Caractérisation des matériaux
 - Caractérisation expérimentale
 - Caractérisation numérique
 - Vieillesse accélérée
 - Cyclage thermique passif
 - Cyclage thermique actif (estimation de la température de jonction)
- Intégration de puces de puissance dans du PCB (PCB#2)
- Conclusion

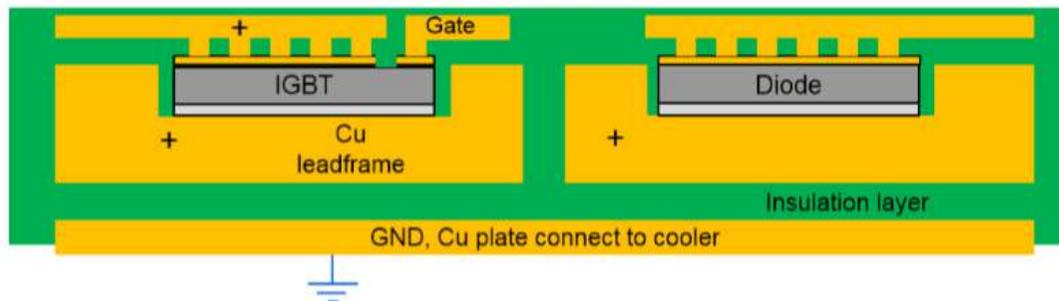
Introduction

➤ Modules de puissance classiques



- ❖ Technologie maîtrisée.
- ❖ Grande robustesse.
- Inductance parasite; composants grand Gap (SiC, GaN).
- Limitation thermique (refroidissement simple face).
- Dégradation des connexion (fils de bonding et brasure).

➤ Enfouissement dans le PCB, connexion par VIAS en cuivre



- ❖ Réduction des inductances parasites.
- Couteux (couche d'accroche Cr/Or..).
- Compliqué à réaliser.

D. J. Kearney, PCB Embedded Semiconductors for Low-Voltage Power Electronic Application, mars 2017

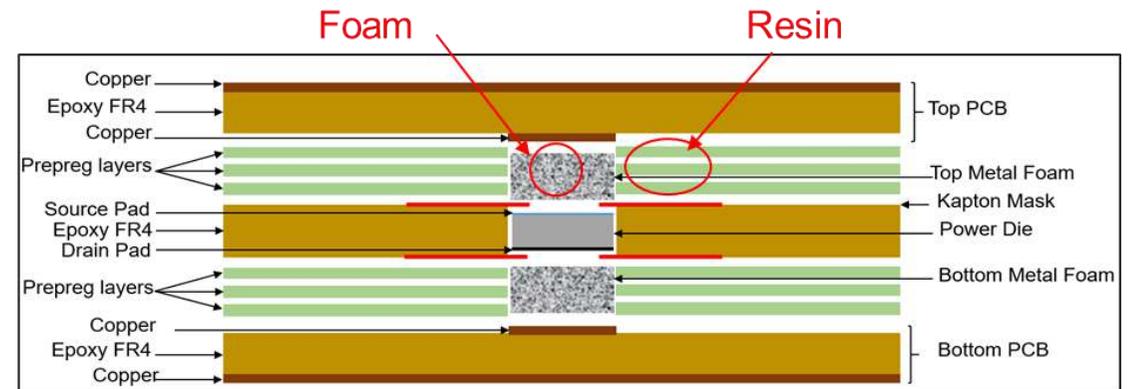
Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#1)

➤ Assemblage proposé

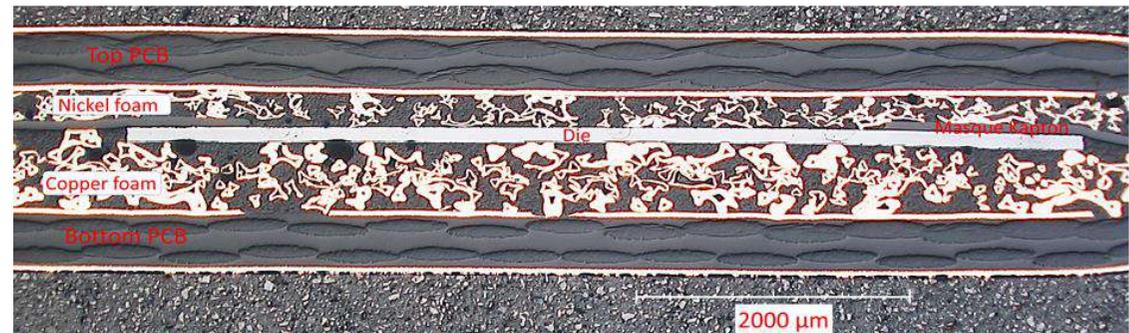
- Intégration de puces de puissances au cœur du PCB.
- Mousse métallique sur la face avant et arrière de la puce.
- Assemblage sans brasure et fils de bonding.

➤ Processus de fabrication

- Empilement des différentes couches.
- Lamination de cet empilement de couches.



Procédé d'intégration PCB, utilisant de la mousse métallique pressée sur face avant et arrière du composant actif.



Coupe métallographique d'une diode intégrée, utilisant mousse Nickel sur face avant et cuivre sur la face arrière (dimensions de la diode 7,3 mm x 7 mm x 0,19 mm); microscope optique.



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

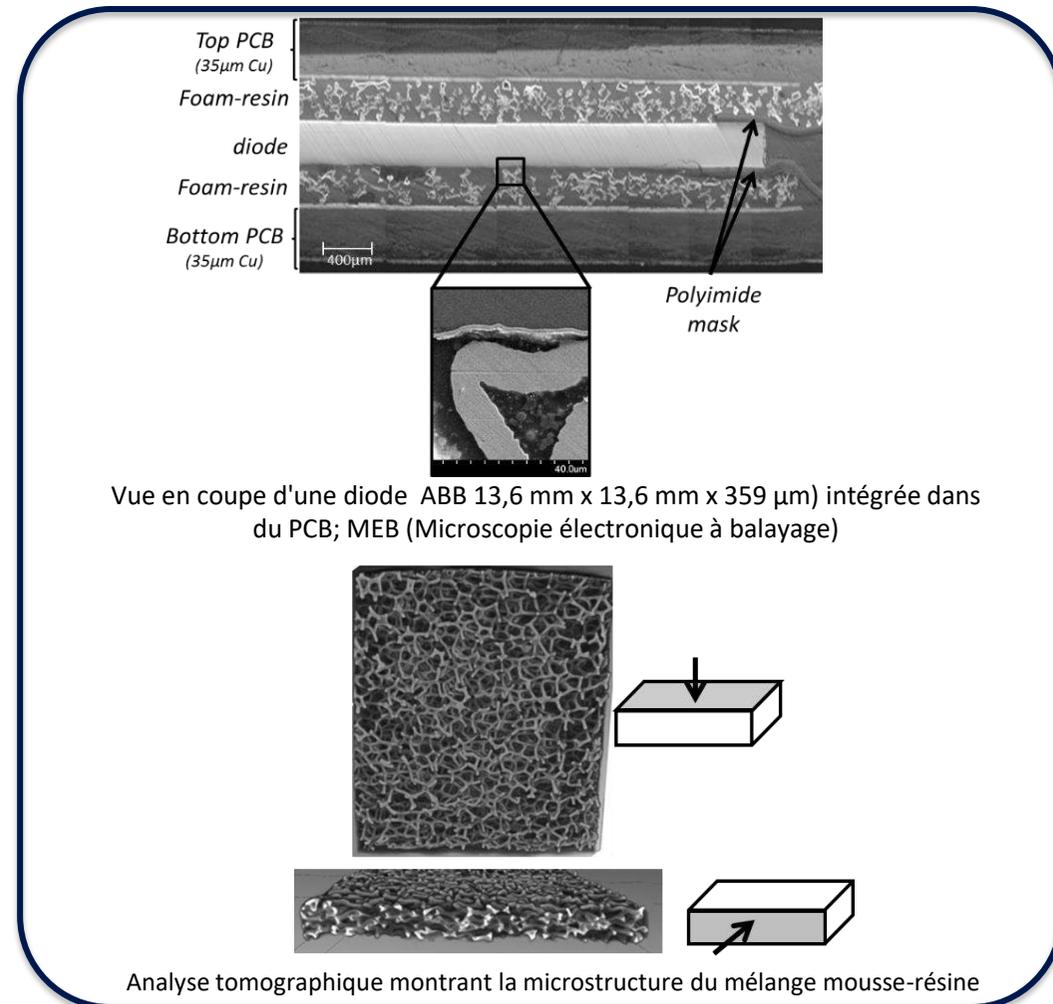
Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#1)

➤ Avantages

- Réduction de l'inductance parasite.
- Simplicité de réalisation.
- Faible coût.

➤ Objectif principal

- Estimation de la robustesse et de la durée de vie.
 - *Qualité des contacts (électrique et thermique).*
 - *Définir les propriétés physiques des matériaux utilisés.*





Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Caractérisation des matériaux

- Caractérisation expérimentale
- Caractérisation numérique



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Caractérisation des matériaux

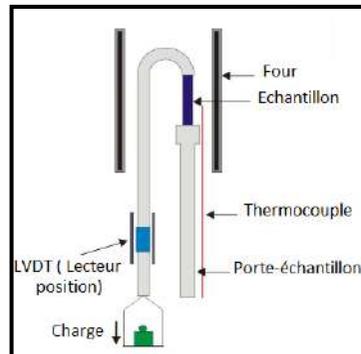
- Caractérisation expérimentale
- Caractérisation numérique

Caractérisation des matériaux : Caractérisation expérimentale

Caractérisation mécanique



Analyseur thermomécanique NETZSCH TMA 402 F1 Hyperion



➤ Essais thermomécanique (sur le mélange mousse-résine)

- Le coefficient de dilatation thermique (CTE) du mélange (Mousse-résine).

$$\varepsilon_{total} = \frac{\sigma_i}{E_i} + CTE_i \cdot \Delta T.$$

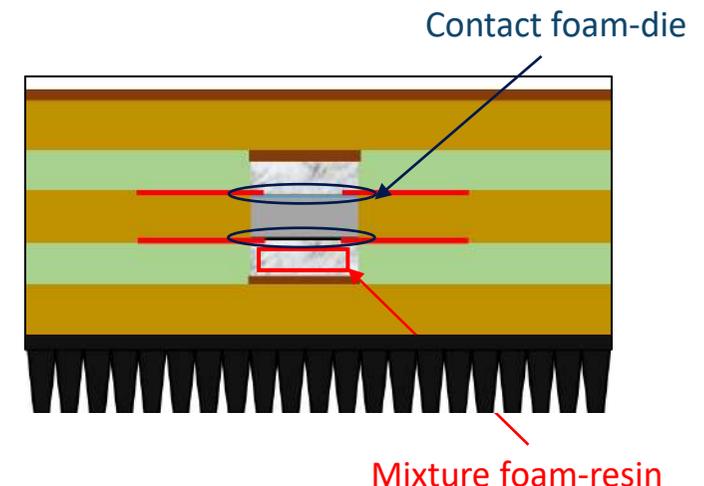
$$CTE = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{dL}{dT}$$

- Module de Young (E) du mélange (Mousse-résine).

$$\varepsilon_{total} = \frac{\sigma_i}{E_i} + CTE_i \cdot \Delta T.$$

Caractérisation thermique et électrique

- Mesurer la conductivité thermique du mélange mousse-résine.
- Mesurer les résistances thermiques des contacts.
- Étudier la résistance de contact électrique entre la mousse métallique et la puce.





Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Caractérisation des matériaux

- Caractérisation expérimentale
- Caractérisation numérique



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Caractérisation des matériaux : Caractérisation numérique

➤ Objectifs

- Caractériser numériquement le mélange mousse-résine
- Déterminer les paramètres effectifs du mélange mousse résine.

Comment modéliser la mousse!

Tomographie

- Image 3D de la mousse pressé

Maillage 3D

- Création d'un maillage volumique

Logiciel Ansys

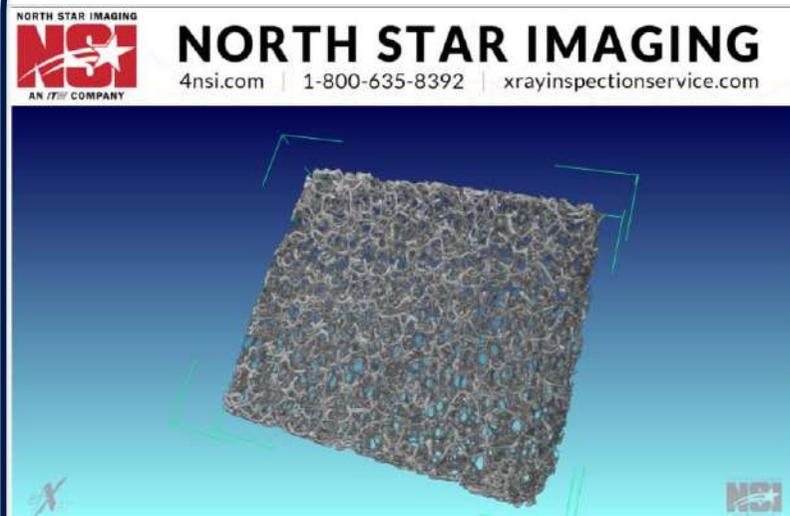
- Utilisation de la géométrie obtenue comme entrée



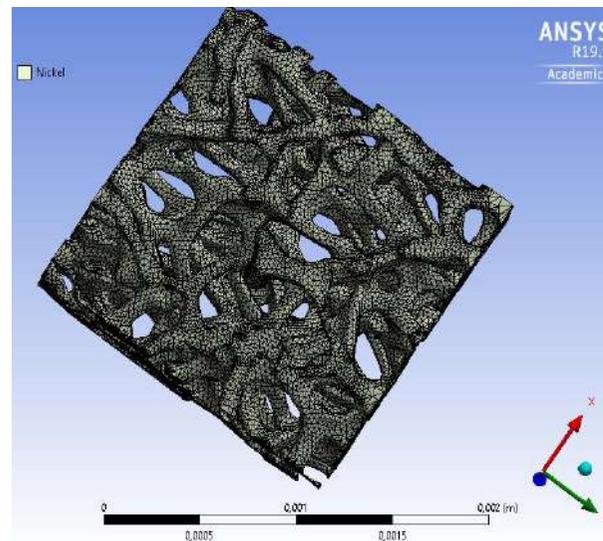
Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

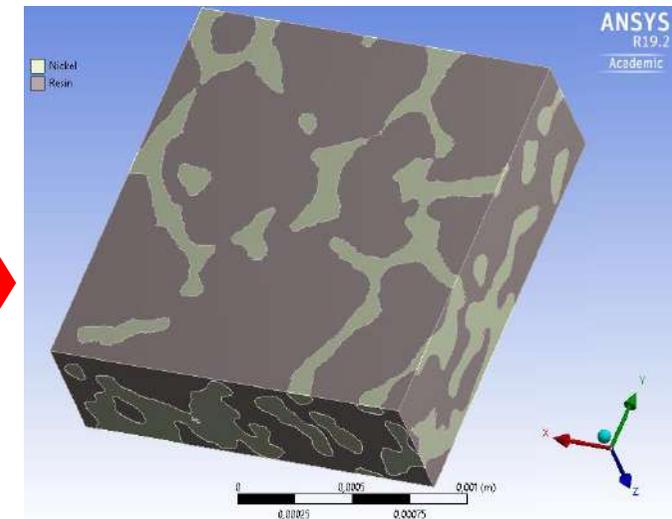
Caractérisation des matériaux : Caractérisation numérique



Analyse tomographique (Mousse métallique pressée (Nickel), dimensions (0,5 mm x 5 mm x 5mm) avec une résolution de 5 μ m).



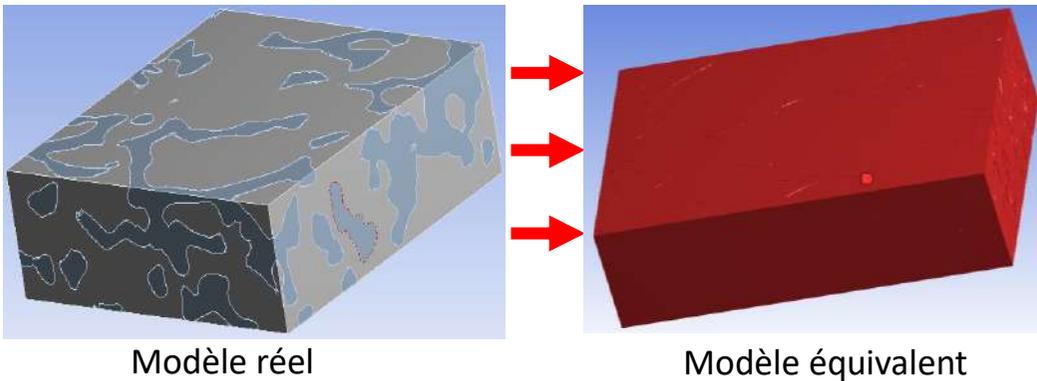
Modèle 3D de la mousse Nickel pressée.



Modèle 3D du mélange mousse-résine.

Caractérisation des matériaux : Caractérisation numérique

➤ Modèle équivalent du mélange (mousse-résine)



➤ paramètres effectifs du mélange mousse résine:

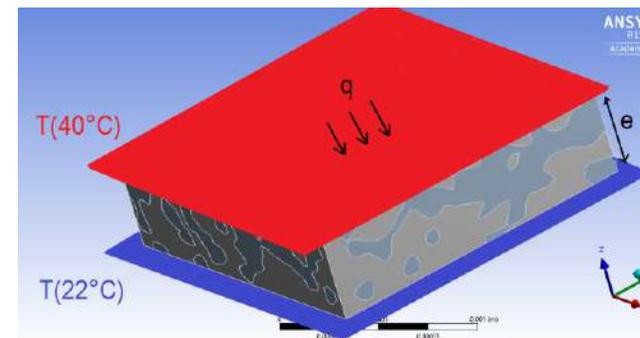
Coefficient de dilatation thermique **CTE**.

Module de Young **E**.

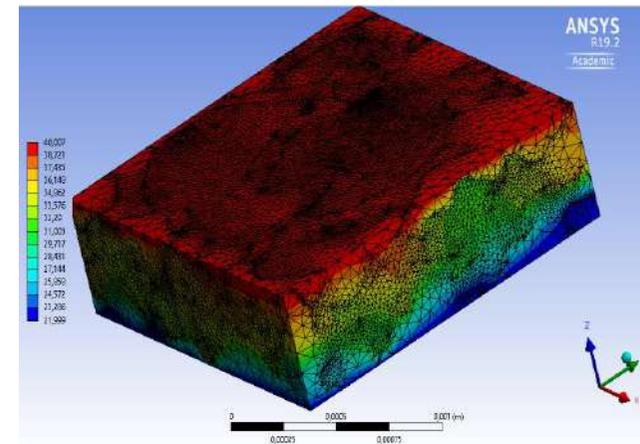
Conductivité thermique λ_{eff} .

Module de cisaillement **G**.

➤ Exemple de détermination de la conductivité effective,



Conditions aux limites appliquées pour le calcul de la conductivité thermique suivant l'axe z



Cartographie de la température en régime permanent

$$\lambda_{eff} \cdot A_{flux} \cdot \frac{\Delta T}{e} = q$$



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Vieillesse accélérée

- Cyclage thermique passif
- Cyclage thermique actif (nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction durant le cyclage thermique actif)



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Vieillessement accéléré

- Cyclage thermique passif
- Cyclage thermique actif (nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction durant le cyclage thermique actif)



Conditionneur thermique (Froilabo-Dragon III).



Conditionneur thermique (Caisson de table Série TM)



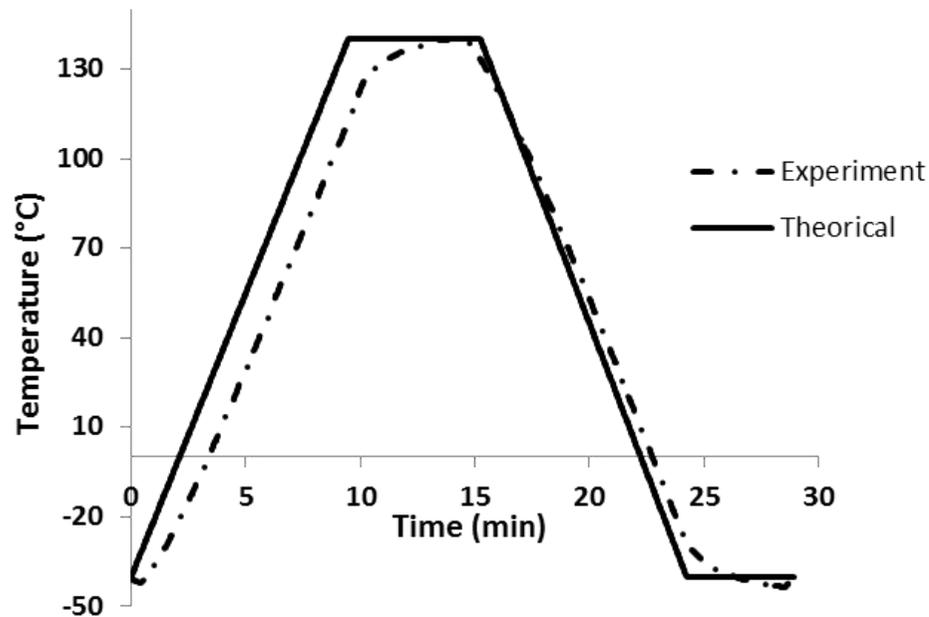
Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Cyclage thermique passif

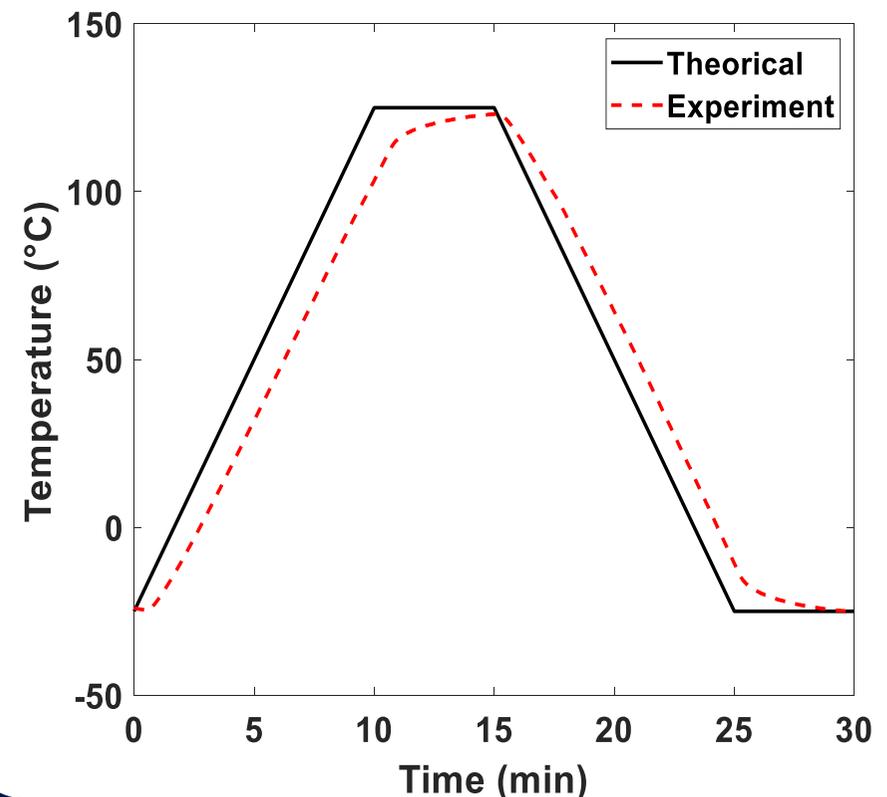
➤ Cycle # 1

[-40°C à 140°C ; 30min/cycle; pente 18°C/min]



➤ Cycle # 2

[-25°C à 125°C ; 30 min/cycle; pente 15°C/min]



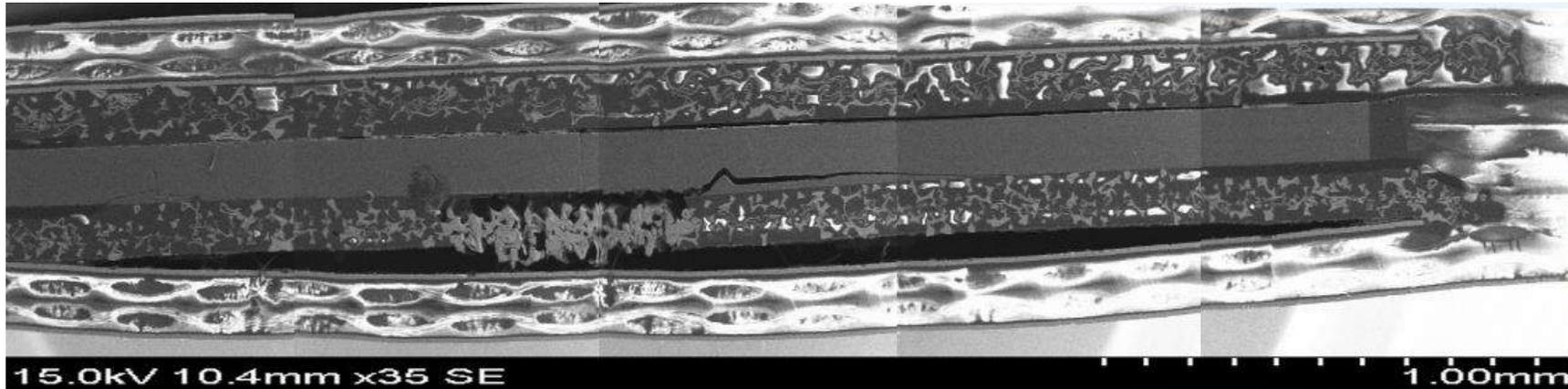


Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Cyclage thermique passif

➤ **Cycle # 1** [-40°C à 140°C ; 30mn/cycle; pente 18°C/min]



Observations au MEB (Microscopie Électronique à Balayage) d'une section réalisée sur un assemble PCB après défaillance

- Apparition de défaillance au bout de 40 à 50 cycles pour la majorité des échantillons.
- Délamination du cuivre du circuit imprimé.
- Fissurations au niveau de la puce.
- La température maximal d'opération Tg (130°C) de l'époxy a été dépassée.



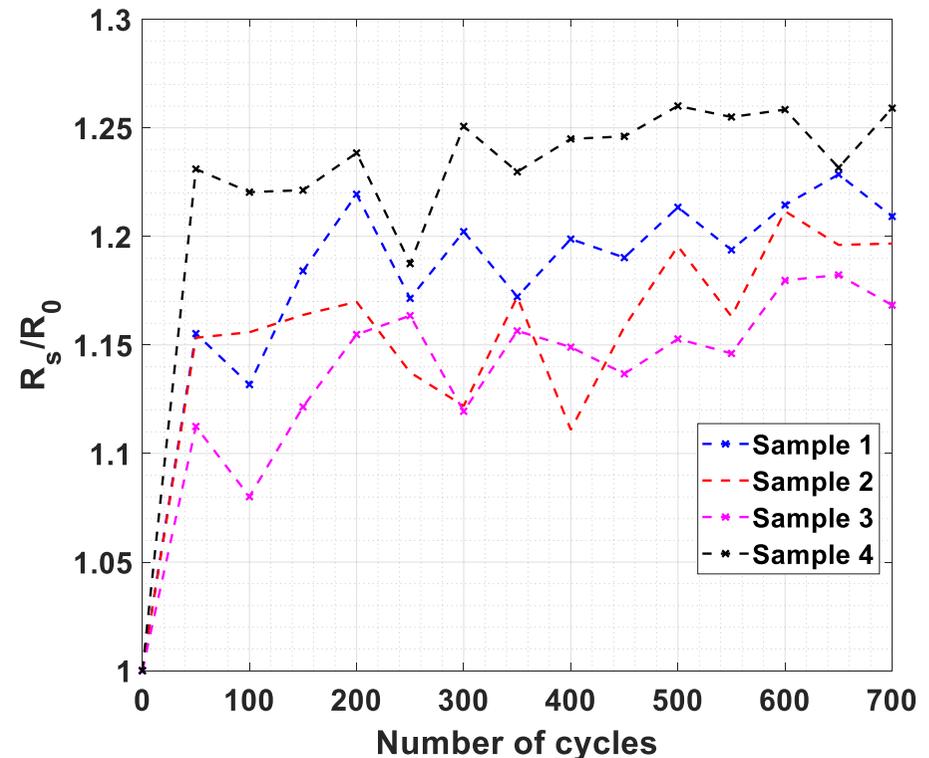
Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Cyclage thermique passif

➤ **Cycle # 2** [-25°C à 125°C ; 30 mn/cycle; pente 15°C/min]

- Normes PCB: JESD22-A104E et MIL-STD-883E
- La résistance électrique des assemblages est mesurée chaque 50 cycles.
- Début des 50 premiers cycles la résistance augmente rapidement jusqu'à environ 15-20 %, puis l'accroissement diminue.
- Les puces sont toujours opérationnel.



Évolution des résistances normalisées R_S/R_0 des fonction du nombre de cycles, R_S résistance électrique à l'état passant, R_0 résistance initiale



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Vieillesse accélérée

- Cyclage thermique passif
- Cyclage thermique actif (nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction durant le cyclage thermique actif)



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Cyclage thermique actif

➤ Cyclage thermique actif

- Injecter un courant dans les modules de puissances.

➤ Problème!

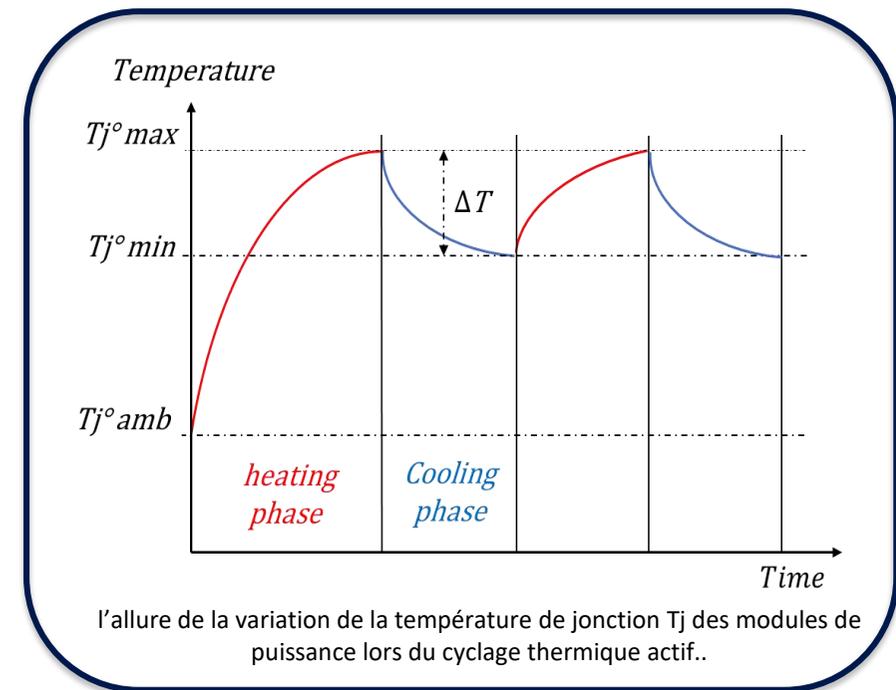
- **Comment suivre l'évolution de la température de jonction!**

➤ Paramètres électriques thermosensibles (TSEP)

- Tension direct V_F sous un faible courant (Diodes, IGBTs).
- Tension de seuil V_{th} (Mosfets).

➤ Inconvénients

- Difficulté de La mesure de T_j sous des contraintes de courant de type PWM.
- Une calibration de chaque composant avant le test.



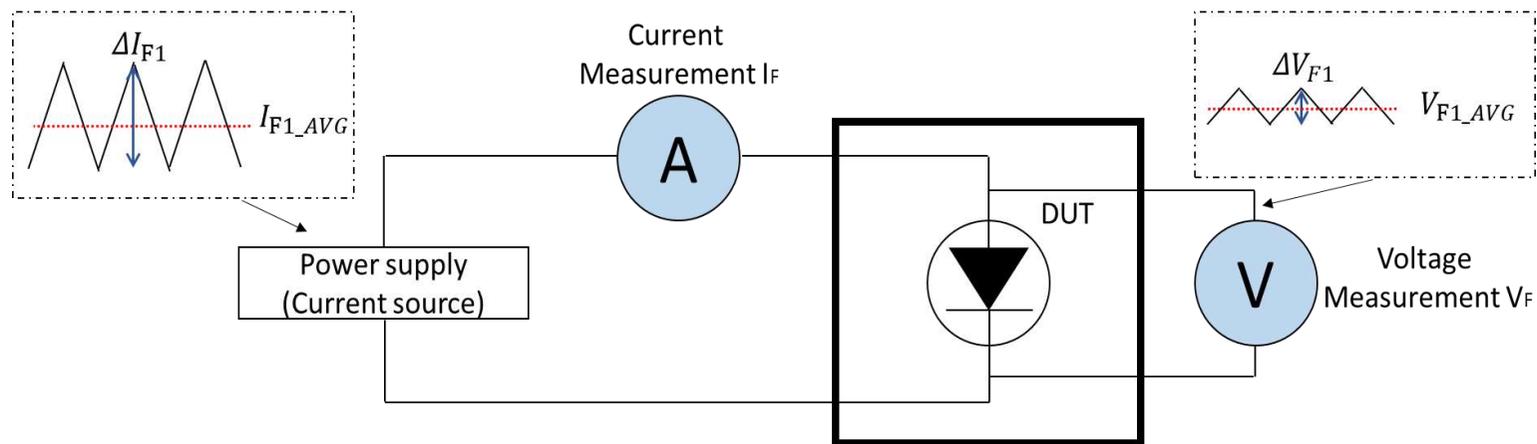


Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction

	The Proposed method
Description	Using the forward voltage V_F and forward current I_F variations
On/off line	On-line
Power device	Diode / (IGBTs in future)
Physical Quantities to be measured	Measuring ΔI_F and ΔV_F variations to estimate thermal voltage U_T



Circuit électrique proposé pour la mesure de la température de jonction T_j , [On-line measurement].



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction – Description de la méthode

- Équation générale de la diode idéale de Shockley $I_F = f(V_j)$:

$$V_j = \eta \cdot U_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_S}\right) \quad \text{Ou :} \quad U_T = \frac{k \cdot T_j}{q}$$

- Caractéristique statique direct $I_F = f(V_F)$ d'une diode réel (packaging)

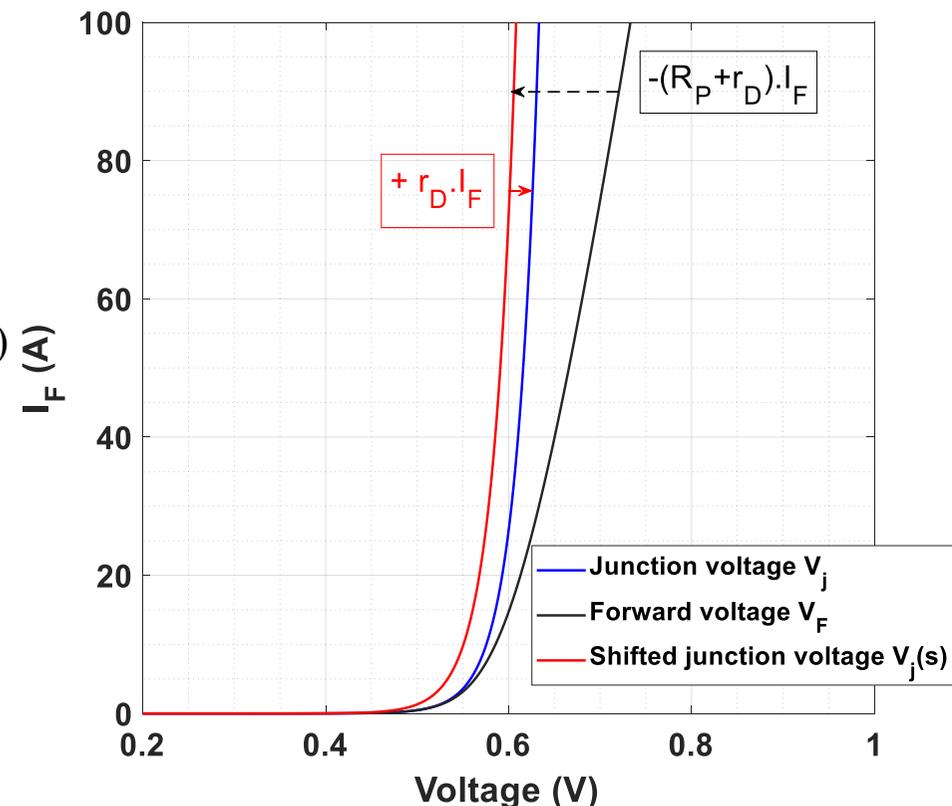
$$V_F(I_F) = \eta \cdot U_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_S}\right) + R_P \cdot I_F$$

- Le calcul de la pente de la courbe en noir $I_F = f(V_F)$:

$$\frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \frac{\Delta(V_j + R_P \cdot I_F)}{\Delta I_F} = \frac{\Delta V_j}{\Delta I_F} + R_P = r_D + R_P = R_{total}$$

- Retrancher le produit $(R_{total} \cdot I_F)$ de la tension directe V_F :

$$V_j(\text{shifted}) = V_F - (R_P + r_D) \cdot I_F$$



Caractéristiques statiques directes $I_F = f(V_F)$ d'une diode de puissance intégrée (courbe noire) ; Équation générale de la diode idéale de Shockley $I_F = f(V_j)$ (courbe bleue).



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction – Description de la méthode

Première étape

➤ Injecter un courant triangulaire I_{F1} (courant moyen I_{F1_AVG} et une ondulation ΔI_{F1})

$$\diamond R_{total1} = \frac{\Delta V_{F1}}{\Delta I_{F1}}$$

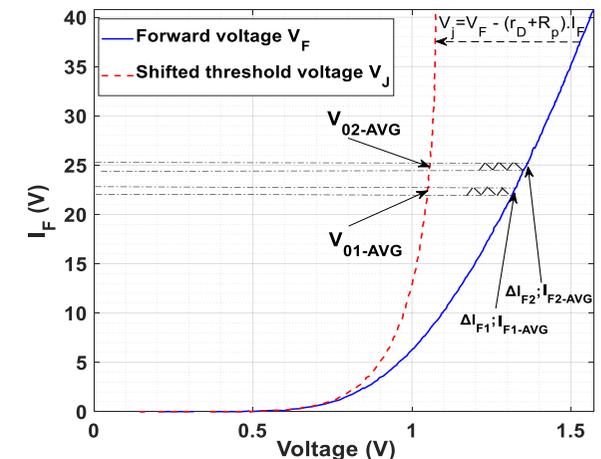
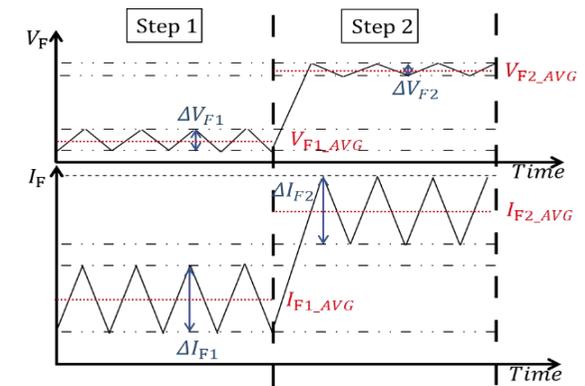
$$\diamond V_{01_AVG} = V_{F1_AVG} - (R_{total1}) \cdot I_{F1_AVG}$$

Deuxième étape:

➤ Injecter un courant triangulaire I_{F2} (avec un courant moyen plus élevée $I_{F2_AVG} > I_{F1_AVG}$).

$$\diamond R_{total2} = \frac{\Delta V_{F2}}{\Delta I_{F2}}$$

$$\diamond V_{02_AVG} = V_{F2_AVG} - (R_{total2}) \cdot I_{F2_AVG}$$



Estimation de la température de jonction à l'aide de la méthode proposée.



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

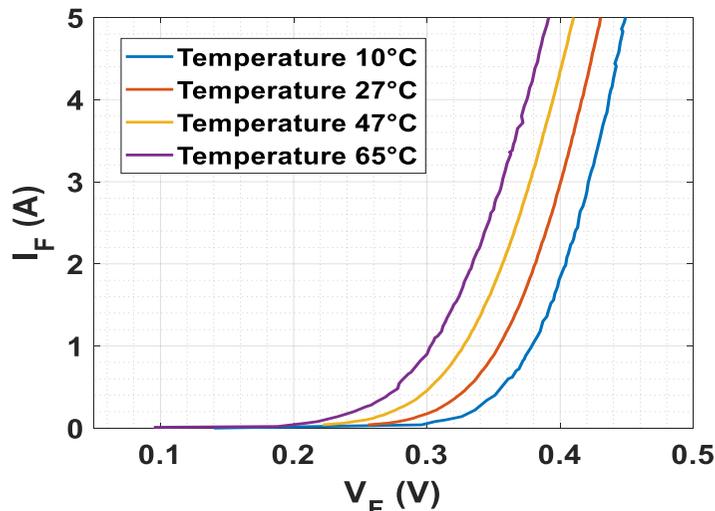
Nouvelle méthode d'estimation de la température de jonction – Validation du modèle de la diode utilisé

➤ Modèle de diode utilisé :

$$V_F = (\eta \cdot U_T) \cdot \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_S}\right) + R_P \cdot I_F$$

Est ce que ce modèle est valide !?

➤ Les caractéristiques statiques directes $I_F = f(V_F)$ d'une diode [PBYR3045PT] ont été tracées pour différentes températures,

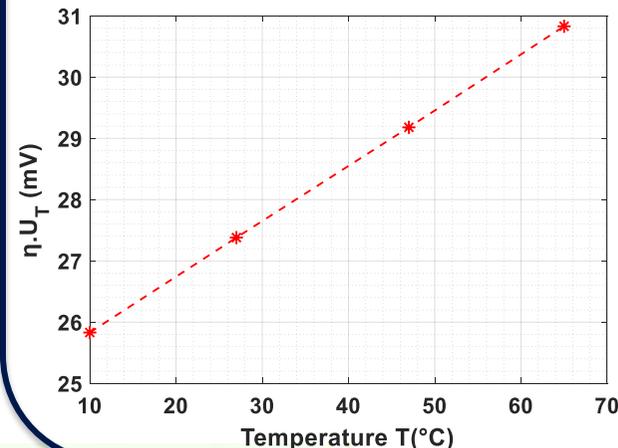


Caractéristiques statiques directes $I_F = f(V_F)$ d'une diode pour différentes températures [PBYR3045PT].

➤ Ajustement de la courbe expérimentale $I_F = f(V_F)$:

Temperature T (°C)	10°C	27°C	47°C	65°C
I_s (μA)	0,566	3,247	18,05	73,81
R_p (mΩ)	7,257	8,07	8,855	9,624
$\eta \cdot U_T$ (mV)	25,83	27,38	29,18	30,83
$\Delta(\eta \cdot U_T) / \Delta T$	In the range of 0,09 mV/°C			
Emission-coefficient η	1.0582	1.0582	1.0572	1.0575
R-square	0.9999	1	0.9999	1

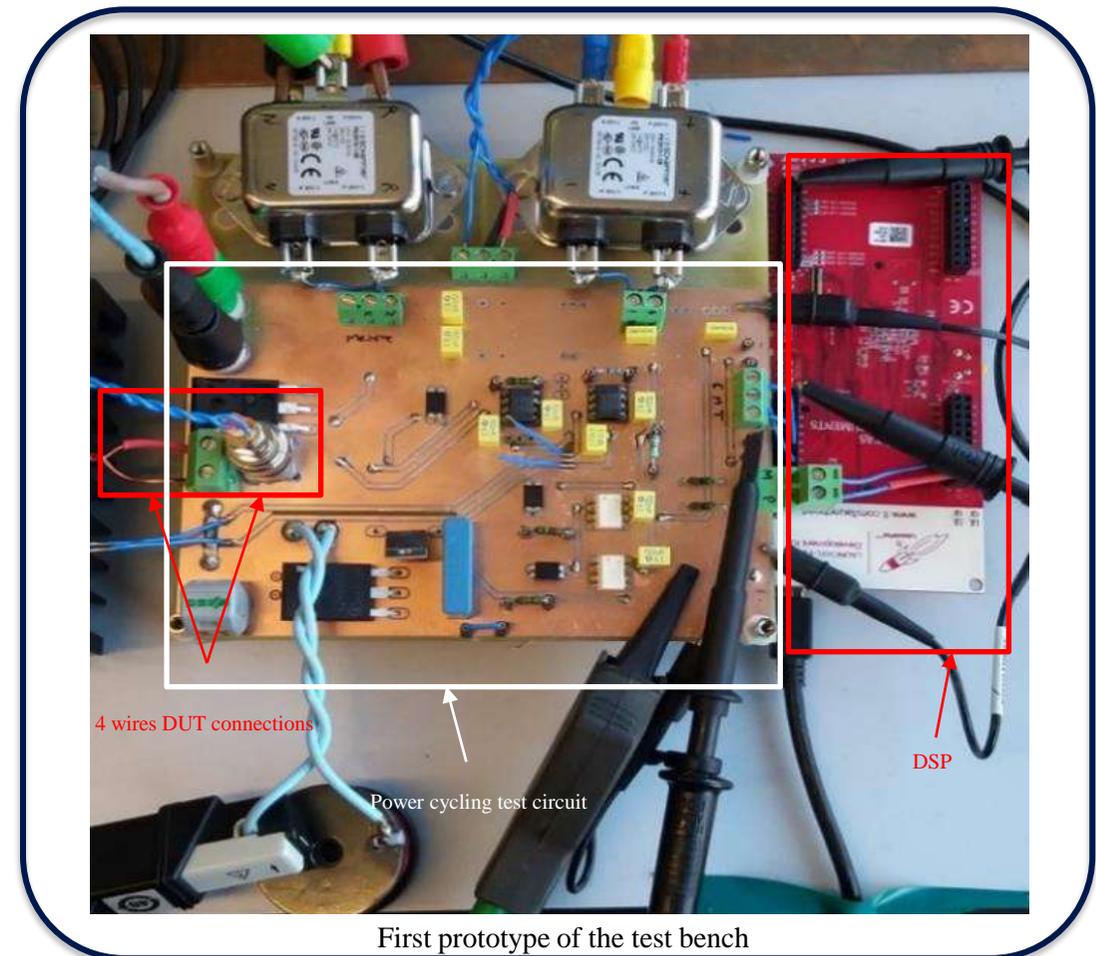
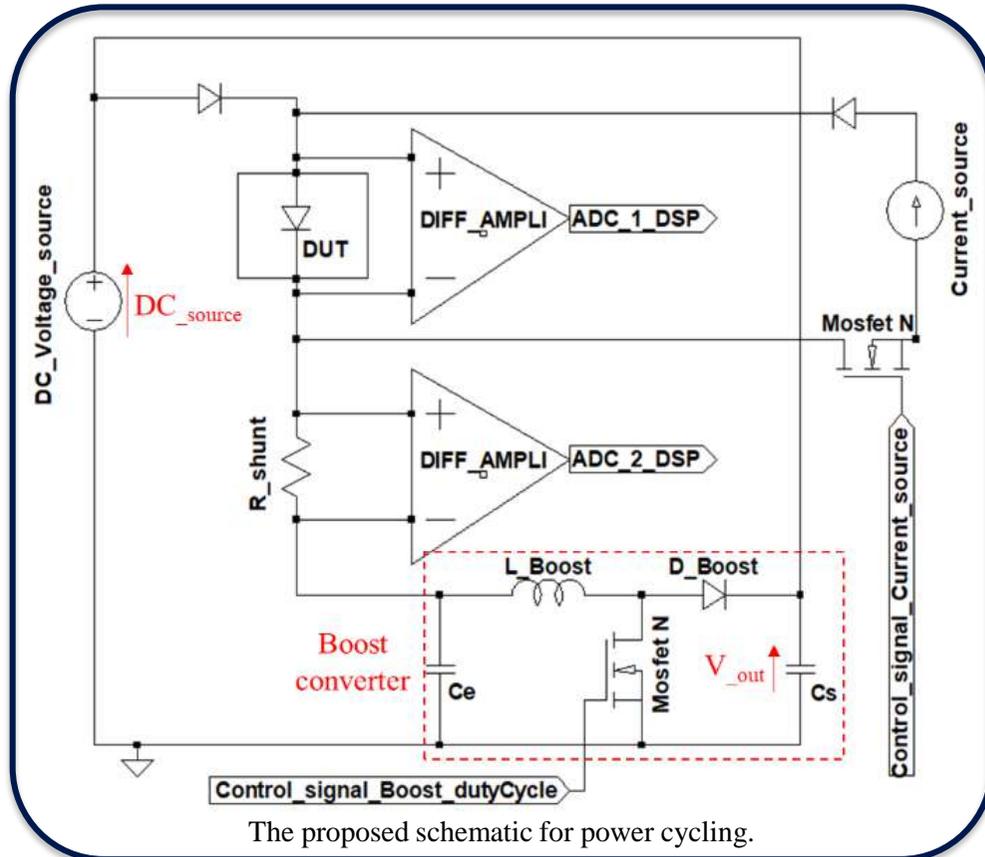
Résultats obtenus à partir de l'outil d'ajustement des courbes (Matlab® curve fitting tool).



Conclusions

- L'existence d'une parfaite linéarité entre le potentiel thermique et la température appliquée.
- La sensibilité de la mesure est de l'ordre de 0,09 (mV/°C).

Cyclage thermique actif (estimation de la température de jonction) - Banc de test:





Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#2)



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

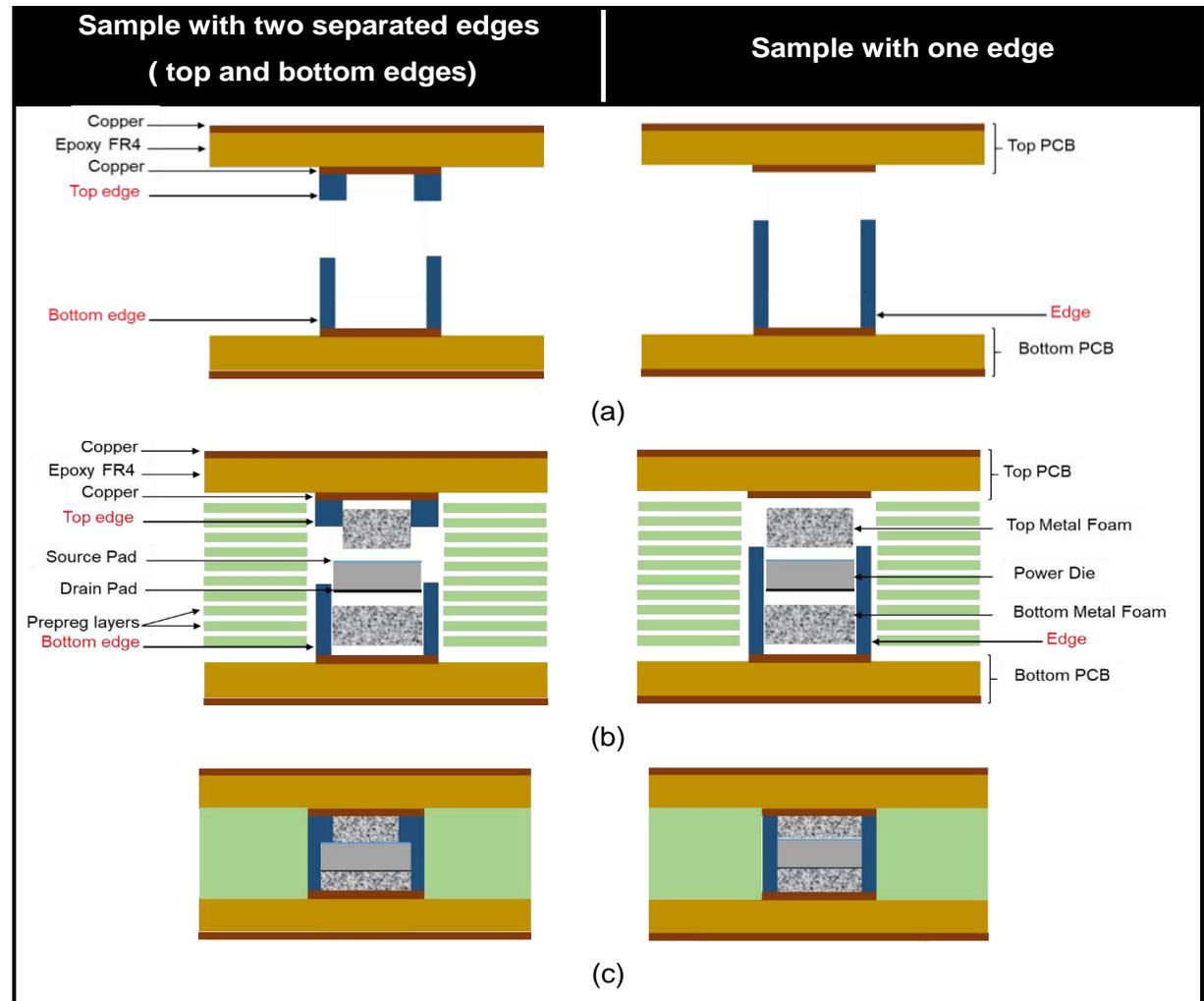
Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#2)

➤ Objectif

- Assurer le contact électrique en utilisant uniquement de la mousse métallique (sans imprégnation de la résine).

➤ Processus de fabrication

- Réalisation de bords autour de l'emplacement du composant actif et des mousses métalliques.
- Empilement des différentes couches.
- Lamination de cet empilement de couches.



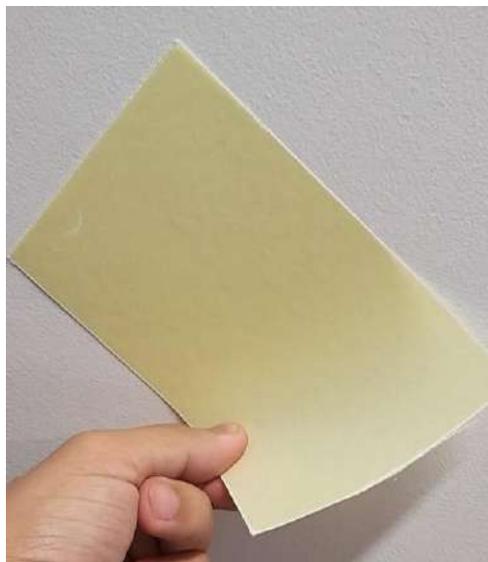


Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#2)

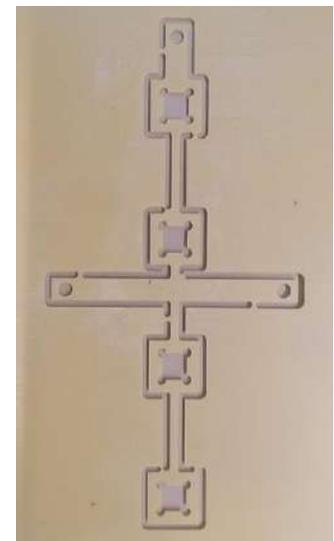
Étape 01: Réalisation de bords autour du composant actif et des mousses métalliques.



Couches de Prepreg non durcies.



Couches de Prepreg après durcissement.



Gravure mécanique des couches de Prepreg.

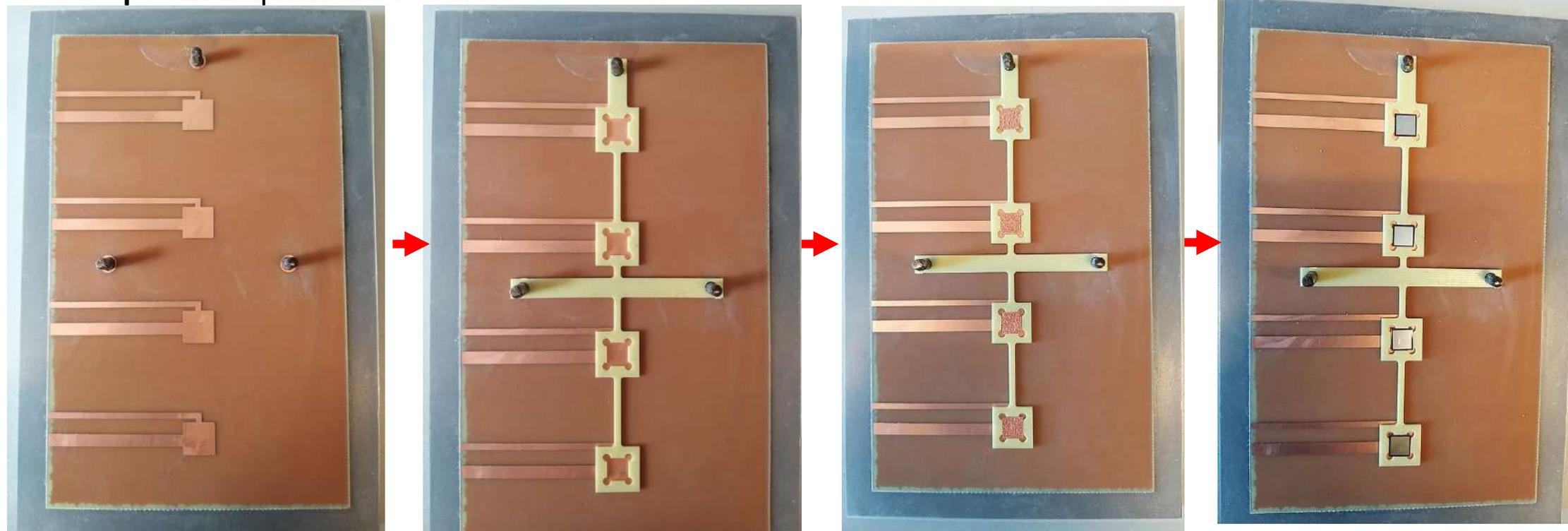


Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#2)

Étape 02: Empilement des différentes couches.



PCB inférieur (gravure
des pistes électriques)

L'ajout des bords

Dépôt de la mousse
métallique pour le
contact inférieur.

Dépôt de la puce.



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#2)

Étape 02: Empilement des différentes couches.



Dépôt des couches de
Prepreg non durcies



Dépôt de la mousse métallique
pour le contact supérieur.



L'ajout du PCB supérieur



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Intégration de puces de puissance dans du PCB avec prise de contact par mousse métallique (PCB#2)

- **Reste à faire concernant le nouveau Procédé d'intégration PCB#2**
 - Faire une étude de caractérisation électrique, thermique et mécanique.
 - Faire des essais de vieillissement accéléré (comportement au cyclage thermique passif et actif).
 - Comparer les résultats obtenus avec ceux de l'assemblage précédent (PCB#1).



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Conclusion

- La présentation de nouveaux procédés d'intégration PCB (sans fil de bonding et sans brasure).
- Caractérisation thermique et électrique.
 - Le calcul des résistances électriques et thermiques des différents contacts.
- Caractérisation numérique.
 - Trouver un modèle équivalent du mélange mousse-résine, avec des paramètres effectifs.
- Étudier le comportement de l'assemblage envers le cyclage thermique passif (fiabilité).
- Élaborer une nouvelle méthode pour l'estimation de la température de jonction durant le cyclage thermique actif.



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans du PCB

Perspectives possibles

Niveau de maturité technologique TRL 3-4

Validation de la faisabilité et du bon fonctionnement du concept technologique (au niveau du laboratoire)



Continuité des travaux de recherche :

- Étudier le comportement des assemblages PCB envers le cyclage thermique actif (Power cycling - sous contraintes PWM).
- Elaborer un modèle numérique 3D de l'assemblage proposé, afin de l'optimiser.
- Trouver de nouveaux matériaux avec de meilleures performances thermique, électrique et mécanique (comme alternative pour la mousse métallique, mais en gardant toujours l'effet ressort).

Coté industriel :

Actuellement, la réalisation des assemblages se fait de manière artisanale au niveau du laboratoire, il serait plus intéressant de se retourner vers un industriel pour automatiser le procès.

A long terme :

- Intégration de cellules de commutation avec Driver.



Les Rendez-Vous Fiabilité du CFF

*Fiabilité des convertisseurs d'électronique
de puissance intégrés dans du PCB*

Merci !

Contact : Said.bensebaa@satie.ens-cahan.fr

Références :

- S. Bensebaa, M. Berkani, S. Lefebvre, M. Petit, N. Schmitt, et S. Zhang, « Reliability study of PCB-embedded power dies using solderless pressed metal foam », *Microelectronics Reliability*, vol. 114, p. 113904, nov. 2020, doi: [10.1016/j.microrel.2020.113904](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113904).
- S. Bensebaa, M. Berkani, M. Petit, et S. Lefebvre, « On-line temperature measurement during power cycle of PCB-embedded diode », *Microelectronics Reliability*, p. 114313, oct. 2021, doi: [10.1016/j.microrel.2021.114313](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114313).
- S. Bensebaa, M. Berkani, S. Lefebvre, M. Petit, et N. Schmitt, « Experimental And Numerical Characterization Of PCB-Embedded Power Dies Using Solderless Pressed Metal Foam », in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, Lyon, France, sept. 2020, p. 1-10. doi: [10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215758](https://doi.org/10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215758).
- S. Bensebaa, M. Berkani, S. Lefebvre and M. Petit, "Design And Characterization Of PCB-Embedded Power Dies Using Solderless Pressed Metal Foam," *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2020, pp. 1-7.