



# Tech Hour

Le rendez-vous mensuel  
des technologies et procédés innovants

**RDV Fiabilité du CFF**  
**Dégradation de l'interface fils-métallisation**  
**des modules IGBT : Modélisation et analyse de**  
**microstructure**

## SATIE



Centre Français Fiabilité



# TECH HOUR

## FORMAT & DÉROULÉ

### LES RENDEZ-VOUS FIABILITE DU CFF



#### ➤ Agenda du Tech Hour – 12h30 à 13h30 :

- Introduction
- Présentation de la technologie et de ses avancées
- Présentations d'applications



#### ➤ Format et règles de fonctionnement :

- Le Tech Hour se déroule via l'outil de **web-conférence Webex**,
- Les **micros seront coupés** pendant la présentation (*environ 45 min*),
- Vous pouvez poser vos questions par « **chat** », à l'attention de l'organisateur,
- Il n'y a pas de nécessité de connecter sa webcam
  - Nous vous conseillons d'utiliser l'appel directement via le téléphone



# TECH HOUR

## ORGANISATEURS



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



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



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



Filière d'excellence, **Normandie Energies** soutient le développement économique du territoire en fédérant plus de 240 acteurs normands de l'énergie.



Ancré dans la Région Hauts-de-France, **i-Trans** est le pôle de compétitivité des transports, de la mobilité et de la logistique.



**Normandie Maritime**, la filière d'excellence en Normandie du maritime et du fluvial.



Filière d'excellence, **Logistique Seine-Normandie (LSN)** fédère 185 adhérents : des entreprises du transport et de la logistique et des acteurs économiques de Normandie.



**ACSIEL Alliance Electronique** réunit plus de 150 adhérents (grandes entreprises, ETI, PME, laboratoires, institutions, associations...), répartis sur l'ensemble du territoire français.



Basé à Lille, le **Pôle MEDEE** est un cluster qui fédère et anime une communauté d'acteurs spécialisés en génie électrique.

# TECH HOUR

## SUJET DU JOUR

mardi 28 novembre 2023

## Le Tech Hour du jour

**RDV Fiabilité du CFF**

L'intervention sera réalisée par :

**Ayda HALOUANI** [ayda.halouani@univ-eiffel.fr](mailto:ayda.halouani@univ-eiffel.fr)

**Laboratoire SATIE**

25 allée des marronniers, 78000 Versailles

Les fils de bonding utilisés pour les modules de puissances IGBT se dégradent suite aux contraintes thermomécaniques engendrées par des variations de température. Un modèle de propagation de fissure basé sur la variation de la déformation plastique et une corrélation entre le comportement macroscopique et la microstructure font l'objet de cette étude.

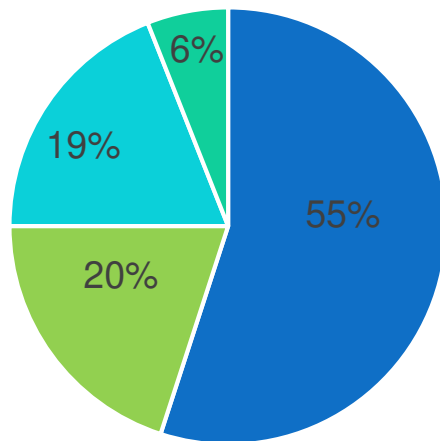
# Dégradation de l'interface fils-métallisation des modules IGBT : Modélisation et analyse de microstructure

Présenté par : Ayda HALOUANI  
Chargée de Recherche Université Gustave Eiffel - SATIE

*CFF novembre 2023*

# CONTEXTE

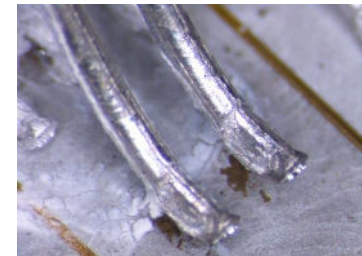
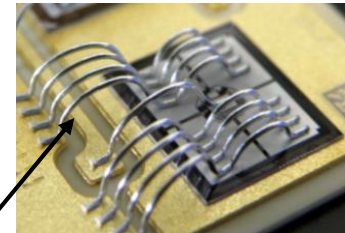
- Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs) sont de plus en plus demandés dans les systèmes de transport, que ce soit dans les chemins de fer, l'aviation, ou même les applications automobiles.
- La fiabilité des IGBTs reste un point critique.



- Température
- Vibration
- Humidité
- Corrosion

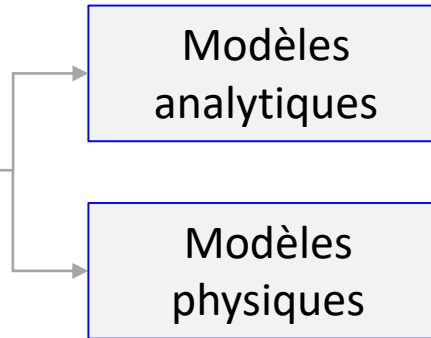
Connection électrique

Connexion mécanique



# MOTIVATIONS

Modèles de durée de vie



Microstructure

Objectifs :

## Établir un nouveau modèle de durée de vie

- ✓ Prise en compte de l'évolution de la déformation plastique lors des cycles.
- ✓ Basé sur les résultats d'expériences menées dans des conditions réelles de température (basse  $\Delta T$ ).

Établir une corrélation entre le comportement de dégradation macroscopique et la microstructure des fils d'aluminium

# PLAN

1

Expériences et résultats

2

Modèle de Propagation des fissures et validation

3

Analyse de la microstructure

4

Conclusions



# 1. EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

## 1.1. Conditions du test de cyclage en puissance:

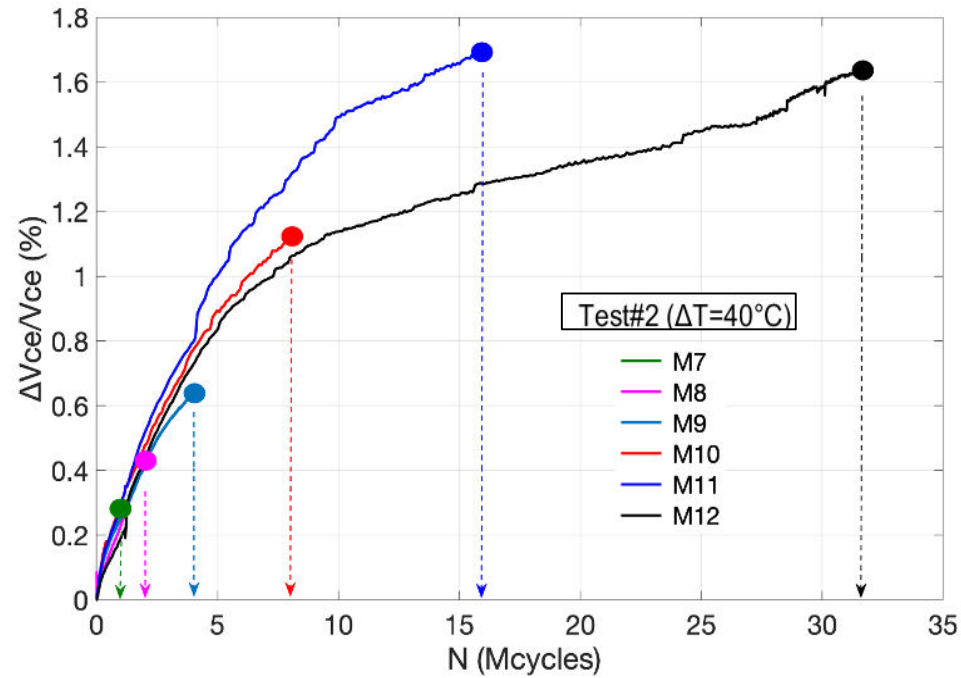
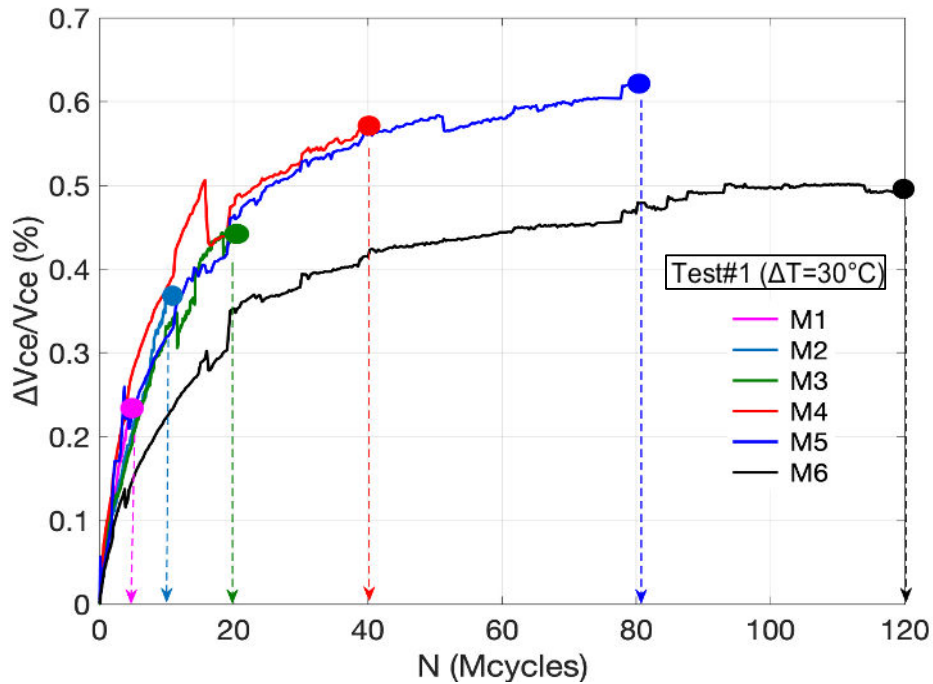
- Modules IGBT (1200V- 150A)
- Fils de connexion en aluminium (Al) d'un diamètre de 390  $\mu\text{m}$
- Epaisseur de métallisation 5  $\mu\text{m}$

	$\Delta T_j$	$T_{ref}$	$t_{on}$	$t_{off}$
Test#1	30°C	55°C	40ms	100ms
Test#2	40°C	55°C	40ms	100ms

$I_{RMS}$	$f_{com}$	$k$
100A	10kHz	95%
100A	18kHz	95%

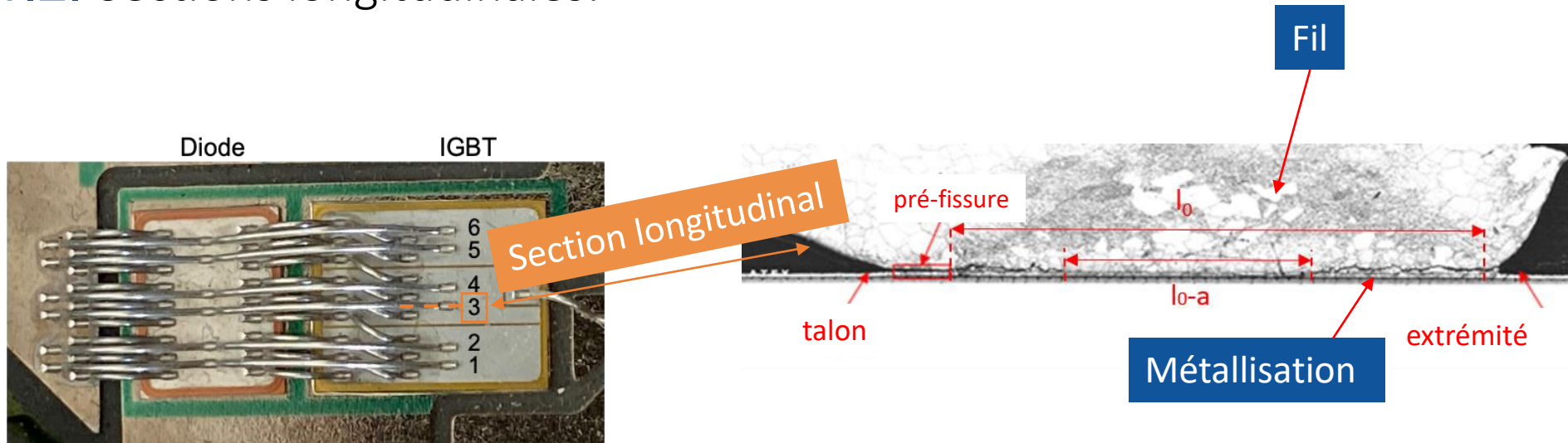
# 1. EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

## 1.2. Evolution de Vce:



# 1. EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

## 1.2. Sections longitudinales:



$l_0$  : Longueur de contact initial

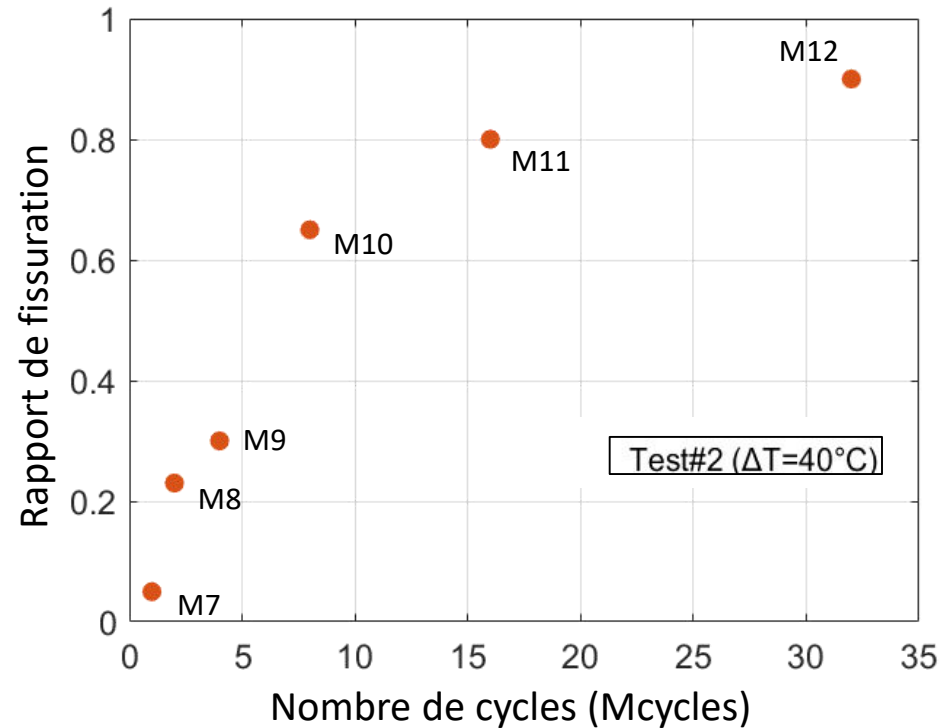
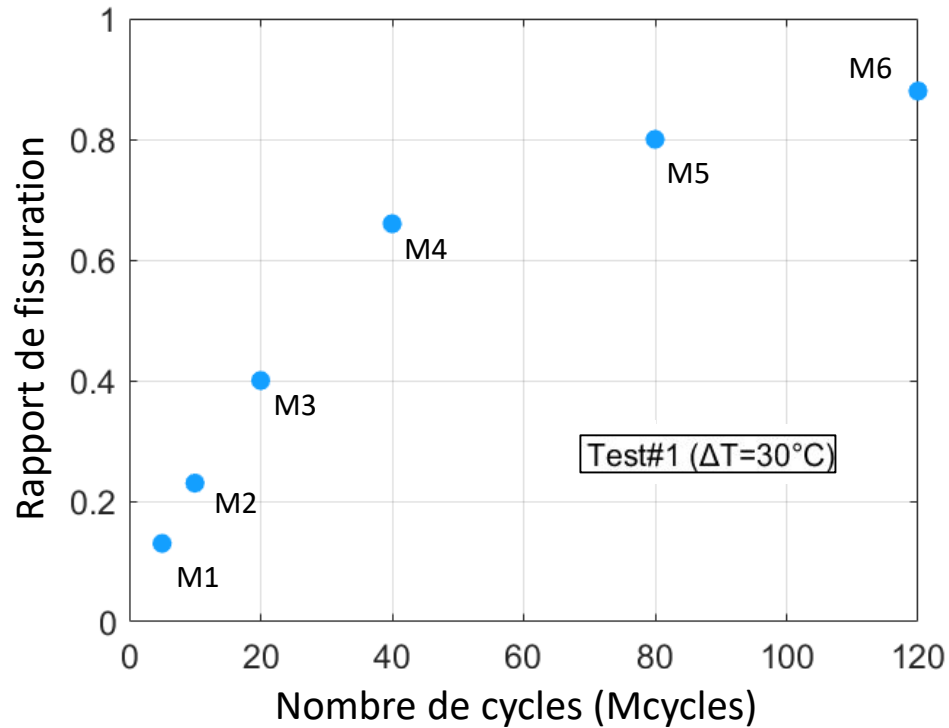
$a$  : Longueur de fissure

$a = a_{\text{côté extrémité}} + a_{\text{côté talon}}$ , excluant la pré-fissure

$\frac{a}{l_0}$  : Rapport de fissuration

# 1. EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

## 1.2. Propagation des fissures:



# PLAN

1

Expériences et résultats

2

Modèle de Propagation des fissures et validation

3

Analyse de la microstructure

4

Conclusions

## 2. MODÈLE DE PROPAGATION DE FISSURES

Loi de Paris modifiée [1] :

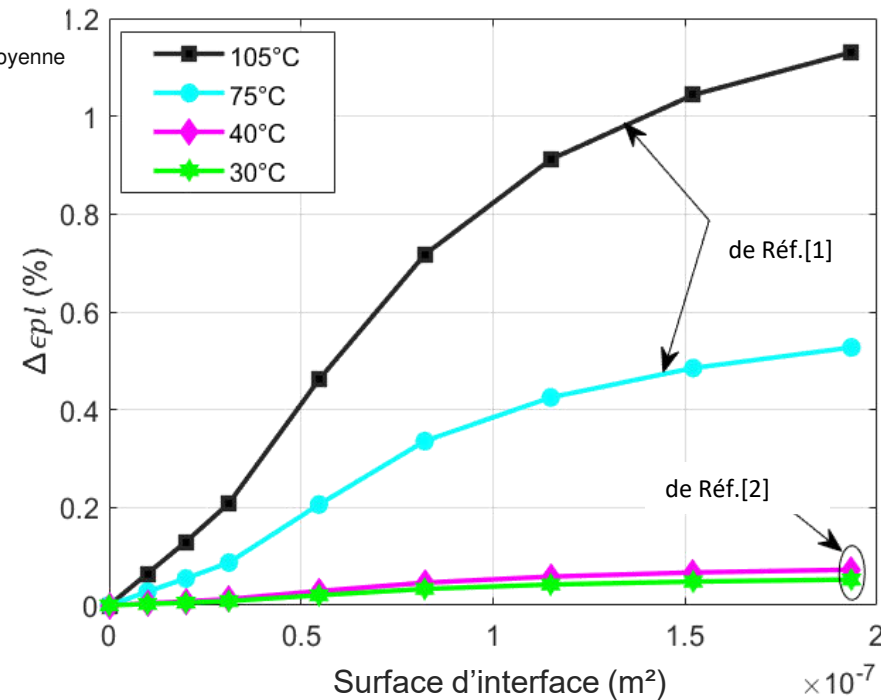
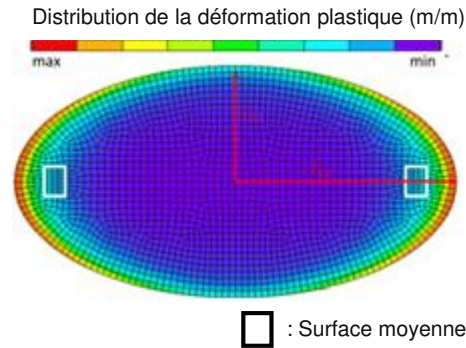
$$\frac{da}{dN} = c_1 (\Delta\epsilon_{pl})^{c_2}$$

$a$  : La longueur de fissure,

$N$  : Le nombre de cycles,

$\Delta\epsilon_{pl}$  : La variation de la déformation plastique par cycle,

$c_1$  and  $c_2$  sont deux paramètres

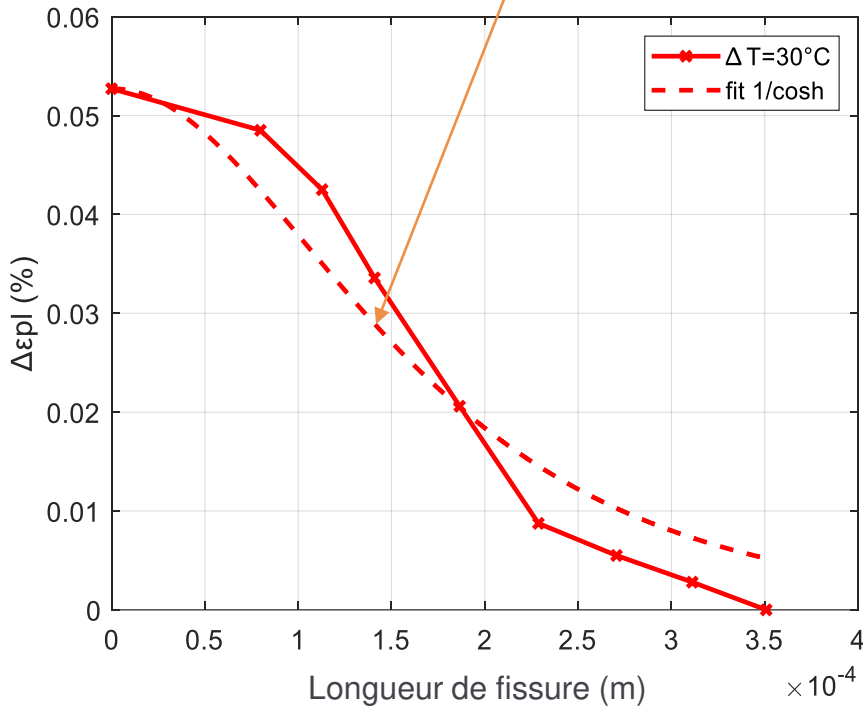


[1] A. Grams, J. Hofer, A. Middendorf, S. Schmitz, O. Wittler, and K. D. Lang, "A geometry-independent lifetime modelling method for aluminum heavy wire bond joints," 2015 16th Int. Conf. Therm. Mech. Multi-Physics Simul. Exp. Microelectron. Microsystems, EuroSimE 2015, vol. 49, no. 0, pp. 1–6, 2015.

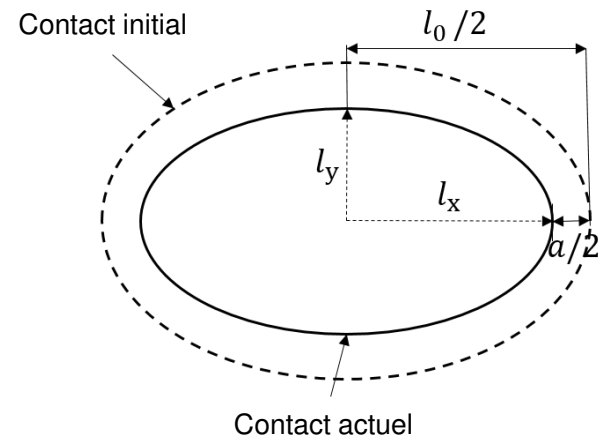
[2] N. Dornic et al., Stress-based model for lifetime estimation of bond wire contacts using power cycling tests and finite-element modelling, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 7.3, 2019, p. 1659-1667.

## 2. MODÈLE DE PROPAGATION DE FISSURES

$$\Delta\varepsilon_{pl} = \frac{\Delta\varepsilon_{pl_0}}{\cosh\left(\alpha \frac{a}{l_0}\right)} ; \alpha = cte$$



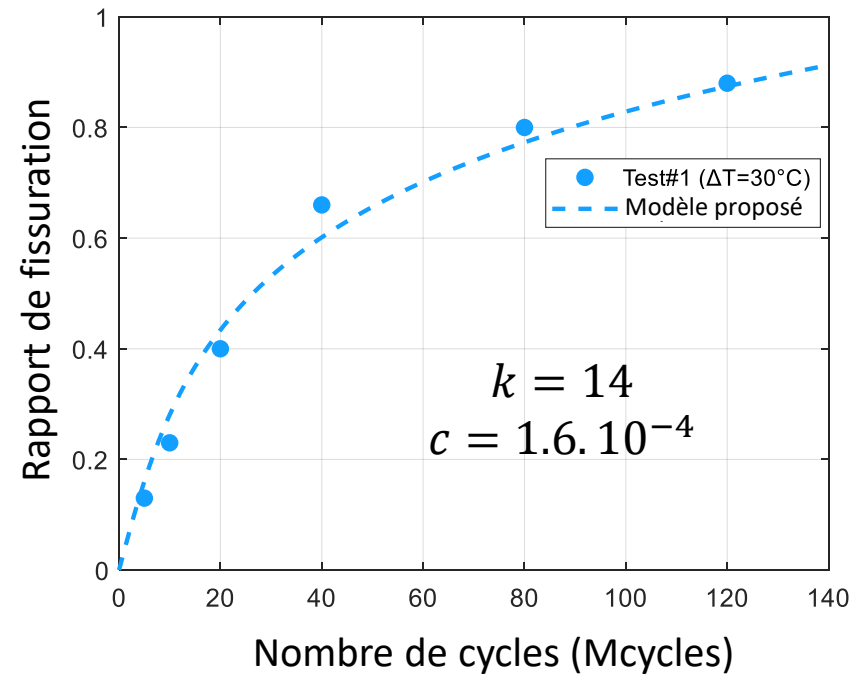
1er hypothèse:  $l_x = 2 * l_y$



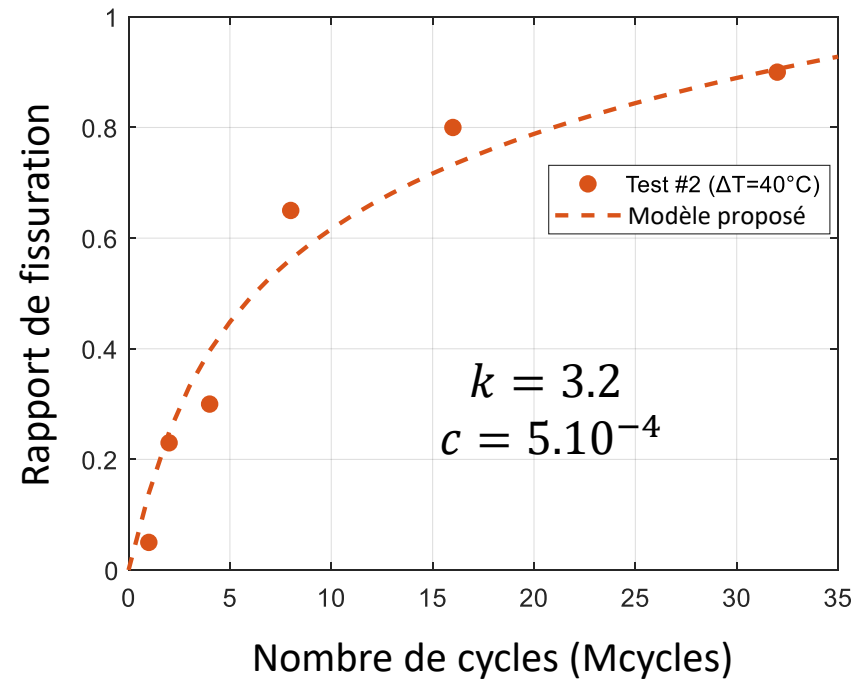
2ème hypothèse :  $c_2 \approx 1$

$$\Rightarrow \frac{a}{l_0} = \frac{1}{\alpha} \operatorname{asinh}(N/k) \quad \text{avec} \quad k = \frac{l_0}{c_1 \alpha \Delta\varepsilon_{pl_0}}$$

## 2. MODÈLE DE PROPAGATION DE FISSURES



$$N_f \approx 180 \cdot 10^6 \text{ cycles}$$

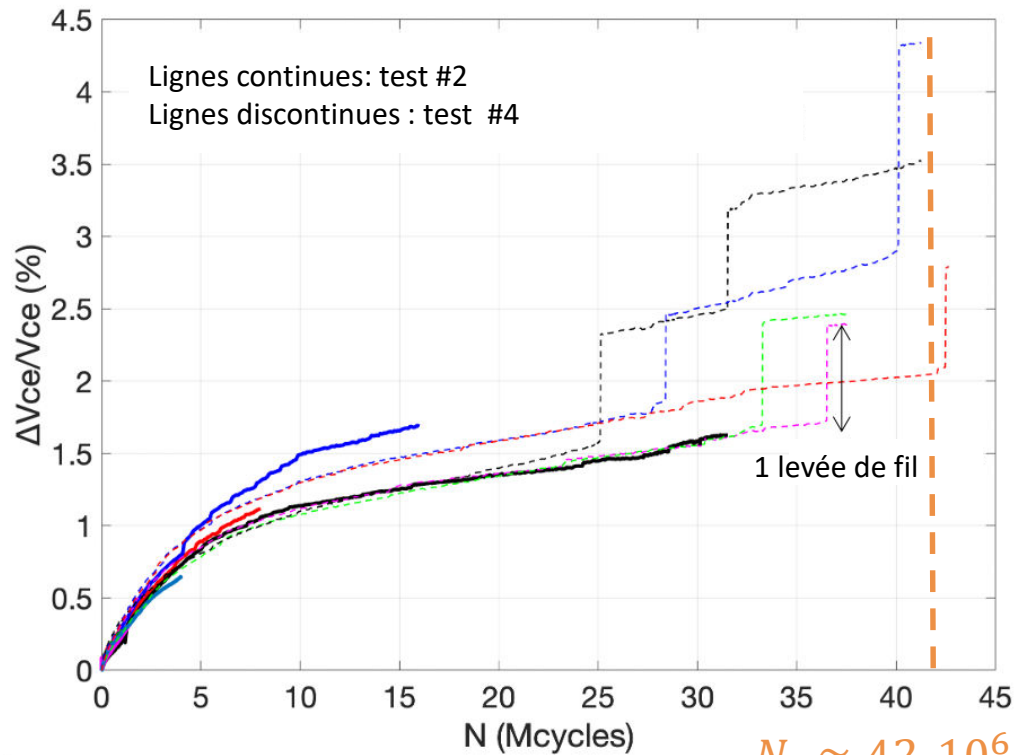


$$N_f \approx 42 \cdot 10^6 \text{ cycles}$$



### 3. VALIDATION DU MODÈLE PROPOSÉ

Numéro de test	Conditions
Test#3	Identique à Test#1
Test#4	Identique à Test#2



$N_f \approx 42 \cdot 10^6$  cycles

# PLAN

1

Expériences et résultats

2

Modèle de Propagation des fissures et validation

3

Analyse de la microstructure

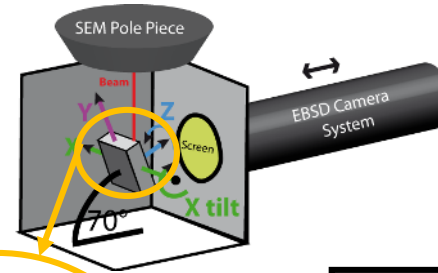
4

Conclusions

### 3. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

EBSD (Réalisé au laboratoire de l'ELEMCA):

→ Granulométrie, orientation cristalline des grains, types de joints de grains, angles de désorientation des grains

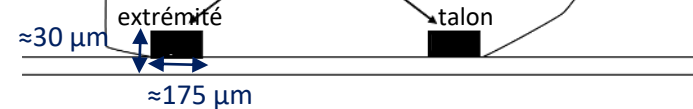
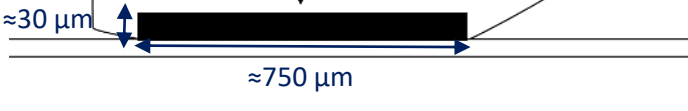
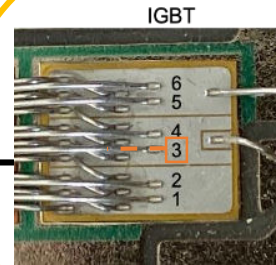


Partitionnement #1

Partitionnement #2

Zones analysées

Zones analysées

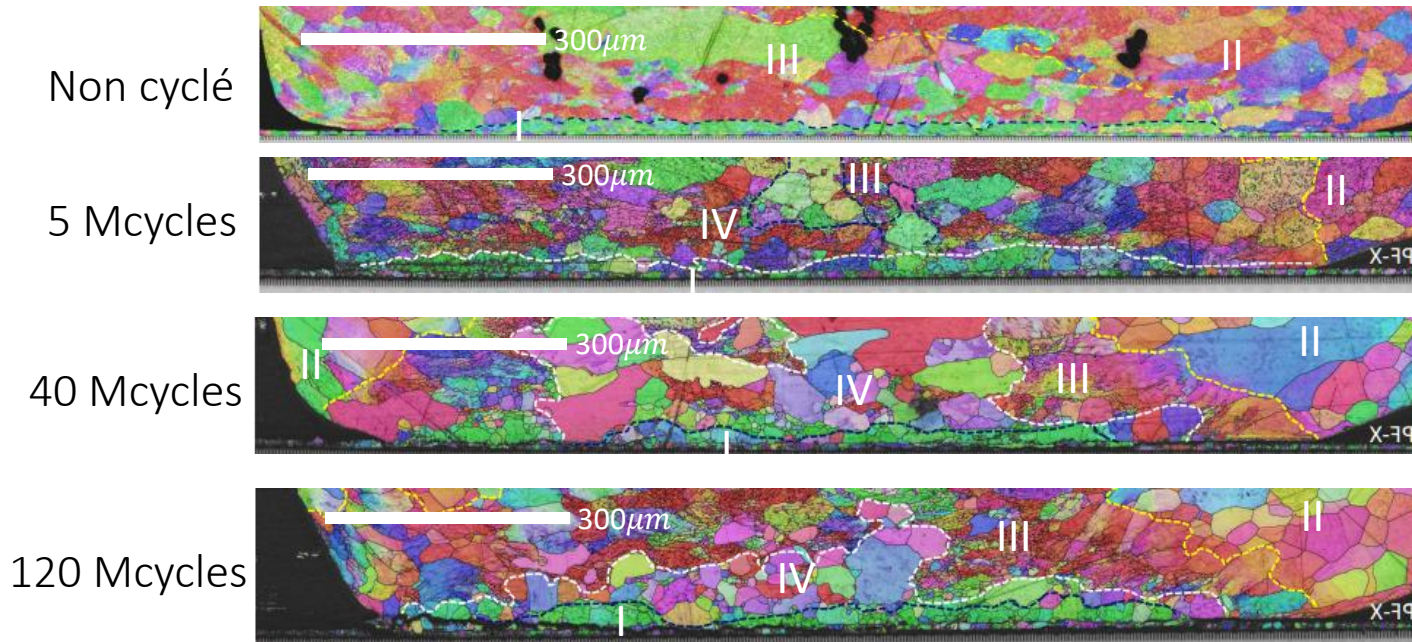


- Dédire la force motrice de l'évolution de la **texture des grains**.
- Comprendre pourquoi la **fissure évolue à l'interface fil-métallisation**.

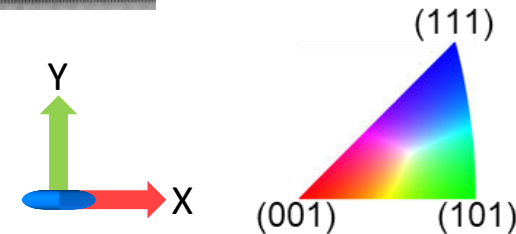
- Identifier le processus dominant : **Déformation / Recristallisation**
- Relier l'évolution des **tailles de grains & des angles de désorientation** à la fissuration.

### 3. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

Quelle est la force motrice de l'évolution de la **texture des grains** ?



Plus d'orientation (111) et moins d'orientation (101). Il semble que les grains s'orientent pour réduire l'énergie de surface et augmenter la densité d'empilement <sup>3,4</sup>.



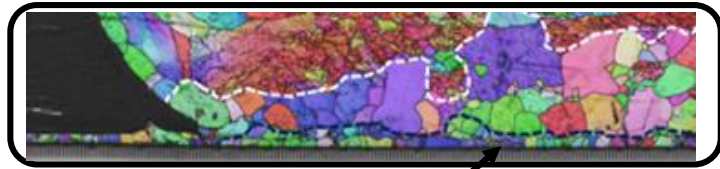
[3] Patra et al. "Properties of real metallic surfaces: Effects of density functional semilocality and van der Waals nonlocality," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 114, pp. E9188–E9196, 2017.

[4] Zhang et al. "Calculation of the surface energy of FCC metals with modified embedded-atom method," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 229, pp. 34–42, 2004.

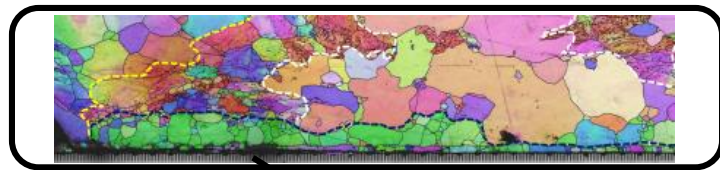
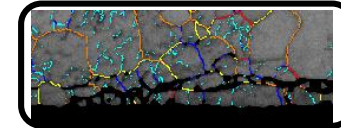
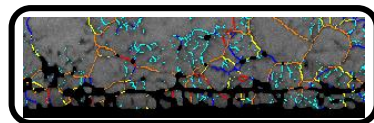
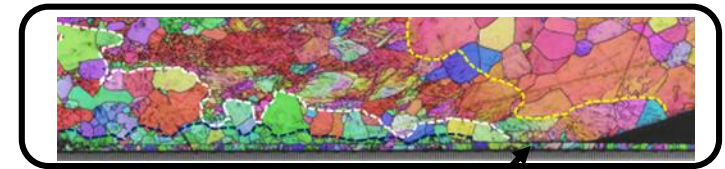
### 3. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

Pourquoi la fissure évolue-t-elle à l'interface fil-métallisation ?

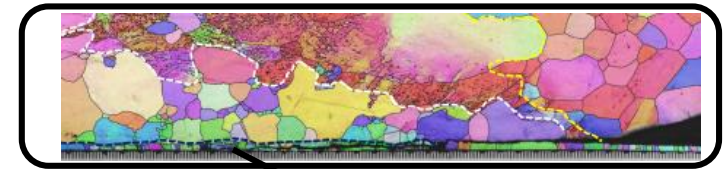
Types de joints de grains:



5 Mcycles



40 Mcycles



LABs

HABs

2° to 5°

5° to 15°

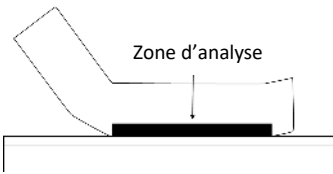
15° to 30°

30° to 55°

55° to 63.5°

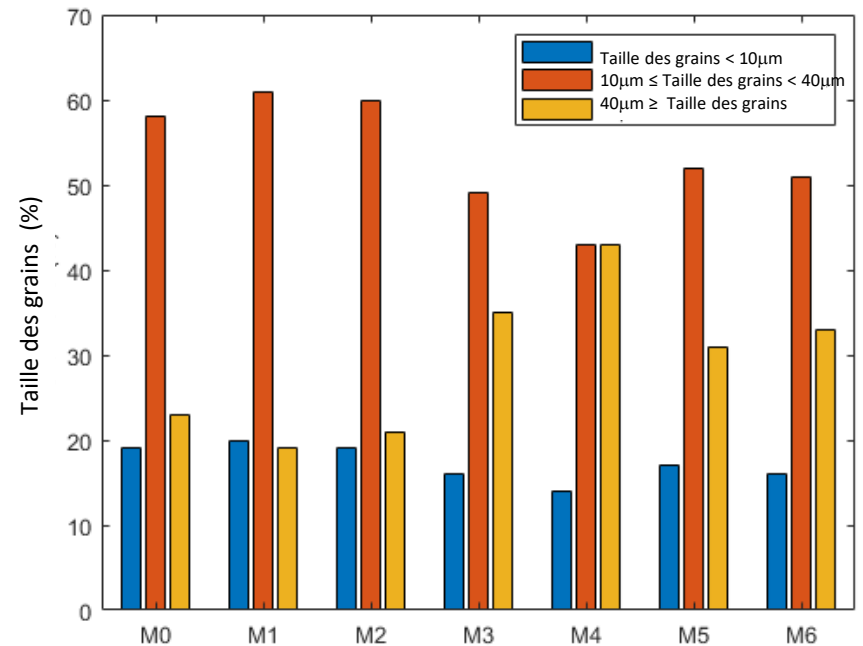
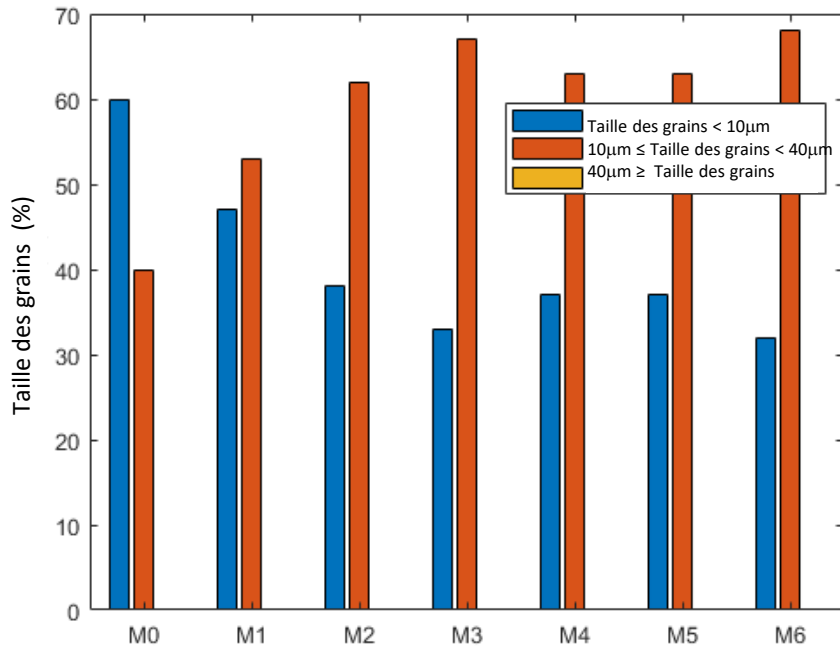
Les fissures sont stoppées par les HABs (High angle boundaries) en raison de leur grande capacité de glissement. La fissure représente une zone de LABs (Low angle boundaries).

### 3. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE



Evolution de la **taille des grains**

Evolution de la **désorientation des grains**

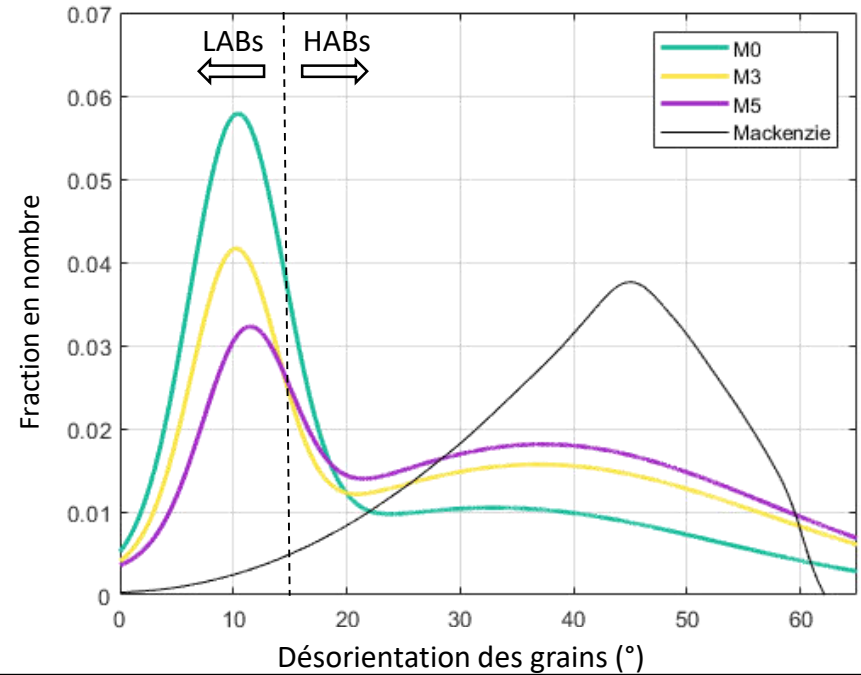
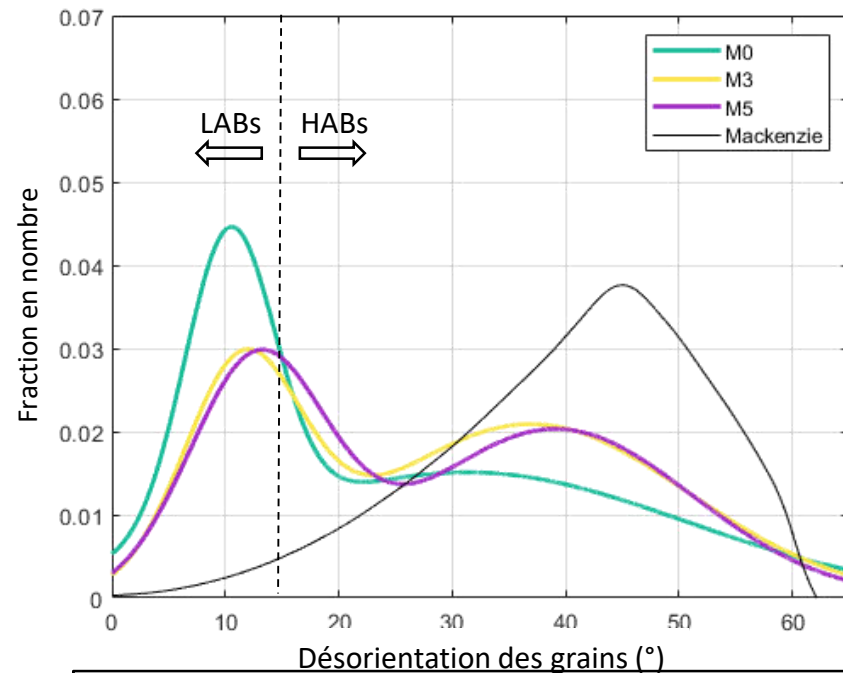


- Au début des cycles : taille des grains  $\searrow$  à cause des reconstructions.
- Lorsque la fissure se propage à une vitesse d'initiation élevée : taille des grains  $\nearrow$

### 3. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

Evolution de la **taille des grains**

Evolution de la **désorientation des grains**



- Lorsque la fissure se propage à une vitesse d'initiation élevée : LABs no. ↗
- Après la phase rapide de propagation de la fissure: HABs no. ↗
- Une migration des LABs aux HABs est observé simultanément avec le ralentissement de la vitesse de la fissure.

### 3. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

Avant les cycles

Le process de soudure crée des déformations et provoque des reconstructions initiales au niveau des sites de contact métallique.

Début des cycles

Les processus de recristallisation s'activent. Les déformations se concentrent au niveau des sites de contact et provoquent des fissures.

Les fissures initialisées au niveau des bords du fil se propagent vers le centre de la zone de l'interface fil-métallisation.

Le nombre de LABs augmente au niveau des sites de propagation de fissures.

La croissance des grains accompagne la vitesse d'initiation de fissure la plus élevée.

Cycles avancés

Le ralentissement de la fissure s'accompagne de l'augmentation du nombre de HABs.

Les déformations ont augmenté en raison de la présence des fissures.



# PLAN

1

Expériences et résultats

2

Modèle de Propagation des fissures et validation

3

Analyse de la microstructure

4

Conclusions

## 6. CONCLUSIONS

- Un modèle amélioré basé sur la déformation pour prédire la durée de vie des fils d'aluminium dans les modules de puissance IGBT sous des faibles variations de température est présenté.
- Le modèle combine des données expérimentales sur la propagation des fissures avec un lissage de la loi empirique de la déformation plastique.
- Les expériences révèlent que le taux de croissance des fissures diminue régulièrement avec le cycle.
- Une étude de la microstructure à l'interface fil-métallisation a permis de corréler les résultats macroscopiques (endroit et vitesse de propagation de fissure) avec les propriétés de la microstructure ( tailles des grains, texture....)

# PUBLICATIONS

## Articles :

- Halouani, A., et al. "New model of crack propagation of aluminium wire bonds in IGBT power modules under low temperature variations." *Microelectronics Reliability* 147 (2023): 115066.
- Halouani, Ayda, et al. "An EBSD Study of Fatigue Crack Propagation in Bonded Aluminum Wires Cycled from 55° C to 85° C." *Journal of Electronic Materials* 51.12 (2022): 7353-7365.
- Shqair, Mustafa, et al. "Microstructural evolution during the crack propagation at the bond-wire contact area of IGBT power modules upon power cycling." *Microelectronics Reliability* 138 (2022): 114635.

## Thèse :

Shqair, Mustafa. Physicochemical and microstructural approaches for modeling the degradations of power electronic component interconnection. Diss. Université Paris-Saclay, 2022.



collaboration is the driver



# Merci pour votre attention

# Des questions ?



mardi 19 décembre 2023

**Collaboration Homme-Machine**

**Retenez la date  
du prochain  
Tech Hour**

L'intervention sera réalisée par :

**Conscience Robotics**

Caen FR, 4 Av. de Cambridge, 14200 Hérouville-Saint-Clair

**Ilies ZAOUI** [ilies.zaoui@conscience-robotics.com](mailto:ilies.zaoui@conscience-robotics.com)

**Conscience Robotics** reconçoit intégralement la relation entre les humains et les robots. Le boîtier "Conscience Box" s'adapte à tout robot, tandis que "Conscience Connect" facilite la définition, le contrôle et le lancement de missions complexes par plusieurs utilisateurs simultanément à destination de plusieurs robots de différents types. Les utilisateurs naviguent intuitivement via une interface unique et simplifiée. Plusieurs exemples seront présentés :

- **Cohoma** : Utilisation du système sur robots à chenilles + drones
- **FireEagle** : Drones autonomes pour détection de départs de feux de forêts



# NAE

745 avenue de l'Université  
Bâtiment CRIANN  
F - 76800 Saint-Etienne du Rouvray  
T +33 (0)2 32 80 88 00

[www.nae.fr](http://www.nae.fr)

