



# Tech Hour

Le rendez-vous mensuel  
des technologies et procédés innovants

## Caractérisation des matériaux pour l'étude de la fiabilité des brasures sans plomb

### ELEMCA et IRT Saint Exupéry

Le mardi 27 février 2024



### ➤ 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** est l'organisation professionnelle des acteurs industriels de la chaîne de valeur de la filière électronique en France.



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 27 février 2024

## Le Tech Hour du jour

### Caractérisation des matériaux pour l'étude de la fiabilité des brasures sans plomb

L'intervention sera réalisée par :

**Jérémie DHENNIN** [jeremie.dhennin@elemca.com](mailto:jeremie.dhennin@elemca.com)  
**ELEMCA** 13 Av. de l'Europe, 31520 Ramonville-Saint-Agne

**Pierre ROUMANILLE** [pierre.roumanille@irt-saintexupery.com](mailto:pierre.roumanille@irt-saintexupery.com)  
**IRT Saint Exupéry** 3 Rue Tarfaya, 31400 Toulouse



La diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD en anglais) est un outil puissant de caractérisation de la microstructure et de la cristallographie des matériaux. La présentation s'intéresse à son utilisation dans le domaine de l'assemblage électronique pour une analyse quantitative du vieillissement des brasures et une meilleure description du lien entre leur métallurgie et leur mécanisme de défaillance.

# CONTEXTE ET ENJEUX

- Assurer la fiabilité des assemblages de composants électroniques par rapport à une mission donnée, dans le contexte de la transition vers l'électronique sans plomb (directive RoHS, mises à jour de la réglementation REACH)

- Alliages de brasure compatibles avec le procédé d'assemblage et avec la mission



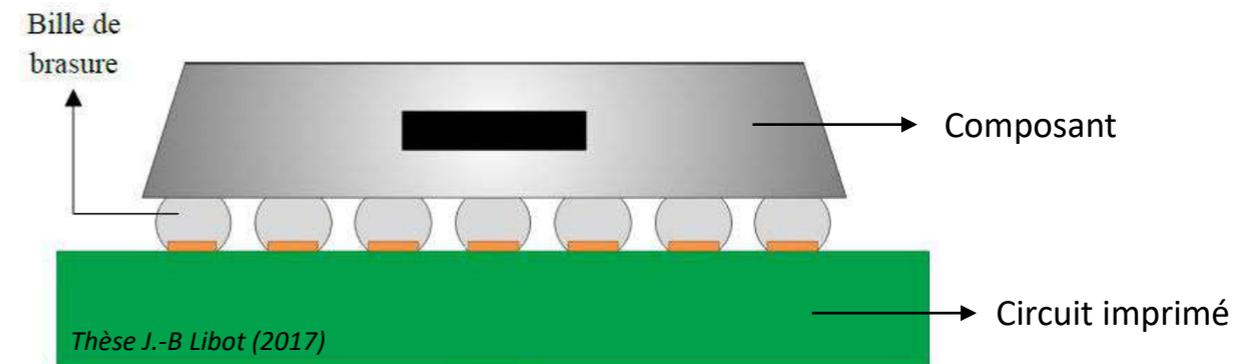
- Règles de choix des matériaux, conception, fabrication des cartes pour retarder les défaillances potentielles en environnement sévère



CMS = Composants Montés en Surface

Composants brasés sur un circuit imprimé par un procédé manuel ou automatique

## Assemblages de composants électroniques sur carte



Défaillance de la brasure = fissuration, perte de fonction électrique / mécanique

# CONTEXTE ET ENJEUX

- Analyser et anticiper le comportement en fatigue des assemblages sans plomb pour proposer les conditions de qualification les plus adaptées
  - Modèles de fatigue, modèles d'accélération
  - Compréhension des mécanismes de défaillance au niveau du matériau
  - Simulation éléments finis de la réponse thermomécanique des assemblages

$$X = K(N)^c$$

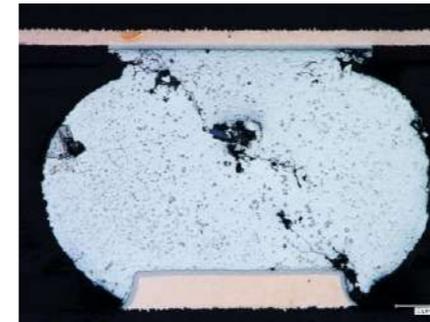
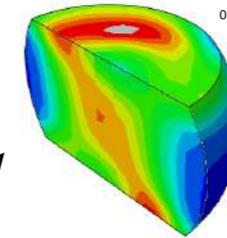
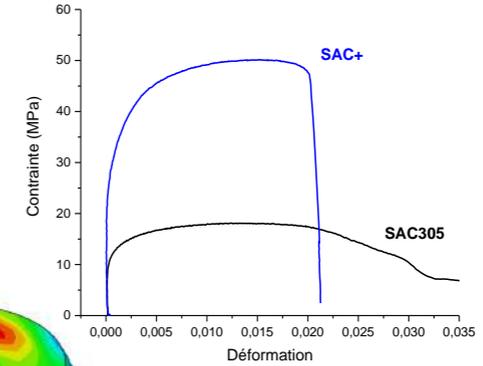
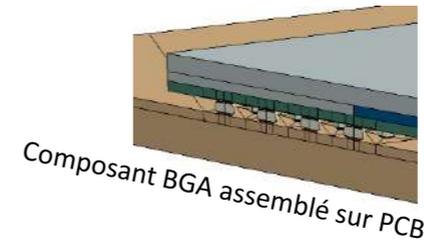
Critère de fatigue                      Nombre de cycles à défaillance

$$AF = \frac{N_o}{N_t} = \left(\frac{f_t}{f_o}\right)^{-1/3} \left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_o}\right)^2 \exp\left[1414\left(\frac{1}{T_{\max,o}} - \frac{1}{T_{\max,t}}\right)\right]$$

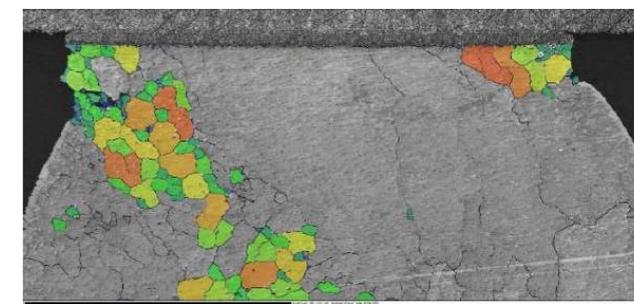
Facteur d'accélération entre la qualification et la mission

→ Norme / procédure de qualification représentative du profil de mission de la carte

Simulation / caractérisation mécanique



Tests accélérés / analyse de défaillance

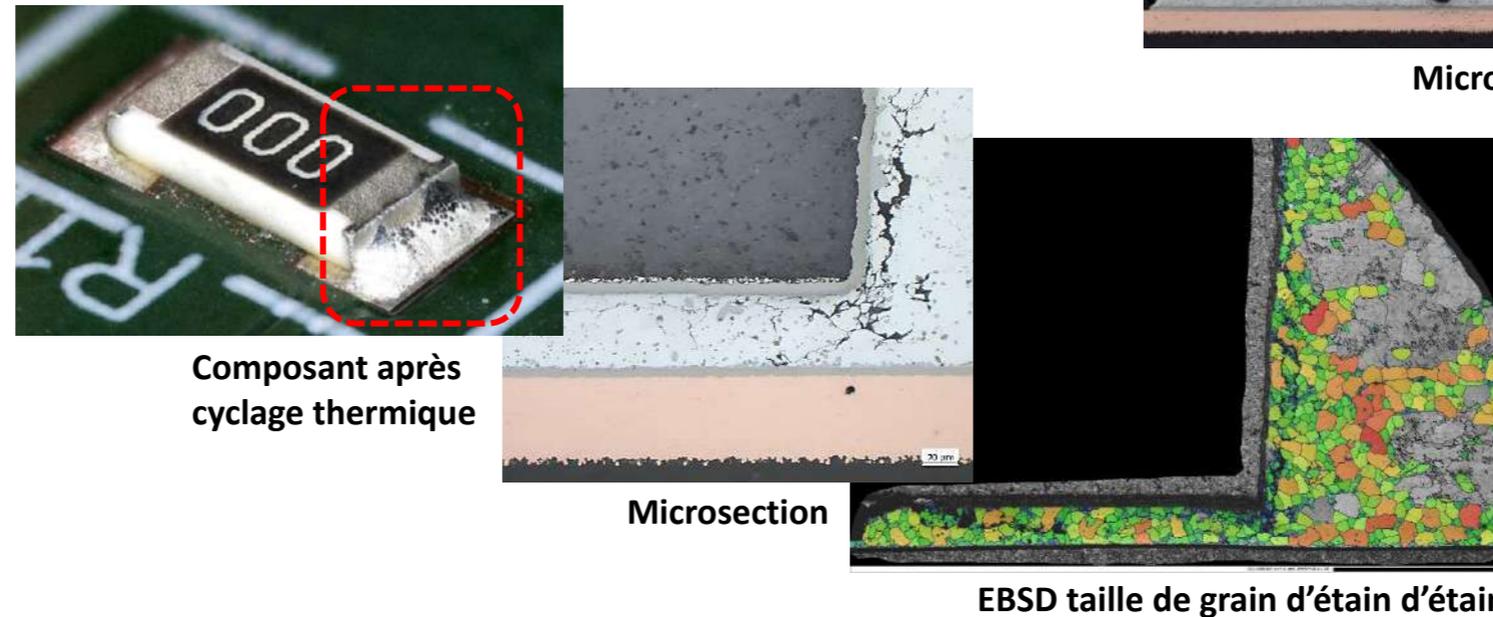
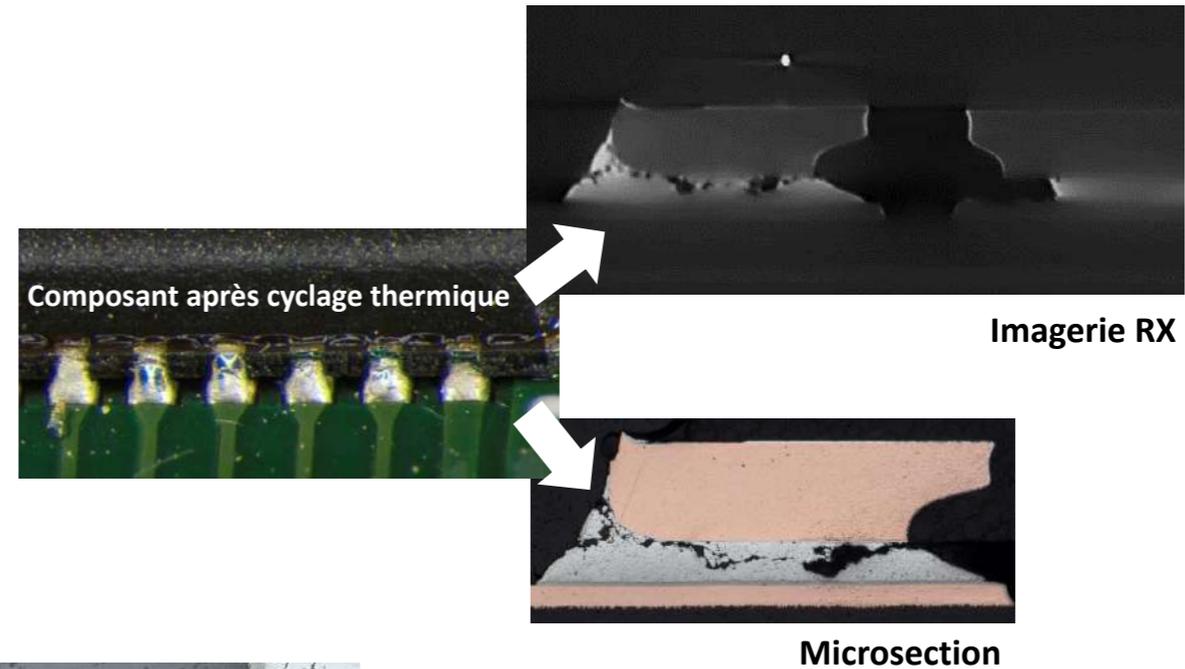


Caractérisation avancée des matériaux



# R&D EN FIABILITÉ DES ASSEMBLAGES ÉLECTRONIQUES

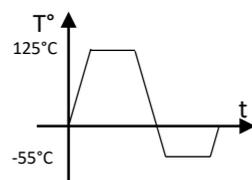
- Développer des méthodes de détection de défaillance et d'analyse d'endommagement des assemblages électroniques
  - Mesures électriques, thermiques
  - Imagerie acoustique, RX
  - Diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD)



# APPORT DE L'ANALYSE MICROSTRUCTURALE EN FIABILITÉ DES ASSEMBLAGES ÉLECTRONIQUES

Couplage des analyses EDS (composition chimique) et EBSD (cristallographie) pour :

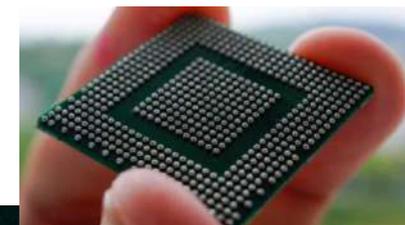
1. Compréhension de la **métallurgie** et de la **microstructure** des joints brasés sans plomb (alliages SnAgCu), réactions entre l'alliage de brasure et la surface du composant et du circuit imprimé
2. **Quantification** du vieillissement microstructural et analyse du **mécanisme de défaillance**
3. Comparaison des mécanismes de défaillance entre **différents alliages** ou entre **différents types de contrainte (mécanique, thermomécanique)**, impact de la métallurgie des brasures sur leur fiabilité



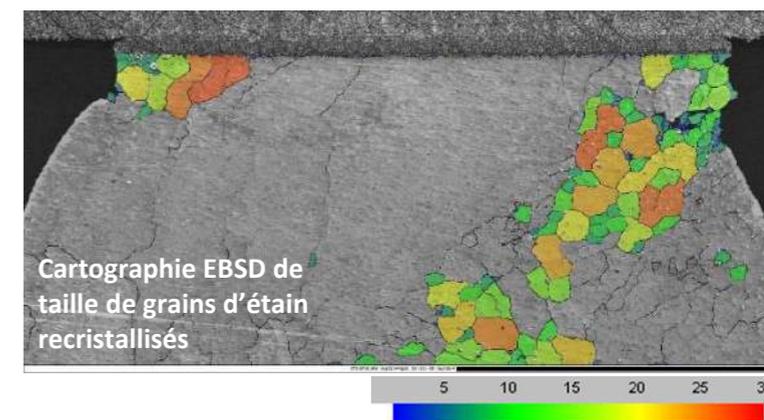
Thermique



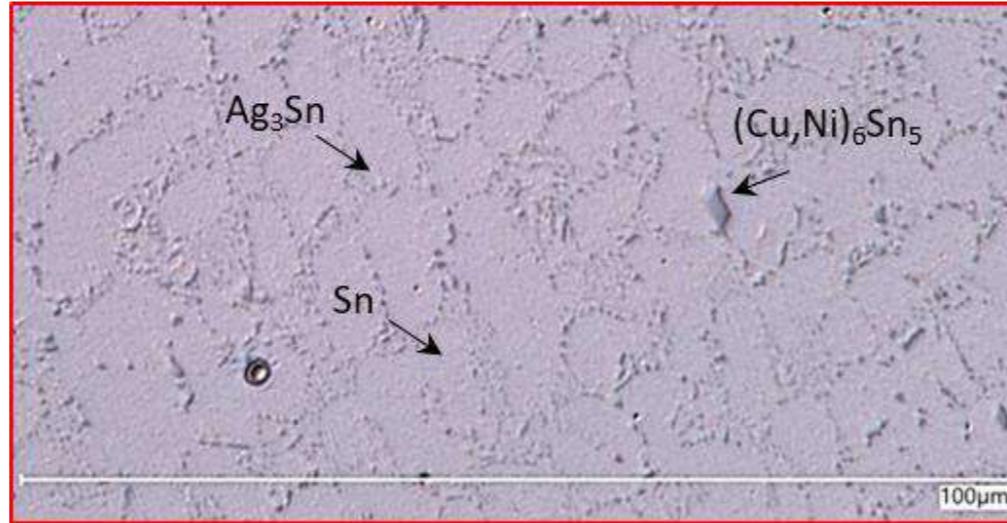
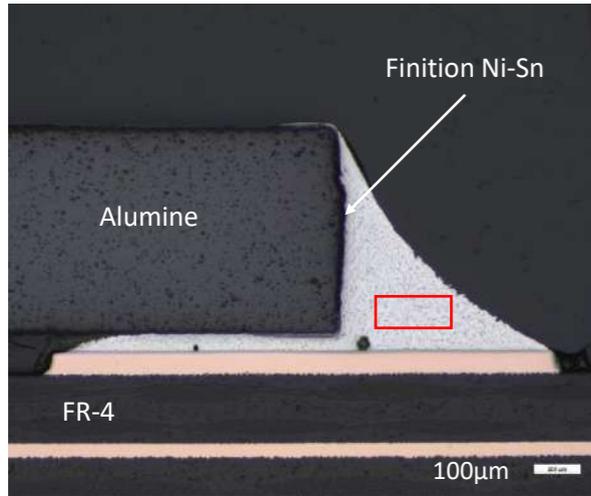
Mécanique



Composant *Ball Grid Array*  
Billes de brasure SnAgCu

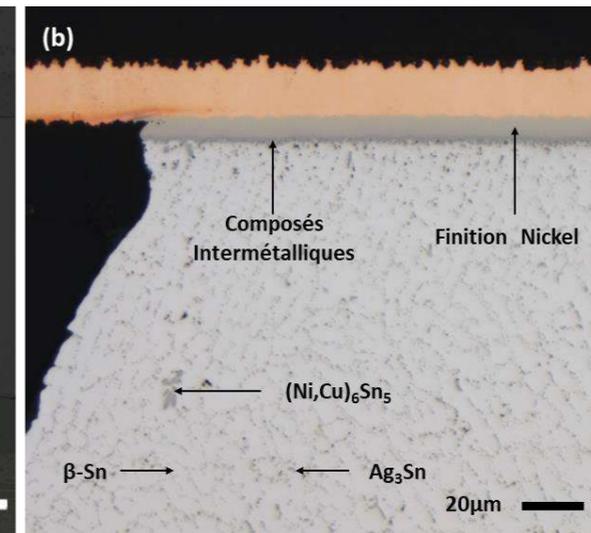
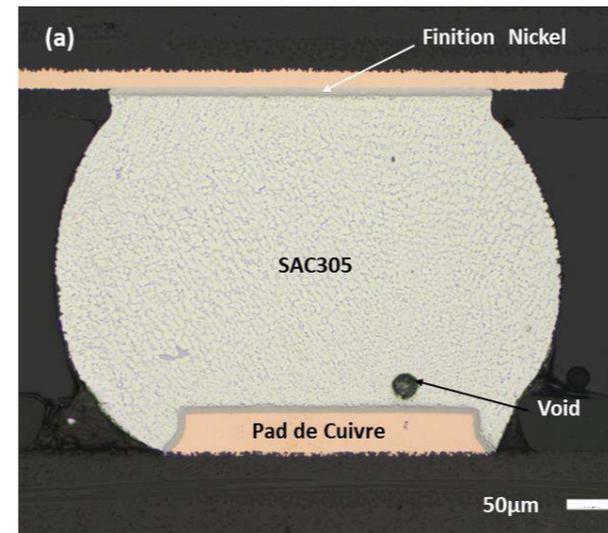
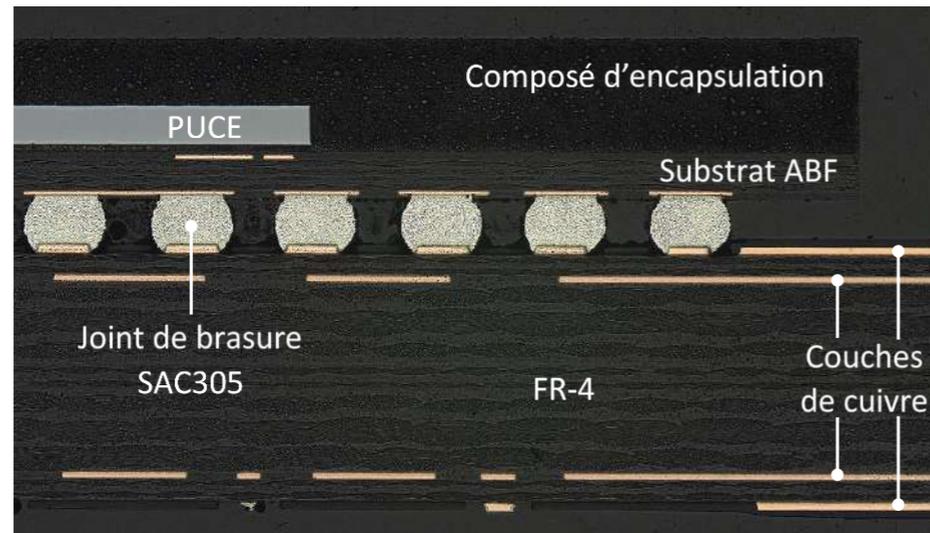


# CARACTÉRISATION AVANCÉE DE LA MÉTALLURGIE DES BRASURES

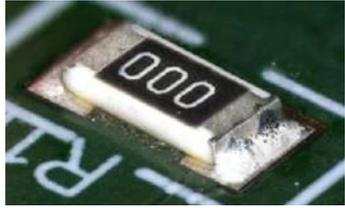


## Jointes brasés SnAgCu :

- Matrice d'étain
- Précipités Ag-Sn et Cu-Sn
- Couches intermétalliques de réaction avec la surface du composant et du PCB



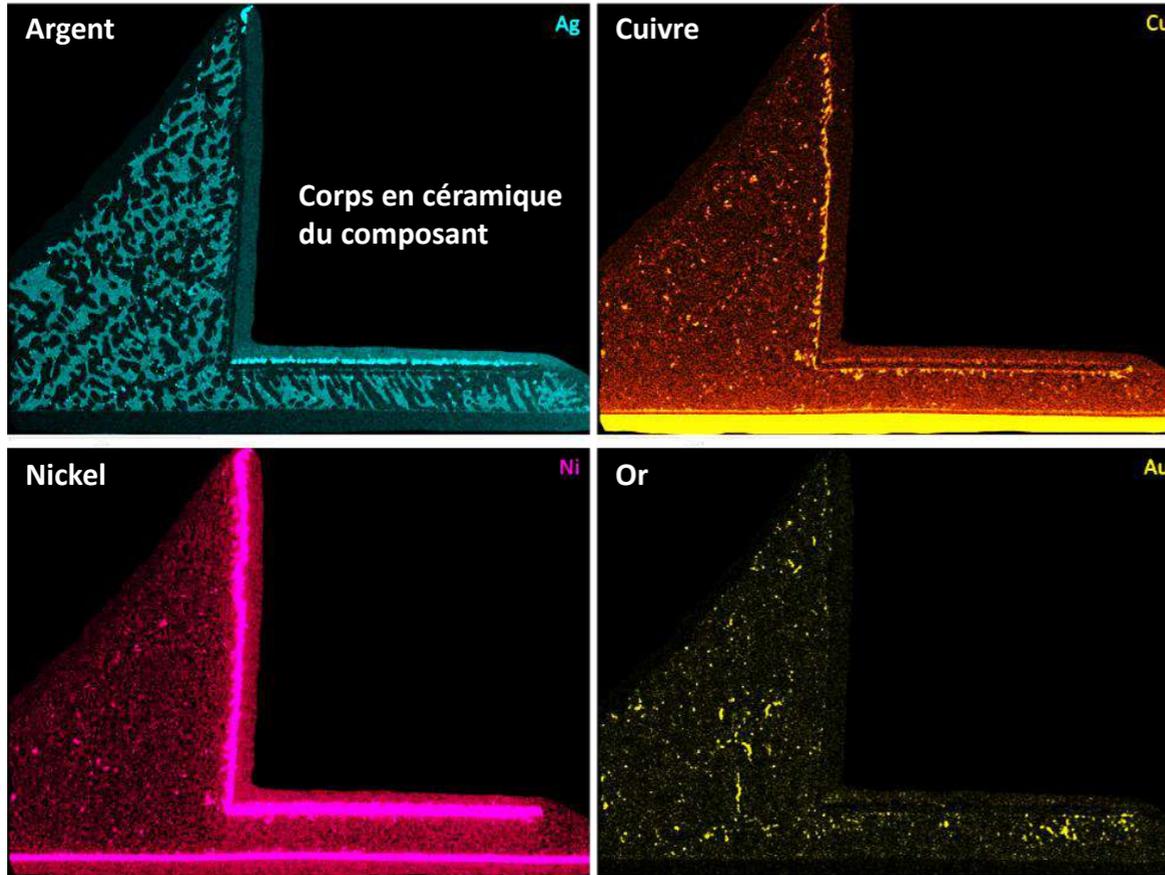
# CARACTÉRISATION AVANCÉE DE LA MÉTALLURGIE DES BRASURES



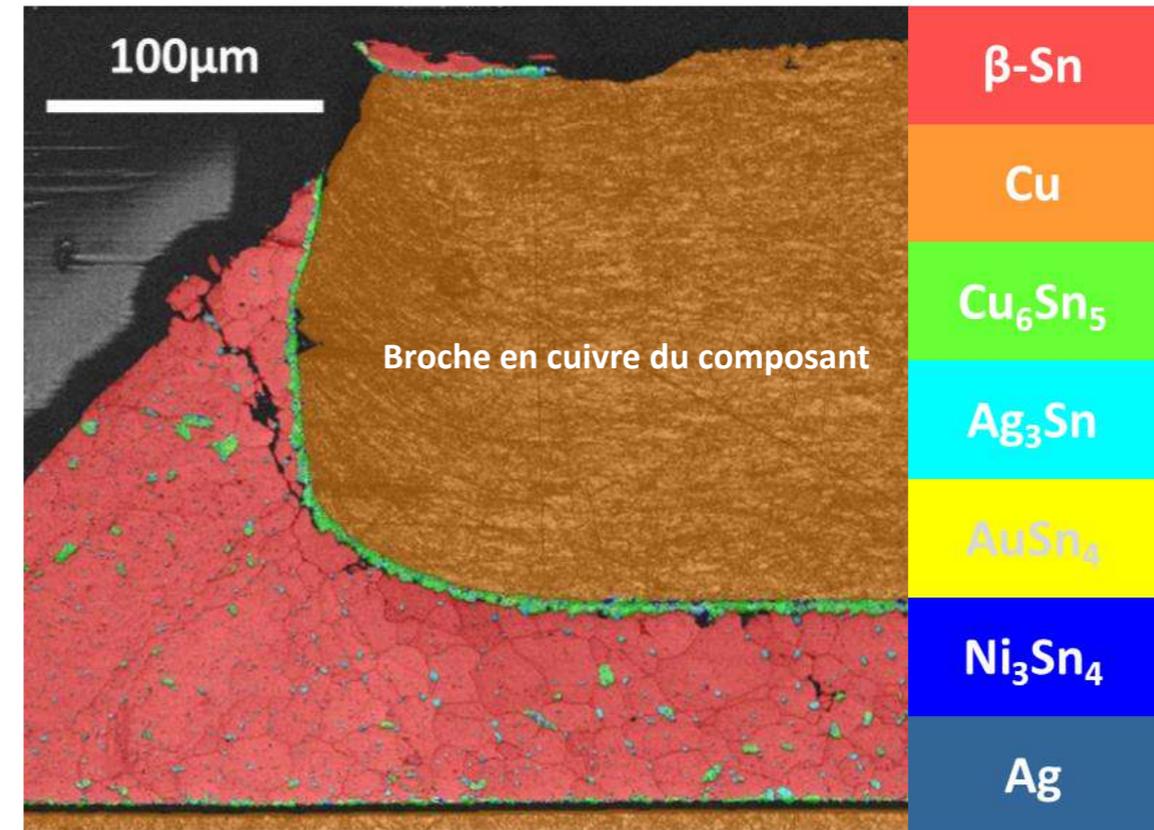
EDS : répartition chimique des éléments



EBSD : répartition des phases cristallines



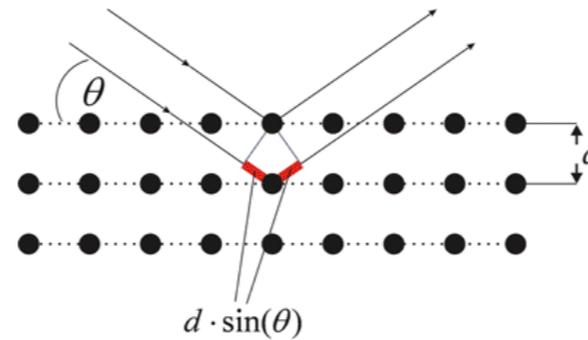
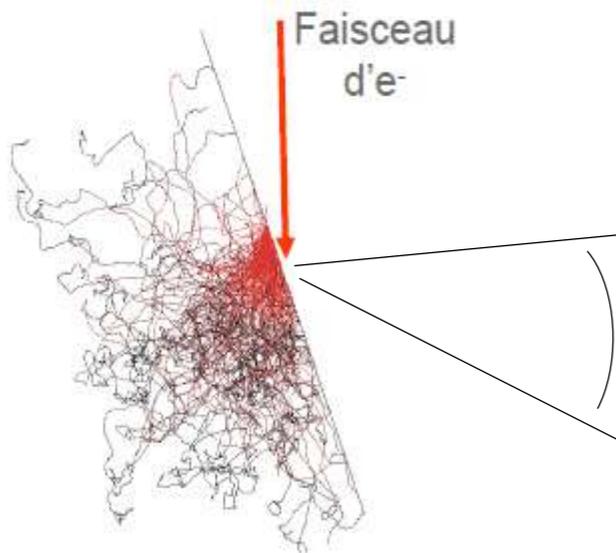
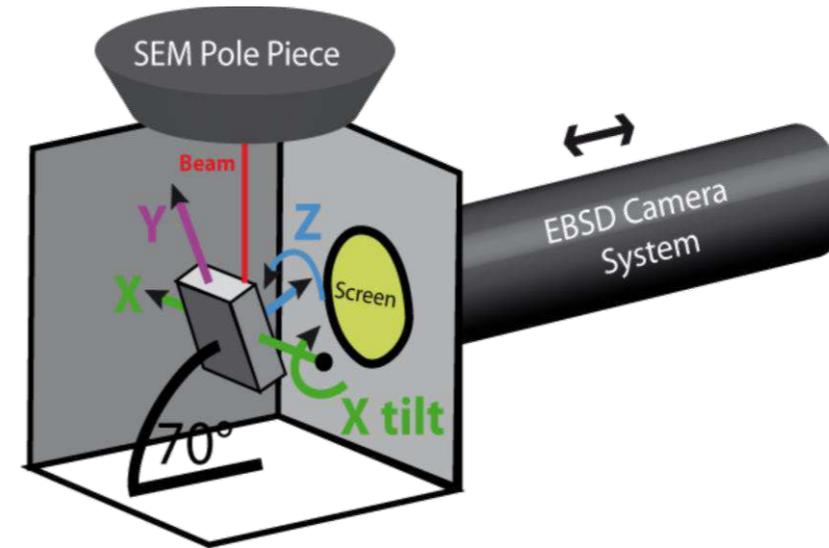
Dissolution / reprécipitation du nickel et de l'or de la finition dans la brasure



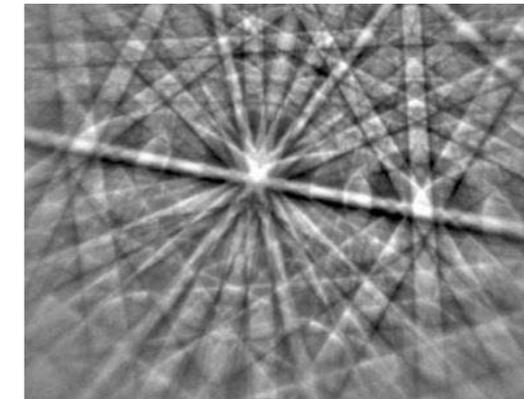
Même structure cristalline pour les couches d'interface et certains précipités (Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>)

# FONCTIONNEMENT DE LA TECHNIQUE EBSD

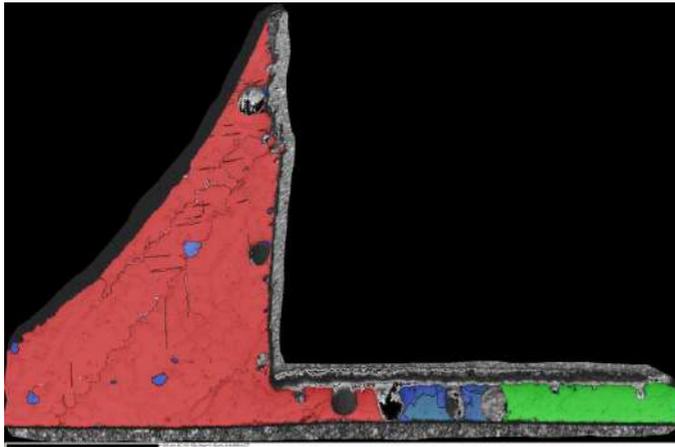
- Un détecteur additionnel dans un MEB
- Utilise la diffraction des électrons incidents par la structure cristalline du matériau
- Pour une tension d'accélération donnée, l'angle de diffraction est caractéristique du matériau



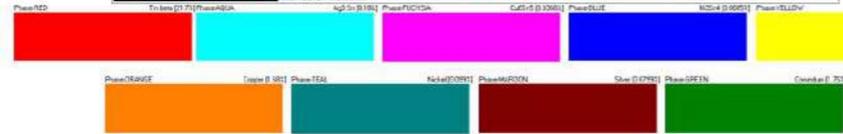
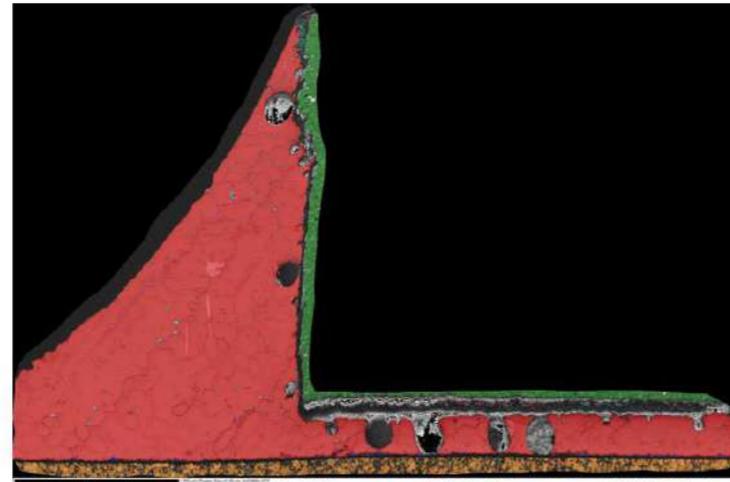
$$2d_{hkl} \cdot \sin\theta_{hkl} = n \cdot \lambda$$



# DONNÉES DE SORTIE DE L'EBSD

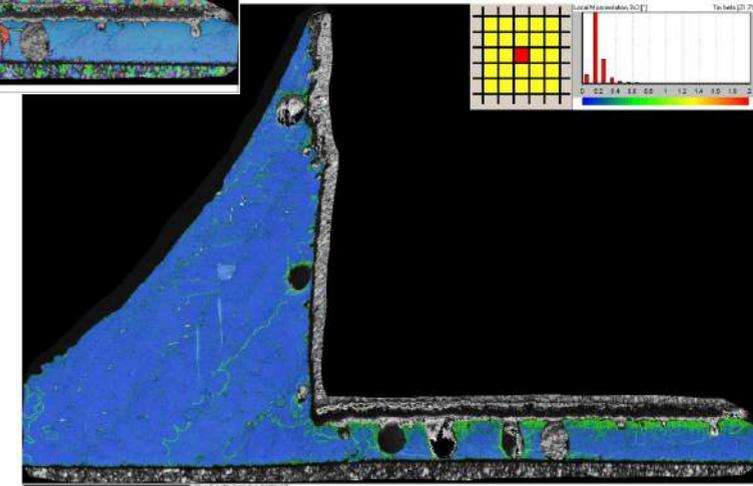
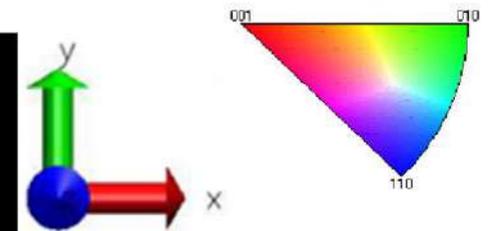
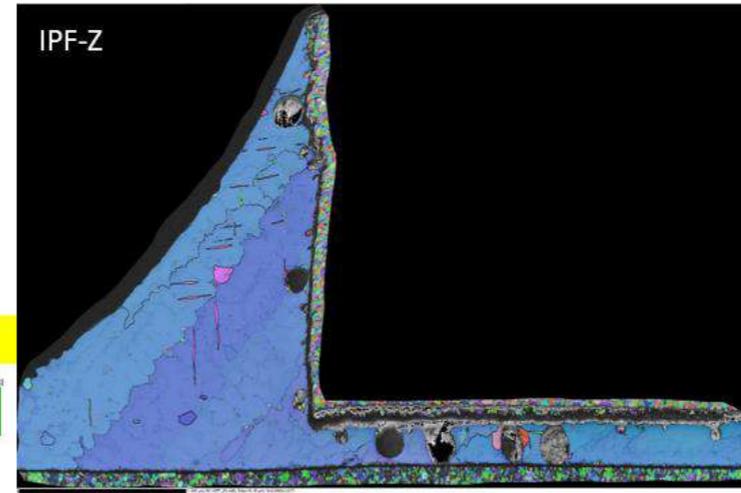


Quantification de la taille de grains



Phases cristallines

Orientation cristalline

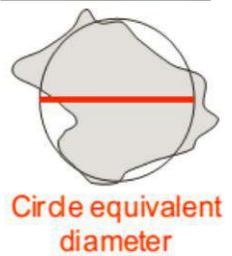
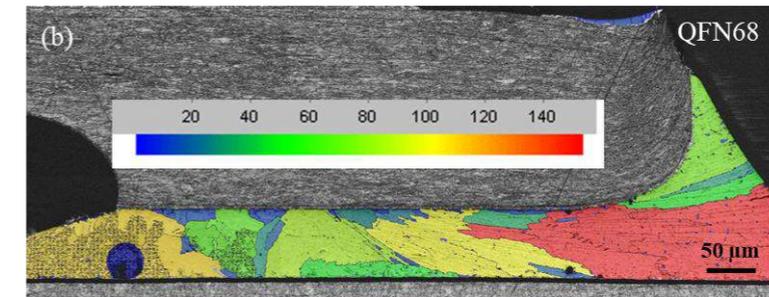
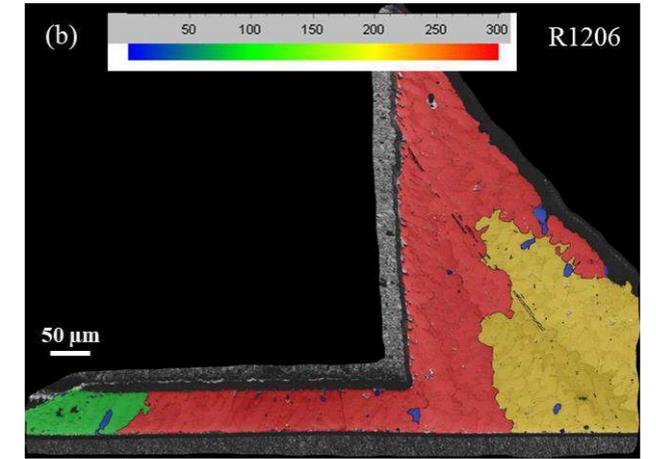
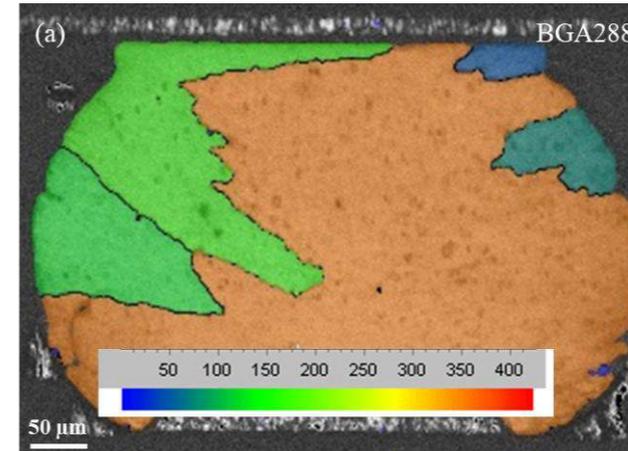
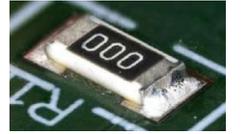
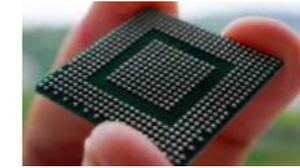


Désorientations cristallines locales

# CARACTÉRISATION AVANCÉE DE LA MÉTALLURGIE DES BRASURES

Les joints brasés SnAgCu sont constitués de quelques grains d'étain, de tailles différentes et d'orientations différentes

→ quantification du nombre et de la taille des grains dans le plan de l'image



EBSD : cartographie de taille de grain d'étain

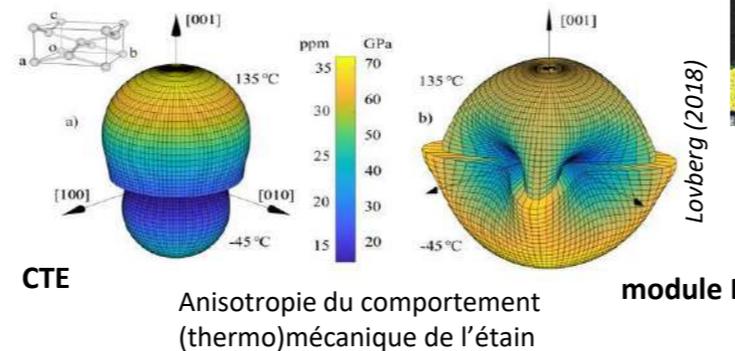
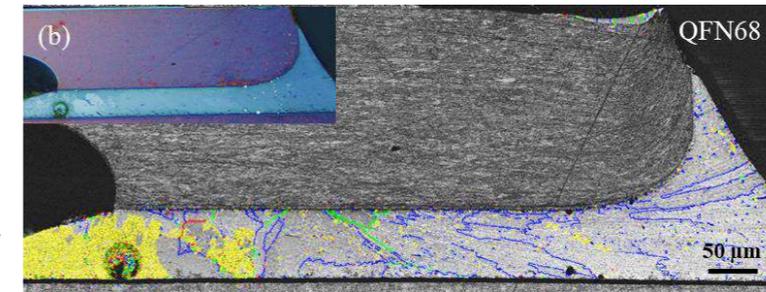
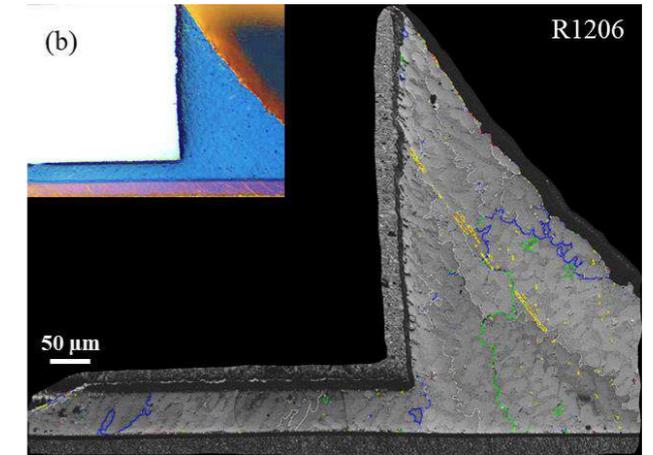
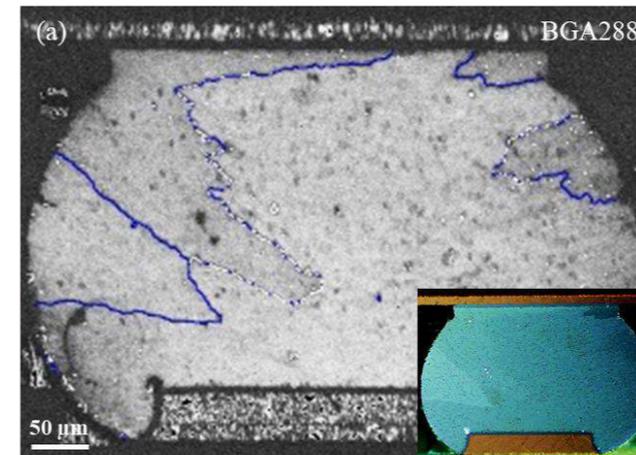
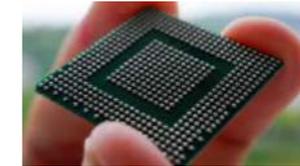
# CARACTÉRISATION AVANCÉE DE LA MÉTALLURGIE DES BRASURES

Les joints brasés SnAgCu sont constitués de quelques grains d'étain, de tailles différentes et d'orientations différentes

→ quantification du nombre et de la taille des grains dans le plan de l'image

→ quantification de la différence d'orientation cristalline entre les grains (angles de joints de grain)

Grande variabilité de la microstructure des joints SnAgCu, caractère aléatoire de la solidification de l'étain : comportement du matériau difficile à généraliser et à modéliser



EBSD : cartographie d'angles de joints de grain

# CARACTÉRISATION AVANCÉE DE LA MÉTALLURGIE DES BRASURES

## Analyse quantitative des propriétés métallurgiques et microstructurales des assemblages électroniques avec l'EBSD

→ étude de l'**impact des paramètres technologiques et procédé** (nouvel alliage, finition du composant, taille des interconnexions, température de brasage, vitesse de refroidissement...)

→ corrélation avec résultats de caractérisation mécanique

## Application à l'étude de la fiabilité des assemblages électroniques

→ étude de l'évolution de la microstructure sous contrainte cyclique, **quantification du vieillissement** microstructural et analyse du **mécanisme de défaillance**

# CARACTÉRISATION DU MÉCANISME DE DÉFAILLANCE EN FATIGUE THERMOMÉCANIQUE

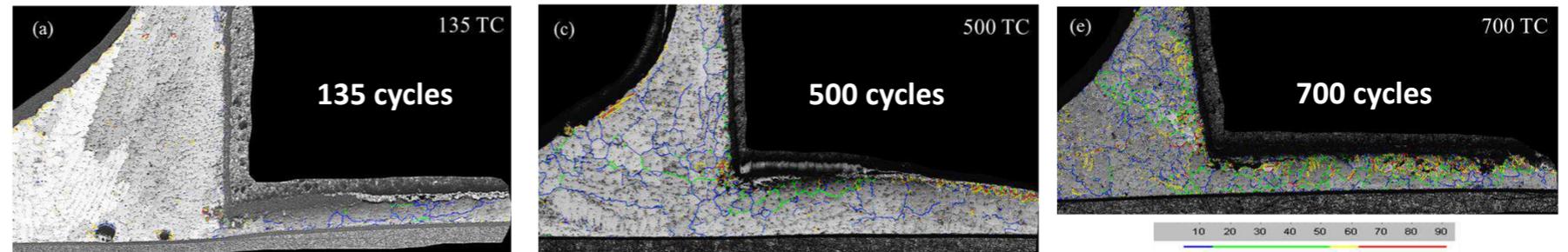
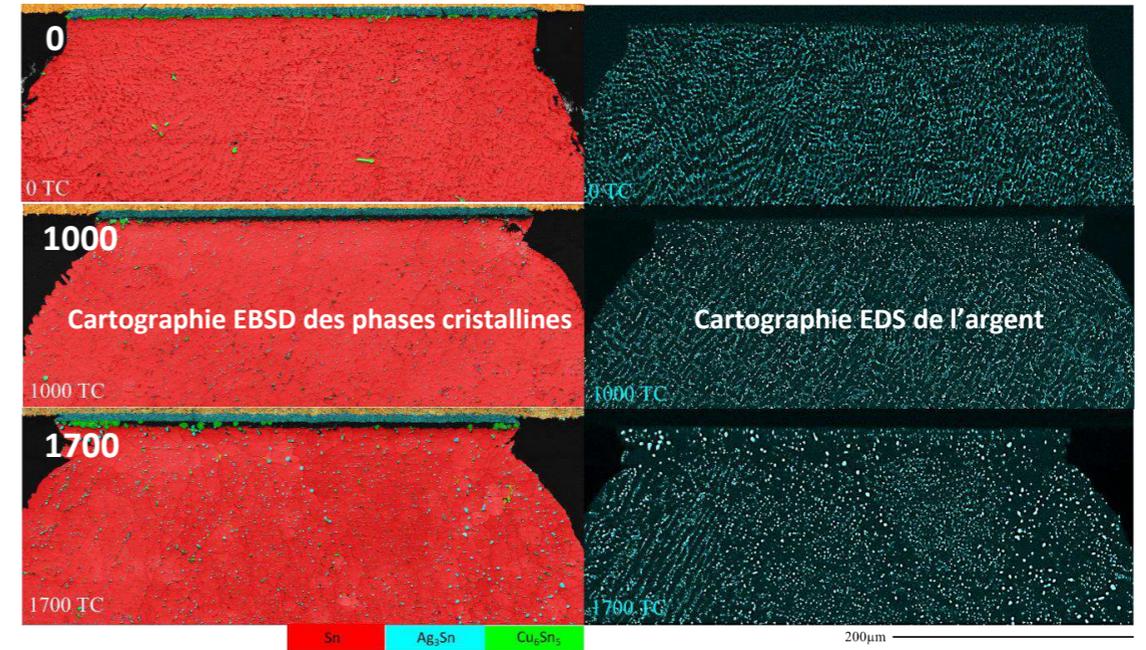
Cyclage thermique [-55 ; 125°C]

Les variations de température répétées génèrent des contraintes et déformations cycliques au sein des joints brasés.

Phénomènes métallurgiques connus du mécanisme de défaillance des brasures SnAgCu :

- **Coalescence des précipités intermétalliques**, diffusion des petits précipités les uns vers les autres pour former de plus gros
- **Recristallisation des grains d'étain**, fragmentation et rotation progressive des grains d'étain

Phénomènes plus marqués dans les zones les plus déformées (selon géométrie des assemblages et différentiel de dilatation thermique entre matériaux) = **chemin de propagation de la future fissure de fatigue**



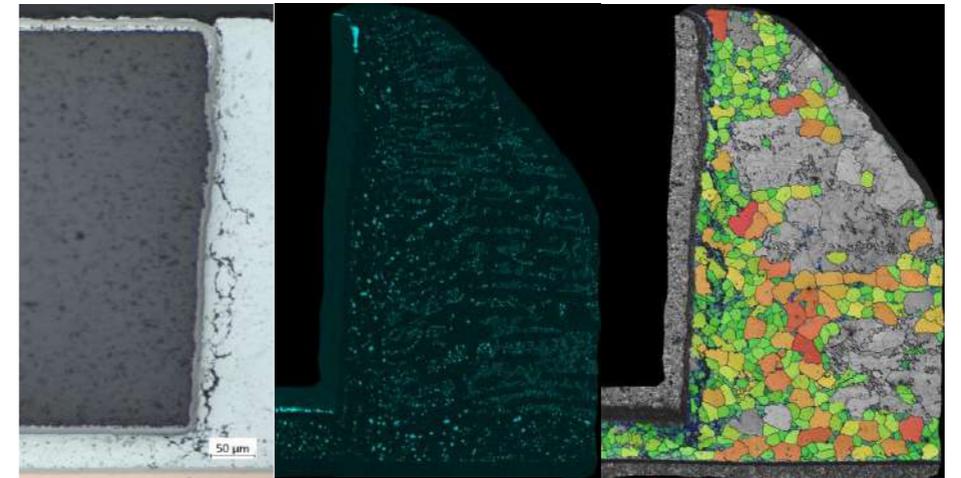
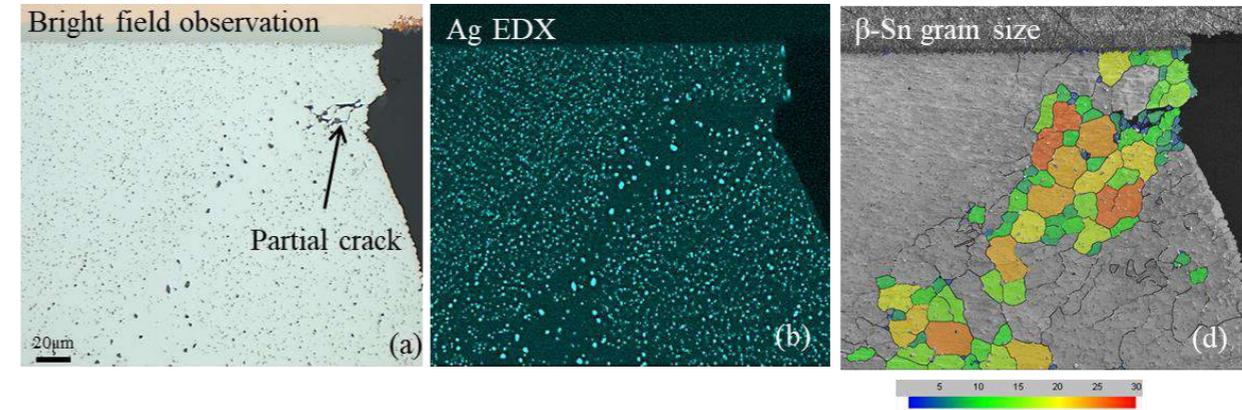
Cartographie EBSD d'angles de joints de grain

# CARACTÉRISATION DU MÉCANISME DE DÉFAILLANCE EN FATIGUE THERMOMÉCANIQUE

Cyclage thermique [-55 ; 125°C]

Thèse d'Emna Ben Romdhane (2018-2022, Université de Bordeaux), projet FELINE de l'IRT Saint Exupéry

- Analyse quantitative par EBSD des indicateurs de vieillissement microstructural des assemblages SnAgCu
- Recherche d'un critère d'endommagement microstructural de l'alliage de brasure, indépendant du type de composant électronique assemblé
- Corrélation avec la propagation des fissures et la détection électrique de la défaillance des interconnexions



Microscopie optique

Carto EDS de l'argent

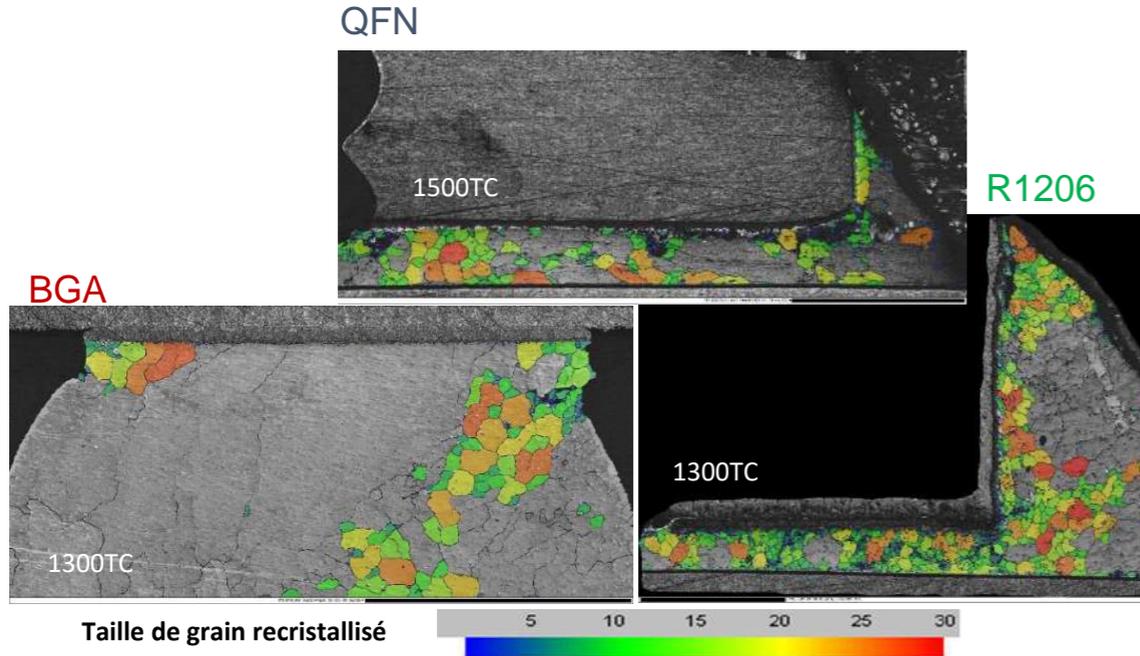
Carto EBSD de taille de grain recristallisé

# CARACTÉRISATION DU MÉCANISME DE DÉFAILLANCE EN FATIGUE THERMOMÉCANIQUE

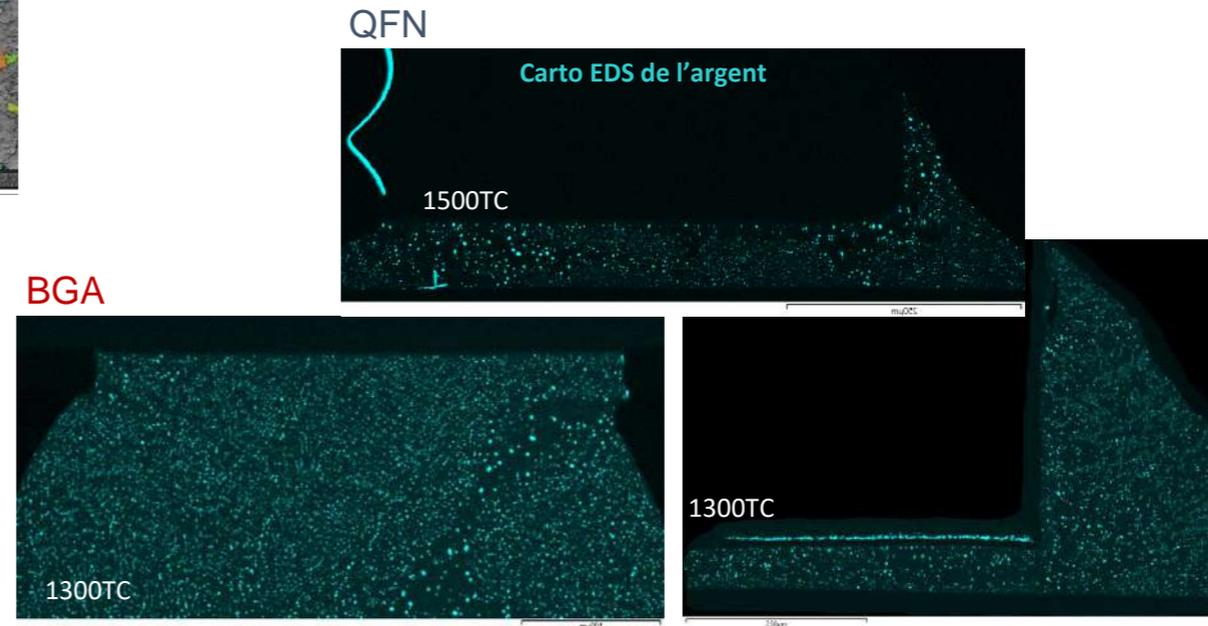
Cyclage thermique [-55 ; 125°C]

Recherche d'un critère d'endommagement microstructural de l'alliage SnAgCu, indépendant du type de composant électronique assemblé

Informations sur les tailles de grain apportées par l'EBS



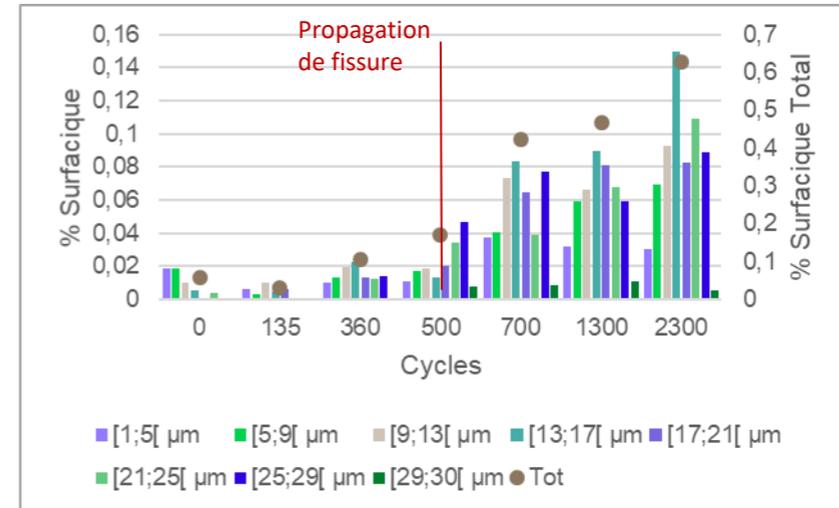
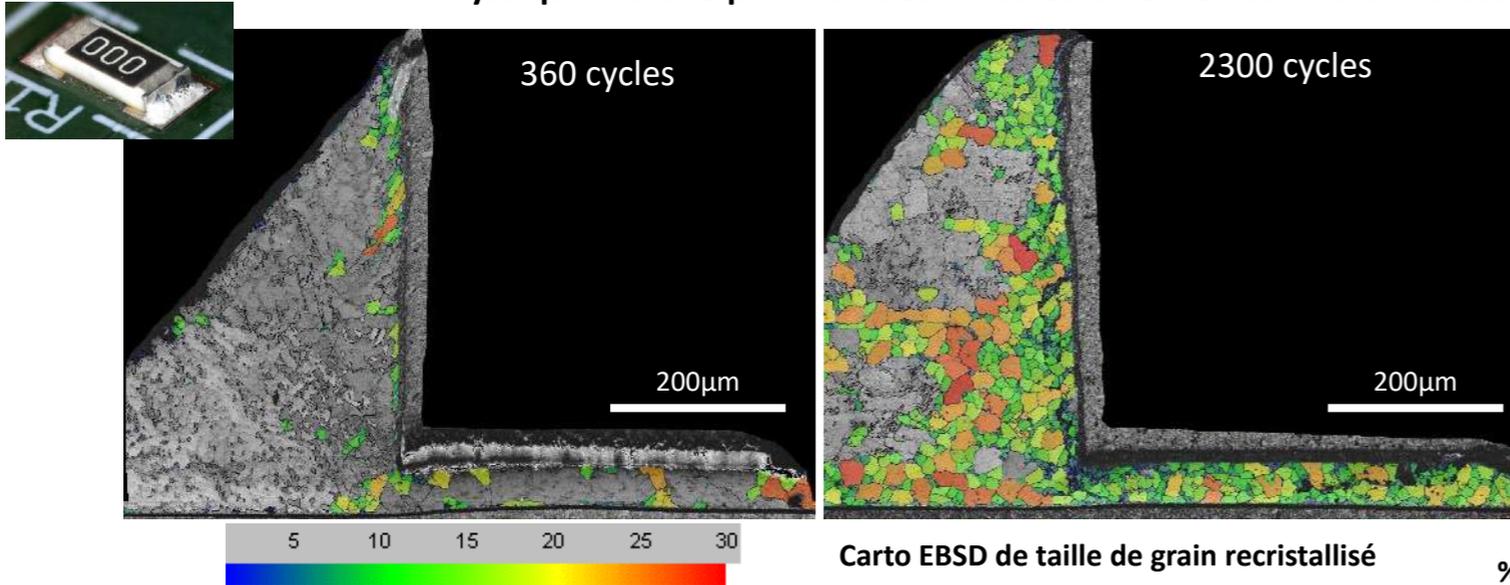
- ✓ Recristallisation de l'étain :  
Gamme de taille de grain [1,30]  $\mu\text{m}$



- ✓ Coalescence précipités  $\text{Ag}_3\text{Sn}$   
Gamme de diamètre [1,3]  $\mu\text{m}$

# CARACTÉRISATION DU MÉCANISME DE DÉFAILLANCE EN FATIGUE THERMOMÉCANIQUE

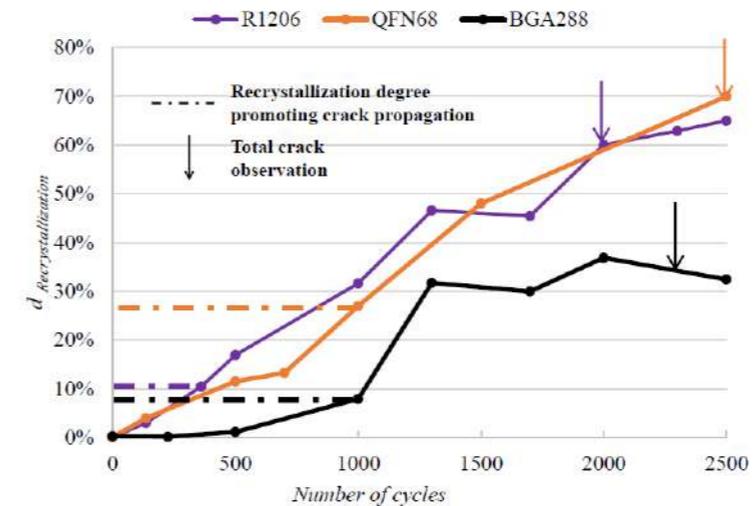
Analyse quantitative par EBSD des indicateurs de vieillissement microstructural des assemblages SnAgCu



% surfaccique de recristallisation en fonction du nombre de cycles thermiques

- Prélèvements successifs d'échantillons
- Analyse EBSD de l'état de microstructural des joints brasés
- Evolution des indicateurs de vieillissement au cours du temps de cyclage thermique
- Comparaison avec la propagation des fissures

Application de la démarche à différents types de composants (BGA, QFN) →

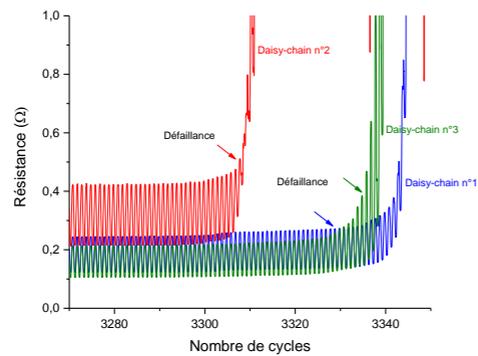


# DIFFÉRENCES DE MODE DE FISSURATION EN CYCLAGE THERMIQUE DANS UN COMPOSANT QFN

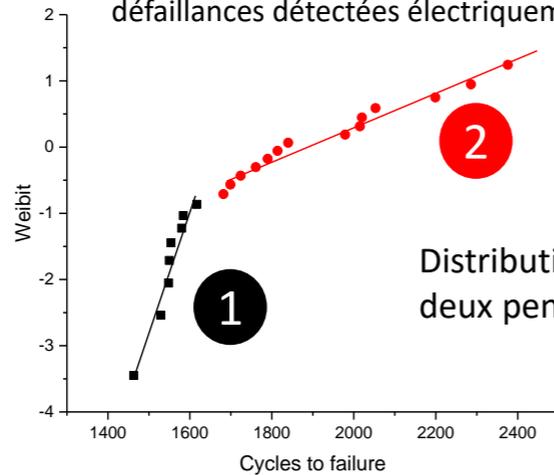
Corrélation entre microstructure, propagation de fissure et détection électrique des défaillances

## Cyclage thermique [-55 ; 125°C]

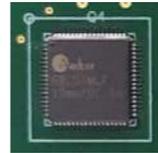
Détection électrique des défaillances des joints brasés



Répartition dans le temps des défaillances détectées électriquement



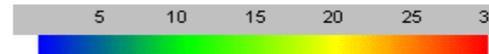
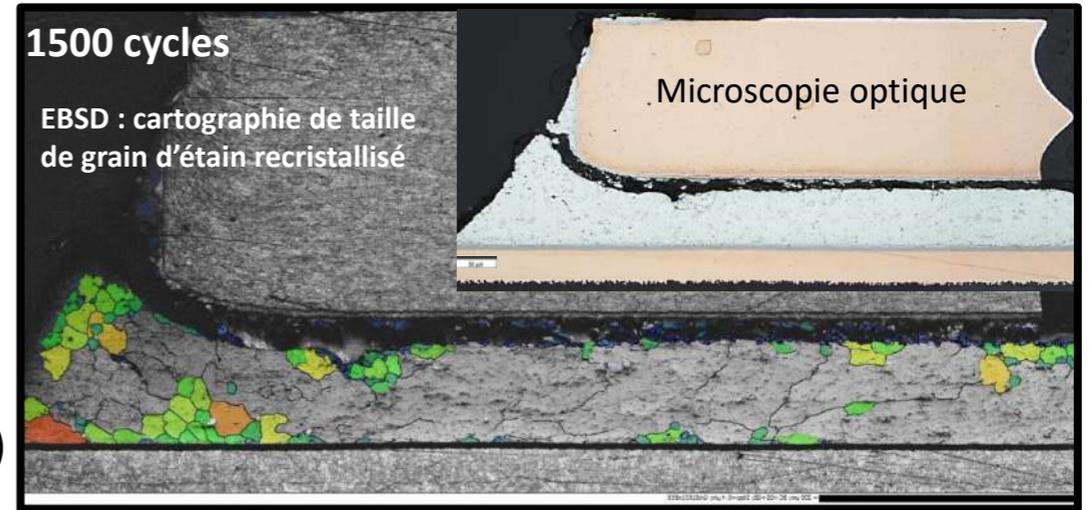
Composant QFN



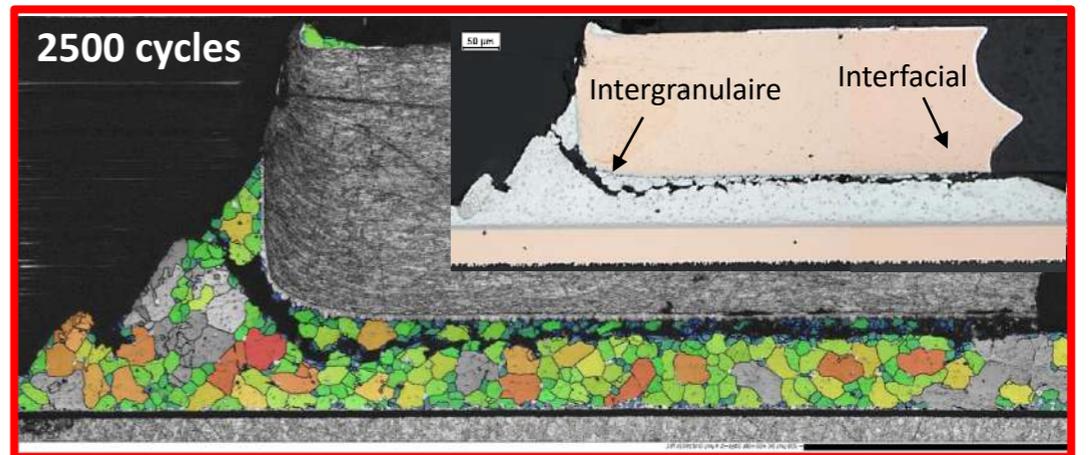
## Hypothèses

- **Lien entre type de contrainte mécanique et mode de fissuration**  
Intergranulaire  $\leftrightarrow$  cisaillement  
Interfacial  $\leftrightarrow$  traction
- **Compétition entre différents facteurs :**  
Microstructure initiale inattendue  
Propriétés de l'assemblage (géométrie du composant et des joints, matériau composite du boîtier à faible coeff. de dilatation thermique)

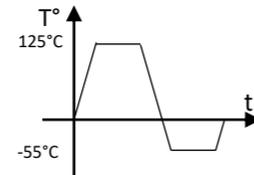
Mode de fissuration interfacial



Mode de fissuration mixte

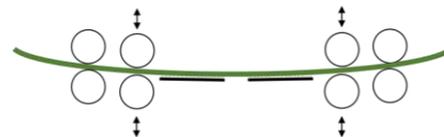


# COMPARAISON DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE



## Fatigue thermomécanique

Cyclage thermique [-55 ; 125°C]  
7 mois de test

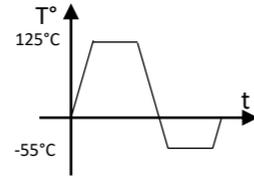


## Fatigue mécanique

Flexion sur carte  
12 jours de test

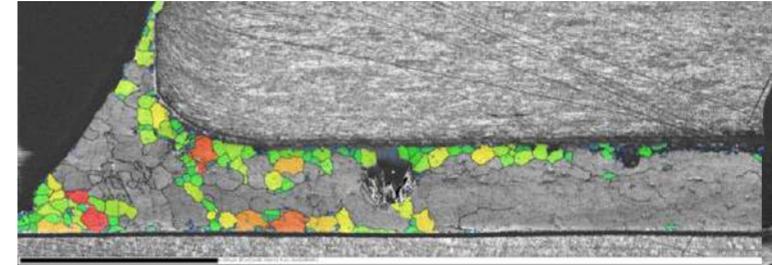
- **Cyclage thermique** : essai de référence pour la fiabilité des assemblages électronique en environnement sévère
- **Cyclage en flexion** : essai de fatigue mécanique, souvent utilisé pour évaluer la résistance de l'assemblage de certains gros composants, répandu dans la téléphonie mobile
- **Etude comparative** : quelle analogie peut-on faire entre les mécanismes de défaillance en fatigue mécanique (essai isotherme rapide) et thermomécanique (essai lent) ?

# COMPARAISON DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE

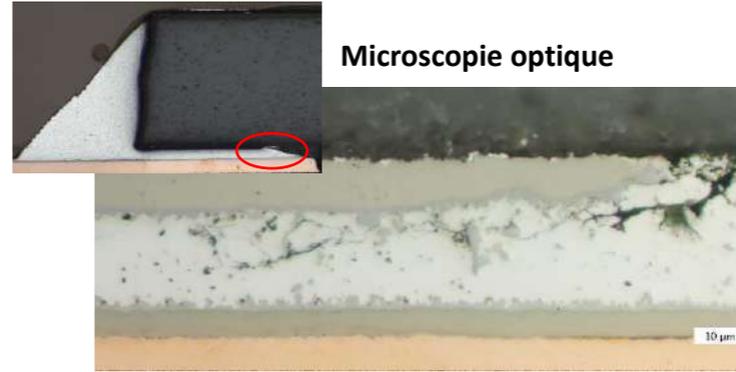


**Fatigue thermomécanique**

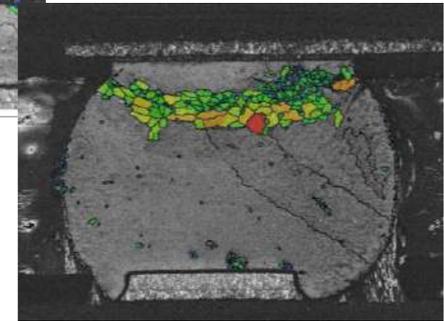
Cyclage thermique [-55 ; 125°C]  
7 mois de test



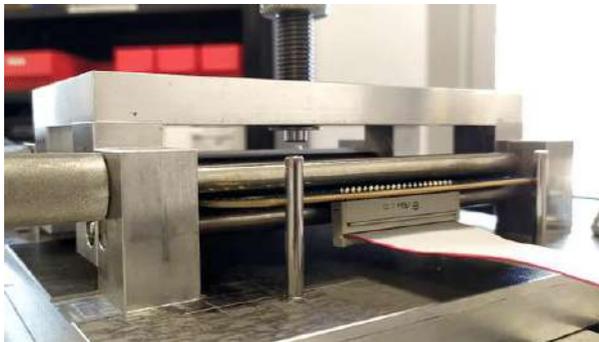
Carto EBSD de taille de grain recristallisé



Microscopie optique

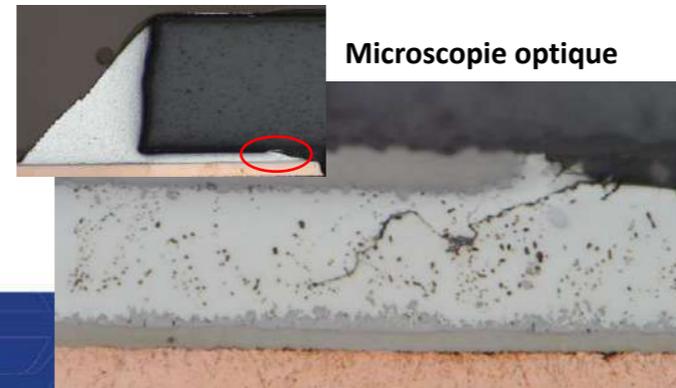
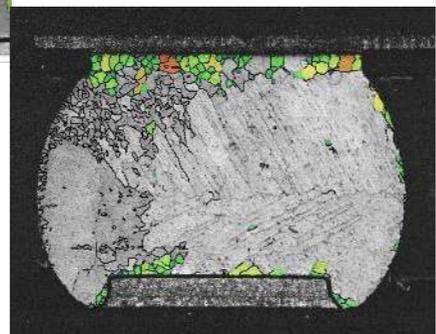
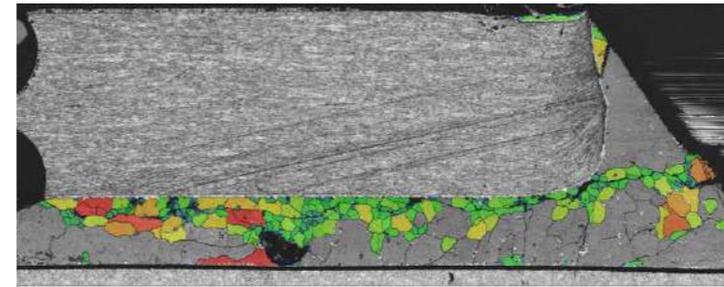


Carto EBSD de taille de grain recristallisé



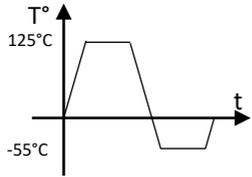
**Fatigue mécanique**

Flexion sur carte  
12 jours de test



Microscopie optique

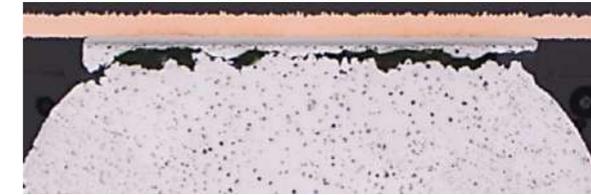
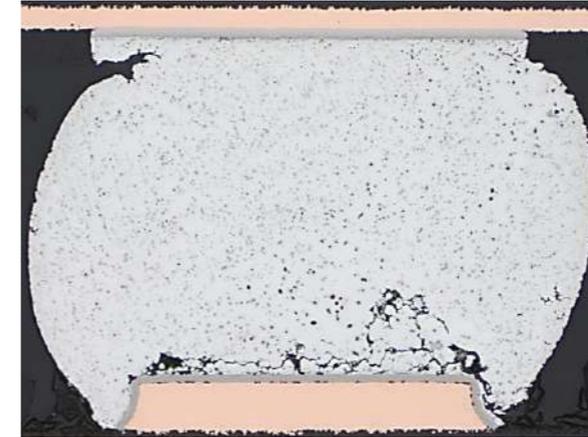
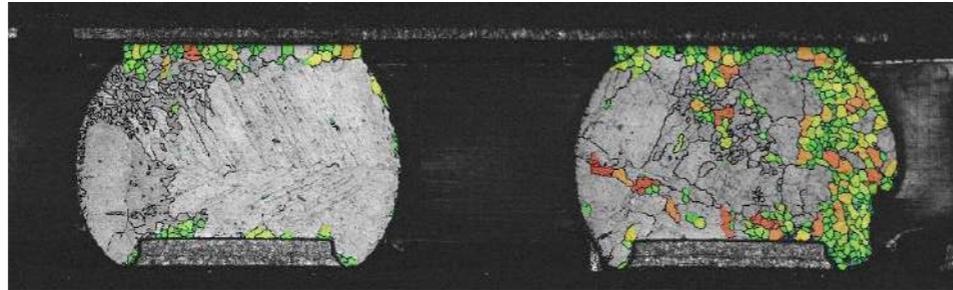
# COMPARAISON DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE



**Fatigue thermomécanique**

Cyclage thermique [-55 ; 125°C]  
7 mois de test

Composant *Ball Grid Array*  
Billes de brasure SnAgCu



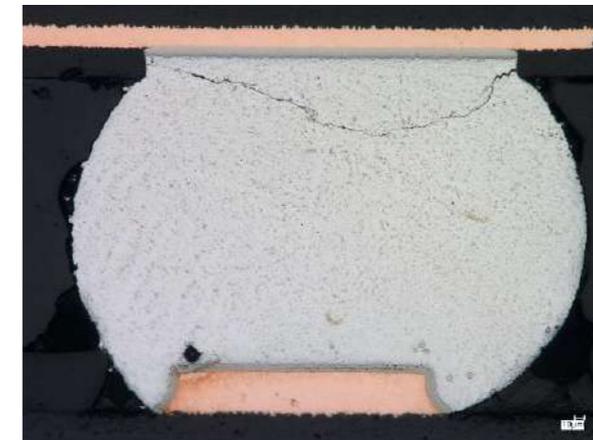
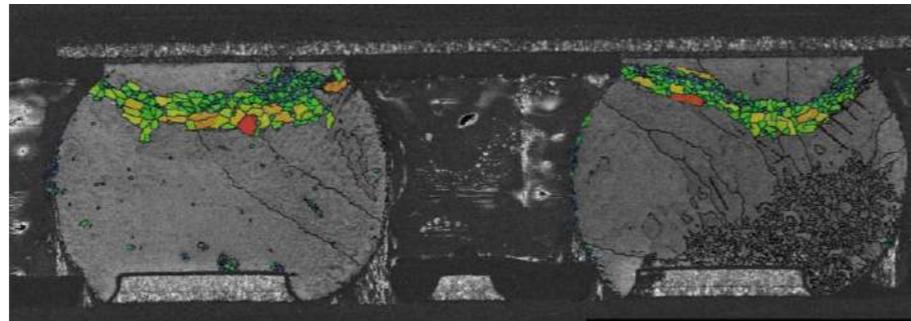
**Différences de distribution de contraintes dans les joints brasés**

**Différences de localisation de la fissure dans le joint brasés critique (celui du coin)**

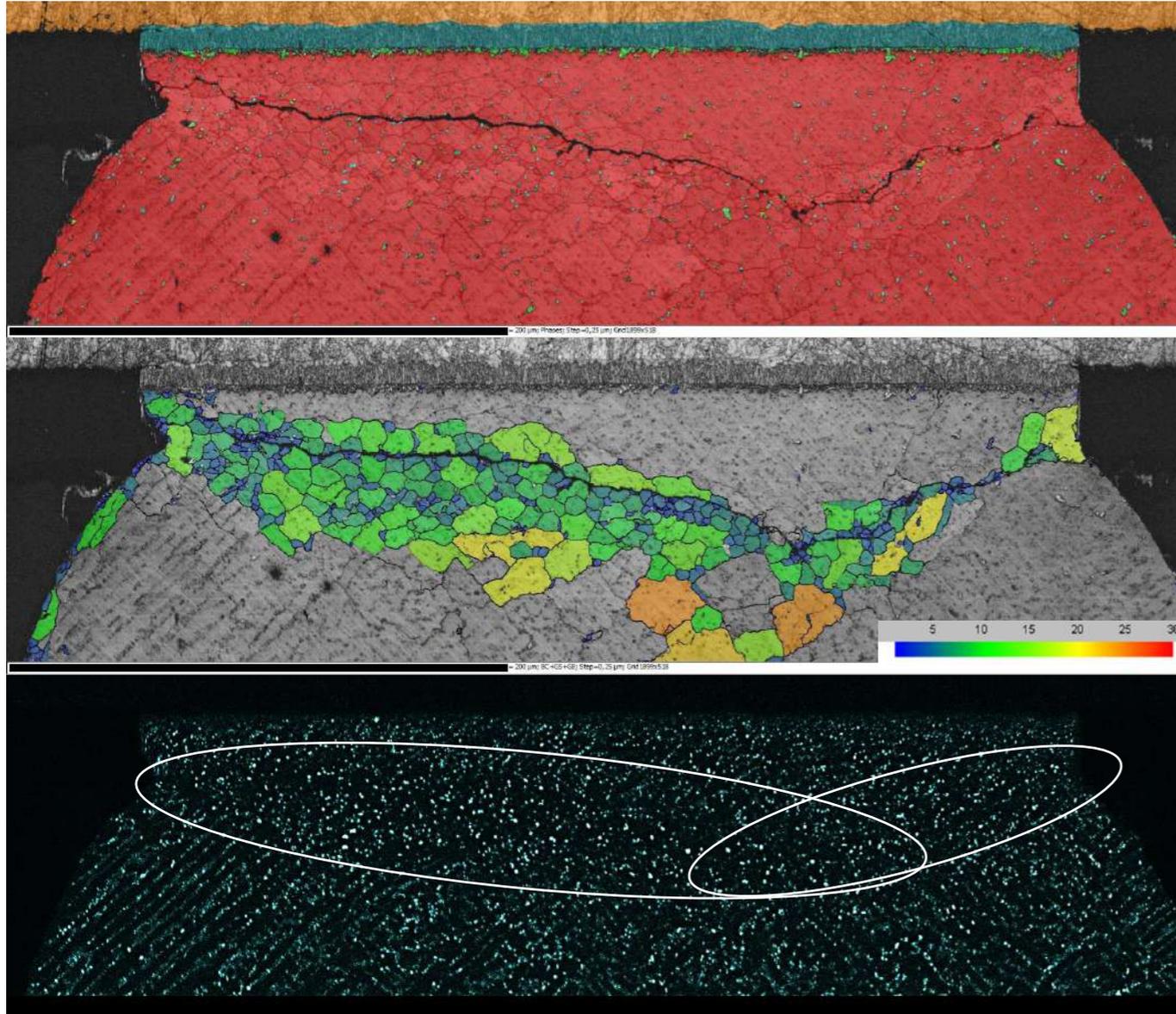


**Fatigue mécanique**

Flexion sur carte  
12 jours de test



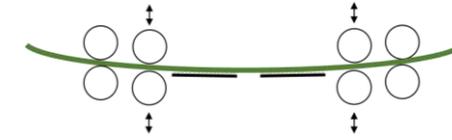
# COMPARAISON DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE



Phases cristallines

Taille de grain d'étain  
recristallisé

Répartition de  
l'argent (EDS)



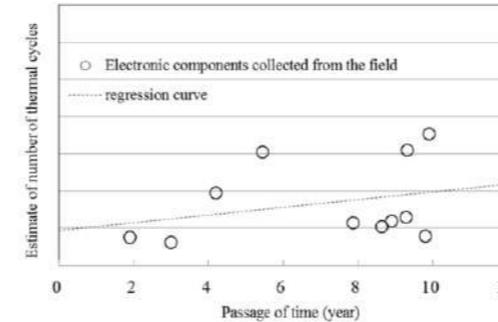
Flexion sur carte  
Essai isotherme

- **Fatigue mécanique isotherme** : mêmes caractéristiques microstructurales qu'en fatigue thermomécanique
- Recristallisation et coalescence sont bien liées à des déformations cycliques du matériau (effet mécanique et pas seulement thermique)
- Phénomènes plus localisés et moins marqués qu'en cyclage thermique

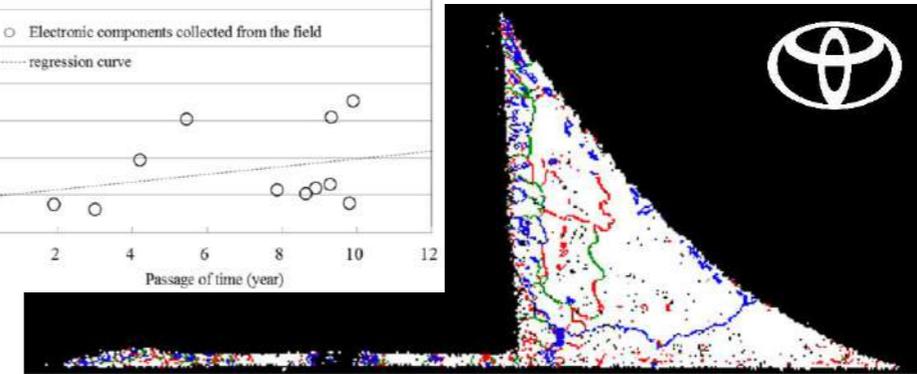
# PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

Utiliser la taille de grain d'étain comme :

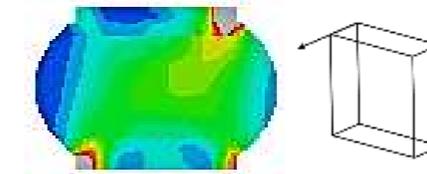
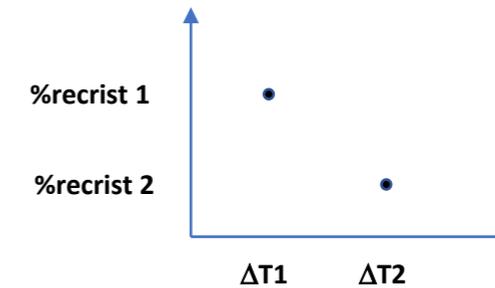
- **Un moyen de mesurer l'état de vieillissement des joints brasés**
  - Dans des véhicules de test ?
  - Dans de vraies cartes électroniques après X années d'utilisation ?
- **Une variable d'endommagement**
  - Dans des études qui mettent en œuvre des contraintes d'amplitudes différentes
  - Corréler le vieillissement accéléré et le vieillissement en opération → facteur d'accélération microstructural ?
- **Une échelle supplémentaire dans la simulation éléments finis**
  - Effet de l'état initial sur le comportement des brasures
  - Effet des nouveaux grains d'étain recristallisés sur le comportement des brasures



Automobile, EBSD après 9 ans



Fujiwara (2018)



Ben Romdhane (2020)

# PERSPECTIVES - PROJET SOLER

## SOLDER Lifetime Evaluation for ElectRronics



1,42 M€



36 mois



AIRBUS, TAS, ELEMCA,  
DGA, IMS, CNES,  
INVENTEC

### Objectifs du projet :

- 1 – Evaluation des performances de crèmes à braser SAC+ pour des designs ou composants critiques ou (quand le SAC305 n'est pas suffisant) avec des tests de vieillissement représentatifs
- 2 – Etudier les modes et mécanismes de défaillance des joints brasés
- 3 – Evaluer des alliages basse température de fusion

### Drivers par application :

#### **Aéronautique**

- Améliorer la robustesse des assemblages électroniques critiques
- Éviter la déformation des composants ou des cartes pendant le processus de refusion

#### **Spatial**

- Supporter la transition vers le sans plomb pour les assemblages électroniques: évaluation de la fiabilité des brasures

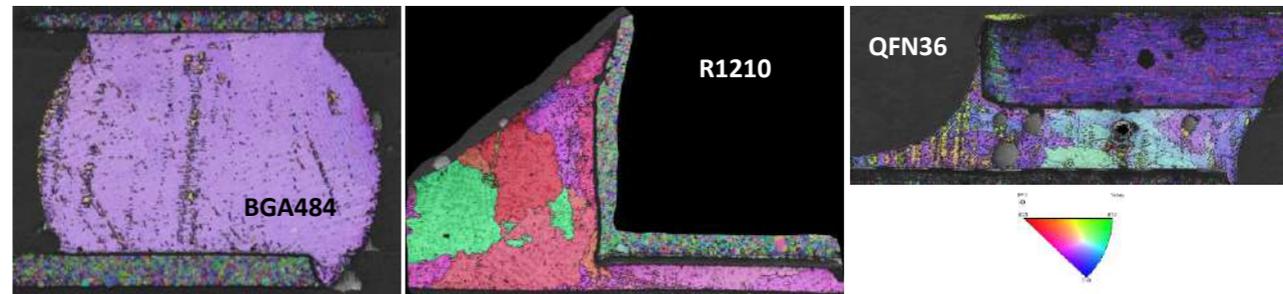
### Contacts IRT:

Laure Dupire-Rocheron: [laure.rocheron@irt-saintexupery.com](mailto:laure.rocheron@irt-saintexupery.com)

Raphaël Riva: [raphael.riva@irt-saintexupery.com](mailto:raphael.riva@irt-saintexupery.com)

### Utilisation de l'EBSD :

- Description des modes et mécanismes de défaillance
- Etude de l'impact des différentes compositions d'alliage sans plomb

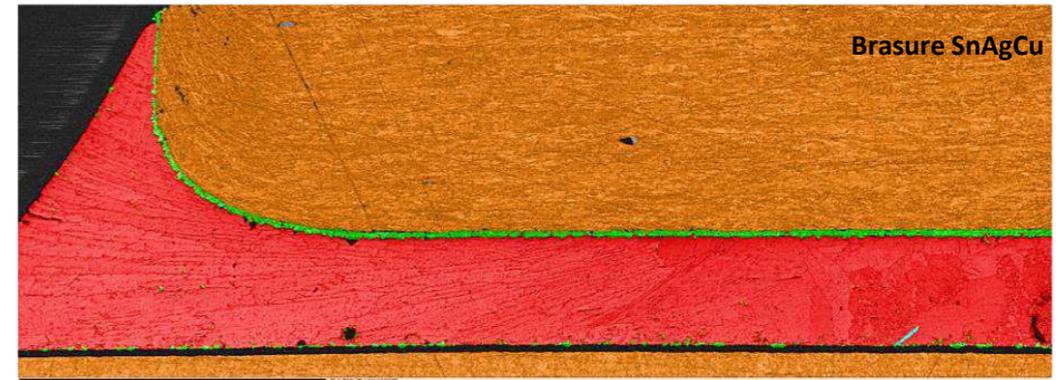
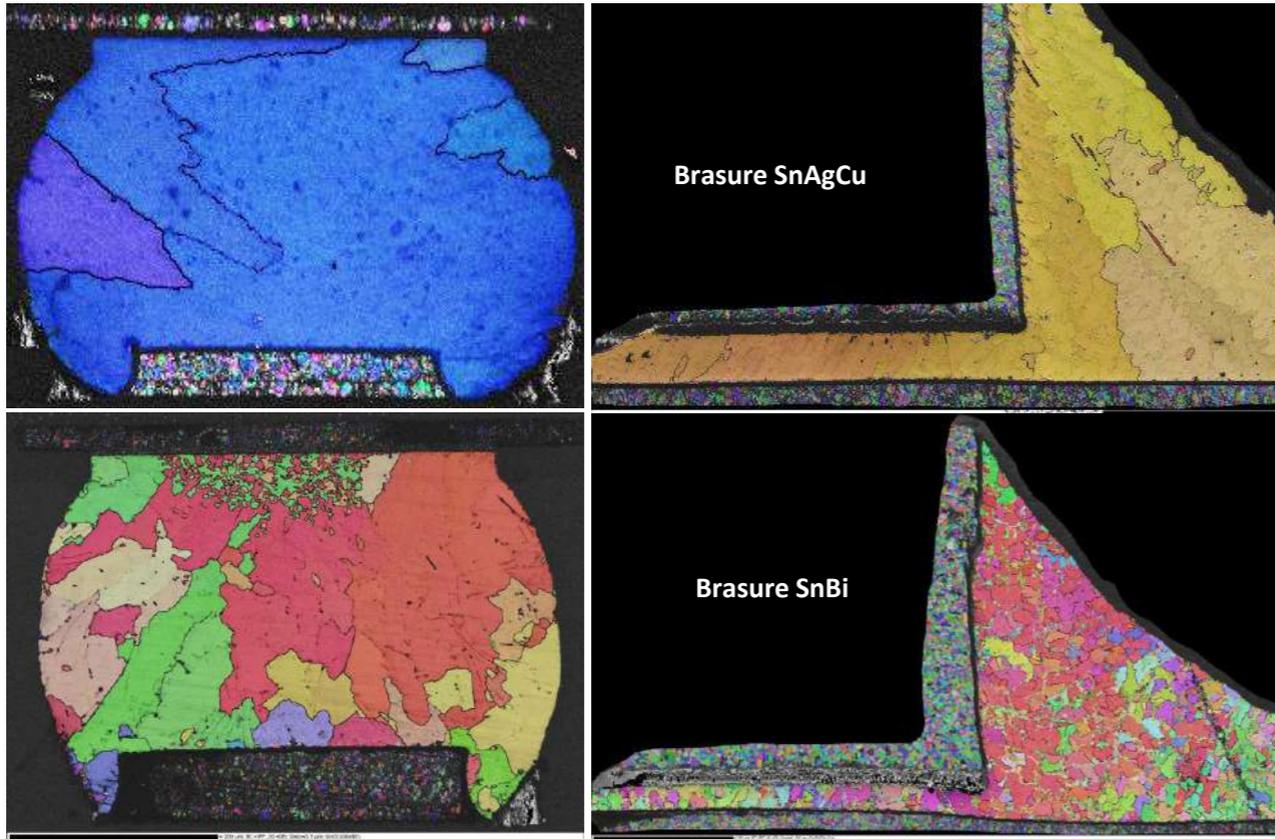


Assemblages SAC+  
Orientation cristalline des grains

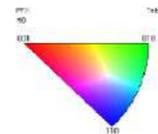
# PERSPECTIVES - PROJET SOLER

## SOLDER Lifetime Evaluation for ElectRronics

Quelles différences de microstructure entre alliages de brasure ? Quel impact sur le mécanisme de défaillance et la fiabilité ?



Orientation cristalline des grains



# PUBLICATIONS



Romdhane, E. B., Guédon-Gracia, A., Pin, S., Roumanille, P., & Frémont, H. (2020). Impact of crystalline orientation of lead-free solder joints on thermomechanical response and reliability of ball grid array components. *Microelectronics Reliability*, 114, 113812.

Romdhane, E. B., Roumanille, P., Guédon-Gracia, A., Pin, S., Nguyen, P., & Frémont, H. (2021). From early microstructural evolution to intergranular crack propagation in SAC solders under thermomechanical fatigue. *Microelectronics Reliability*, 126, 114288.

Roumanille, P., Romdhane, E. B., Pin, S., Nguyen, P., Delétage, J. Y., Guédon-Gracia, A., & Frémont, H. (2021). Evaluation of thermomechanical fatigue lifetime of BGA lead-free solder joints and impact of isothermal aging. *Microelectronics Reliability*, 126, 114201.

Romdhane, E. B., Roumanille, P., Guédon-Gracia, A., Pin, S., Nguyen, P., & Frémont, H. (2021, June). Early microstructural indicators of crack initiation in lead-free solder joints under thermal cycling. In *2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (pp. 2293-2301). IEEE.

Romdhane, E. B., Roumanille, P., Guedon-Gracia, A., Pin, S., Nguyen, P., & Frémont, H. (2022, May). QFN (Quad Flat No-lead) SAC Solder Joints under Thermal Cycling: Identification of Two Failure Mechanisms. In *2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (pp. 716-722). IEEE.

Romdhane, E. B., Roumanille, P., Guédon-Gracia, A., Pin, S., Nguyen, P., & Frémont, H. (2022, April). Evaluation of SAC solder joint thermomechanical fatigue in different types of components. In *2022 23rd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (pp. 1-6). IEEE.

Thèse Emna Ben Romdhane (Université de Bordeaux, 2022) MICROSTRUCTURAL APPROACH TO EVALUATE THE RELIABILITY OF LEAD-FREE ELECTRONIC ASSEMBLIES IN THERMOMECHANICAL FATIGUE



Merci pour votre attention  
Des questions ?





# TECH HOUR

## PROCHAIN SUJET

mardi 26 mars 2024

**Retenez la date  
du prochain  
Tech Hour**

**Jumeau numérique et réalité augmentée pour  
l'apprentissage machine**

L'intervention sera réalisée par :  
**Vincent VAUCHEY** [vvauchey@cesi.fr](mailto:vvauchey@cesi.fr)  
**Vincent HAVARD** [vhavard@cesi.fr](mailto:vhavard@cesi.fr)

**CESI LINEACT – UR 7527**  
80 avenue Edmund Halley, Technopôle du Madrillet,  
76800 Saint-Étienne-du-Rouvray

L'émergence des jumeaux numériques industriels offre une opportunité clé pour l'IA et la prise de décision éclairée. Utilisés initialement pour le monitoring, la conception et la formation, ces jumeaux permettent la génération de données synthétiques basées sur la réalité mixte pour les algorithmes d'apprentissage profond. Associé à la réalité virtuelle, le jumeau numérique devient un outil d'aide à la décision intégrant les incertitudes d'une analyse de scène obtenue par une flotte d'agents robotiques.



# 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)

