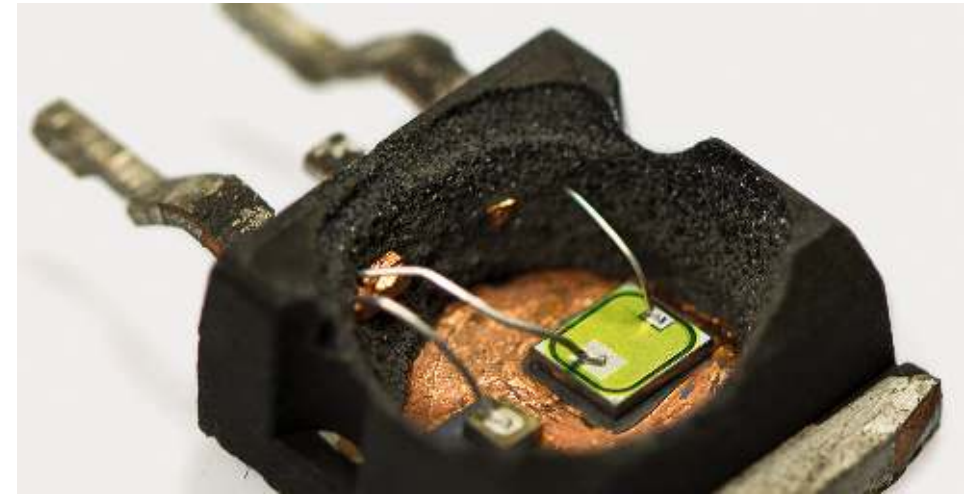
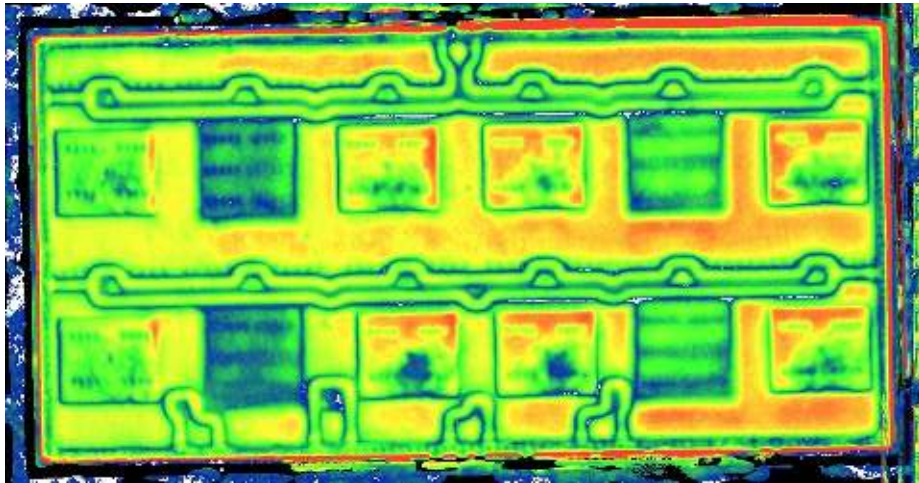


Analyse de défaillance et aide au diagnostic en EP

Zoubir KHATIR

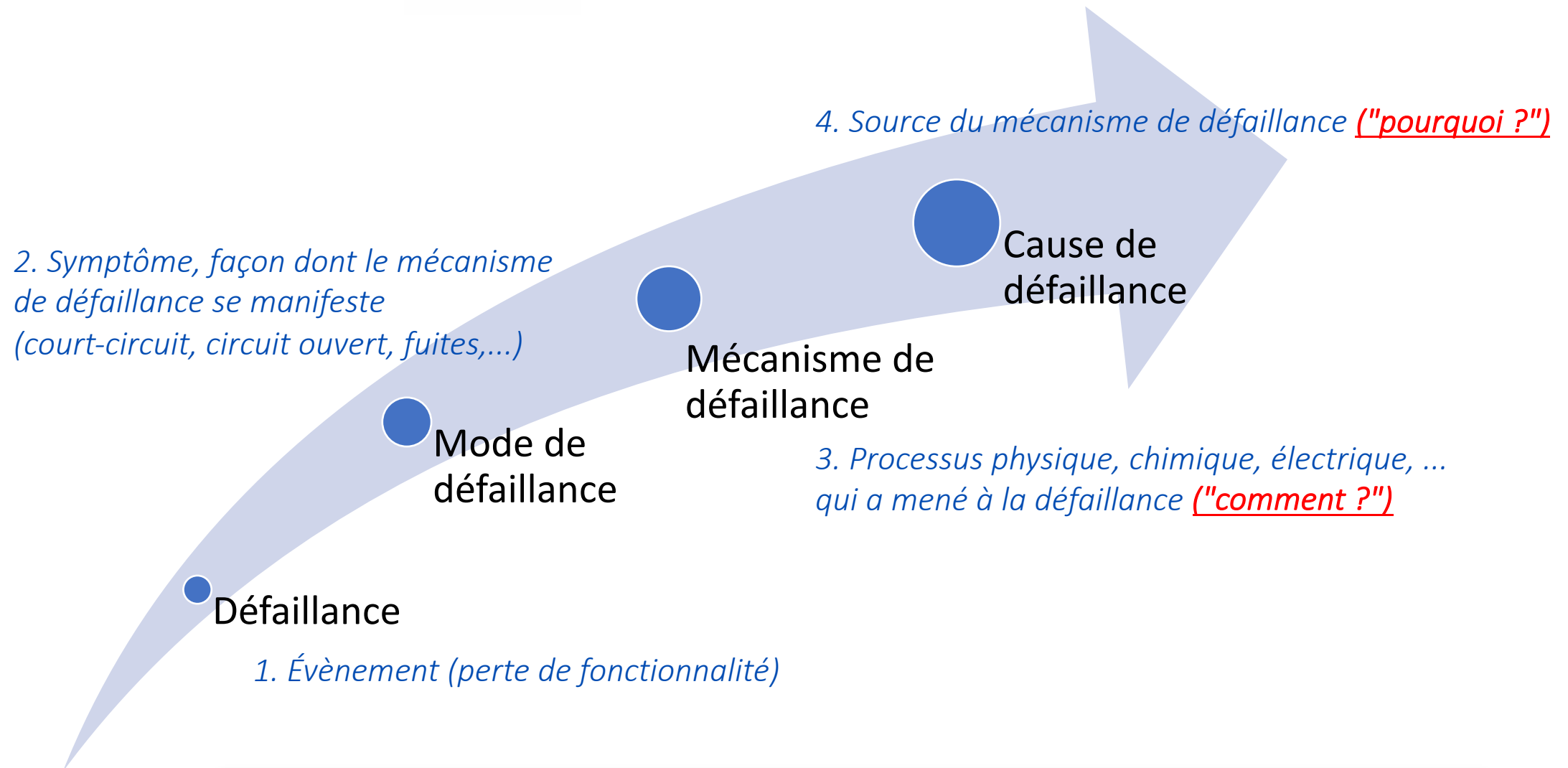


Plan de présentation

1. L'analyse de défaillance des composants
2. Types de stress et dégradations en EP
3. Aide au diagnostic & pronostic

L'analyse de défaillance des composants

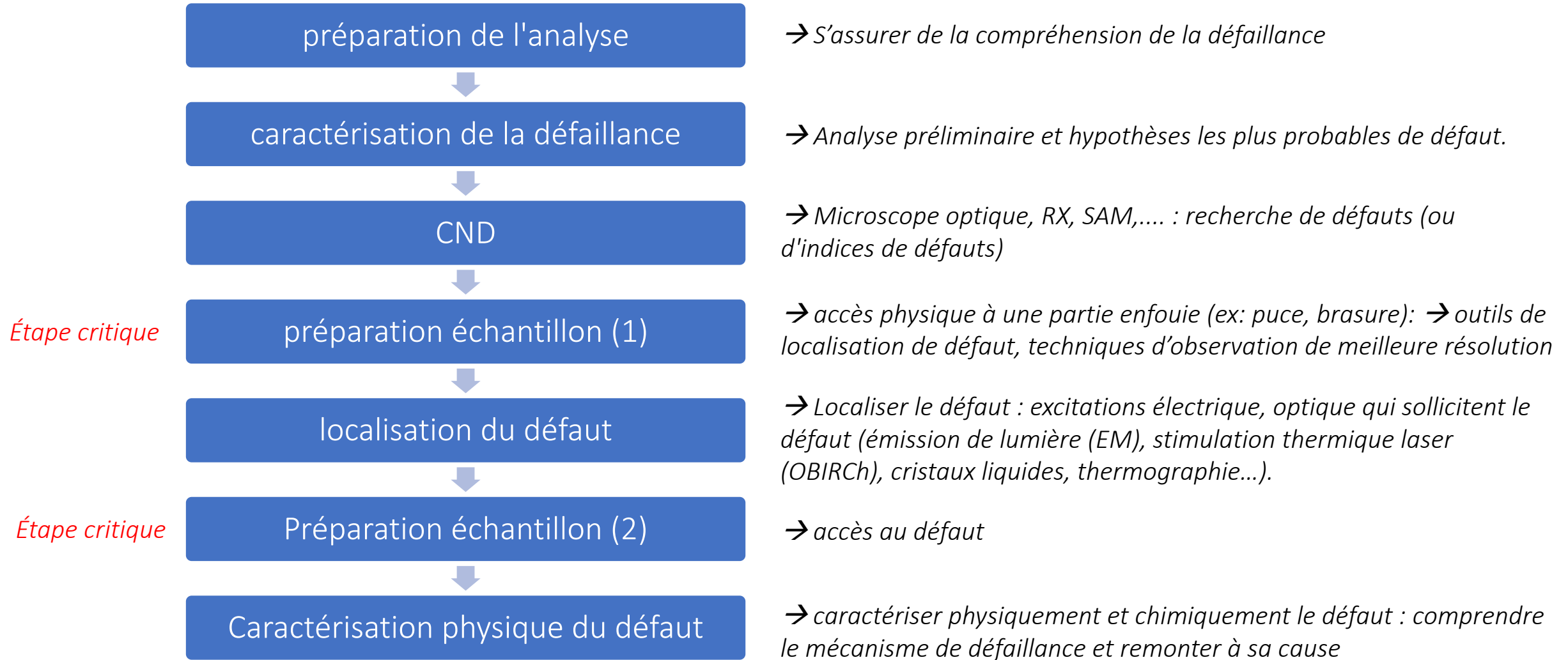
Qu'est-ce que l'analyse de défaillance ?



Objectif : déterminer le mécanisme et la cause de la défaillance.

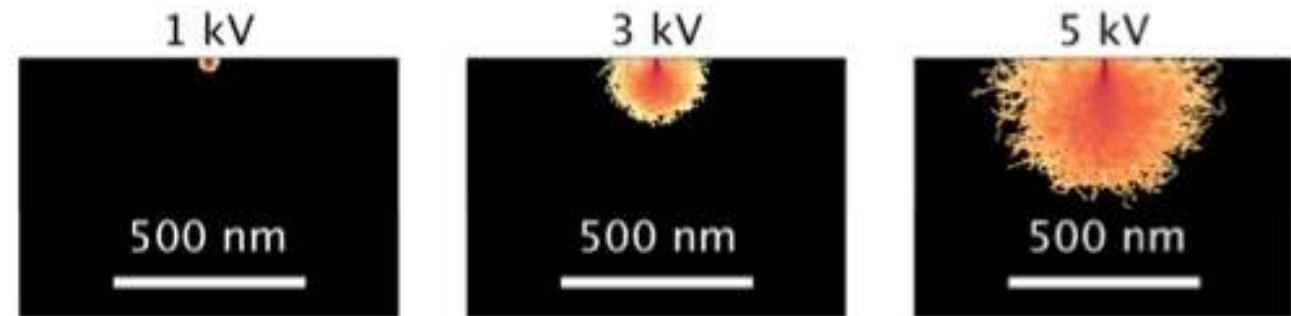
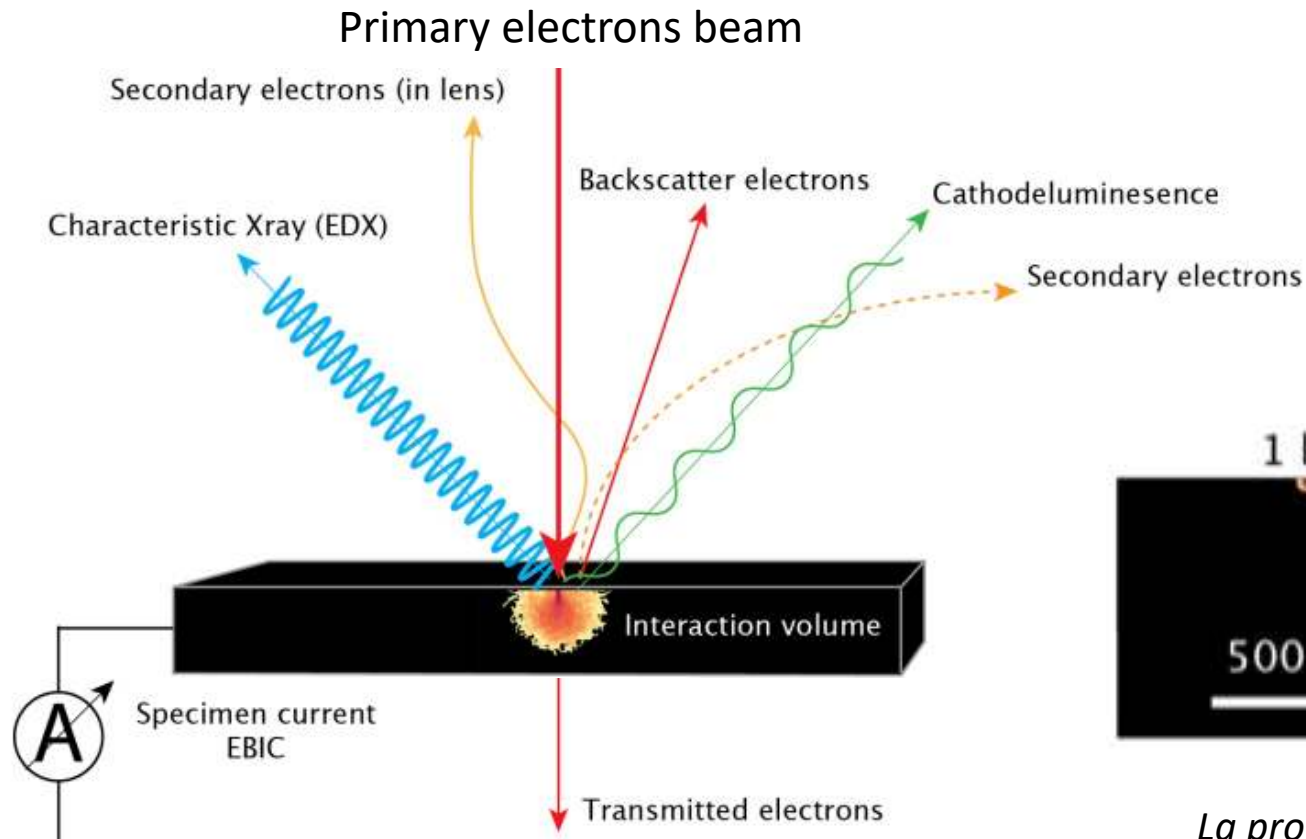
L'analyse de défaillance des composants

Méthodologie générale



Techniques de localisation de défauts...

... utilisant l'interaction avec des faisceaux d'électrons



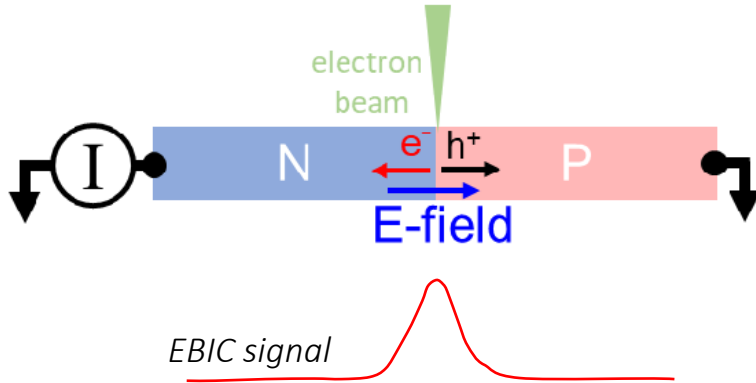
La profondeur d'analyse dépend de l'énergie du faisceau mais en augmentant celle-ci on "perd" en résolution spatiale.

Techniques de localisation de défauts...

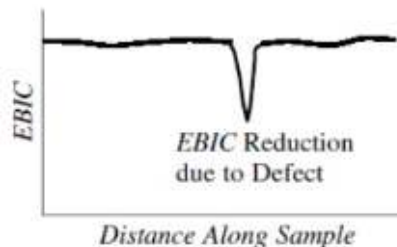
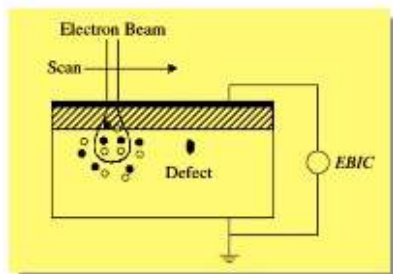
... utilisant l'interaction avec des faisceaux d'électrons

Principe : des charges sont générées dans le SC par le faisceau d'électrons. Sous polarisation, ces charges vont circuler et générer un courant.

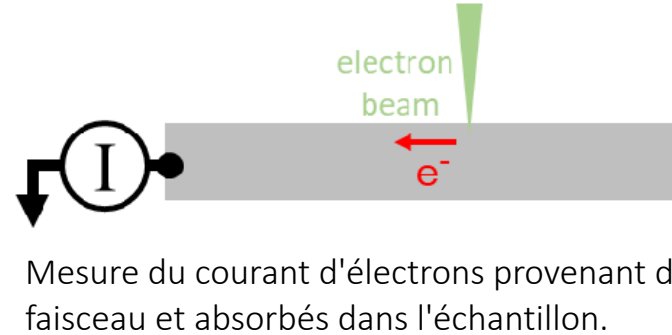
EBIC (Electron beam induced current)



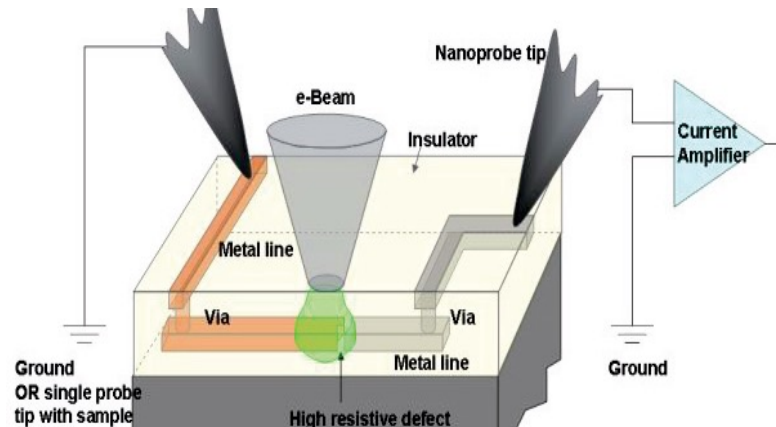
- Caractérisation des propriétés des porteurs : longueur de diffusion, durée de vie des minoritaires,...
- Cartographies de champ électrique
- Détection de défauts (dislocations, dégradation de jonction,....)



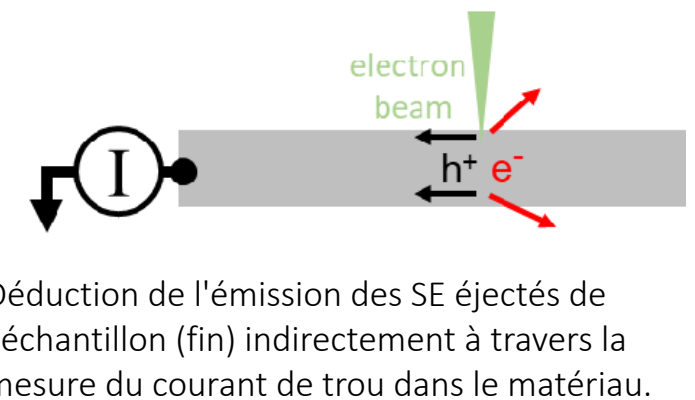
EBAC (Electron beam absorbed current)



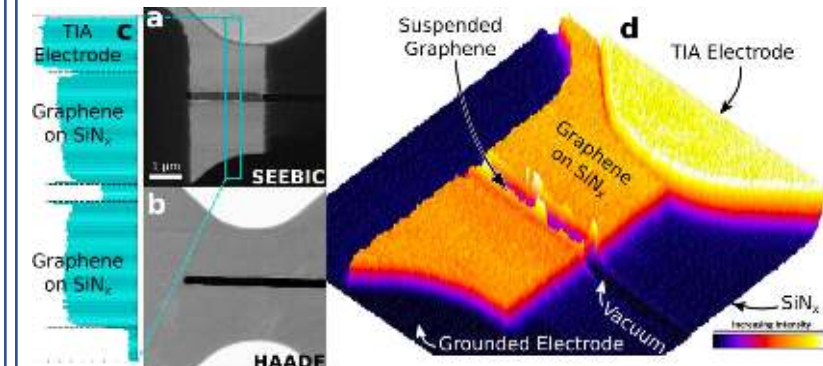
- Localisation des ouvertures de circuits,...
- Défauts d'oxyde, fuites
- Courts-circuits



SEEBIC (Secondary Electron beam induced current)



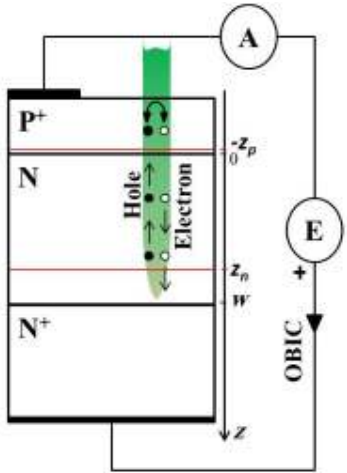
- Localisation des ouvertures de circuits,...
- Courts-circuits
- conductivité matériaux
- mapping travail de sortie.



Techniques de localisation de défauts...

... utilisant l'interaction avec des faisceaux de photons

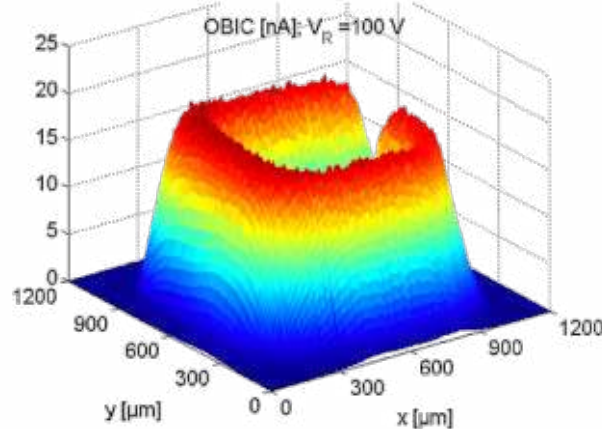
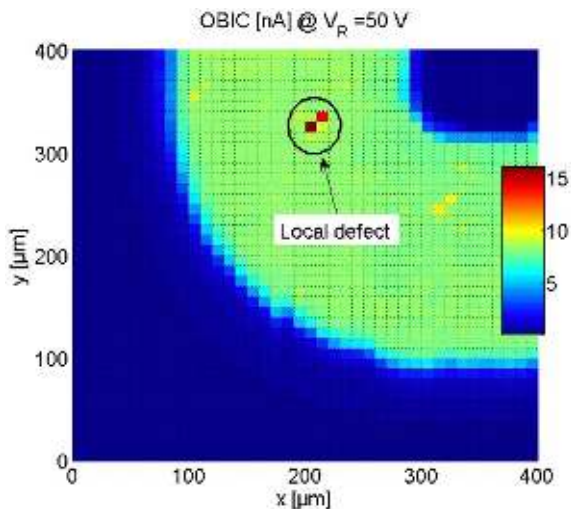
OBIC (Optical beam induced current)



Même principe que EBIC mais avec un faisceau laser (optique)

Zone d'analyse plus profonde que l'EBIC mais moins résolues.

- Caractérisation des propriétés des porteurs : longueur de diffusion, durée de vie minoritaires,...
- Cartographie de champ électrique
- Détection de défauts



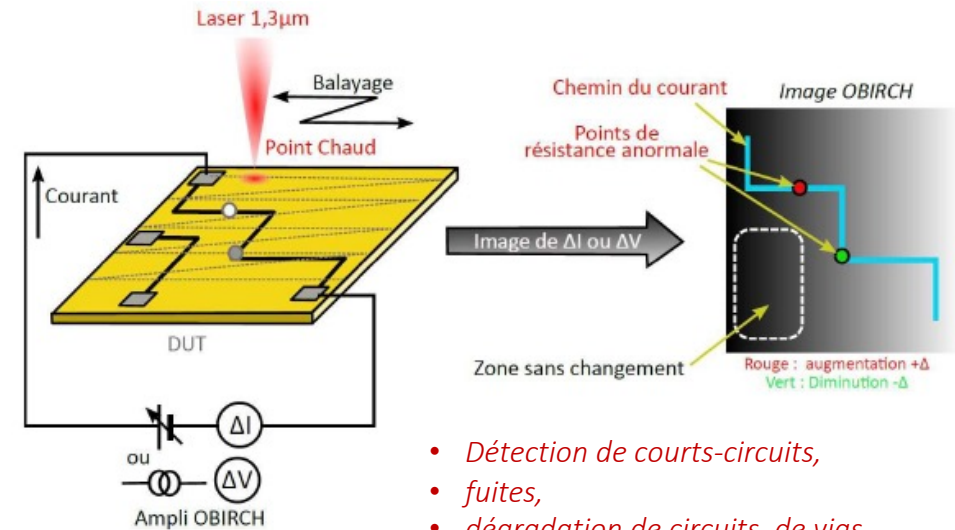
OBIRCh (Optical beam induced current)

On injecte un courant constant (ou applique une tension constante) et on mesure une tension en sortie (ou un courant).

L'échauffement localisé de pistes métalliques va induire un ΔR qui induira un ΔV (ou ΔI) qui est le signal OBIRCh.

→ Un échauffement anormal sera généré en présence d'un défaut (ΔV (ou ΔI) anormal)

→ Superposition de l'image optique et de la cartographie du signal pour localiser les défauts



- Détection de courts-circuits,
- fuites,
- dégradation de circuits, de vias

Techniques de localisation de défauts...

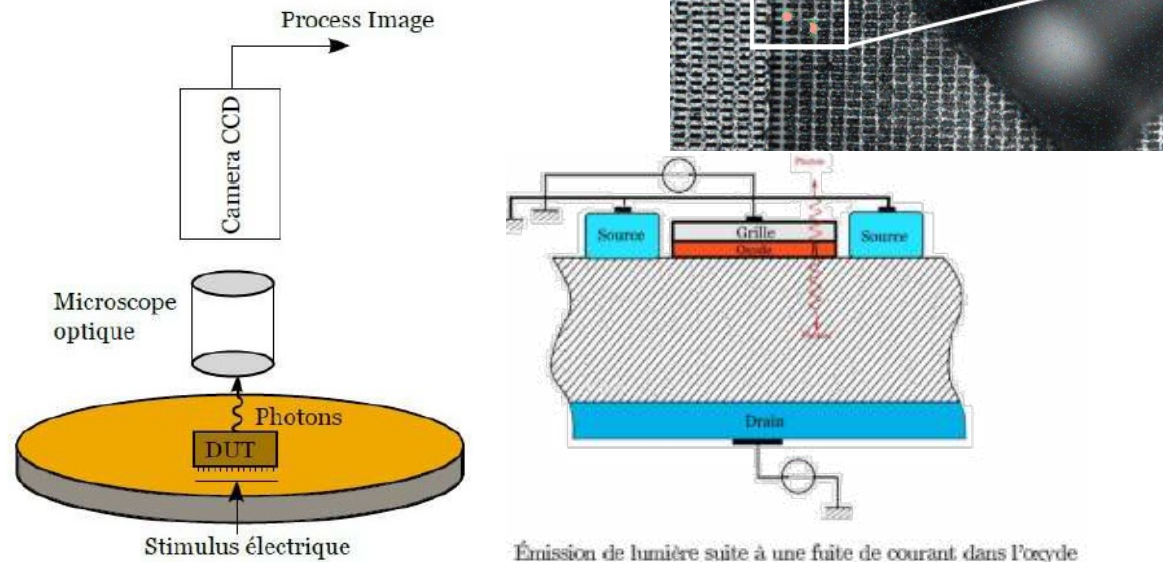
... utilisant l'émission de photons ou des effets thermiques

PEM (microscopie à émission de photons)

détection de photons émis par le composant excité par un stimuli électrique.
Sous le stimuli électrique, la zone défectueuse s'active et émet de la lumière. Celle-ci sera capturé par une caméra à travers un microscope.

→ Superposition de l'image optique et de la cartographie d'émission pour localiser les défauts

- défaillance de jonction PN
- fuites d'oxyde
- ionisation par impact
- latch-up

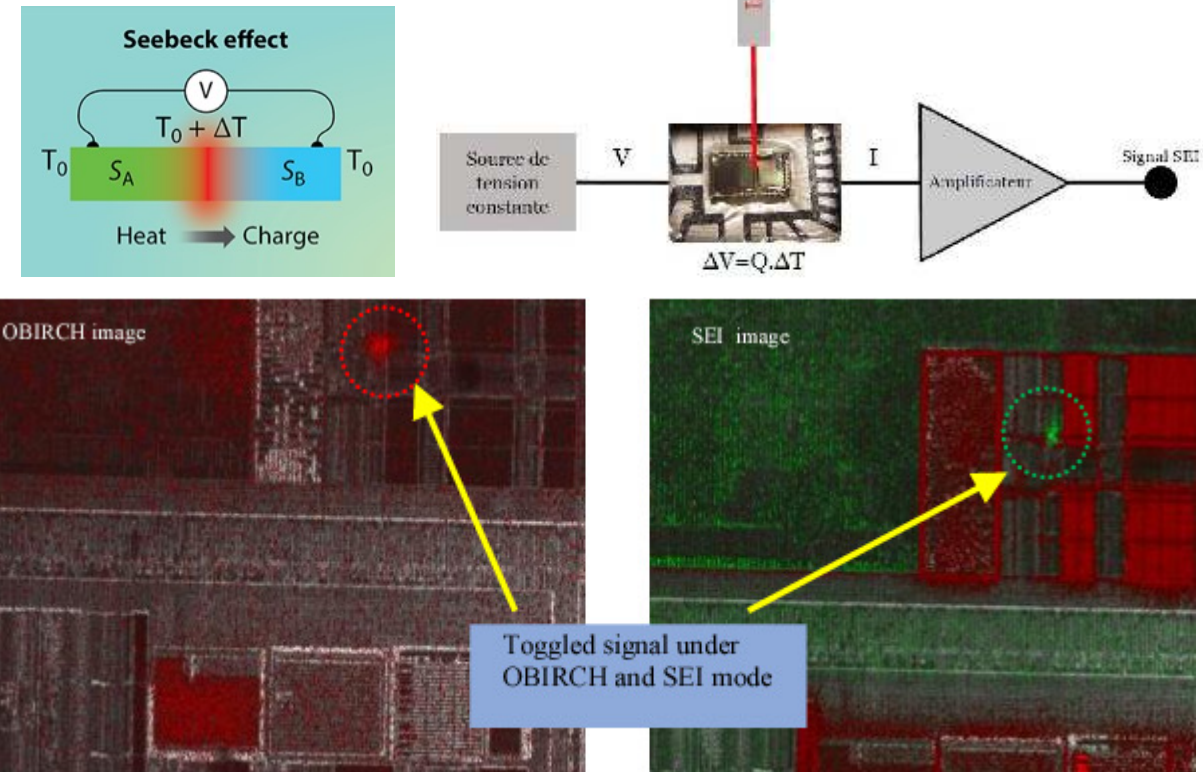


SEI (Seebeck effect imaging)

mesure de la variation de potentiel induite par les gradients de $T^{\circ}\text{C}$ dans les matériaux métalliques induits par un faisceau laser: $\Delta V = Q \cdot \Delta T$

coeff. thermoélectrique

- Détection de circuits ouverts,
- dégradation de circuits

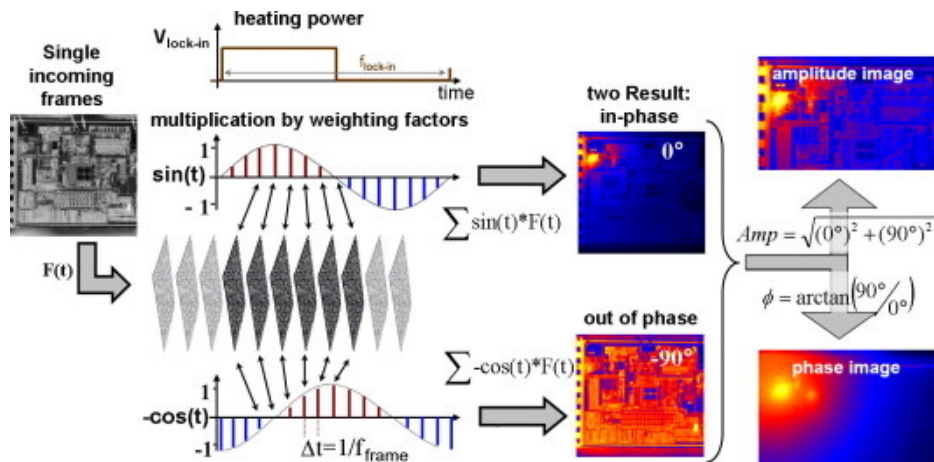


Techniques de localisation de défauts...

... CND utilisant l'infrarouge ou l'acoustique

Thermographie synchrone (Lock-In Thermography)

Cartographie IR où la T°C moyenne et le contenu harmonique hors d'intérêt sont éliminés, acquisition uniquement des variations de température dues à une harmonique d'excitation particulière.



- Courts-circuits,
- ouverture de circuit
- Fuites
- Défauts ESD
- Dégradations d'oxyde

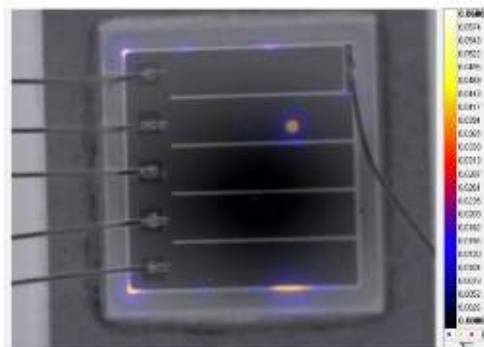


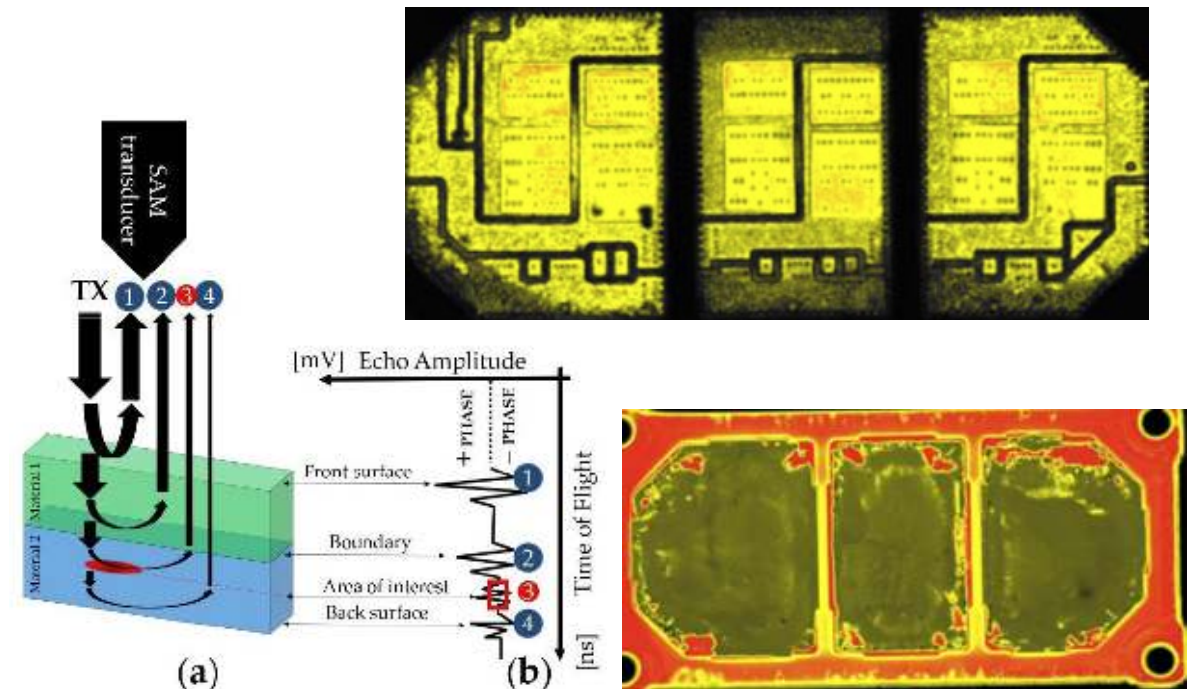
Fig. 13. Optical image of the device layout superimposed to amplitude thermal image obtained from LIT measurements.

Localisation de fuites de grille sur V-JFET en modulant en sinus V_{gs} .

SAM (Optical beam induced current)

Analyse des ondes acoustiques réfléchies aux interfaces d'un assemblage (changement d'impédance acoustique).

- Délaminations aux interfaces
- fractures de brasures



L'analyse de défaillance des composants

	Technique	type de défauts	limitations
Faisceau d'électron	CIVA	- interconnexions ouvertes - défauts d'oxyde	la présence de couches épaisses de passivation nécessite une forte énergie du faisceau d'électrons pour atteindre le conducteur : augmente le risque d'irradiation
	EBIC (<i>Electron beam induced current</i>)	- dégradation de jonction - défauts actifs (précipités, joints de grains) - dislocation	- coûteuse (nécessité du vide) - problème de charge - analyse des zones profondes - dégradation de l'oxyde de grille par irradiation
	EBAC (<i>Electron beam absorbed current</i>)	- site défailants à haute résistances - circuits ouverts d'interconnexion - courts-circuits - défauts d'oxyde et fuites de grille	- exige 2 sondes pour les défauts à forte résistance - risque de dégradation par irradiation (si forte énergie du faisceau d'électrons)
Faisceau optique (laser)	OBIC (<i>Optical beam induced current</i>)	- ESD/EOS - courants de fuite, courts-circuits - dégradation de jonction - sensibilité au latch-up	- faible résolution due à la largeur du faisceau - en analyse face arrière : nécessite un polissage du substrat pour réduire la diffusion du faisceau
	OBIRCH (<i>Optical beam induced resistance changes</i>)	courts-circuits, fuites	sensibilité de détection des faibles tensions et courants
	LIVA (<i>light induced voltage alteration</i>)	- dégradation de jonction - circuit ouvert	les connexions électriques doivent être maintenues sur le composant
	TIVA (<i>Thermally induced voltage alteration</i>)	- courts-circuits - défauts de pistes métalliques et vias	- sensibilité à l'émissivité et niveau de bruit - nécessite une polarisation du composant à courant constant
	SEI (<i>Seebeck effect imaging</i>)	circuit ouvert	fort contraste qui peut masquer les défauts
	PEM (<i>Photoemission microscopy</i>)	- défaillance de jonction PN - fuites d'oxyde - ionisation par impact - latch-up	- défaut qui n'émet pas de lumière - présence de couches de métallisation et jonctions enterrées - préparation d'échantillon délicate - sensibilité du détecteur

L'analyse de défaillance des composants

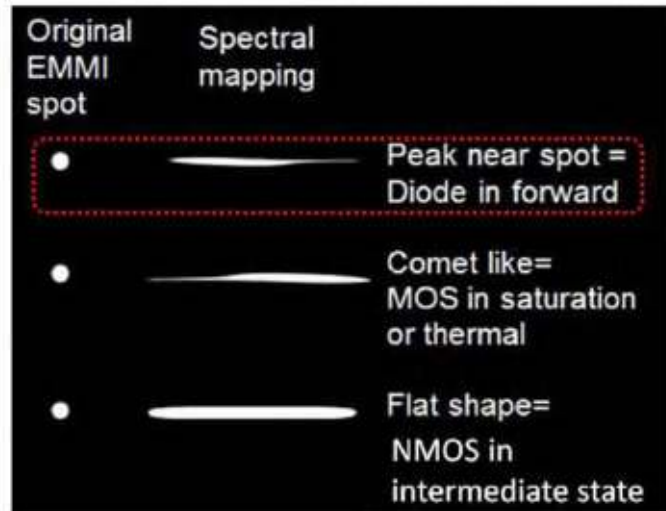
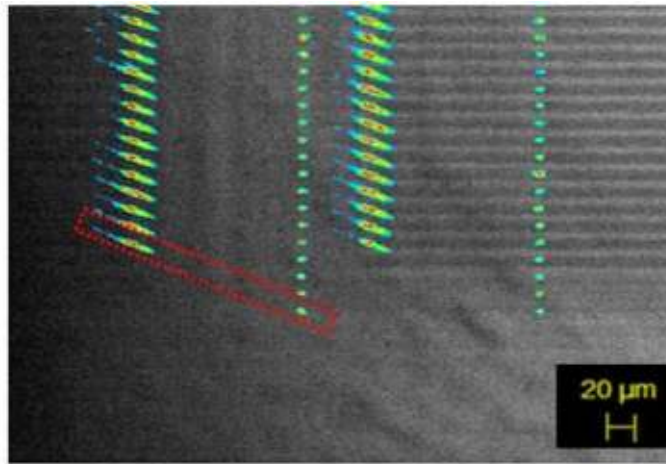
techniques de localisation en fonction des défaillances

Défaillance électrique générée	Méthodes de localisation à utiliser	Accès nécessaire en préparation d'échantillon
Circuit ouvert	Contraste de potentiel	Face avant
Défaut résistif	Effet Seebeck	Face arrière ou face avant
	Microscopie magnétique	En boîtier, face avant ou face arrière
	Thermographie IR	En boîtier, face avant ou face arrière
	Cristaux liquides	Face avant
	OBIRCh	Face arrière ou face avant
Court-circuit	OBIRCh	Face arrière ou face avant
	Contraste de potentiel	Face avant
	Microscopie magnétique	En boîtier, face avant ou face arrière
Courants de fuite	EMMI	Face avant ou face arrière
	Cristaux liquides	Face avant
	Thermographie IR	En boîtier, face avant ou face arrière
	Microscopie magnétique	En boîtier, face avant ou face arrière

Analyse de défaillance : *localisation de défauts*

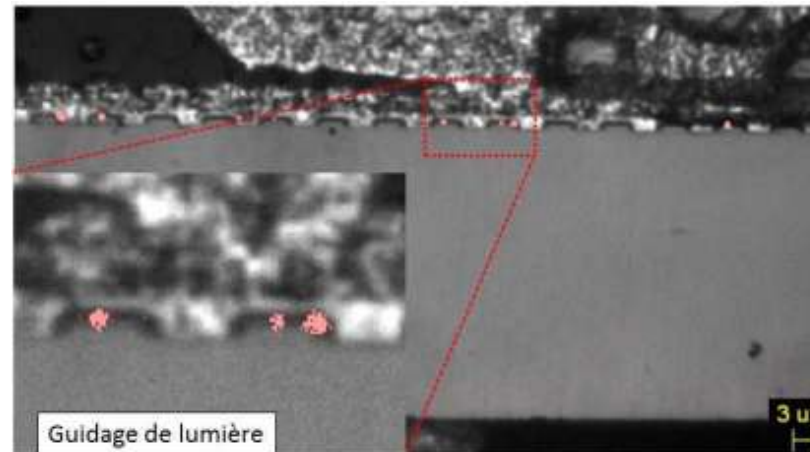
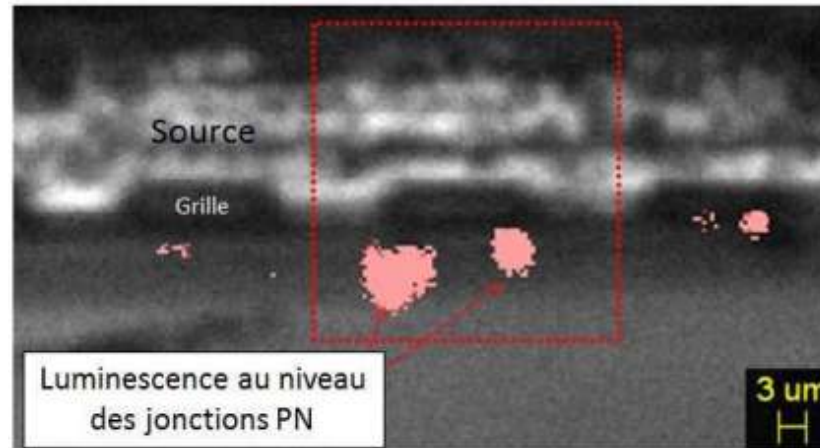
Exemples d'analyse

Face arrière (MOS-SiC)

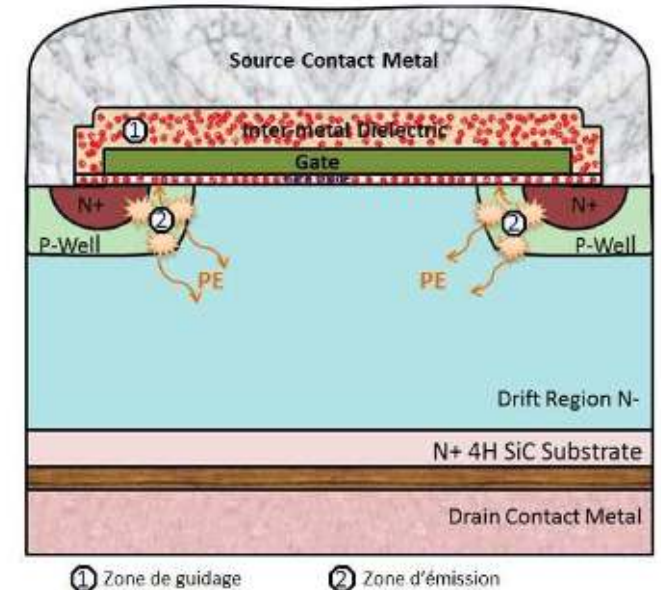


Analyse en électroluminescence

microsection

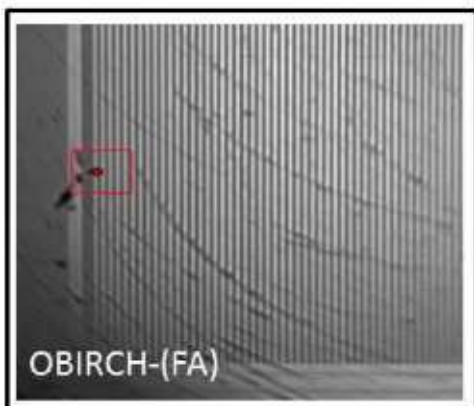


Localisation de l'émission de lumière

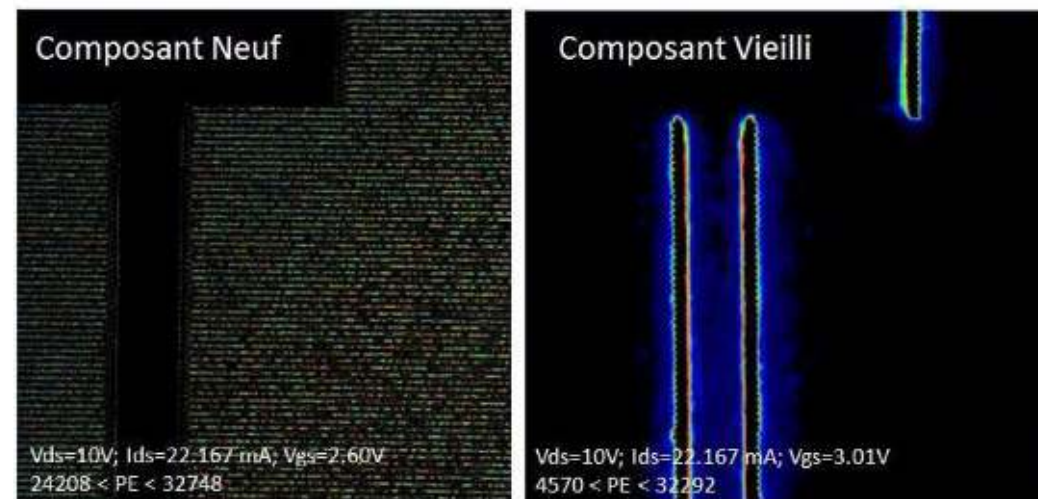
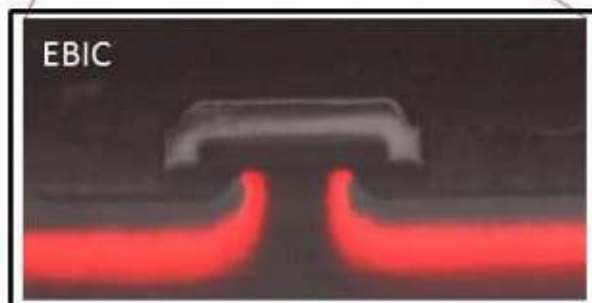
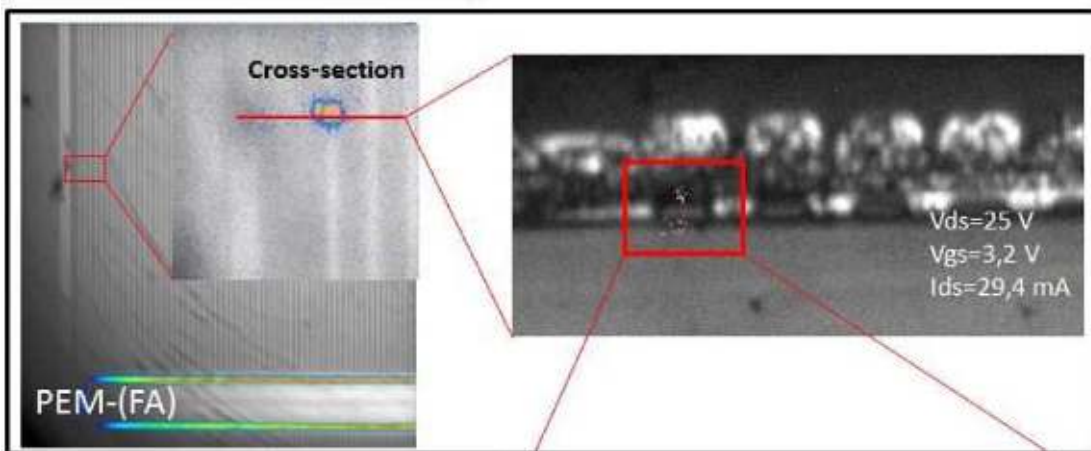


Analyse de défaillance : *localisation de défauts*

Exemples d'analyse

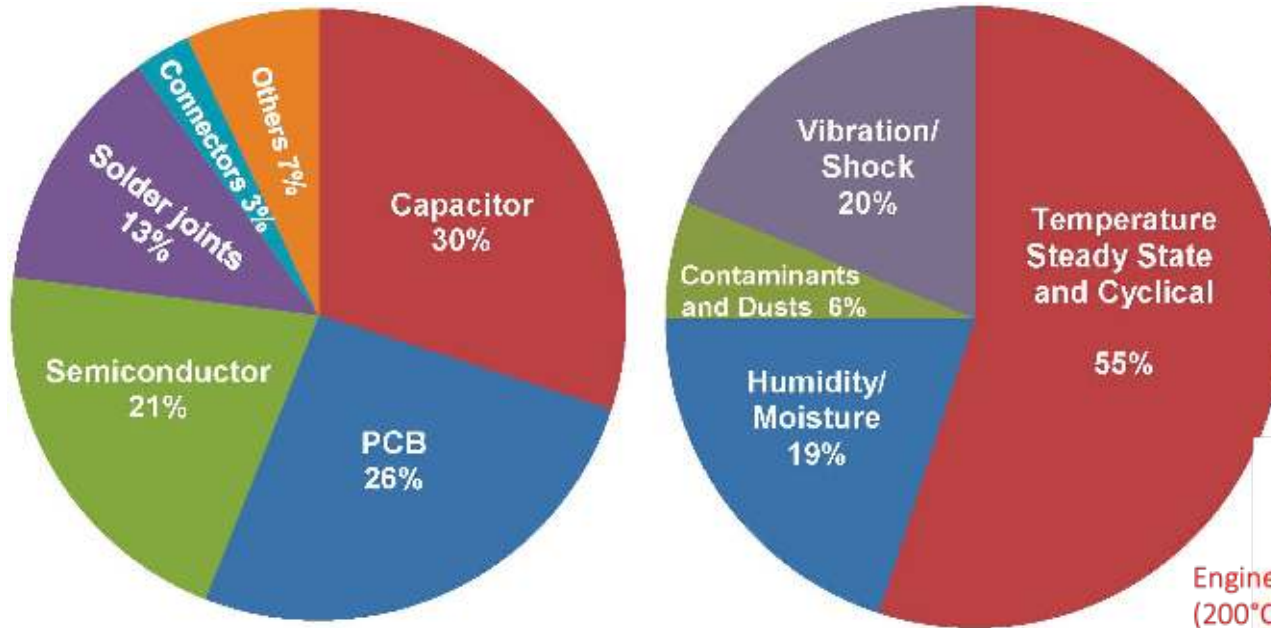


*Procédure d'analyse sur MOS-SiC
Localisation de défaut par OBIRCH*

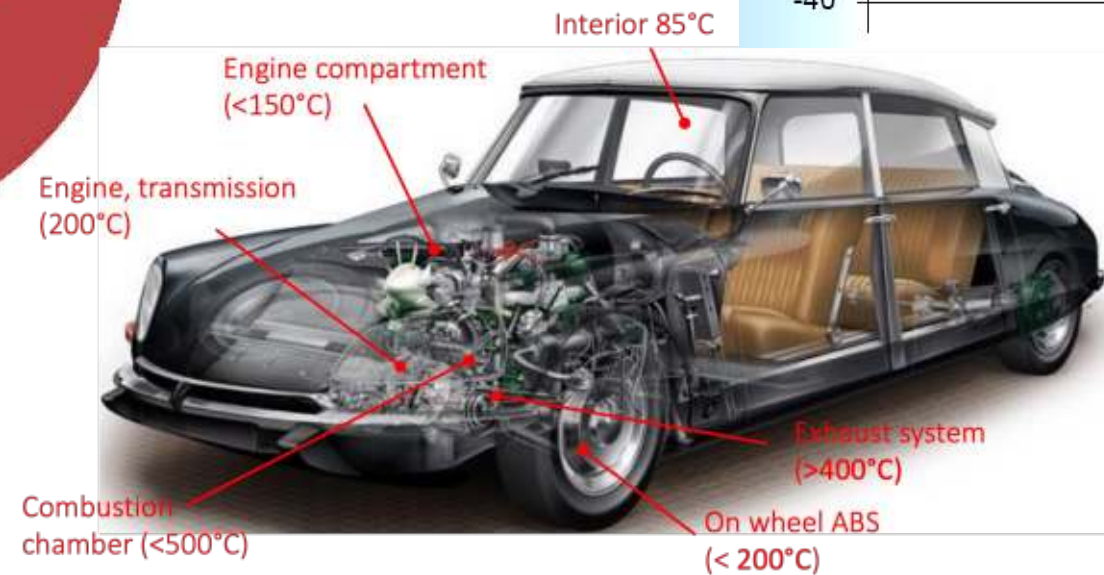
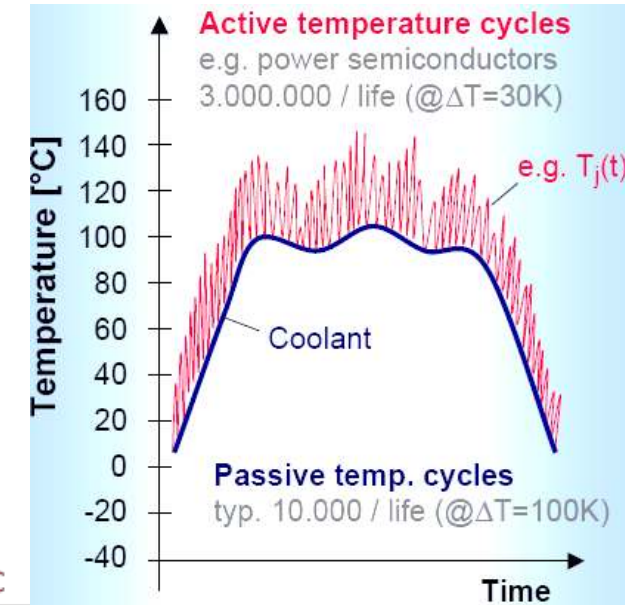


*Microscope à émission de photons:
Localisation des fuites de courants après
vieillessement HTRB sur MOS-SiC*

Types de stress et dégradations en EP



H. Wang, K. Ma, F. Blaabjerg, "Design for reliability of power electronic systems", [IECON 2012](#)



Passanger cabin	Engine compartment	Engine/transmission	Components on wheel
-40°C to 80°C	-40°C to 125°C	-40°C to 140°C	-40°C to 250°C

Types de stress et dégradations en EP

Type de stress	Surcharges	Vieillessement
Mécaniques	• Fracture fragile • Vibrations	• Fatigue thermomécanique • Fluage (viscoplasticité)
Electriques	• Claquage diélectrique • Second claquage • Décharges électrostatiques (ESD) • Surcharges électriques (EOS)	• Time Dependant Dielectric Breakdown (TDDB) • Electrons « chauds » • Electro-migration • Piégeage lent de charge (oxydes)
Thermiques	• Transition de phase • Transition vitreuse	• Thermo-migration
Radiations	• Claquage par ionisation	• Piégeage de charges (oxydes)
Chimiques		• Corrosion • Croissance de dendrites • Dépolymérisation • Croissance d'intermétalliques

Type de tests normalisés

No	Test	Test Conditions	Standard
01	High Temperature Reverse Bias IGBT 600/1200 V 1700 V	1000h, $V_{GE} = 0V$ $95\% V_{DSmax} / V_{CEmax}$, $T_c = 140^\circ C$ $T_c = 125^\circ C$	IEC 60747
02	High Temperature Gate Stress	1000h, $\pm V_{GSmax} / V_{GEmax}$, T_{vjmax}	IEC 60747
03	High Humidity High Temperature Reverse Bias	1000h, $85^\circ C$, 85% RH $V_{DS}/V_{CE} = 80\% V_{DSmax}/V_{CEmax}$, max. 80V, $V_{GE} = 0V$	IEC 60068 Part 2-67
04	High Temperature Storage	1000h, $T = + 125^\circ C$	IEC 60068 Part 2-2
05	Low Temperature Storage	1000h, $T = - 40^\circ C$	IEC 60 068 Part 2-1
06	Temperature Cycling	100 cycles $- 40^\circ C \quad + 125^\circ C$	IEC 60068 Part 2-14 Test Na
07	Power Cycling	20000 load cycles $\Delta T_j = 100K$	IEC 60749-34
08	Vibration	Sinusoidal Sweep, 5 g, x, y, z – axis, 2h/axis	IEC 60068 Part 2-6 Test Fc
09	Shock	Halfsinusoidal Pulse, 30 g, $\pm x, \pm y, \pm z$ direction, 3x/direction	IEC 60068 Part 2-27 Test Ea

Tests ciblés sur les puces (HTRB, HTGB et THB):

Tests de la compatibilité de la technologie de la puce avec le process d'assemblage

Tests d'intégrité mécanique (HTS, LTS, V et S):

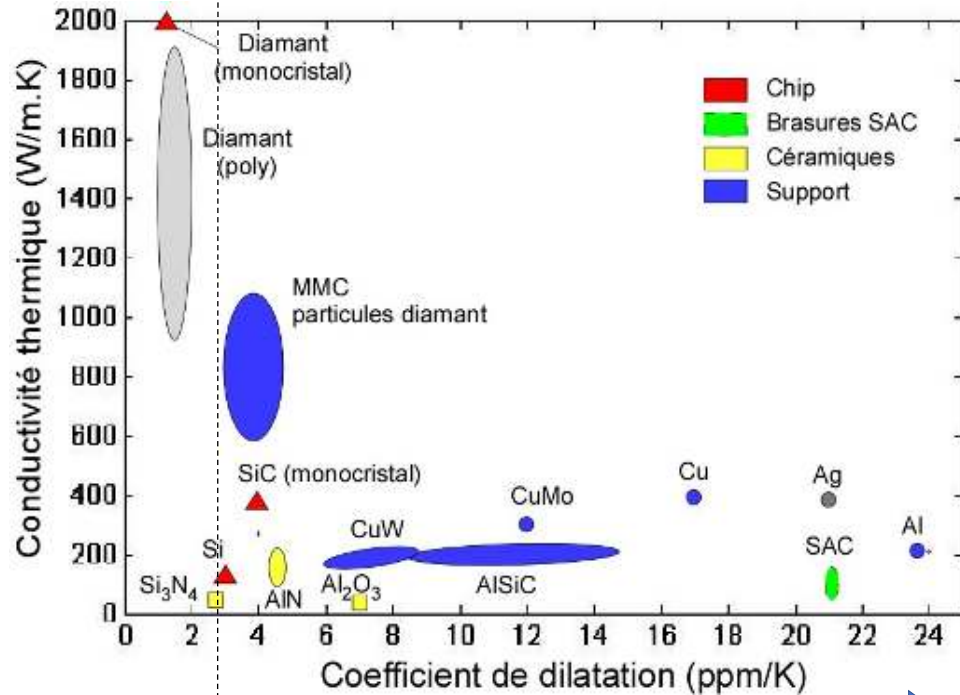
Tests de stabilité du package sous stress mécanique et thermique

Tests de durée de vie (TCT, PCT):

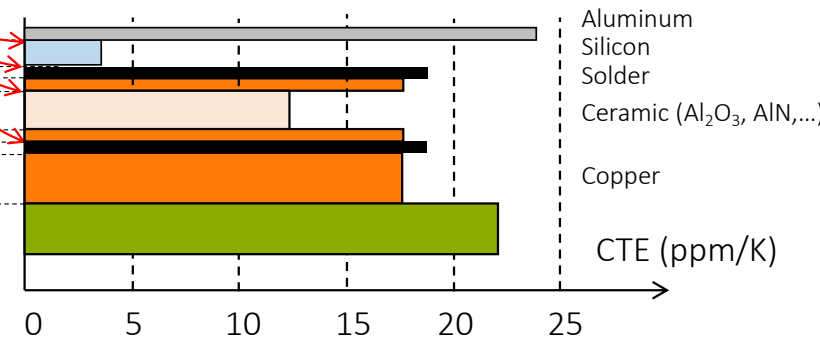
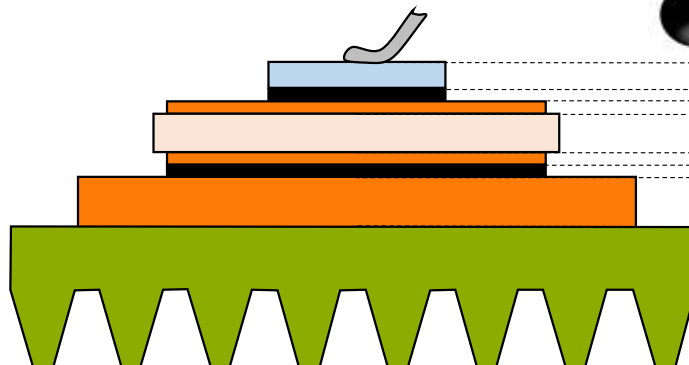
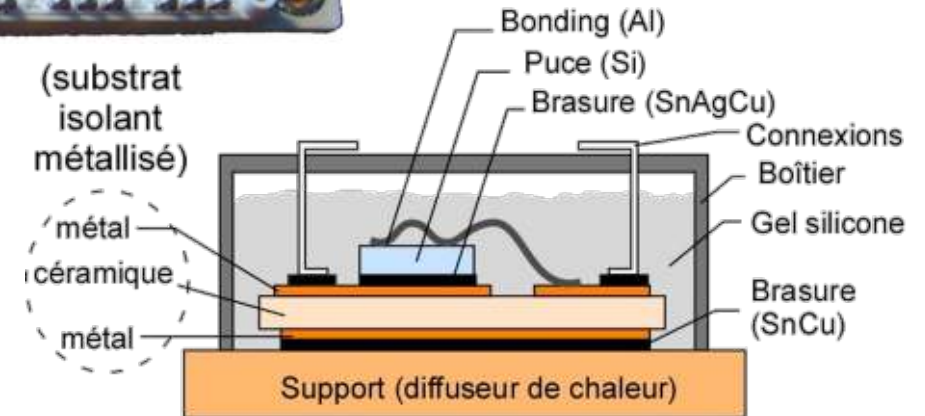
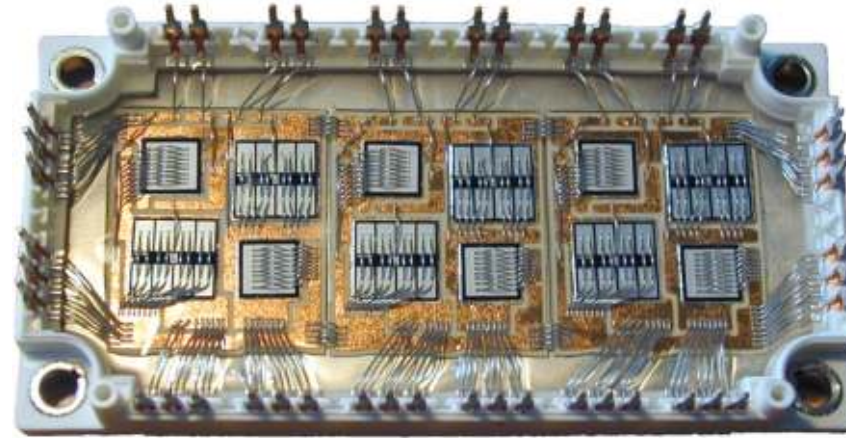
Tests de cyclages thermiques pour évaluer la durée de vie des dispositifs en application réelle.

Types de stress et dégradations en EP

Exemples de dégradations liées à la fatigue thermique

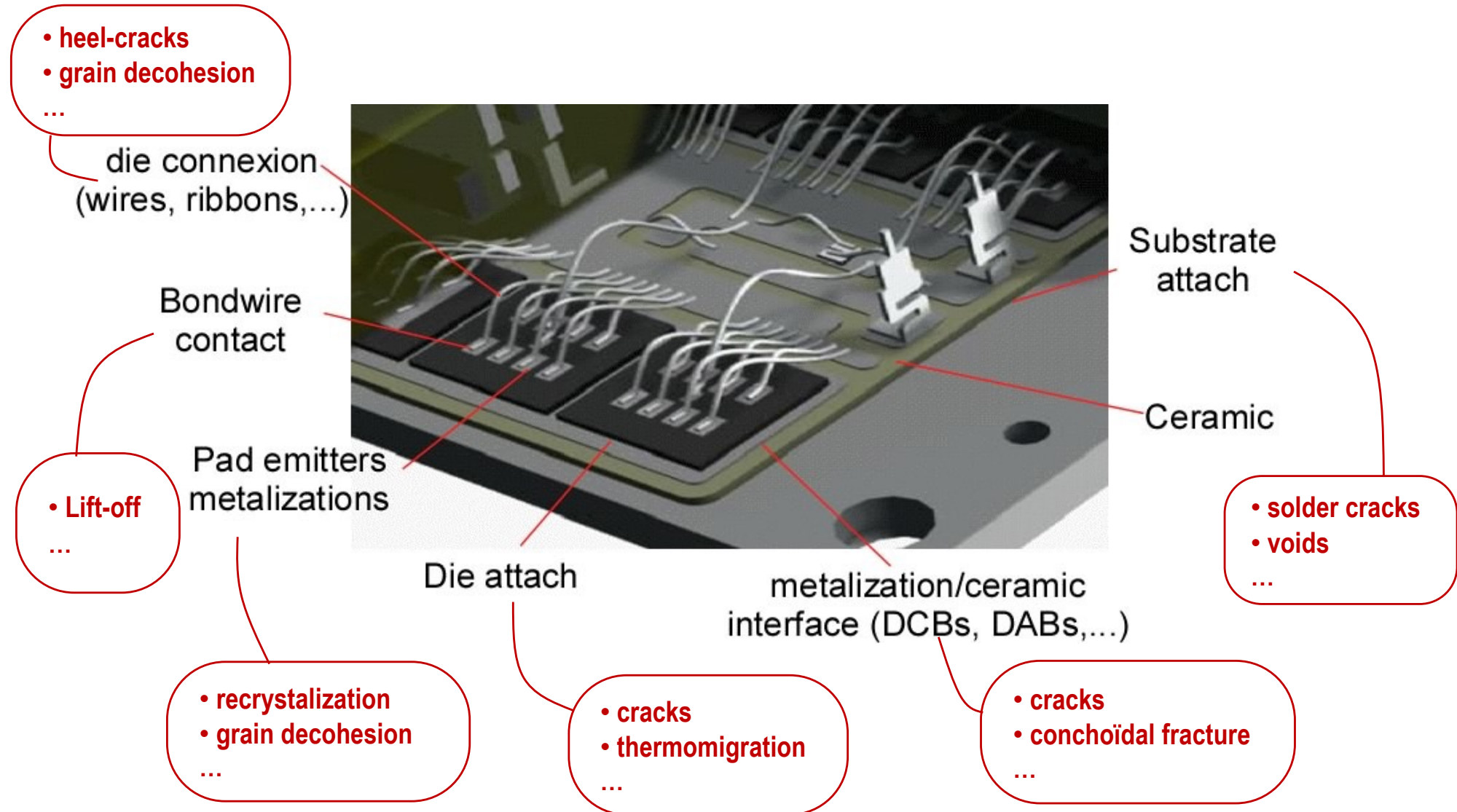


Pb. mécaniques



Types de stress et dégradations en EP

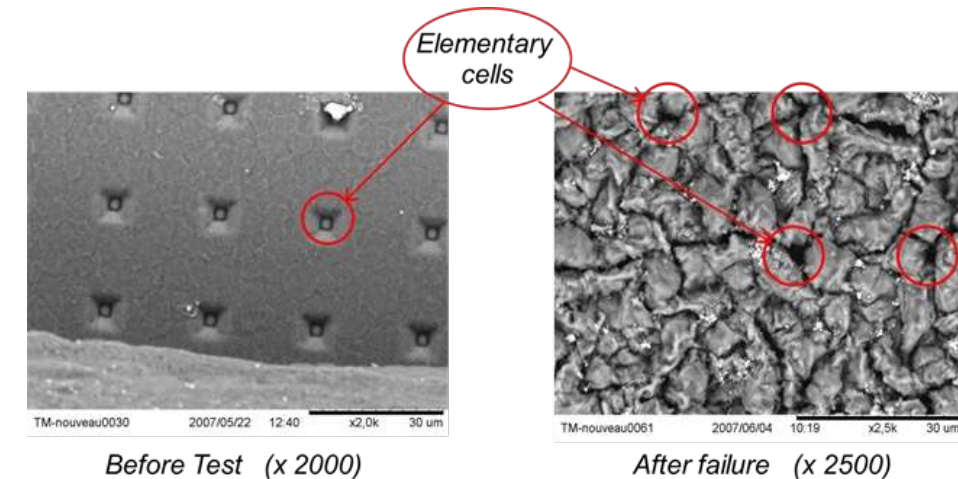
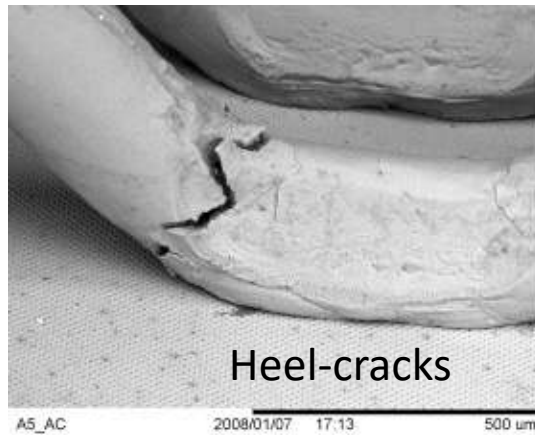
Exemples de dégradations liées à la fatigue thermique



Types de stress et dégradations en EP

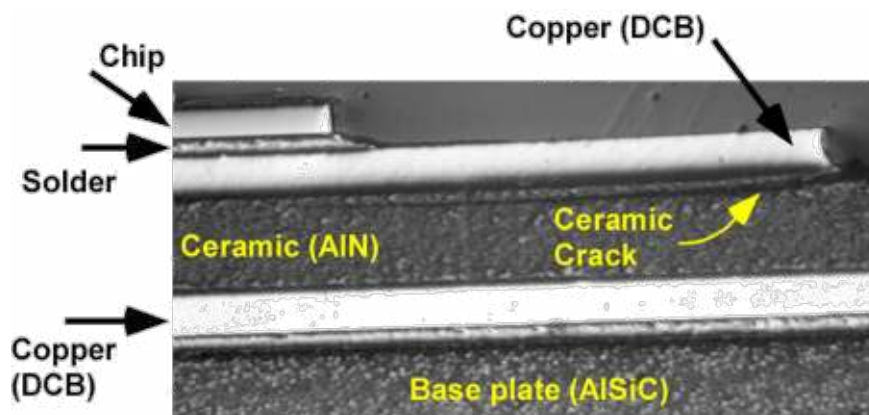
Exemples de dégradations liées à la fatigue thermique

Dégradations au niveau des fils d'interconnexions

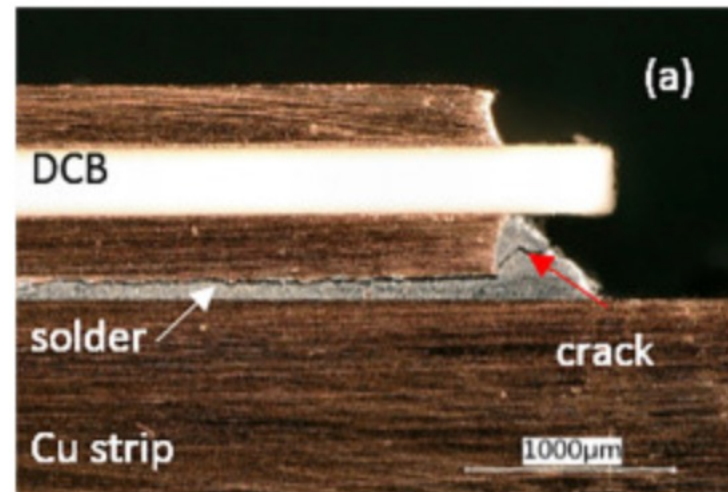


... du top-métal

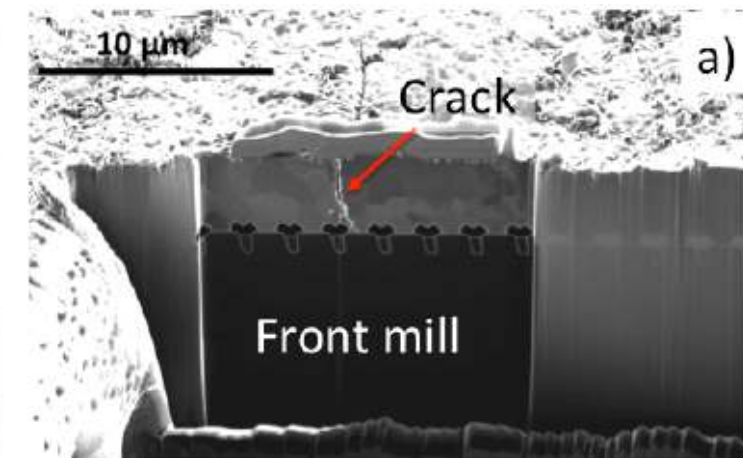
... au niveau des substrats isolants



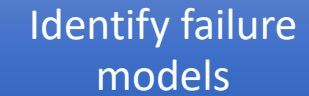
... de brasure



... de l'oxyde



Failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA)



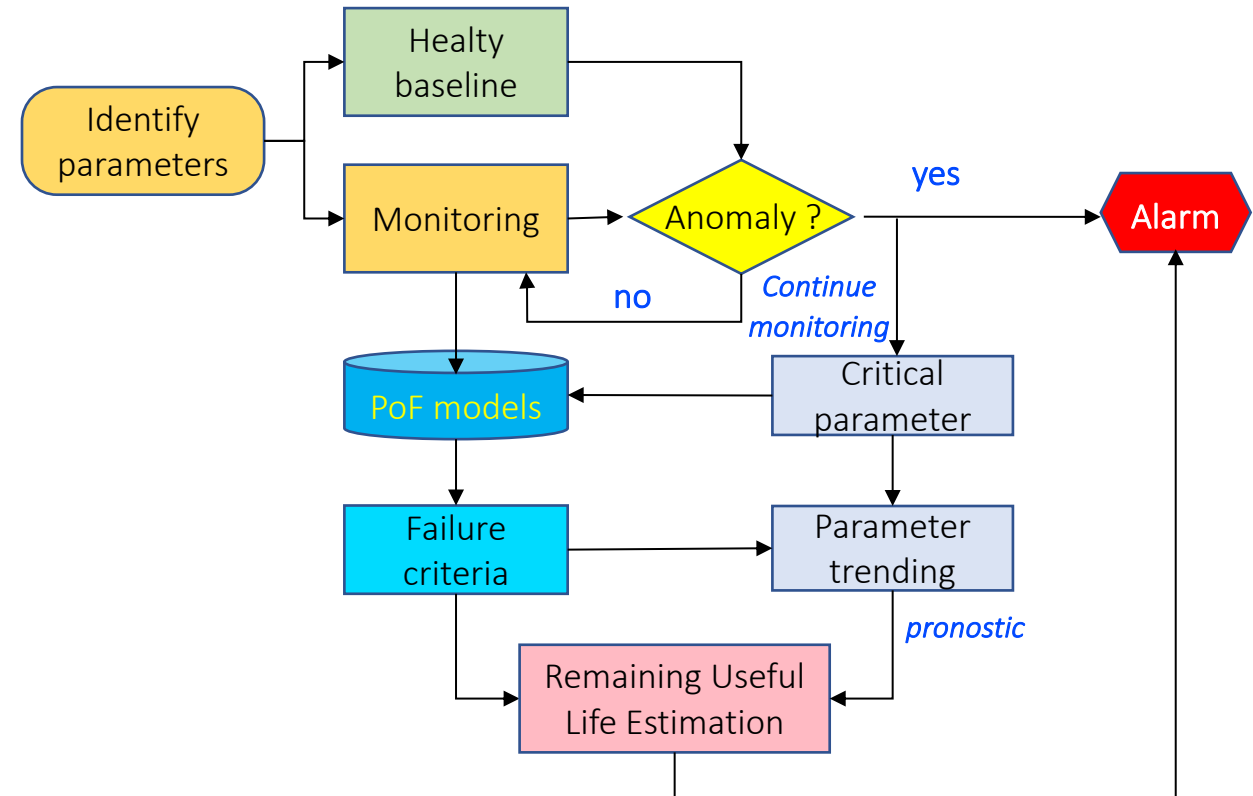
1. Identification de paramètres précurseurs (indicateurs de dégradations)
2. Modélisation du mécanisme de dégradation → Diagnostic de l'état de santé
3. Simulation de la poursuite du processus moyennant qlq hypothèses → pronostic de durée de vie restante

Aide au diagnostic & pronostic

Failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA)

Failure mechanisms	Precursor parameters
- Time dependent dielectric breakdown (TDDB) - hot electrons	- threshold voltage (V_{th}) - transconductance (g_m) - gate leakage current (I_{ge})
latch-up	- on-state voltage $V_{ce(on)}$ - collector leakage current (I_{ces})
- wire bond lift-off, heel-crack - die attach cracking or voiding	on-state voltage $V_{ce(on)}$
substrate solder layer	thermal resistance (R_{thjc}, R_{thja})

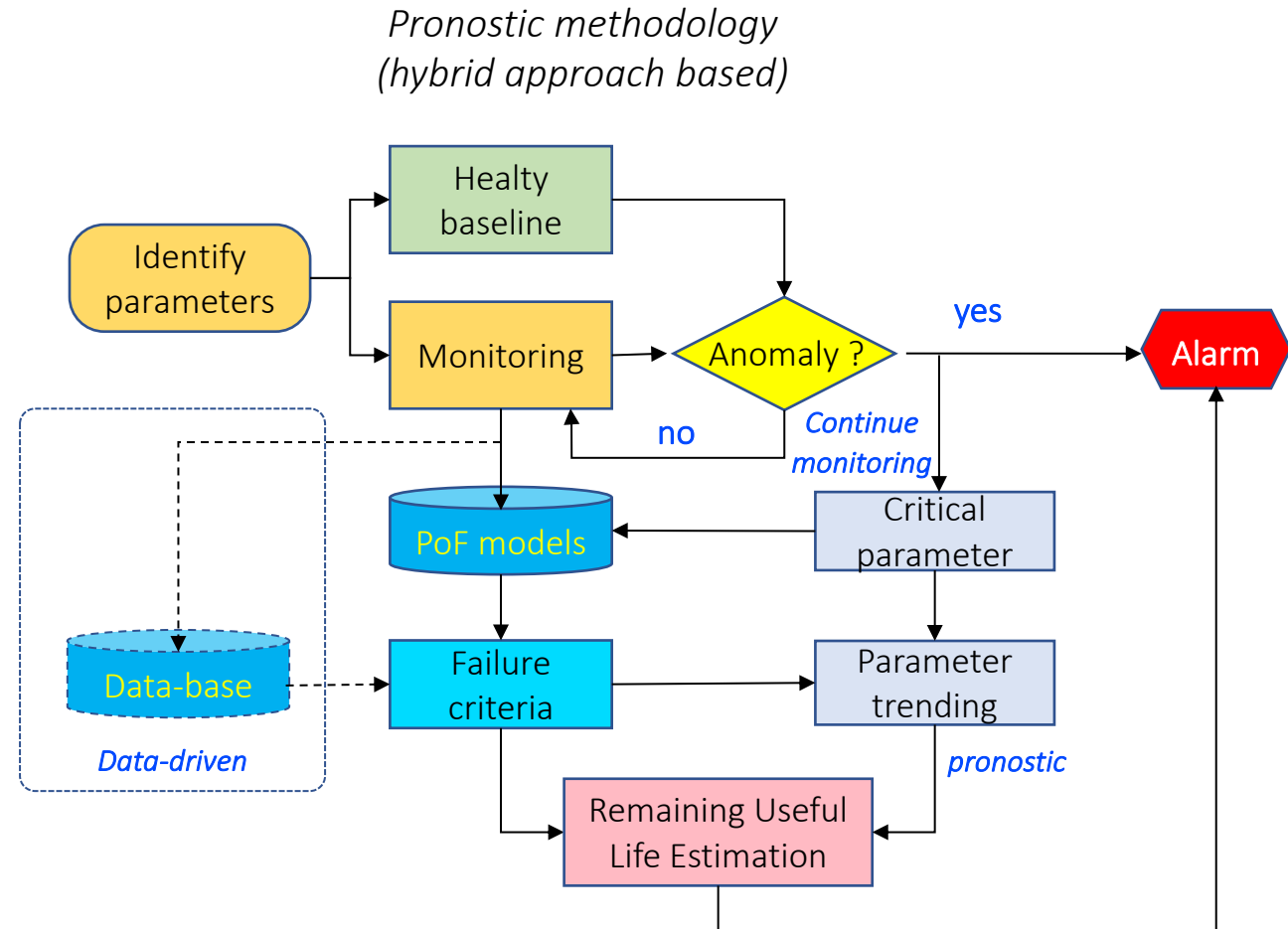
*Pronostic methodology
(Physics of failure model based)*



Aide au diagnostic & pronostic

Failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA)

Failure mechanisms	Precursor parameters
- Time dependent dielectric breakdown (TDDB) - hot electrons	- threshold voltage (V_{th}) - transconductance (g_m) - gate leakage current (I_{ge})
latch-up	- on-state voltage $V_{ce(on)}$ - collector leakage current (I_{ces})
- wire bond lift-off, heel-crack - die attach cracking or voiding	on-state voltage $V_{ce(on)}$
substrate solder layer	thermal resistance (R_{thjc}, R_{thja})



Références

Cathodoluminescence (CL)

- T. Coenen, N. M. Haege, Cathodoluminescence for the 21st Century: Learning More from Light, Applied Physics Reviews 4, 031103 (2017)
- B. SIEBER, "Cathodoluminescence - Principes physiques et systèmes de détection", Techniques de l'ingénieur, P3792 V1, 2012.

EBIC, SEEBIC

- W.A. Hubbard, M. Mecklenburg, H.L. Chan, B.C. Regan, "STEM Imaging with beaminduced hole and secondary electron currents", Phys. Rev. Appl. 10 (4) (2018) 044066,
- H.J. Leamy, Charge collection scanning electron microscopy, J. Appl. Phys. 53 (6) (1982) R51–R80
- O. Dick et al., "Contrast mechanisms in secondary electron e-beam induced current (SEEBIC) imaging, Microscopy and Microanalysis, 2022

Lock-in thermography

- Breitenstein, O. et al, "Lock-in thermography: basics and use for evaluating electronic devices and materials", 2nd ed. Springer- Verlag (Berlin, 2010).
- M. Vellvehi et al, "Failure Analysis in Power Devices using Lock-in Infrared Thermography ", Eurosime 2018
- M. Mousnier, "Apport de la thermographie infrarouge à l'analyse de défaillance de composants et systèmes électroniques", Thèse de doctorat de l'Univ. Toulouse 3, 2019

OBIC

- Hassan Hamad et al., "OBIC Technique Applied to Wide Bandgap Semiconductors from 100K up to 450K", Semic. Science and Tech., IOP Publi., 2017, 32 (5)
- T. Wilson et al., "Theory of optical beam induced current images of defects in semiconductors," J. Appl. Phys., vol. 61, no. 1, pp. 191–195, Jan. 1987

RCI

- C.A. Smith et al., "Resistive Contrast Imaging: A New SEM Mode for Failure Analysis", IEEE trans. On Electron devices, vol.33, n°2, 1986

Seebeck effect imaging (SEI)

- E.I. Cole Jr., P. Tangyonyong, et D.L. Barton, . Backside Localization of Open and Shorted IC Interconnections ., International Reliability Physics Symposium, IEEE, p.129-136, 1998.
- M. Guo, JL Li, "Seebeck Effect Imaging to Improve Short Defect Localization", International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2018

Scanning Acoustic Microscopy (SAM)

- F. Bertocci, "Scanning Acoustic Microscopy (SAM): A Robust Method for Defect Detection during the Manufacturing Process of Ultrasound Probes", sensors, 2019, 19, 4868

Thermal induced effects (TIVA)

- F. Beaudoin, R. Desplats, P. Perdu, C. Boit, "Principles of Thermal Laser Stimulation Techniques", Microelectronics Failure Analysis, Materials Park, Ohio, 2004