

Quelles technologies pour améliorer le cycle de vie des composants et des systèmes d'électronique de puissance dans les applications industrielles ?

Nicolas DEGRENNE, Vincent QUEMENER,

Merouane OUHAB, Pierre-Yves PICHON,

n.Degrenne@fr.mercede.mee.com

2023/07/07

MITSUBISHI ELECTRIC R&D CENTRE EUROPE

MFR2023-ARC-0330 – MFR2023-ECD-0237



Mitsubishi Electric (1921, 145000 employés)

- Exemples de domaines relatifs à l'électronique de puissance:

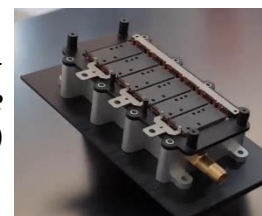
Systèmes de chauffage et climatisation	Automatismes Industriels	Equipements pour l'Automobile	Systèmes pour le Bâtiment	Traction ferroviaire	Semi-conducteurs
					

- Exemple de prototypes, produits et investissements récents:



Moteur synchrone à reluctance variable
MELSUSMO et onduleur pour le marché
Japonais (05/2023)

Future génération de modules semi-conducteurs pour la traction automobile (présenté à PCIM 05/2023)

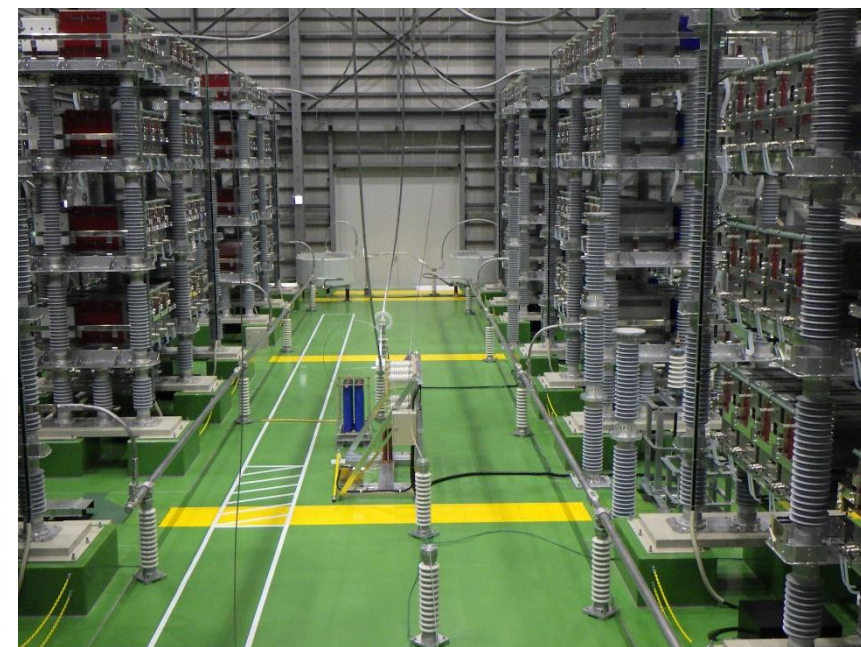


Power Semiconductor Devices

Establish a new SiC³ 8-inch wafer factory in Shisui district in Kumamoto
Double⁴ the previous investment plan to approximately ¥260 billion from FY2022 to FY2026



New factory in Shisui district (illustration)

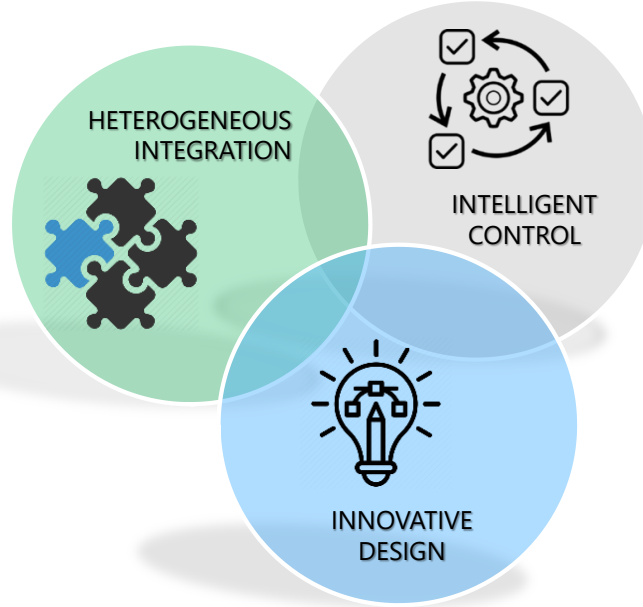


HVDC diamond

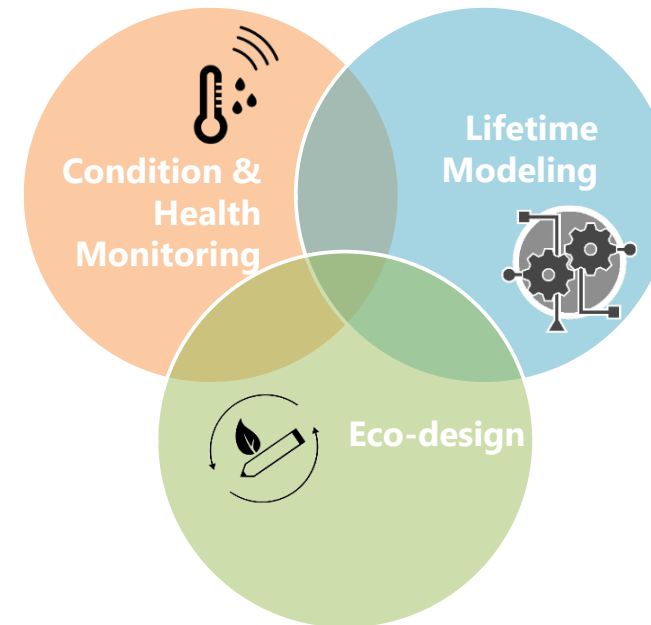
- Centre de recherche industrielle: recherche qualitative et contribution à Mitsubishi Electric via les Laboratoires Japonais
- Fortes collaborations avec des centres de recherche académiques Européens
- Deux domaines d'expertise:
 1. Systèmes de télécommunication et de l'Information, depuis 1995
 2. **Systèmes d'électronique de puissance, depuis 2010**

Design & Integration Technologies (DIT)

Heterogeneous integration technologies, **Innovative Design** methods and **Intelligent Control** features for reliable, efficient and cost-effective power electronics from the device to a system level.



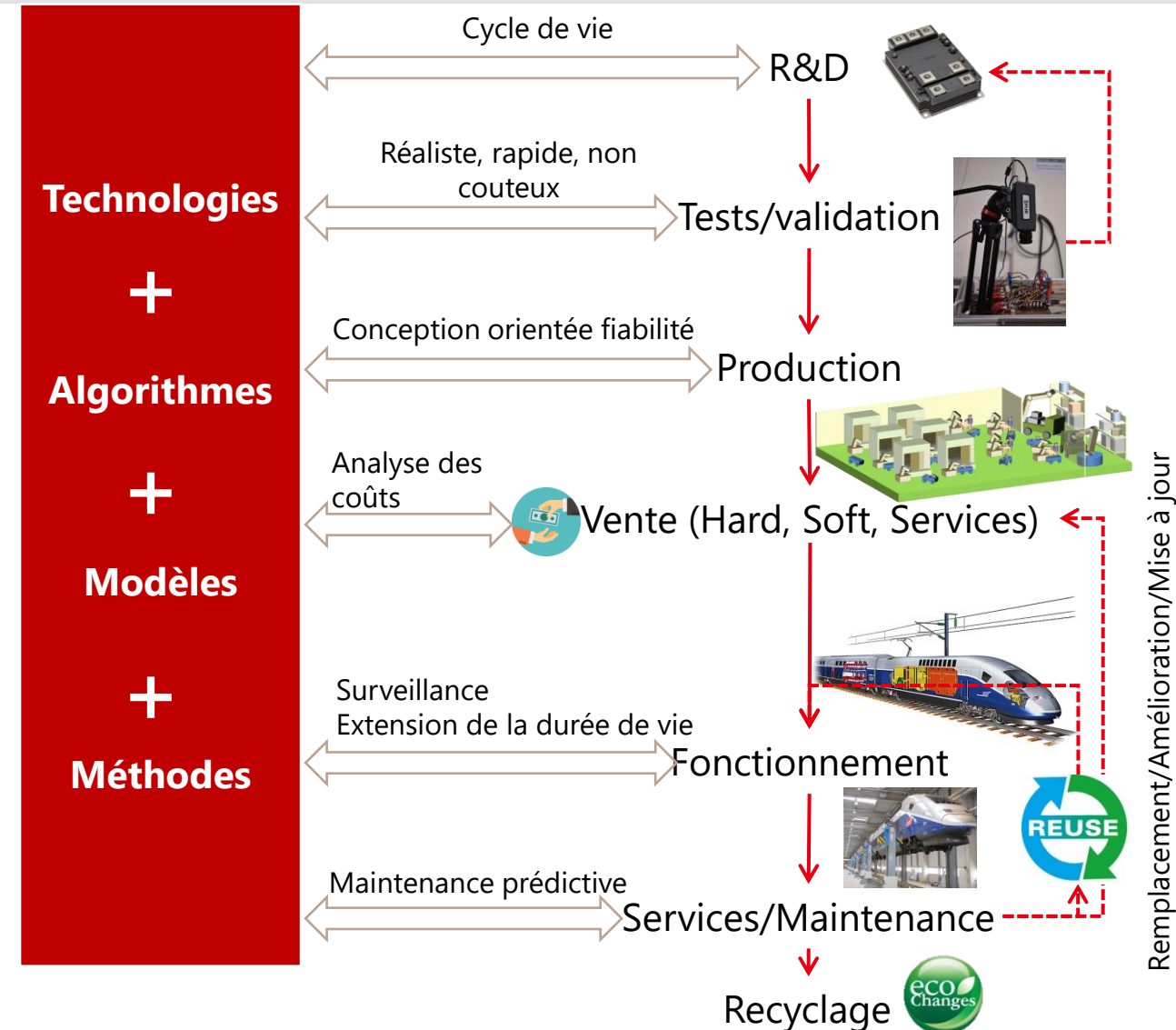
Health Management Technologies (HMT)



Sensors, Systems, Models and Methods for the enhancement of the life-cycle of **power modules** (70%), converters (20%) and motors (10%) through **Safety, Availability, Reliability, Life-cycle Impact**.

- Contexte applicatif:
 - Développement 'accéléré' d'applications 'outdoor' (ex: éolien et PV) aux modes de défaillance nouveaux (dont précoces) et corrélés au climat (ex: humidité)
 - Introduction 'accéléré' de nouvelles technologies de puce (ex: SiC) et de packaging (ex: DLB) plus performantes mais différentes du point de vue de la fiabilité
- Contexte économique:
 - Différentiation des produits $\neq$ prix
 - « Solution business » devient stratégique dans un contexte d'économie circulaire

« Quelles technologies pour améliorer le cycle de vie des composants et des systèmes d'électronique de puissance dans les applications industrielles ? »

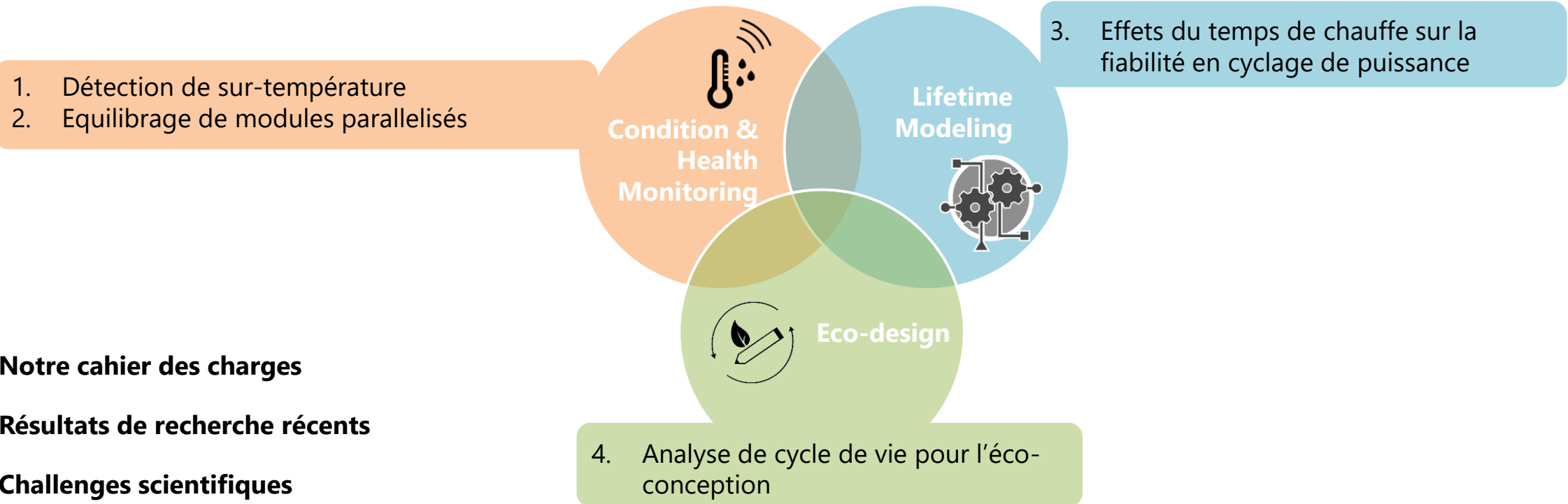


Amélioration du cycle de vie en électronique de puissance de part les technologies de gestion de la santé

[HMT research targets]

Sensors, Systems, Models and Methods for the enhancement of the life-cycle of power modules (70%), converters (20%) and motors (10%) through Availability, Safety, Reliability, Life-cycle Impact.

3 familles de technologie, 4 technologies présentées aujourd'hui à SGE



A. Notre cahier des charges

B. Résultats de recherche récents

C. Challenges scientifiques

Mesure de l'état (de santé)

Exemple de l'estimation de température de puce

« Applicable dans les systèmes d'électronique de puissance »

1. 'On-line'
 - Compatible avec le fonctionnement opérationnel du composant dans son application
→ Commutation, tension et courants indéfinis
2. Calibrable
 - Données mesurables automatiquement avec des équipements et procédures existantes, ou séquence d'auto-calibration spécifique 'in-situ'
3. Robuste et fiable
 - Atteint les spécifications d'erreur et de bruit dans une large plage de conditions opérationnelles
 - Taux de défaillance et de dérive 'faibles'
4. Simple et bas coûts
 - De l'ordre de quelques % du coût des modules de puissance
5. Applicable largement
 - A des convertisseurs existants → non intrusif
 - A des modules existants, provenant de plusieurs constructeurs

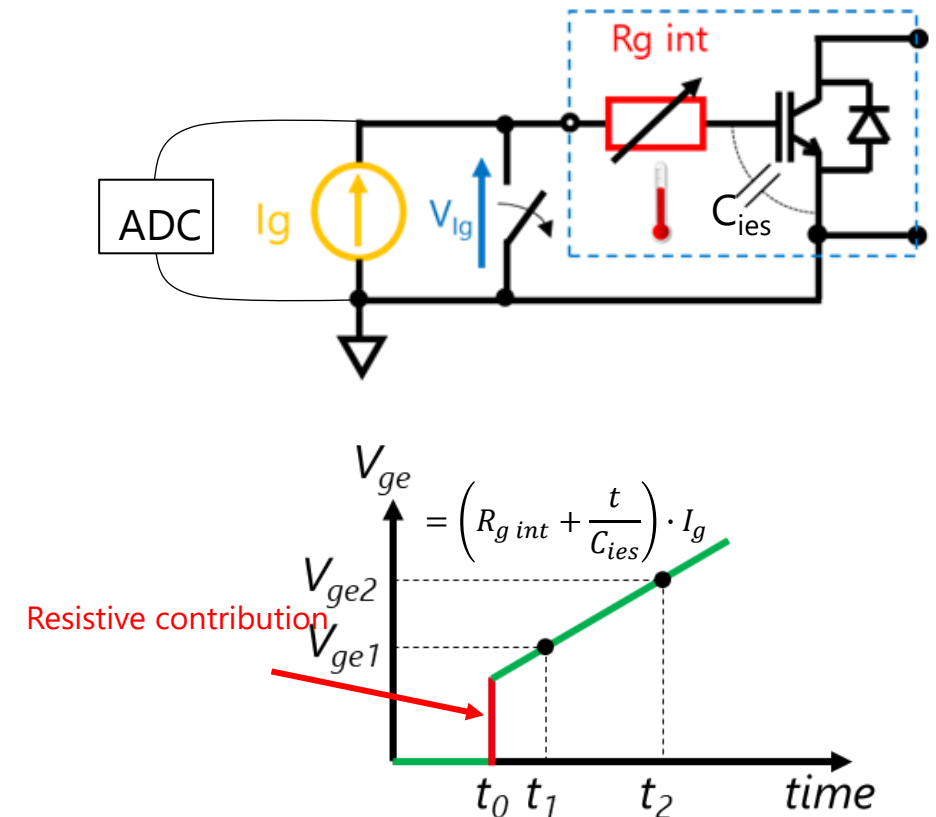
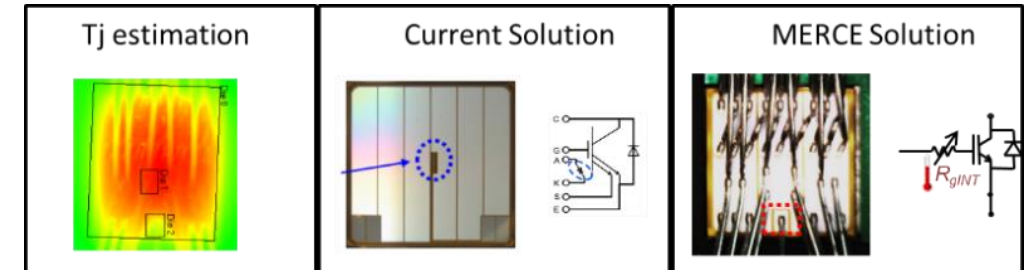
PETS: Rgint

- Résistance de grille interne Rgint présente localement sur la plupart des puces IGBT et SiC MOSFET.
- Résistance thermosensible avec une sensibilité de l'ordre de 0,1%/° C.

Evaluation par injection de courant

- Injection d'un courant de mesure DC à l'état bloqué et/ou passant
- Réponse en tension thermosensible utilisée avec:
 - Comparateur
 - Convertisseur analogique/numérique

[Brandelero, J., Ewanchuk, J., & Mollov, S. (2018, March). On-line virtual junction temperature measurement via DC gate current injection. In CIPS 2018; 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (pp. 1-7). VDE.]



Objectif

- Protection des semi-conducteurs dans des convertisseurs avec un rapport de coût exigeant (par exemple automobile)

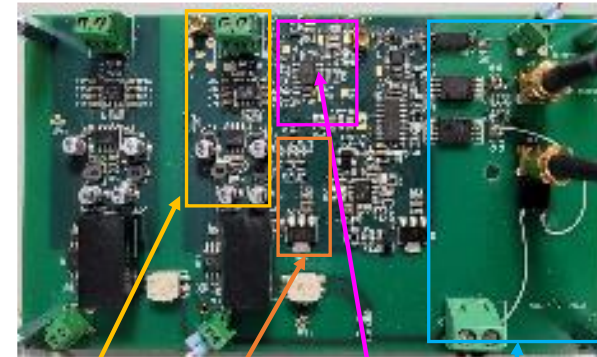
Principe de fonctionnement

- Comparaison de la réponse en tension avec une réponse en tension correspondant à la température maximum.

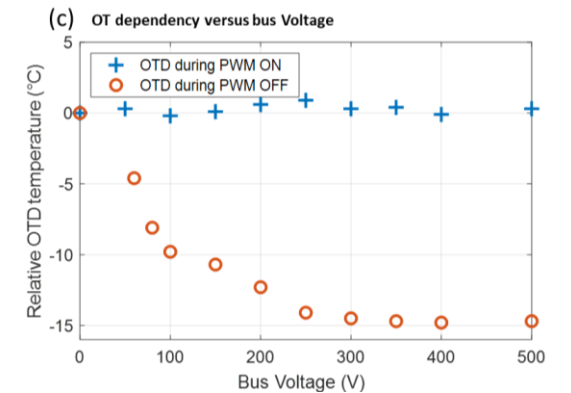
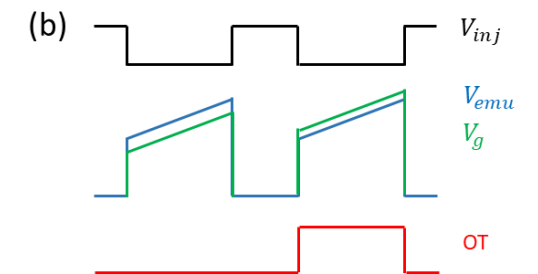
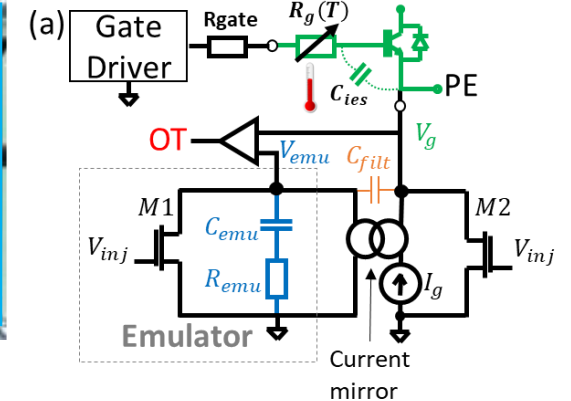
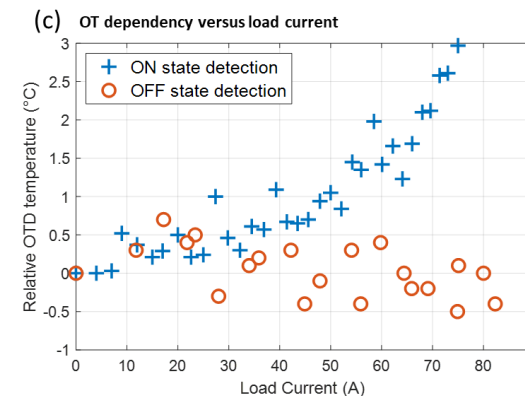
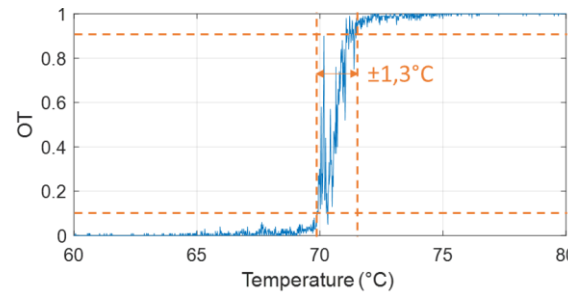
Résultats

- Bruit de détection mesurée en conditions on-line de l'ordre de $\pm 2^\circ \text{C}$ pour un composant bas
- Mesure à l'état passant: sensibilité au courant
- Mesure à l'état bloqué: sensibilité à la tension pour des faibles tensions.

[Kawahara, C., Izuo, S. I., Brandelero, J., & Degrenne, N. (2022, March). Development of an over temperature detection method via internal and emulated gate resistance. In CIPS 2022; 12th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (pp. 1-6). VDE.]
[Quemener, V., Degrenne, N., Kawahara, C., Izuo, S. (2023, May). Design of a low-cost over-temperature detector using the internal gate resistance an TSEP. PCIM 2023.]



Gate driver Current source Emulator Isolated input/output



Objectif

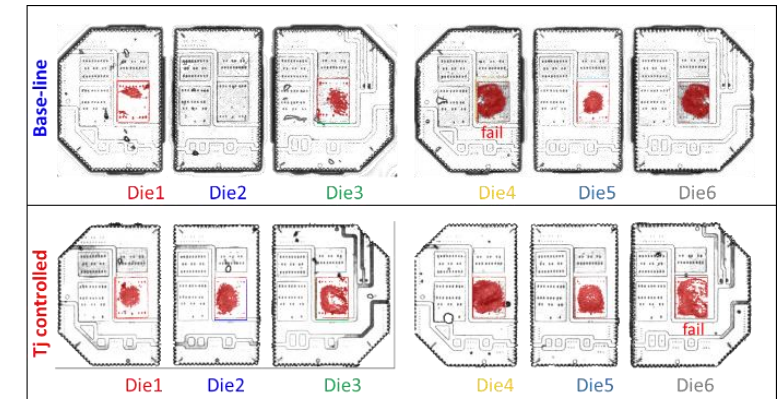
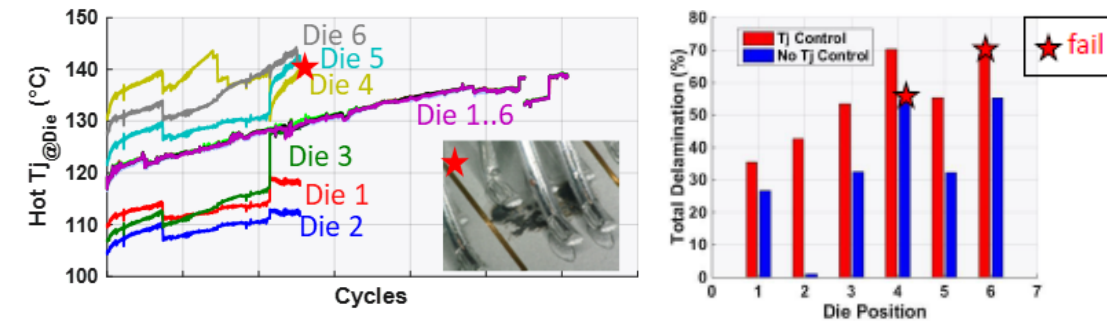
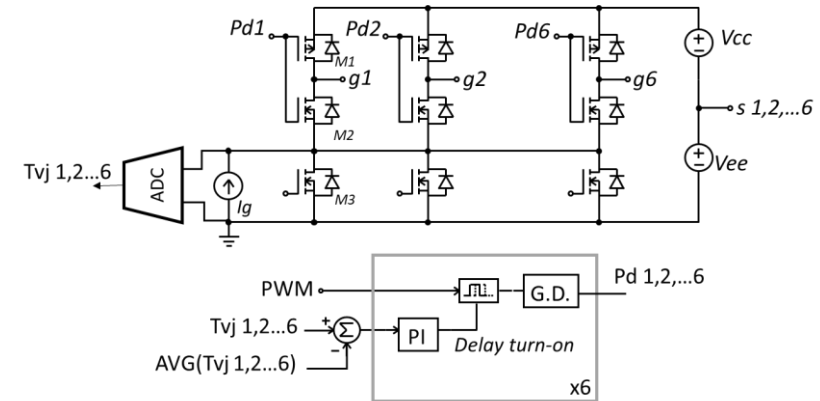
- Extension de durée de vie de modules parallélisés dans des applications de fort courant et une fiabilité exigeante (par exemple ferroviaire).

Principe de fonctionnement

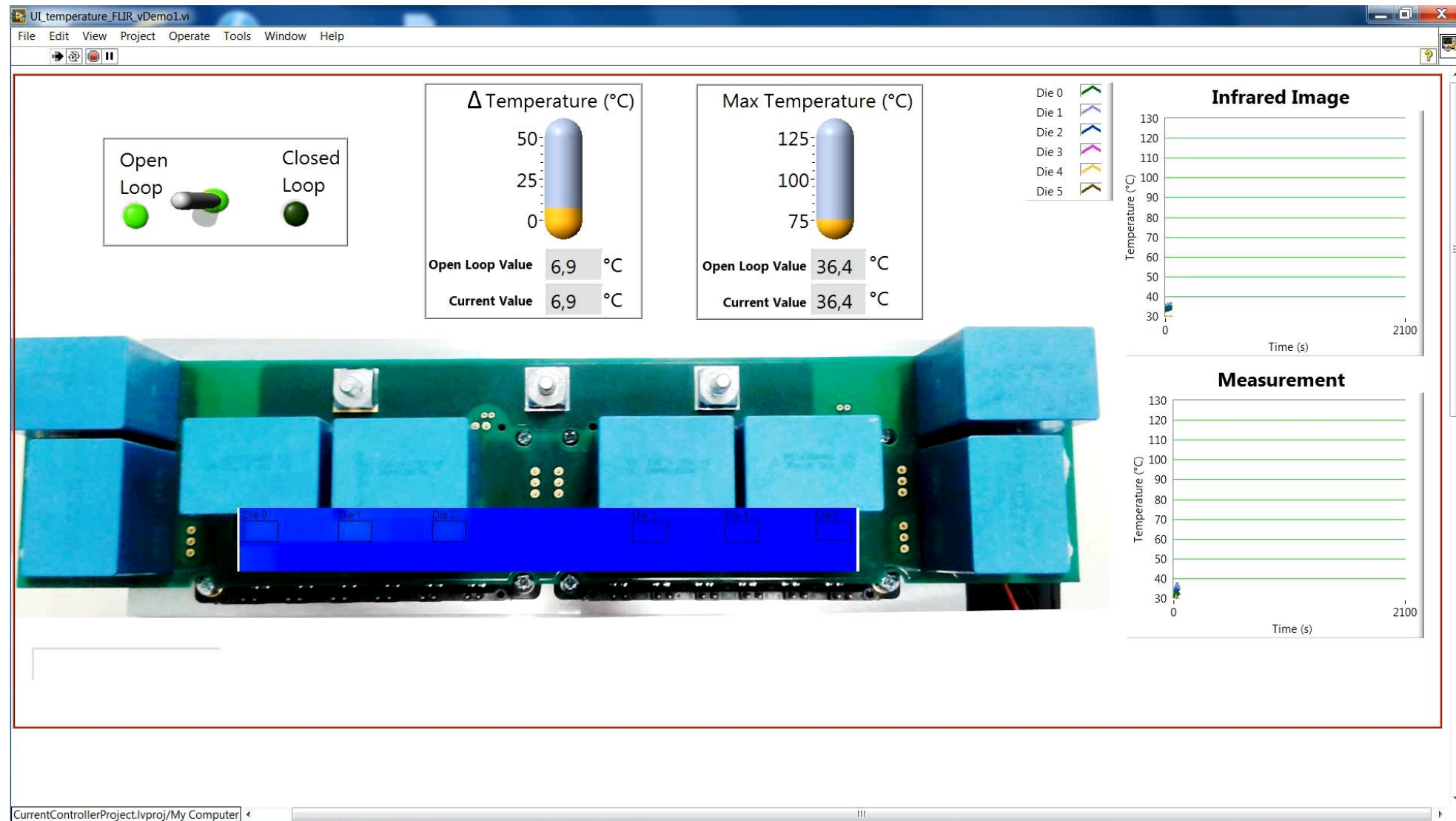
- La température est mesurée à tour de rôle sur chaque module (conversion analogique/digitale).
- Les ordres de commande à l'allumage des modules les plus chauds sont décalés pour réduire leurs pertes.

Résultats

- Preuve de concept fonctionnelle à l'échelle de la parallélisation de 6 puces sous asymétrie thermique
- Extension de durée de vie étendue de +140% lors d'un test adressant principalement la délamination des brasures



Equilibrage: démonstration



'Health monitoring'

- Utilisation de la mesure de température pour détecter la dégradation des interconnexions électriques et/ou thermiques
- Mesure direct de dégradation, ou compensation de la sensibilité à la température d'un paramètre sensible à la dégradation

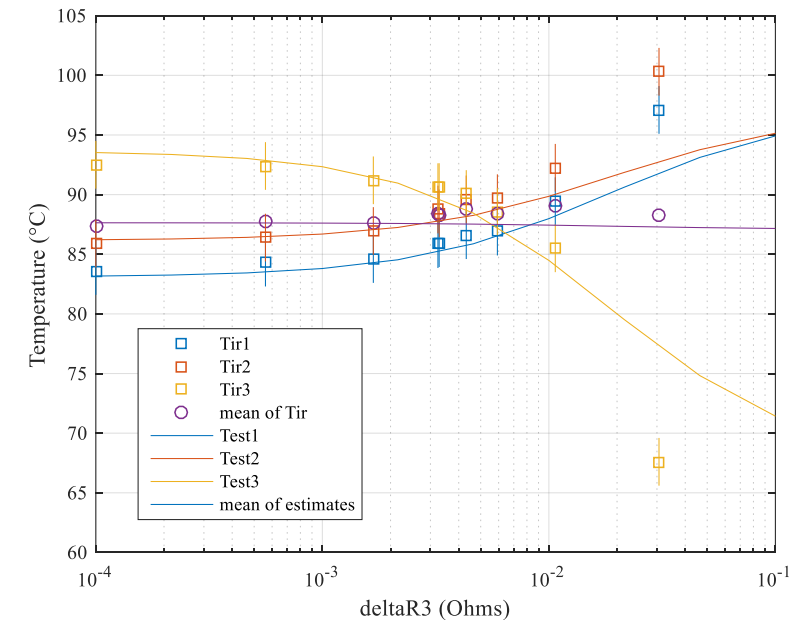
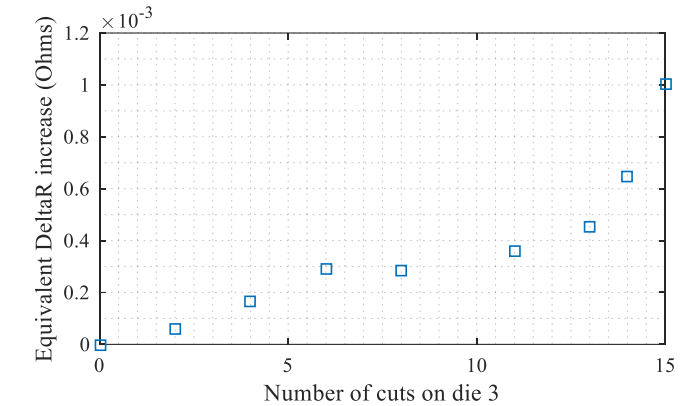


**Hybridation pour la prédiction
de durée de vie restante**

Estimation de la dégradation avec des modèles de fiabilité

- Application de modèles empiriques ou physiques de durée de vie pour estimer la dégradation des composants

[Degrenne, N., Delamea, R., & Mollov, S. (2020). Electro-thermal modelling and T_j estimation of wire-bonded IGBT power module with multi-chip switches subject to wire-bond lift-off. AIMS Electronics and Electrical Engineering, 4(2), 154-168.]
[Nazar, M. (2023). Prédiction en ligne de la durée de vie restante des modules semi-conducteurs IGBTs. thèse de l'université Paris Saclay]



*Effet de la dégradation de l'interconnexion
électrique d'une puce en parallèle avec deux
autres puces*

1. Estimation de l'erreur et du bruit des méthodes sur des composants encapsulés en fonctionnement opérationnel (problème de référence de température)
2. Identification des températures maximum et moyennes à partir d'une mesure locale, y compris en cas d'apparition de dégradations
3. Application aux composants SiC qui disposent de R_{gint} plus faibles, et dont les capacités d'entrée sont instables et peuvent varier fortement avec la tension et le courant
4. Lien entre température et dégradation en cas de modes de défaillance multiples, par exemple interconnexions électriques et thermiques
5. Validité des modèles de fiabilités obtenus en test normalisés et accélérés à la vie réelle d'un composant de puissance...

Modélisation de la durée de vie

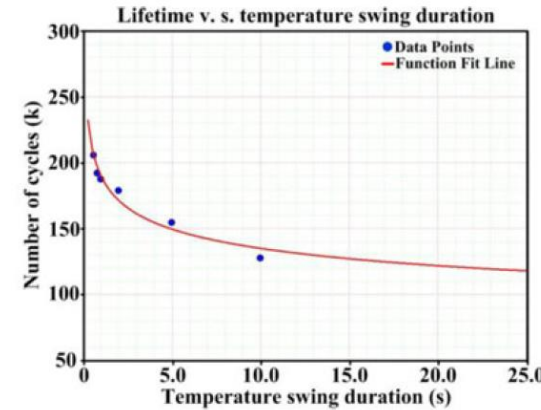
Exemple du cyclage en puissance des modules semi-
conducteurs

« Models à forte valeur ajoutée »

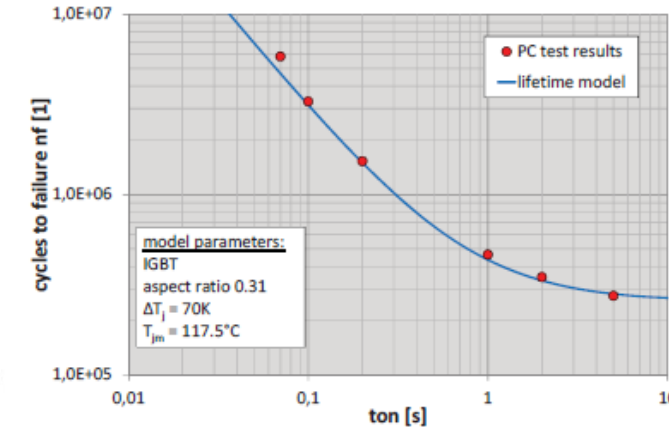
1. Généricité: adaptable aux différentes géométries et matériaux avec un minimum de nouveau test
 - Fils de bonding: diamètre et matériaux (alliages d'aluminium, cuivre)
 - Matériaux de la puce: Si ou SiC
 - Matériaux d'encapsulation (gel, résine)
2. Extrapolabilité: à des conditions de test difficilement testables
3. Compréhensibilité: pour expliquer et d'augmenter la confiance dans les résultats
4. Complétude: intègre les propriétés des matériaux nécessaires pour expliquer les résultats de cyclage complexes
 - Propriétés matériaux: élastique, plastique et visqueuses
 - Dépendances à la température
 - Etat de stress nul
5. Rapidité
 - Capable d'atteindre les cycles limite et de simuler des profils complexes de plusieurs minutes ou heures

Heating-time effect on IGBT power module lifetime

- Need to avoid wear-out failures
 - need to predict lifetime with accuracy
 - Variable operating conditions : current, frequency, ambient temperature ... etc.
 - Mission profiles with temperature cycles of various durations

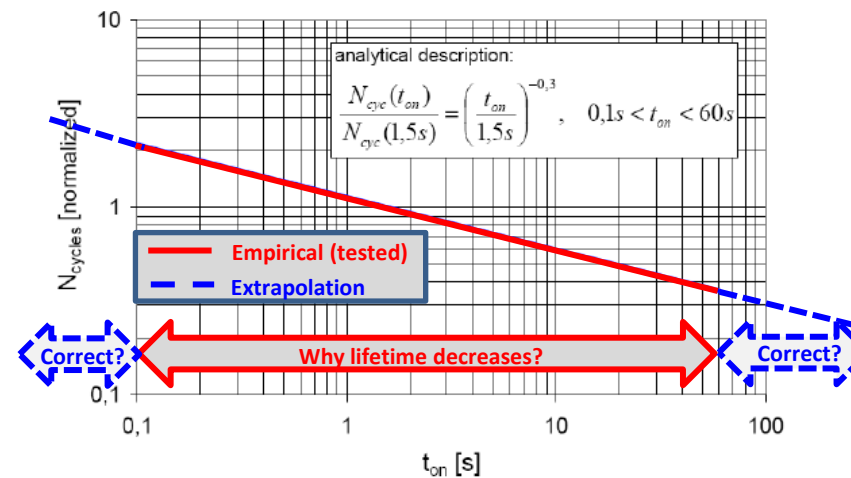


[U. Choi et al. 2017]

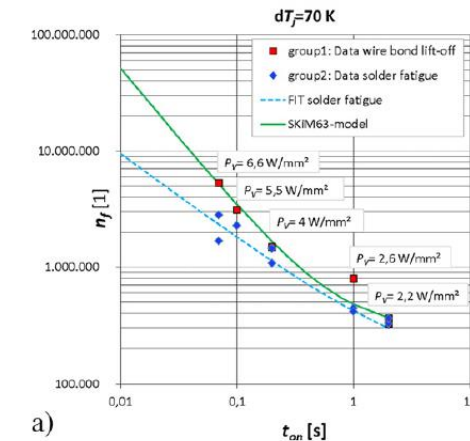


[U. Scheuermann et al. 2014]

- Most of the proposed models are empirical :
 - Lack of physical explanation
 - Limited extrapolation insight



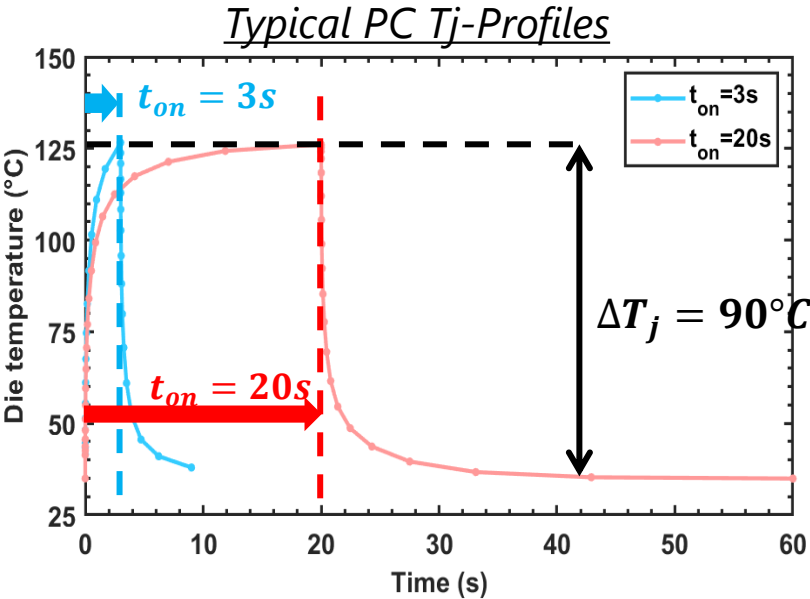
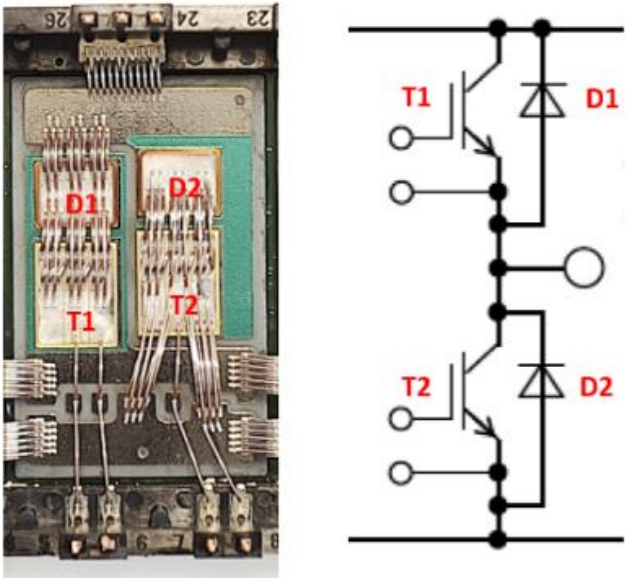
[Infineon AN2019-05]



[U. Scheuermann et al. 2013]

- ❑ The studied module has a standard structure
 - 400um aluminum wire bonds as top interconnection
 - 5um metallization layer
 - Silicon dies (IGBTs & diodes)
 - Sn-Ag-based die and DCB solders
 - Direct Bond Copper (DBC) substrate made of Aluminum Nitride (AlN)
 - Copper baseplate
- ❑ Four DC power cycling tests performed at four different heating times
- ❑ Gate voltage was adjusted to achieve the same ΔT_j and the same current

One Phase of the Tested Power Module (1.2kV-150A)

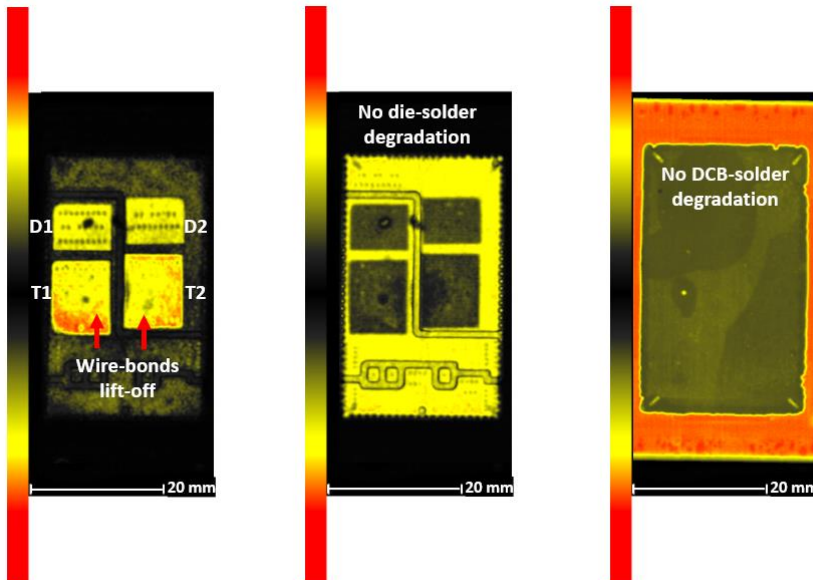


PCT Conditions

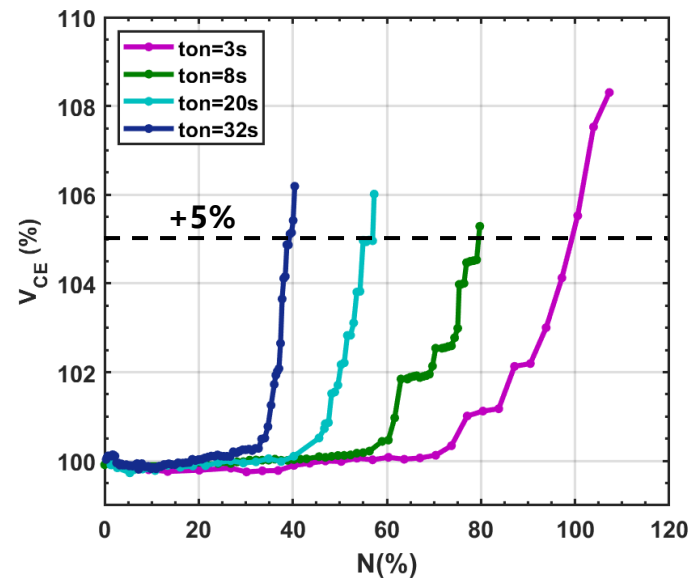
Test n°	ΔT_j [°C]	T_{jmin} [°C]	t_{on} [s]	I [A]
1	90	35	3	120
2	90	35	8	120
3	90	35	20	120
4	90	35	32	120

- ❑ SAM images did not show any die or DBC solders fatigue, however, they revealed several wire bonds lift-off
 - The same observations for all the conducted tests
- ❑ Evolution of on-state voltage confirmed wire bond lift-off as illustrated in the figure below
 - +5% in V_{ce} was set as a threshold value to calculate the lifetime
- ❑ The lifetime decreases as the cycle time increases
 - A power law expression provides a good fit to the data within the tested range 3s-32s
- ❑ Creep (or stress relaxation phenomena) in the Aluminum material is pointed out as the responsible behind this lifetime decrease

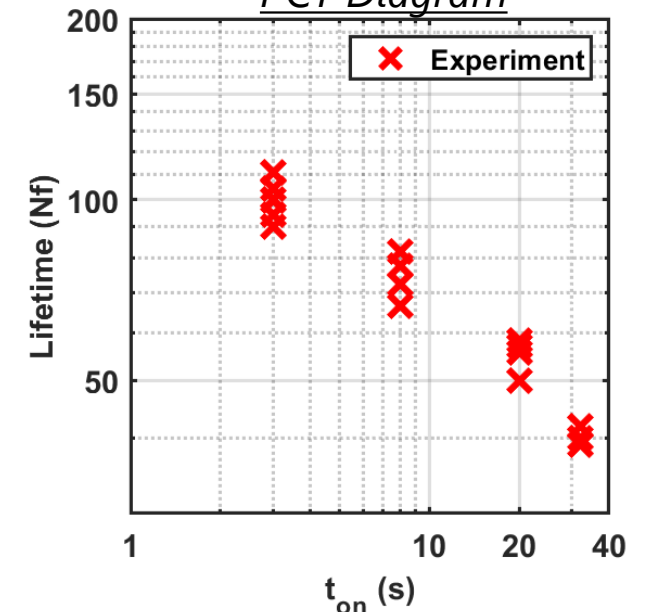
Scanning Acoustic Microscopy (1 DUT)



On-state Voltage Curves



PCT Diagram



❑ A nonlinear fracture mechanics approach is used to model lifetime dependency on the cycle time

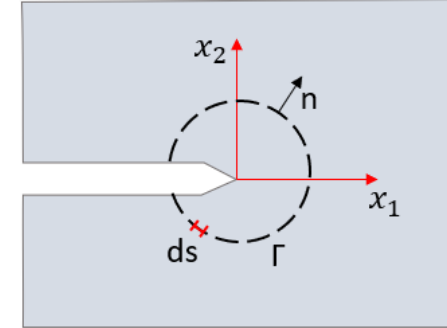
❑ Creep J integral (J^*) is used as a crack-tip characterizing parameter, where : $J^* = \int_{\Gamma} \left(W^* dx_2 - T_i * \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) * ds \right)$

❑ The proposed model is based on a modified Paris law with : $\frac{da}{dt} = \alpha (J^*)^\beta$

❑ The cycle crack growth can be approximated as follow : $\frac{da}{dN}(ton) \approx \int_0^{ton} \frac{da}{dt} dt = \alpha \int_0^{ton} (J^*)^\beta dt$

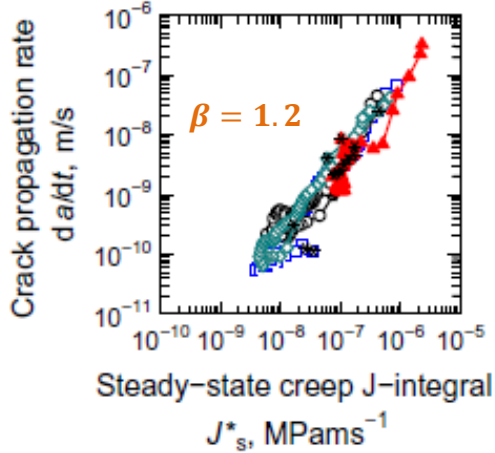
❑ Cyclic J^* is noted by : $\Delta J^*(ton) = \int_0^{ton} (J^*)^\beta dt$

Crack-Tip Zone



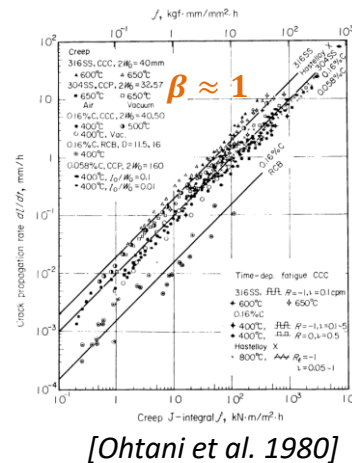
Creep Crack Growth Tests

$\beta > 1$



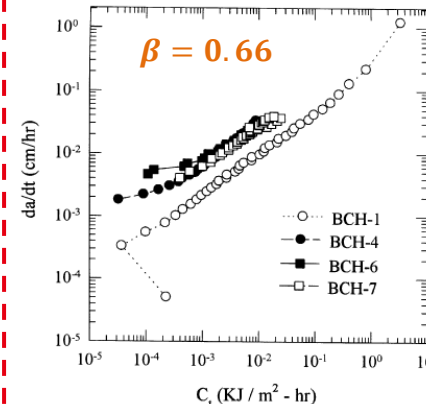
[H. Hirakata et al. 2015]
• Au films at ambient temperature

$\beta = 1$



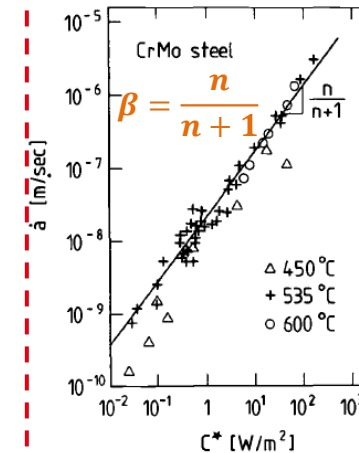
• Low-carbon steels and stainless steels at 673–973K

Used in this work

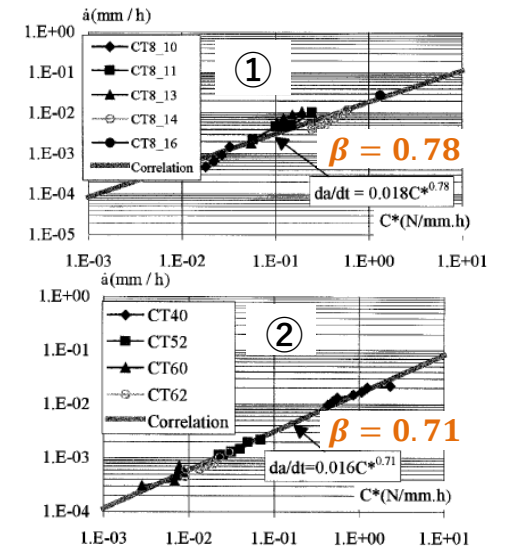


• Aluminium alloy 2519-T87 at 135° C

$\beta < 1$



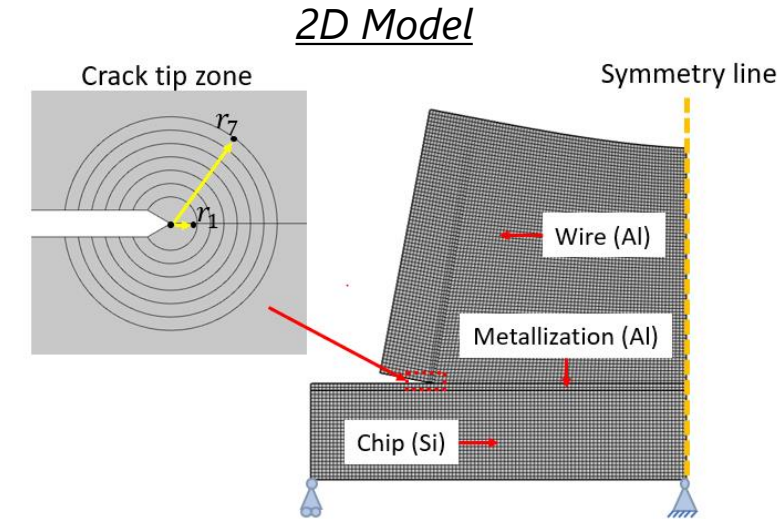
• Cr–Mo steel under 723–873K
• n is the exponent of power creep law



• ① Ferritic steel at 550° C
• ② Austenitic stainless steel at 600° C

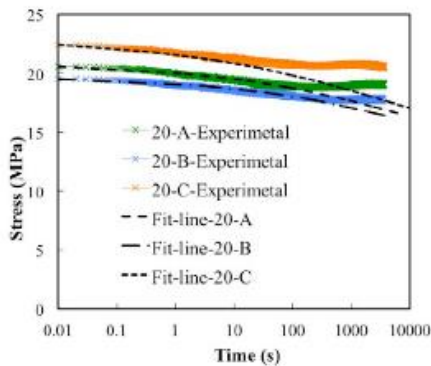
Lifetime modeling: implementation

- ❑ A reduced 2D thermomechanical model was constructed based on the real geometry
 - A half symmetrical structure is used to reduce simulation time
 - The model is constrained to reproduce conditions close to the real geometry
- ❑ A crack was inserted at the interface between wire and metallization
 - The crack-tip zone is meshed adequately
 - Seven circular contours surrounding the crack-tip were defined to evaluate J^* response
- ❑ Thermomechanical properties of aluminum material are function of temperature
- ❑ Norton-Bailey creep model was used for the aluminum material, where : $\varepsilon_{cr} = A\sigma^n t^m$

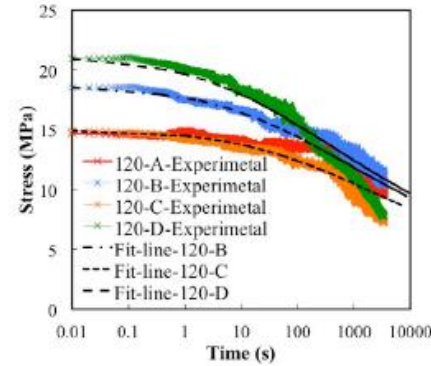


Creep Parameters [Y. Setoguchi et al. 2018]

Temperature (°C)	A (MPa ⁻ⁿ .s ^{-m})	n	m
20	1.88×10^{-13}	5.86	0.35
120	9.09×10^{-10}	3.34	0.49



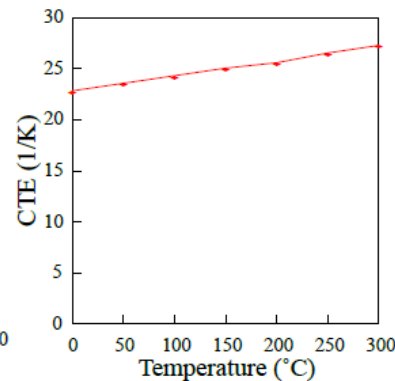
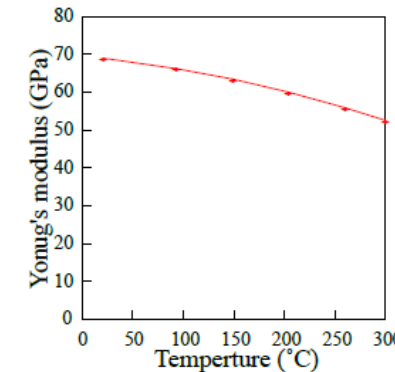
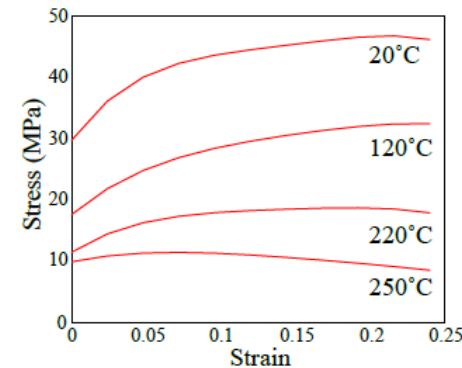
(a) 20°C



(b) 120°C

Thermomechanical Properties [Y. Setoguchi et al. 2018]

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson ratio	CTE
Al	Fig. 1	0.33	Fig. 2
Si	165.7	0.22	2.6

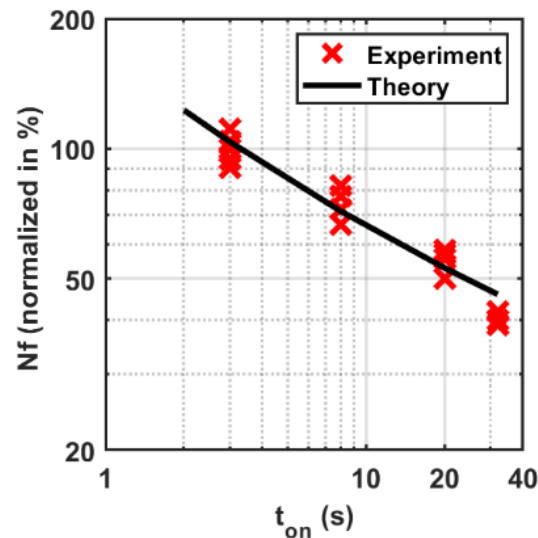


- For seek of simplicity, the J^* response was evaluated considering a step temperature profile
- Considering a material parameter $\beta=0.66$, ΔJ^* was evaluated for different cycle times
- Lifetime ratio for two cycles times can be expressed independently of the crack length as follow :

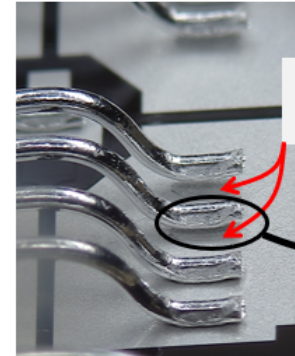
$$R_{t_{on1}/t_{on2}} = \frac{N_f(t_{on1})}{N_f(t_{on2})} = \frac{\Delta J^*(t_{on2}, \beta)}{\Delta J^*(t_{on1}, \beta)}$$

- Model predictions agree with the experimental data
- Results extrapolation can be made particularly towards high cycle time values

Lifetime Model VS Experiment

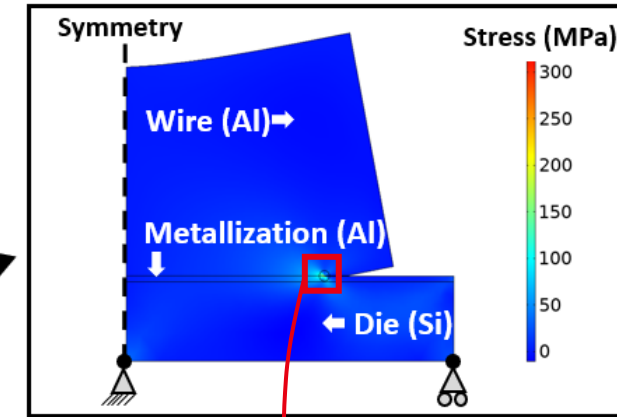


Wire Bond Degradation Mechanism

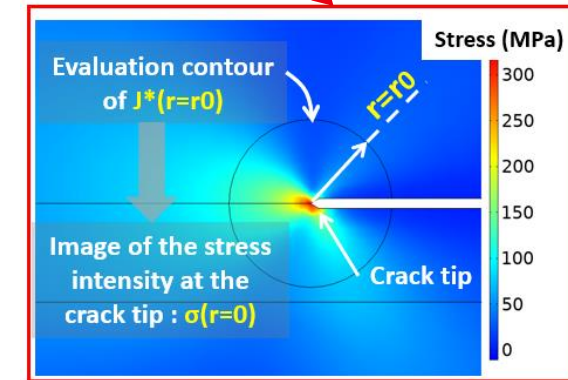
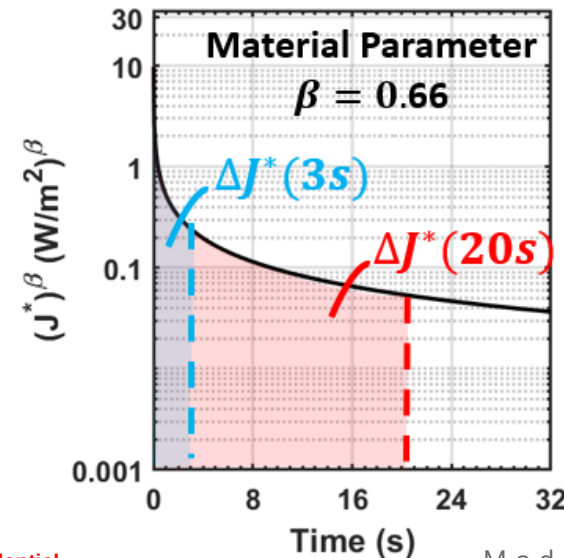


Simplified 2D Model

Thermo-Mechanical Finite Element Model



ΔJ^* Evaluation



- ❖ Using nonlinear fracture mechanics, creep behavior of aluminum in the wire-metallization zone explained reasonably the observed lifetime decrease
- ❖ An efficient time-dependent crack growth model was proposed to extrapolate with high confidence lifetime results to several ton values

1. Généricité

- Autres types d'interconnexions électriques et thermiques (fils de bonding, brasures, frittage), couplage de leurs dégradations
- Autres stress (ex: humidité) et modes de défaillances (y compris précoces), couplage de leurs dégradations
- Données terrain!

2. Extrapolabilité

- Comment valider un modèle dans des conditions non facilement testables?
→ Echantillons et bancs de test spécifiques?

3. Compréhensibilité

- Comment quantifier la confiance d'un modèle physique, y compris de l'extrapolation dans des domaines non testés?

4. Complétude

- Quels moyens de test pour obtenir les propriétés des matériaux avec les bonnes conditions de stress?

5. Rapidité

- Modèles FEM: comment les utiliser frugalement, les accélérer ou les réduire?
- Modèles analytiques: quels sont les compromis à faire?

Eco - conception

Apport de l'analyse de cycle de vie

« Maintenir les ressources (énergie + matériaux) dans l'écosystème produit »



[Provisoire: futures normes]: Calcul des impacts environnementaux:

1. Factuel et quantifiable
2. Vérifiable/certifiable
3. Complet: pour intégrer différents critères environnementaux (toxicité, consommation de ressources, pollution...) et mettre en évidence d'éventuels effets rebonds (fausses bonnes solutions)

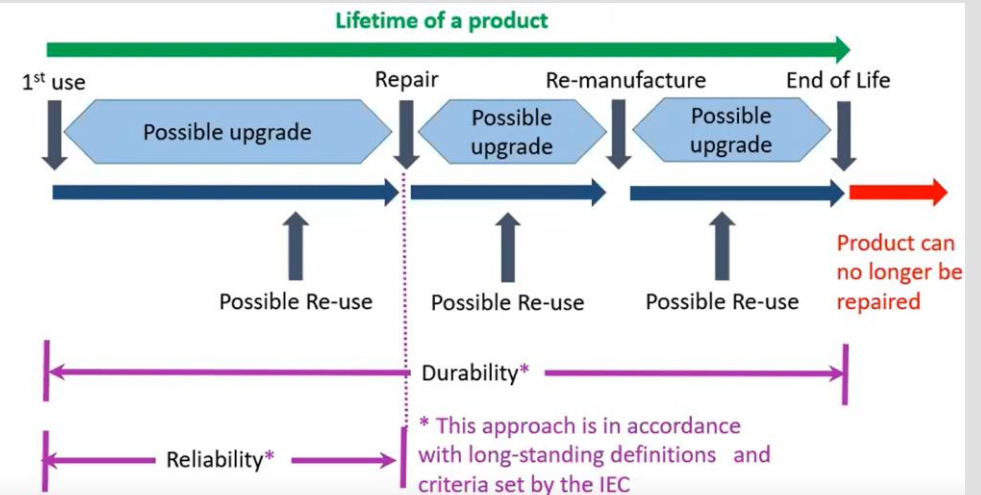
- European circular economy action plan:
 - Already includes **minimum mandatory ecodesign requirements for energy-related products (ErP)**. For example:
 - Draft regulation Ecodesign requirements for (other) electric motors (includes **variable speed drives**) (2019);
 - Mostly related to energy efficiency
 - Draft regulation Ecodesign requirements for **welding** equipment (2019);
 - Also covers availability of spare parts, access to repair and maintenance information, e.g.:
 - "Component and diagnosis information (such as minimum and maximum theoretical values for measurement)"
 - "Diagnostic fault and error codes (including manufacturer-specific codes where applicable)"
 - "Data records of reported failure incidents stored in the welding equipment (where applicable)"
 - Standardization bodies are preparing new standards related to both material and energy efficiency, e.g. JTC10 general (material) and TC22 power electronics systems specific (material and energy) :
 - The notions of durability, remanufacture, repair and reuse are explicated (EN45552, EN45553, EN45555, EN45553).

→ Repairability criteria based on, e.g. easily **dismantlable priority parts** or **remanufacturing criteria** based on **testing** and **diagnostic** become critical for energy related products.

Requirements for the remanufacturing (EN45553)

Product Attribute	Remanufacturing Process Step						
	Inspection	Disassembly	Cleaning	Reprocessing	Reassembly	Testing	Storage
Ease of locating access points and fasteners	X	X			X	X	
Ease of identification and verification	X					X	X
Ease of access	X	X	X	X	X	X	
Ease of disassembly / reassembly		X	X	X	X		X
Wear resistance	X	X	X	X	X	X	X

Durability concept (EN45552)



1. Objective

Background:

- Life Cycle Assessment (LCA) is state of the art for evaluating environmental impact including global warming potential, and resource depletion
- The European Green Deal started in 2019 is the promise of a proactive legislative and subsidy ambition, including the electronic sector

Objective:

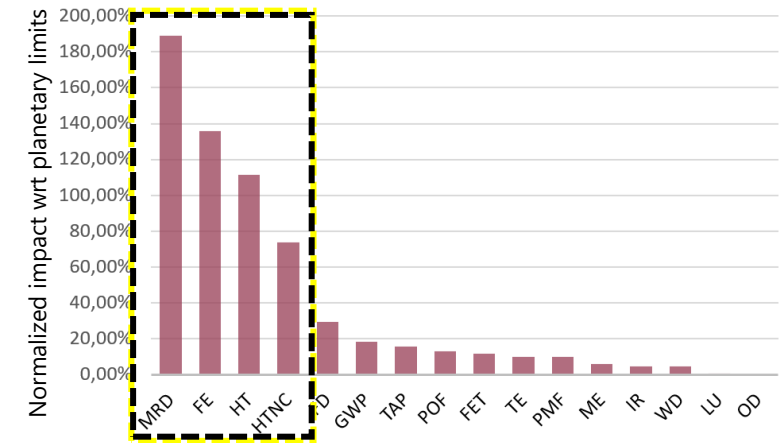
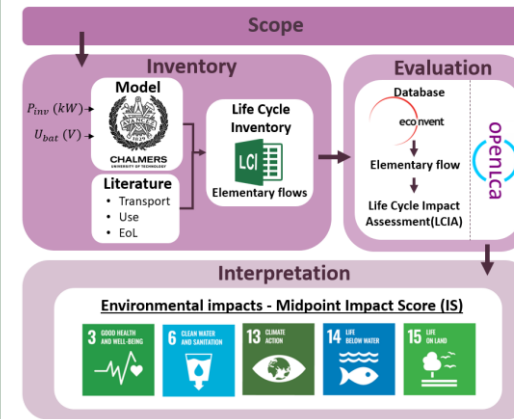
- To identify 'environmental hot spots' in EV inverters
- To evaluate the environmental benefit of diagnostic technologies which improve durability and repairability

Strategy:

- Realize and analyze the LCA of an automotive inverter
- Realize a seamless Python design-lifetime-environmental tool

2. Main published results

1. In the life cycle of an automotive inverter, the manufacturing and usage have a preponderant environmental impact over transport and end of life.
2. The most important impact is the **mineral and metal depletion of resources**, which is mainly attributed to the power semiconductor module baseplate and contact materials.
3. The other impacts are almost equally caused by the aluminum case, capacitors and power module (equally comprised of die, baseplate and contacts).



3. Main Publications

- [1] Baudais, B.; Ben Ahmed, H.; Jodin, G.; Degrenne, N.; Lefebvre, S. Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter. *Energies* **2023**, *16*, 2192. <https://doi.org/10.3390/en16052192>, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/5/2192>

PCIM Europe 2023, 09 – 11 May 2023, Nuremberg

DOI:10.30420/566091368



How Life Cycle Analyses are Influencing Power Electronics Converter Design

Franz Musil¹, Carina Harringer¹, Alfred Hiesmayr¹, David Schönmayr¹

¹ Fronius International GmbH, Austria

Corresponding author: Franz Musil, musil.franz@fronius.com

[Results]

1. Different databases give very different CO₂ footprint for capacitors and Si dies → **Stringent power- electronics based LCI is required (from manufacturers)**
2. Wafers + front-end GWP is $\approx 3,3$ times more for SiC (90000 kg CO₂e/m²) than Si (27300 kg CO₂e/m²). Despite of this, due to the lower chip area and smaller volume/mass, the SiC PM manufacturing was evaluated to generate $\approx 5,2$ times less CO₂e (1,66kg vs 8,62kg)
3. Massive coils, aluminum and plastics result in a large carbon footprint. → **SiC will reduce coils size and thermal requirements (aluminum heat sink) and improve efficiency**

1. Different databases give very different carbon footprint for the fabrication of capacitors

2. Despite of a $\approx 3,3$ times higher carbon footprint per die area, the SiC PM has $\approx 5,2$ times less CO₂ footprint for its fabrication

3. The coils, aluminum and plastics are most contributing to the carbon footprint. PM comes 6th with 8,9% contribution.

Contribution / GWP	[%]	[kg CO ₂ e]
Coils	17,4%	55,1
Aluminium	15,2%	48,1
Techn. Plastic	12,8%	40,5
IC	12,5%	39,4
Capacitor	10,5%	33,1
IGBT Modul	8,9%	28,1
Printed Circuit Board	8,0%	25,2
Galvanised steel	3,6%	11,5
Complex Components	2,6%	8,1
Transistor	2,5%	8,0
Simple material mixe	1,1%	3,3
Relay	1,0%	3,1
Resistor	0,9%	2,7
Cardboard	0,7%	2,1
Inductors	0,7%	2,1
Standard plastic	0,6%	2,0
Diode	0,5%	1,6
Stainless steel	0,4%	1,3
Paper	0,1%	0,2
Total	100,0%	315,6

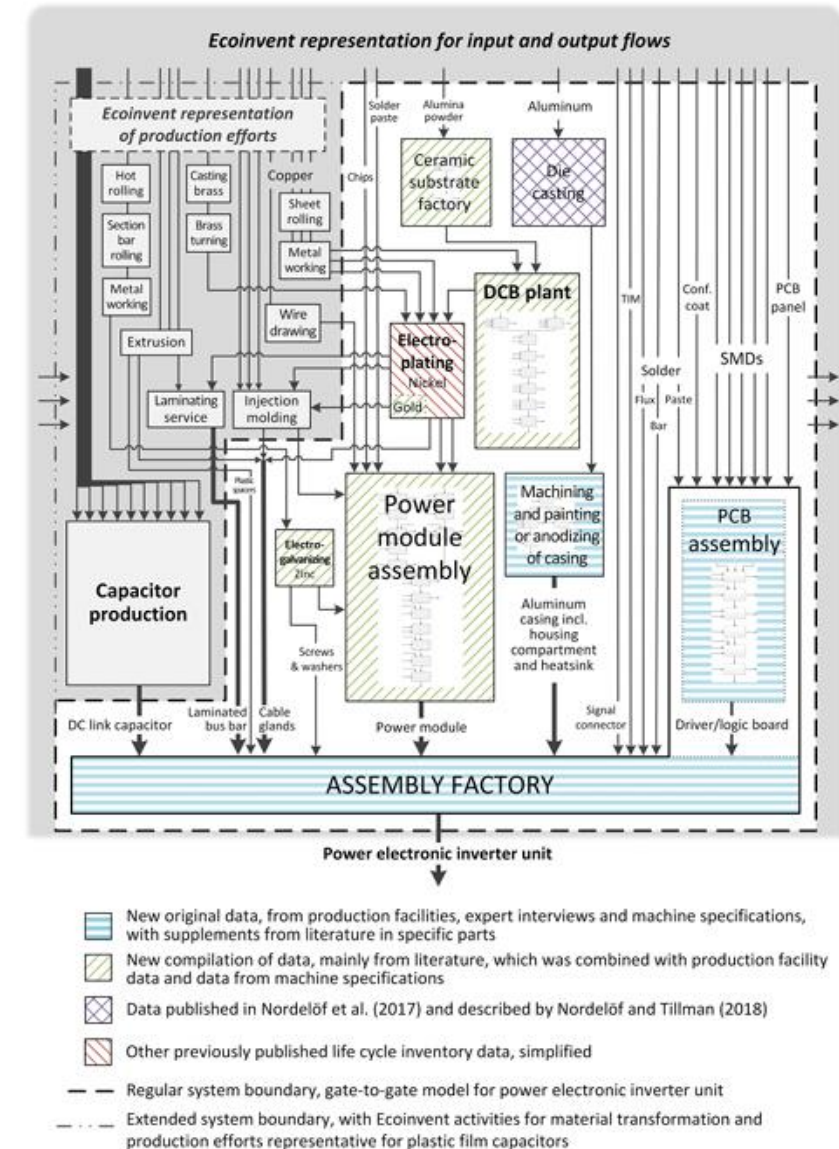
		LCI database		
Carbon Footprint		ecoinvent 3.8	Milca	other LCI database
Type	Mounting	kg CO ₂ e / kg	kg CO ₂ e / kg	kg CO ₂ e / kg
Electrolyte, >2 cm height	Snap-In	50,7	14,0	~ 5
Film	THT	47,0	N/A	~ 4
Ceramic	SMD	82,7	279,4	N/A

Table 1 Carbon Footprint for Capacitors [5], [10]

Part Number		F4-75R12 KS4_B11	FF8MR12W1 M1H_B11
Package		Econo 2B	Easy 1B
Switch		Si-IGBT	SiC MOSFET
Current Rating (Half Bridge)		150A	150A
Revision		3.0	1.0
Toal weight [g]		179,5	22
Construction Element	Material	Mass [g]	Mass [g]
chip	silicon	0,1945	0,00
	silicon carbide	0,00	0,0343
Base plate and substrate including metallisation	copper	117,75	4,82
	aluminium oxid	3,05	1,98
	tin	2,33	0,22
	silver	0,18	0,22
encapsulation	silicone gel	15,26	3,52
	PBT	19,57	5,04
	antimonytrioxide	2,15	0,53
	brominate resin	1,44	0,35
	clorinated resin	0,90	0,24
	silicondioxide / glasfiber	10,41	2,64
clamp	X12CrNi17-7	0,00	1,10
lead, finish and plating	copper	6,10	1,08
smd	lead oxide	0,11	0,04
Carbon Footprint		[kg CO ₂ e]	[kg CO ₂ e]
Calculated		8,62	1,66

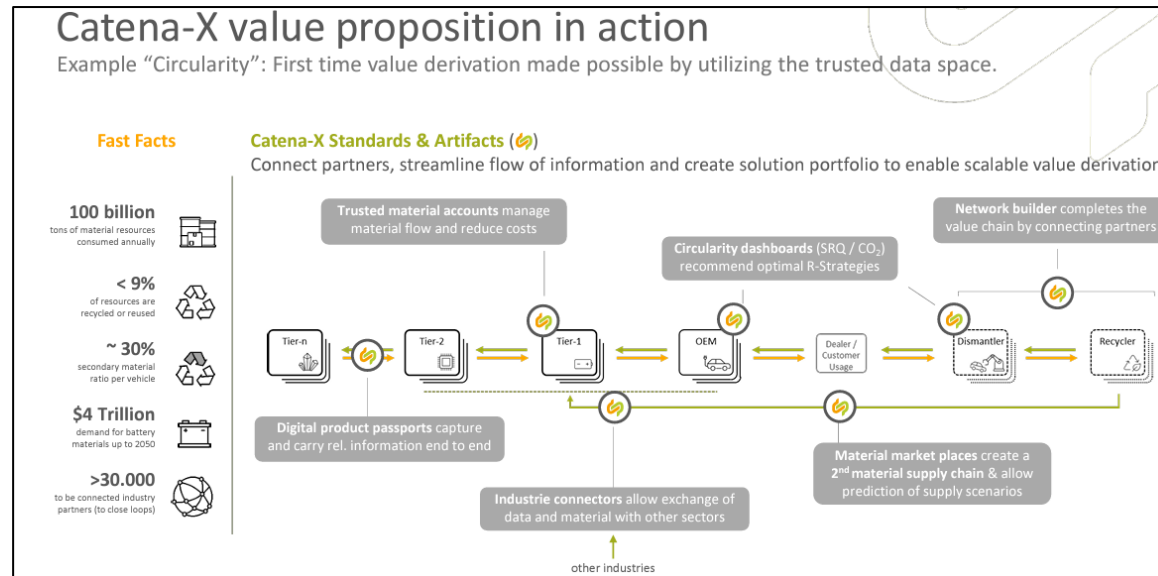
Table 2 Comparison of Full Material Declaration [16] [17] [18] and calculated carbon footprint

1. Les données de fabrication fines et 'à jour'
 - Quels sont les matériaux et procédés mis en œuvre du composant au système?
2. Les données de fin de vie
 - Quel est le coût de fin de vie d'un DEEE de type 'Electronique de puissance'?
3. Les méthodes/outils d'éco-conception spécifiques à l'électronique de puissance



Exemple de données matériaux et procédés nécessaires à l'inventaire de cycle de vie

[Nordelöf, A., & Alatalo, M. (2017). A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit. Chalmers University of Technology.]



Catena-X: un exemple de structuration des industriels autour des données

Conclusions

- Feuilles de route technologiques (« step-by-step »)

- Surveillance de l'état de santé:

Protection → Estimation de l'état → Estimation de l'état de santé → Contrôle intelligent pour augmenter la durée de vie

- Modélisation de la durée de vie:

Mécanique de la fracture des fils de bonding → Evaluation des limites des modèles → Extension à d'autres interconnexions

- Eco-conception:

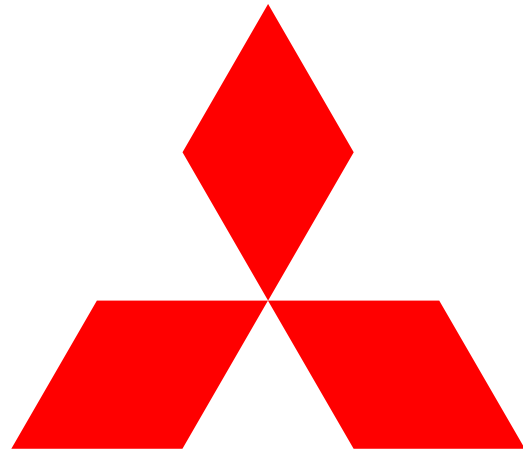
Outil ACV → Evaluation de design et technologies existantes → Proposition de nouveaux design et technologies



- Challenges: axes de développement prioritaires internes MERCE:

<https://www.mitsubishielectric-rce.eu/jobs/>

1. Développer l'activité de diagnostic système: « **Researcher** in the field of inverter systems for motor-drive applications »
2. Développer l'activité de contrôle rapproché intelligent: « **Researcher** in the field of power semiconductor modules »
3. Transférer les technologies d'estimation de température: **Chercheur associé** dans le domaine des modules semi-conducteurs
4. Repousser les limites des tests de fiabilité: **Chercheur associé** en conception et test de convertisseurs de puissance



**MITSUBISHI
ELECTRIC**

Changes for the Better