

NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

Fiabilité des convertisseurs de puissance ferroviaires :
la place des essais environnementaux & la prise en compte de l'impact
du rayonnement cosmique

Michel PITON

ALSTOM
• mobility by nature •

Organisé par :

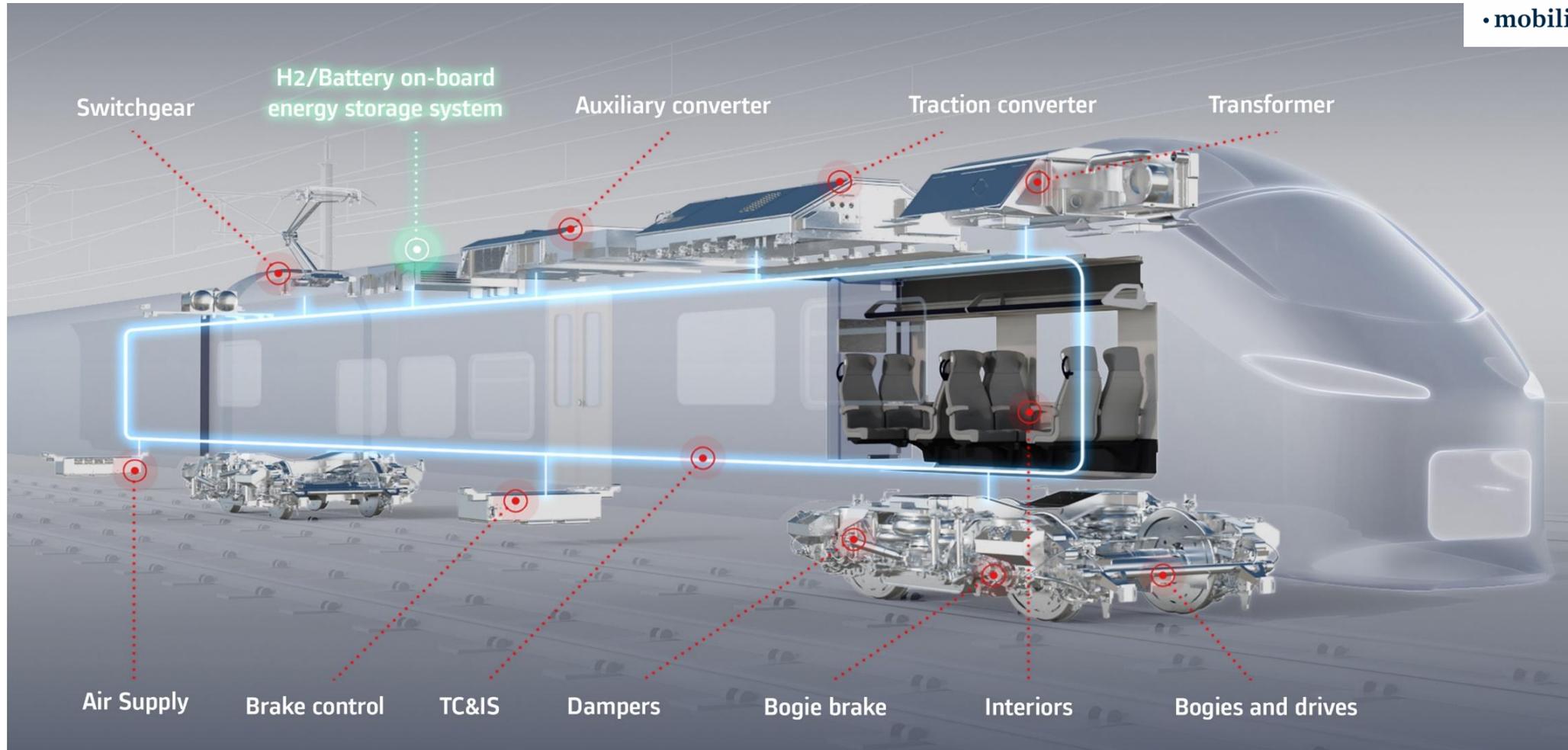


Les convertisseurs de puissance ferroviaires



Centre Français Fiabilité

ALSTOM
• mobility by nature •





01. Introduction : l'enjeu de la fiabilité pour les convertisseurs de traction ferroviaire

02. Les essais environnementaux

03. La prise en compte de l'impact du rayonnement cosmique sur la fiabilité

04. Les challenges

01. Introduction : l'enjeu de la fiabilité pour les convertisseurs de traction ferroviaire

02. Les essais environnementaux

03. La prise en compte de l'impact du rayonnement cosmique sur la fiabilité

04. Les challenges

L'évolution des semiconducteurs de puissance pour la traction ferroviaire

Différentes tensions des réseaux ferroviaires

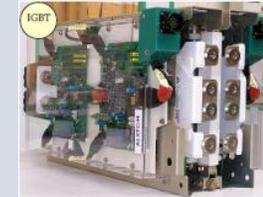


- DC 750 V
- DC 1 500 V
- DC 3 000 V
- AC 15 kV 16Hz $\frac{2}{3}$
- AC 25 kV 50Hz

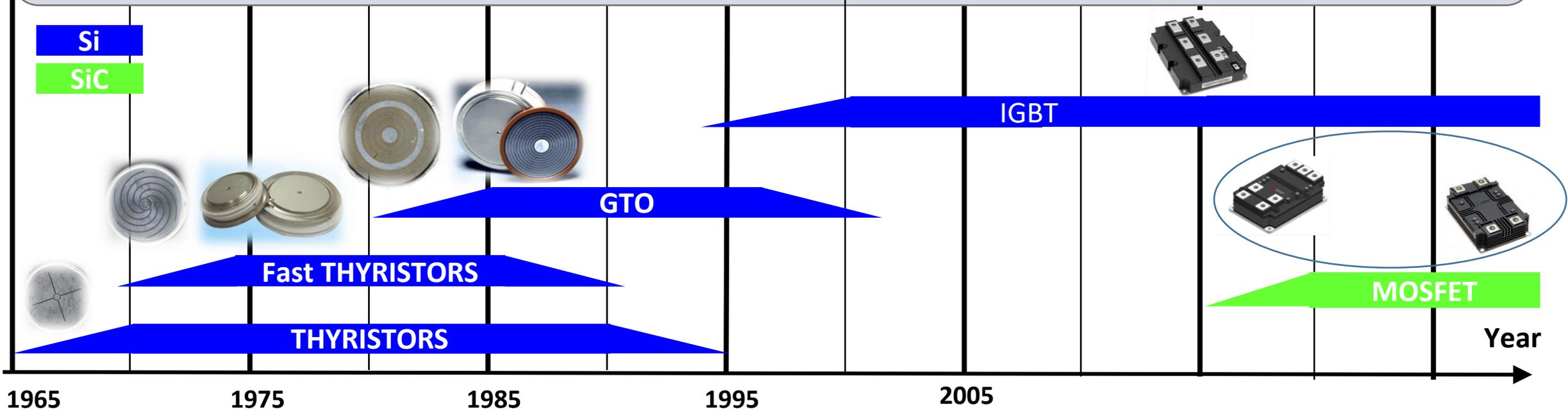


Gamme de tension : 1700 V à 6500 V
Gamme de courant : 100 A à 2000 A

Traction converters



Si
SiC



Le « dominant design » : module IGBT multi-puces



Centre Français Fiabilité

ALSTOM
• mobility by nature •



3300 V – 1500 A



Des contraintes sévères

Electrique

- ❑ Haute tension
- ❑ Forte puissance instantanée

Environnement

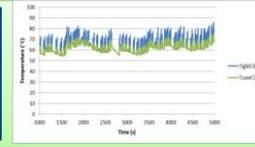
- ❑ Température / Humidité
- ❑ Atmosphère corrosive
- ❑ Equipement embarqué

Cyclage thermique

250kW



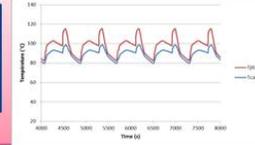
Tramway:
Cooling: dry panel – forced air cooled
Cycling: small ΔT / very large number



>400kW



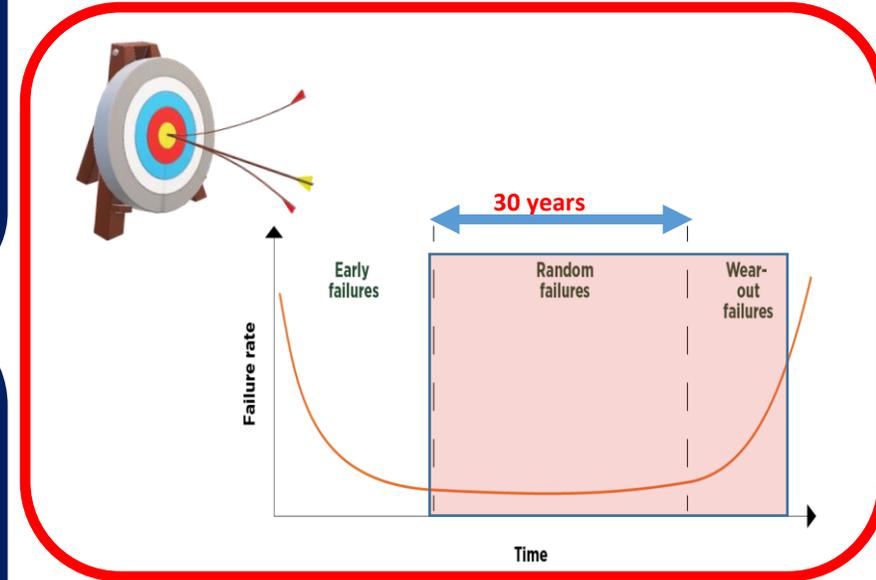
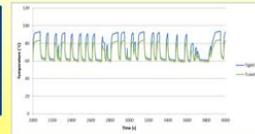
Metro / Regional:
Cooling: forced air cooled
Cycling: large ΔT / large number



1MW

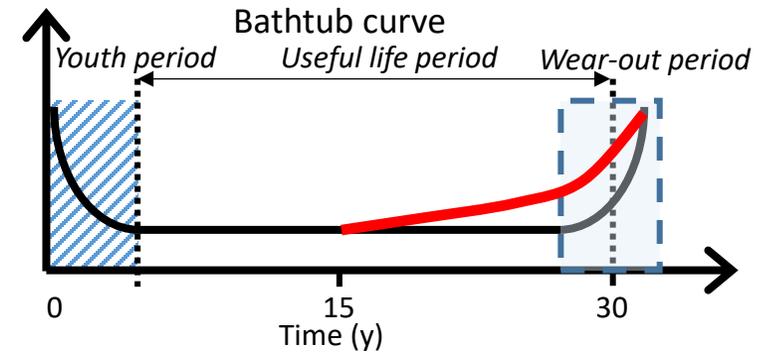
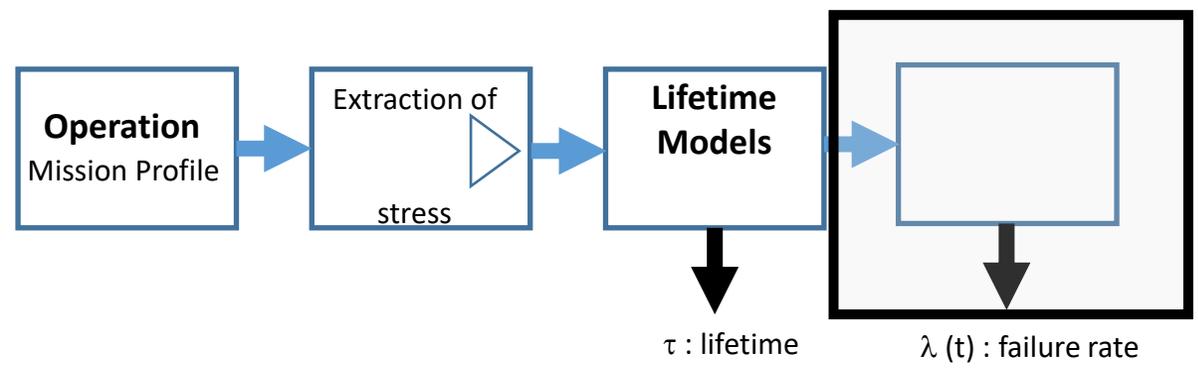


Very High Speed / Loco:
Cooling: water
Cycling: large ΔT / large number

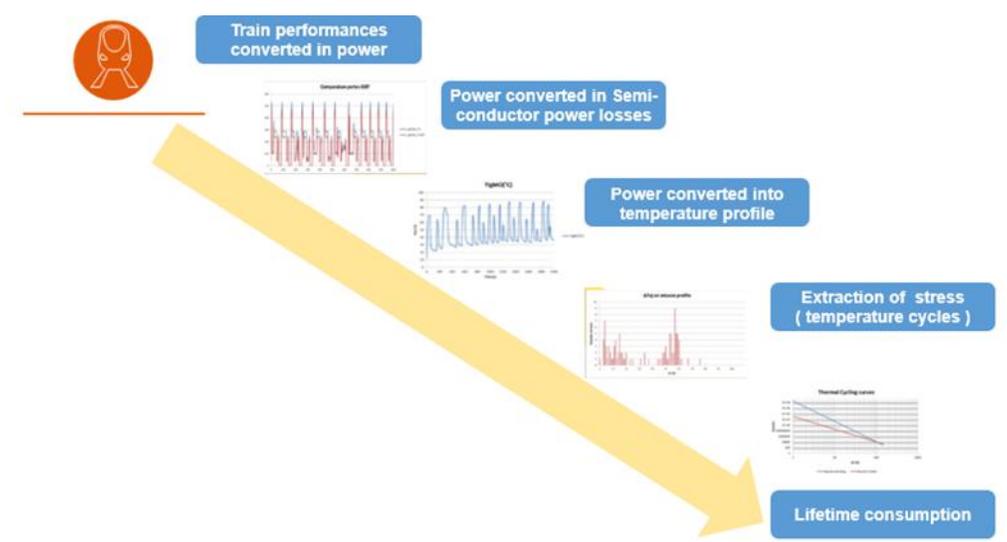




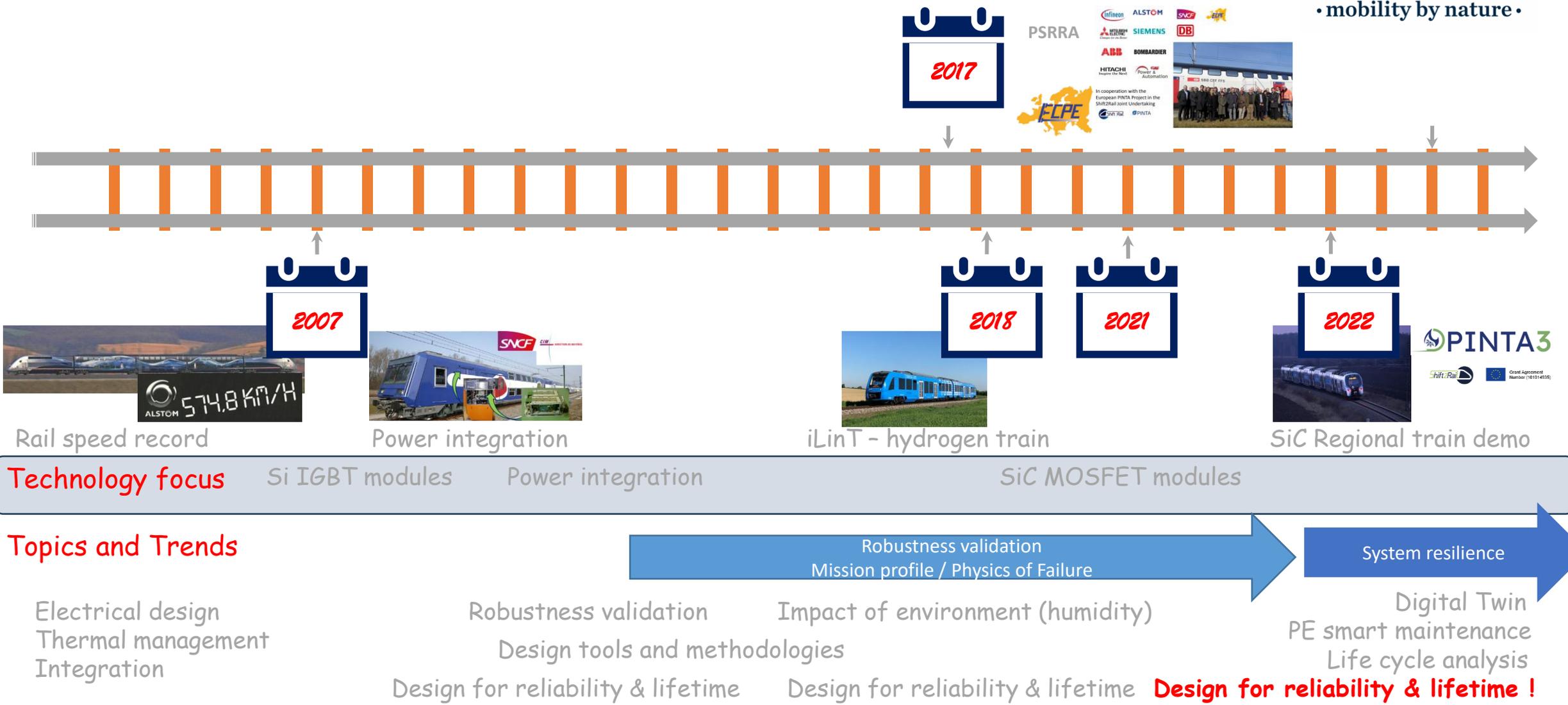
→ Du calcul de durée de vie au calcul de l'évolution du taux de défaillance



→ Cas du cyclage thermique



Vers des systèmes plus résilients



Rail speed record



Si IGBT modules



Power integration

Power integration



iLinT - hydrogen train



SiC MOSFET modules



SiC Regional train demo



Topics and Trends

Electrical design
Thermal management
Integration

Robustness validation
Design tools and methodologies
Design for reliability & lifetime

Impact of environment (humidity)
Design for reliability & lifetime

Design for reliability & lifetime !

System resilience
Digital Twin
PE smart maintenance
Life cycle analysis



01. Introduction : l'enjeu de la fiabilité pour les convertisseurs de traction ferroviaire

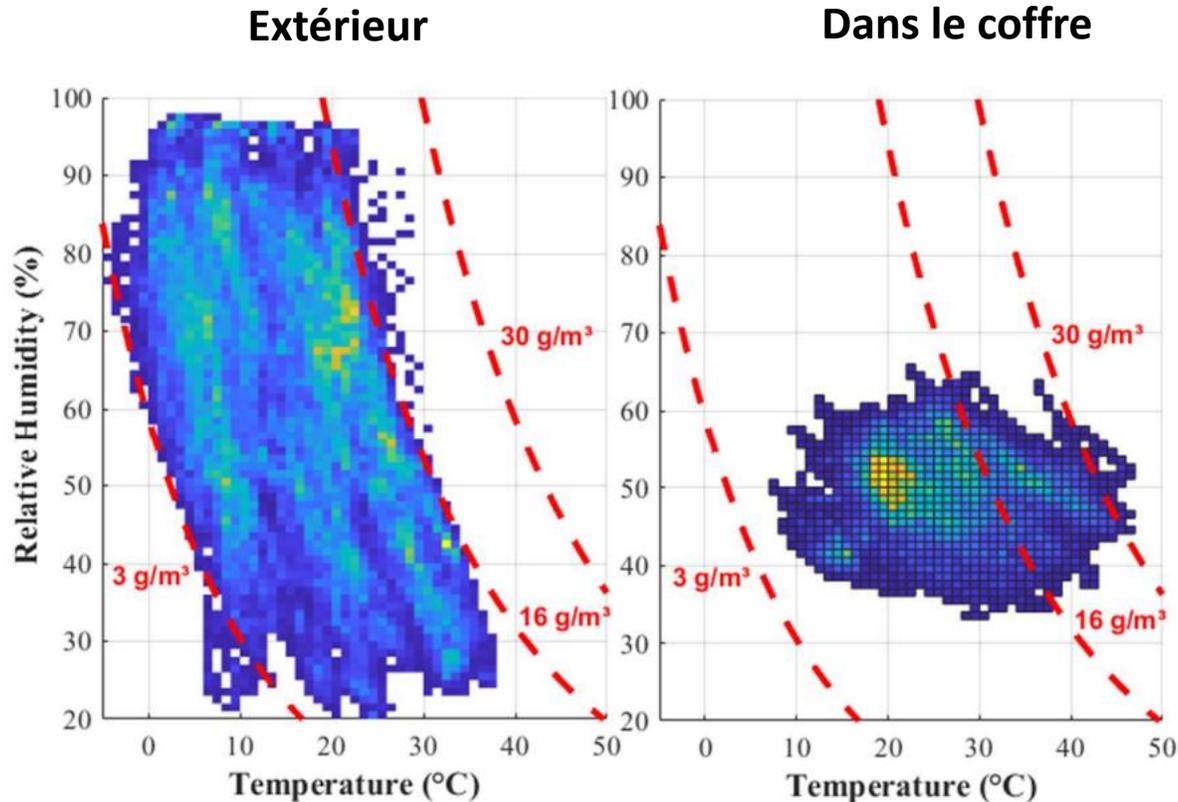
03. La prise en compte de l'impact du rayonnement cosmique sur la fiabilité

02. Les essais environnementaux

04. Les challenges

Des contraintes environnementales sévères

- Le microclimat dans le coffre convertisseur

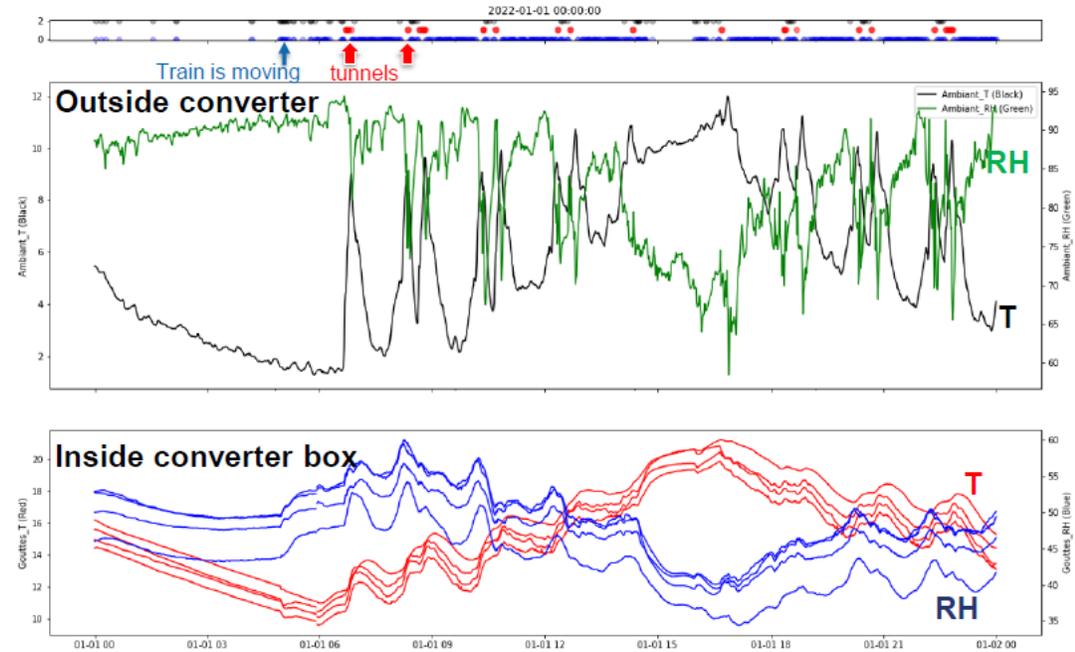


Ref : SCHUSTER, Oskar, NAGEL, Andreas, et LASKA, Bernd. **Observation and simulation of dynamic humidity in power converters for railway applications due to moisture diffusion in plastics.** In : (EPE'21 ECCE Europe). IEEE, 2021.

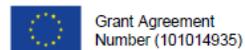


Measurement Campaigns: Key Learnings Influence of short tunnels during a cold day

- Importance of night stop for initial conditions
- Short tunnels have a visible but limited impact on conditions inside converter box



Regional Train France - Switzerland
(water cooled)



20/06/2022 16

Environmental requirement specification including harmful gas requirements

En libre téléchargement : <https://www.ecpe.org/research/working-groups/railway-reliability/>

Standard test
IEC60749-4 (2002)
High Humidity High Temperature
Reverse Bias test
[H3TRB]
85 °C
85 % RH
80 V

- Voltage stress factor was not taken into account
- Al corrosion was not addressed



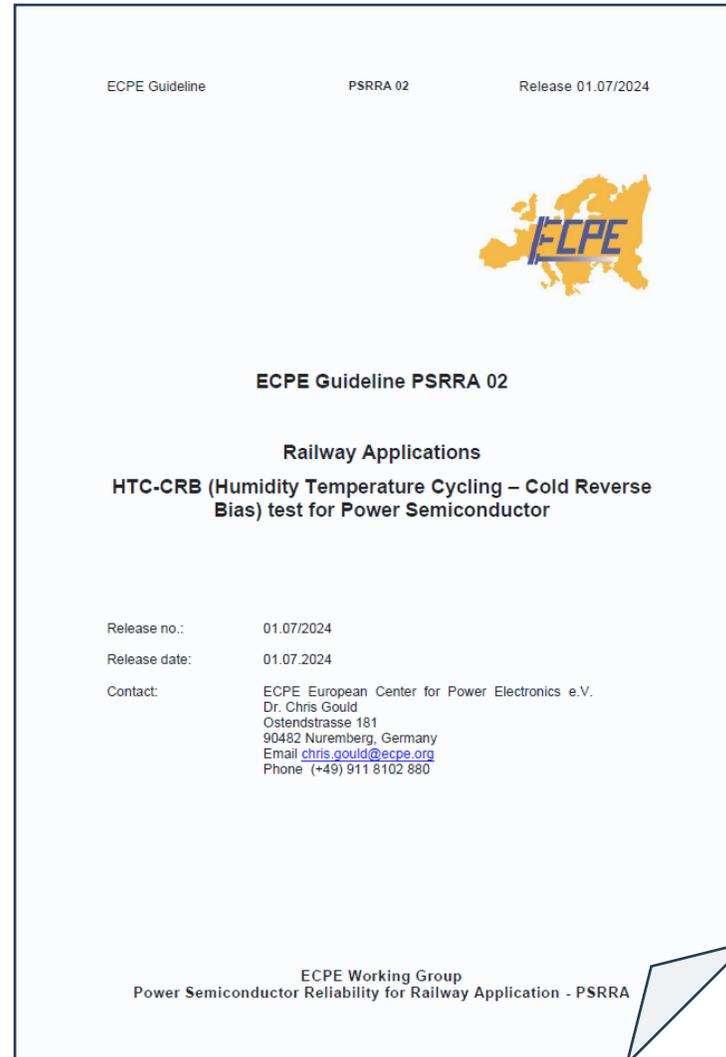
Lifetime model :
extended Peck model

$$\text{accf}(RH, T, V) = \underbrace{\left(\frac{RH_a}{RH_u}\right)^x}_{\text{accf}(RH)} \cdot \underbrace{\exp\left[\frac{E_A}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right]}_{\text{accf}(T)} \cdot \underbrace{\left(\frac{V_a}{V_u}\right)^y}_{\text{accf}(V)}$$

Ref : ZORN, Christian et KAMINSKI, Nando. Temperature–humidity–bias testing on insulated-gate bipolar transistor modules–failure modes and acceleration due to high voltage. *IET Power Electronics*, 2015, vol. 8, no 12, p. 2329-2335.



- L'analyse des profils de mission dans le groupe  PSRRA a mis en évidence que la condensation dans le module était possible
- Travaux des fournisseurs de semiconducteurs de puissance



Ref : HATORI, Kenji, NAKAMURA, Keiichi, NOBORU, Wakana, *et al.* Investigation for Condensation Test Condition of HVIGBT Modules. In : *2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)*. IEEE, 2022.

En libre téléchargement : <https://www.ecpe.org/research/working-groups/railway-reliability/>



01. Introduction : l'enjeu de la fiabilité pour les convertisseurs de traction ferroviaire

02. Les essais environnementaux

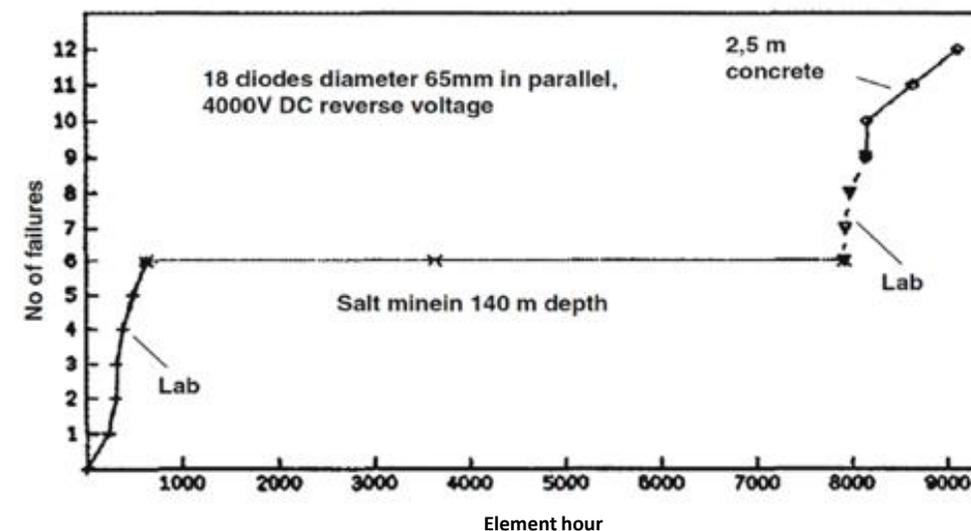
03. La prise en compte de l'impact du rayonnement cosmique sur la fiabilité

04. Les challenges

- Augmentation du taux de défaillance de GTO 4500 V sur des locomotives
- Différence de taux de défaillance observé pour des GTO polarisés sous tension dans une mine et au sommet d'une montagne



Cosmic ray failures



Source : HESEM

Taux de défaillance lié aux rayons cosmiques pour les composants de puissance

- Document de référence : note d'application HESEM
- Modèle empirique (Kaminski)

Application Note 5SYA 2042-09

Failure rates of IGBT modules due to cosmic rays

In the early 1990's a new failure mode for high current, high voltage semiconductor devices was discovered. The failure mode was of considerable practical significance and caused a series of equipment malfunctions in the field. This failure mode affects all kind of devices like diodes, thyristors, GTOs, IGBTs, etc.



1. General

It consists of a localised breakdown in the bulk of the devices and is not related to junction termination instabilities. The location of the breakdown spot on the wafer is random. The onset of the breakdown occurs without a precursor within a few nanoseconds and there is no sign of early failure or wear out. The failure rate is, thus, constant in time but strongly dependent on the applied voltage and shows a small dependence on temperature. Experiments in a German salt mine 140 m below ground did not show any of these failures, while experiments on the Jungfrau (5480m above sea level) in the Swiss Alps yielded a much higher failure rate than in laboratories close to sea level. Furthermore, irradiation with heavy energetic particles creates the same failure patterns. All together it was concluded that "cosmic rays" are the root cause of this kind of failure and this conclusion is now supported by a huge number of experiments done all around the world. Primary cosmic rays are high-energy particles, mostly protons, that are found in space and that penetrate our atmosphere. They come from all directions and have a wide energy range of incident particles. Most of these cosmic rays originate from supernovae. Originally the Austrian physicist Viktor Hess (Nobel Prize 1936) discovered cosmic rays because of the ionization they produce in our

atmosphere. In fact, a primary cosmic ray particle usually does not reach the surface of the earth directly but collides with an atmospheric particle (see picture above). There it generates a variety of other energy-rich particles, which later collide with other atmospheric particles. The process of a cosmic ray particle colliding with atmospheric particles and disintegrating into smaller pions, muons, neutrons, and the like, is called a cosmic-ray shower. Most of the generated particles are harmless for semiconductor devices but some, mostly neutrons, may be lethal. Occasionally cosmic ray related events are observed, which do not lead to any perceivable damage but in general, the device is doomed even if fast fuses are used. Today Hitachi Energy's high current, high voltage semiconductors are designed such that the failure rate due to cosmic rays is reduced to an "acceptable" level. Nevertheless, cosmic-ray induced failures have to be taken into account for every power electronic circuit. In particular, semiconductors for applications with a high utilization of the device's blocking capability and for equipment operating at high altitudes have to be assessed carefully. This application note is intended to provide a basis on which the power electronics designer can estimate failure rates, adjust parameters such as DC-link voltages or simply select the right semiconductor device for a particular application.

$$\lambda(V_{DC}, T_{vj}, h) = \underbrace{C_3 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right)}_{\text{① Tension}} \cdot \underbrace{\exp\left(\frac{25 - T_{vj}}{47.6}\right)}_{\text{② Température}} \cdot \exp\left(\frac{1 - \left(1 - \frac{h}{44300}\right)^{5.26}}{0.143}\right)_{\text{③ Altitude}}$$

- Un niveau max de 100 FIT (@ 25°C – Sea level) est spécifié à la tension DC max non permanente (+ précision) de la norme IEC 62497-2 (*Applications ferroviaires – Coordination de l'isolement Partie 2 : Surtensions et protections associées*)

Blocking capability Vces (V)	1200	1700	3300	4500	6500
Vdc max @ 100 FIT	800	1100	2100	2800	3700
Vdcmax / Vces (%)	66	64	60	62	56

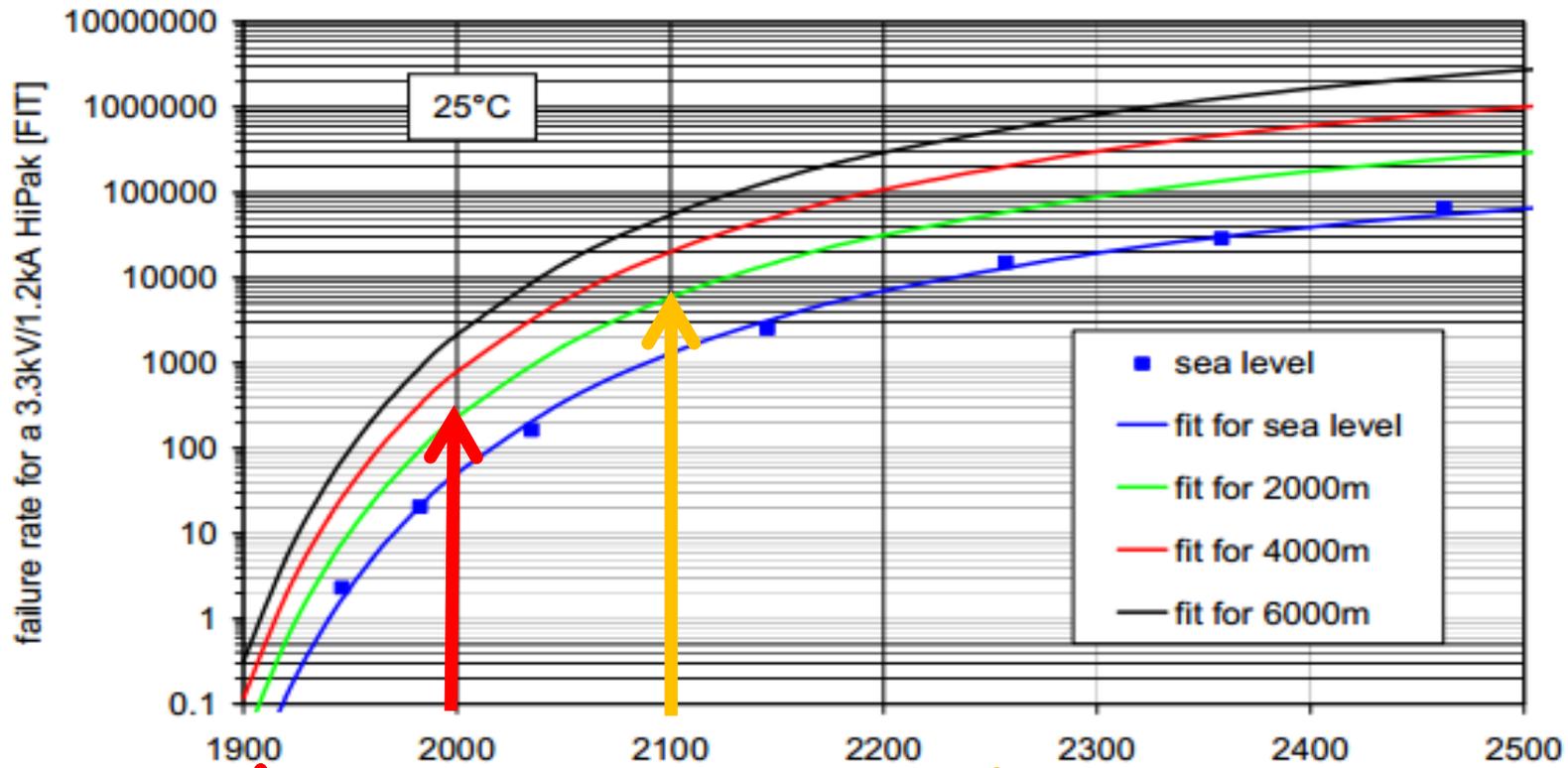
- Courbes LTDS (Long Term DC Stability) demandées aux fournisseurs

- Une locomotive utilisant des IGBT 3300 V fonctionne sur une ligne située à 2000 m d'altitude. La tension continue de la ligne qui est de 2000 V DC s'élève à 2100 V DC sur une portion de la ligne (représentant 10 % du temps de fonctionnement de la locomotive)



Un exemple ...

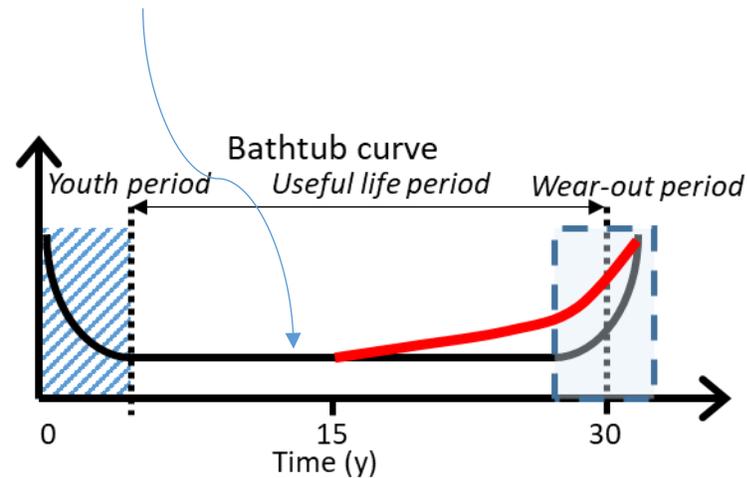
$$\lambda_{\text{appli}} = 0,9 \times \lambda_{2000 \text{ V}, 2000 \text{ m}} + 0,1 \times \lambda_{2100 \text{ V}, 2000 \text{ m}} = 180 + 600 = \boxed{780 \text{ FIT}}$$



$$\lambda_{2000 \text{ V}, 2000 \text{ m}} = 200 \text{ FIT} \quad \lambda_{2100 \text{ V}, 2000 \text{ m}} = 6000 \text{ FIT}$$

Source : données HESEM

- Pour les composants de puissance haute tension utilisés dans les applications ferroviaires, l'impact des rayons cosmiques est non négligeable sur le taux de défaillance durant la vie utile du produit
- Cet aspect est pris en compte dans le choix et la conception des convertisseurs de puissance.





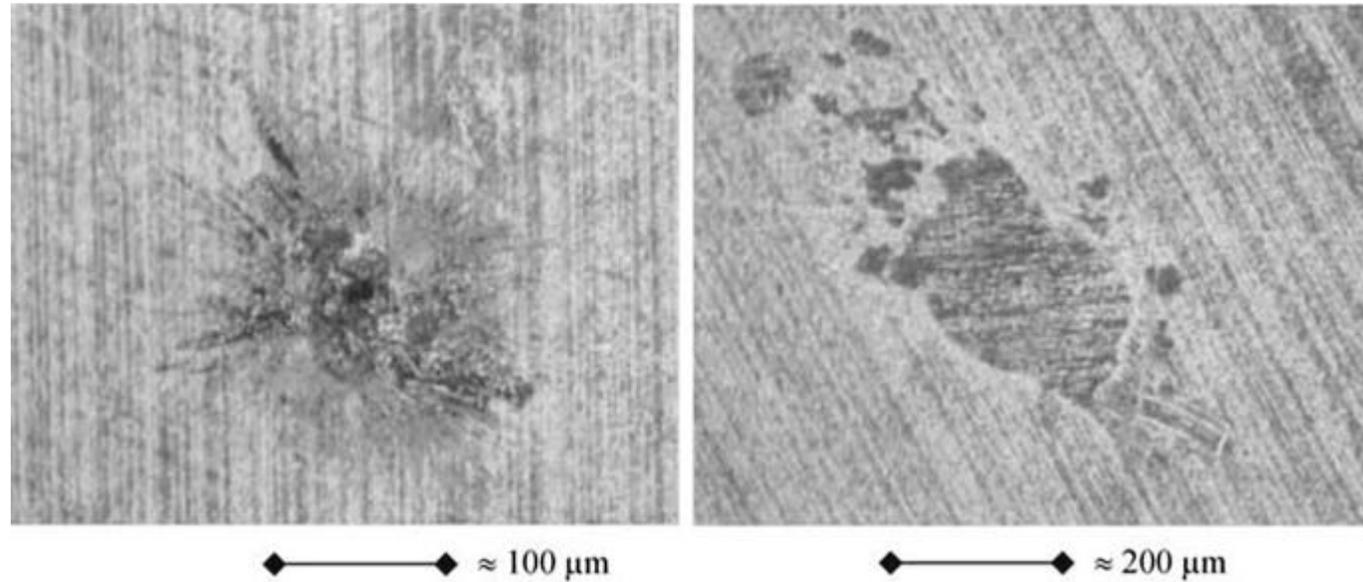
01. Introduction : l'enjeu de la fiabilité pour les convertisseurs de traction ferroviaire

02. Les essais environnementaux

03. La prise en compte de l'impact du rayonnement cosmique sur la fiabilité

04. Les challenges

- Des défaillances très localisées sur la puce ...

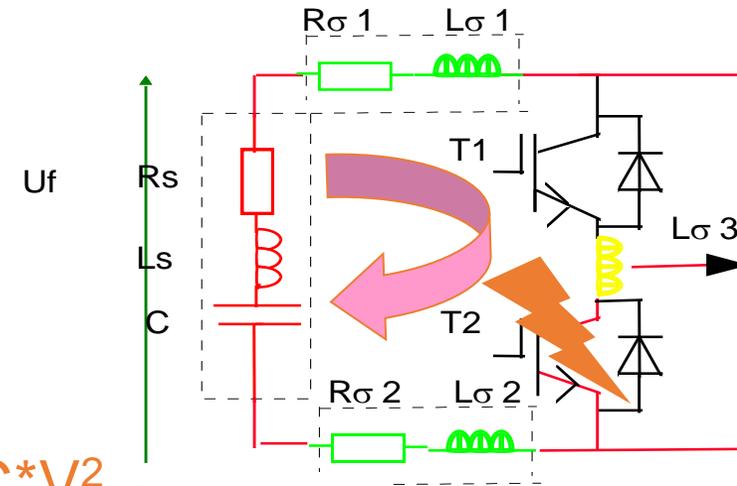


- Fig. 12.45 Failure pictures after a cosmic ray destruction of 4.5-kV diodes. The photos are from the cathode side. Left-hand side: small pinhole. Right-hand side: Molten area in the metallization with bubbles.

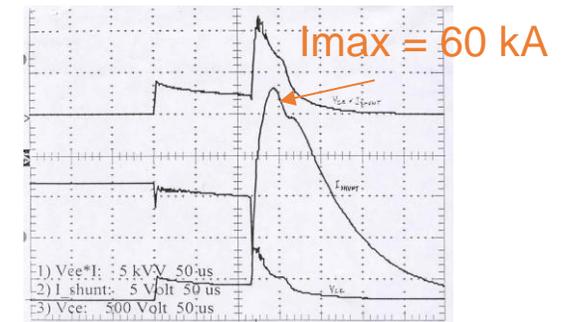
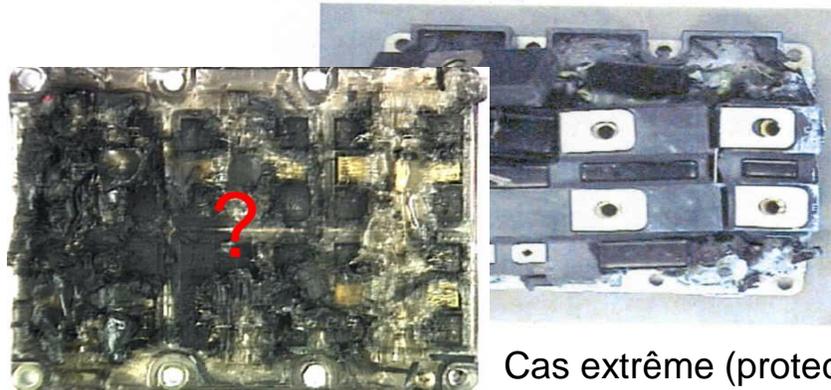
J. Lutz et al., *Semiconductor Power Devices*, DOI 10.1007/978-3-642-11125-9_12, 419 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011 - Pictures from Jean-Francois Serviere, Alstom

Des défaillances en service très difficiles à identifier

- ... alors qu'on n'observe généralement que la conséquence



$$1/2 * C * V^2$$

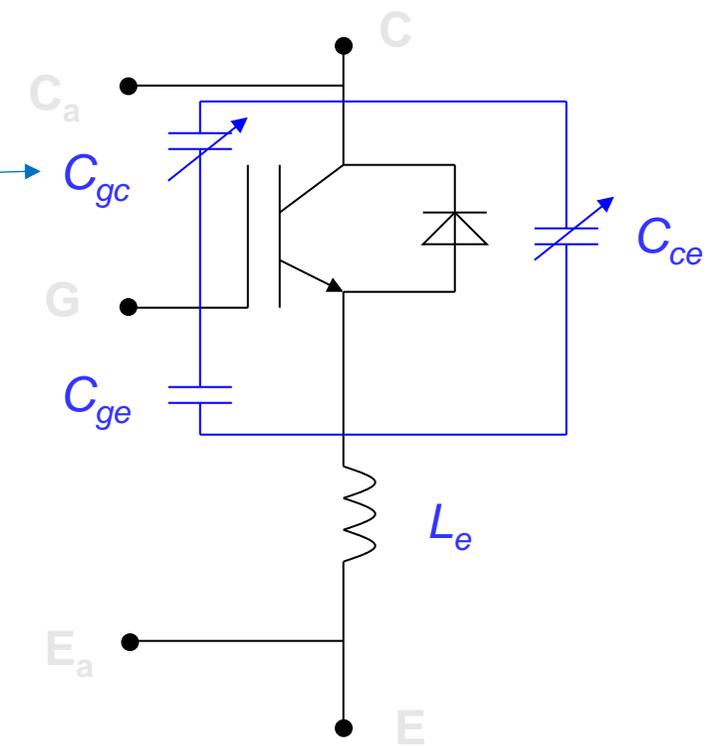
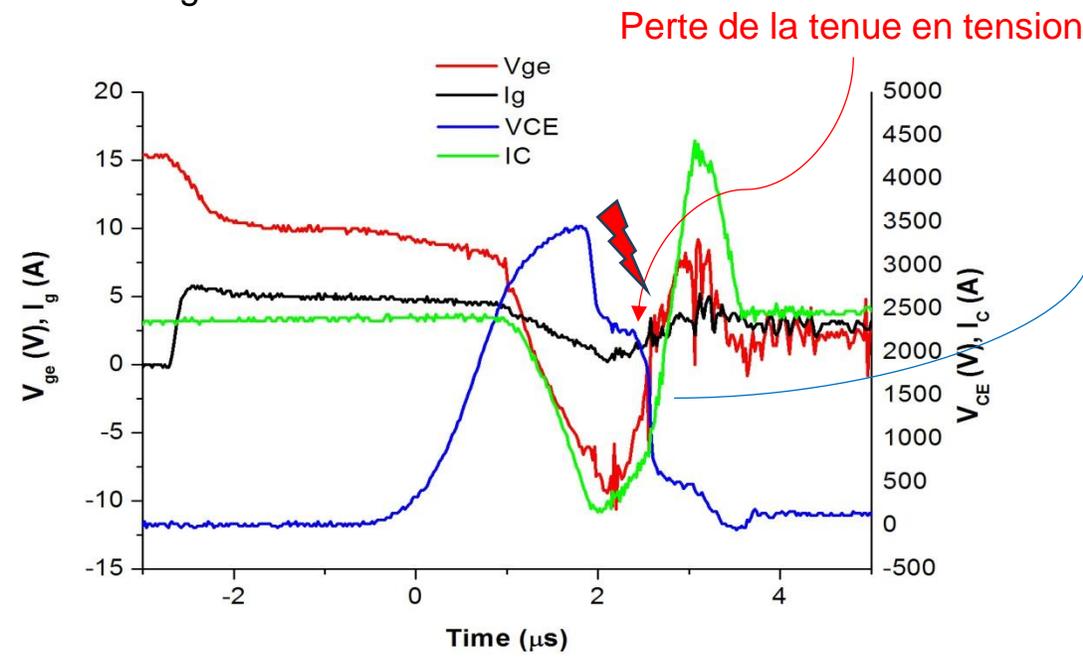


Cas extrême (protection en court-circuit non opérante)

Propagation de la défaillance dans un module multi-puces

- La défaillance se traduit par une perte brutale de la tenue en tension de la puce
- Le transitoire généré au moment de la casse met à conduire les puces en parallèle dans le module

Blocage IGBT 3300 V @ 2500 A - 2000 V





Essais environnementaux

- **Prise en compte des différents effets dynamiques sur des profils complexes**
- **Combinaison des profils environnementaux avec les profils opérationnels des convertisseurs**
- **Application du modèle de Peck étendu**
- **Impact des gaz corrosifs (facteur d'accélération, modèle ?)**

Impact radiation

- **Difficulté d'observation des casses en service liées aux rayons cosmiques**
- **Introduction du SiC : faut-il prendre en compte d'autres effets (sur la grille) ?**

→ Importance fondamentale des travaux collaboratifs et du partage des connaissances sur les mécanismes de défaillance

NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

merci pour votre écoute !

Organisé par :

