



Platform of Reliability tOOLs for Failure analysis  
dedicated to wide bandgap devices

# Verrous scientifiques dans l'étude des interrupteurs de puissance grand-gap - outils et méthodes d'analyses requis

David Trémouilles

COS PROOF

4 février 2021



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



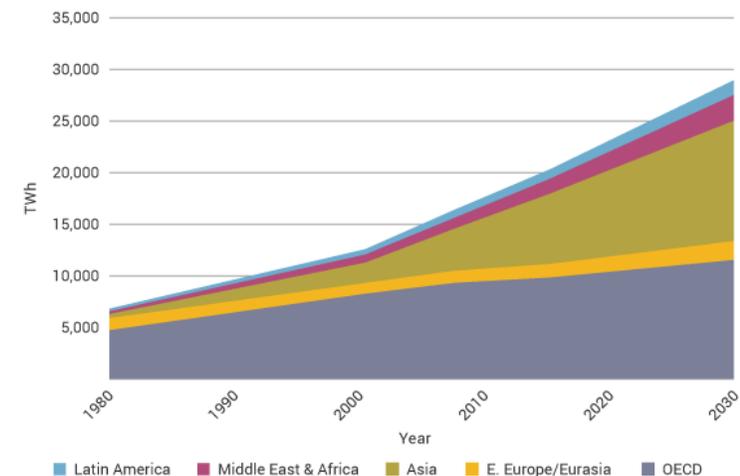
# L'électronique de puissance, un domaine clé

## *Forte demande sociétale en matière d'environnement et d'énergies renouvelables*

- > COP 21 (dec.2015 Paris) « A Global Climate Agreement Has Been Reached »
- > Horizon 2020 (H2020) & Horizon 2030 (H2030)
  - 20% (40%) reduction of GHG emission in 2020 (2030)
  - 20% (30%) energy efficiency improvement in 2020 (2030)
  - 20% (27%) increase in the part of renewable energies in 2020 (2030)

- Croissance économique des pays en développements
- Électrification des transports et du chauffage
- Aujourd'hui 40% de la consommation énergétique est électrique, 60 % d'ici 2040

World Electricity Consumption by Region



Source: OECD/IEA World Energy Outlook 2009 - Reference Scenario

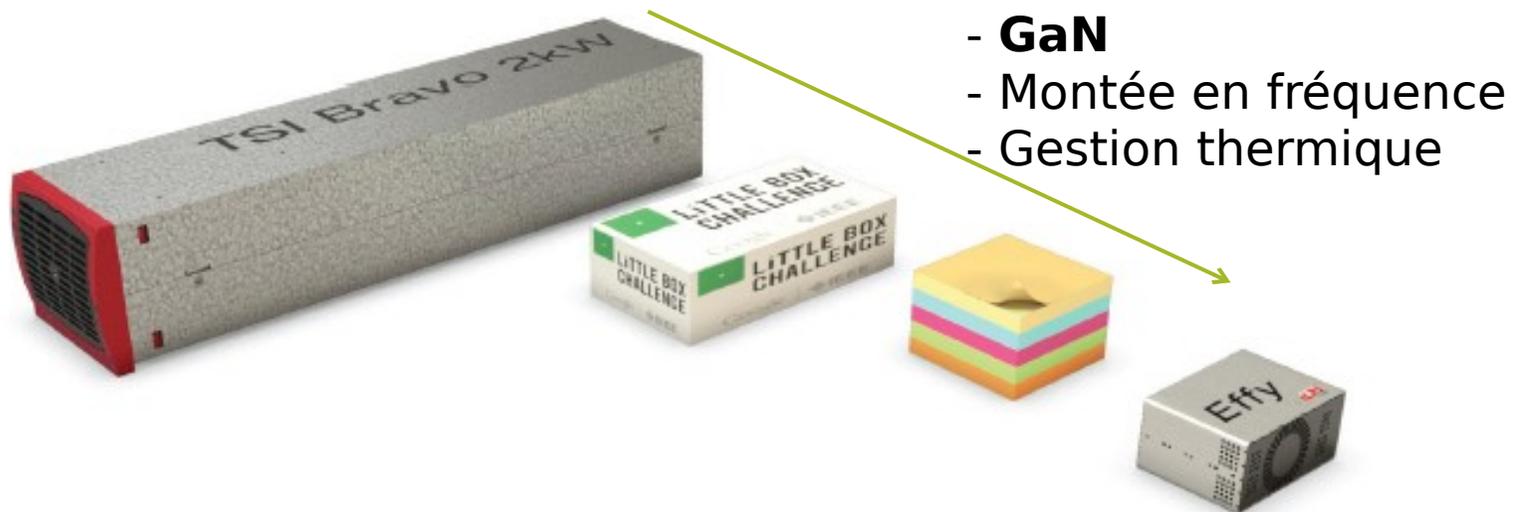
- **Des interrupteurs haute tension, haute fréquence, haute température et faibles pertes** sont nécessaires pour une **gestion optimisée de l'énergie**



*Leading AC Backup Technology*

# LITTLE BOX CHALLENGE

HOW WE RESPONDED ...



- **GaN**
- Montée en fréquence
- Gestion thermique

# Interrupteurs grand-gap : key enabling technologies

- Faible résistance à l'état passant pour une **forte tension** bloquée
- Composant haute tension compact, permet des **commutations rapides**, pertes réduites
- Fonctionnement permis à plus **haute température**
- Pour des bénéfices majeurs au niveau des systèmes
  - Conversion plus efficace
  - Passifs (capacité, inductance) de beaucoup plus faible encombrement
  - Taille et masse réduites pour les convertisseurs



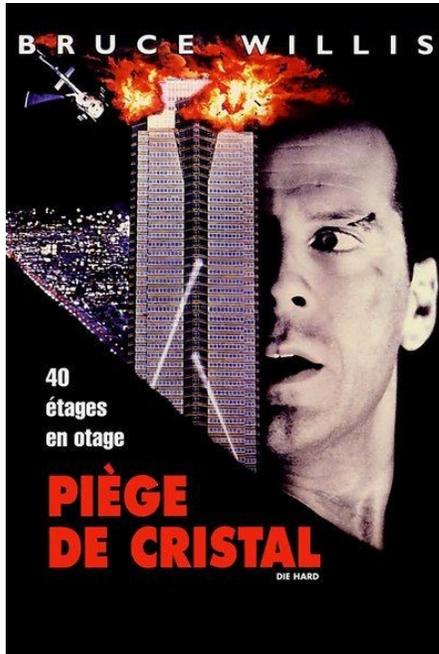
Enabler of innovative systems  
Huge material and energy savings

# Interrupteurs grand-gap

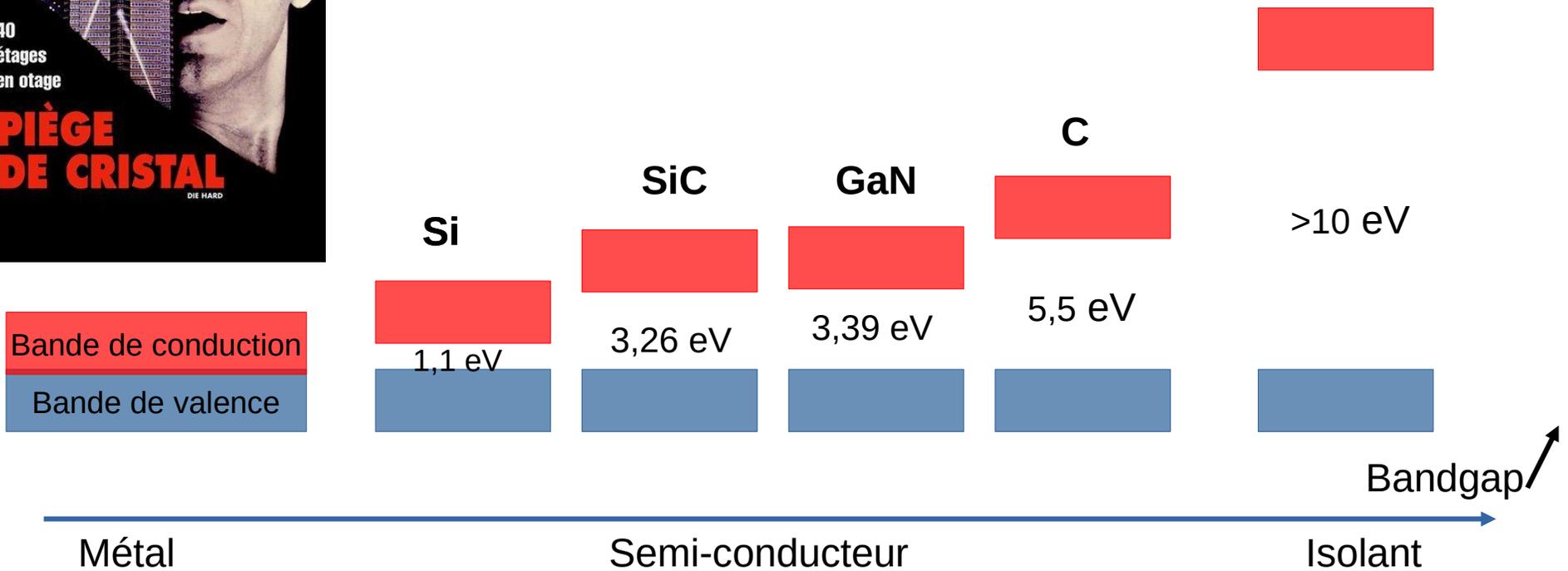
- Aujourd'hui des bases solides,
- mais des champs encore peu explorés en termes
  - de robustesse,
  - de fiabilité et
  - de compréhension fine des mécanismes
- En quoi les grands-gap seraient-il différents du silicium ?
  - Toujours des semi-conducteurs donc même physique, non ?
  - Oui, mais des propriétés différentes et...

# Grand-Gap :

## De plus en plus de place pour les pièges



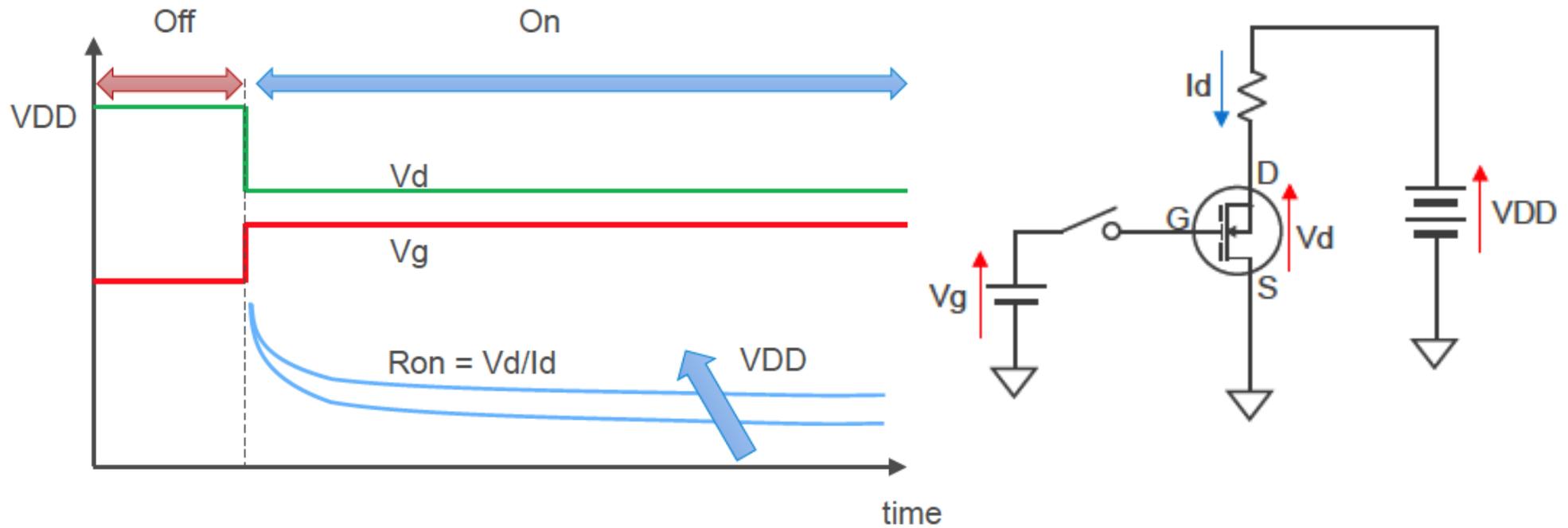
Plus un piège est profond, plus les **cinétiques électriques** associées risquent d'être **lentes**.



# Plan

- $R_{on}$  dynamique
- Instabilité de la tension de seuil
- Mécanismes physiques spécifiques

# $R_{ON}$ dynamique



- Immédiatement après le passage à l'état ON, la résistance à l'état passant ( $R_{ON}$ ) peut rester relativement haute pendant plusieurs microsecondes (voir plus...)

# Banc Ron dynamique LAAS aujourd'hui

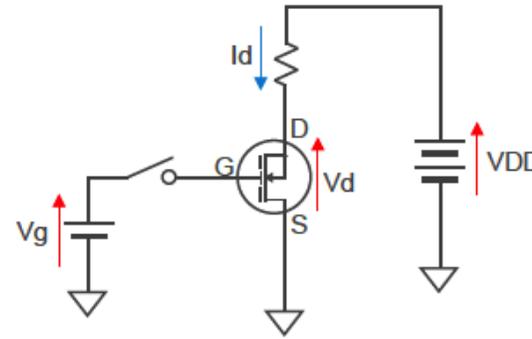
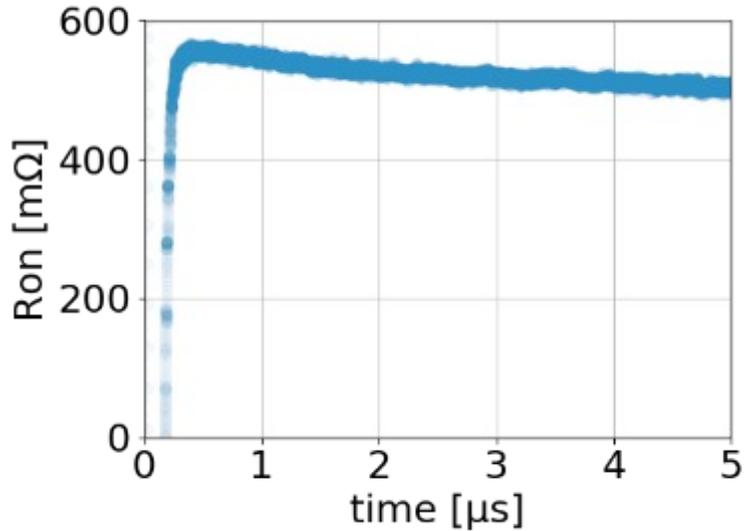
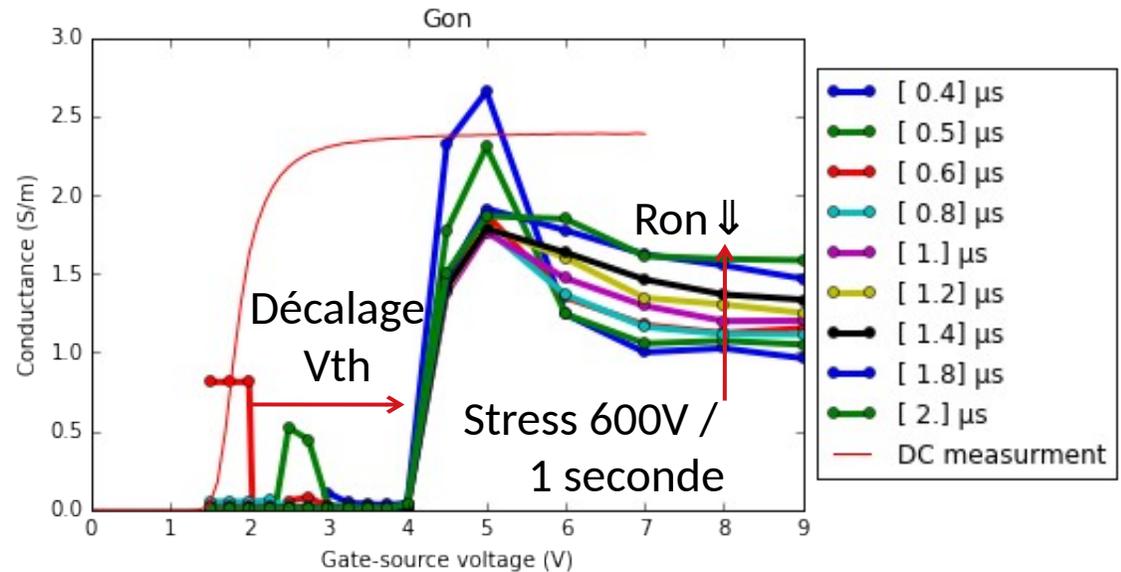


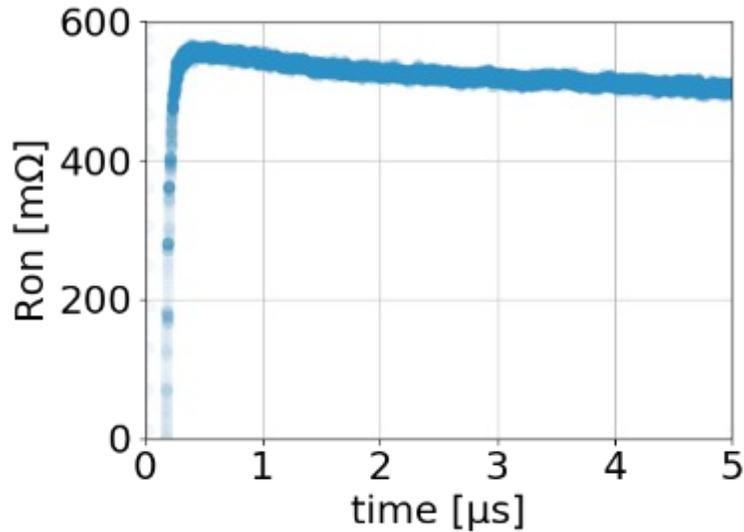
Figure de mérite:

$$V_{MAX}(V) / \text{temps avant mesure précise (ns)}$$

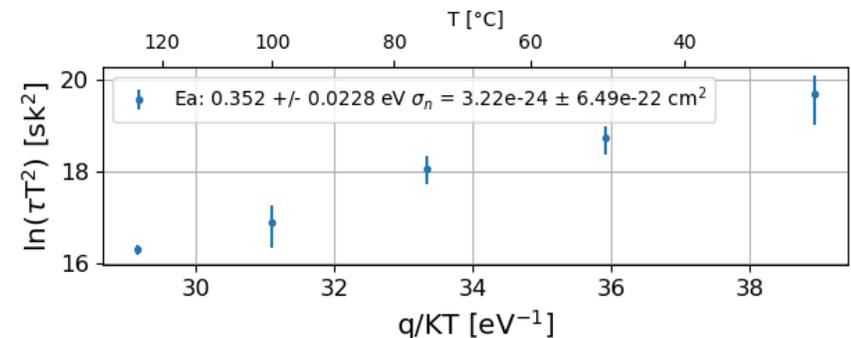
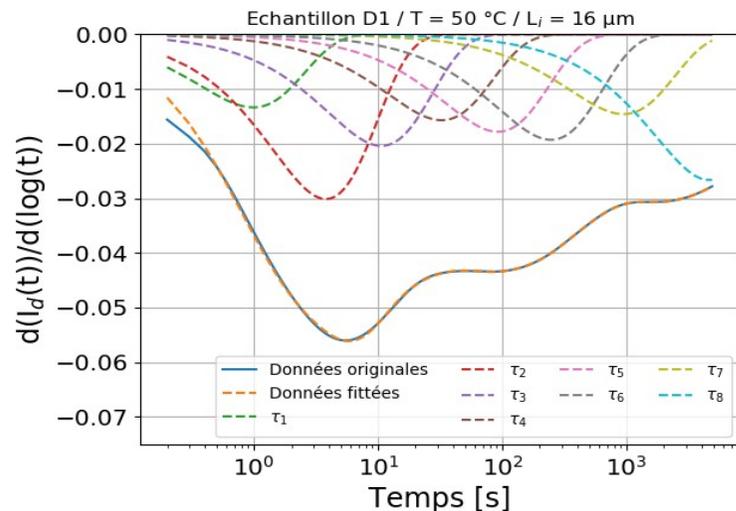
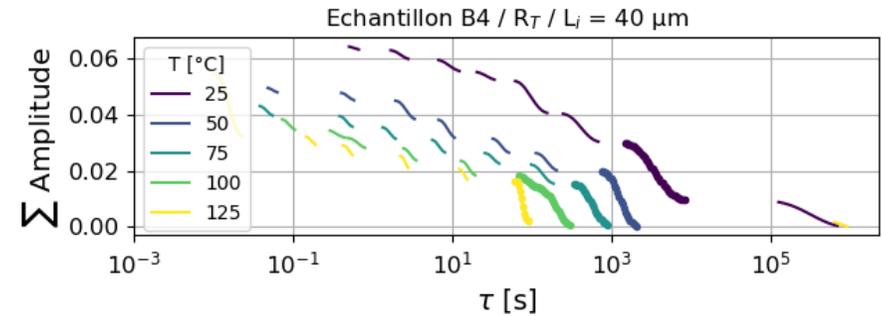
1kV / 100ns



# Outils numériques pour l'analyse des variations et extractions des énergies d'activation



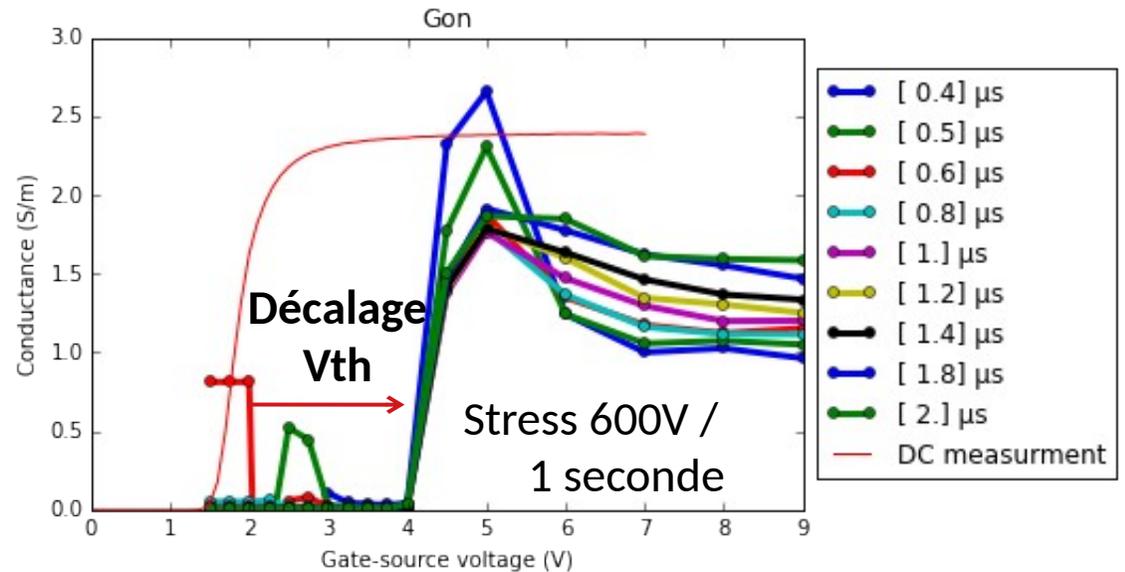
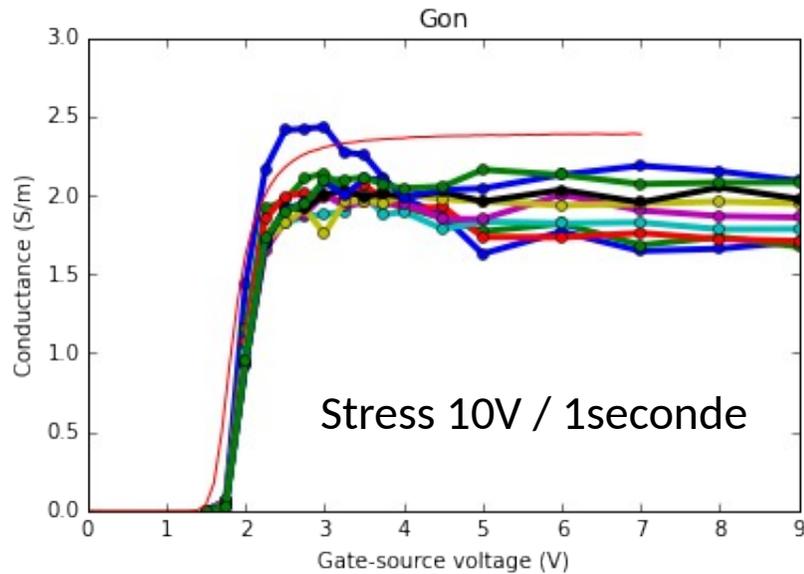
$$G_T(t) = \sum_{i=1}^n G_i e^{-t/\tau_i} + G_\infty$$



Utilisés aussi avec la méthode de stimulation optique

# Plan

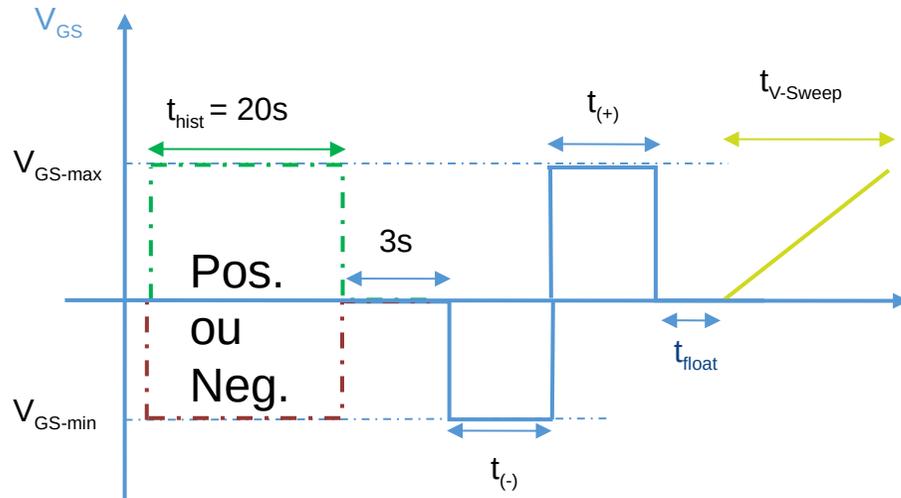
- $R_{on}$  dynamique
- **Instabilité de la tension de seuil**
- Mécanismes physiques spécifiques



# Instabilité du $V_{th}$ dans les MOSFET SiC

- Instabilité liée aux pièges proches de l'interface SiC / oxyde de grille
- Engendre des variations de  $V_{th}$  de **plusieurs centaines de mV** en fonction de l'historique de polarisation de la grille
- Cette variation peut être étudiée grâce à des **mesures** :
  - De **cycles d'hystérésis** du  $V_{th}$  ou de la capacité de grille
  - **Temporelles** de conductance (similaire à  $R_{on}$  dynamique)
  - **Temporelles** de variation de capacité (similaire à DLTS)

# Obtention d'une mesure $V_{th}$ robuste pour suivre les études de fiabilité – utilisation d'un pré-conditionnement



Projet SiCRET  
Post-Doc Dany HACHEM

- L'utilisation de la mesure de  $V_{th}$  pour le suivi des dégradations dans une étude de fiabilité requiert une mesure insensible à l'historique de polarisation
- Mise au point d'une séquence au **timing parfaitement maîtrisé** incluant un **pré-conditionnement**
- Mesure optimisée : variation de  $V_{th}$  de  $\pm 5mV$
- Mesure sans précaution : variation de  $\pm 500mV$

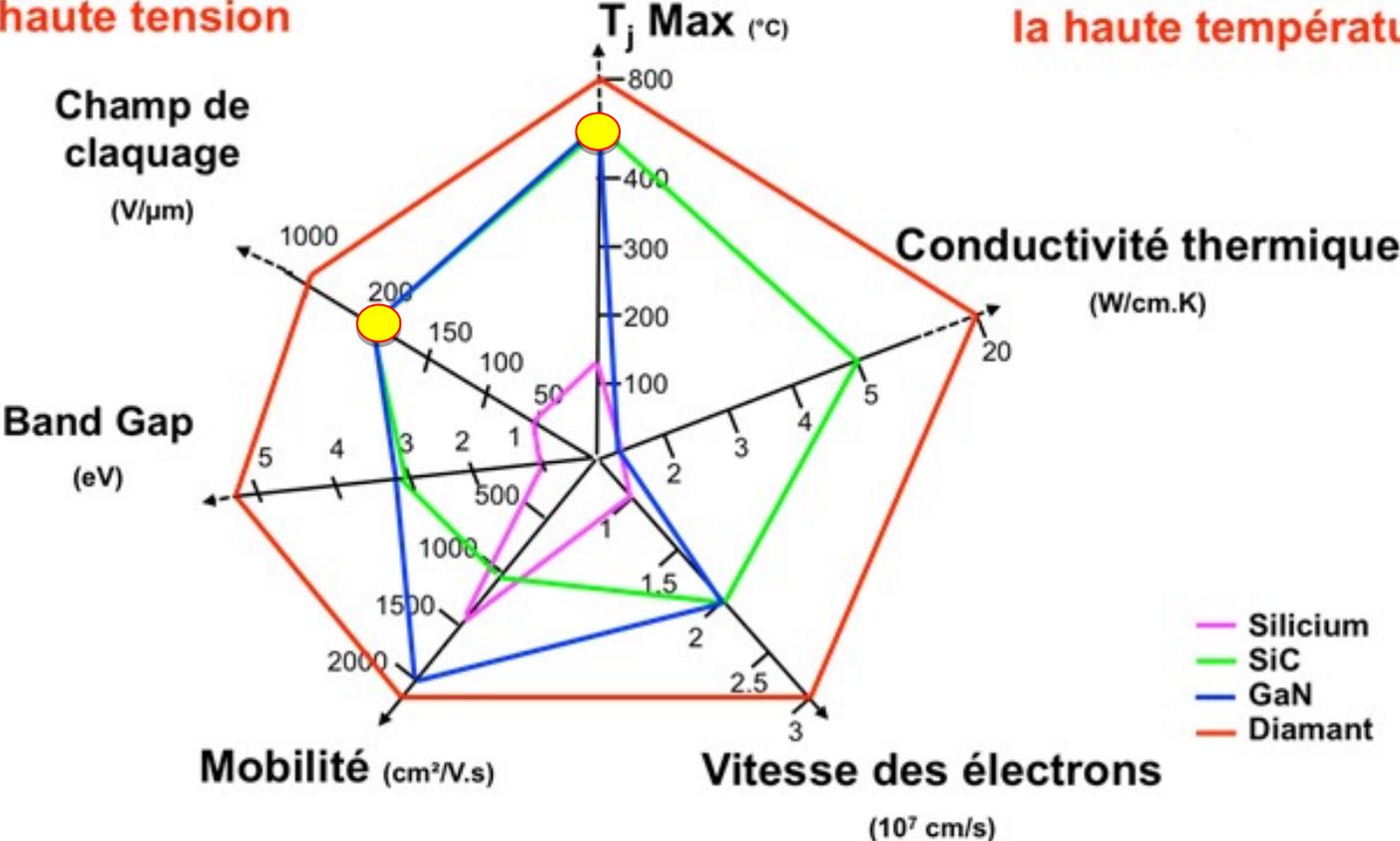
# Plan

- $R_{on}$  dynamique
- Instabilité de la tension de seuil
- **Mécanismes physiques spécifiques**

# Des qualités exceptionnelles pour l'électronique de puissance

Fonctionnement pour la haute tension

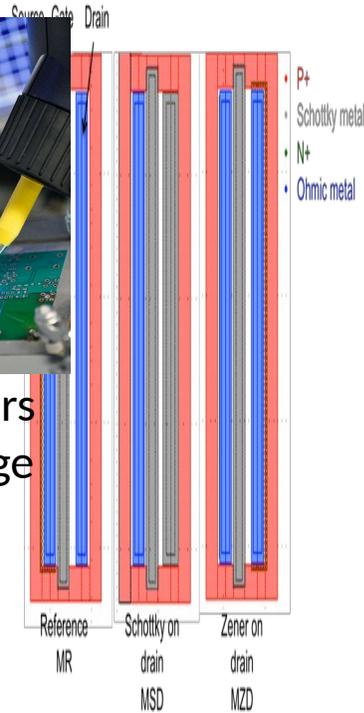
Fonctionnement pour la haute température



Fonctionnement pour la haute fréquence

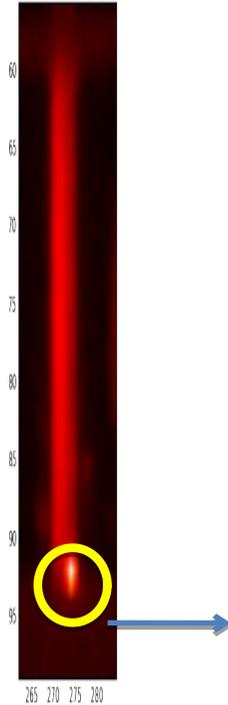
Mais qui induisent des mécanismes (de défaillances) qui peuvent être différents de ceux dont on est habitué dans le silicium.

# Étude robustesse ESD de composants SiC

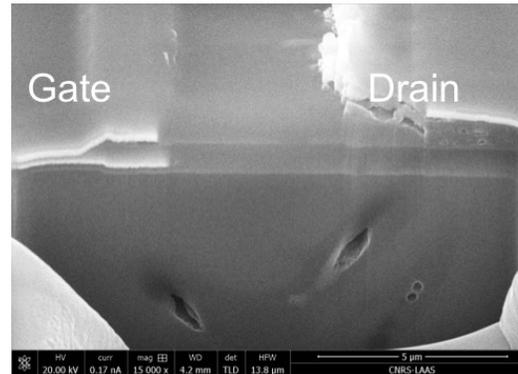


Générateurs de décharge

Design des composants



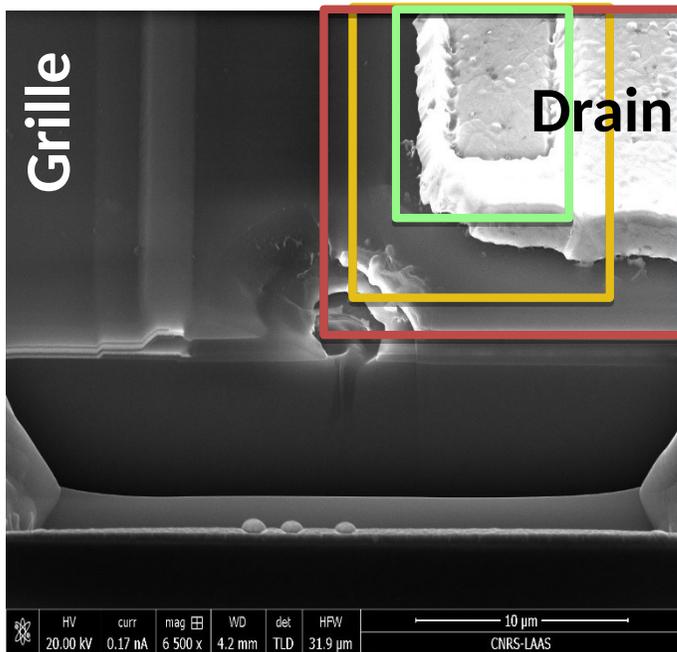
Anomalie dans la réponse LIT



Thèse Tanguy Phulpin (2016) - LIA Widelab

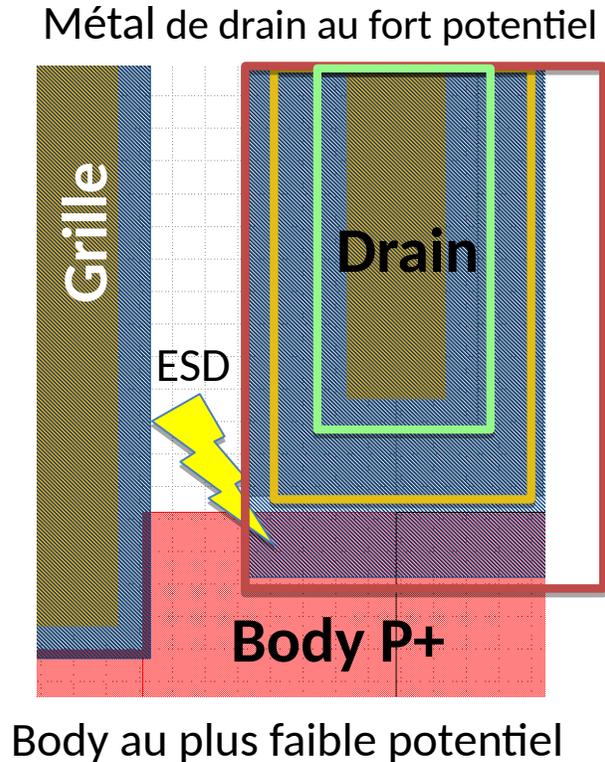
- Robustesse intrinsèque faible
- Deux types de défaut, fonction de la géométrie et de la technologie du composant

# 1<sup>er</sup> type de défaut : claquage du diélectrique



Photographie au MEB après une coupe FIB sur un MR défaillant

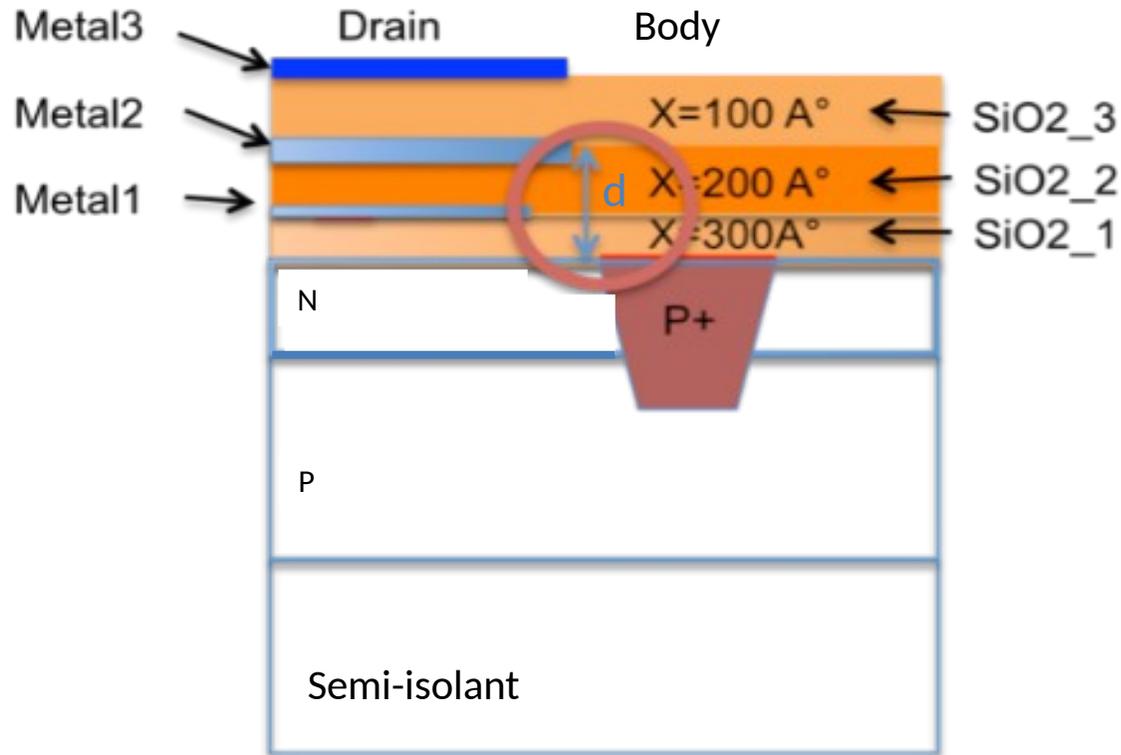
- Via
- Metal 1
- Metal 2
- contact



Body au plus faible potentiel

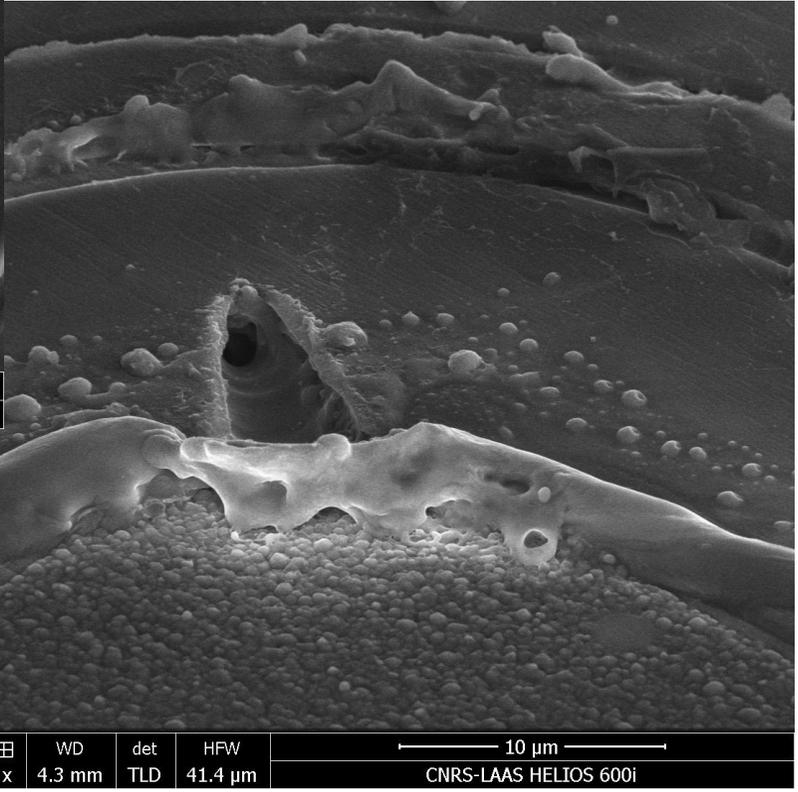
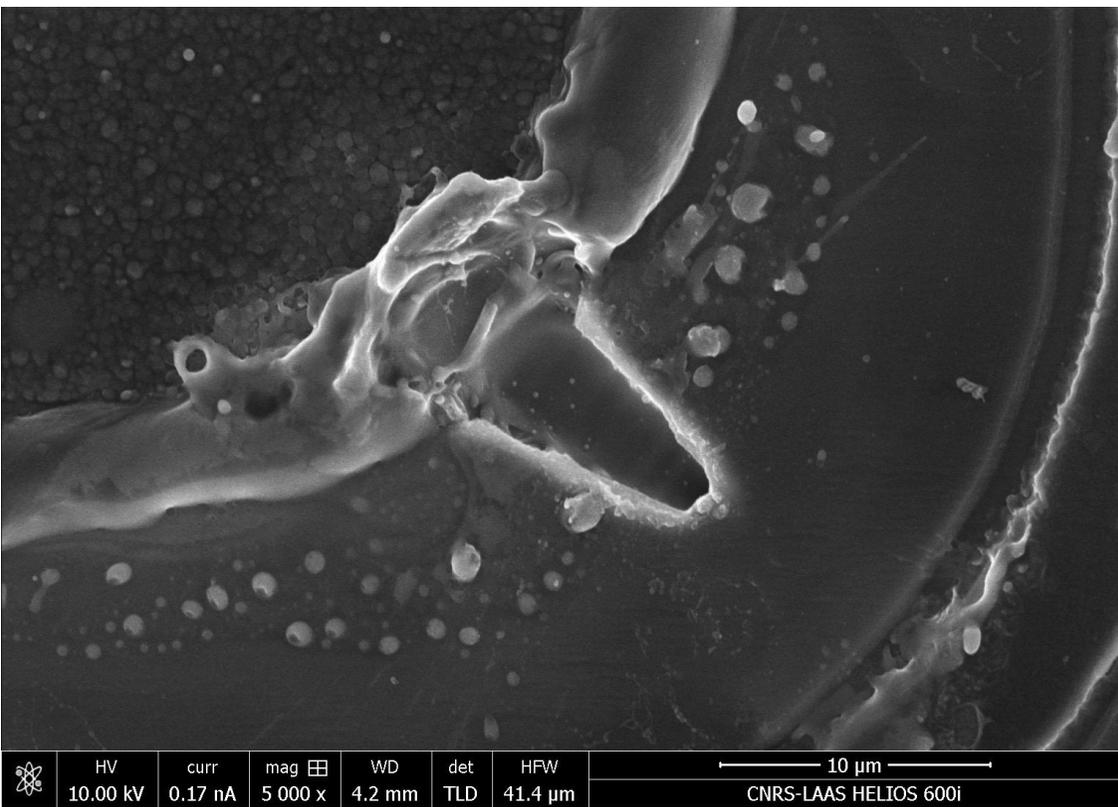
# Le SiO<sub>2</sub> ne peut soutenir le champ appliqué

Dégradation de l'oxyde suite à un trop fort champ électrique



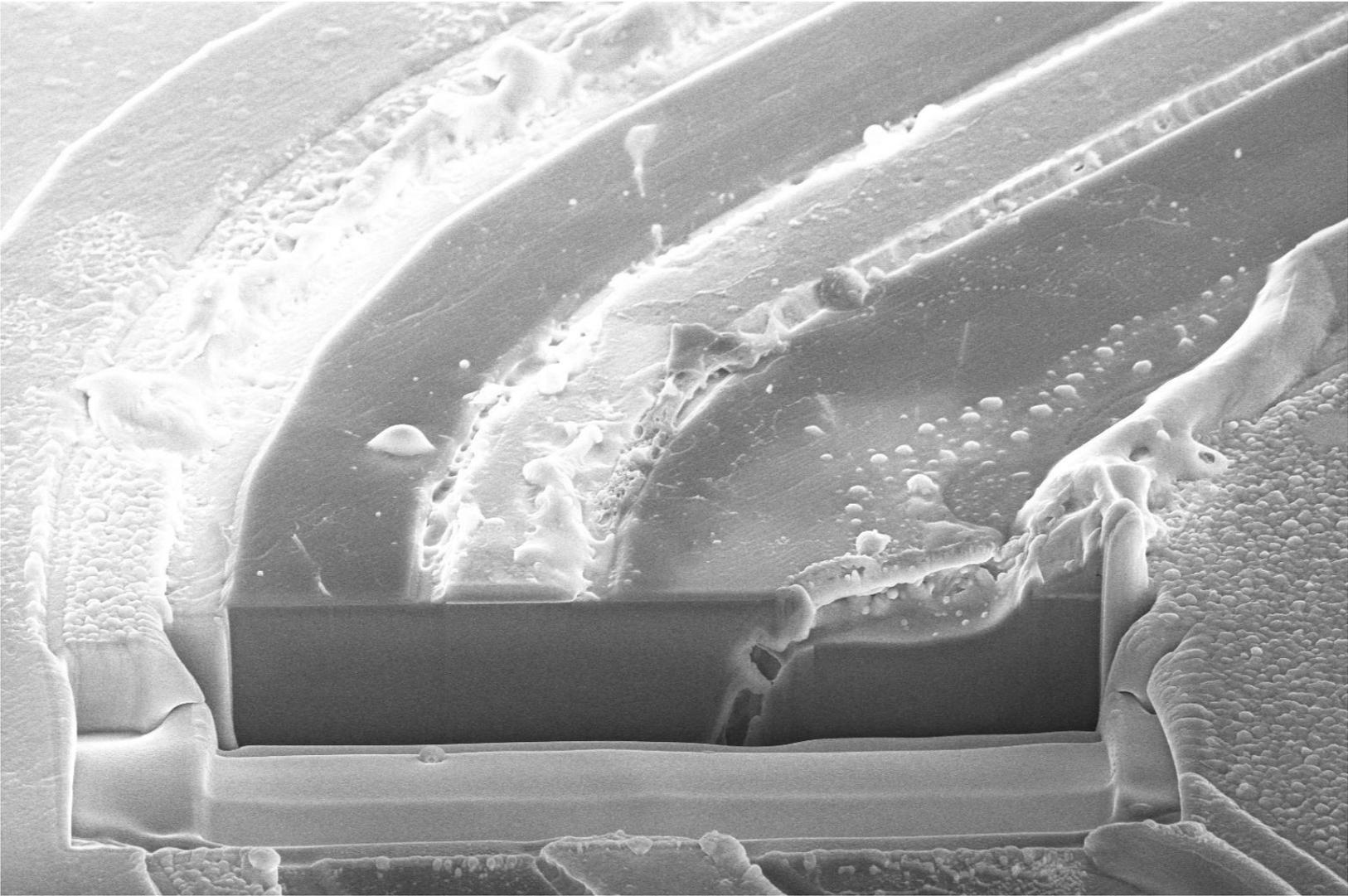
- Champ de rupture du SiO<sub>2</sub> à RT autour de 5 MV/cm, d=0,5 μm  
La tension soutenue par le diélectrique autour de 250V

# 2<sup>nd</sup> type de défaut : sublimation du SiC



Sublimation du SiC  
lors de l'ESD (2700°C)

# 2<sup>nd</sup> type de défaut : sublimation du SiC



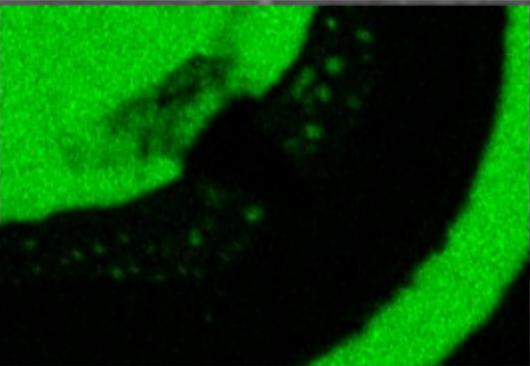
	HV 10.00 kV	curr 0.17 nA	mag  3 500 x	WD 4.3 mm	det TLD	HFV 59.2 μm	20 μm
							CNRS-LAAS HELIOS 600i

# 2<sup>nd</sup> type de défaut : sublimation du SiC

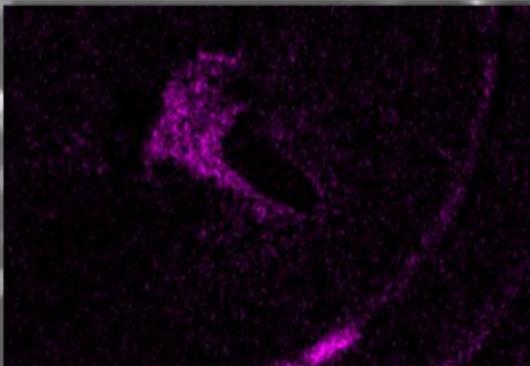
Al K series

Electron Image 1

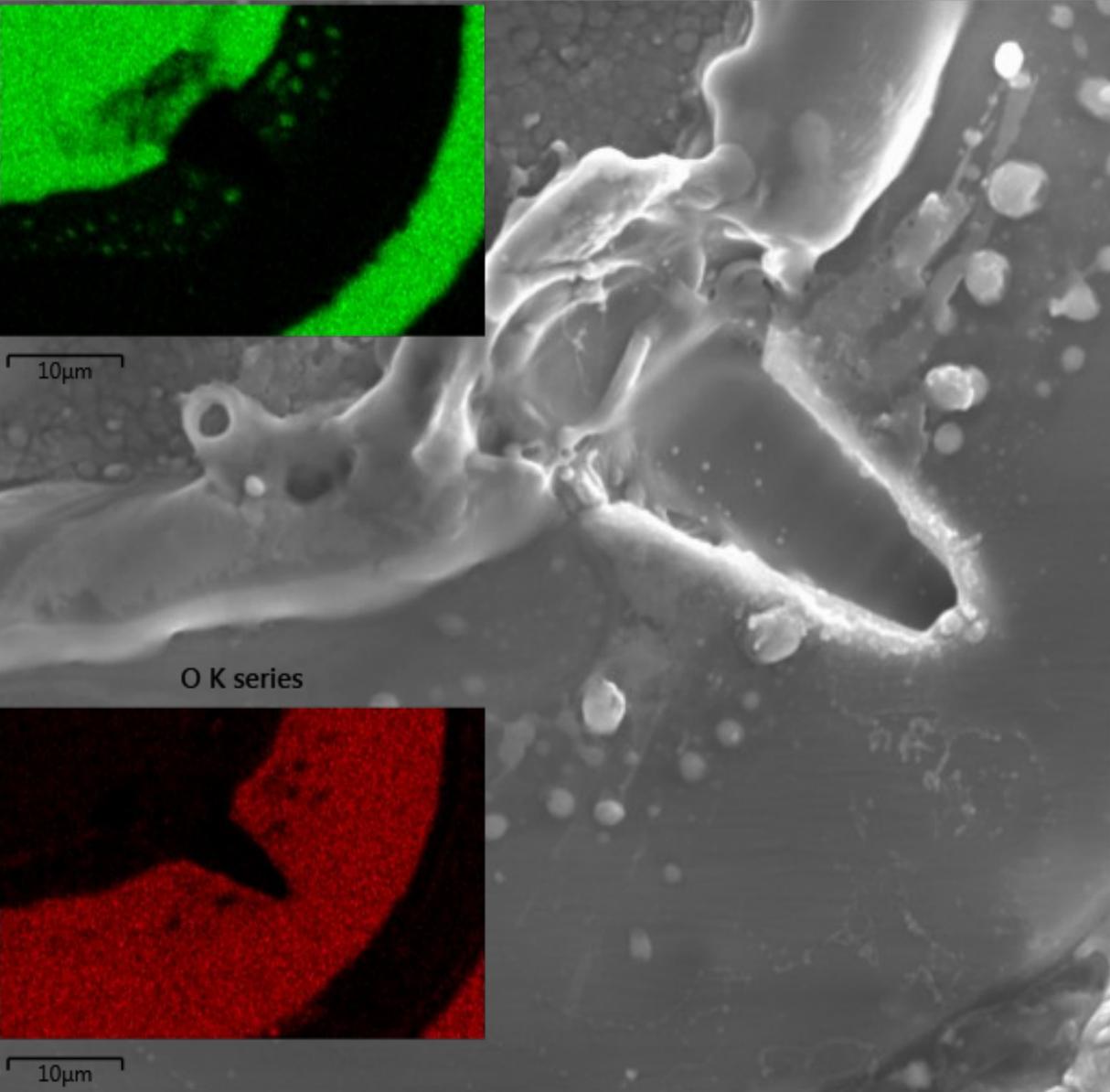
C K series



10µm

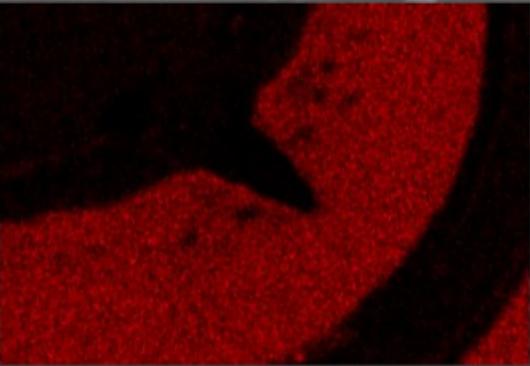


10µm

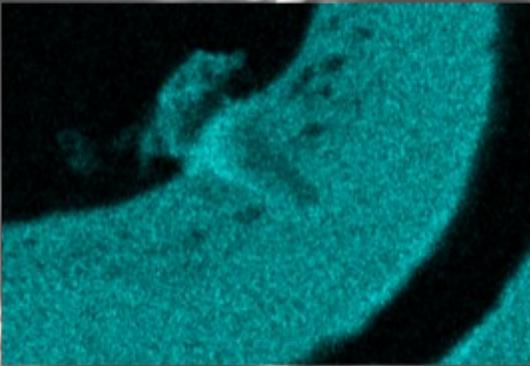


O K series

Si K series



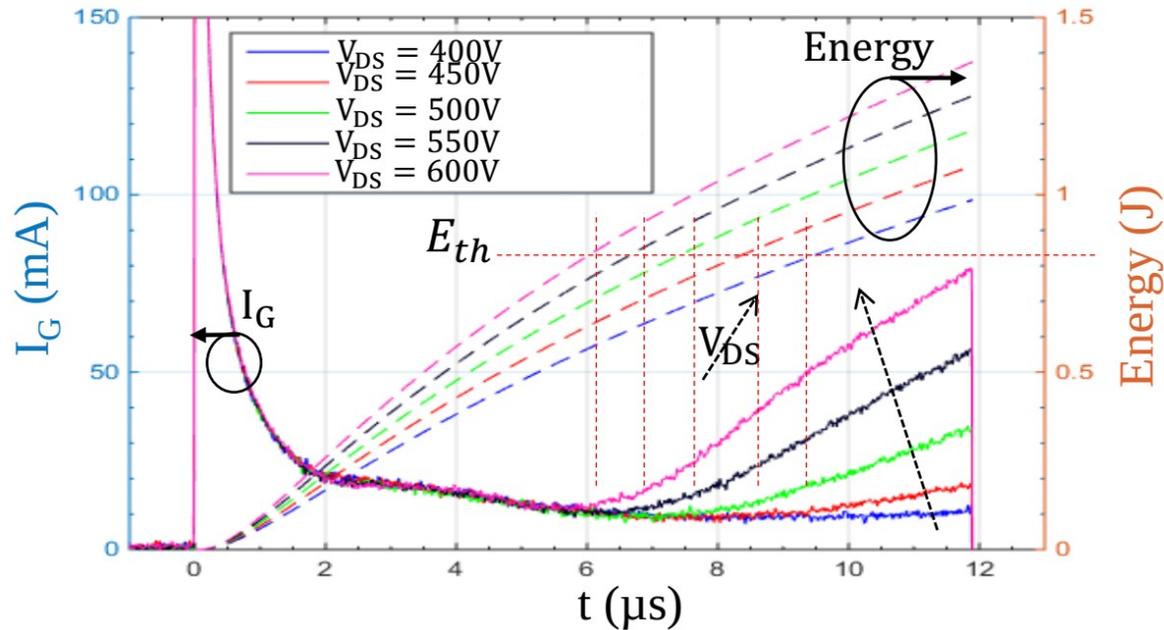
10µm



10µm

10µm

# Observation d'une « fuite de grille »

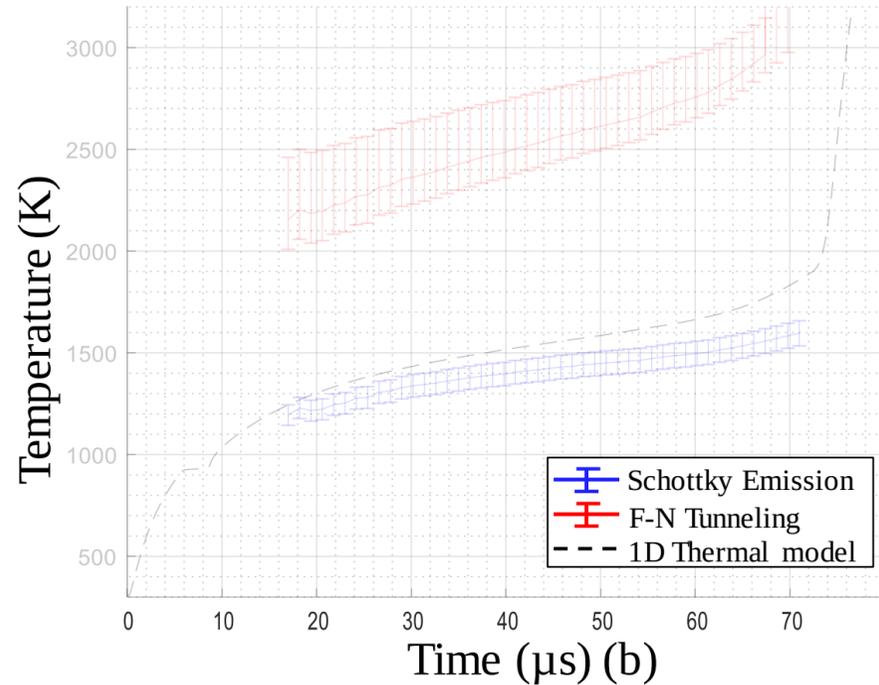
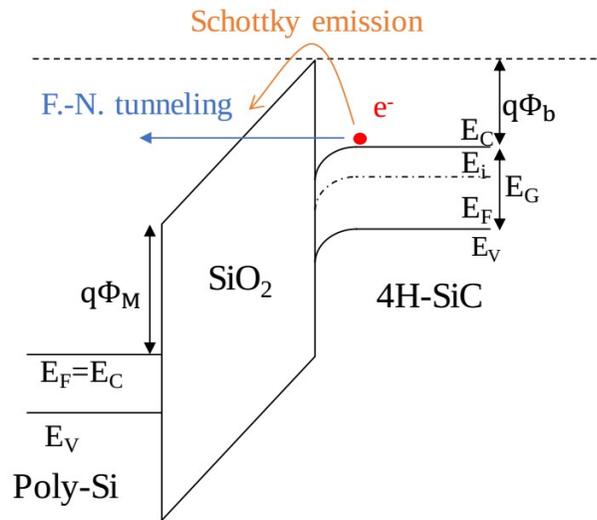
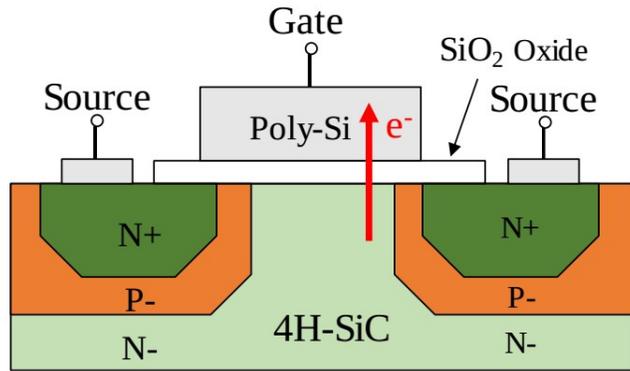


Composant B2 –  $R_G = 47\Omega$

- **Appariation d'un courant de grille pendant le court-circuit**
  - Il dépend de la polarisation de la grille ( $V_{gs}$ )
  - Il dépend de l'échauffement interne du composant ( $V_{ds}$ ) : **Notion d'énergie "seuil" (ou température seuil)**

[1] F. Boige et F. Richardeau, « Gate leakage-current analysis and modelling of planar and trench power SiC MOSFET devices in extreme short-circuit operation », *Microelectron. Reliab.*, vol. 76-77, n° Supplement C, p. 532-538, sept. 2017. 5

# Origine de la Fuite de grille en CC

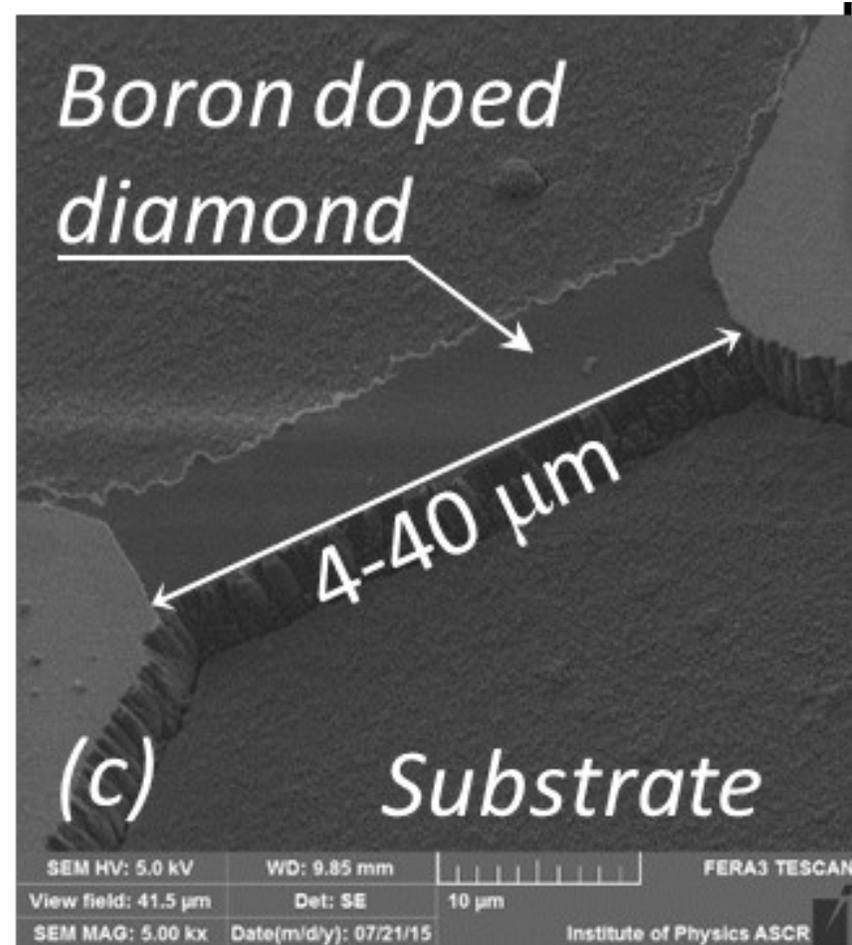
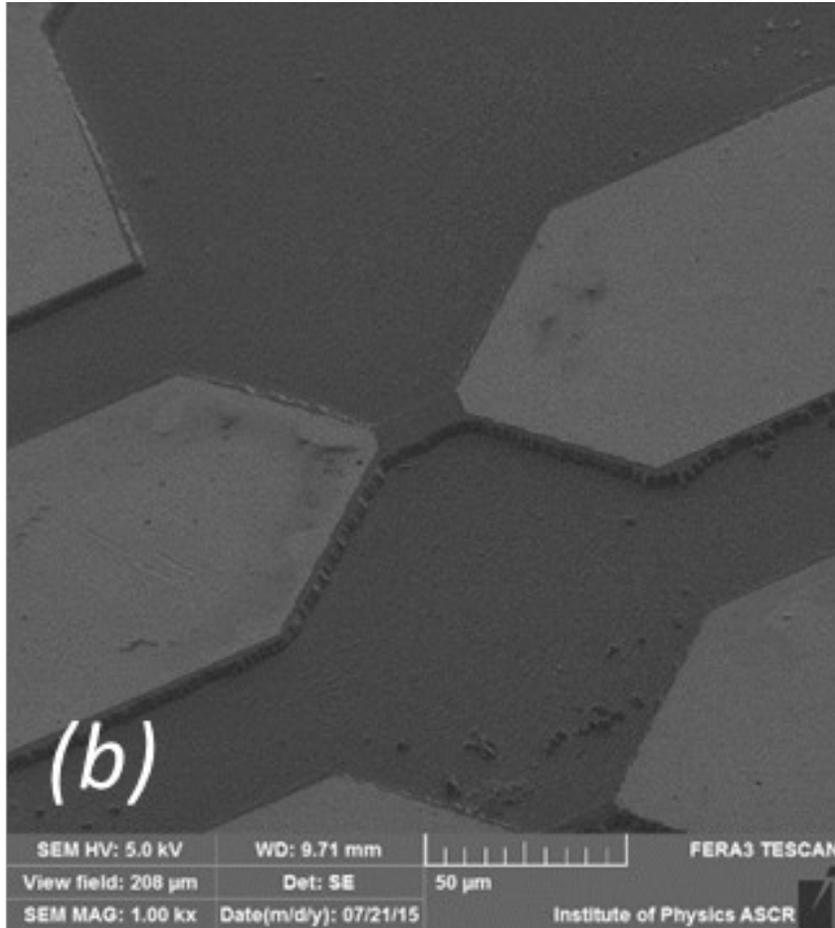


F. Boige, D. Trémouilles, et F. Richardeau, « Physical Origin of the Gate Current Surge During Short-Circuit Operation of SiC MOSFET », IEEE Electron Device Letters, vol. 40, no 5, p. 666-669, mai 2019.

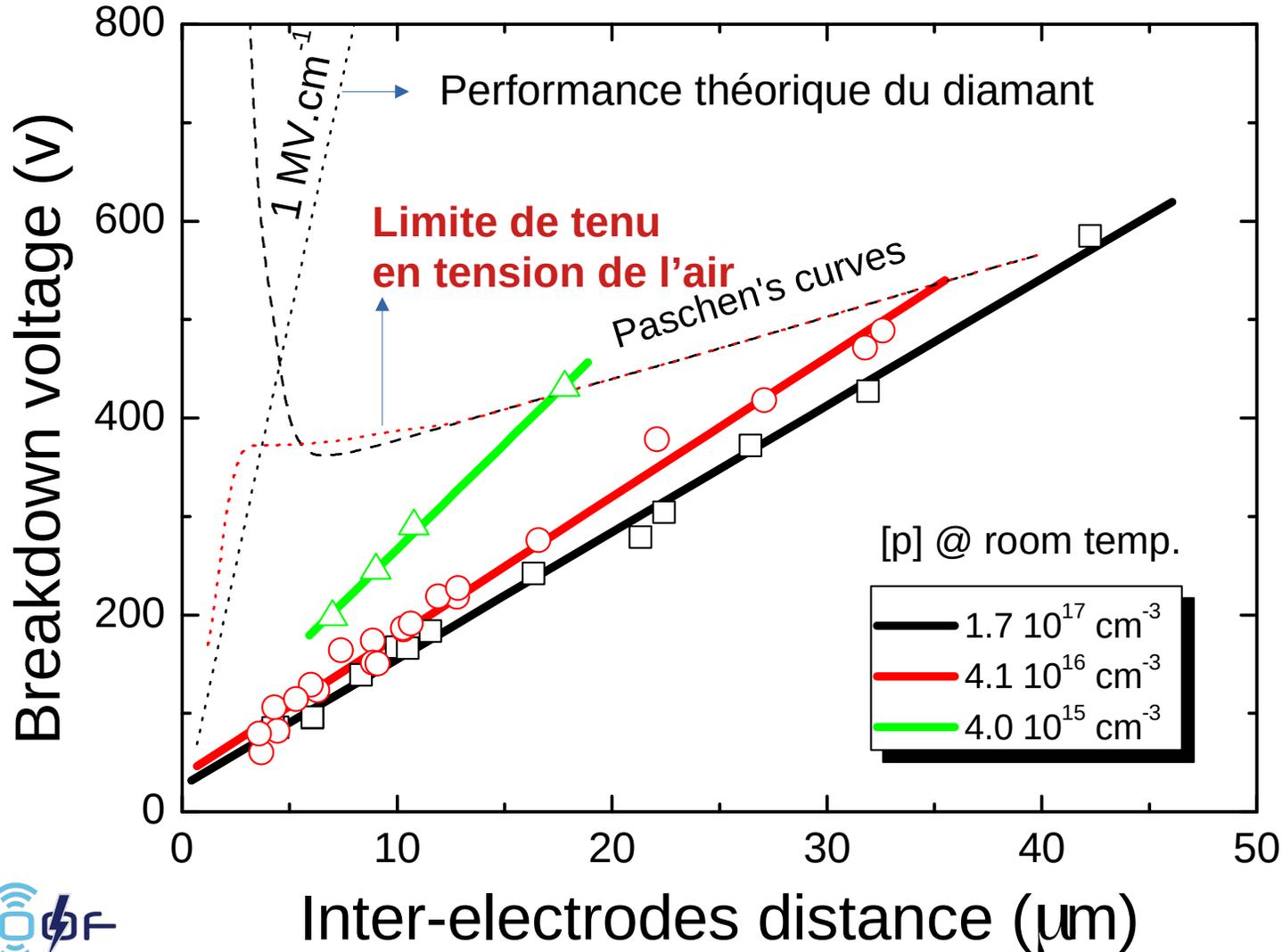
✕✕ Origine purement thermique du courant

(Émission Schottky)

# Étude de barreaux de diamant dopé Bore



# BV en fonction du dopage et de la distance inter-électrodes

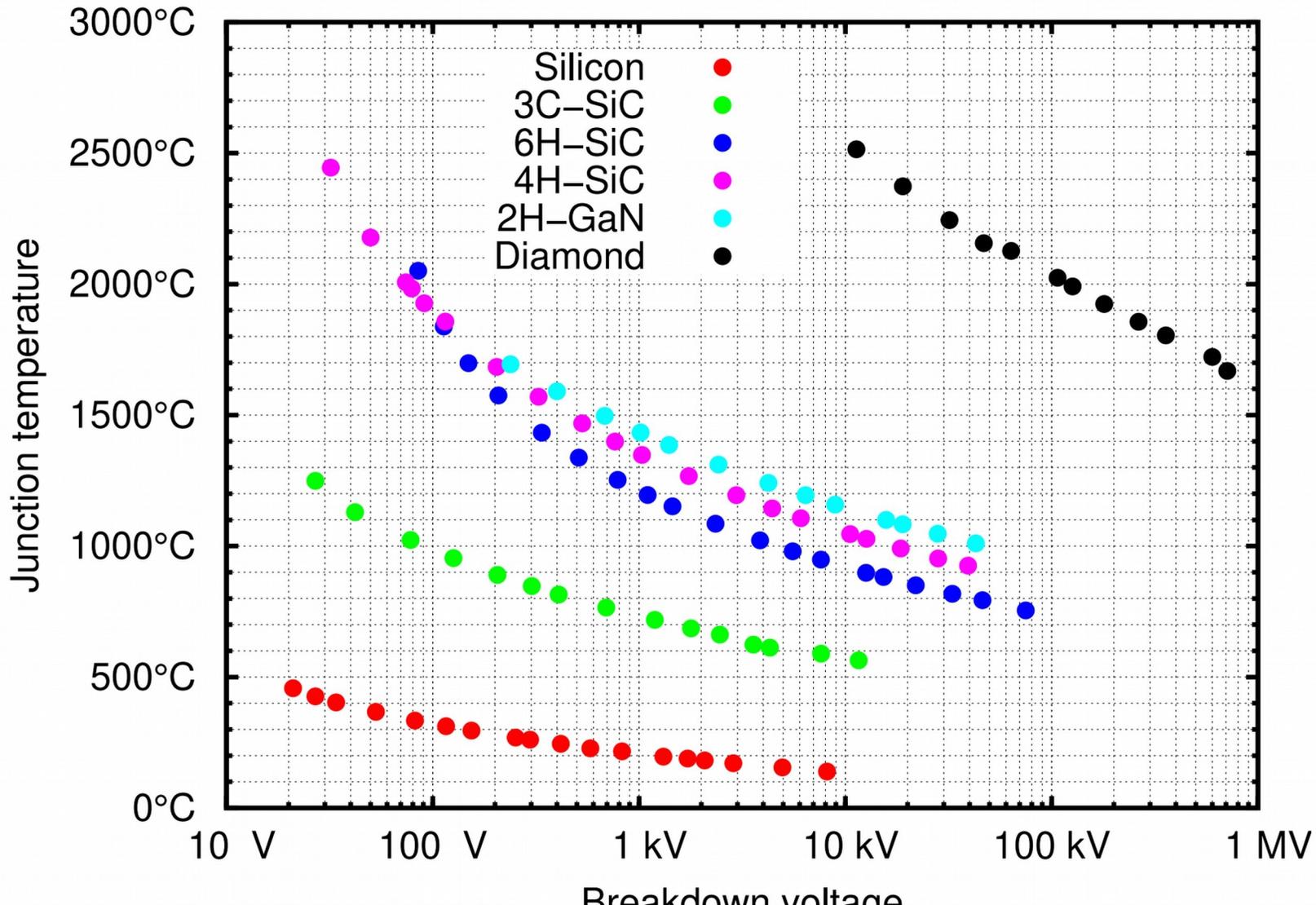


# Conclusion – spécificités des grand-gaps

- Certaines caractéristiques électriques distinctes / silicium  
Phénomènes électriques dynamiques liés à la présence de pièges
  - ✓ Ron dynamique,
  - ✓ Instabilité de la tension de seuil,
  - ✓ (qui peuvent aussi brouiller le suivi du vieillissement)
- Régimes extrêmes de fonctionnement  
Certains phénomènes physiques sensiblement différents de ceux du silicium
  - ✓ Report des contraintes sur les couches supérieures
  - ✓ Hautes températures et forts champs électriques
  - ✓ Pas de fusion, mais sublimation
- Besoin d'outils de caractérisations adaptés 

<sup>ox</sup> *Liste non exhaustive : autres aspects ?*

# Repousser les limites du silicium en température et tenue en tension



# Repousser les limites du silicium : surface réduite à Ron et BV identique

Figure de mérite de Baliga:

$$R_{ON} \cdot S = \frac{4 \cdot BV_{dss}^2}{\epsilon \cdot \mu_n \cdot E_C^3}$$

(pour les composants conventionnels)

