



# NRTW 2025

## National Reliability Technology Workshop

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

Effets des radiations sur les composants et systèmes électroniques embarqués: Des applications spatiales aux applications terrestres, tous concernés.

Françoise BEZERRA  
CNES

Organisé par :



# SOMMAIRE

- 01 CONTEXTE  
Environnement Radiatif Naturel
- 02 INTRODUCTION  
Interactions rayonnements/matière
- 03 EFFETS CUMULATIFS  
Effets de dose

- 04 EFFETS SINGULIERS  
Probabilistes
- 05 EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES  
Impact sur la sensibilité à l'ERN
- 06 CONCLUSION  
Quels effets redouter et moyens d'essais

# 01

## CONTEXTE

ENVIRONNEMENT RADIATIF NATUREL

# ENVIRONNEMENT RADIATIF SPATIAL

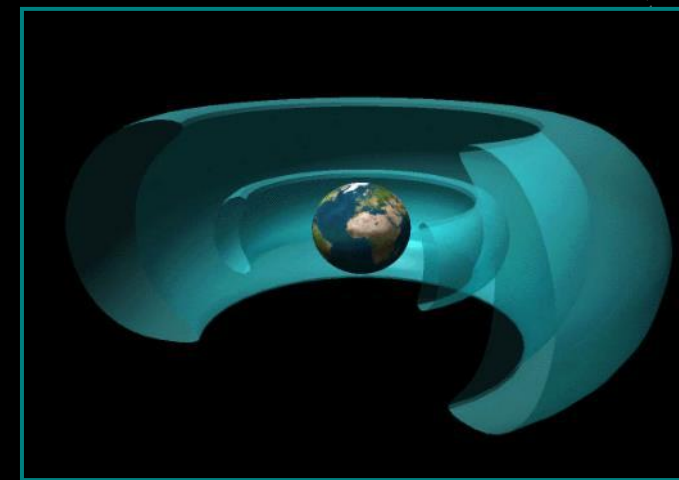
ENVIRONNEMENT  
RADIATIF NATUREL



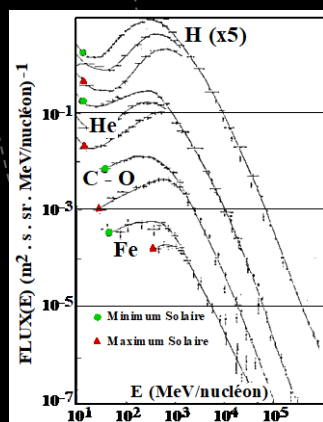
Rayons Cosmiques Galactiques



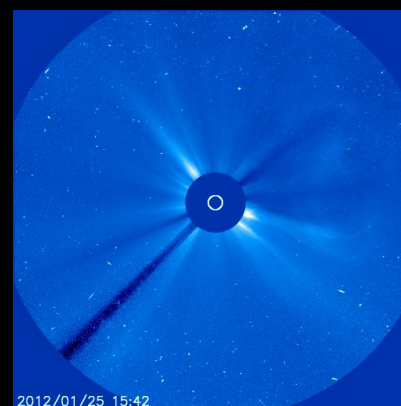
Soleil



Ceintures de Van Allen

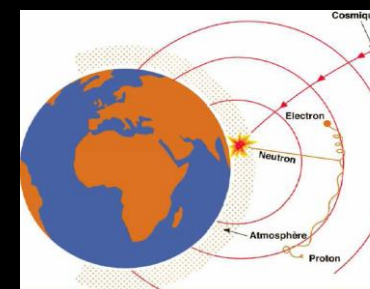


Ions lourds, protons  
Très énergétiques  
 $E_{\text{max}} > 10 \text{ GeV/u}$   
Abondance  
max  $\sim 300 \text{ MeV/u}$

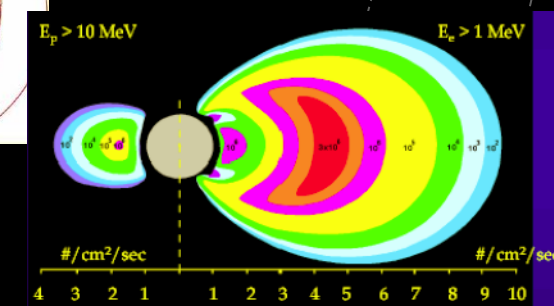


2012/01/25 15:42  
© SOHO/ESA/NASA

Cycle solaire 11 ans  
Vent solaire  
Eruptions:  
- CME (p+, ions)  
- SEP (p+ rapides)

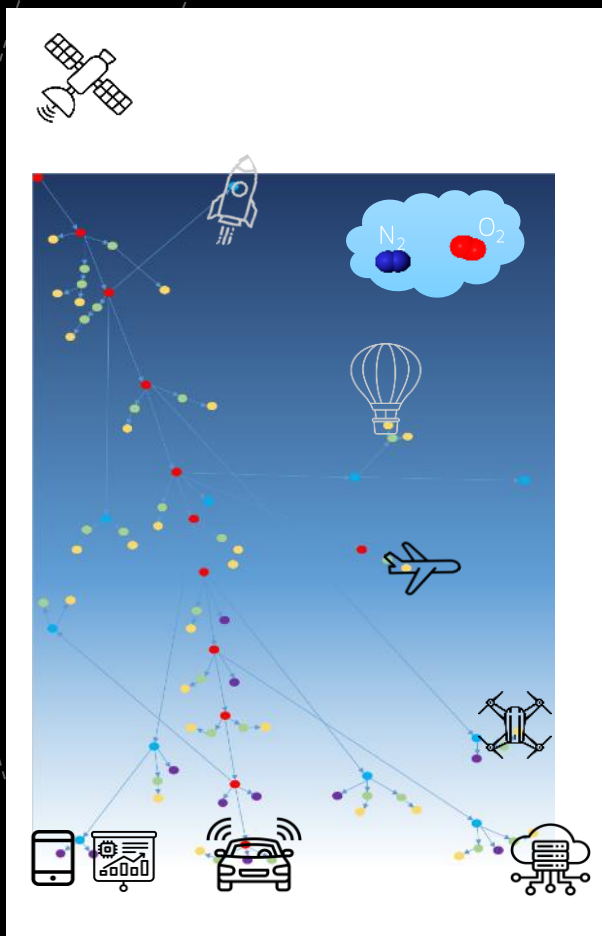


Protons et électrons piégés par  
le champ magnétique terrestre



# ENVIRONNEMENT RADIATIF ATMOSPHERIQUE

ENVIRONNEMENT  
RADIATIF NATUREL



Interaction de protons avec l'atmosphère

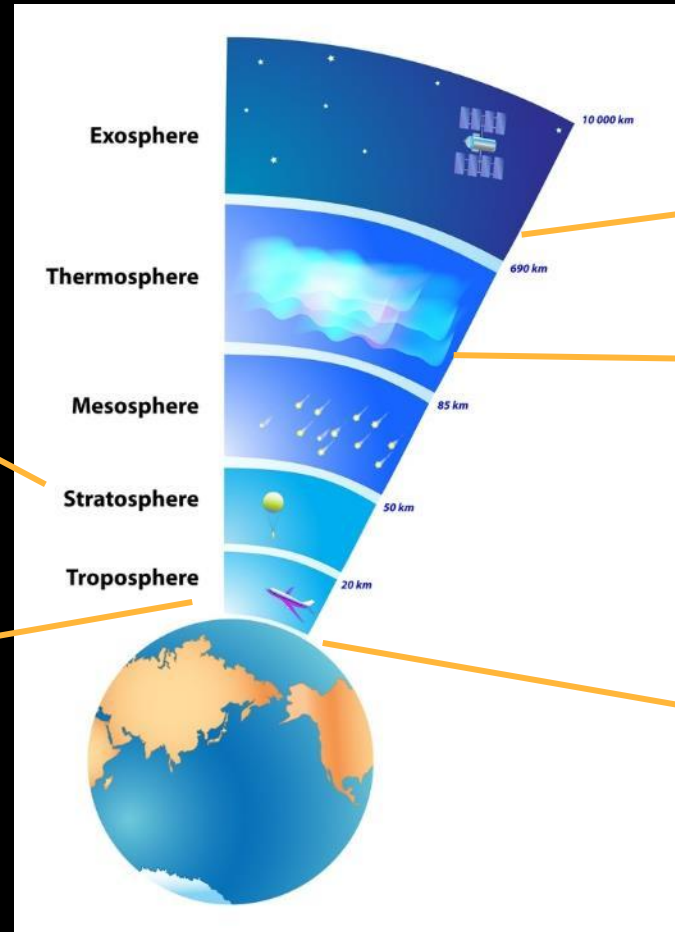
Gerbes/cascades de particules secondaires

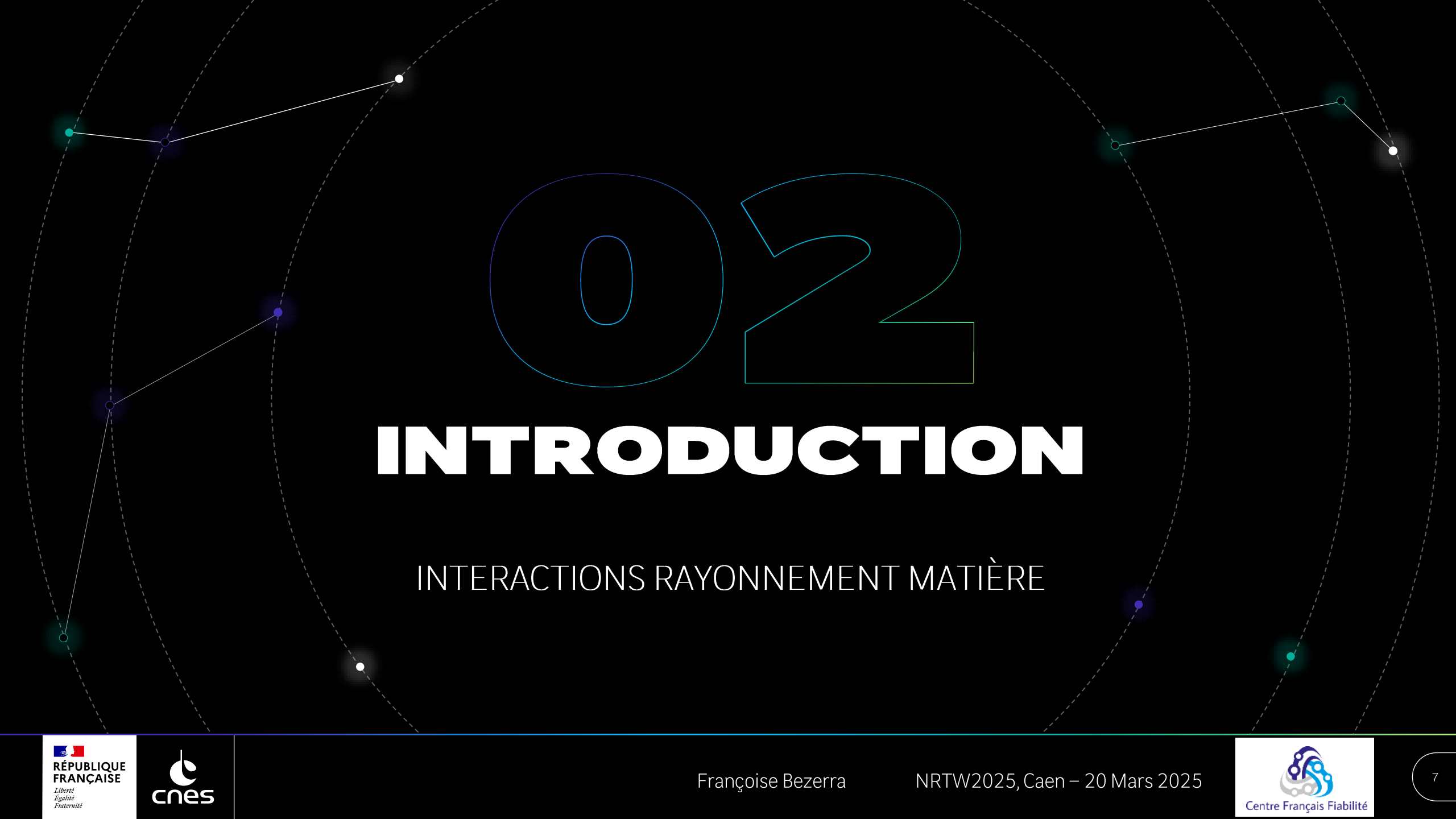
(protons, neutrons, muons, photons,...)



# ERN: TOUS CONCERNÉS

ENVIRONNEMENT  
RADIATIF NATUREL





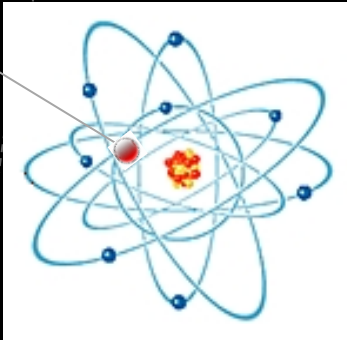
# 02

# INTRODUCTION

INTERACTIONS RAYONNEMENT MATIÈRE

# PERTE D'ÉNERGIE

INTERACTIONS  
RAYONNEMENT  
MATIÈRE



## Par interaction avec

### Le cortège électronique

(particules chargées)

- ⇒ Ionisation
  - ⇒ création de paires e<sup>-</sup>/trous

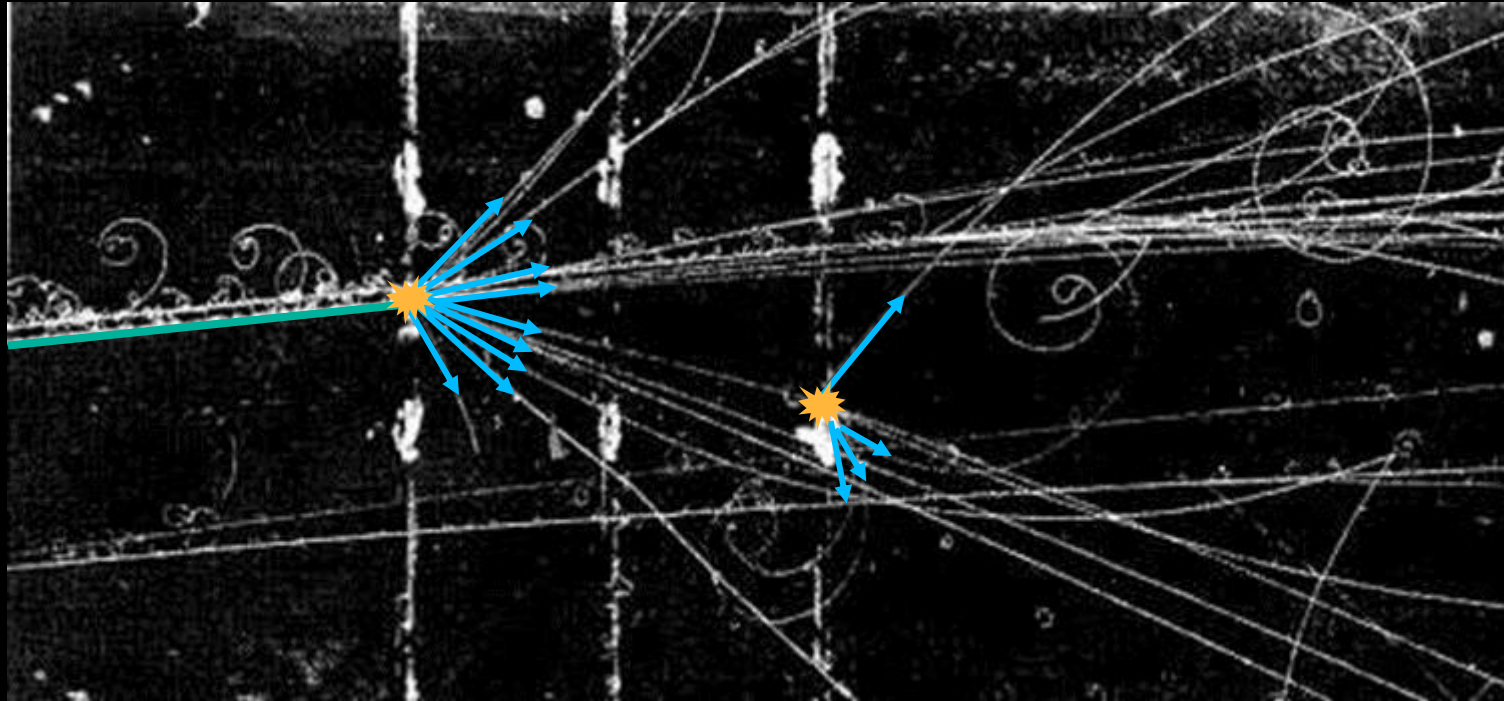
### Le noyau

- ⇒ Interaction nucléaire
  - ⇒ Noyaux de recul, particules secondaires
    - ⇒ Défauts de déplacements
    - ⇒ Ionisation

# ILLUSTRATION: CHAMBRE À BULLES

INTERACTIONS  
RAYONNEMENT  
MATIERE

Proton incident  
→



Trace laissée dans une chambre à bulles par un proton de haute énergie

- Ionisation directe
- Interaction nucléaire et production de particules secondaires
- Particules secondaires et Ionisation indirecte

La chambre est soumise à un champ magnétique, les trajectoires des particules sont courbées vers la gauche ou la droite selon leur signe.

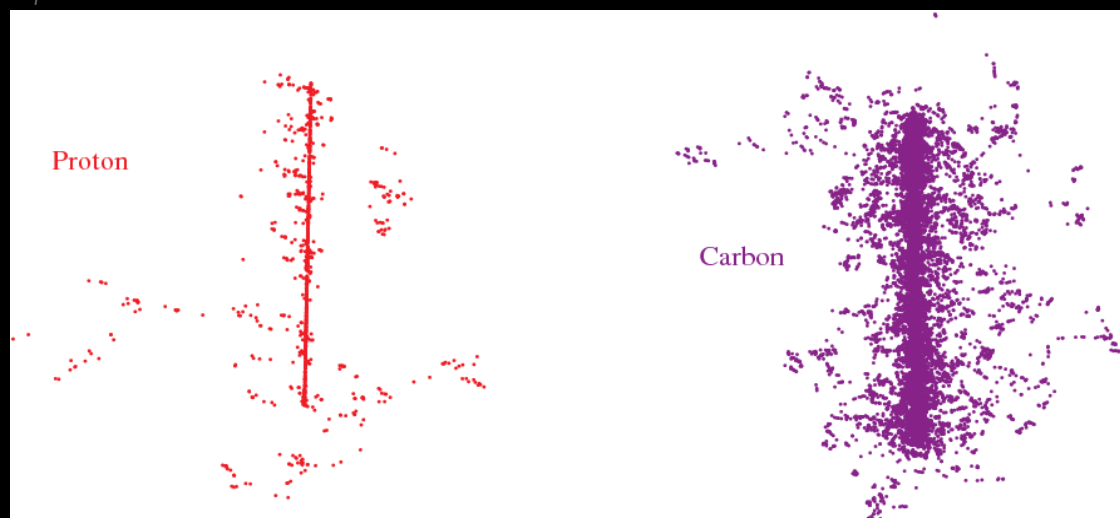
A partir de Ionizing radiation detection and spectrometry, V. Ullmann

# LET: LINEAR ENERGY TRANSFERT

INTERACTIONS  
RAYONNEMENT  
MATIERE

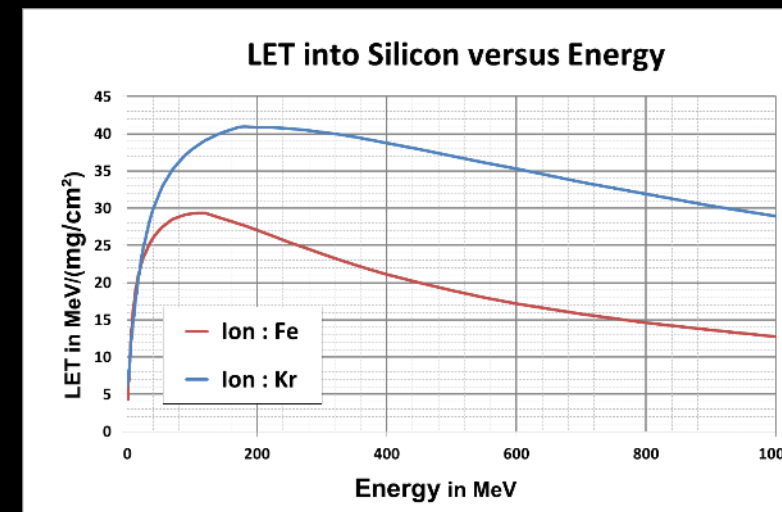
**Energie déposée par ionisation le long de la trace**

**LET = f (p, Ep, Mat)**



Dépôt d'énergie d'un proton et d'un ion Carbone dans 1 $\mu$ m d'épaisseur d'eau pour une énergie incidente de 1 MeV/n.

Bäckström, G. (2013). Protons, other Light Ions, and 60Co Photons : Study of Energy Deposit Clustering via Track Structure Simulations.



Variation du LET en fonction de l'énergie pour des ions de Fe ou de Kr dans une cible en Si

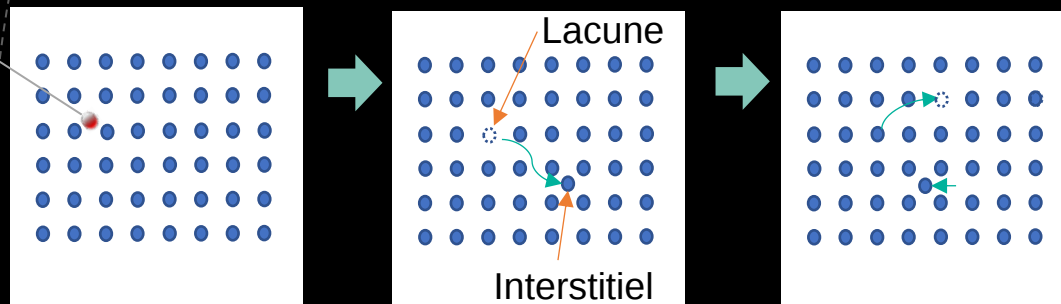
# NIEL: NON IONIZING ENERGY LOSS

INTERACTIONS  
RAYONNEMENT  
MATIERE

**Energie déposée autrement que par ionisation**

Interactions nucléaires – défauts de déplacements

Particule incidente

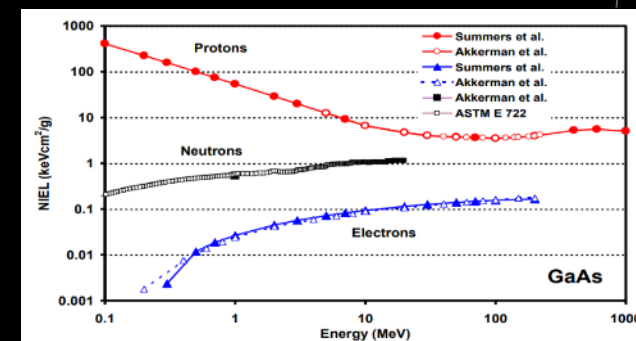
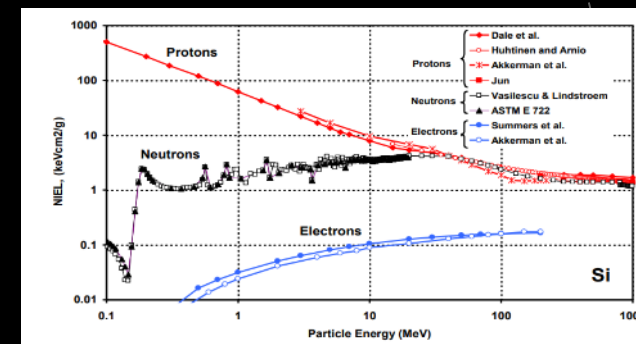


Création de défauts de déplacements  
ou de clusters de défauts dans un réseau d'atomes

**NIEL**  
Si

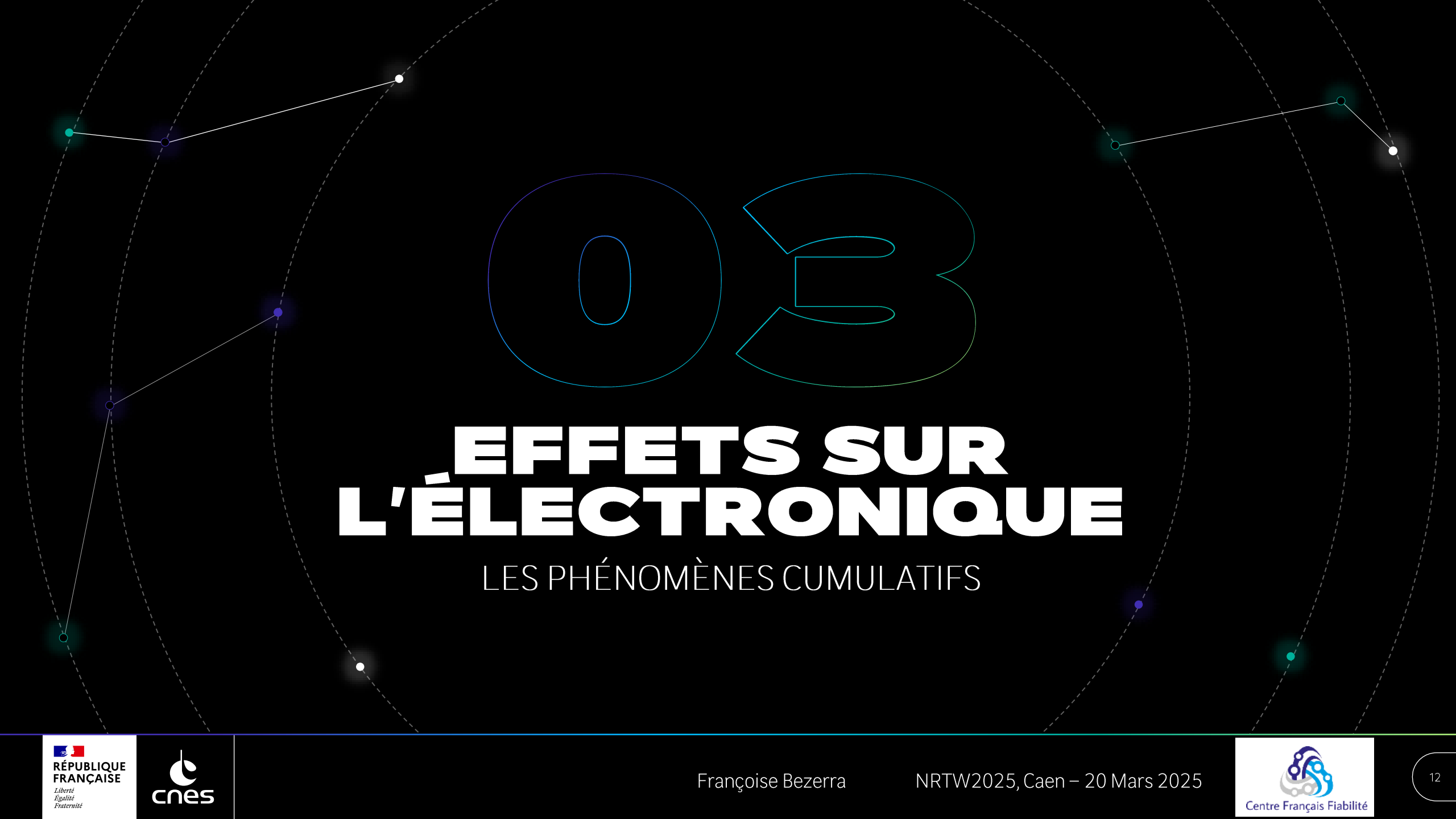
**NIEL**  
AsGa

$$\text{NIEL} = f(p, E_p, \text{Mat})$$



A. Jay et al., Simulation of Single Particle Displacement Damage in Silicon–Part II: Generation and Long-Time Relaxation of Damage Structure, IEEE-TNS vol;64 (2017)

C. Poivey, TNID Total Non Ionizing Dose or DD Displacement Damage, ESA- CERN SCC Workshop (2016)



# 03

## **EFFETS SUR L'ÉLECTRONIQUE**

LES PHÉNOMÈNES CUMULATIFS

# DÉFINITIONS

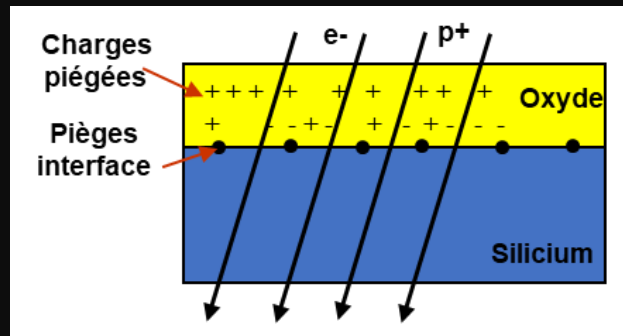
PHÉNOMÈNES  
CUMULATIFS

**Dose = Effet résultant de la contribution de nombreuses particules:**

Dégradation progressive et vieillissement prématuré

## Dose Ionisante: TID

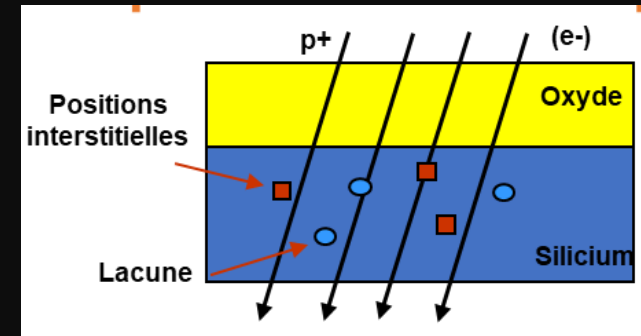
Total Ionizing Dose



⇒ Accumulation de charges dans les oxydes

## Dose non Ionisante: TNID/DDD

Total Non Ionizing dose  
/Displacement Damage Dose

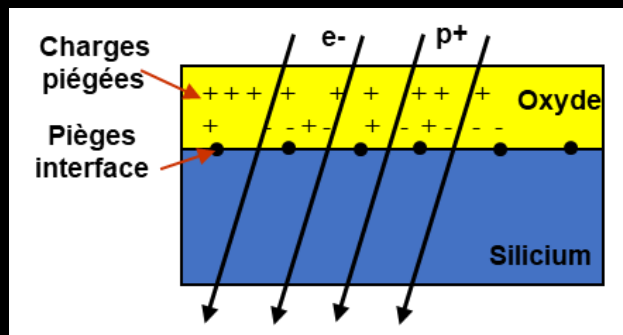


⇒ Apparition de défauts de déplacements dans les zones actives

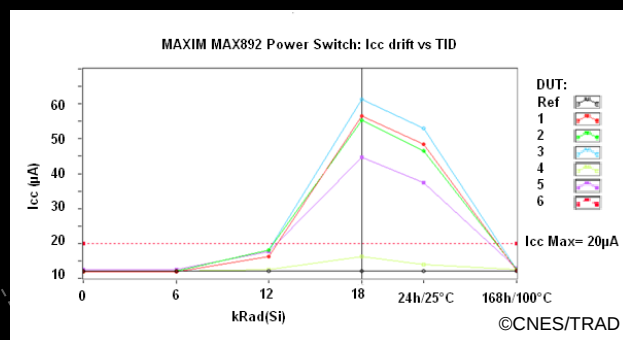
# LA DOSE IONISANTE - TID

PHÉNOMÈNES  
CUMULATIFS

**Zone sensible:** Oxydes



**Composants sensibles:**  
Tous les composants actifs (plus ou moins)



**Facteurs influents:**

- Qualité des oxydes
- Epaisseur des oxydes
- Polarisation
- Température
- Débit de dose

**Cinétique:**

- Effets rapides
  - Création des paires e-/h dans le volume de l'oxyde
  - Séparation sous l'effet de  $\vec{E}$
- Effet différé
  - Création d'états d'interfaces

**Conséquences électriques:**

- Variation de tension de seuil
- Apparition de courants de fuites

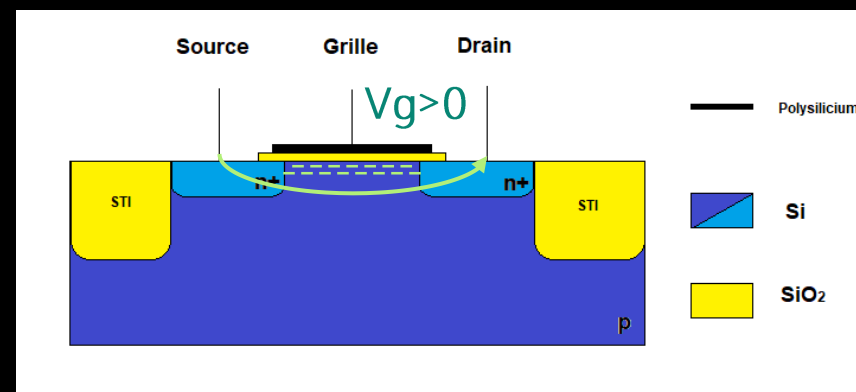
# LA DOSE IONISANTE - TID

PHÉNOMÈNES  
CUMULATIFS

## Sensibilité suivant la technologie

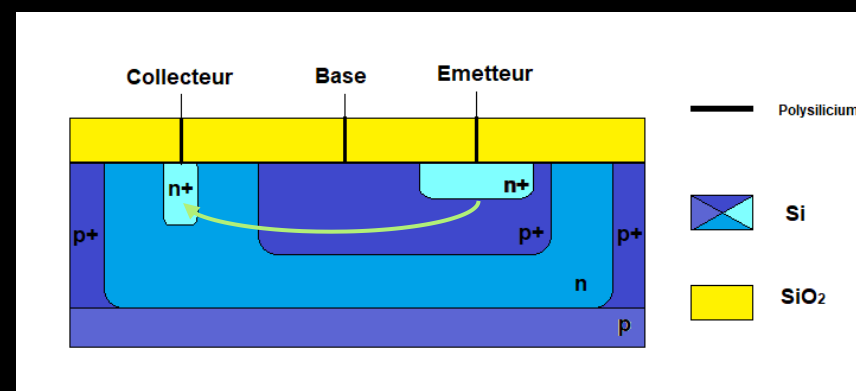
### MOS et CMOS:

- NMOS plus sensible que PMOS
- Sensibilité ON > sensibilité OFF
- Courants de fuites
- Variation des tensions de seuil,
- délai de commutation



### Bipolaire:

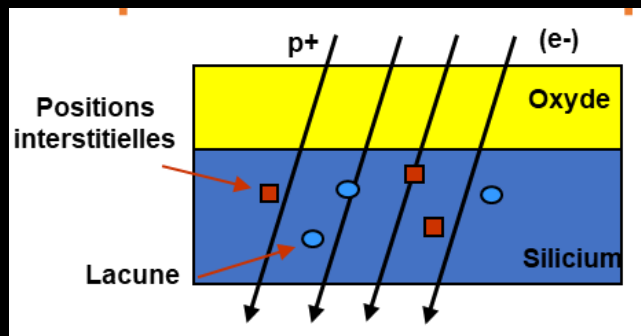
- N plus sensible que P
- Sensibilité OFF > Sensibilité ON
- Courants de fuites
- Variation des gains



# LA DOSE NON IONISANTE – TNID/DDD

PHÉNOMÈNES  
CUMULATIFS

## Zone sensible: Substrat



## Composants sensibles:

Bipolaires, Détecteurs,  
Cellules solaires, LEDs,  
Diodes laser, Optocoupleurs,  
...

## Facteurs influents:

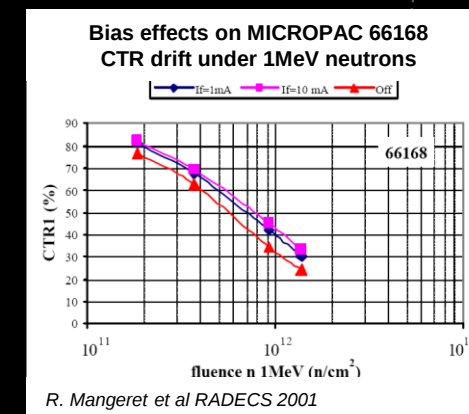
- Nature du substrat
- Qualité du substrat

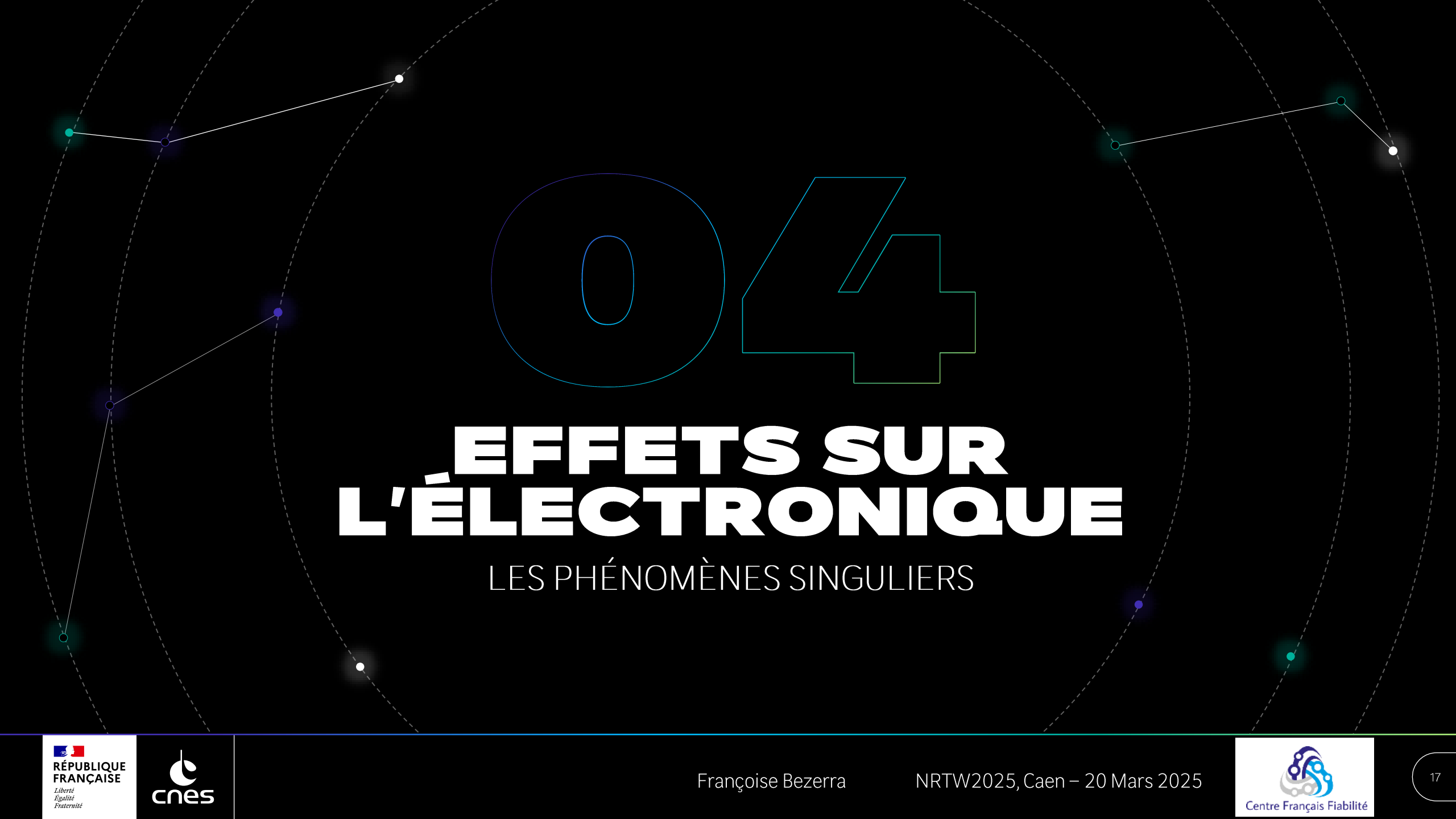
## Cinétique:

- Effets rapides
- Création des paires lacunes/interstitiels
- Effets différés
- Recombinaison possibles (fortes doses~1 mois)

## Symptômes:

- Variation des seuils
- Courants résiduels
- Perte de transmission
- Diminution des gains





# 04

# **EFFETS SUR L'ÉLECTRONIQUE**

## LES PHÉNOMÈNES SINGULIERS

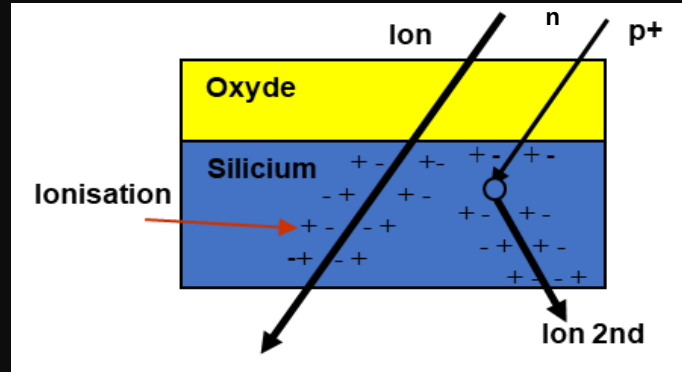
# SINGLE EVENT EFFECTS - SEE

LES EFFETS SINGULIERS

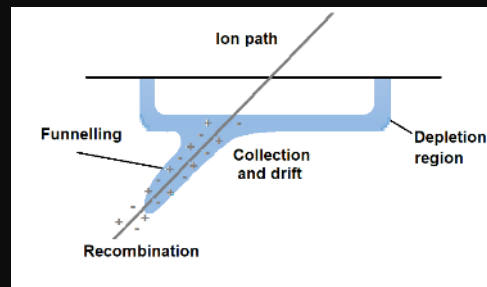
## Effet résultant du passage d'une particule unique:

Effet immédiat, probabiliste

Par ionisation directe ou indirecte



⇒ Collection de charge dans les zones actives



Un SEE se produit si:

⇒ La charge  $q$  est déposée dans un nœud critique  
⇒ Notion de **Volume Sensible**  
(Zone de collection de charge)

Et

⇒ La charge est suffisante ( $q > q_{\text{critique}}$ )  
⇒ Notion de **Charge critique**

On distingue plusieurs types de SEE:

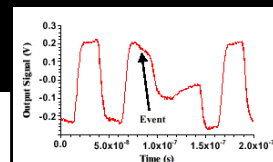
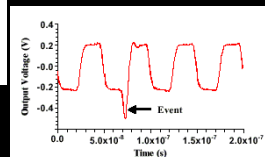
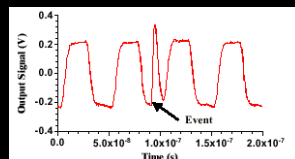
⇒ Destructifs (Hard Errors)  
⇒ Non destructifs (Soft Errors)

# LES SEE NON DESTRUCTIFS

LES EFFETS SINGULIERS

## SET = Single Event Transient

- Changement d'état transitoire (qq 10  $\mu$ s)



## SEU = Single Event Upset

- Mémorisation du transitoire dans une bascule
- Changement d'état logique
  - SBU: Single Bit Upset - Un seul bit dans le mot
  - MBU: Multiple Bit Upset – Plus d'un bit dans le même mot
  - MCU: Multiple Cell Upset – Plusieurs cellules touchées



## SEFI = Single Event Functionnal Interrupt

- SET ou SEU conduisant à la perte de fonctionnalité



## Sortie d'incident

**SET** = Rien à faire

**SEU** = Ré-écriture

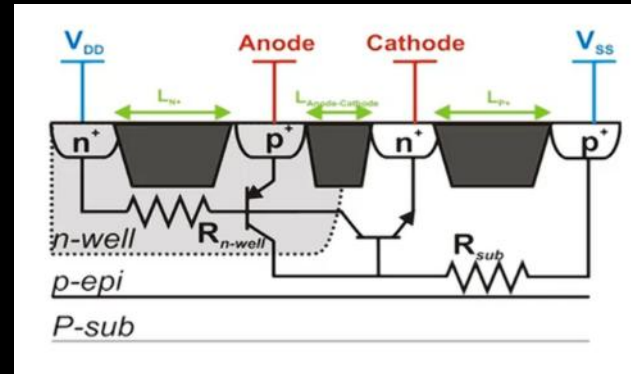
**SEFI** = Reset ou OFF/ON

# LES SEE DESTRUCTIFS

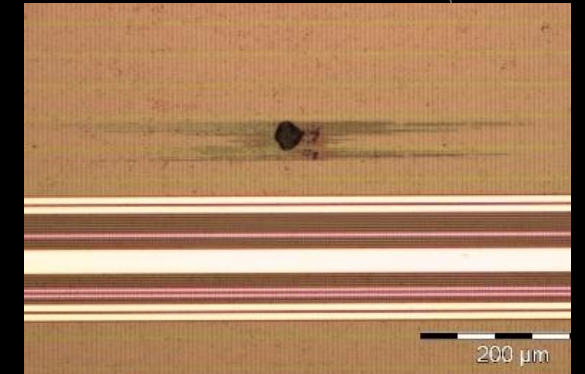
## LES EFFETS SINGULIERS

### SEL = Single Event Latchup

- Mise en conduction d'une structure thyristor parasite
- Perte de fonctionnalité
- Seulement dans les composants CMOS (PNPN)
- Possible destruction par effet thermique
- Sensibilité augmente avec V et T°.
- Phénomène auto-entretenu
- Technologie et design dépendant



Extrait de Texas Instruments - Destructive SEE (Ti.com)



Point de fusion suite à des SELs répétés dans une mémoire SRAM BSI

### Protections envisageables:

- Délatcheur: Limite le courant + cycle OFF/ON rapide => impact sur la fiabilité?
- MAIS dans certains cas le premier SEL sera systématiquement destructif

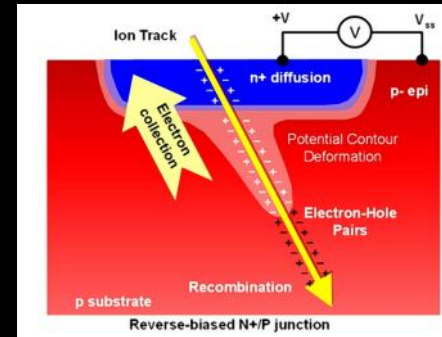
=> Un test sous faisceau permet d'écarter les composants non protégeables et, pour les autres, d'identifier la signature de SEL pour mettre en place une protection adaptée.

# LES SEE DESTRUCTIFS

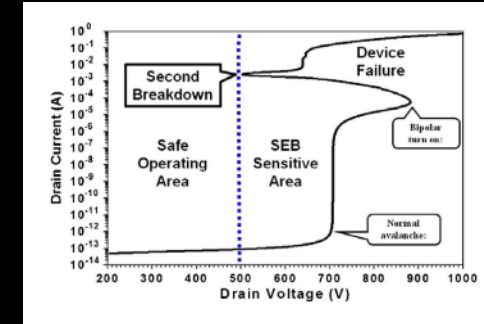
LES EFFETS SINGULIERS

## SEB = Single Event Burnout

- Conduction parasite, avalanche
- MOSFETs de puissance Canal N
- Possible destruction de l'oxyde
- Courant et tension dépendant.



Texas Instruments - Destructive SEE (Ti.com)



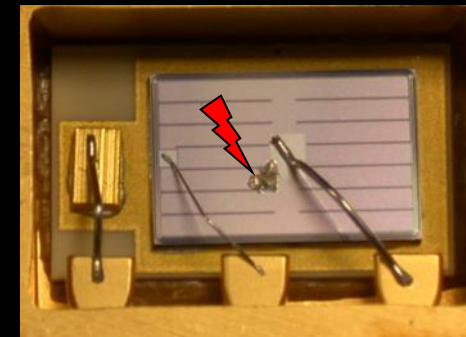
S. Liu et al., "Single-event burnout and avalanche characteristics of power DMOSFETs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 6, pp. 3379–3385, Dec. 2006

## SEGR = Single Event Gate Rupture

- Power MOSFETs en mode bloqué
- Défauts latents
- Destruction de l'oxyde de grille

## SEDR = Single Event Diélectrique Rupture

- Idem dans composants numériques à grosses capacités (DRAMs)



Point de fusion suite à SEB dans un Power MOSFET canal N

## Protections envisageables:

**SEB et SEGR:** Limiter la tension pour rester dans la Safe Operating Area (SOA).

# MAIS AUSSI:

LES EFFETS SINGULIERS

## $\mu$ -SEL = Micro-Latchup

- SEL avec courant très limité (quelques mA max)
- Fonctionnalité parfois conservée
- Possible destruction par effet thermique très localisé
- Nécessite un OFF/ON

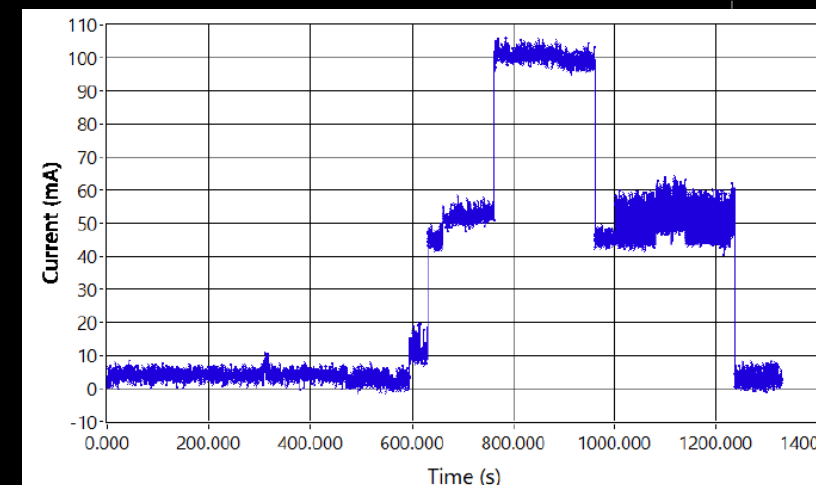
## HCE = High Current Event

- Saut brutal de consommation, parfois réversible (RILC)
- Composants logiques complexes et mémoires
- Fonctionnalité parfois conservée
- A priori pas de destruction malgré les forts courants
- Nécessite un RESET et/ou un OFF/ON
- Impact sur la fiabilité ?

## Protections envisageables:

- Très difficile à détecter => Pas de protection possible  
=> impact sur la fiabilité?

- Un délatcheur sera efficace



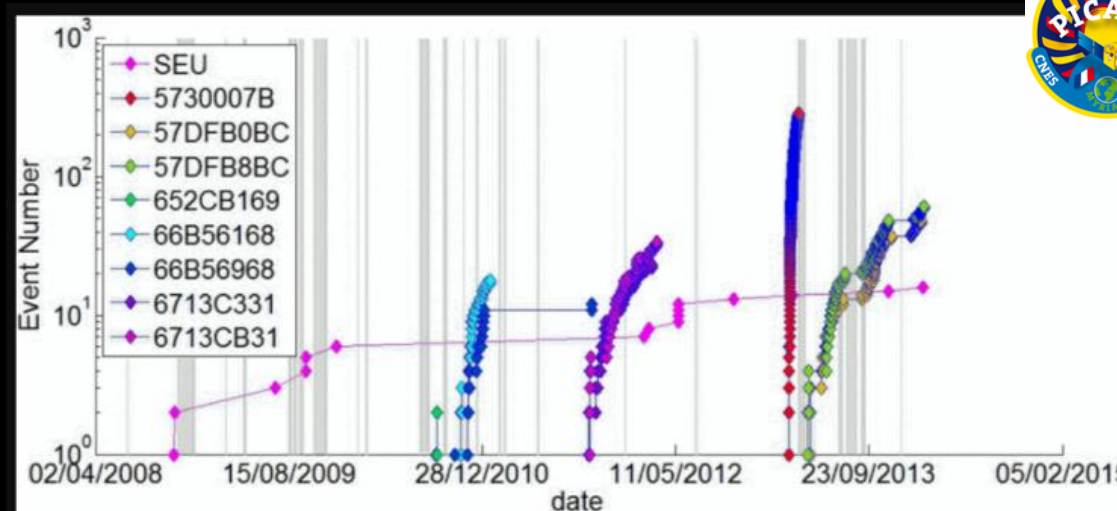
HCE sous ions lourds dans une mémoire Flash MICRON – Extrait de rapport de test TRAD

# MAIS AUSSI:

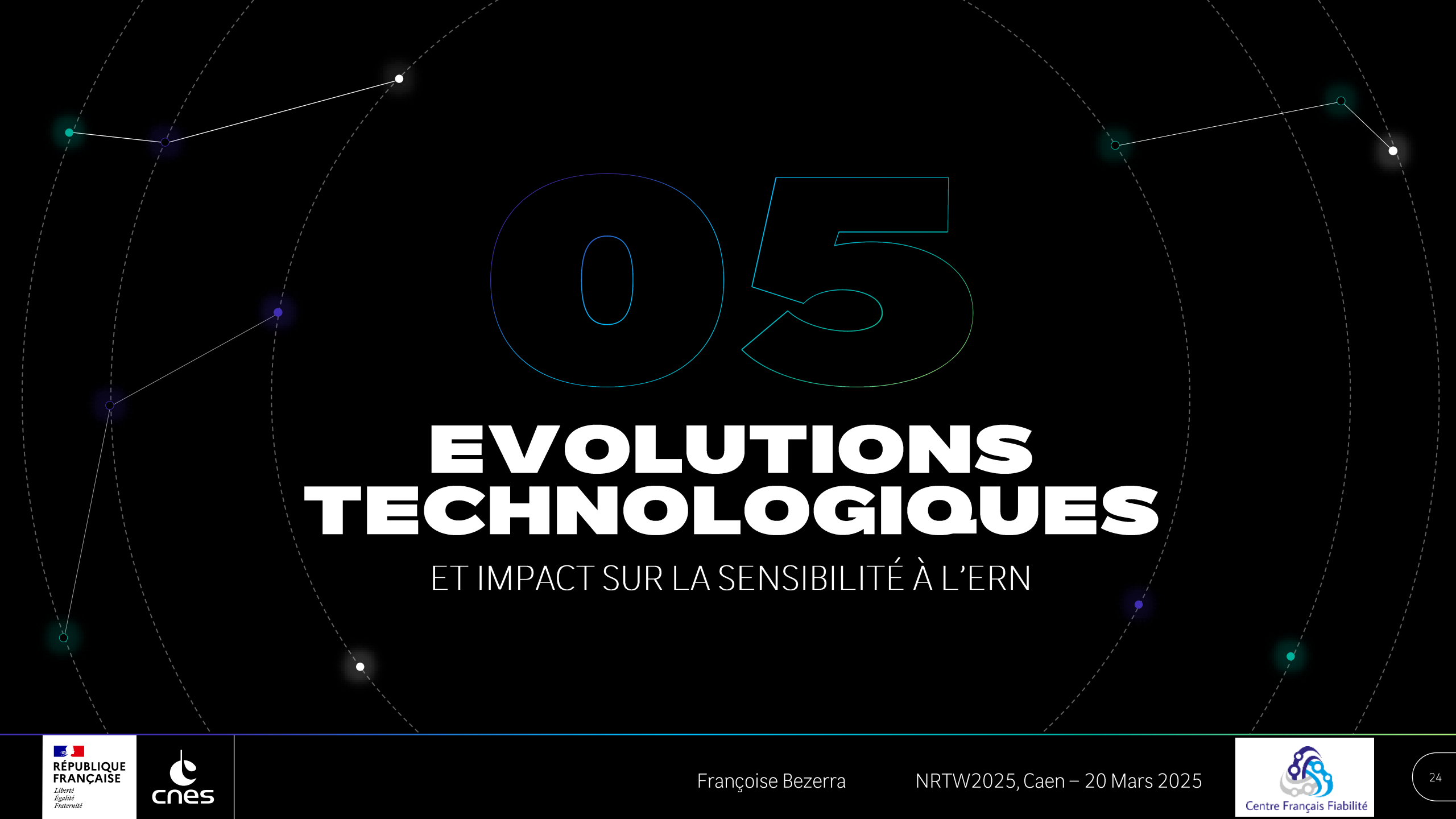
## LES EFFETS SINGULIERS

**SHE** = Single Hard Error ou **ISB** = Intermittent Stuck Bit

- DRAM, SDRAM,
- Des bits deviennent incontrôlables
- Phénomène singulier qui peut être cumulatif et réversible
- Probable défaut local qui amène le composant en limite fonctionnelle (temps de rétention).
- Confirmé en vol – SSU du PICARD.



A. Samaras et al., "Experimental Characterization and In-Flight Observation of Weakened Cell in SDRAM," 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, Russia, 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/RADECS.2015.7365611.



# 05

# EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

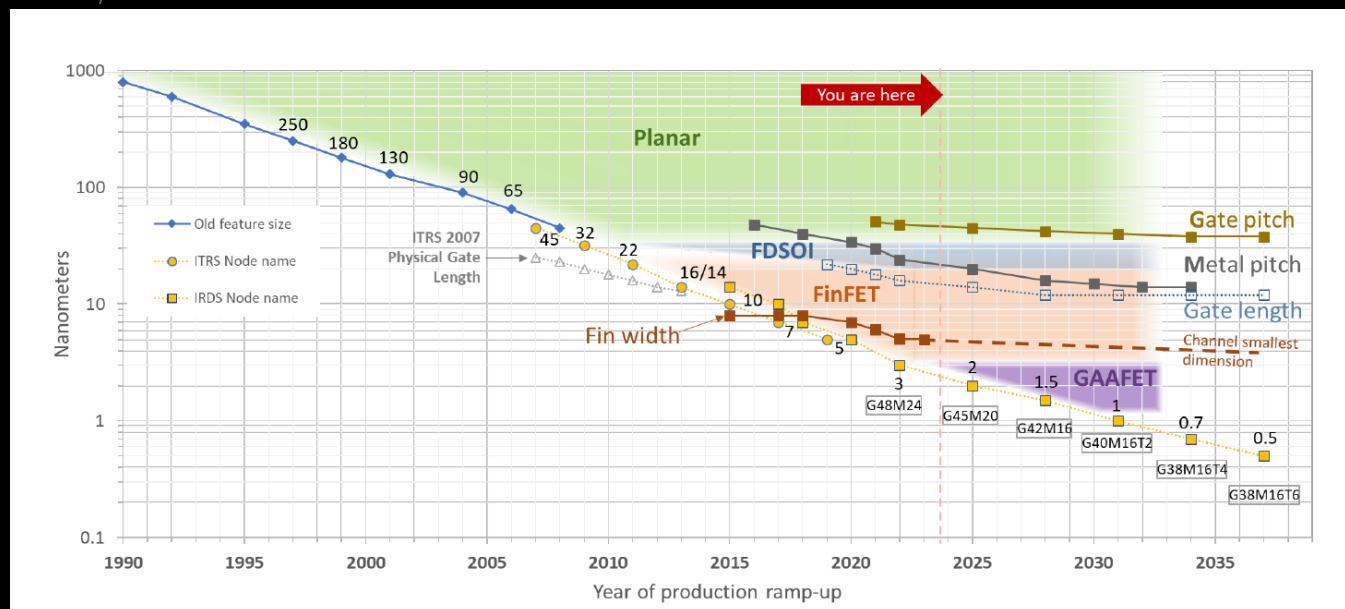
ET IMPACT SUR LA SENSIBILITÉ À L'ERN

# COMPOSANTS CMOS

IMPACT DES  
EVOLUTIONS  
TECHNOLOGIQUES

## L'abandon des technologies Planar

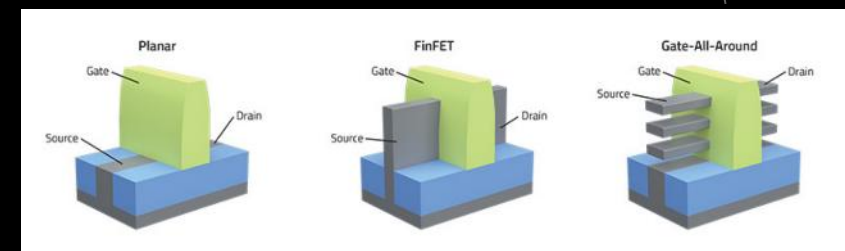
La diminution d'échelle à rendu le passage au FinFET, puis GAAFET nécessaires.



Evolution de la taille du « nœud technologique » pour les technologies CMOS

V. Pouget, "Single Event Effects in Advances CMOS Technologies", RADECS2023 Short Course.

**=> Pas de règle générale sur la sensibilité (TID ou SEE)**



Lam Research Newsroom - Blog

Planar > FinFET > GAAFET:

- Meilleur contrôle électrostatique
- Moins de courants de fuites
- Consommation réduite
- Surface réduite

# COMPOSANTS CMOS

IMPACT DES  
EVOLUTIONS  
TECHNOLOGIQUES

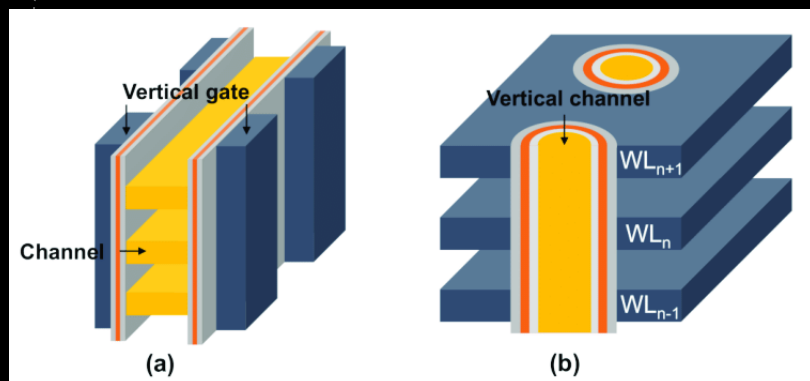
## Emergence des technologies 3D

Mémoires Flash sont à l'origine de l'apparition des puces 3D en deçà de 10nm

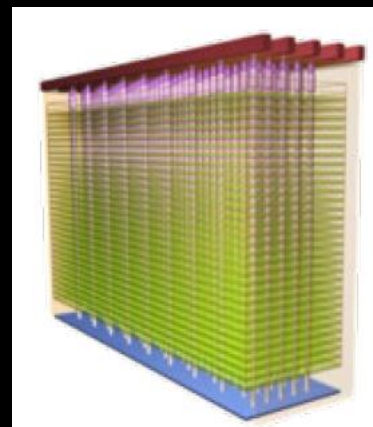
FG Floating Gate => MLC Multilayer cells

Effets de la densification:

- SEE multiples
- Effets d'angle (tilt/roll)
- Sensibles au RILC et ISB
- Synergie TID/SEE (LETseuil)



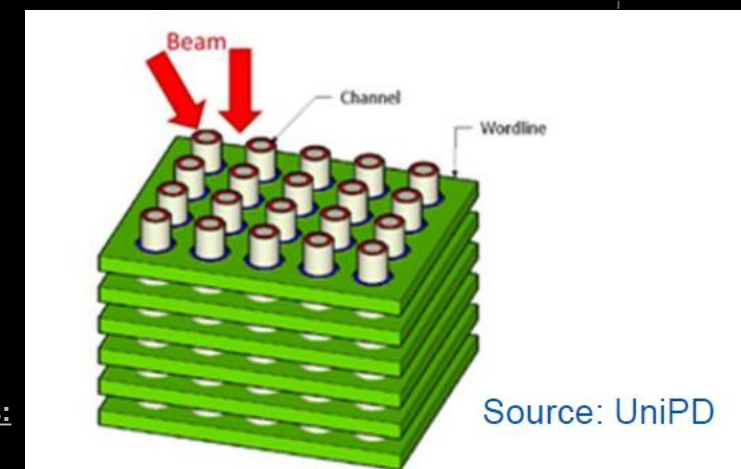
Schema de principe architecture 3D NAND : (a) grille verticale (b) Canal vertical



Etat de l'art en 2023: 3D NAND Flash 232 couches

Chiu, Yung-Yueh & Shirota, Riichiro. (2021). Technique for Profiling the Cycling-Induced Oxide Trapped Charge in NAND Flash Memories. Electronics. 10. 2492. 10.3390/electronics10202492.

M. Bagatin, Radiation Effects in Flash Memories: from Planar to 3D devices, SSQ2024



# COMPOSANTS DE PUISSANCE:

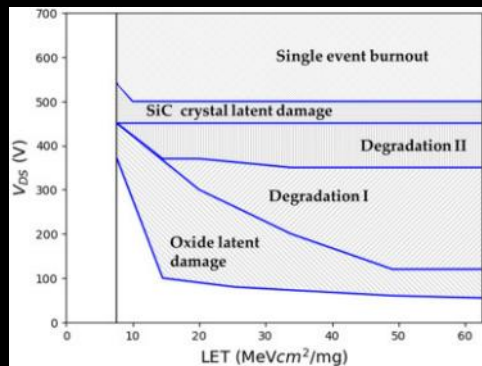
IMPACT DES  
EVOLUTIONS  
TECHNOLOGIQUES

**SiC = sensible au SILC** (Single Event Leakage Current)

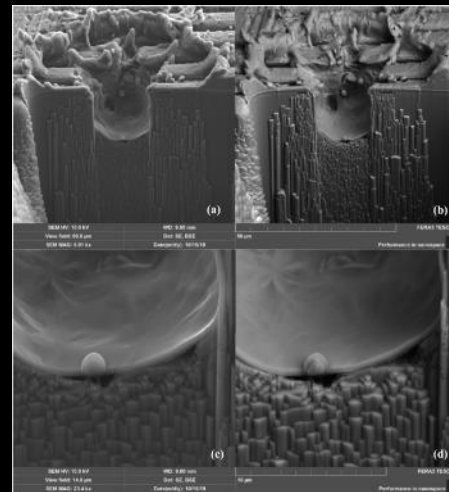
## SiC Power Transistor

SEB et défauts latents comme pour les Power MOSFET

Dégradation des courants de drain et de grille (SILC) spécifique au SiC.



Different types of damages induced by heavy-ion in SiC power MOSFETs as a function of the ion LET.

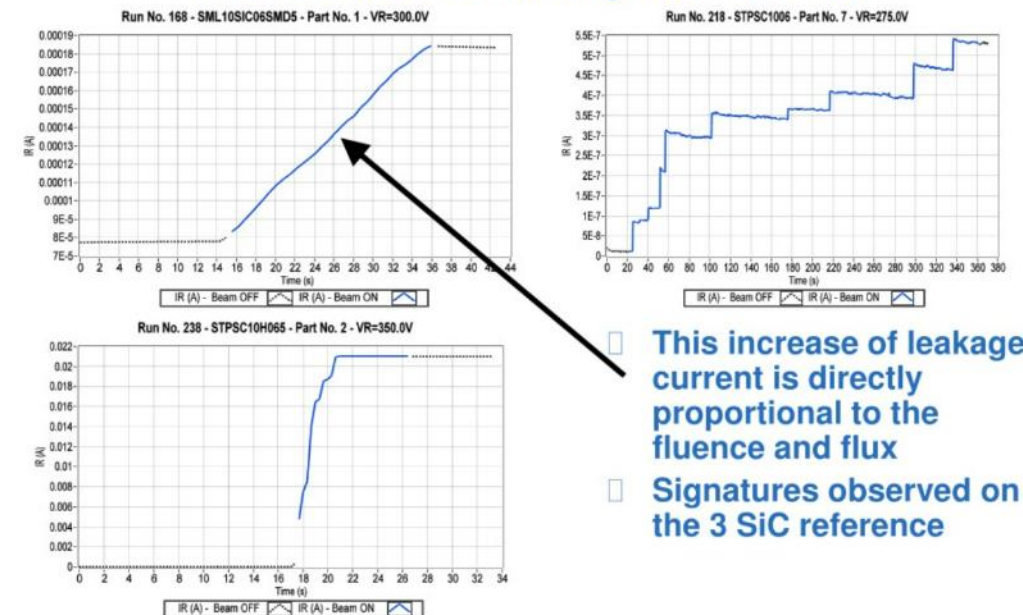


Cross-section of the damaged area after FIB milling.

C. Martinella et al., Heavy-ion induced single event effects and latent damages in SiC power MOSFETs, Microelectronics Reliability, Volume 128, 2022, 114423, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114423>.

## SiC Schottky diodes

### Focus on SiC Schottky diode result



P. Garcia et al. Single Event Burnout testing of high power Schottky diodes, ESA/CNES Radiation Final Presentation days 2017.

# COMPOSANTS DE PUISSANCE:

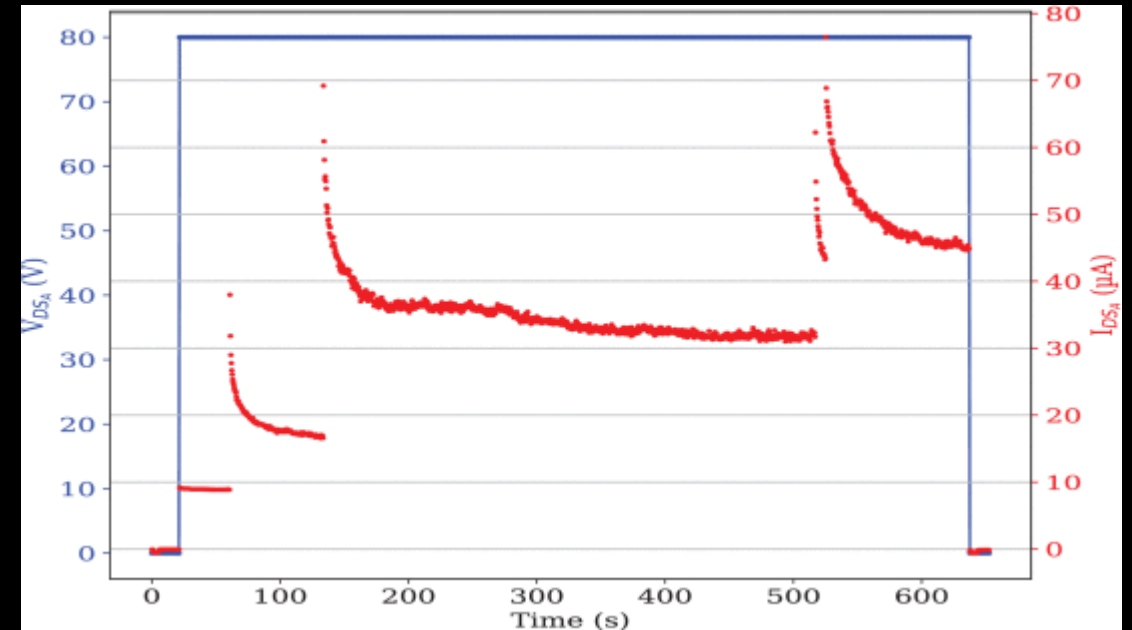
## GAN SENSIBLE EN MODE BLOQUÉ

IMPACT DES  
EVOLUTIONS  
TECHNOLOGIQUES

En mode bloqué, les GaN de puissance de tension élevée sont sensibles aux ions lourds de fort LET.

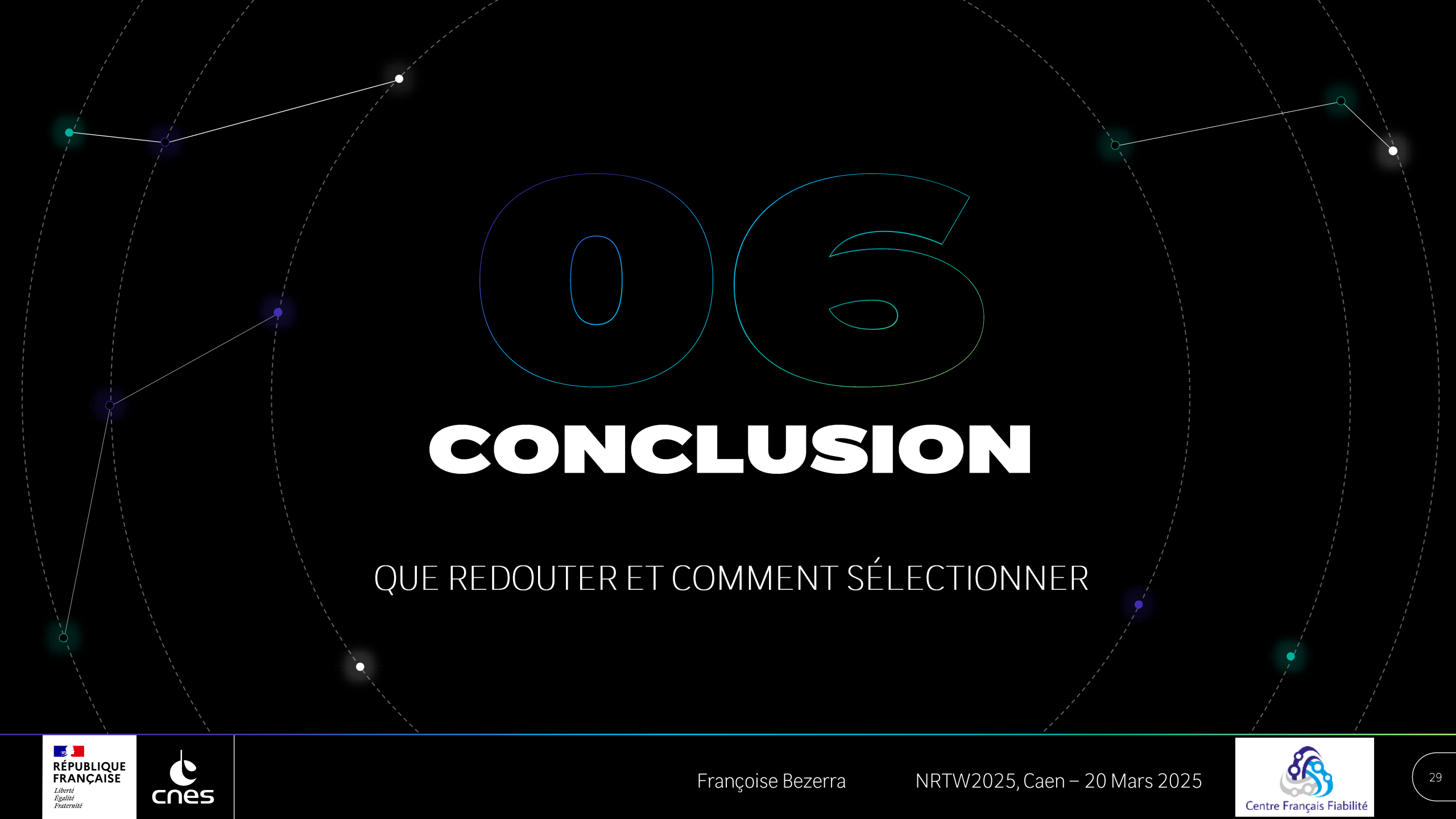
Ceux de plus basse tension sont plus robustes.

| Part number | V <sub>DS</sub> max (V) | Manufacturer | Ion | V Pass (V) | V Fail (V) |
|-------------|-------------------------|--------------|-----|------------|------------|
| EPC2001C    | 100                     | EPC          | Xe  | 100        | -          |
| EPC2012C    | 200                     | EPC          | Xe  | 200        | -          |
| GS61008P    | 100                     | GaN System   | Xe  | 90         | -          |
| PGA26E19I   | 600                     | Panasonic    | Xe  | 300        | 350        |
| PGA26E19I   | 600                     | Panasonic    | Rh  | 350        | 375        |
| IGOT40R07   | 400                     | Infineon     | Xe  | 350        | 400        |
| IGOT40R07   | 400                     | Infineon     | Rh  | 375        | 375        |



V<sub>DS</sub> and I<sub>DS</sub> as a function of run time for GS61008T device using Xe at 995 MeV. Courtesy Alter Technology France.

J. -B. Sauveplane et al., "Heavy-Ion Testing Method and Results of Normally OFF GaN-Based High-Electron-Mobility Transistor," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 68, no. 10, pp. 2488-2495, Oct. 2021, doi: 10.1109/TNS.2021.3109990..



# 06

## CONCLUSION

QUE REDOUTER ET COMMENT SÉLECTIONNER

# EFFETS DE L'ERN SUR LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES: QUE REDOUTER?

CONCLUSION

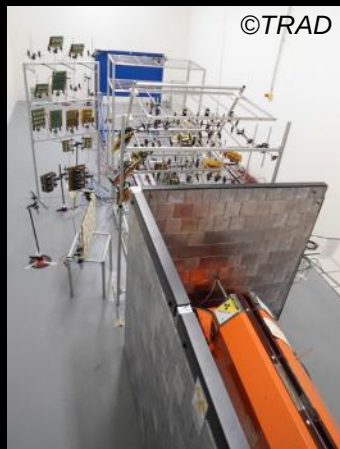
| Type de rayonnement | TID | TNID | SEE |
|---------------------|-----|------|-----|
| Ions lourds         |     |      | +   |
| Protons             | +   | +    | +   |
| Neutrons            |     | +    | +   |
| Electrons           | +   |      |     |
| Muons               |     |      | +   |

|              | Espace           | Ballons strato-sphériques | Aéronefs | Applications sol |
|--------------|------------------|---------------------------|----------|------------------|
| Type d'effet | Niveau de risque |                           |          |                  |
| TID          | ++               |                           |          |                  |
| TNID         | ++               |                           |          |                  |
| SEE          | +++              | +                         | ++       | + / ++           |

# LA SÉLECTION PASSE PAR DES ESSAIS: LES MOYENS D'ESSAIS

CONCLUSION

**TID** = Source de Cobalt 60



**TNID** = Accélérateurs de protons ou de neutrons



**SEE** = Accélérateurs d'ions lourds, de protons, de neutrons





# 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 :

