

# **Expérimentations GANIL pour mesure d'évènements singuliers radiatifs dans des transistors unitaires**

Thomas Jarrin, Neil Rostand, Arthur Losquin (CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France)

28 Août 2024

# Sommaire

- 1. Effets des radiations en microélectronique**
- 2. Nos expérimentations au GANIL**
- 3. Cas d'application : approche combinée expérience-simulation**
- 4. Conclusion**





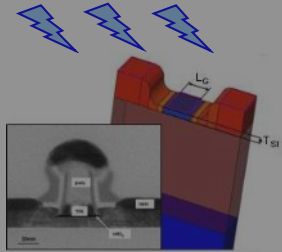
# **1 Effets des radiations en microélectronique**

# Effets des radiations en microélectronique

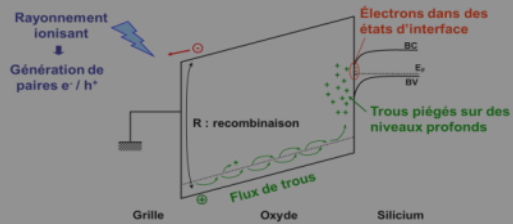
## TID

Total Ionizing Dose

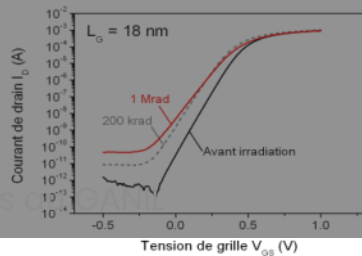
Irradiation *uniforme* d'un matériau / composant



Piégeage de charges dans les *diélectriques*



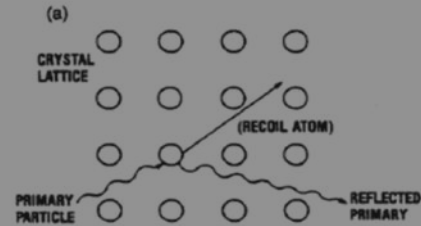
Modification du comportement



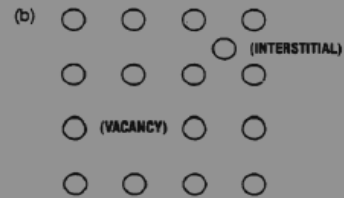
## DDD

Displacement Damage Dose

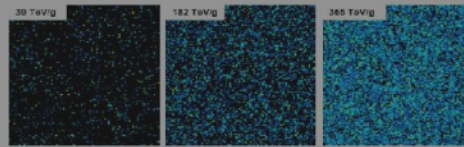
Irradiation *uniforme* d'un matériau / composant



Déplacement atomiques → *création de défauts*



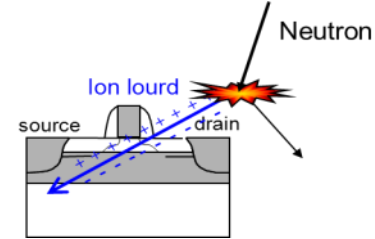
Modification du fonctionnement



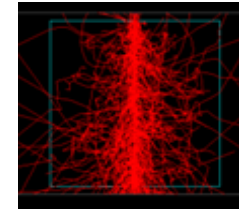
## SEE

Single-Event Effects

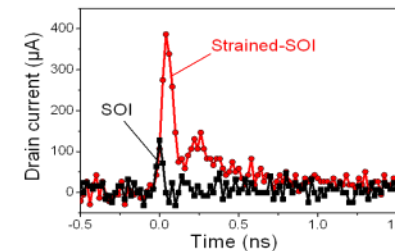
Irradiation *localisée* d'un matériau / composant



Dépôt d'énergie dans les *zones actives semicond.*



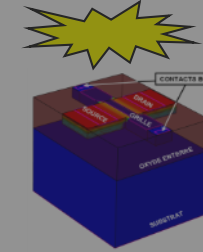
Génération de courants parasites



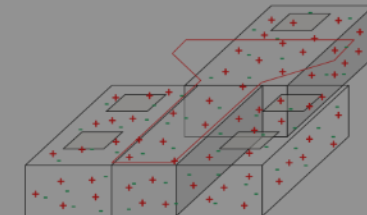
## DR (TREE)

Dose Rate

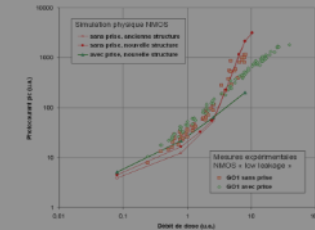
Irradiation *uniforme et impulsionnelle*



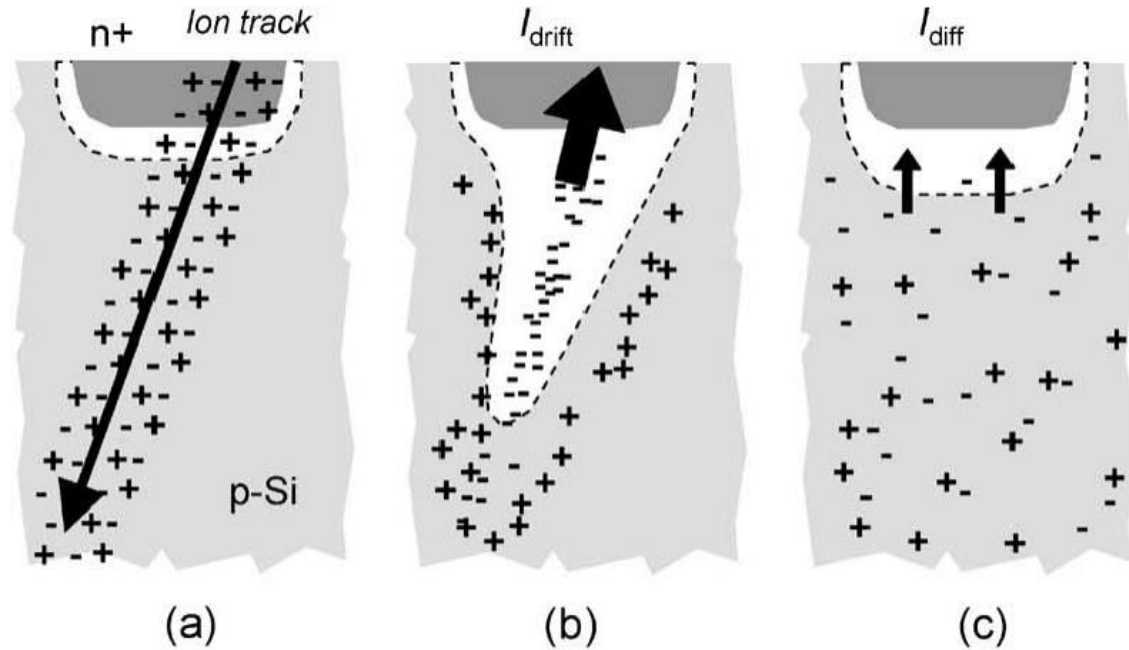
Dépôt d'énergie dans les *zones actives semicond.*



Génération de photocourants



# Effets singuliers



## Amplitude

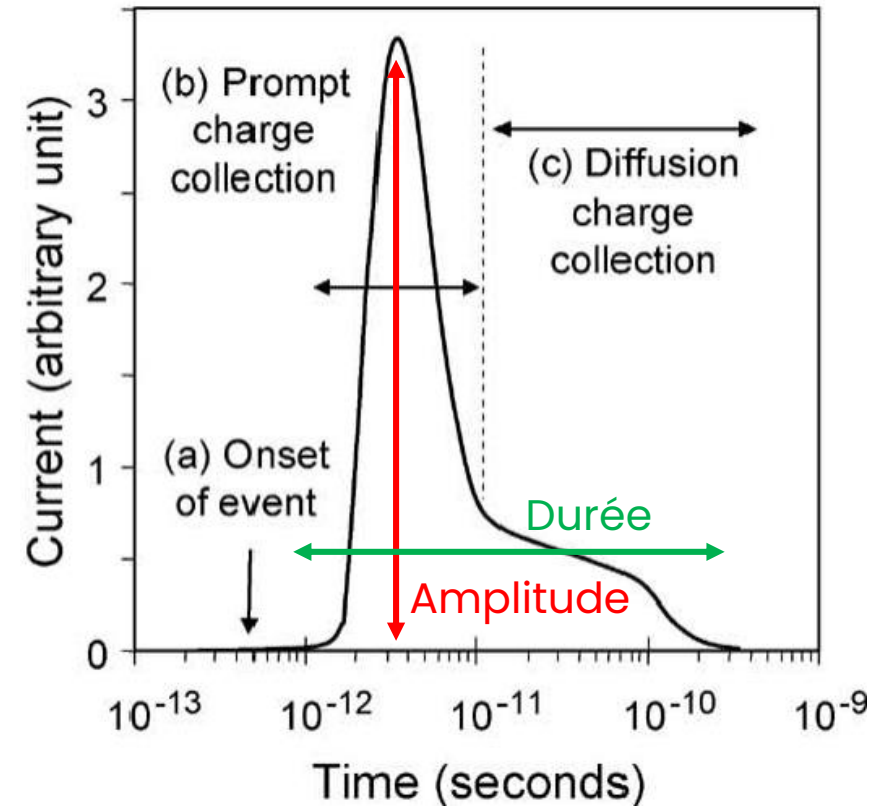
0,1 mA – 1 mA

Niveau de bruit typique : ~ 0,02 mA

## Durée

~100 ps

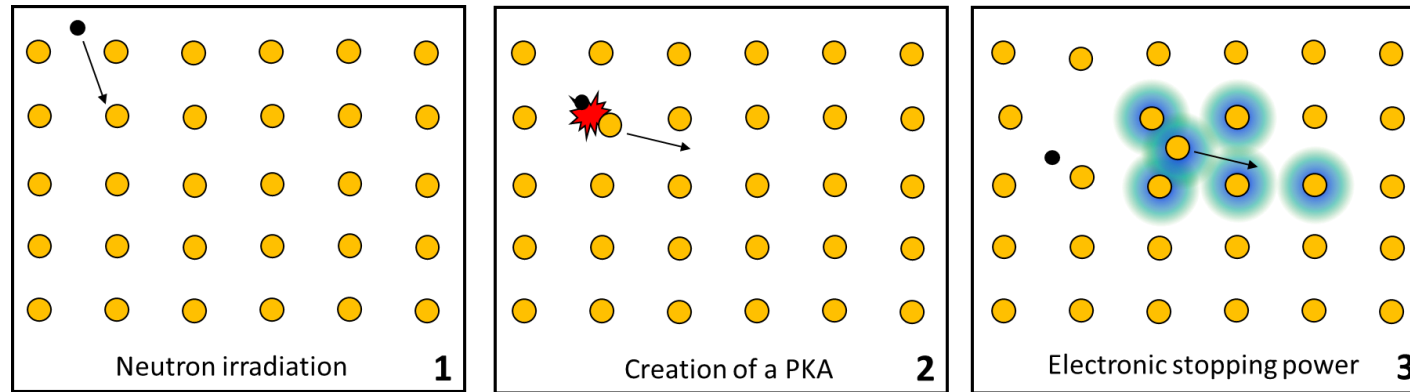
→ Evènement pas facile à mesurer



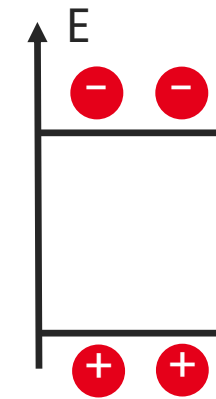
# Pourquoi le GANIL ?

Environnements radiatifs pour nos cas d'applications ? Neutrons et rayons gamma

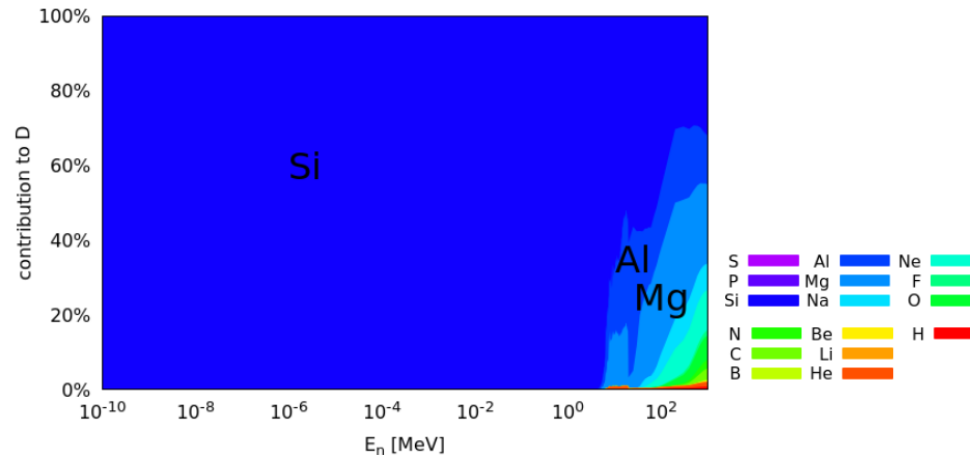
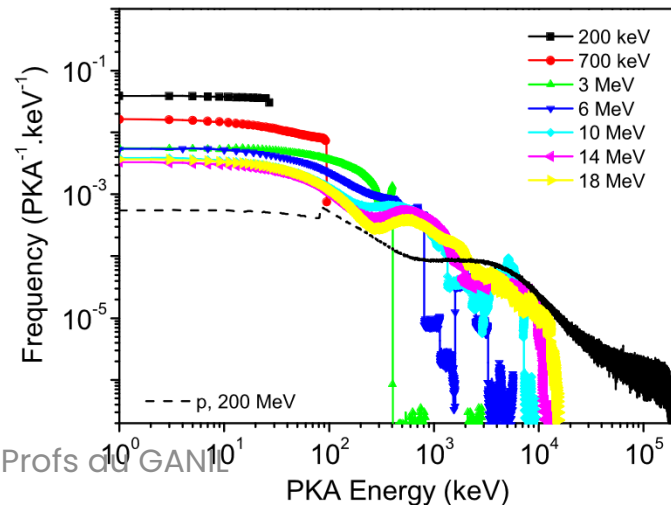
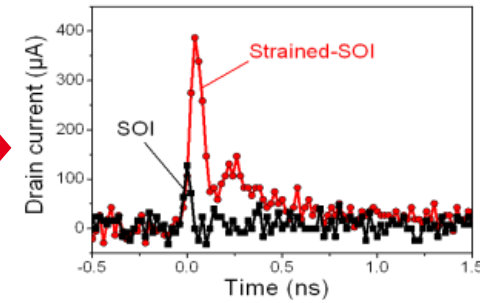
→ Pourquoi avons-nous besoin d'ions ?



Génération de paires électron-trou



SEE



Simulations d'interactions neutrons-Si

# Quantifier le pouvoir ionisant

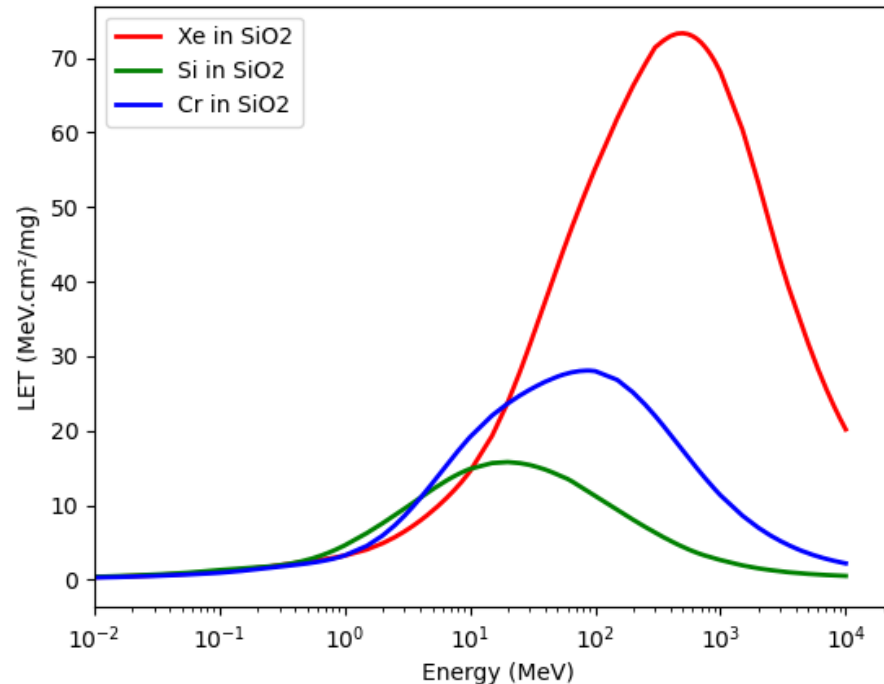
On ne peut pas toujours avoir les ions souhaités dans un accélérateur, et de plus il est nécessaire de tester nos composants dans des conditions plus dures que les conditions réelles.

Alors, comment quantifier le pouvoir ionisant d'un ion ?

## → Linear Energy Threshold (LET)

Le LET donne la quantité d'énergie cédée par un ion aux électrons du réseau.

Quand une expérience est préparée, on raisonne sur le LET et non sur le type ou l'énergie de l'ion.



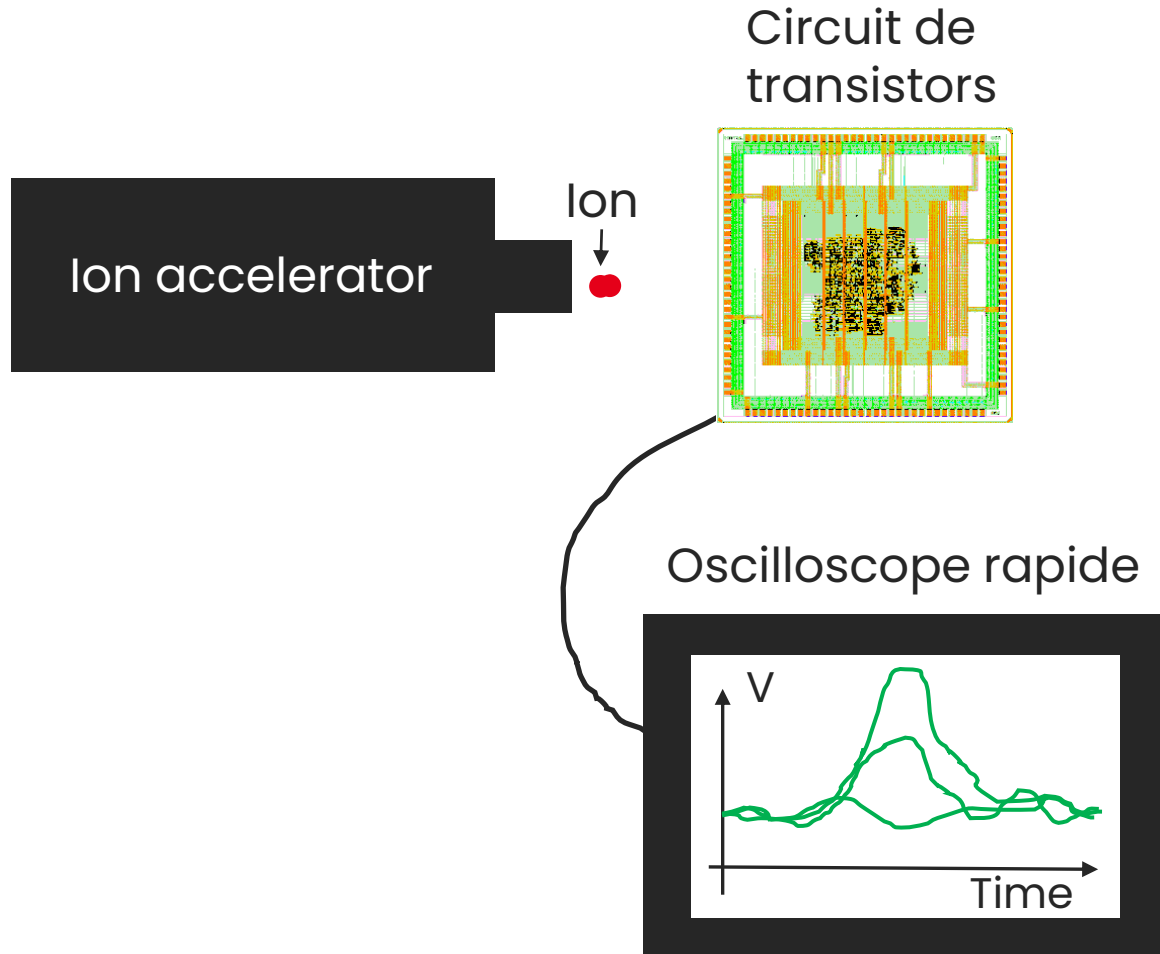


# **2. Nos expérimentations**

## **GANIL**



# Mesures des effets singuliers



Evènements **stochastiques**.

→ Nécessaire de réaliser une **analyse statistique**.

Pour des transistors supposément identiques, la réponse mesurée d'un transistor à l'autre peut être différente : **variabilité transistor à transistor**.

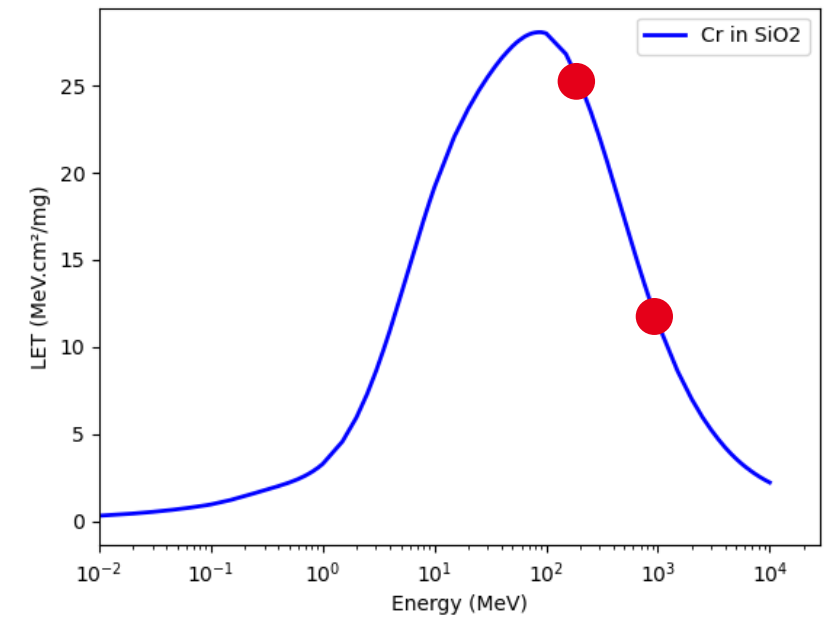
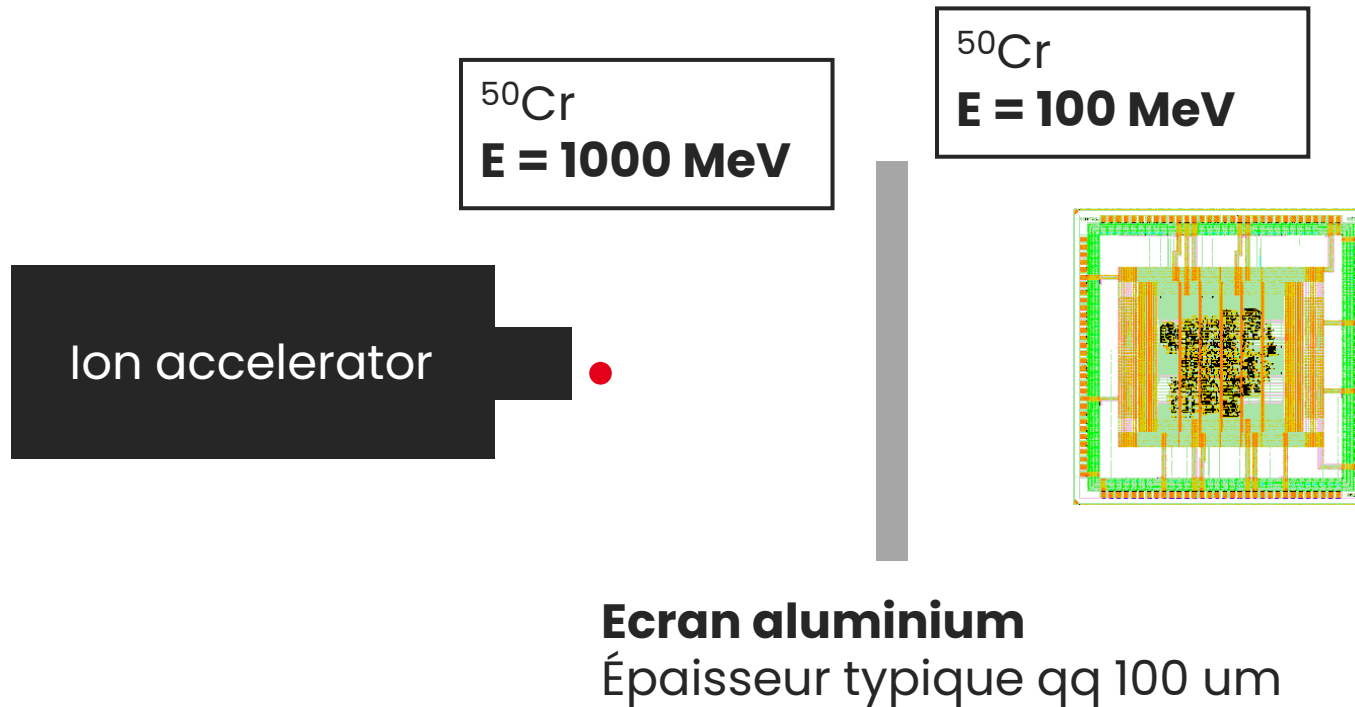
→ L'expérience doit être **répétée**.

Typiquement, on réalise une dizaine de « runs » par transistor, avec quelques centaines d'évènements singuliers mesurés par run.

# Mesures des effets singuliers

Lors d'une session d'expérimentation GANIL, on ne peut pas changer le type ou l'énergie de l'ion.

→ Alors, comment faire varier le LET ?





**3**

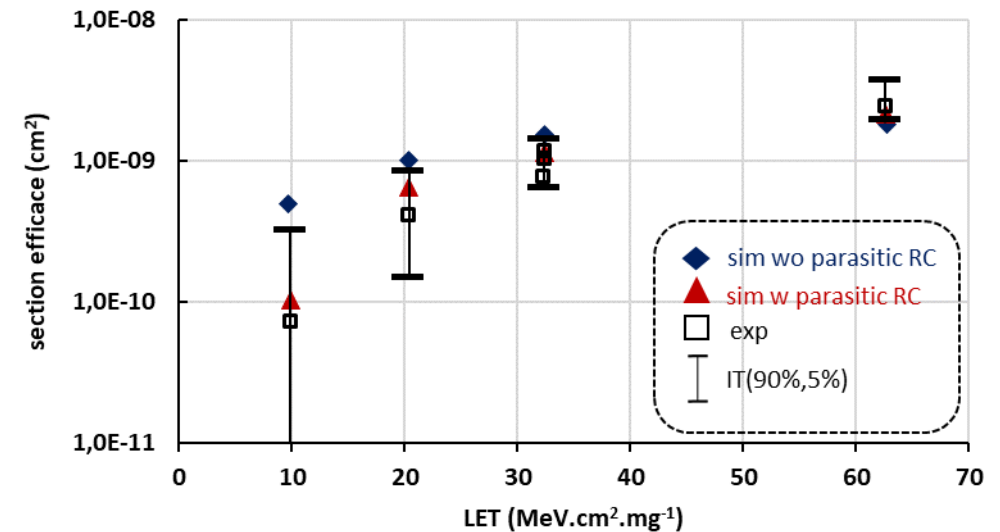
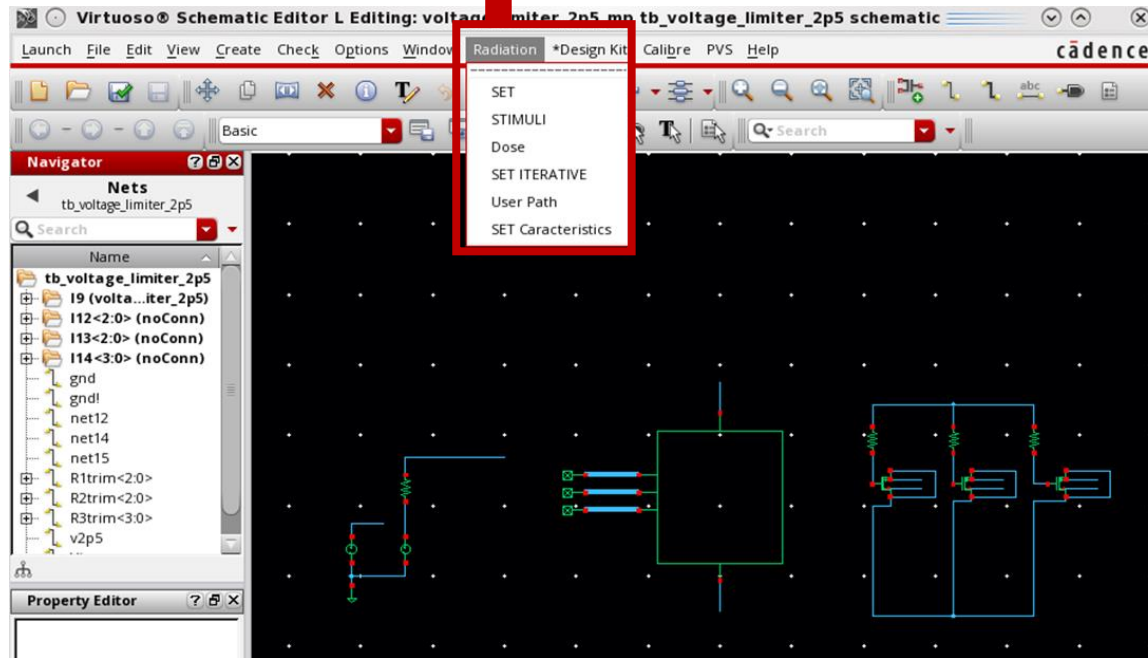
■ **Cas d'application :  
approche combinée  
expérience-simulation**

# Objectif final : être prédictif à l'échelle d'un circuit

Virtuoso

Schematics

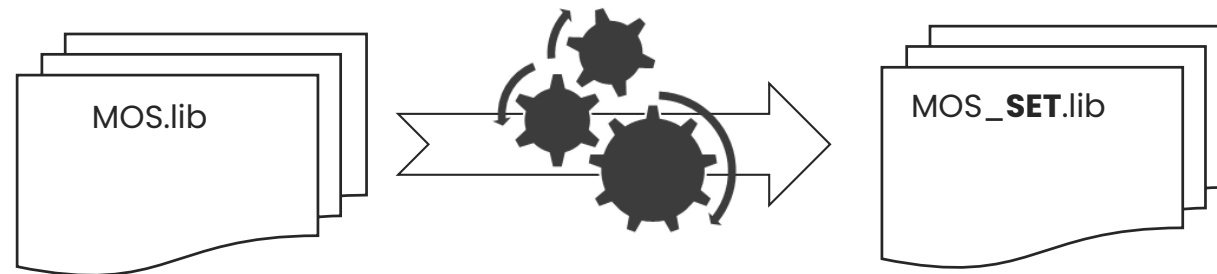
« Radiation » tool (SKILL) (appr.Ing M. Poverino)



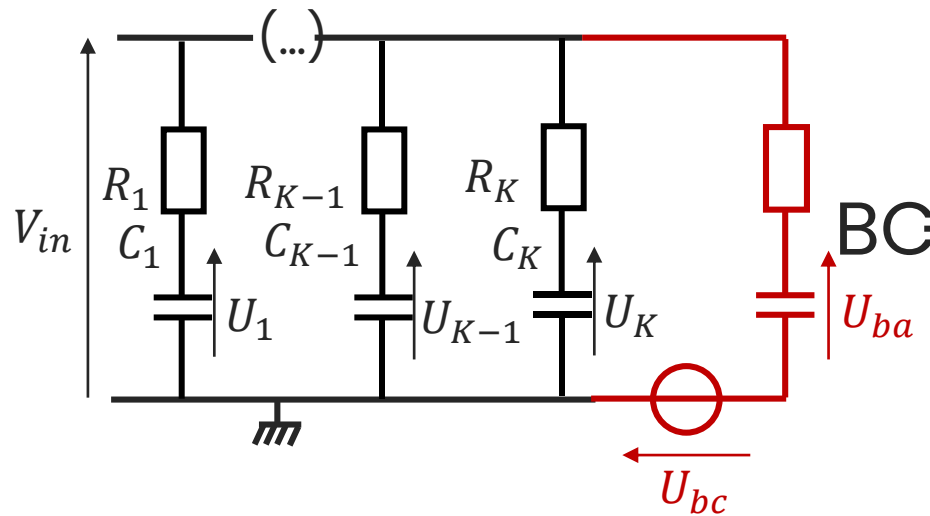
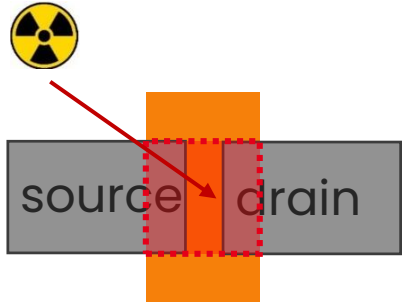
# Objectif final : être prédictif à l'échelle d'un circuit

Tout transistor est traité comme un « **modèle compact** » (circuit électrique analogue) dans les solveurs à l'échelle des circuits.

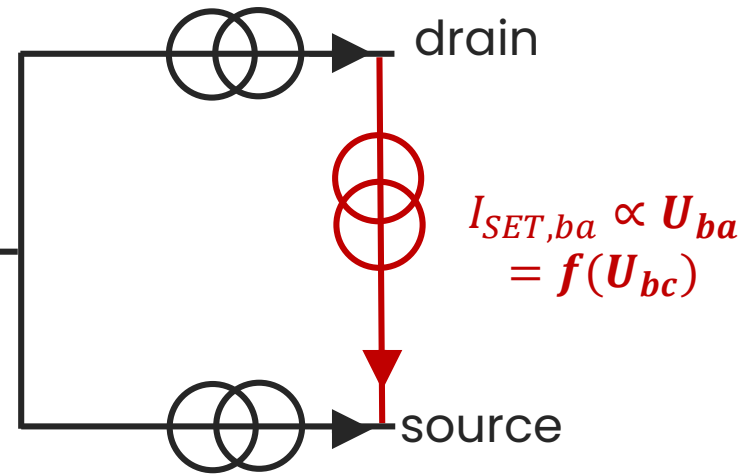
L'enjeu est de modifier ces « **modèles compacts** » décrivant le fonctionnement normal des transistors pour imiter les effets radiatifs (SEE) observés à l'échelle d'un transistor.



# Représentation d'un modèle compact de SET



$$I_{TIRR,d} = - \sum_k coef_{d,k} \cdot S_k \cdot U_k$$



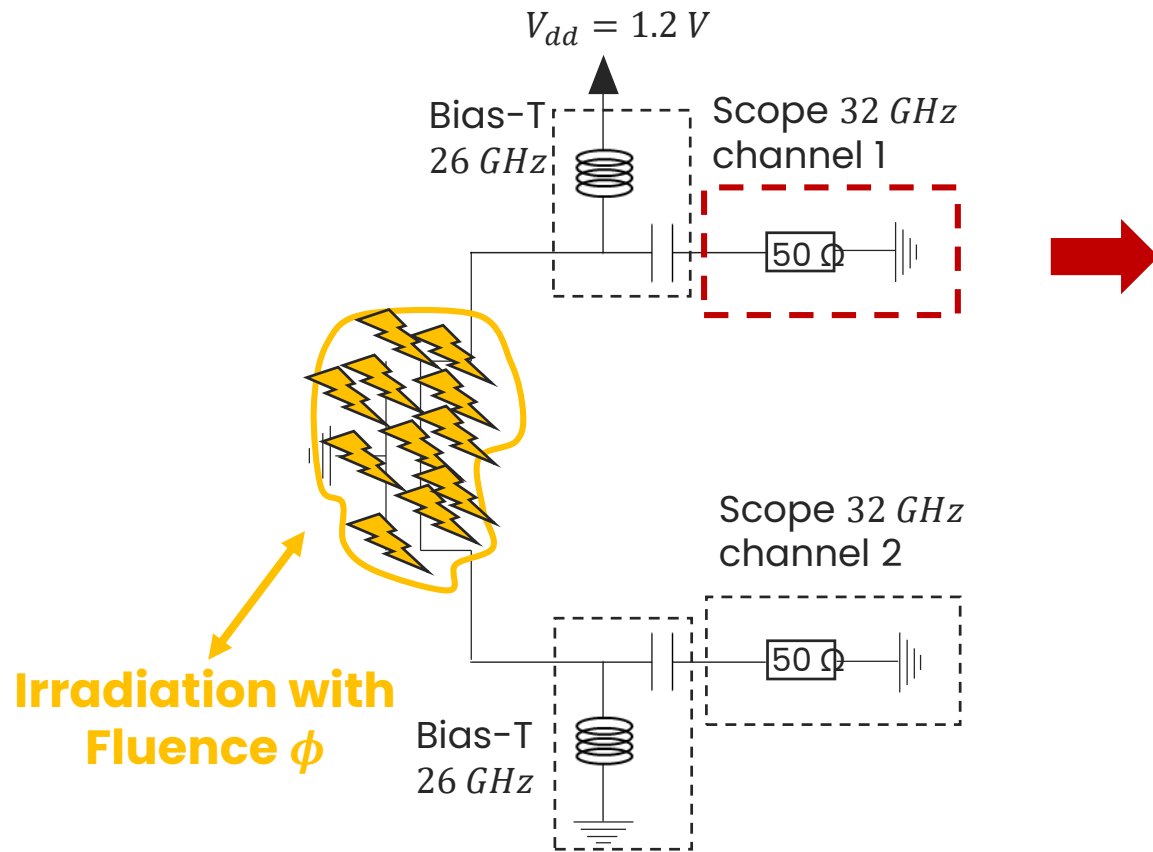
$$I_{TIRR,s} = - \sum_k coef_{s,k} \cdot S_k \cdot U_k$$

[1] N. Rostand et al IEEE SISPAD 2021

[2] N. Rostand et al IEEE TNS 2024

# Evènements singuliers transitoires

Calibration expérimentale sur les manip GANIL



Measurement of  $N_{SET}$  voltage impulses

$$\downarrow \frac{1}{50 \Omega}$$

$N_{SET}$  SET

$$\downarrow \int dt$$

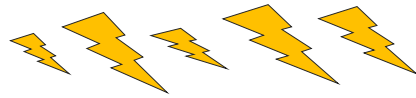
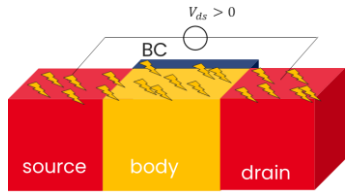
$N_{SET}$  collected charge  $Q_{coll,d}$   
extraction of  $\delta\sigma(Q_{coll,d})$

# Evènements singuliers transitoires

Simulation **Monte Carlo (MC)** SPICE d'un run d'irradiation

Impact aléatoire  
(loi uniforme)

$\delta N_{eh}$  aléatoire  
(loi normale)



MC SPICE simulation

$I_{SET}$  et  $Q_{coll}$  aléatoires

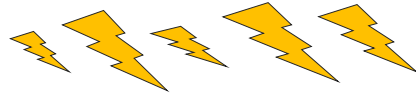
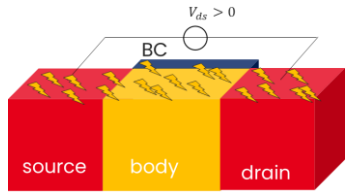


# Evènements singuliers transitoires

Simulation **Monte Carlo (MC)** SPICE d'un run d'irradiation

Impact aléatoire  
(loi uniforme)

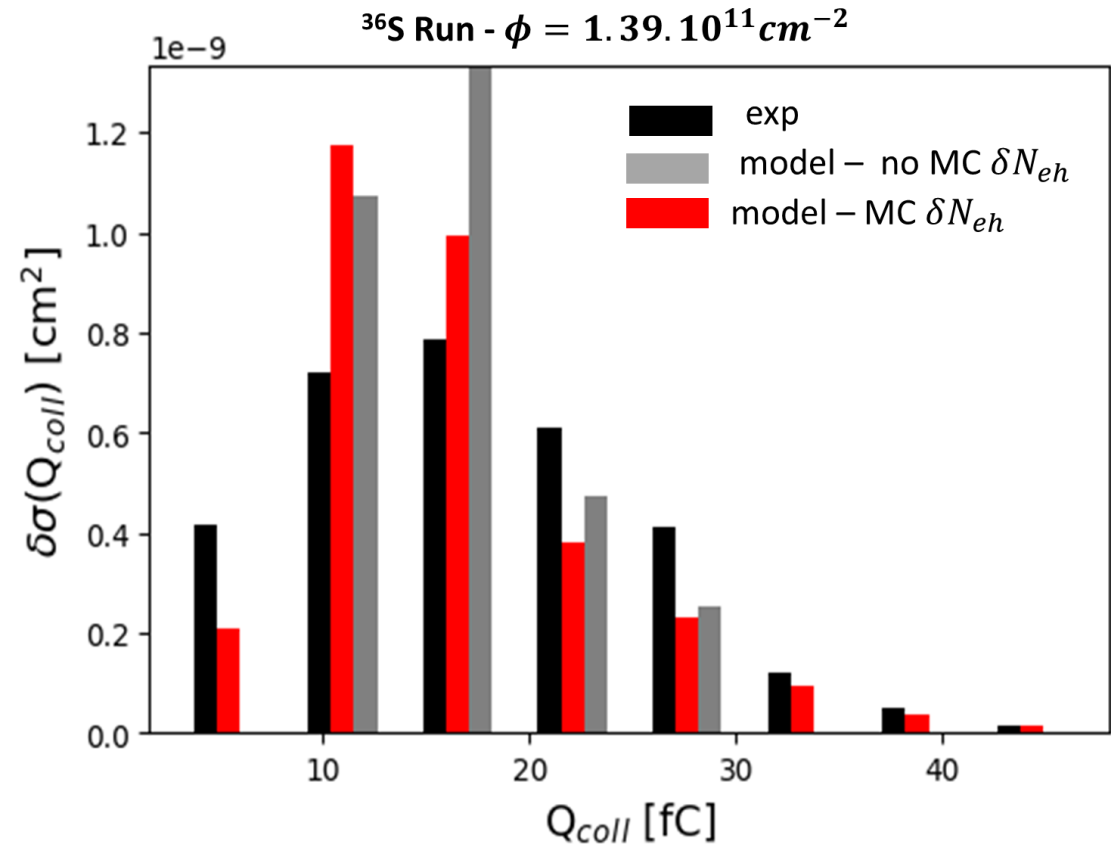
$\delta N_{eh}$  aléatoire  
(loi normale)



MC SPICE simulation

$I_{SET}$  et  $Q_{coll}$  aléatoires

	$\{D, D_{sd}\}$ [ $10^{-4} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ ]	$\{\tau, \tau_{sd,eff}\}$ [ps]	$\chi$
<b><math>^{36}\text{S}</math> run</b>	{1,0.1}	{8,30}	0.190





# 4. Conclusion

# Conclusion

- Les expérimentations GANIL interviennent lors de la phase d'évaluation des technologies et de développement des modèles de simulations.
- Les accélérateurs d'ions sont pertinents pour nos applications car les interactions neutron-matière produisent des ions.
- Un traitement statistique des données extraites est primordial, ce qui rend nécessaire de répéter les manipulations un très grand nombre de fois.
- Les données extraites au GANIL permettent de se faire une idée sur la résistance d'une technologie de transistor aux radiations, mais surtout de fournir des données pour calibrer des modèles de simulation.

