

Détecteurs GaN à lecture directe pour le monitoring de faisceau et l'imagerie en proton thérapie

Jean-Yves Duboz



Journées thématiques du Réseau Semi-conducteurs IN2P3-IRFU.

Applications médicales des détecteurs semi-conducteurs: dosimétrie et imagerie

Détecteurs GaN à lecture directe pour le monitoring de faisceau et l'imagerie en proton thérapie

Jean-Yves Duboz, Maxime Hugues, Julie Zucchi, Lucas Lesourd, Shirley Prado De La Cruz,

Patrick Chalbet, Eric Frayssinet, Sébastien Chenot

CNRS, CRHEA, 06560, Valbonne, France

Jean-Claude Grini, Marie Vidal, Petter Hofverberg, Joël Hérault

Cyclotron Biomédical, Centre Antoine Lacassagne, Nice, France



Contexte et motivation

Proton thérapie en plein développement:

- Dommages collatéraux réduits en profondeur (pic de Bragg)
 - Résolution latérale par masque ou faisceau fin (scanned pencil beams)
- ⇒ fort développement des centres de proton-thérapie et de l'instrumentation associée: 90 centres dans le monde (+4/an), 3 in France



Accélérateur ProteusOne®, Lacassagne, juin 2016



Accélérateur ProteusOne®, machine de soins de protonthérapie, inauguré au centre Cyclhad, à Caen, le 5 juillet 2018

Contexte et motivation

- Quality assurance: connaître exactement (3%) la dose délivrée (forme du faisceau, intensité) à moyenne ou forte (flash) intensité
- Imagerie de patient par proton à faible intensité ($< \text{pA/cm}^2$)

⇒ Besoin d'un imageur

❖ Monoélément avec déplacement mécanique: très lent, sensible aux fluctuations de faisceau

❖ Matrice linéaire (barrette) avec déplacement mécanique: lent

❖ Matrice 2D

➤ Grande dimension ($> 5 \text{ cm}$): Si, GaN, diamant

➤ Résolution spatiale $< 1 \text{ mm}$

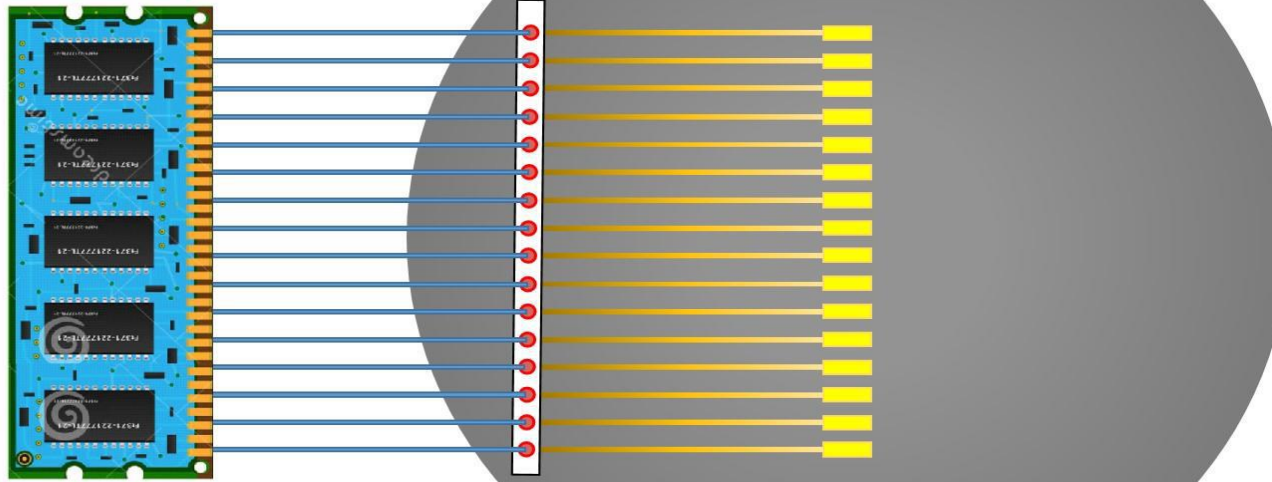
➤ Linéarité

➤ Résistance à l'irradiation proton: Énergie de déplacement: énergie nécessaire pour déplacer un atome dans le cristal: Silicium: 15-21 eV, Ga dans GaN: 45 eV, N dans GaN: 109 eV

Matrices de détecteurs GaN (1D)

Barrette de détecteurs GaN
128 ou 256 canaux
Pitch 500 μ m environ

Circuit de lecture commercial
128 ou 256 canaux à base de Si

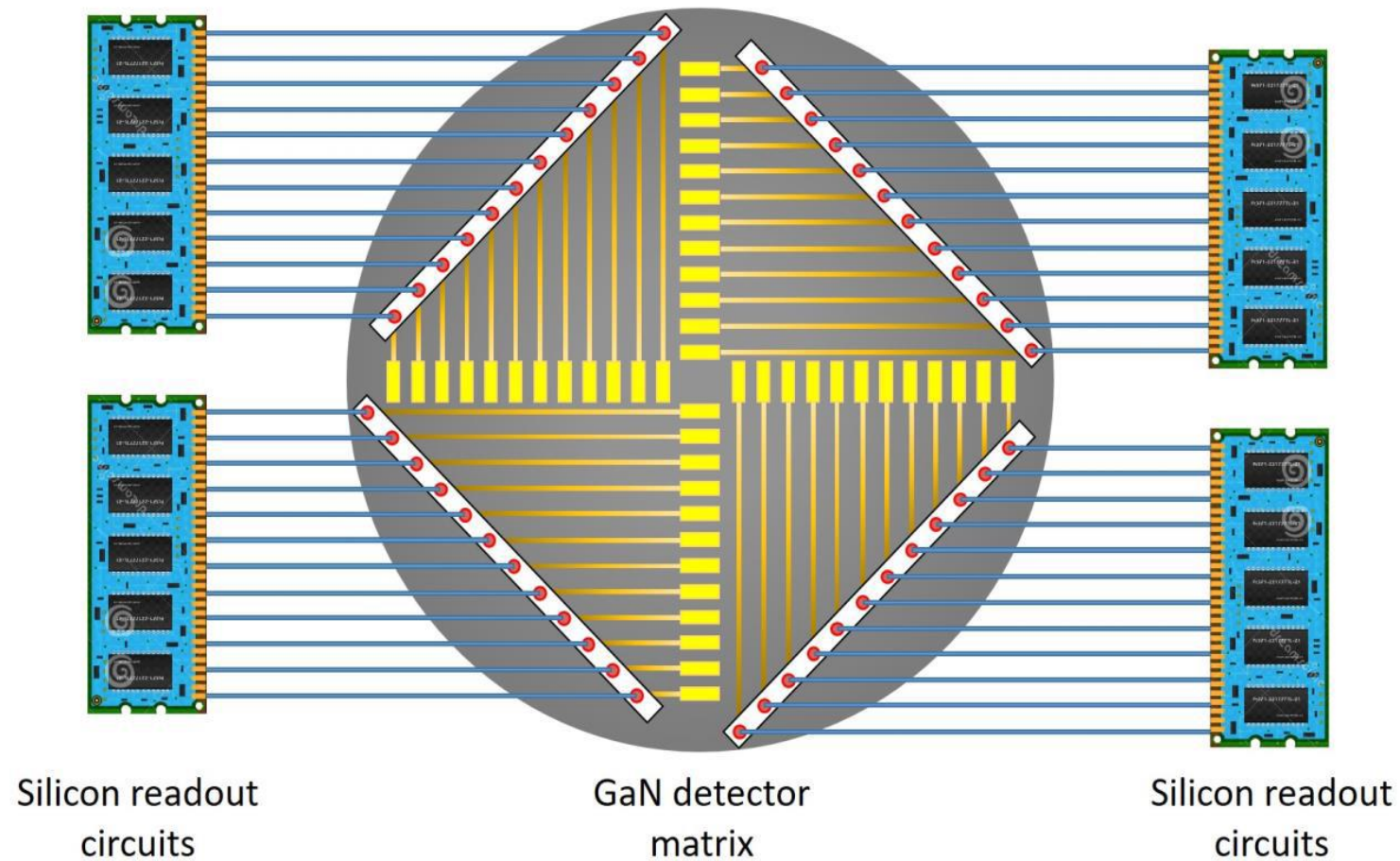


Silicon readout
circuit

GaN detector
single array

Collaboration souhaitée
avec laboratoire ayant
une expertise en
électronique de matrice

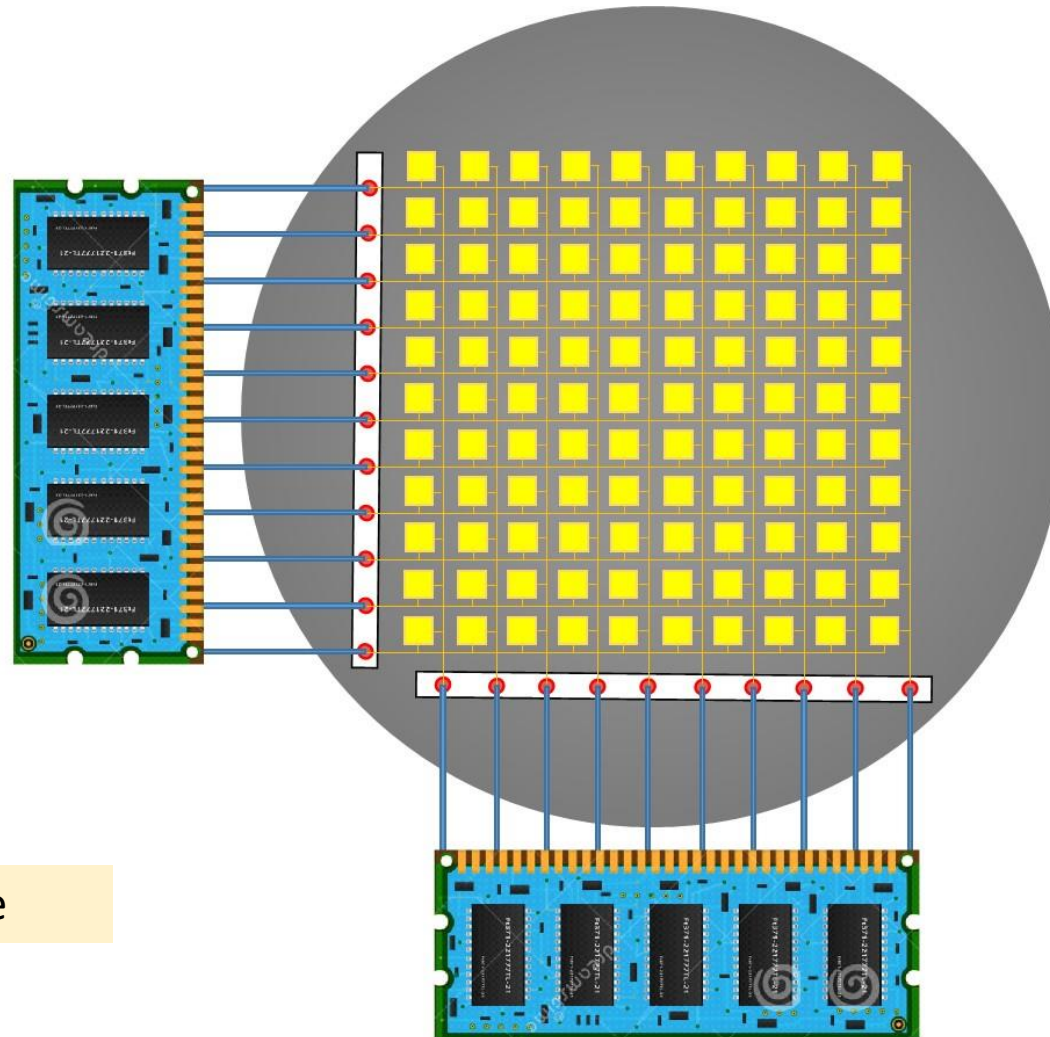
Matrices de détecteurs GaN (1.5D)



Collaboration souhaitée
avec laboratoire ayant
une expertise en
électronique de matrice

Matrices de détecteurs GaN (2D)

Scanner de commande
en tension
N canaux



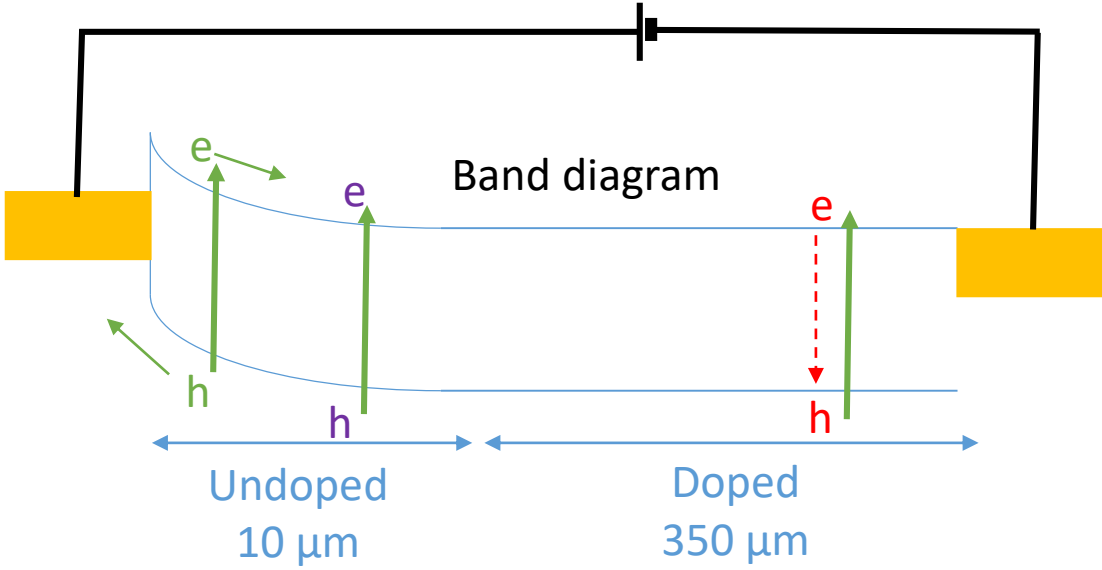
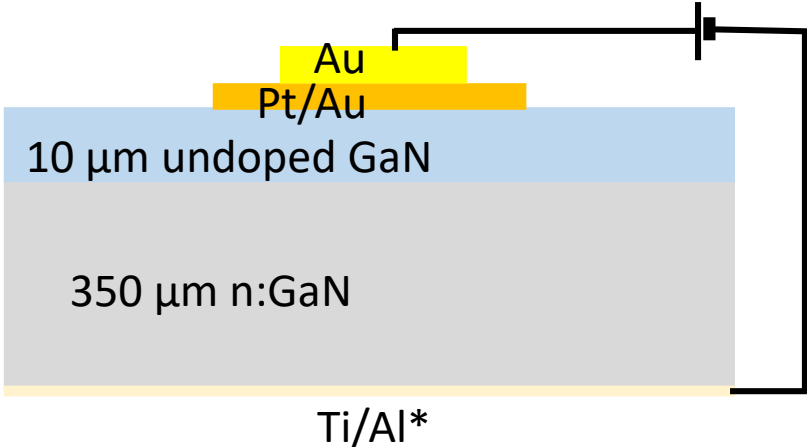
Matrice de détecteurs GaN
 $N \times 128$ ou $N \times 256$

Collaboration souhaitée
avec laboratoire ayant
une expertise en
électronique de matrice

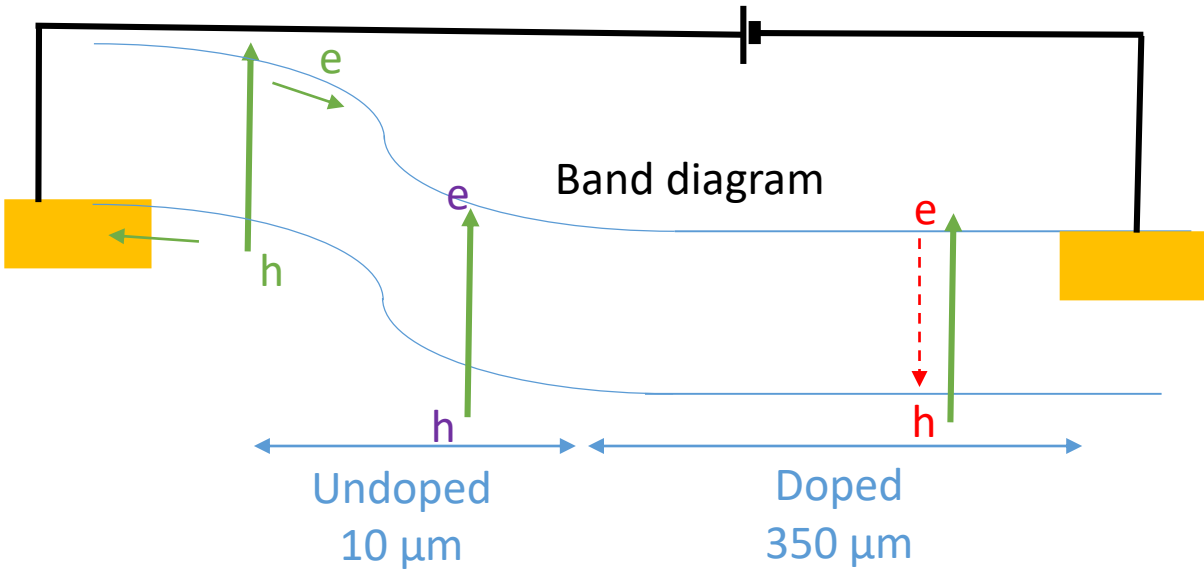
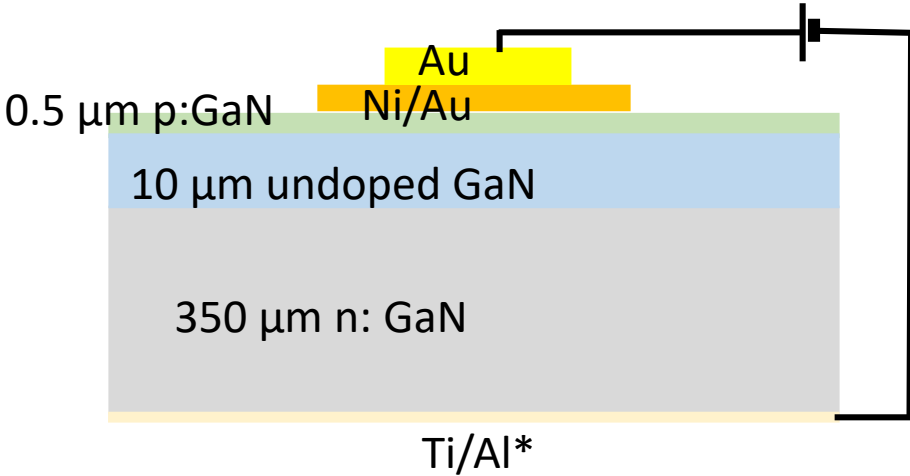
Lecture ligne-colonne

Circuit de lecture commercial
128 ou 256 canaux à base de Si

Diodes Schottky

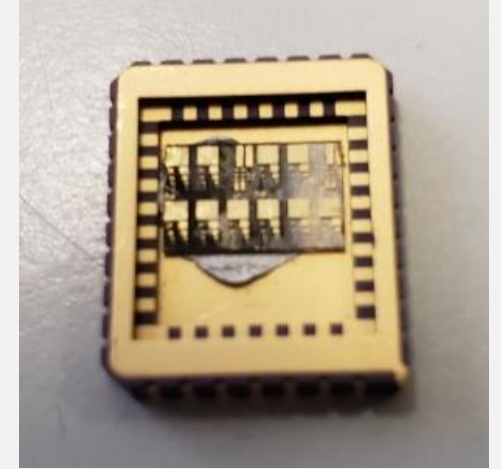
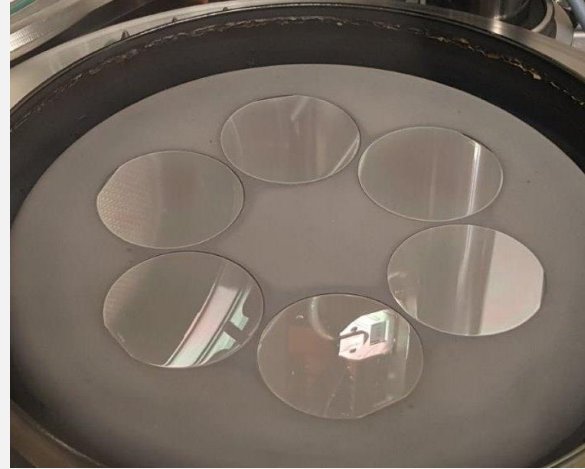


Diodes pin

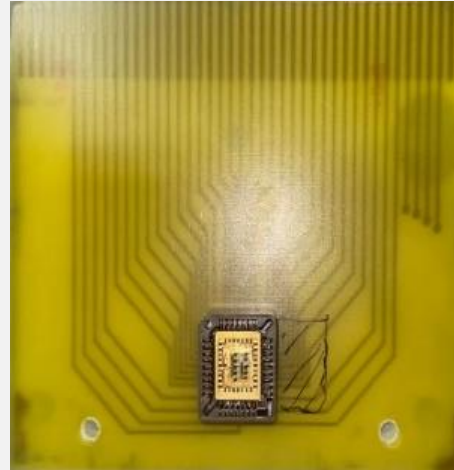


* Variante avec contact n face avant

CNRS-CRHEA

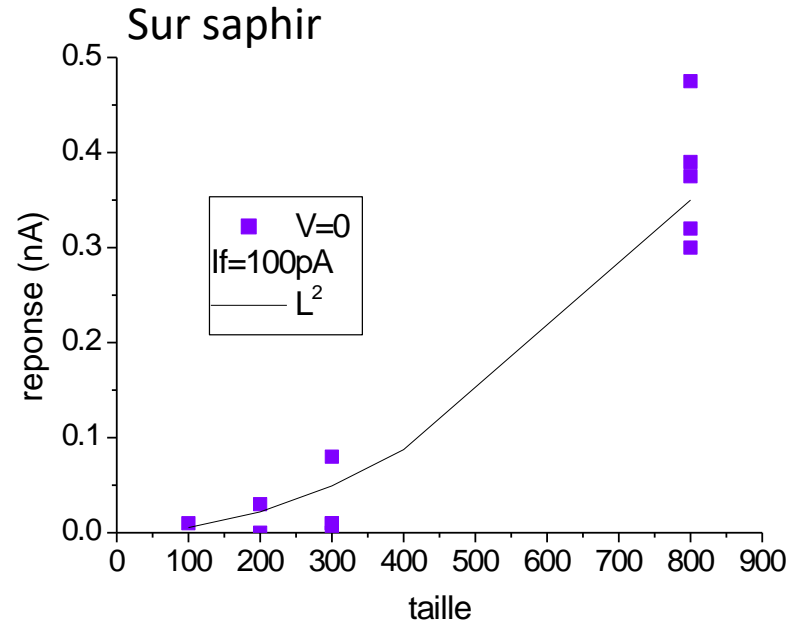
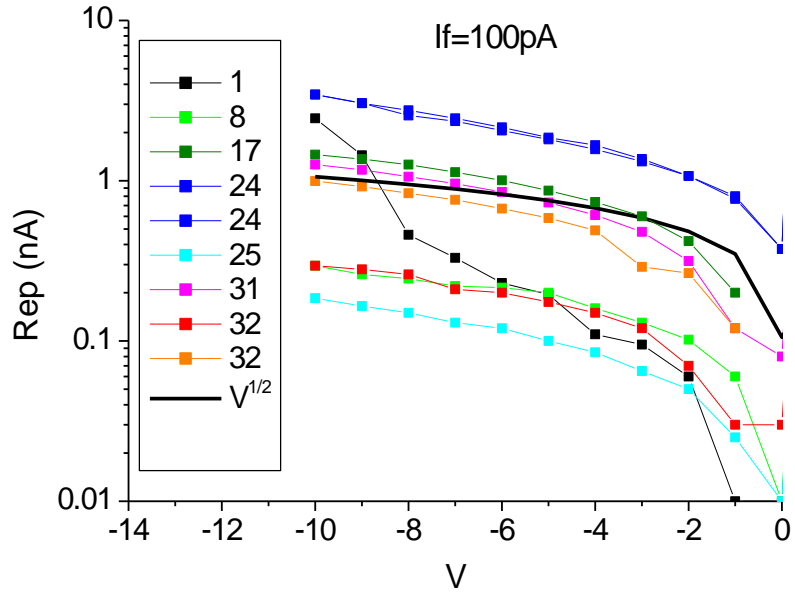


IMPT-CAL

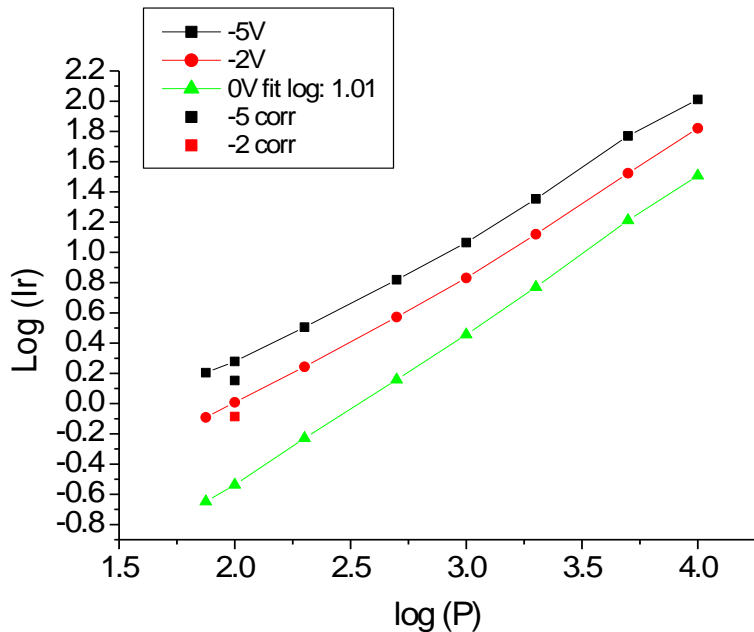


- 7 ns pulses-frequency of 25 MHz
- CW measurements
- Proton energy =64.8 MeV.
- Beam size = $0.4 \times 2 \text{ cm}^2$.
- Proton current from 10 pA to 100 nA.
- 30 m coaxial cable

Diode Schottky



Taille 800 μm : Dispersion 7.8%

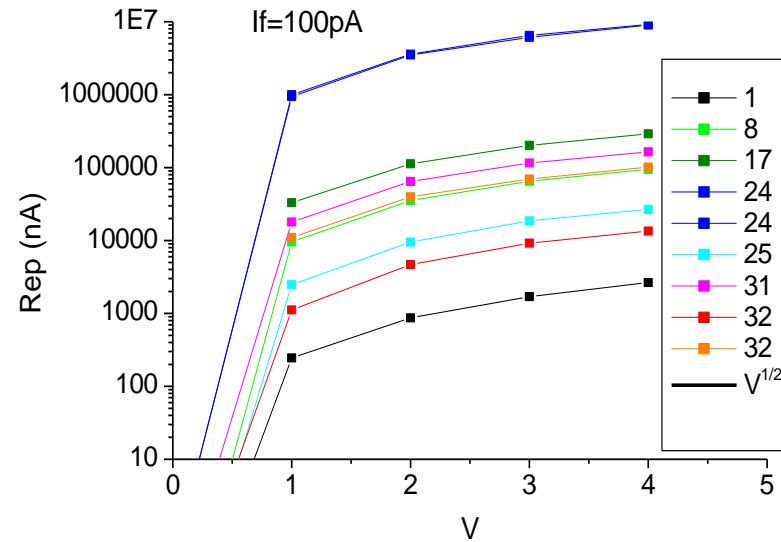
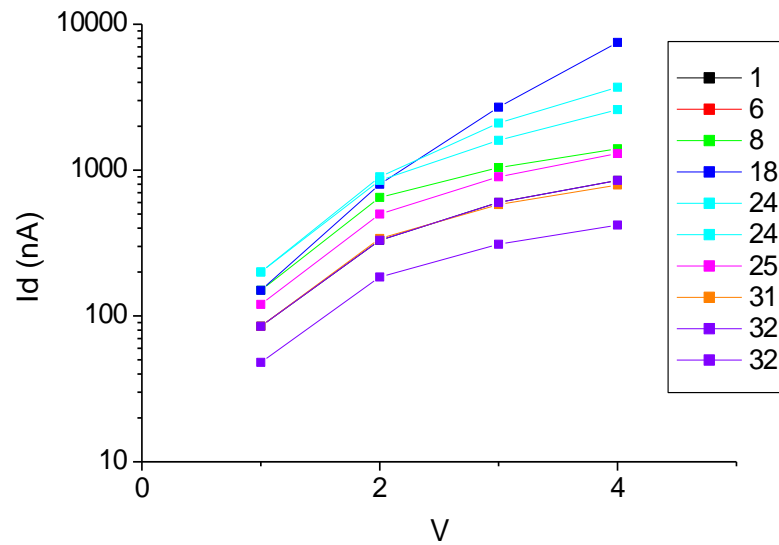


En inverse

- Réponse en \sqrt{V}
 - Réponse rapide ($< 1 \text{ s}$)
 - Linéarité avec I_{proton}
 - Réponse absolue en accord avec théorie
- \Rightarrow Photovoltaïque

Diode Schottky

Sur saphir



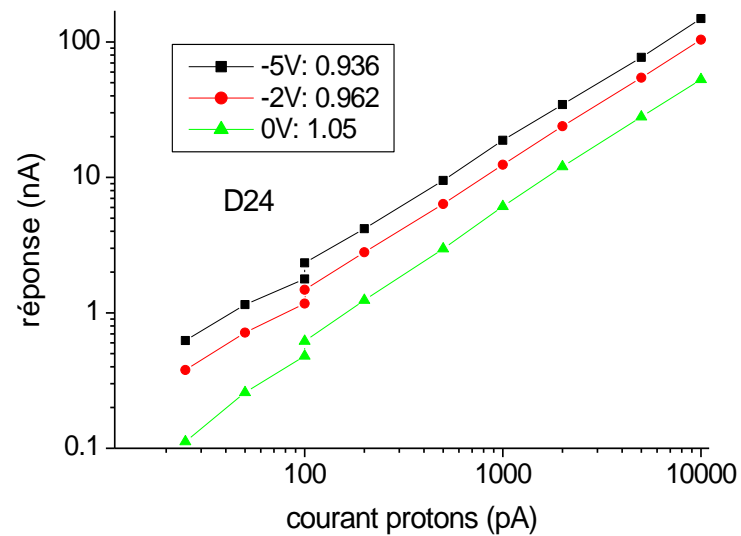
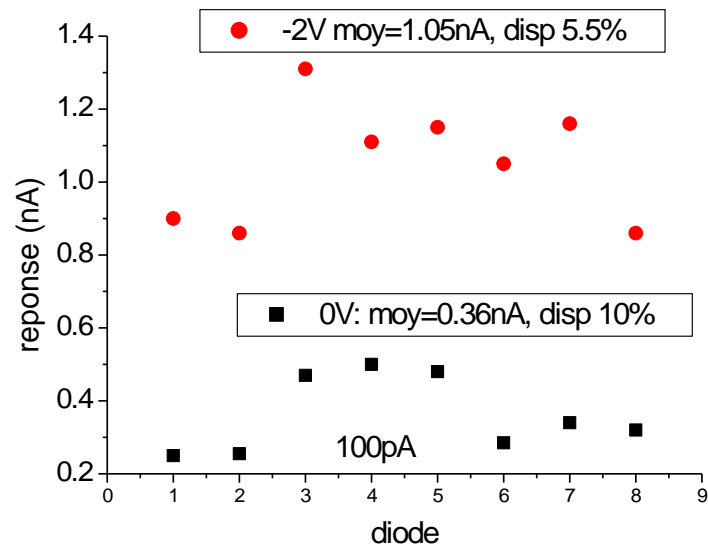
En direct

- Forte réponse qui augmente avec le courant d'obscurité et indique un gain de photoconductivité $\gg 1$
- Réponse lente ($>1s$)
- Sous linéarité avec I_{proton}

\Rightarrow Photoconducteur

Diode Schottky

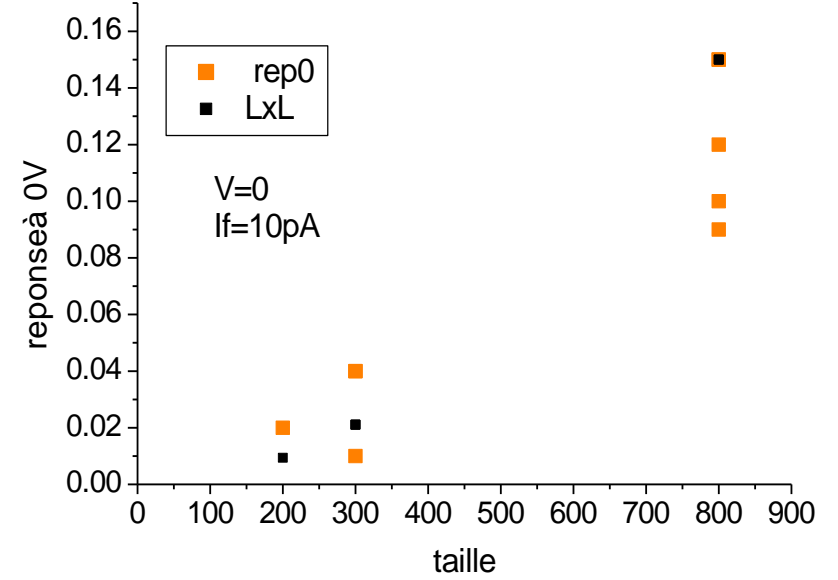
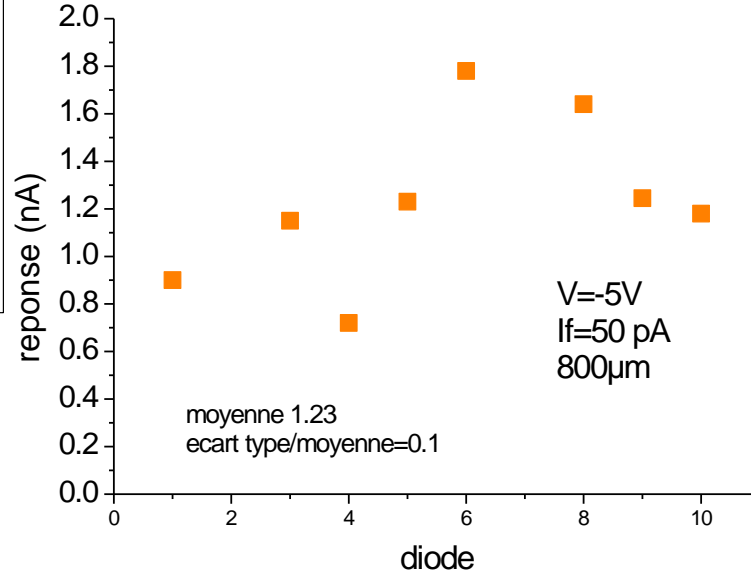
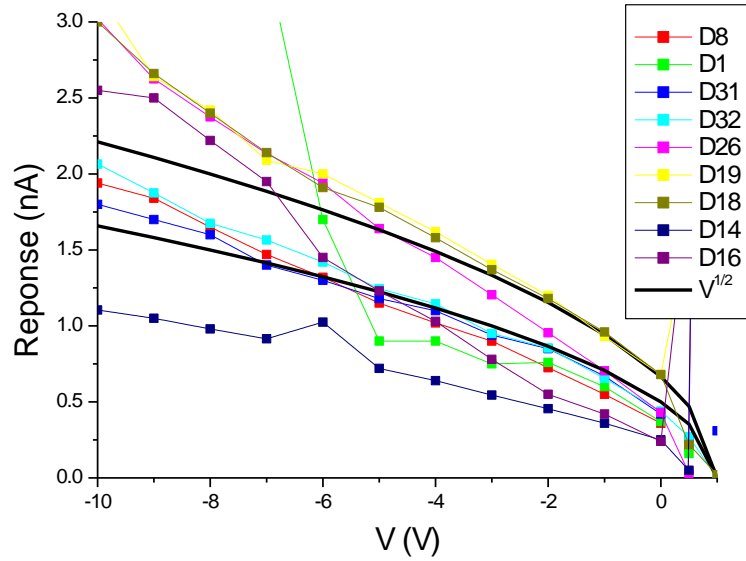
Sur GaN



Résultats similaires sur substrat GaN et sur substrat saphir

Diode pin

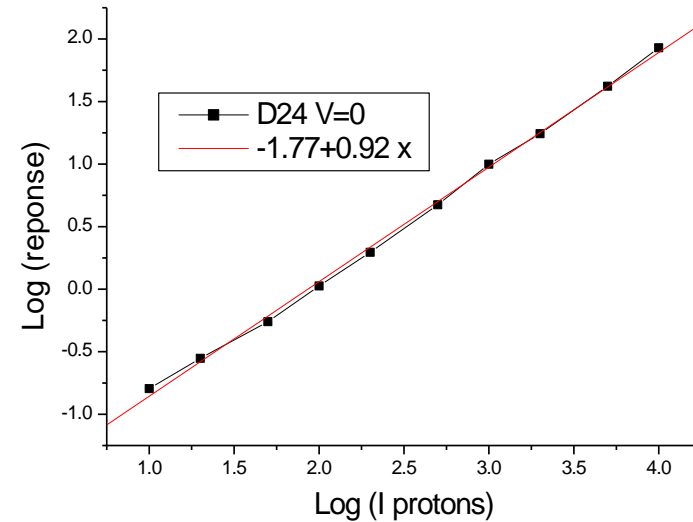
Sur GaN



En inverse

- Réponse en \sqrt{V}
- Réponse rapide (<1s)
- Linéarité avec I_{proton}
- Réponse absolue en accord avec théorie

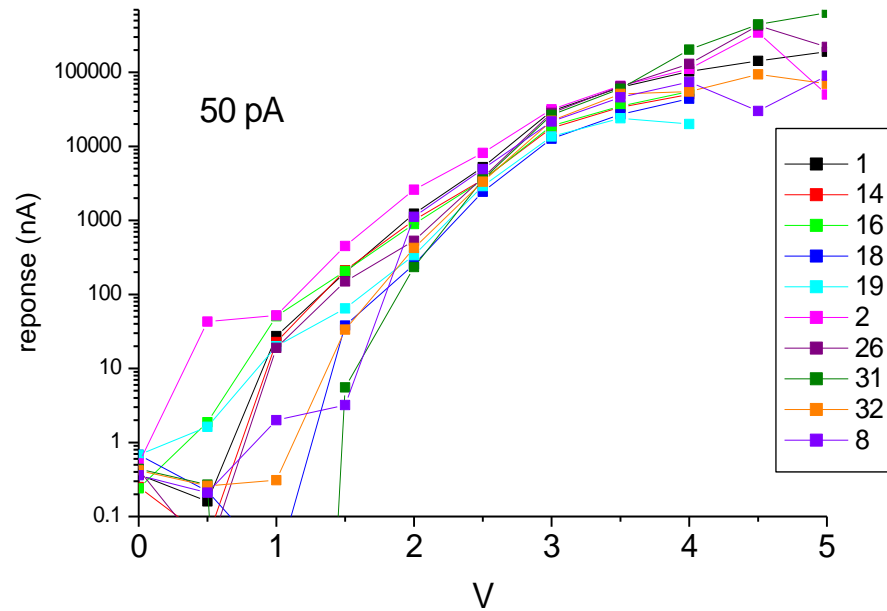
⇒ Photovoltaïque



Contribution parasite pour les petites tailles due au boitier

Diode pin

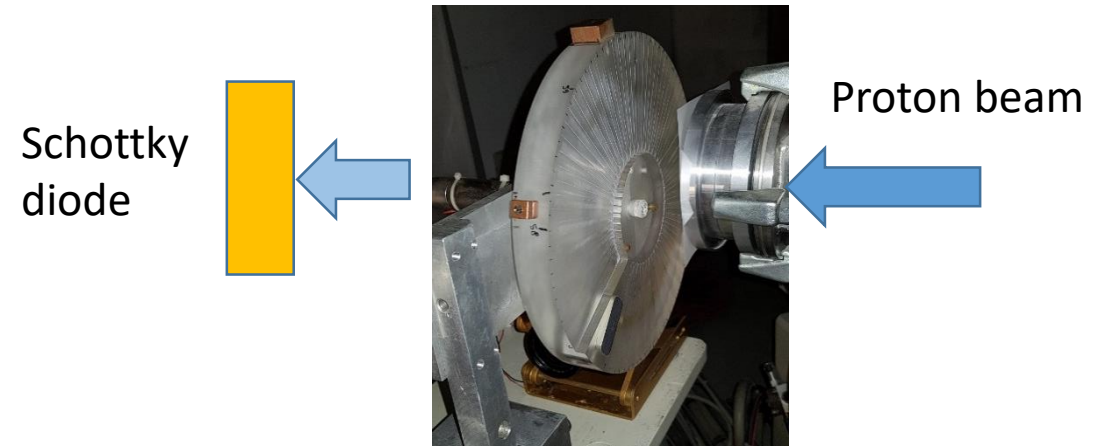
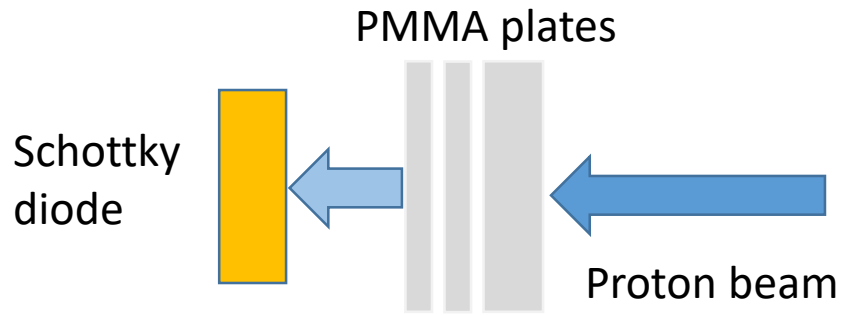
Sur GaN



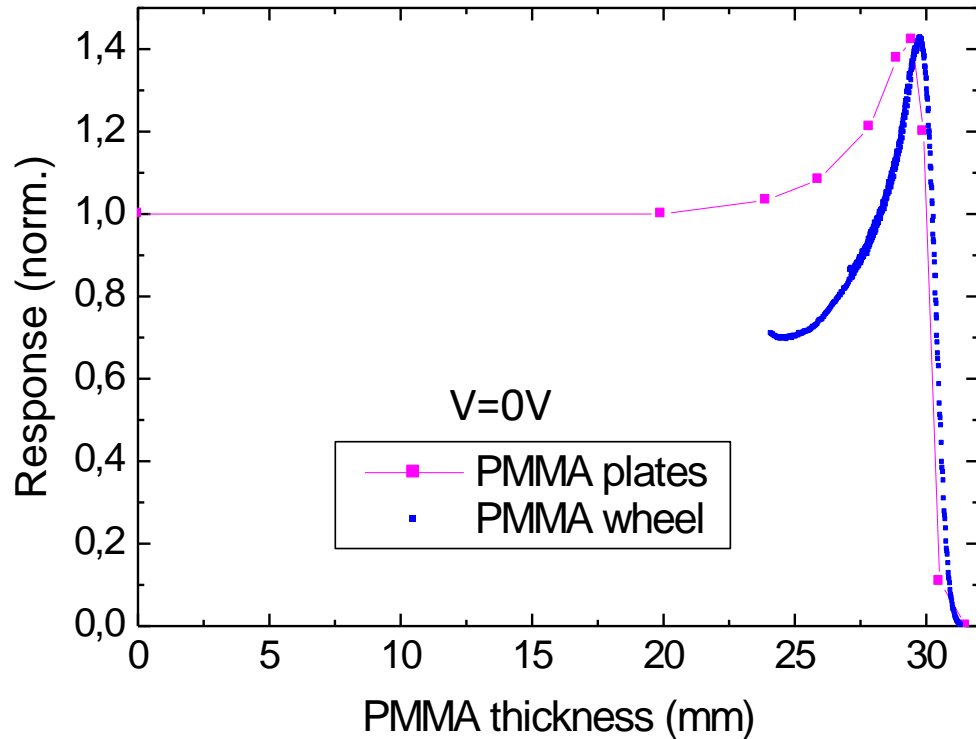
En direct

- Forte réponse qui augmente avec le courant d'obscurité et indique un gain de photoconductivité $\gg 1$
 - Réponse lente ($>1s$)
 - Sous linéarité avec I_{proton}
- \Rightarrow Photoconducteur

Absorption spectrale dans GaN

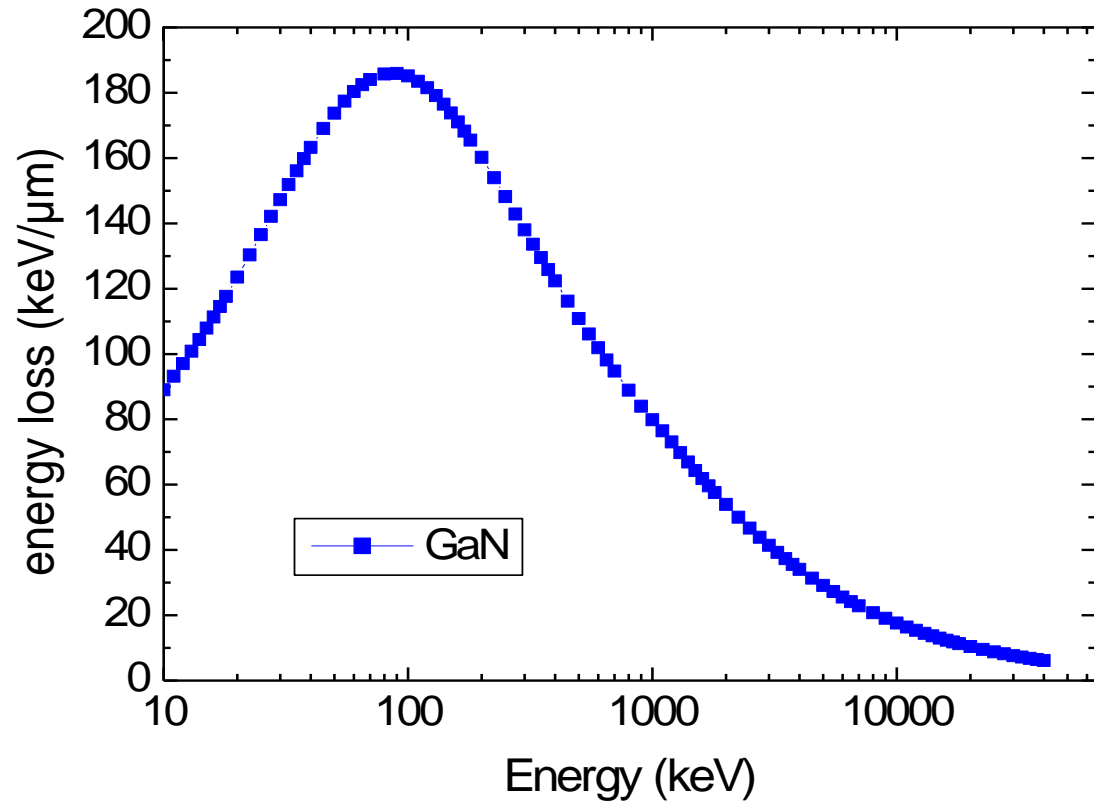


PMMA wheel with varying thickness



- L'énergie des protons varie avec l'épaisseur de PMMA
⇒ Mesure de la réponse d'une diode GaN en fonction de l'énergie des protons

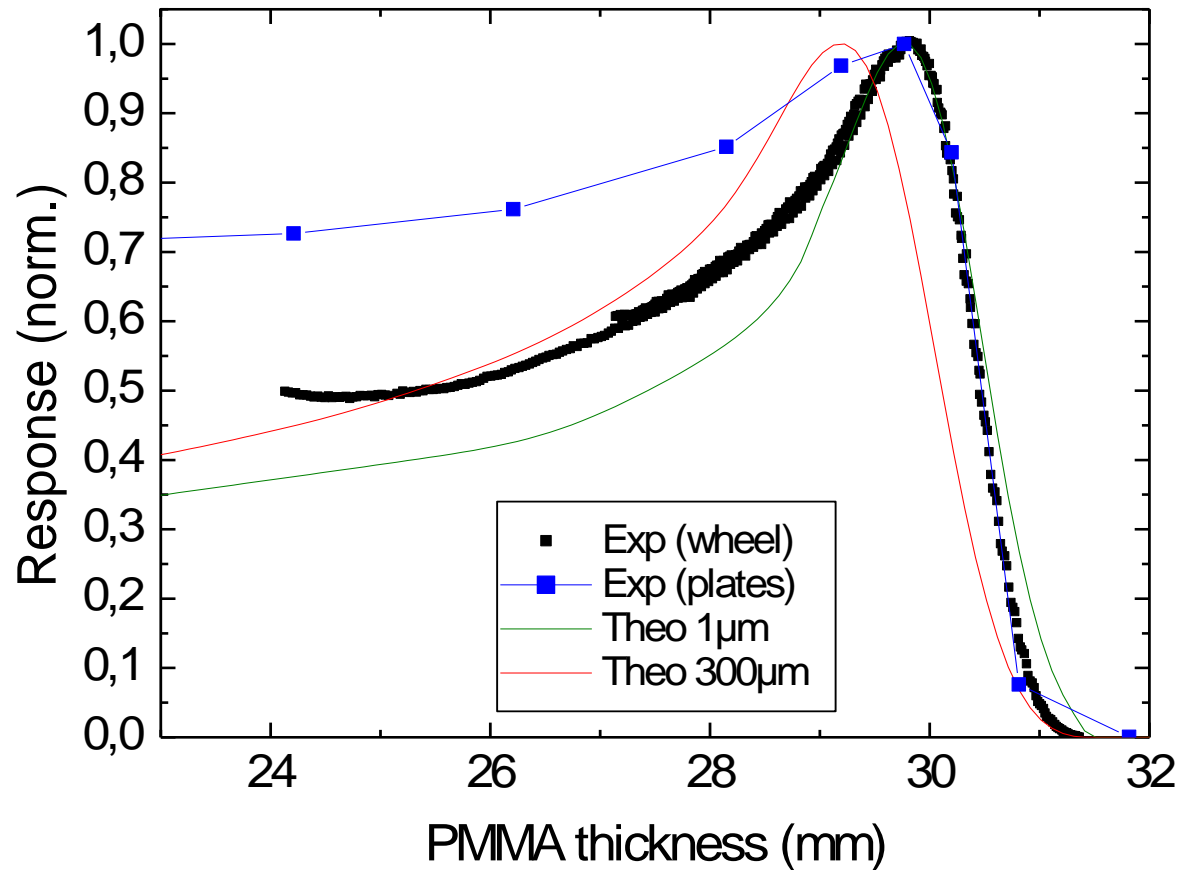
Pertes d'énergie dans GaN



Théorie (Bethe)

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

*Particule avec charge ze et $\beta=v/c$
Matériau: densité électronique n et
potentiel d'excitation moyen I*

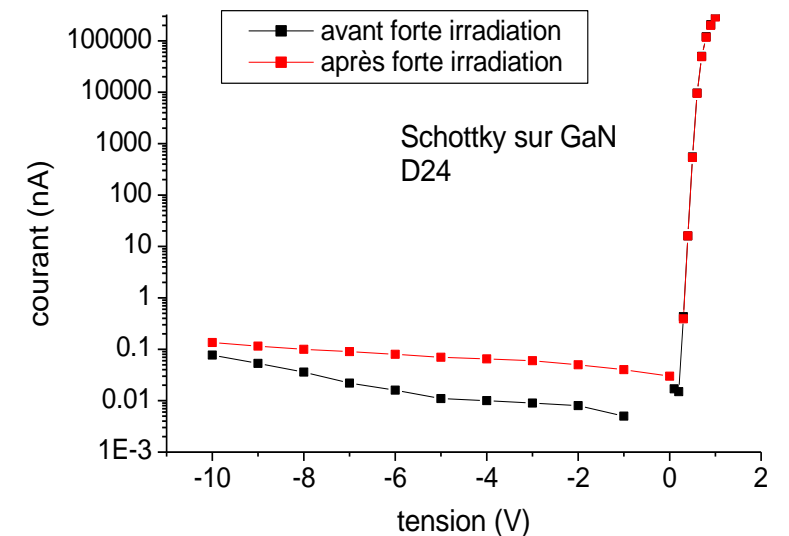


Très bon accord entre théorie et mesure; le désaccord restant est dû à des effets parasites (élargissement transverse)

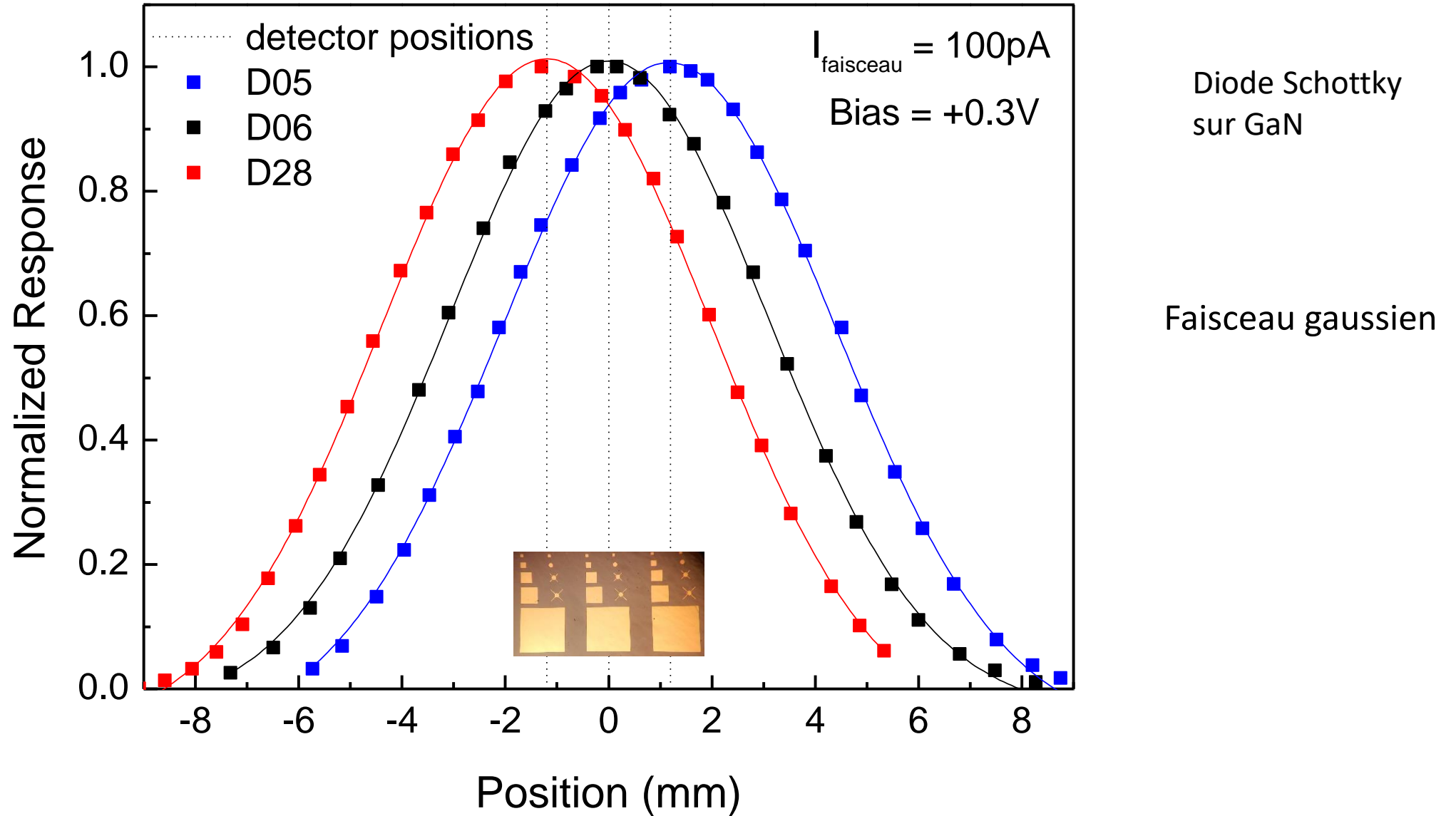
- Le spectre d'absorption dans GaN suit le modèle de Bethe
- La région contribuant au courant est de quelques microns (pas le substrat)

Résistance aux radiations

- Aucune dégradation observée sur les diodes jusqu'à une dose totale de 10^{14} cm^{-2} .
- La littérature indique des seuils de dégradation de transistors GaN de $> 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ pour des protons de qq MeV
- NB: $4,4 \text{ keV}/\mu\text{m} \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \Rightarrow 10^5 \text{ Gy}$. Human letal dose = 5 Gy
- On observe une augmentation des courants d'obscurité juste après irradiation: après quelques min ou après application d'une tension, le courant reprend sa valeur (phénomènes de piégeage/dépiégeage) sur des niveaux profonds

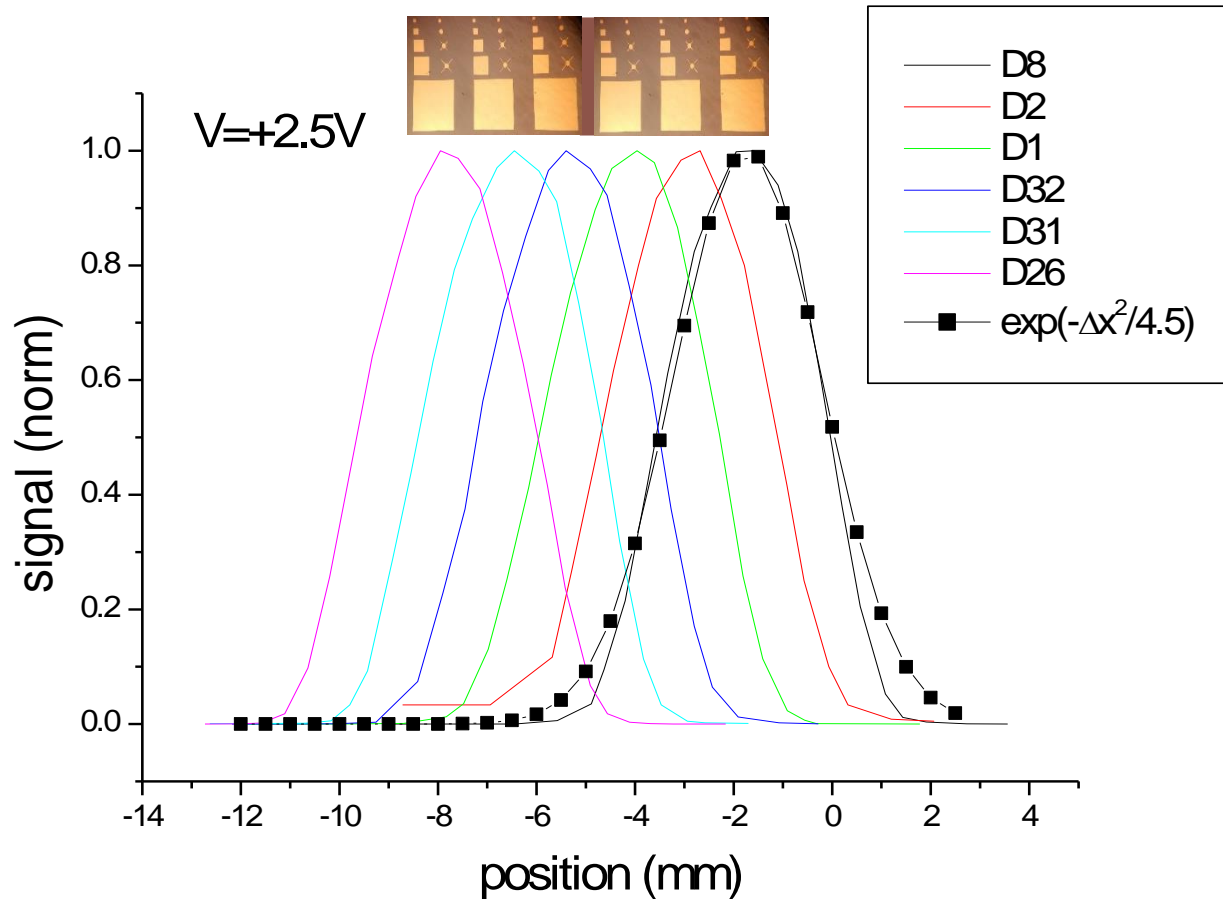


Résolution spatiale et imagerie

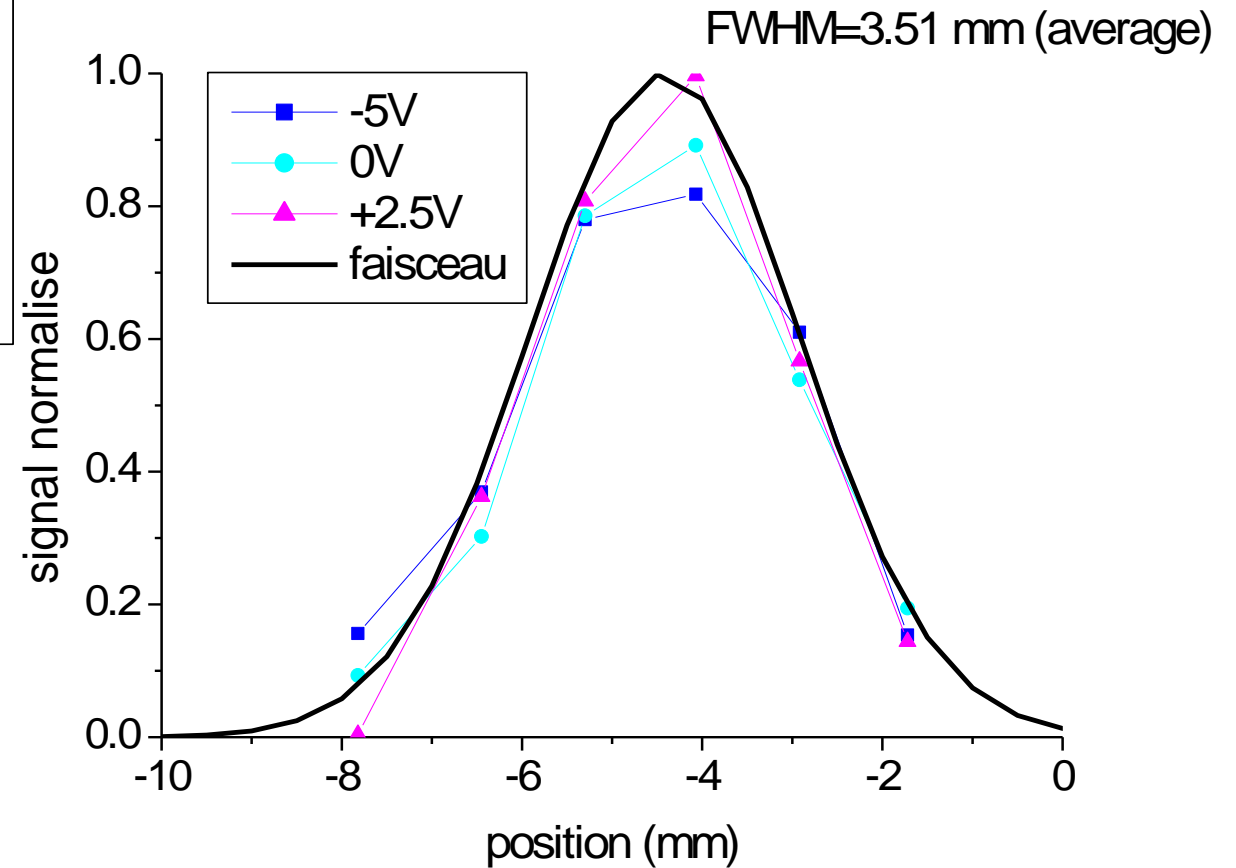


Résolution spatiale et imagerie

Mesure du faisceau par déplacement latéral des diodes
FWHM=3.52 mm



Mesure du faisceau par mesure simultanée des 6 diodes
et calibration



Diode pin sur GaN

Conclusion

- ❖ Les mesures au niveau du pixel unitaire sont quasiment terminées
- ❖ Les diodes Schottky et pin ont des comportements similaires: PV en inverse et PC en direct
- ❖ Courants de fuite inférieurs et réponses légèrement supérieures pour les pin
- ❖ La sensibilité permet de mesurer des densités de courants jusqu'à 1pA/cm² sans électronique dédiée.
- ❖ Le projet s'oriente maintenant vers la fabrication de matrices 1D, 1.5D et 2D, pour gagner en sensibilité et réaliser l'imagerie de faisceau voire de patient (à long terme). Une collaboration sur l'électronique est recherchée.

1- Jean-Yves Duboz, Julie Zucchi, Eric Frayssinet, Patrick Chalbet, Sébastien Chenot, Maxime Hugues, Jean-Claude Grini, Richard Trimaud, Marie Vidal and Joël Hérault, GaNSchottky diodes for proton beam monitoring, *Biomed. Phys. Eng. Express*, vol 5, n2, 025015 (2019). <https://doi.org/10.1088/2057-1976/aaf9b4>, <http://arxiv.org/abs/1810.08377>

2- Proton energy loss in GaN, Jean-Yves Duboz, Julie Zucchi, Eric Frayssinet, Sébastien Chenot, Maxime Hugues, Jean-Claude Grini, and Joël Hérault, *Phys. Status Solidi B* 2021, 2100167 (2021). DOI: 10.1002/pssb.202100167

A panoramic view of a city at sunset. The sun is low on the horizon, casting a warm glow over the city and the surrounding landscape. In the foreground, there is a dense forest of green trees. In the middle ground, the city is visible with various buildings and structures. In the background, there is a large body of water and distant hills. The overall scene is peaceful and scenic.

Merci pour votre attention

Radiation robustness

	Si	GaAs	GaN	AlN
Cohesive energy (eV per bond)	2.17-2.32	1.63	2.1-2.44	2.88
Bond length(Å)	2.25	2.45	1.93	1.86
Melting point (°C)	1410	1238	2500	2800

GaN and Si have similar cohesive energy.

Why are displacement energies so different ?

And melting points ?