

Détecteurs infrarouges à superréseaux de type-2 (T2SL)

Philippe CHRISTOL

(philippe.christol@umontpellier.fr)

Institut d'Electronique et des Systèmes (IES)



UMR-CNRS 5214

Université de Montpellier, FRANCE.



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

Détecteurs T2SL

Photodétecteurs T2SL : imageurs IR commercialement disponibles



FLIR **X6900sc SLS™**

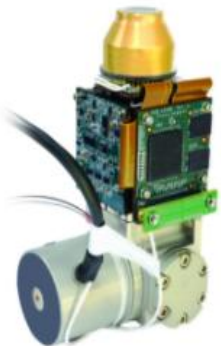
Caméra LWIR [7.5 – 12μm]
InAs/GaSb T2SL
VGA format
NETD 40mK (f/2.5)



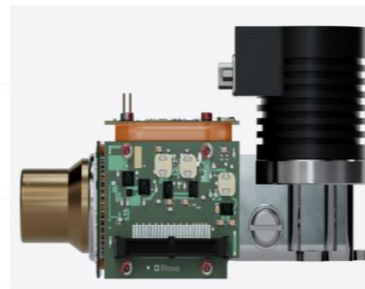
T2SL detector (i3system)
XGA format, 10μm pitch

MWIR (3μm-5μm) **i3system**
NETD ~ 25mK
FPA Operating Temp : up to 120-130K

LWIR (7.7μm-9.4μm)
NETD ~ 30mK
FPA Operating Temp : 80K



InAs/GaSb T2SL XBp detector (SCD)
LWIR (9.3μm cutoff)
VGA format, 15μm pitch
NETD ~ 15mK
FPA Operating Temp : 77K



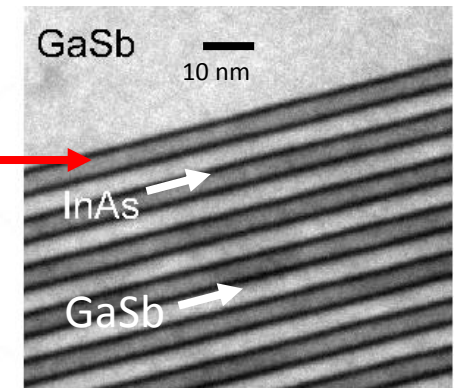
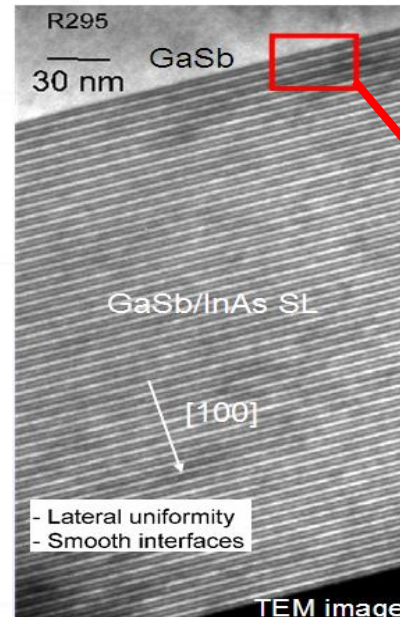
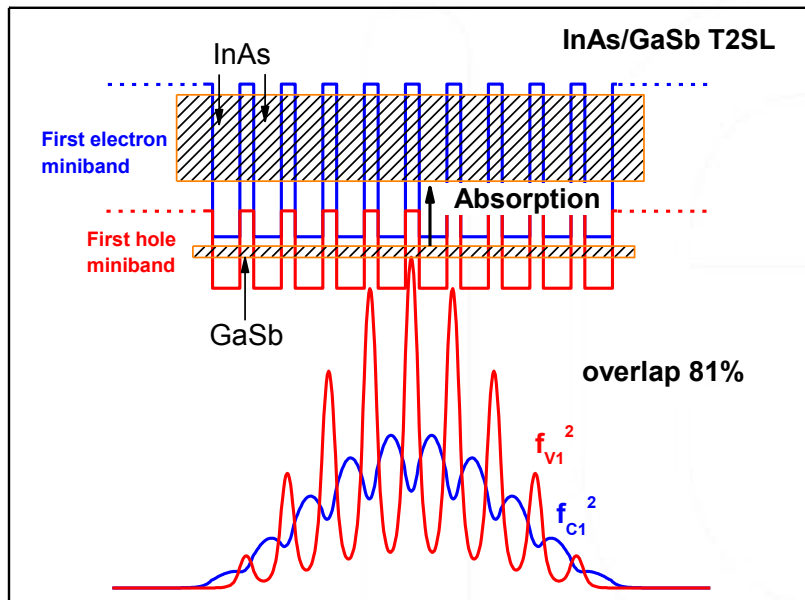
T2SL detector (IRnova)
MWIR (3.7μm-5.1μm)
VGA format, 15μm pitch
NETD ~ 20mK (f/4)
FPA Operating Temp : up to 120-130K



Détecteurs T2SL

Structures à superréseaux T2SL

Ga-containing InAs/GaSb T2SL



→ très grand nombre de périodes (nbre d'interfaces)

grande flexibilité : du MWIR au VLWIR ($3\mu\text{m} - 30\mu\text{m}$)

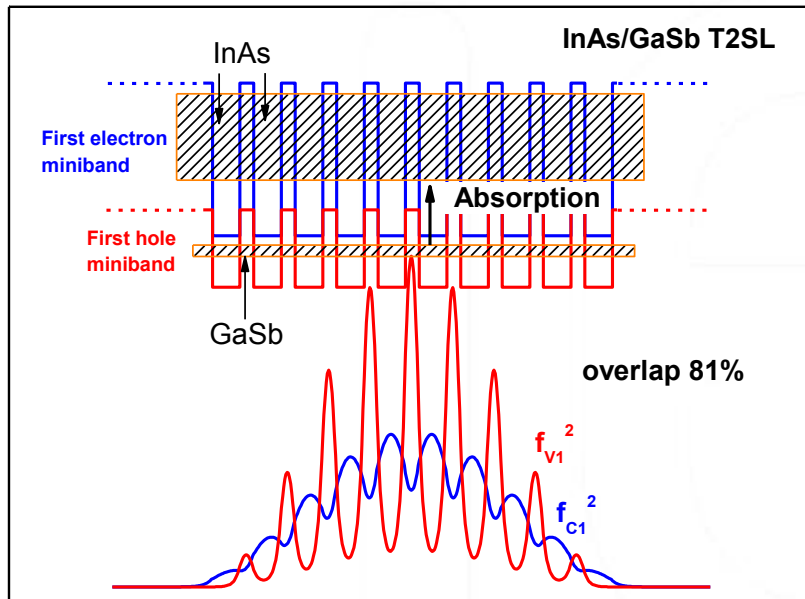
forte absorption

faible lifetime ($\sim 100\text{ns}$ MWIR)

Détecteurs T2SL

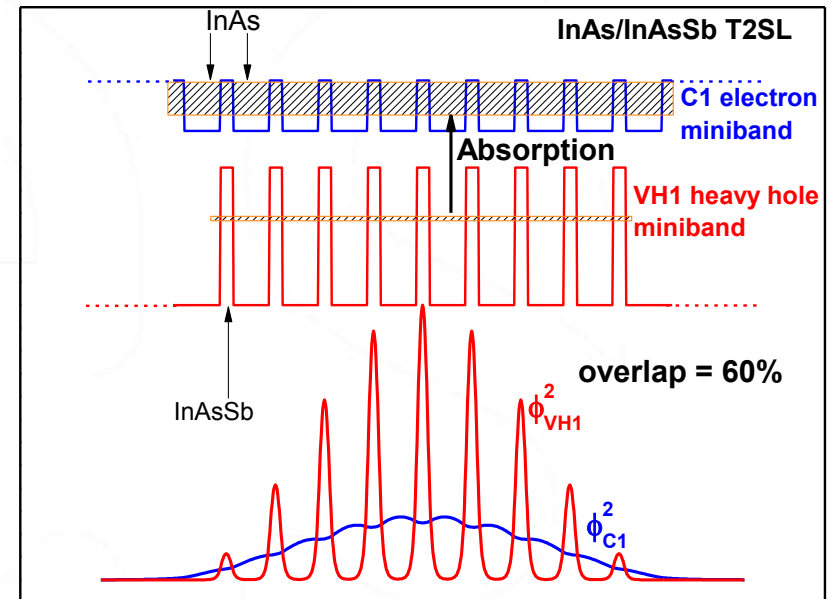
Structures à superréseaux T2SL

Ga-containing InAs/GaSb T2SL



grande flexibilité : du MWIR au VLWIR (3 μ m – 30 μ m)
forte absorption
faible lifetime (~100ns MWIR)

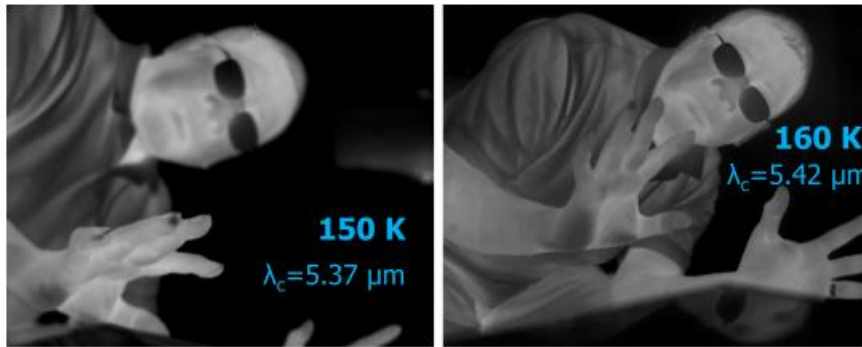
New Ga-free InAs/InAsSb T2SL (GF T2SL)



plus faible flexibilité : de 3 à 13 μ m max
plus forte anisotropie
mais lifetime plus élevée (> 1 μ s MWIR)

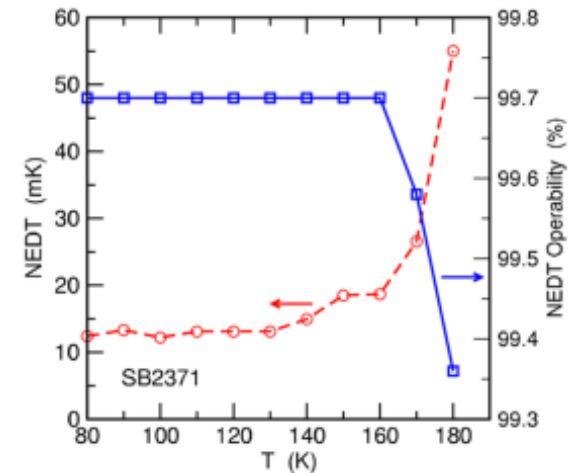
Détecteurs à superréseaux T2SL « Ga-free »

→ JPL : D. Ting *et al* IEEE Photon. J. 10 (dec 2018)



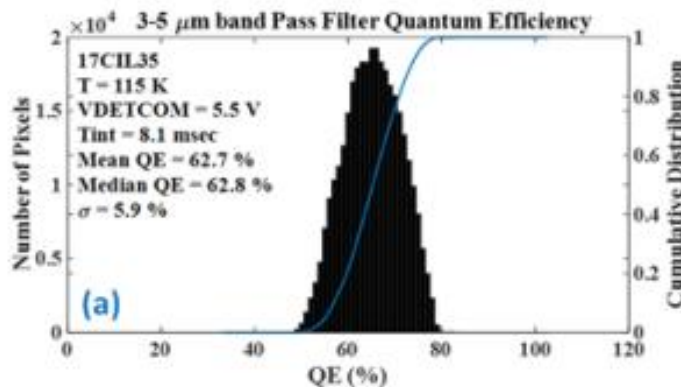
MWIR

VGA format
NETD 19 mK
@150K , f/2



→ JPL : D. Ting *et al* IEEE Photon. Technol. Lett. 34 (March 2022)

Type-II Superlattice Mid-Wavelength Infrared Focal
Plane Arrays for CubeSat Hyperspectral Imaging



@115K

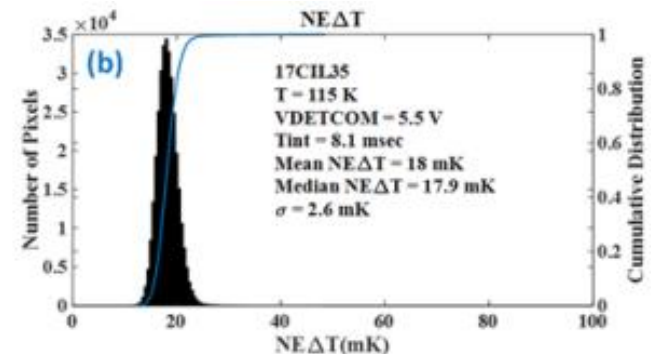
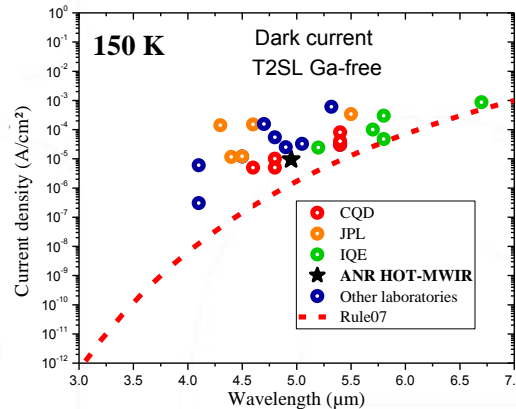
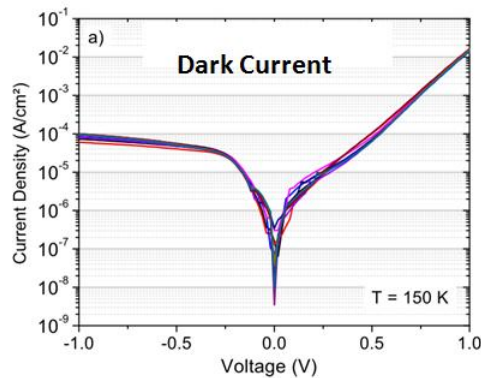


Fig. 6. Distribution histogram and cumulative distribution of (a) quantum efficiency (no anti-reflection coating) at 115 K, and (b) NETD at 115 K with 300 K background and F/7.8 optics for FPA 17CIL35.

Détecteurs T2SL

Détecteurs à superréseaux T2SL « Ga-free »

→ **ANR HOT-MWIR (2019-2023) : IES + LP-ENS + ILV + 3-5Lab + ONERA + LYNRED**

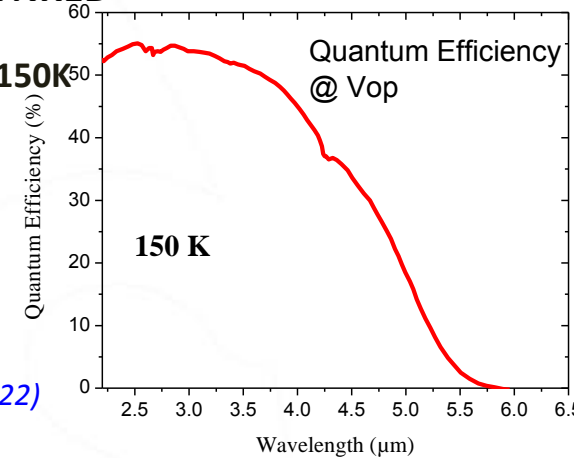


$J(V) = 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \text{ @150K}$

$QE > 50\% \text{ @150K}$

$\tau > 1.5 \mu\text{s} \text{ @150K}$

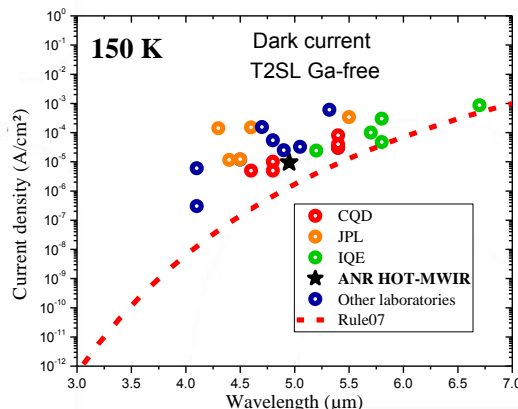
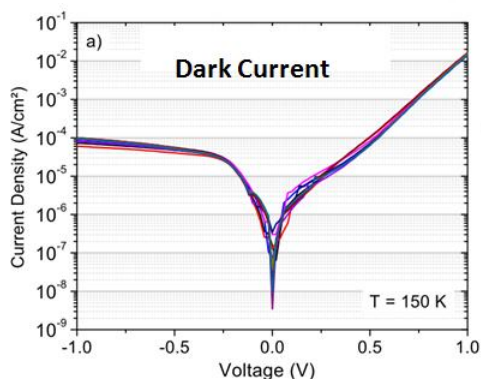
M. Bouschet *et al*,
Appl. Sc. **12**, 10358 (2022)



Détecteurs T2SL

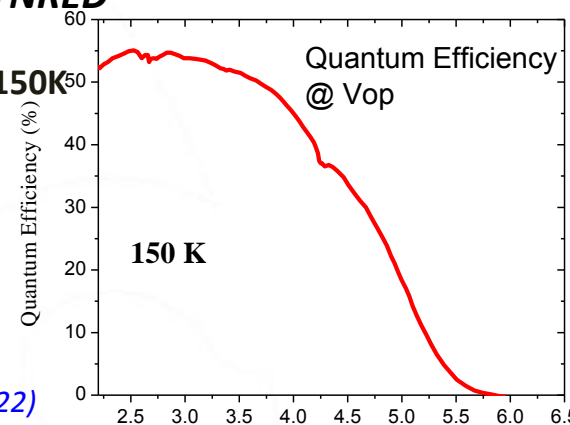
Détecteurs à superréseaux T2SL « Ga-free »

→ **ANR HOT-MWIR (2019-2023) : IES + LP-ENS + ILV + 3-5Lab + ONERA + LYNRED**

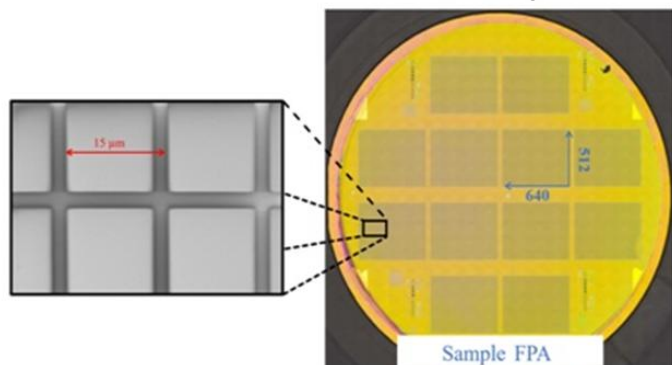


$J(V) = 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \text{ @ } 150\text{K}$
 $\text{QE} > 50\% \text{ @ } 150\text{K}$
 $\tau > 1.5 \mu\text{s} \text{ @ } 150\text{K}$

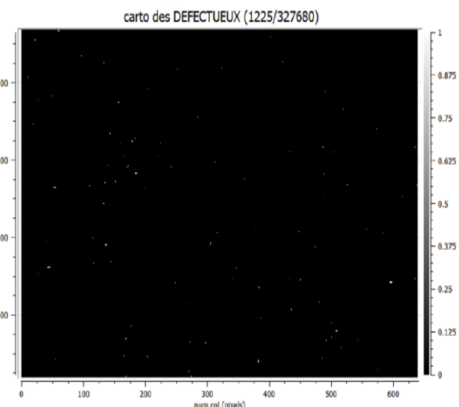
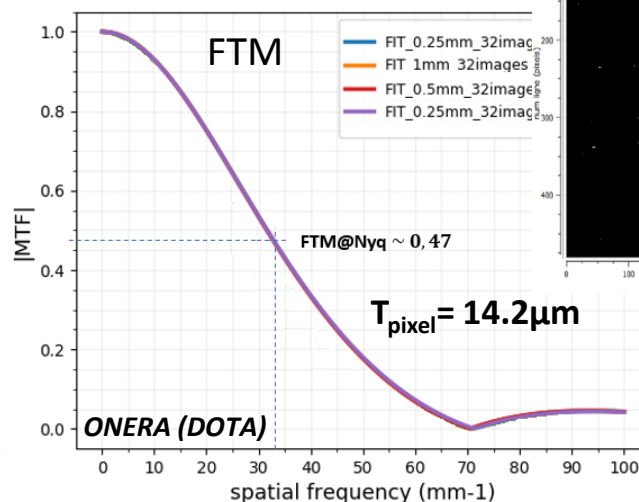
M. Bouschet *et al*,
Appl. Sc. **12**, 10358 (2022)



1ère réalisation d'un FPA (format VGA)



**Images IR
@130K**



**99.6% d'opérabilité
@130K**

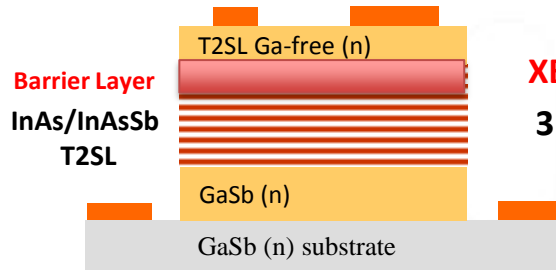
QE > 60% (TAR+DP)

Impact des irradiations protons sur les détecteurs IR T2SL

- ➔ R&T CNES (2019-2023)
- ➔ Thèse Région Occitanie / AIRBUS-DS (2020-2023) : Clara BATAILLON
- ➔ Thèse IES + Région Occitanie (2023-2026) : Hassen MEZOUAR

👉 **Etablir les besoins dans le contexte des applications spatiales**

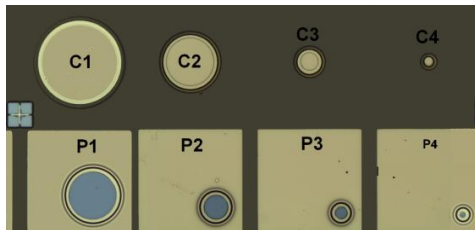
Détecteurs T2SL à barrière



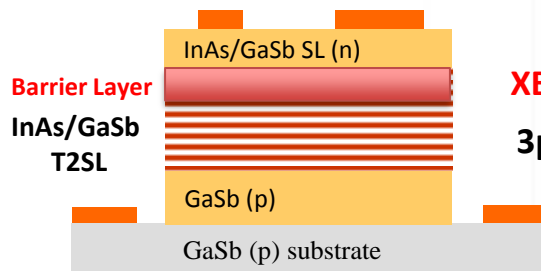
XBn MWIR InAs/InAsSb T2SL
 $3\mu\text{m} = 545$ periods

Pixel XBn MWIR Ga-free T2SL detector

ANR HOTMWIR + Thèse Cifre LYNRED (2019-2023)

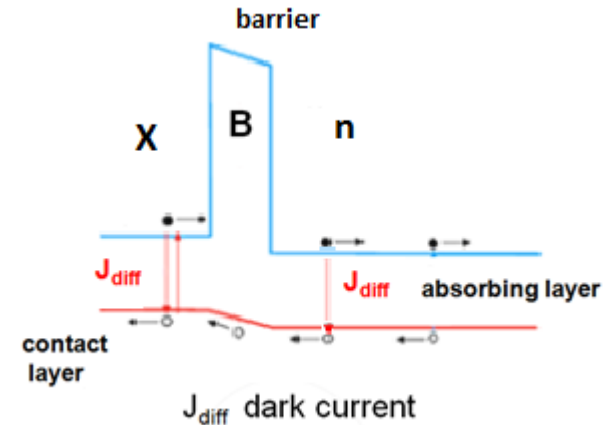


mesa size
 $70\mu\text{m}$ to $300\mu\text{m}$
Polymerised Photoresist

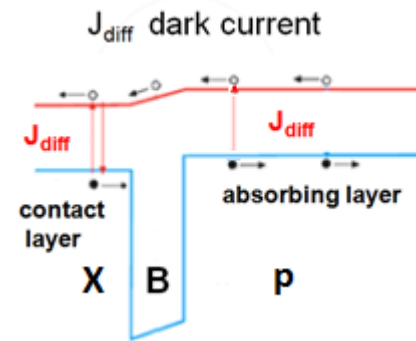


XBp LWIR InAs/GaSb T2SL
 $3\mu\text{m} = 455$ periods

Pixel XBp LWIR Ga-containing T2SL detector



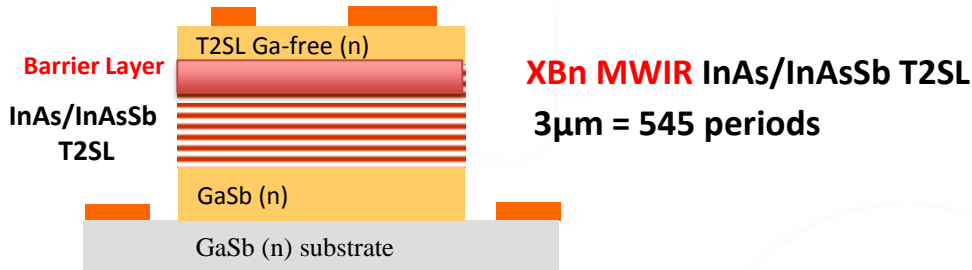
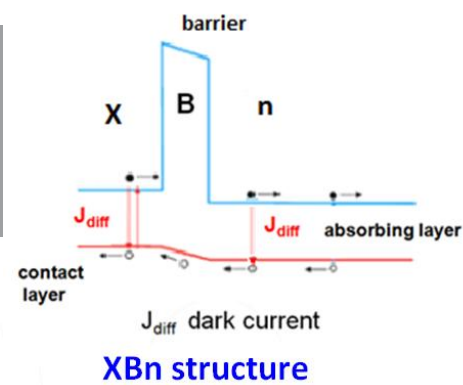
XBn structure



XBp structure

ESA project “Low dark current T2SL IR detectors”
IRnova + IES + AIRBUS-DS (2016-2019)

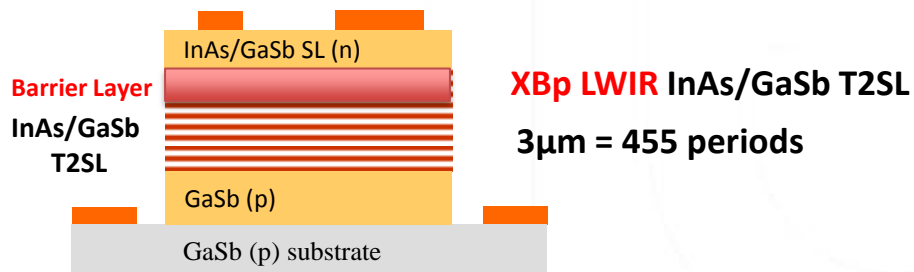
Détecteurs T2SL à barrière



XBn MWIR InAs/InAsSb T2SL
 $3\mu\text{m} = 545$ periods

Pixel XBn MWIR Ga-free T2SL detector

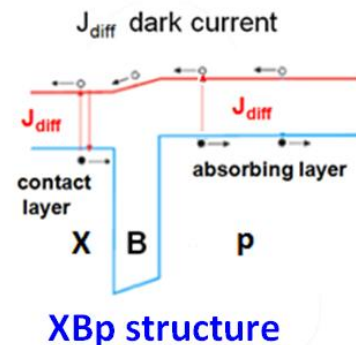
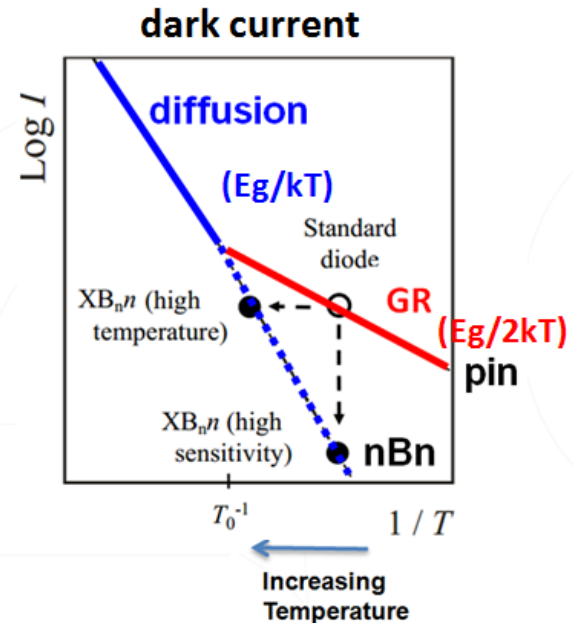
ANR HOTMWIR + Thèse Cifre LYNRED (2019-2023)



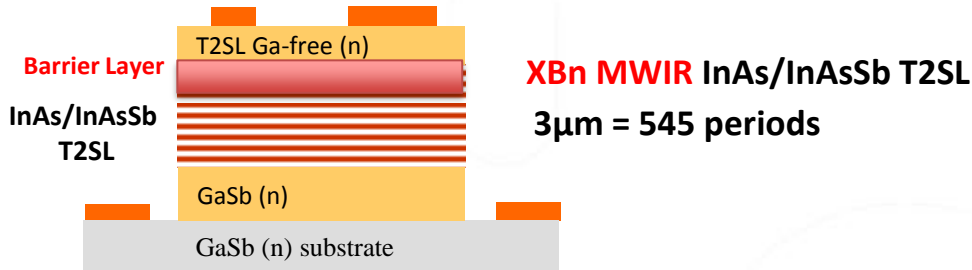
XBp LWIR InAs/GaSb T2SL
 $3\mu\text{m} = 455$ periods

Pixel XBp LWIR Ga-containing T2SL detector

ESA project "Low dark current T2SL IR detectors"
IRnova + IES + AIRBUS-DS (2016-2019)

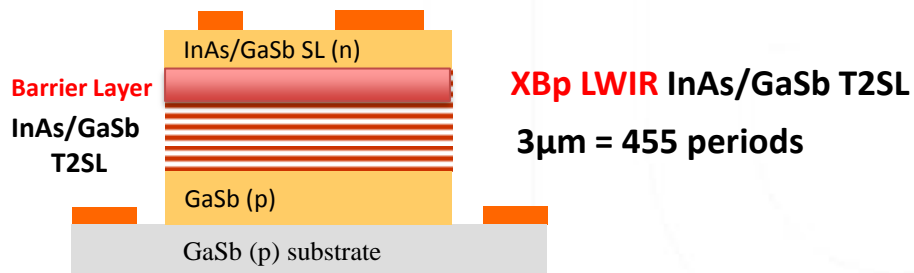


Détecteurs T2SL à barrière



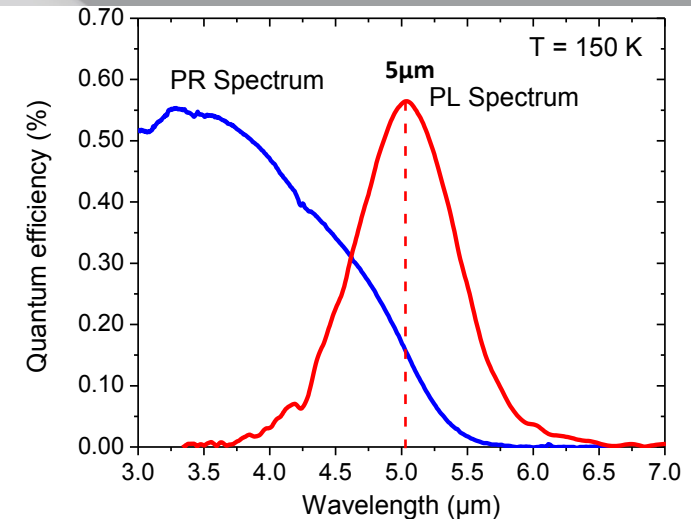
Pixel XBn MWIR Ga-free T2SL detector

ANR HOTMWIR + Thèse Cifre LYNRED (2019-2023)

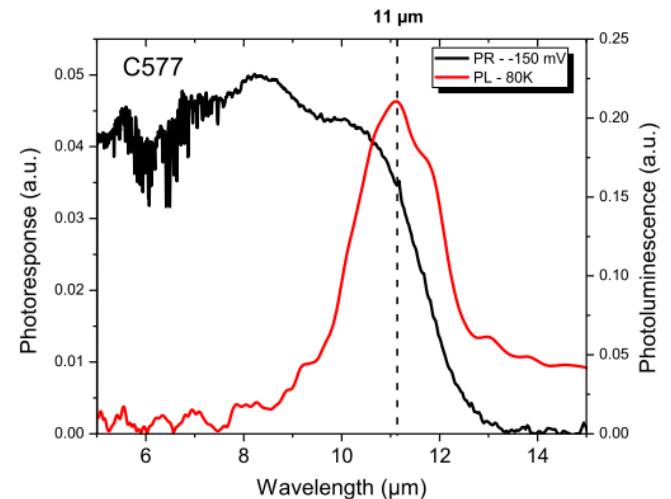


Pixel XBp LWIR Ga-containing T2SL detector

ESA project “Low dark current T2SL IR detectors”
IRnova + IES + AIRBUS-DS (2016-2019)



QE >50% pour 3 μm de ZA (zone active)
M. Bouschet *et al.* Appl. Sc. **12**, 10358 (2022)

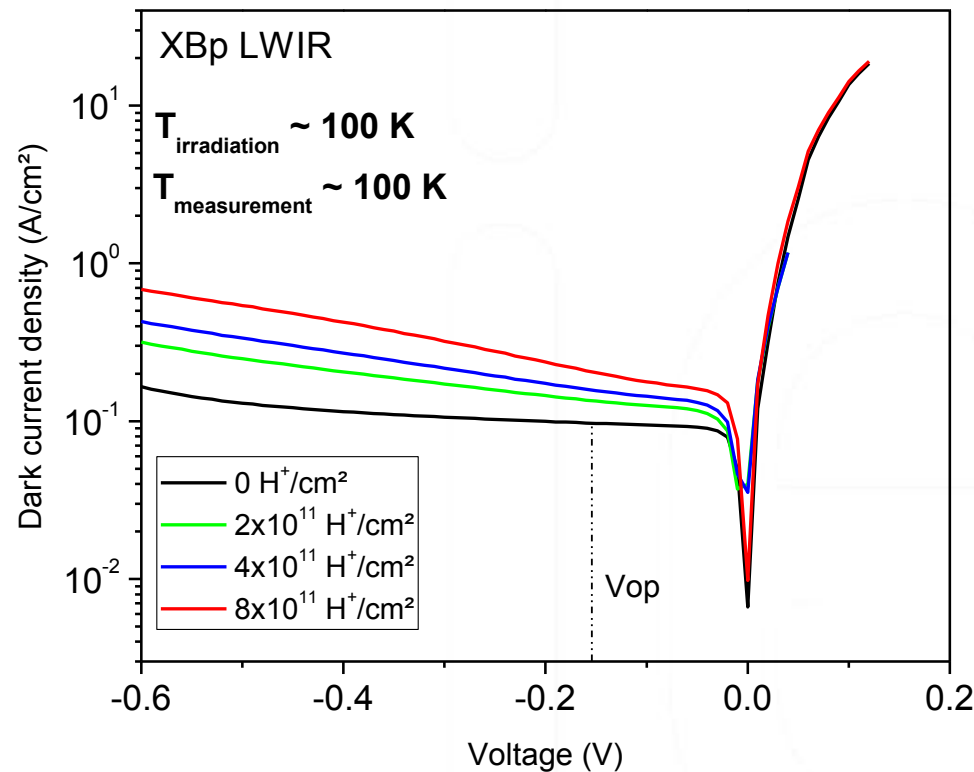


QE >30% pour 3.2 μm de ZA

L. Höglund *et al.* IPT **95**, 158 (2018)

XBp T2SL LWIR sous irradiation protons

1- Dark current

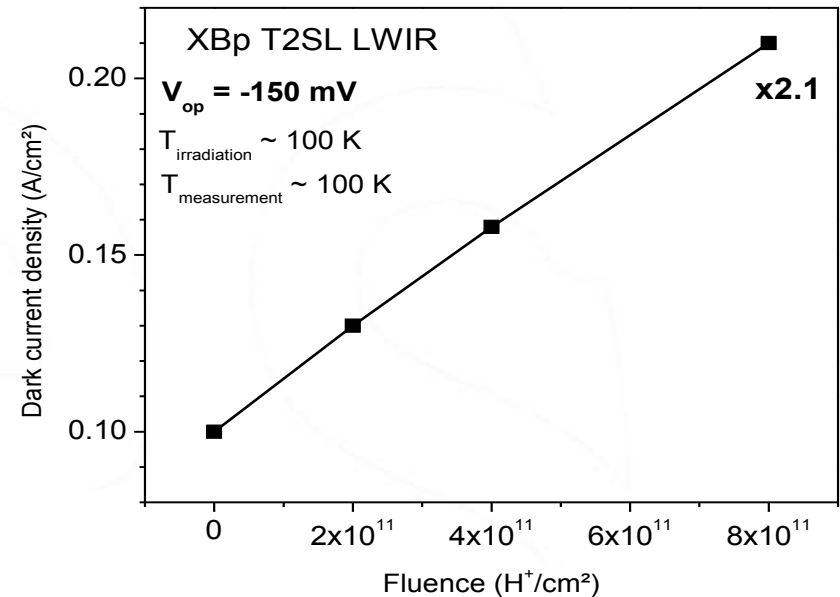
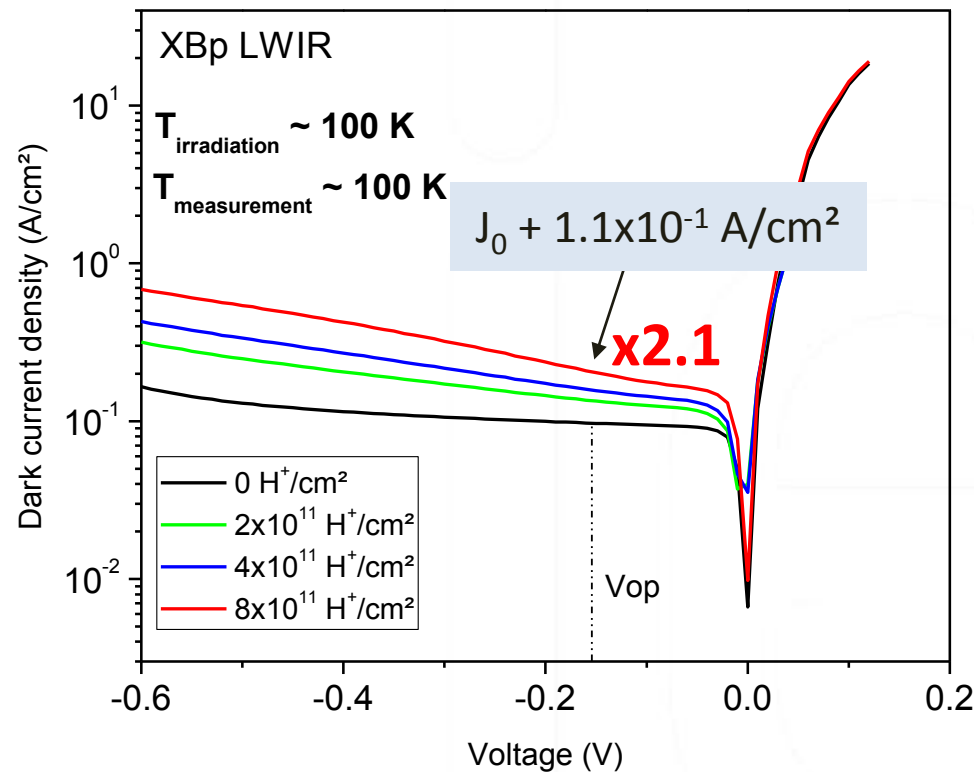


Épaisseur T2SL : $3.2 \mu\text{m}$ (485 périodes)

- Dégradation dès $2 \times 10^{11} \text{ p}/\text{cm}^2$
- Disparition du plateau de diffusion

XBp T2SL LWIR sous irradiation protons 63 MeV

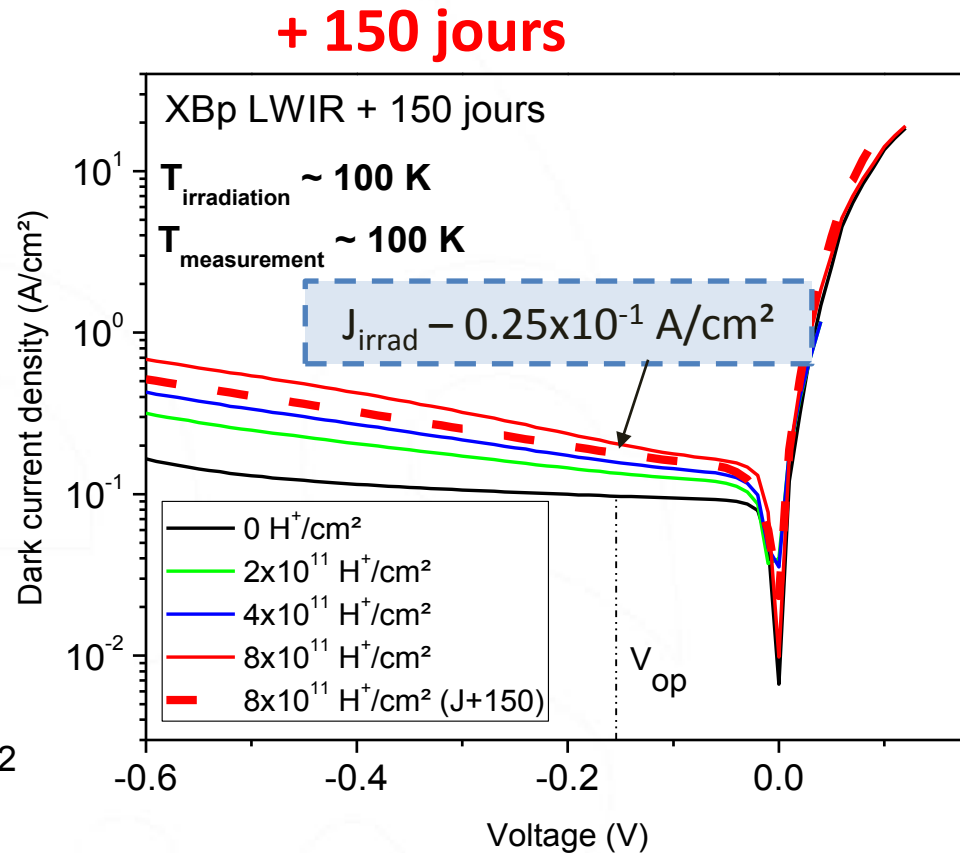
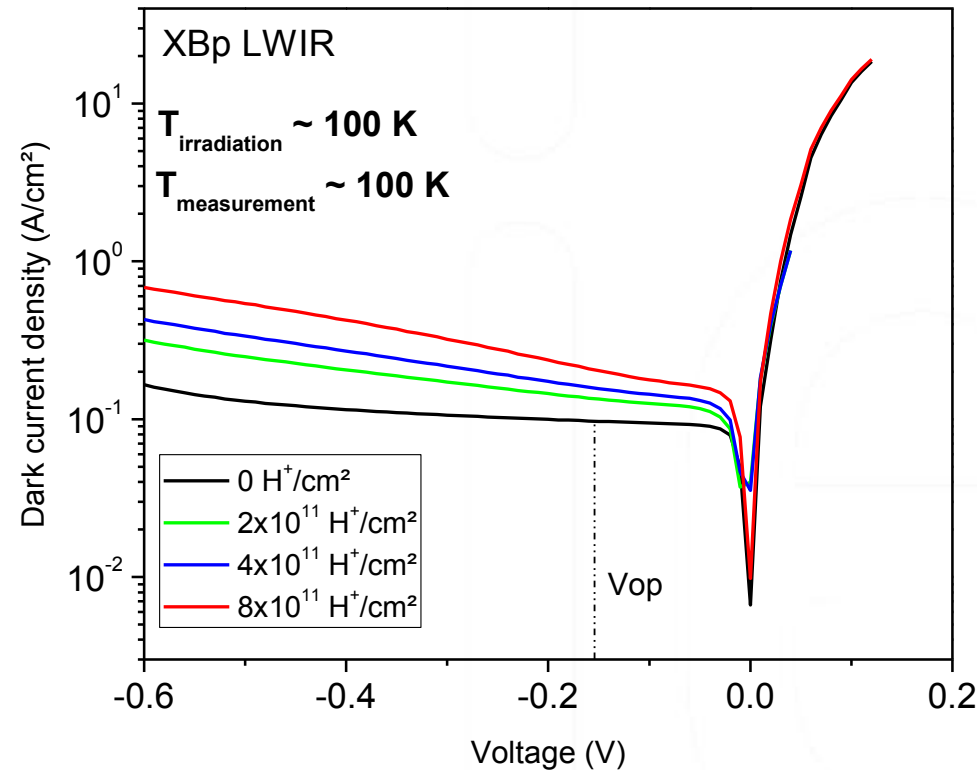
1- Dark current



- ➔ Disparition du plateau de diffusion
- ➔ Dégradation du courant (x2)
- ➔ Augmentation linéaire du J_{dark} avec la fluence : effet DDD

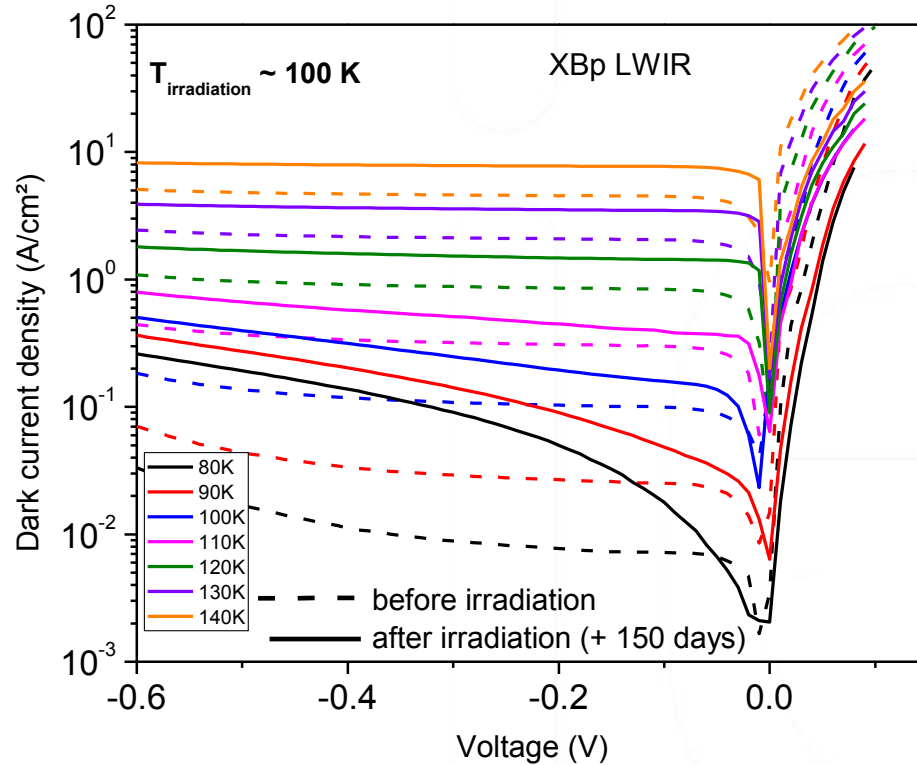
XBp T2SL LWIR sous irradiation protons 63 MeV

1- Dark current

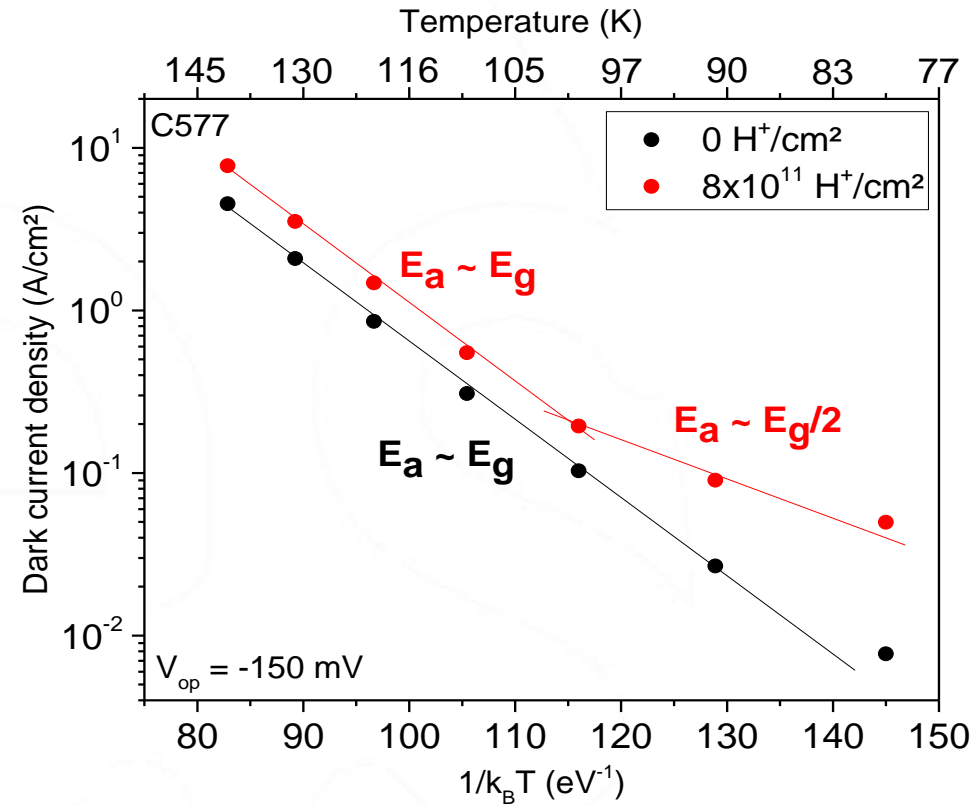
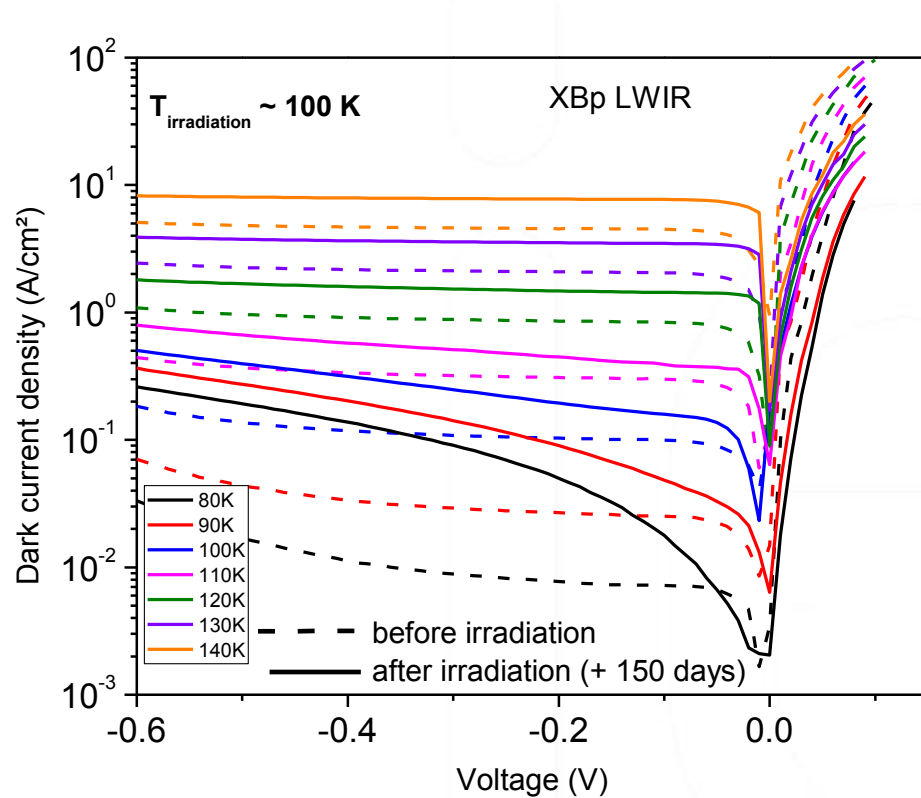


→ Guérison partielle du courant
après 150 jours @ RT annealing

2- Dark current : comportement en température

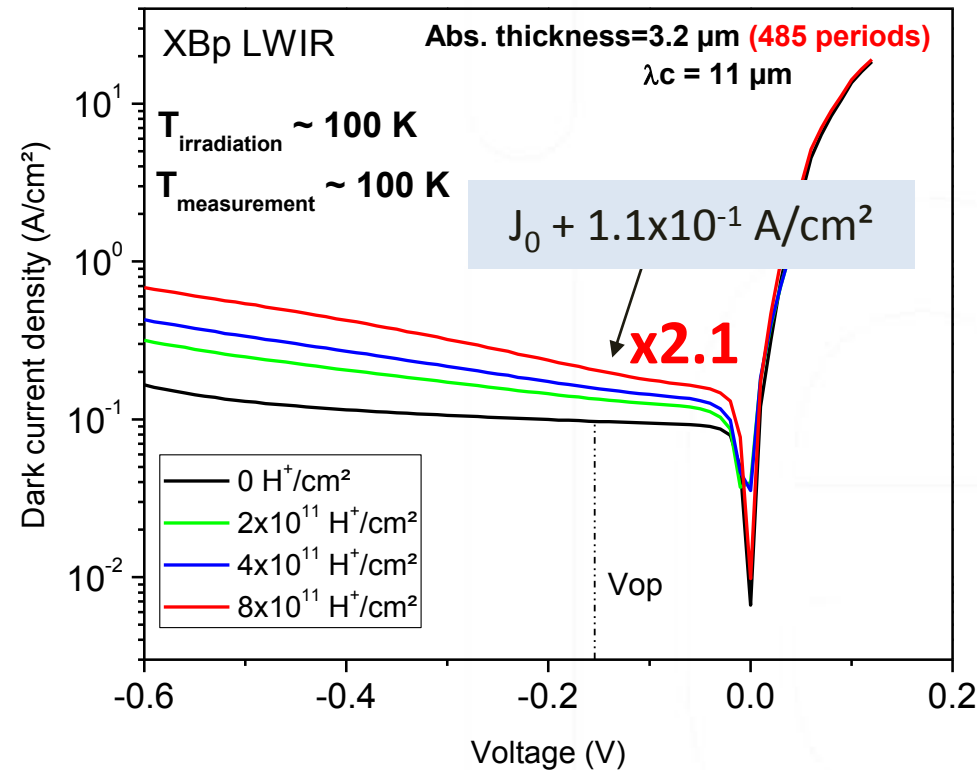


2- Dark current : comportement en température



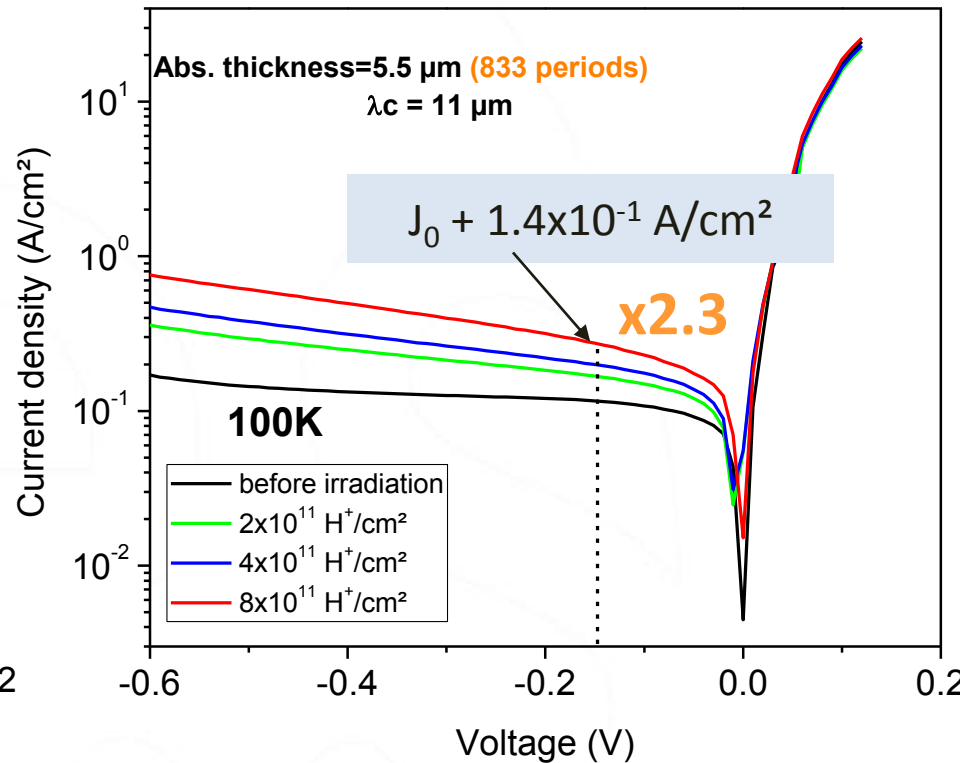
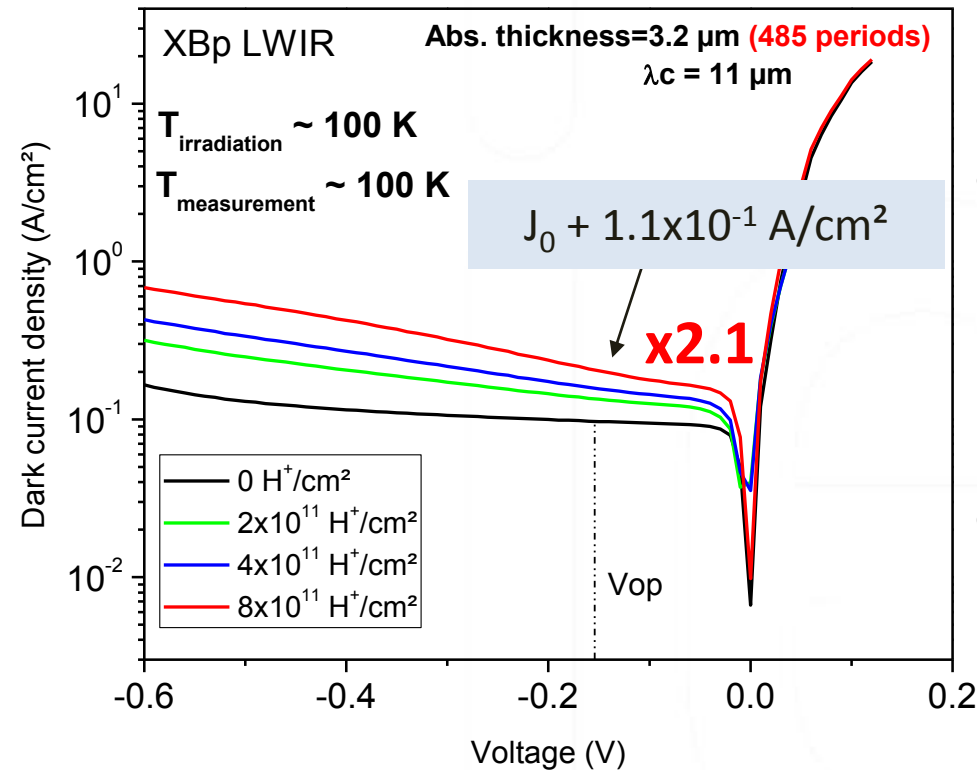
→ Courant n'est plus diffusion limité à basse température (dominé GR)

3- Epaisseur zone d'absorption : 3.2 μm (485 périodes) \rightarrow 5.5 μm (833 périodes)



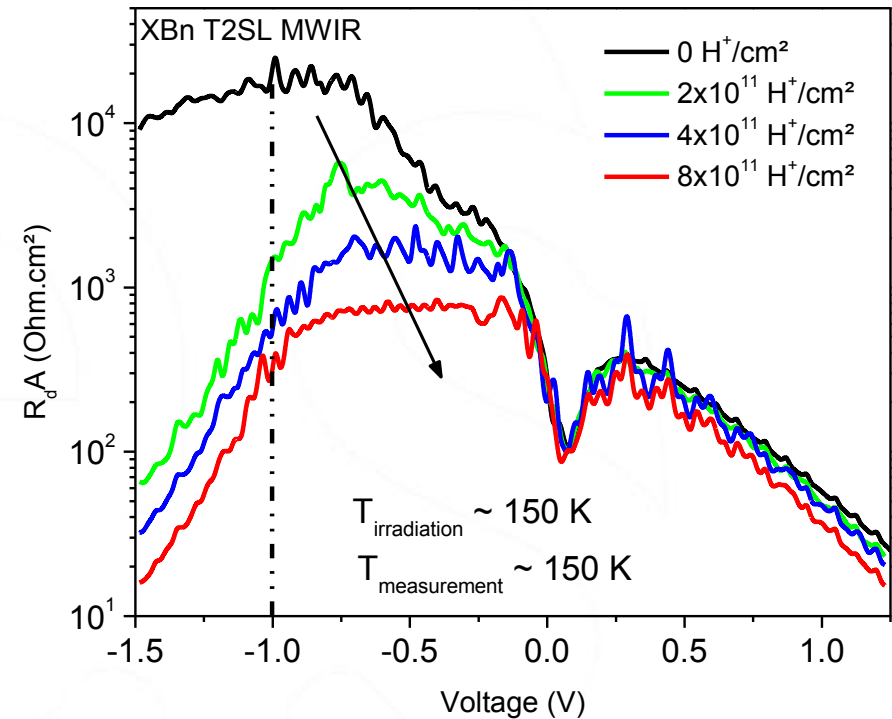
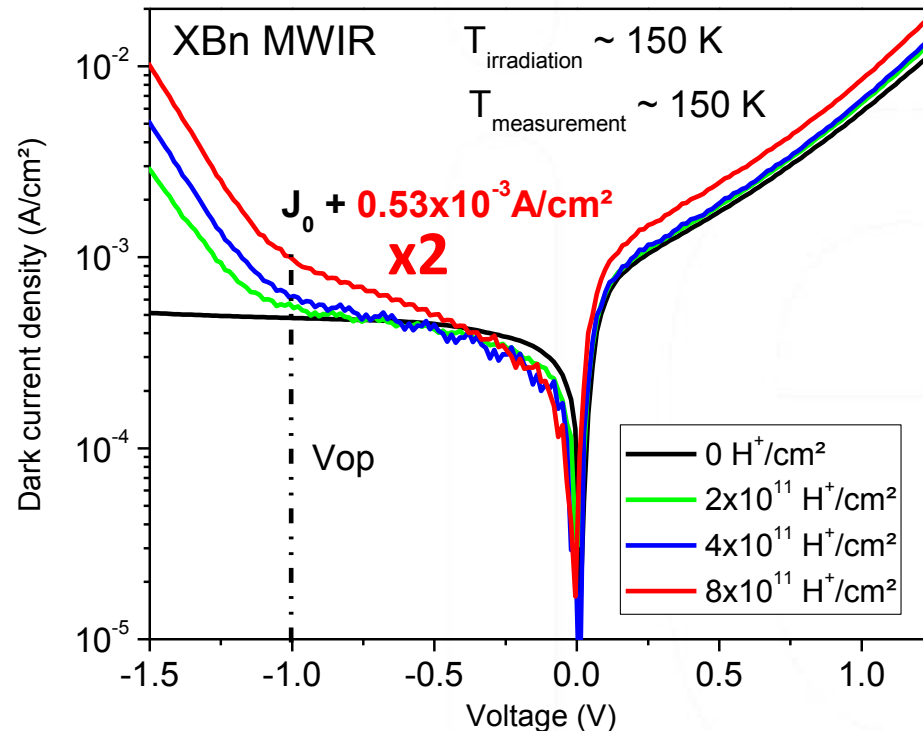
XBp T2SL LWIR sous irradiation protons 63 MeV

3- Epaisseur zone d'absorption : 3.2 μm (485 périodes) \rightarrow 5.5 μm (833 périodes)



\rightarrow Dégradation n'est pas/peu fonction
du nombre de périodes du T2SL

4- Domaine spectral MWIR (zone d'absorption 3μm)

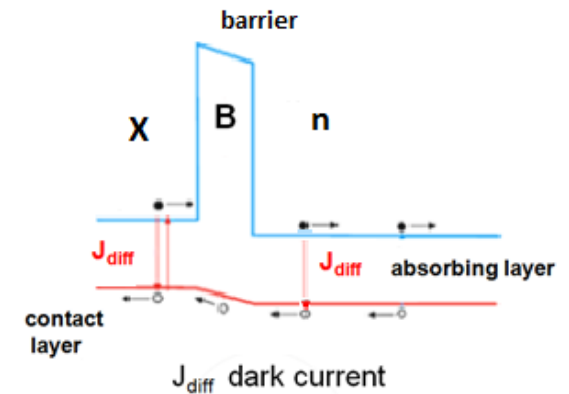
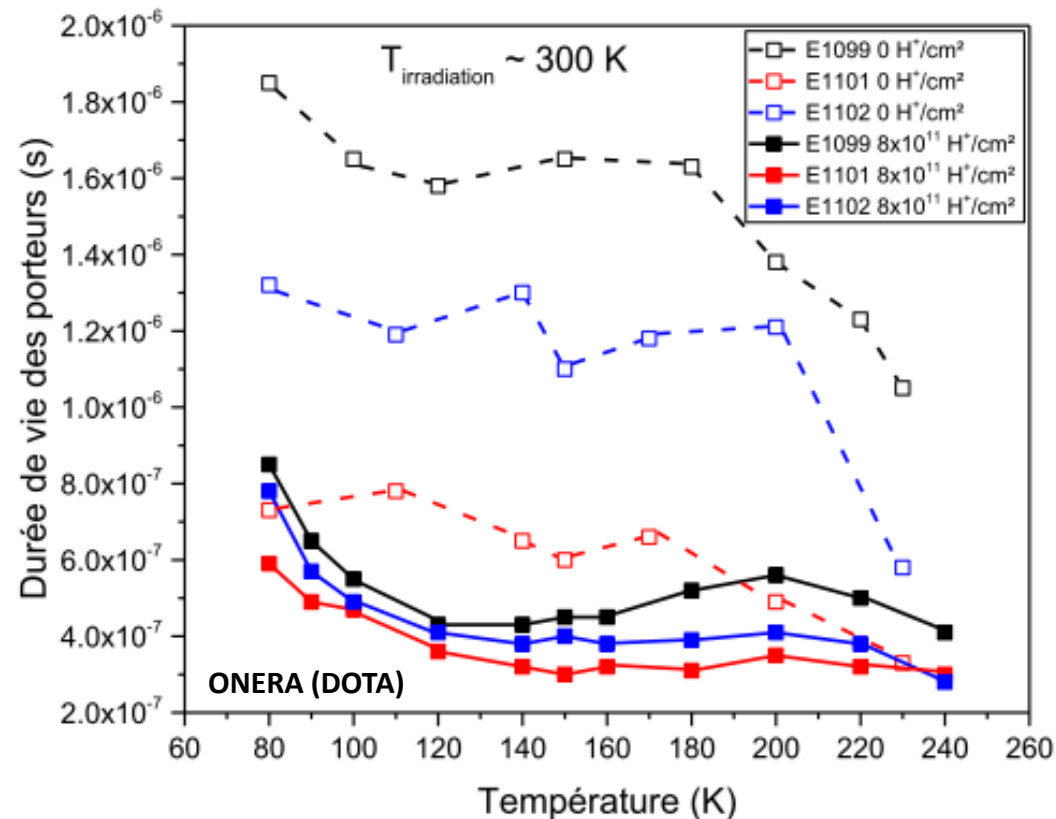


- Augmentation linéaire du J_{dark} avec la fluence
- Dégradation du J_{dark} (x2)
- Augmentation du G-R, apparition de TAT/FNT (?)

- Dégradation du R_dA
- Réduction du Vop :
extention zone déplétée

4- Domaine spectral MWIR (zone d'absorption 3 μ m)

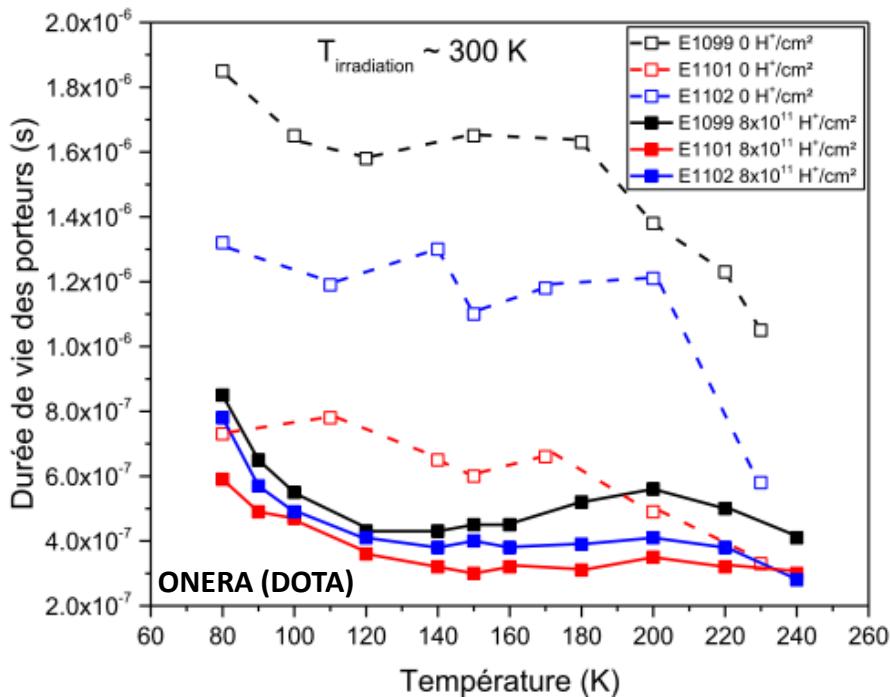
Influence largeur de barrière sur lifetime



→ lifetime $\sim \tau/3$ sous irradi $\Rightarrow L_{\text{diff}}$ et QE ?

4- Domaine spectral MWIR (zone d'absorption $3\mu\text{m}$)

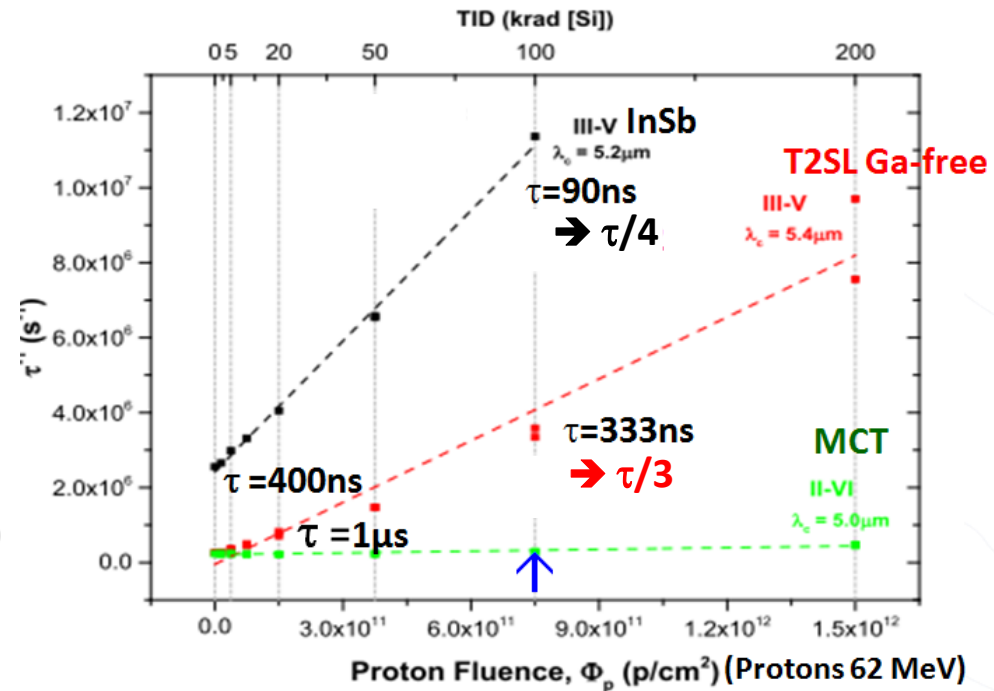
Influence largeur de barrière sur lifetime



→ lifetime $\sim \tau/3$ sous irradi

Comparaison avec InSb, autre T2SL Ga-free et MCT

E. Steenberg *et al* (AFRL), SPIE 10111 (2017)



Bilan et besoins à venir (1)

Phase 1 : observation de la dégradation en J_{dark} des détecteurs T2SL sous irradiation protons

- J_{dark} x2 pour fluence $8E11$ p/cm² et dégradation linéaire : **DDD**
- pas d'influence du nombre d'interface du T2SL : **Sb-based III-V material**
- peu de guérison recuit RT : **DDD**
- perte du comportement barrière après irradiation : **ZCE**

Bilan et besoins à venir (1)

Phase 1 : observation de la dégradation en J_{dark} des détecteurs T2SL sous irradiation protons

- J_{dark} x2 pour fluence $8E11$ p/cm² et dégradation linéaire : **DDD**
- pas d'influence du nombre d'interface du T2SL : **Sb-based III-V material**
- peu de guérison recuit RT : **DDD**
- perte du comportement barrière après irradiation : **ZCE**

Phase 2 : Compréhension de la dégradation en J_{dark} des détecteurs T2SL (thèse en cours)

➔ outil de simulation des courants : compréhension/identification du transport .

Diffusion, GR, TAT, FNT, niveaux de pièges, densité de pièges.

**cartographie des centres SRH (ZA, interface ZA/BL)
et mécanismes de dégradation**

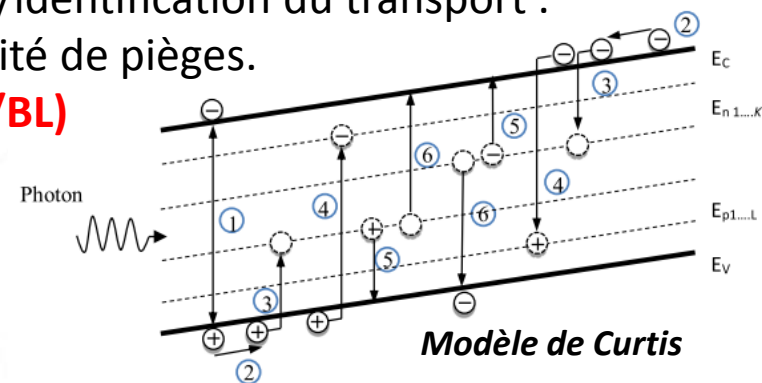
➔ Influence Temp détecteur pendant irradiation

➔ Etude en fonction de l'épaisseur barrière

➔ campagnes d'irradiation protons complémentaires : face avant/arrière ; plus faible fluence ...

➔ guérison sous recuit thermique HT : cycles isochrones, isothermes

➔ Grandeur de comparaison : **facteur de dommage K_{dark} pour T2SL (Sb-based III-V)**



Bilan et besoins à venir (2)

Phase 3a : Investigations complémentaires sur monoéléments T2SL Ga-free MWIR

- radiométrie (QE), durée de vie, dopage (C-V, DLTS)
- mesure de bruit temporel sous irradiation
- effets dose ionisante (TID) sur composants passivés : irradiation Gamma, irradiation RX puis investigations recuits thermiques
- **comment gérer le comportement des détecteurs à barrière sous irradiation ?**
design barrière, solutions technologiques pré-irradiation, post-irradiation ...

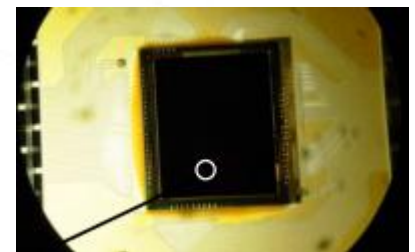
Bilan et besoins à venir (2)

Phase 3a : Investigations complémentaires sur monoéléments T2SL Ga-free MWIR

- radiométrie (QE), durée de vie, dopage (C-V, DLTS)
- mesure de bruit temporel sous irradiation
- effets dose ionisante (TID) sur composants passivés : irradiation Gamma, RX puis investigations recuits thermiques
- **comment gérer le comportement des détecteurs à barrière sous irradiation ?**
design barrière, solutions technologiques pré-irradiation, post-irradiation ...

Phase 3b : Investigations sur composant matriciel T2SL Ga-free MWIR

- Evolution J_{dark} , QE sous irradiation
- bruit spatial fixe et temporel
- pixels clignotant (RTS)
- pixels defectueux / opérabilité
- ...



*FPA HOTMWIR ou
autre matrice T2SL Ga-free ...*

- **Statuer sur la fiabilité de la filière T2SL pour des missions spatiales et proposer des solutions pour limiter les effets des radiations**

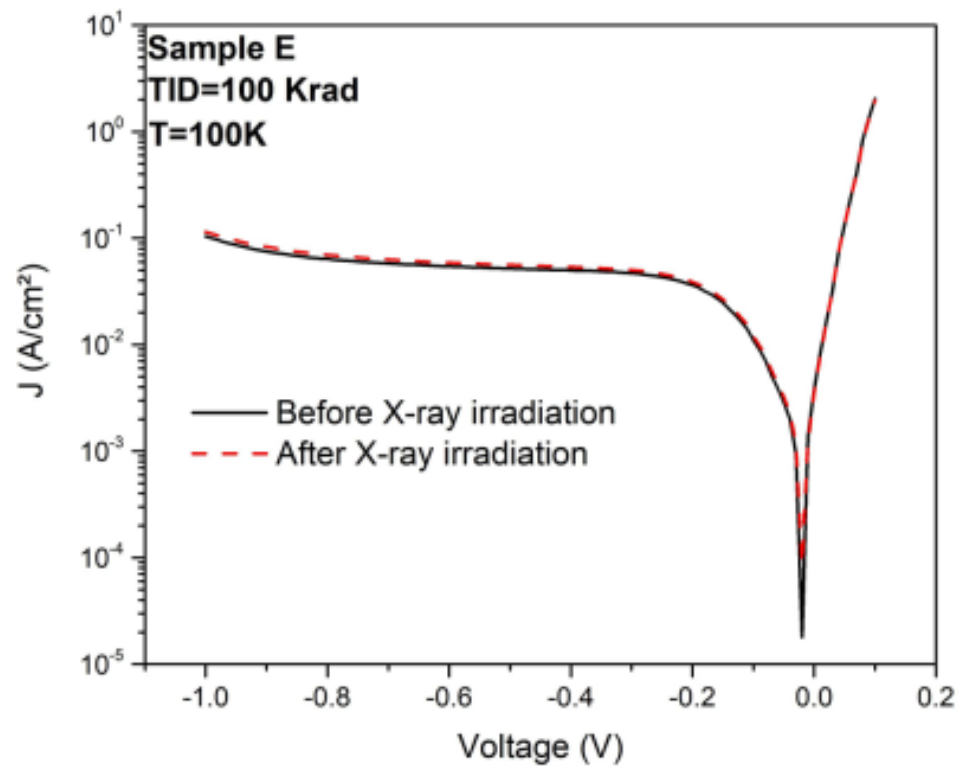
* T2SL Ga-free & Ga-containing

- M. Bouschet *et al.* "Temperature Dependence Study of Electrical and Electro-Optical Performance of Midwave Infrared Ga-free T2SL barrier Photodetector", *Appl. Sc.* **12**, 10358 (2022).
- V. Arounassalame *et al.* "Anisotropic transport investigation through different etching depths in InAs/InAsSb T2SL barrier midwave infrared detector", *Inf. Phys. Technol.* **126**, 104315 (2022)
- M. Bouschet *et al.* "Influence of pixel etching on electrical and electro-optical performances of a Ga-Free InAs/InAsSb T2SL Barrier Photodetector for mid-wave infrared imaging", *Photonics* **8**, 194 (2021).
- R. Alchaar *et al.* "Performance analysis of an InAs/GaSb superlattice barrier photodetector covering the full LWIR spectral domain" *Opto-Electron. Rev* **28**, 164 (2020)

* T2SL sous irradiation

- C. Bataillon *et al.* "Electrical Characterization of Ga-free Type II Superlattice Midwave Infrared Photodetectors Under Protons" to be published in *IEEE TNS* (2024)
- C. Bataillon *et al.* "Irradiation Temperature Influence on the Degradation of the Electrical Performances of MidWave InfraRed Type-II Superlattice Detectors", *IEEE TNS* **70**, 541 (2023)
- R. Alchaar *et al.* "63 MeV proton-induced mild displacement effects in long-wave infrared InAs/GaSb type-II superlattice barrier infrared detectors", *J. Appl. Phys.* **130**, 184501 (2021)

XBp LWIR sous irradiation RX



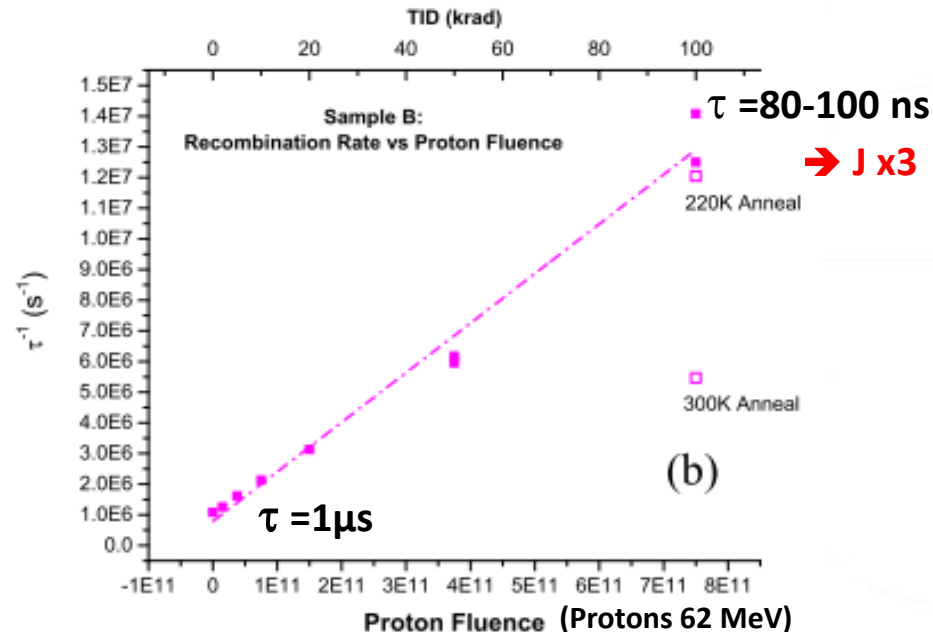
Comparaison biblio lifetime

* Lifetime

- Sous fluence $8 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$: lifetime $\sim \tau/3 - \tau/4$
 \rightarrow dégradation des courants $\sim \times 2$

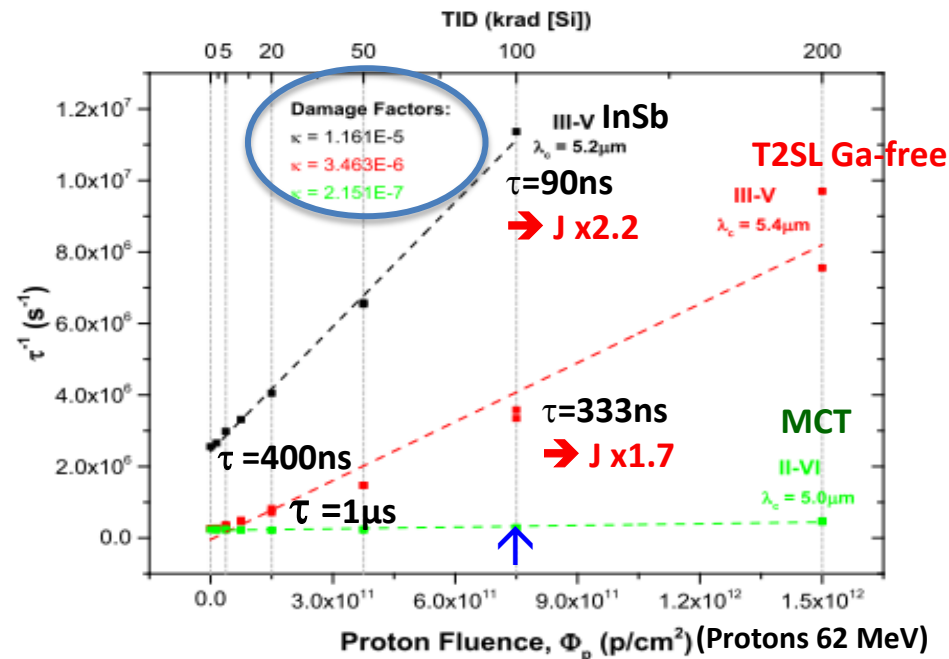
$$J_{\text{diff}} \approx \frac{1}{L_{\text{diff}}} \quad J_{\text{diff}} \approx \frac{1}{\sqrt{\tau}}$$

G.D. Jenkins *et al* (AFRL), SPIE 9616 (2015)



Comparaison avec InAsSb ($\lambda_c = 4.2 \mu\text{m}$)

E. Steenbergen *et al* (AFRL), SPIE 10111 (2017)

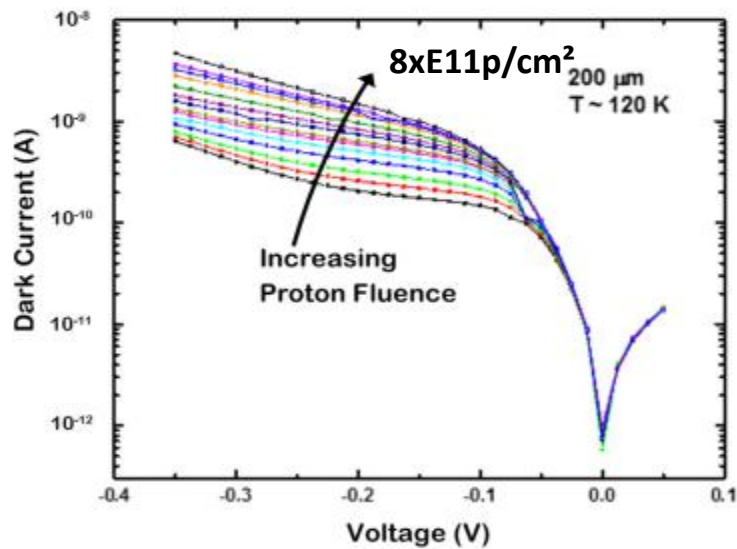


Comparaison avec InSb et MCT

Comparaison biblio Jdark

* J_dark

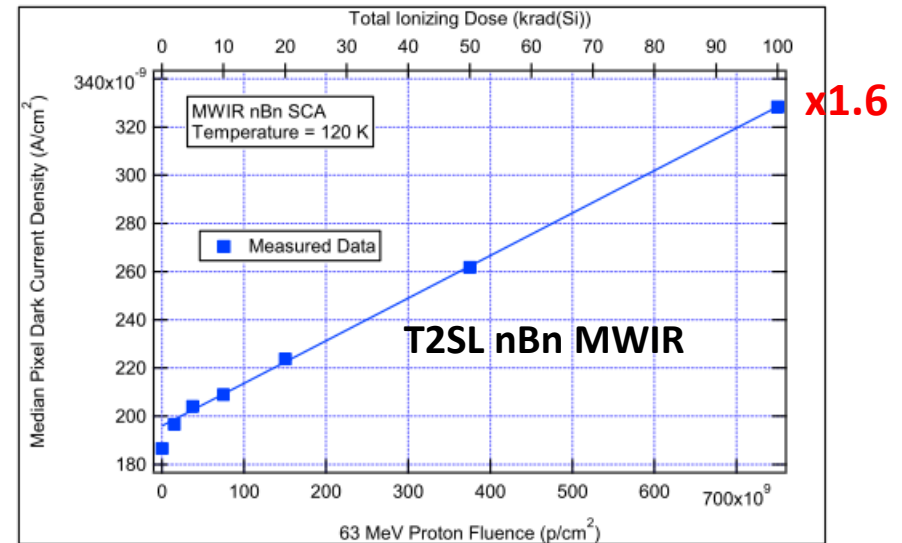
G.R. Savich *et al* (Univ Rochester), APL 106 (2015)



T2SL Ga-free nBn (λ_c = [5.4@120K](#)) MWIR

Dégradation du courant : ~x3.5 @ Vop

J.E. Hubbs (AFRL), SPIE 9933 (2016)



8x10¹¹p/cm²

