



Etude et modélisation des effets d'irradiation sur les cellules photovoltaïques multi-jonctions à fort rendement en environnement spatial

Antoine FEES

Doctorant 1ère année

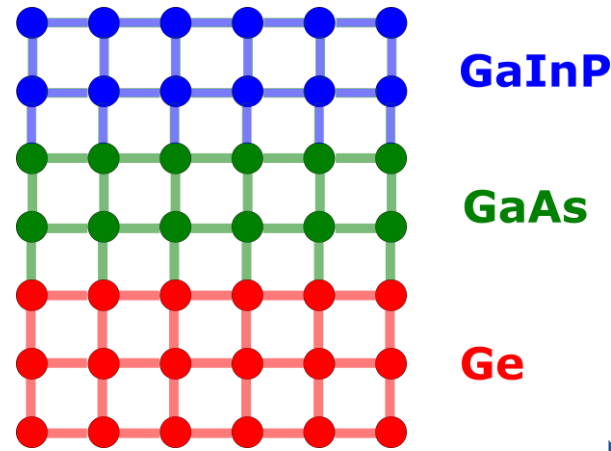
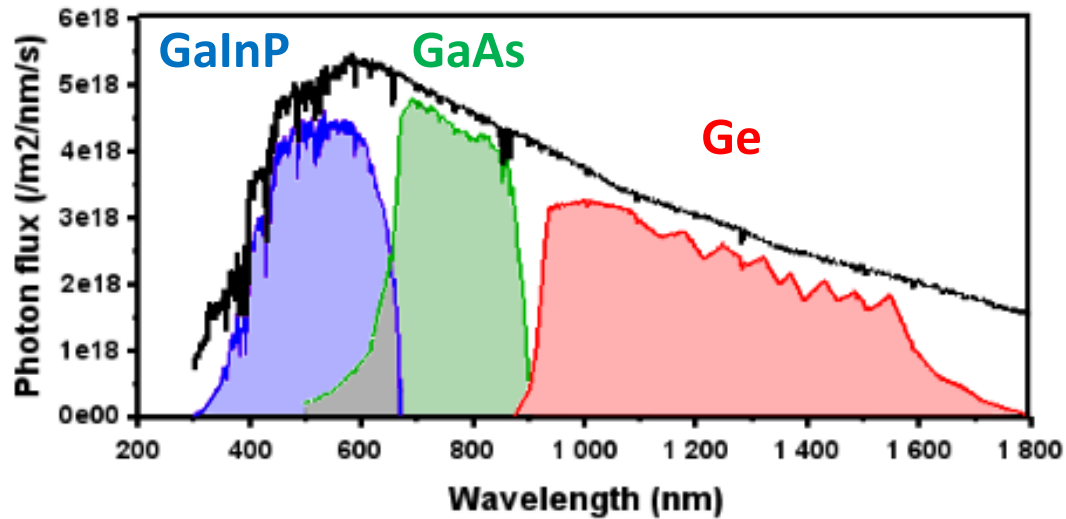
LAAS-CNRS / ONERA, DPHY/ECM

Sommaire

- I/ Contexte
- II/ Le GaInAsN et les applications PV spatiales
- III/ Objectifs de la thèse
- IV/ Fabrication et caractérisation des cellules PV
- V/ Simulation numérique du dispositif
- Perspectives et conclusions



I/ Contexte : Les cellules PV multi-jonctions en applications spatiales



- Résistance aux rayonnements spatiaux
- Hauts rendements $W/kg.m^2$
- Accord de maille sur le substrat Ge

≈30% efficiency 3J
grown lattice-
matched to a Ge
substrate

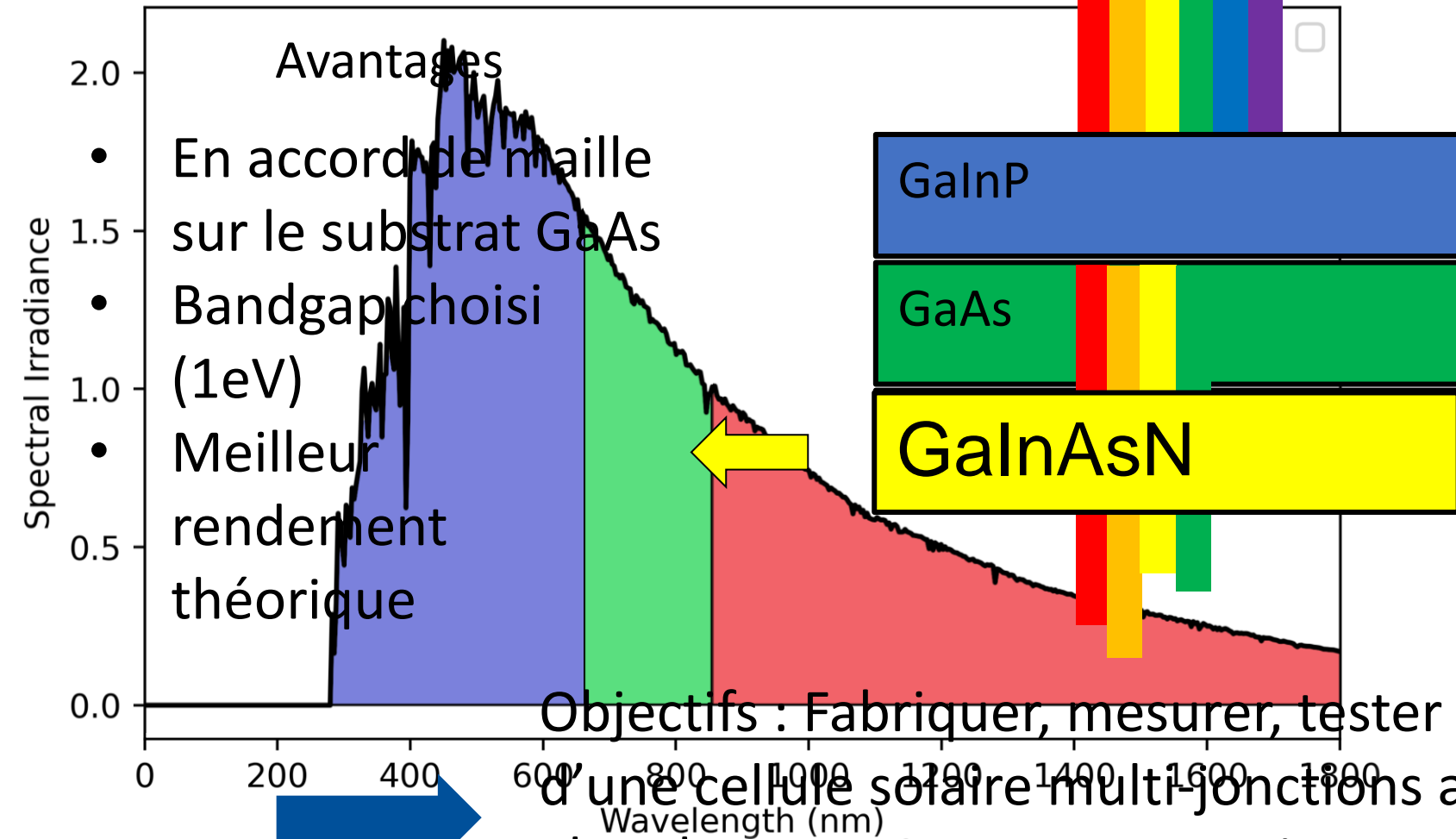
Manufacturer	BOL* efficiency**	Structure
Azurspace	30%	GaInP/GaAs/Ge
CESI	29.5%	GaInP/GaAs/Ge
Spectrolab	30.7%	GaInP/InGaAs/Ge
SolAero	29.5%	GaInP/InGaAs/Ge

*Beginning of life **under AM0 sunlight



I/ Contexte

AM0 Solar spectrum



Avantages

- En accord de maille sur le substrat GaAs
- Bandgap choisi (1eV)
- Meilleur rendement théorique

Problématiques

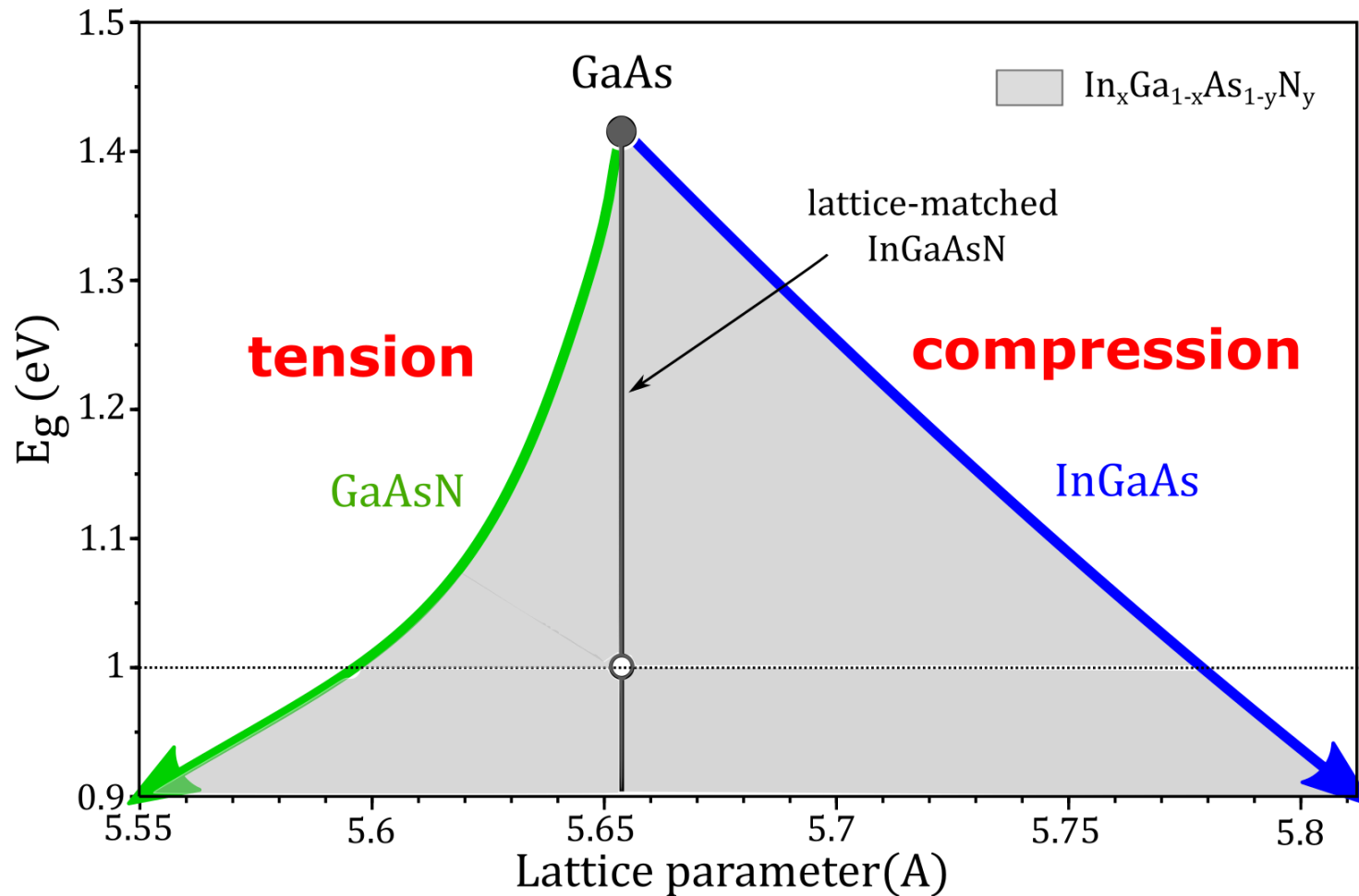
- Qualité du matériau à améliorer
- Peu testé en environnement radiatif

Objectifs : Fabriquer, mesurer, tester et simuler la réponse d'une cellule solaire multi-jonctions avec une couche absorbeur en GaInAsN en environnement radiatif



II/ Le GaInAsN en applications PV : une route semée d'embûches

GaInAsN : lattice-matching sur GaAs



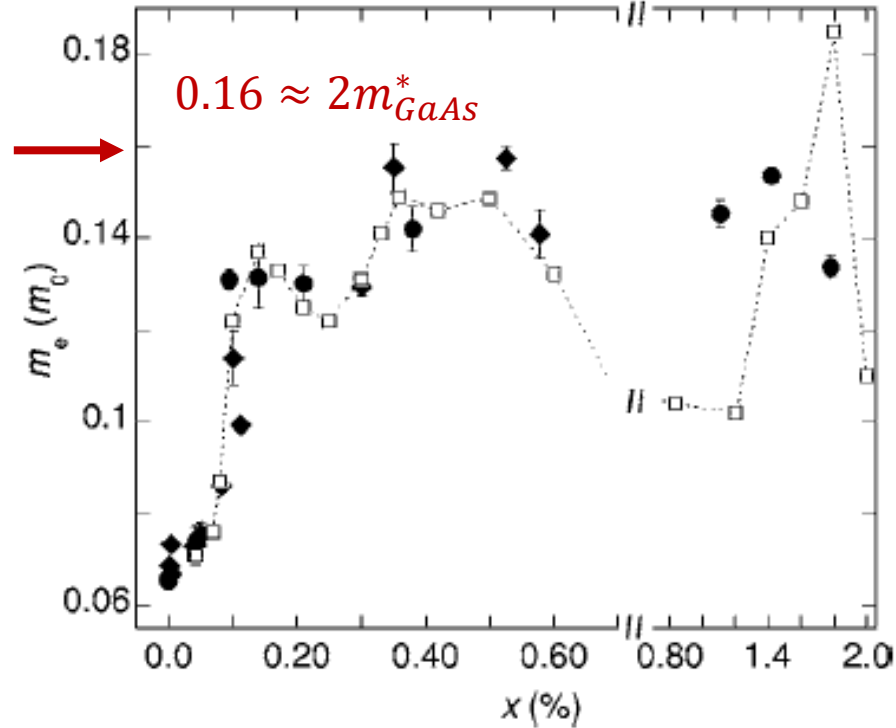
Il est possible de choisir le bandgap du GaInAsN tout en conservant la condition d'accord de maille sur le GaAs !



II/ Le GaInAsN en applications PV : une route semée d'embûches

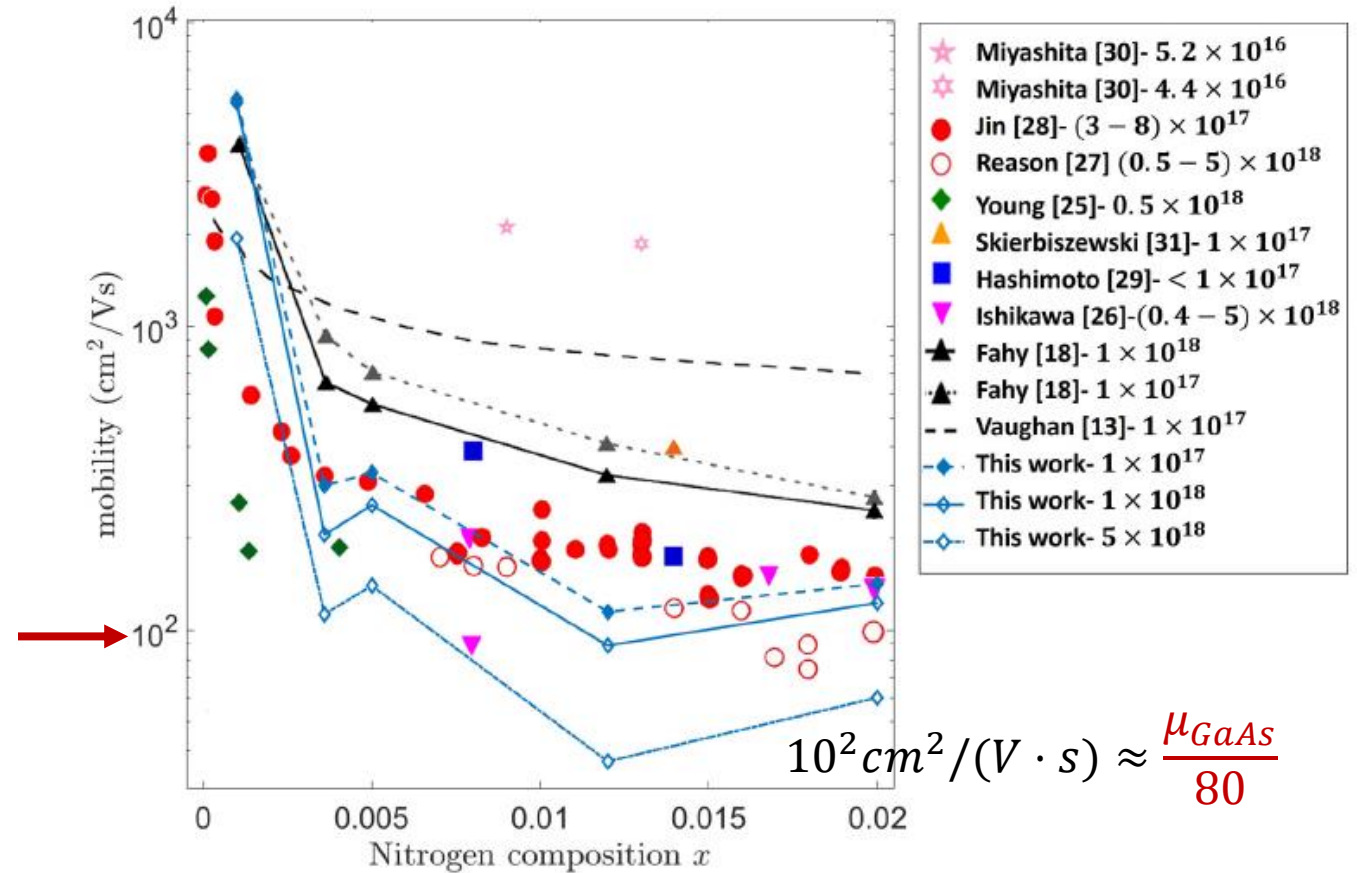
Ajout d'azote dans les alliages III-V : diminution du bandgap mais...

- Augmentation de la masse effective des électrons [1]
- Diminution de la mobilité des électrons [2]



[1] F. Masia et al., Phys. Rev. B 73, 073201, 2006

[2] M. Seifikar et al. J. Appl. Phys. 2024 ; 135 (4): 045704.

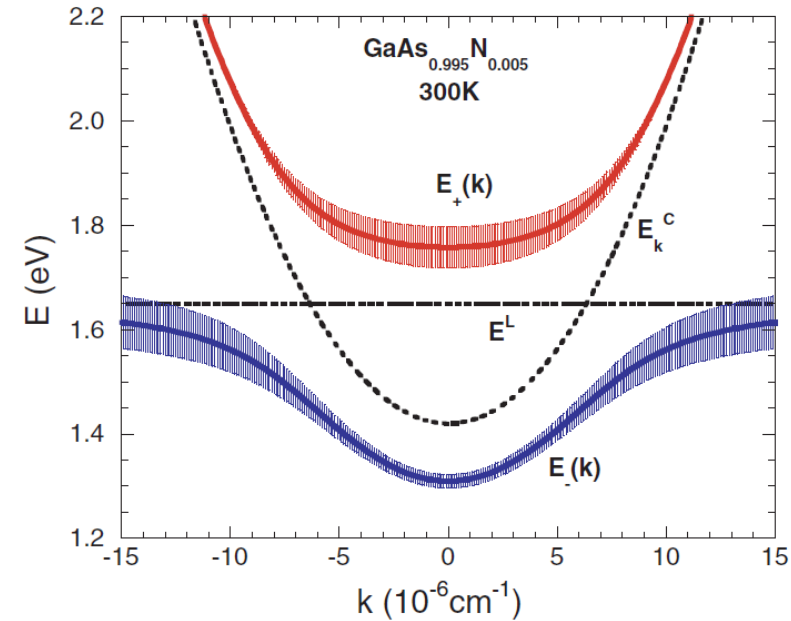


II/ Le GaInAsN en applications PV : une route semée d'embûches

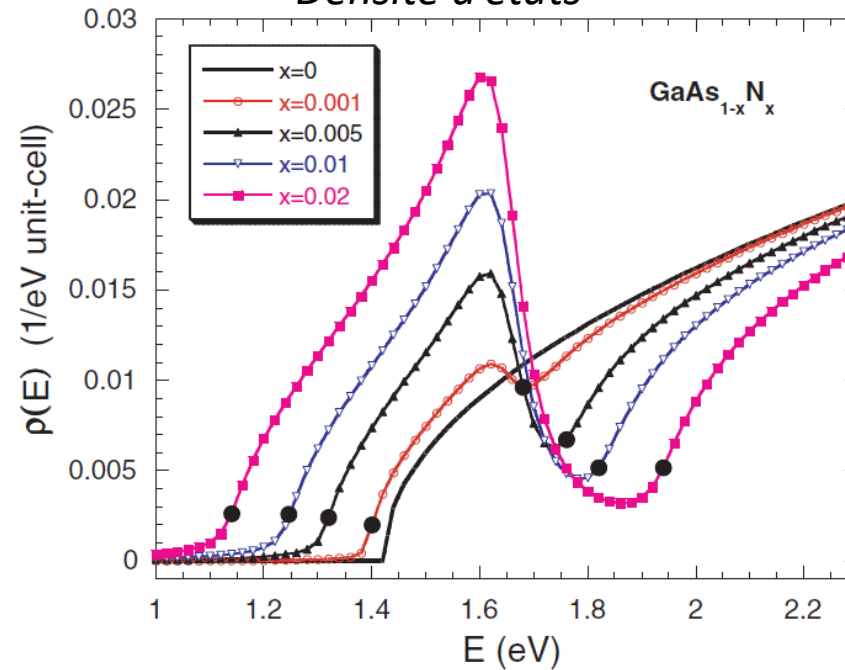
Ajout d'azote dans les alliages III-V : diminution du bandgap mais...

- Non-parabolicité des bandes de conduction (Band Anti Crossing) + Modification du DOS et du coefficient d'absorption α [3]

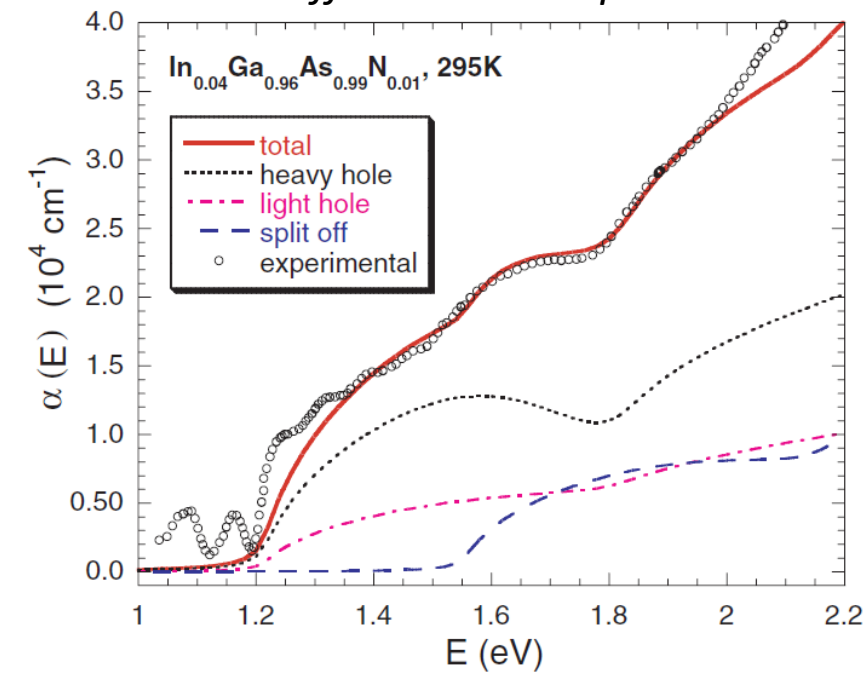
Structure de bandes



Densité d'états



Coefficient d'absorption

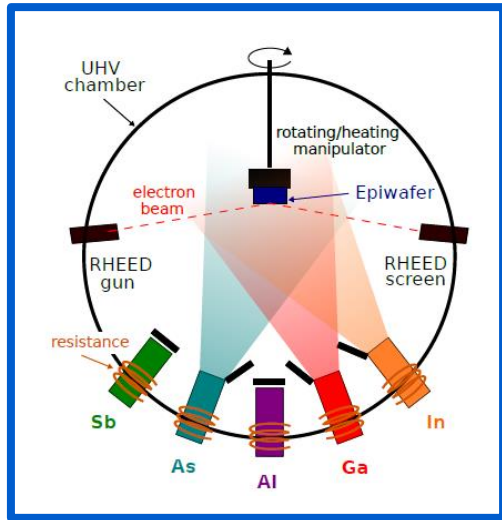


Modification (non-classique) des propriétés et des modèles physiques par rapport à un alliage semiconducteur classique !

[3] J. Wu, W. Walukiewicz, and E. E. Haller
Phys. Rev. B 65, 233210, 2002

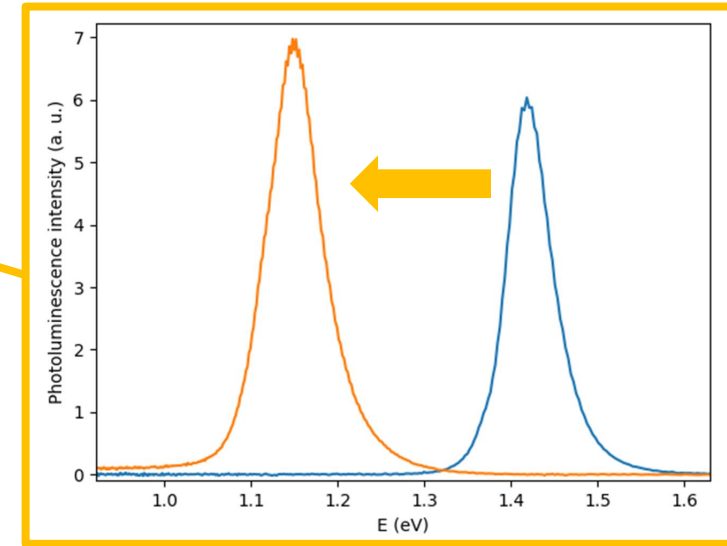


III/ Objectifs de la thèse



Fabrication de cellules par process EJM optimisé

Contrôle expérimental de la **qualité** du matériau épitaxié



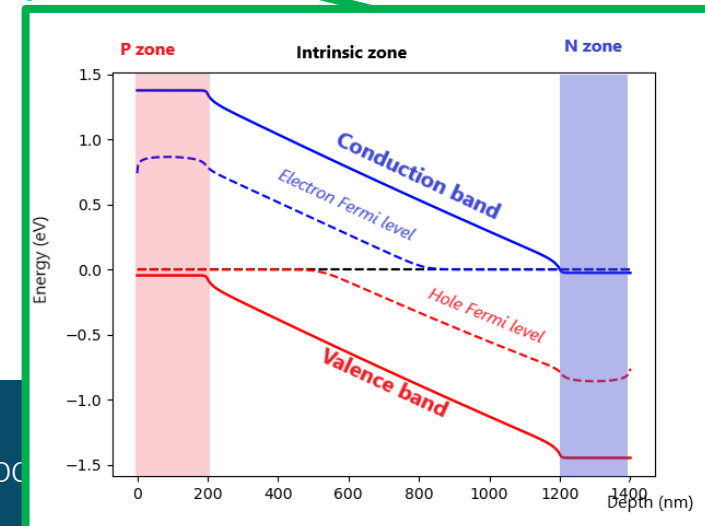
Analyse et modélisation après irradiation

Modélisation des paramètres matériaux, optimisation de la structure

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{e} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n + G_n - R_n$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{e} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p + G_p - R_p$$

Fabrication de cellules, Irradiation protons et électrons



IV/ Fabrication des cellules PV

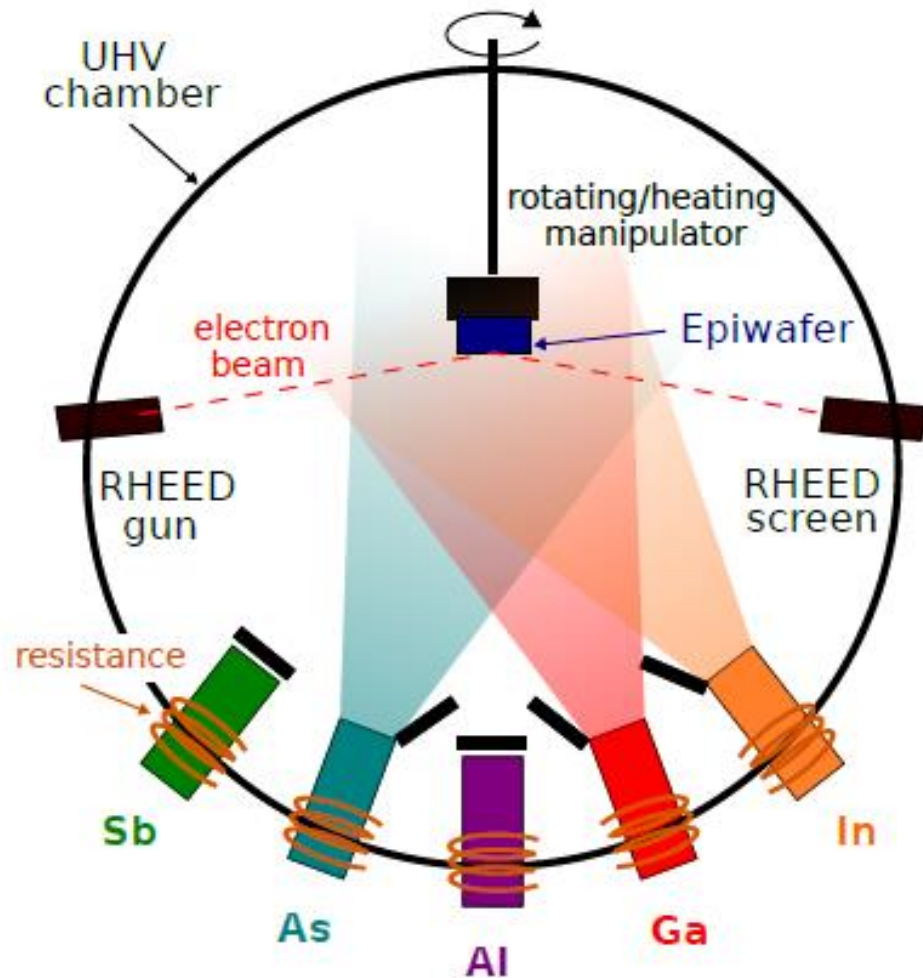


Schéma de principe de l'EJM

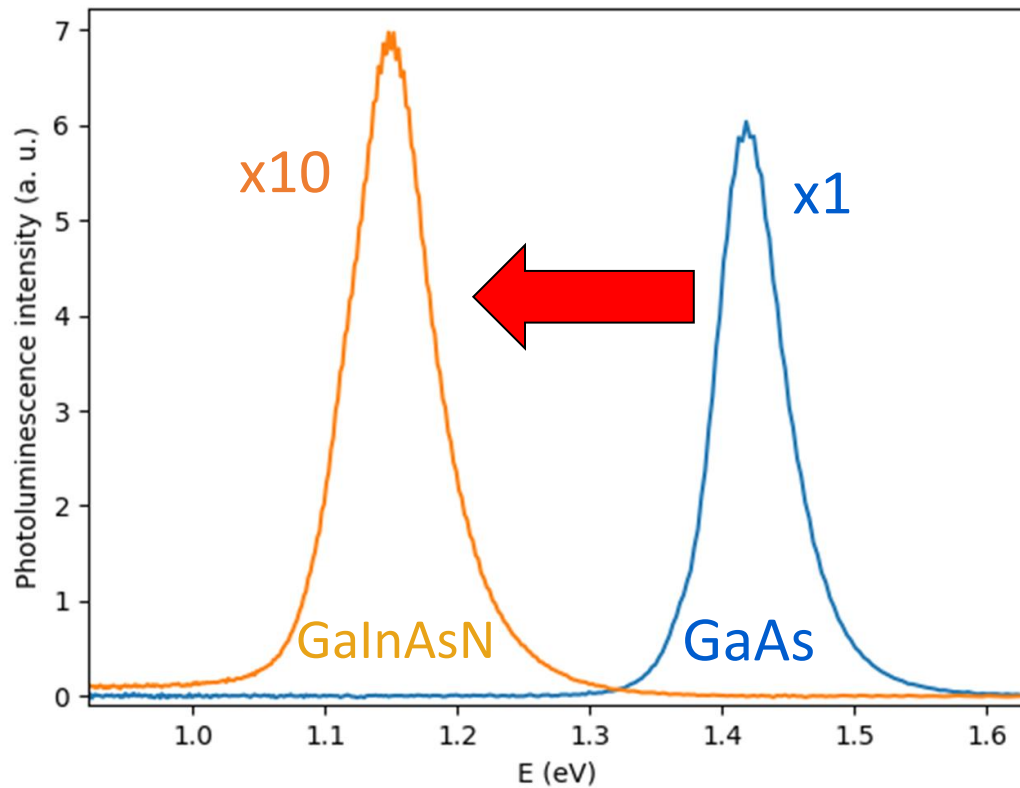
- Croître le GaInAsN en **accord de maille** sur le GaAs grâce aux outils de monitoring *in situ* et de contrôle de la croissance **en temps réel**
- Contrôler la concentration d'In et de N pour atteindre un **bandgap de 1eV**
- Optimiser le **processus de fabrication en salle blanche** de la cellule PV (Métallisations, gravures, couche anti-réfléchissante)
- Eviter les effets indésirables : **diffusion et passivation mutuelle des dopants**, recuit pour la guérison des **défauts ponctuels**



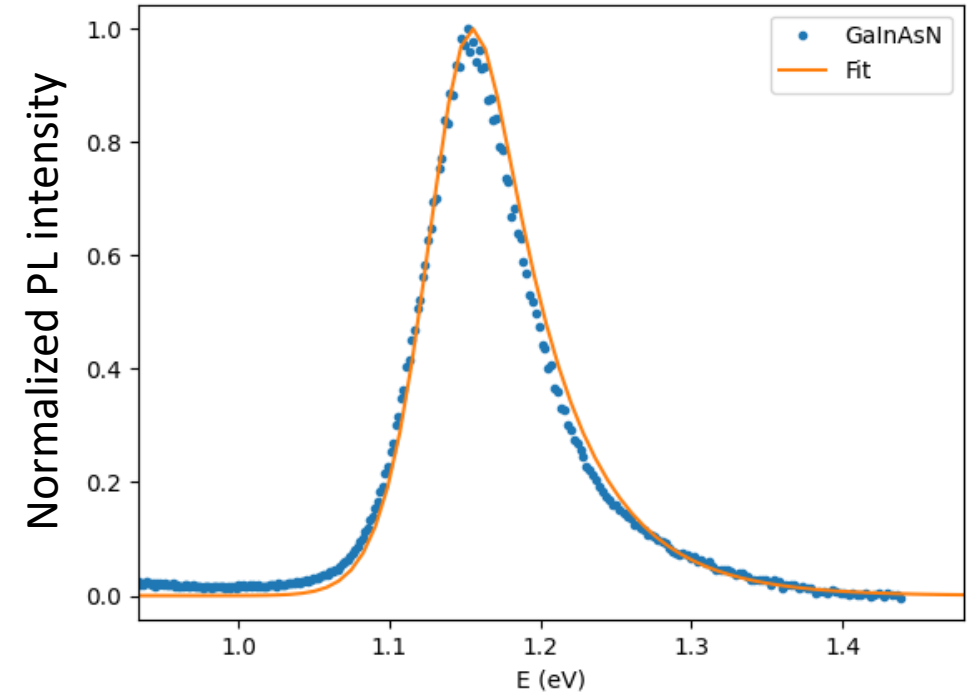
IV/ Caractérisation matériau

Validation expérimentale de la méthode de croissance : Fitting de spectres de photoluminescence

- Vérification du **red-shift** du spectre de PL du GaInAsN par rapport au GaAs



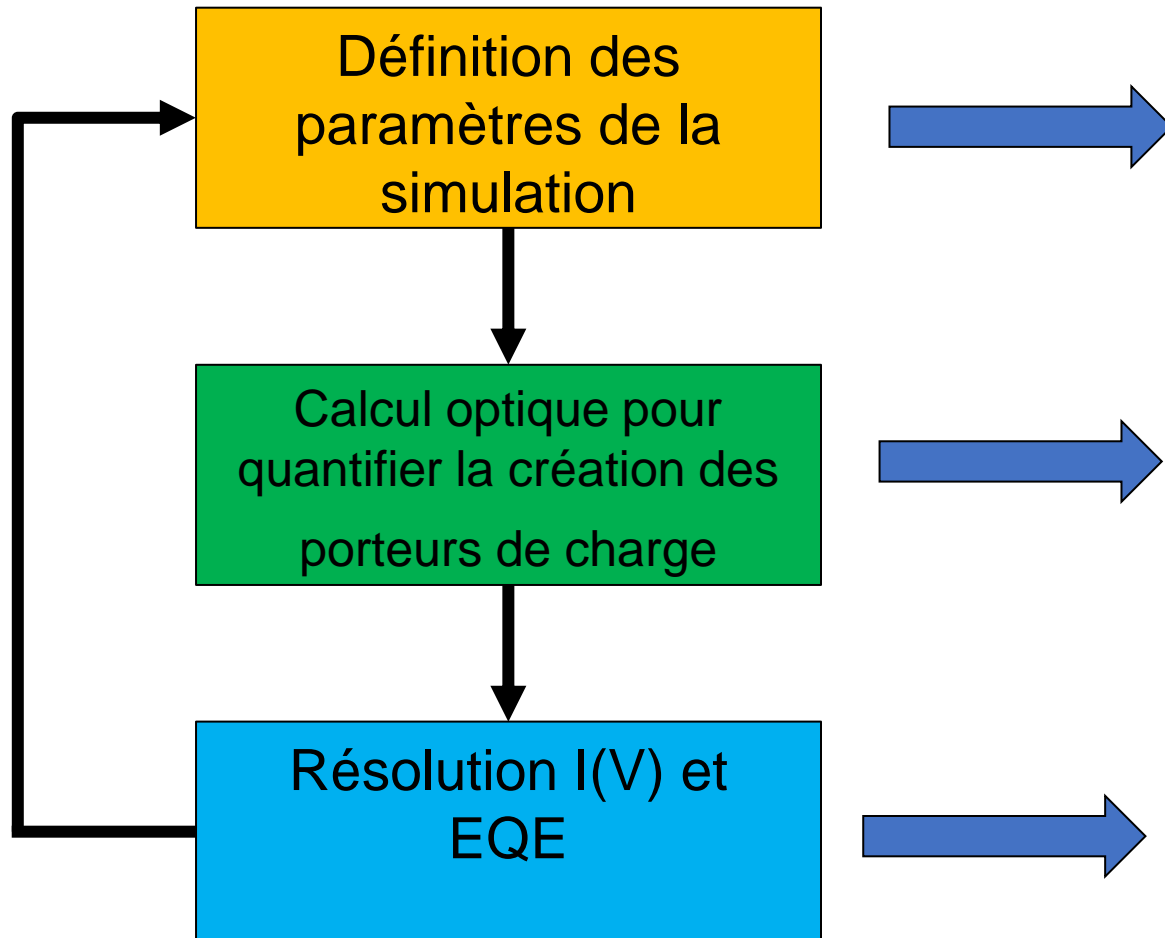
- **Lineshape analysis** du spectre de PL pour en obtenir le coefficient d'absorption [3]



[3] J. K. Katahara et al., *J. Appl. Phys.* 7 November 2014; 116 (17): 173504. <https://doi.org/10.1063/1.4898346>



V/ Simulation numérique de la cellule



- Architecture de la cellule
- Paramètres matériaux
- Type d'illumination

- Absorbance : Loi de Beer-Lambert
- Transfer-Matrix method (TMM)
- Scattering Matrix method (SMM)
- Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) ...

- Solveurs PDD Open-source, e.g.

SESAME

<https://sesame.readthedocs.io/en/latest/>

SOLCORE

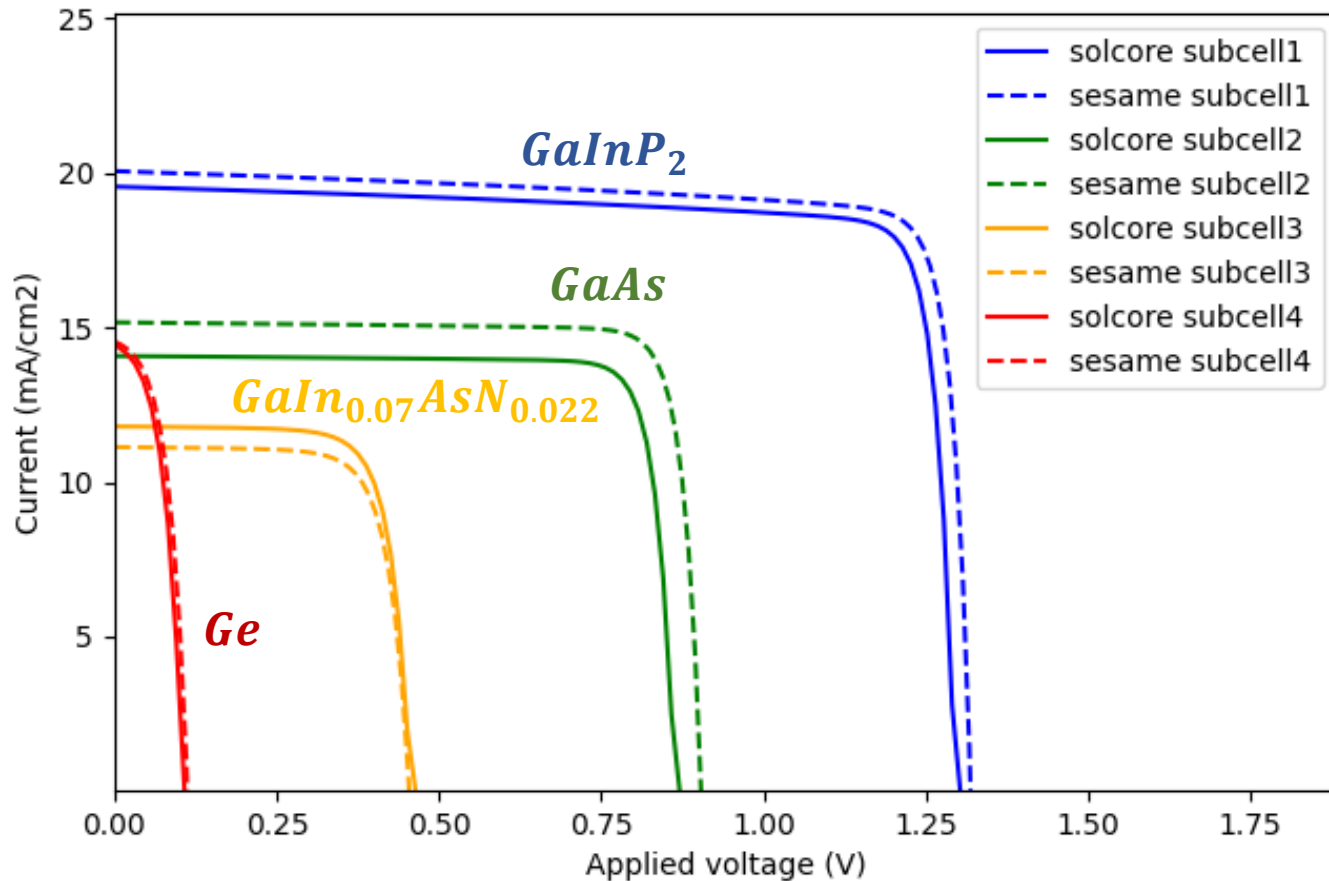
<http://docs.solcore.solar/en/latest/index.html>



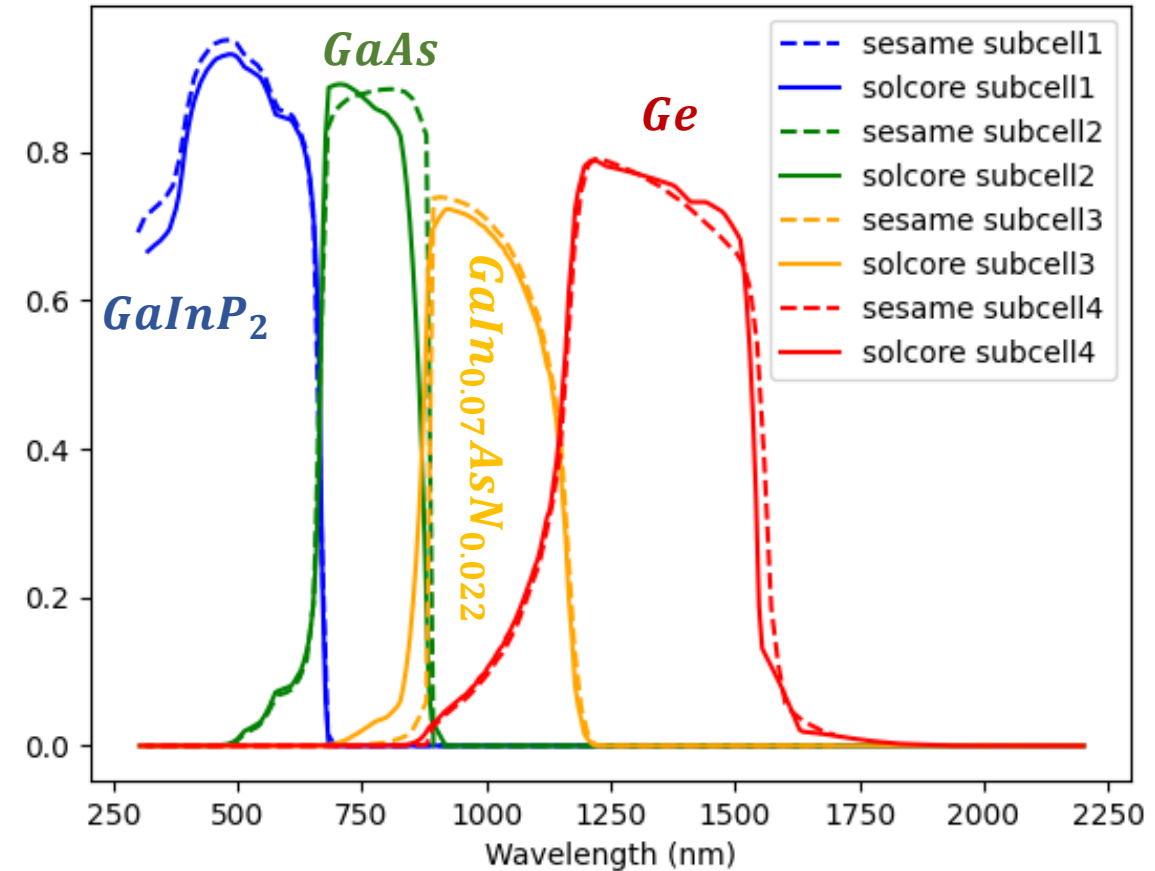
V/ Simulation numérique du dispositif

Premiers résultats : Figures de mérite du dispositif (cellule 4J incorporant du GaInAsN en troisième sous-cellule)

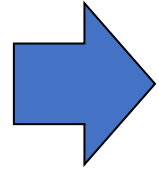
I(V)



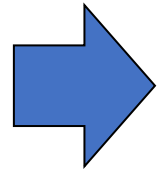
EQE



Perspectives et conclusions

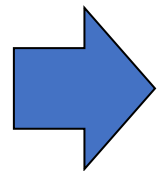


Nécessité d'implémenter un modèle physique **solide** pour simuler et **dimensionner** la cellule solaire PV



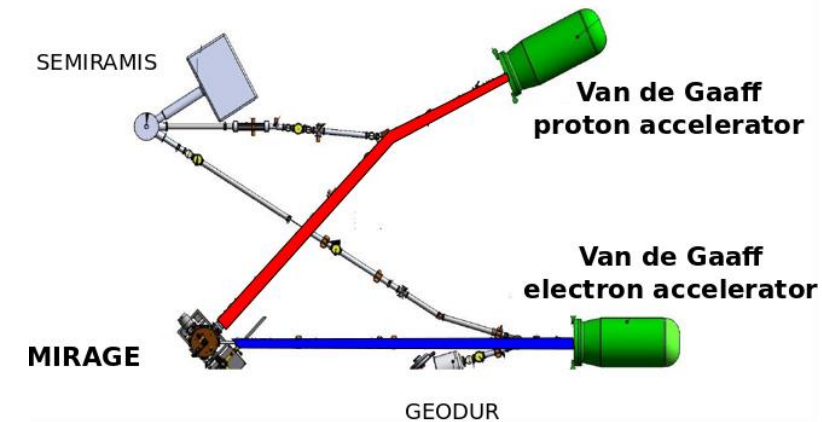
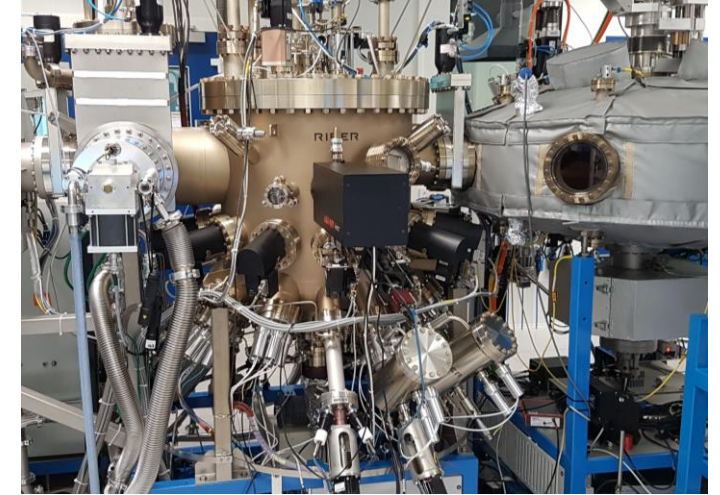
Apport des méthodes expérimentales pour :

- Optimiser le processus d'épitaxie
- Vérifier les prédictions des modèles



Appréhender les effets des radiations dès la conception de la cellule PV

- Prendre en compte les différences physiques entre les matériaux
- Vérifier expérimentalement les prédictions après irradiation





RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Merci pour votre attention !

LAAS
CNRS

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

www.onera.fr

