



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Saad Dahlab, Blida-1

Faculté de technologie

Département Des Énergies Renouvelables

Mémoire de Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Énergies renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Présenté par : HAMDI Salah

Thème :

Simulation numérique une cellule solaire à base de GaInP en présence des défauts créés par irradiation à électron de 1MeV

Soutenue le 11/07/2021 devant le jury composé :

M.Boukenoui Rachid	MCB	USDB	Président
M.BEDIA Asma	MCB	USDB	Examineur
M.MAZOUZ Halima	MCB	USDB	Encadreur

2020/2021

Tables des matières

Résumé	
Liste des acronymes et abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	2
Chapitre I : Cellule solaire GaInP dans l'espace	
I.1 Introduction	5
I.2 Rayonnement solaire dans l'espace	5
I.3 Rayonnements spatiaux	6
I.3.1 Rayons cosmiques galactiques	6
I.3.2 Particules solaires éjectées lors d'éruptions solaires	7
I.3.3 Rayons piégés par le champ magnétique terrestre	8
I.3.4 Vent solaire	9
I.3.4.1 Ceinture de Van Allen	9
I.4 Orbites des satellites	10
I.4.1 Types des orbites	10
I.4.1.1 Orbite géostationnaire" GEO" (ou de Clarke)	10
I.4.1.2 Orbite héliosynchrone	11
I.4.1.3 Orbite de basse	12
I.4.1.4 Orbite moyenne	13
I.4.1.5 Orbite de Molnia	13
I.5 Satellites équipés de panneaux solaires à travers l'histoire	14
I.6 Cellule solaire à base de GaInP	16
I.6.1 Matériau III-V	16
I.6.2 Définition	17
I.6.3 Paramètres de base à 300 K pour GaInP	17
I.7 Etat de l'art	18
I.8 La spectroscopie transitoire de niveau profond	25
I.9 Différentes types de recombinaison	26

I.9.1 Recombinaison radiative	27
I.9.2 Recombinaison Shockley- Read-Hall (SRH)	27
I.9.3 Recombinaison Auger	28
I.9.4 Recombinaison en surface	29
I.10 Conclusion	29
Chapitre II : Simulation de la cellule solaire en présence des défauts	
II.1 Introduction	31
II.2 Équations indispensable	31
II.2.1 Équation de continuité	31
II.2.2 Équation de transport	32
II.2.3 Équation de poisson	33
II.3 Comsol Multiphysics	33
II.4 Simulation de la cellule solaire sous Comsol Multiphysics	34
II.5 Conclusion	36
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction	38
III.2 Caractéristique IV sans défauts	38
III.3 L'influence des pièges d'électrons sur les paramètres	39
III.4 L'influence des pièges des trous sur les paramètres	40
III.5 Comparaisons de l'influence des pièges des trous et électrons	41
III.5.1 Comparaisons les paramètres externe avant et après l'irradiation	41
III .6 Conclusion	42
Conclusion Générale	44
Référence Bibliographie	45

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH le Tout Puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté de mener à terme ce projet.

J'adresse premièrement et chaleureusement toute ma gratitude à mon respecté encadreur Madame MAZOUZ Halima, pour son aide et son précieux conseils.

Mes remerciements vont aussi au membre du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail et de participer à la soutenance.

Mes vifs remerciements vont aussi à mes parents qui m'ont donné la lumière et guidés et à tous mes professeurs qui m'ont orientés, assistés et aidés à concevoir ce mémoire ainsi qu'à tous ceux qui, durant ma vie scolaire et universitaire m'ont apporté leurs précieux conseils et m'ont permis d'être ce que je suis aujourd'hui.

Enfin, je remercie l'université de Saad Dahlab Blida 1 et le département des Energies Renouvelables.

Dédicaces

Je Dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, pour tous leur sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études.

À la mémoire de mon grand-père ; que Dieu lui accorde sa miséricorde

Mes chers amis de loin ou de près, pour leur encouragements permanant et leur soutiens moral

À tous ceux qui ont participé à ma formation.

Salah

Résumé

Les scientifiques ont accordé beaucoup d'attention depuis longtemps aux études dans le domaine spatial, notamment à l'utilisation de panneaux solaires dans des applications spatiales comme les satellites afin de leur fournir de l'énergie électrique. Cependant, les semi-conducteurs à base des matériaux III-V qui composent ces panneaux sont souvent exposés à des dangers et des distorsions de leur structure après exposition à des particules nocives et aux rayonnements solaires. Nous présentons dans ce travail une simulation numérique sous Comsol Multiphysics d'une cellule solaire à base de GaInP en présence des défauts générés par irradiation à électron de 1MeV sous une fluence de 3.10^{16}cm^{-2} électrons. Nous avons constaté que les pièges à trous H1, H2 et H3 sont plus influent par rapport aux défauts à électrons E1, E2 et E3 dans la dégradation des paramètres externes de la cellule solaire.

Mots clés : GaInP, simulation, défauts, semi-conducteur, irradiations, électrons, matériaux III-V.

Abstract

Scientists have paid much attention in recent years to space-related studies, including the use of solar panels in space applications such as satellites to provide them with electrical power. However, the semiconductors based on III-V materials that compose these panels are often exposed to hazards and distortions of their structure after exposure to harmful particles and solar radiation. In this work, we present a numerical simulation under Comsol Multiphysics of a GaInP-based solar cell in the presence of defects generated by 1MeV electron irradiation under a fluence of 3.10^{16}cm^{-2} electrons. We found that the hole traps H1, H2 and H3 are more influential compared to the electron defects E1, E2 and E3 in degrading the external parameters of the solar cell.

Key words: GaInP, simulation, defects, semiconductor, irradiations, electrons, materials III-V.

ملخص

منح العلماء الكثير من الاهتمام في السنوات الأخيرة للدراسة في مجال الفضاء، بما في ذلك استخدام الألواح الشمسية في التطبيقات الفضائية مثل الأقمار الصناعية لتزويدهم بالطاقة الكهربائية. وغالبا ما تتعرض أشباه الموصلات المستندة إلى المواد الثالثة والخامسة التي تشكل هذه اللوحات لمخاطر وتشوهات هيكلها بعد التعرض للجزيئات الضارة والإشعاع الشمسي. لقد قدمنا في هذا البحث محاكاة رقمية من كومسول متعدد الفيزياء للخلية الشمسية فوسفيد غالسيوم إنديوم في وجود العيوب التي تم إنشاؤها بواسطة التشعيع الإلكتروني من 1 ميجا إلكترون فولت تحت تأثير 3.10^{16} إلكترون في سم². وجدنا أن الفخاخ H1 و H2 و H2 و H3 الأكثر تأثيرا من عيوب الإلكترون E1 و E2 و E3 في تدهور المعلمات الخارجية للخلية الشمسية.

الكلمات المفتاحية: فوسفيد غالسيوم إنديوم، محاكاة، عيوب، أشباه الموصلات، التشعيع، الإلكترونات، المواد الثالثة والخامسة.

Liste des acronymes et abréviations

DLTS :Deep-level transient spectroscopy

MOCVD : Metal-organic chemical vapour deposition

AM :Masse d'air (Air mass)

GEO : Orbite géostationnaire (Geostationary Earth Orbit)

NASA : Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique (National Aeronautics and Space Administration)

ISS : Station Spatial Internationale (International Space Station)

SRH :Recombinaison Shockley-Read-Hall

N_c : Densité d'états effective dans la bande de Conduction (cm^{-3})

N_v : Densité d'états effective dans la bande de Valence (cm^{-3})

μ_p : Mobilité des trous (cm^2 / v)

μ_n : Mobilité des électrons (cm^2 / v)

AE : Affinité des électrons (eV)

n_i : Concentration intrinsèque des porteurs (cm^{-3})

V_{th} : vitesse thermique de l'électron et du trou cm / s

H :Défauts à trous

E : Défauts à électrons

E_a : Niveau d'énergie introduit par les défauts (eV)

N_T : Densité des centres de recombinants (cm^{-3})

λ : Longueur d'onde (nm)

J_{cc} :Courant de court-circuit (mA/cm^2)

V_{co} : Tension de circuit-ouvert (V)

P_{max} : Puissance maximal (W)

FF : Facteur de forme

η : Rendement

n : Concentration des électrons libre dans la bande de conduction (cm^{-3})

p : Concentration des trous libres dans la bande de valence (cm^{-3})

q : Charge électrique(C)

J_n : Densité de courant d'électrons (mA/cm^2)

J_p : Densité de courant des trous (mA/cm^2)

G_n : Taux de génération des électrons($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)

G_p : Taux de génération des trous ($m^{-3} \cdot s^{-1}$)
 r_n : Taux de recombinaison des électrons (s^{-1})
 r_p : Taux de recombinaison des trous (s^{-1})
 \vec{E} : Champ électrique (N/C)
 D_n : Constante de diffusion des électrons (m^2/s)
 D_p : Constante de diffusion des trous (m^2/s)
 k_B : Constante de Boltzmann (J/K)
 T : Température (K)
 r : Coefficient de réflexion
 N_{Apmax} : Dopage maximal de type P (cm^{-3})
 NDn : Dopage de type N (cm^{-3})
 $NDnmax$: Dopage maximal de type N (cm^{-3})
 ϵ : Permittivité diélectrique (F /m)
 N_a : Concentration des accepteurs (cm^{-3})
 N_d : Concentration des donneurs (cm^{-3})
 Δn : Concentrations d'électrons (cm^{-3})
 Δp : Concentrations des trous (cm^{-3})
 τ_r : Durée de vie des porteurs (s)
 E_i : Niveau de fermi intrinsèque (eV)
 σ_n : Section efficace de capteur pour les électrons (cm^2)
 σ_p : Section efficace de capteur pour les trous (cm^2)
 R_a : Taux de Recombinaison Auger (s^{-1})
 C_n : Coefficient de recombinaison Auger des électrons ($cm^6 \cdot s^{-1}$)
 C_p : Coefficient de recombinaison Auger des trous ($cm^6 \cdot s^{-1}$)
 R_s : Taux de recombinaison à la surface (s^{-1})
 n_s : Concentrations des électrons proches de la surface (cm^{-3})
 p_s : Concentrations des trous proches de la surface (cm^{-3})
 N_{st} : Densité des centres de recombinaisons (cm^{-3})

Liste des figures

Figures	Page
Fig I.1 Rayonnement solaire hors atmosphère et sur la surface terrestre	6
Fig I.2 Les particules cosmiques	7
Fig I.3 Éruption solaire avec panaches émis en anneau	8
Fig I.4 champ magnétique de terre	8
Fig I.5 vents solaires	9
Fig I.6 Ceinture de Van Allen	10
Fig I.7 Le plan d'une orbite héliosynchrone présente toujours le même angle par rapport à la direction du Soleil.	10
Fig I.8 Orbite géostationnaire	11
Fig I.9 L'inclinaison d'une orbite héliosynchrone circulaire pour différentes altitudes	12
Fig I.10 Les différentes orbites intermédiaires en InGaAs de la cellule solaire irradiée par un électron de 1 MeV.	12
Fig I.11 Différents types d'orbites des satellites	13
Fig I.12 Satellite Vanguard 1	14
Fig I.13 Satellite Explorer 6	14
Fig I.14 Satellite Telstar	15
Fig I.15 Nimbus	15
Fig I.16 OAO-1	16
Fig I.17 Tableau périodique	17
Fig I.18 Structure de la cellule solaire n ⁺ P à base de InGaP	18
Fig I.19 Structure n ⁺ P jonction de Ga _{0.5} In _{0.5} P	19
Fig I.20 Caractéristiques courant-tension de 1Mev électrons irradiation de cellule solaire n ⁺ P InGaP à température ambiante en circuit ouvert pendant 40 jours dans l'obscurité	20
Fig I.21 Structure de la cellule solaire n ⁺ P InGaP	20
Fig I.22 Réponse spectral de n ⁺ P InGaP avec 1.10 ¹⁷ cm ⁻² influence de l'électron	21
Fig I.23 Structure de la cellule solaire multijonction GaInP/GaInAs/Ge	22
Fig I.24 Dégradation de rendement des sous-cellules supérieures en GaInP et intermédiaires en InGaAs de la cellule solaire irradiée par un électron de 1 MeV	22
Fig I.25 Structure de la cellule solaire multijonction GaInP/GaAs/Ge	23
Fig I.26 Structure optimisée de la cellule solaire InGaP	24
Fig I.27 Tracés simulés pour I-V Courbe (a) et P-Vcourbe (b) pour la cellule solaire InGaP	25

optimisée

Fig I.28 Instrument de DLTS (Deep-level transient spectroscopy)	26
Fig I.29 Processus de perte énergétique dans une cellule photovoltaïque	26
Fig I.30 Différentes types de recombinaisons	26
Fig II.1 Logiciel comsol3.5aMultiphysics	34
Fig II.2 Maillage et dimensions de la jonction NiP modélisée	35
Fig III.1 Caractéristique I-V avant irradiations	38
Fig III.2 Caractéristique P-V avant irradiations	38
Fig III.3 Caractéristique I-V avant et après irradiation à électrons	39
Fig III.4 Caractéristique P-V avant et après irradiation à électrons	39
Fig III.5 Caractéristique I-V après irradiations (en présence des défauts à électrons)	40
Fig III.6 Caractéristique I-V après irradiations (en présence des défauts à trous)	41
Fig III.7 Caractéristique I-V en présence des défauts à électrons et trous	42

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tab I.1 Paramètres des différents types d'orbites	13
Tab I.2 Paramètres de base à 300 K (GaInP)	17
Tab I.3 Paramètres physiques de GaInP	18
Tab I.4 Paramètres électriques mesurés des défauts induits par les électrons de 1 MeV	21
Tab I.1 Valeurs de dégradation de la tension ouvert Voc de la sous-cellule GaInP	23
Tab II.1 Les paramètres de GaInP	34-35
Tab III.1 Comparaison les paramètres de la cellule solaire sans défauts	38
Tab III.2 Les paramètres externes avant et après l'irradiation	39
Tab III.3 Les paramètres de la cellule solaire après les défauts à électrons	40
Tab III.4 Les paramètres de la cellule solaire après les défauts à trous	41
Tab III.5 L'influence des pièges à électrons et trous sur les paramètres externes	42

Introduction Générale

Introduction

La production d'électricité d'engin spatial vient habituellement d'une source renouvelable d'énergie, telle que le soleil. La plupart des satellites et même sondes d'espace profond emploient les panneaux solaires qui arment l'énergie du soleil, la convertissant en énergie électrique qu'ils exigent pour des fonctions internes. Ces panneaux solaires sont composés des matériaux semi-conducteurs tels que le Gallium (Ga), l'arséniure(As) et le Phosphure d'indium (InP), dont chacun absorbe différentes longueurs d'onde du rayonnement du soleil pour fournir la puissance. Individuellement, les cellules solaires développent seulement quelques watts, mais quand de grandes quantités sont placées dans les rangées, kilowatts de puissance peuvent être produites, assez pour maintenir beaucoup à bord des processus. Pour l'efficacité maximum, cependant, les panneaux doivent être perpendiculaires à la direction que le rayonnement du soleil voyage, et en tant que tels les panneaux solaires sont généralement mobiles.

Les besoins en énergie des satellites sont fonction de leur taille et de leur mission. Les satellites de communication, qui émettent en permanence sont ceux qui nécessitent le plus d'énergie. Les satellites alloués à la recherche fonctionnent, pour la plupart, par intermittence et avec des puissances inférieures. Par exemple : les télescopes spatiaux, envoyés en 2009, demandent une énergie comprise entre 1 et 15 kW [1], grâce à l'emploi de technologie électronique basse puissance.

Pour générer 10 kW à l'aide des panneaux solaire, il faut une surface de module approchant les 40 m² [1]. Cependant les satellites étant en rotation perpétuelle autour de la Terre, ainsi qu'un ensemble de batteries sont obligatoires pour fournir une puissance continue. Les systèmes positionnés sur des orbites dites géostationnaires ou héliosynchrones ne nécessitent qu'un axe d'orientation pour les panneaux.

Les panneaux solaires se dégradent. Un panneau solaire ne fournira pas la même quantité d'énergie au fil du temps, en raison de la perte d'efficacité des cellules, Ceci est dû à la grande énergie qu'il reçoit des particules énergétiques provenant du soleil, telles que les protons et les électrons, de 1 à 10 MeV et plus [2], ce qui provoque des pièges à l'intérieur de la cellule solaire. Et la nature de ces defaults peut être de différents types selon le matériau.

Les panneaux solaires dans l'espace se trouvent soumis aux actions de plusieurs facteurs spécifiques dont l'irradiation électronique et protonique sont des facteurs qui sont responsables des pièges situés dans la bande interdite de cellule solaire. Il est important de connaître cet environnement et de connaître son influence sur les cellules solaires dans l'espace, de savoir le simuler et modéliser afin de définir l'étendue de la résistance des cellules solaires à GaInP et l'influence de facteurs externes tels que le courant et la tension après l'irradiation à électron de 1MeV.

Ce mémoire se décompose en quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne la cellule solaire GaInP dans l'espace et l'état de l'art. Nous parlerons sur l'environnement spatial, les satellites et tout ce qui concerne cet espace extra-atmosphérique et aussi on a définie le matériau GaInP et ces paramètres. Nous avons également touché toutes les études et résultats réalisés par des chercheurs sous l'outil de La spectroscopie transitoire en profondeur sur le nombre et la nature des différents pièges avec différentes structures de la cellule solaire GaInP. Que ce soit pour les électrons ou les trous, avec le niveau d'énergie de chaque piège, la concentration et la section, ainsi que leur influence sur des paramètres externes tel que le courant, la tension et de la puissance maximale avant et après l'irradiation à électrons de 1MeV.

Le deuxième chapitre présente la simulation numérique de la structure du GaInP par logiciel de Comsol Multiphysics en présence des défauts à électrons et à trous créés par irradiation à électrons de 1 MeV avec les équations et les constants nécessaires aux simulations.

Le troisième chapitre consiste à présenter les résultats de l'influence de ces défauts sur les paramètres externes de la cellule solaire tels que le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert, le rendement et le facteur de forme. A fin de prédéfinir la durée de vie d'une telle cellule solaire dans l'espace.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale concernant ce sujet ainsi que certaines perspectives à ce travail.

Chapitre I
Cellule solaire GaInP
dans l'espace

I.1 Introduction

L'environnement spatial est un environnement complexe et dynamique et son interaction avec les panneaux solaires de satellites spatiaux a posé aux concepteurs de satellites beaucoup de problèmes. La course au développement de systèmes spatiaux toucha de nombreux domaines : l'étude de l'espace lui-même, la science des matériaux et surtout le domaine de l'énergie. L'intérêt pour l'effet photovoltaïque fut très rapidement mis en avant. Les panneaux solaires sont effectivement le seul moyen non nucléaire d'alimenter de façon continue les satellites en orbite. Les panneaux solaires à base des matériaux III-V comme GaAs et GaInP sont les plus utilisés dans les applications spatiales. En raison de l'importance de leur rendement et l'énergie de gap par rapport aux autres semi-conducteurs comme Si et Ge. Mais leur exposition à un rayonnement à haute énergie du côté des électrons de 1 MeV venant de l'espace et du soleil, de nombreux pièges sont produits à l'intérieur du bande interdite de semi-conducteur ce qui affecte directement sur le fonctionnement et l'efficacité de la cellule solaire dans l'espace.

I.2 Rayonnement solaire dans l'espace

Le rayonnement est un flux d'énergie qui traverse l'espace ou la matière sous forme d'ondes ou de particules. Sur Terre le rayonnement solaire est reçu de façon intermittente. Les rayons du soleil sont occultés par les différentes couches constitutives de l'atmosphère, ainsi que par les nuages. Dans l'espace, le rayonnement solaire n'est pas altéré, l'énergie disponible est donc près de dix fois supérieure à celle captée par la surface terrestre [14]. De plus ce rayonnement est constant car indépendant des saisons des jours et des conditions météorologiques. Ainsi hors atmosphère l'énergie solaire est aussi fiable que l'énergie nucléaire. La puissance du rayonnement solaire reçu peut être évaluée grâce à l'équation suivante :

$$\text{Puissance} = \text{Intensité} \times 4\pi r^2 \text{ (II.1)}$$

Dans l'espace, le rayonnement solaire n'est pas réfléchi ou absorbé par l'atmosphère et les nuages.

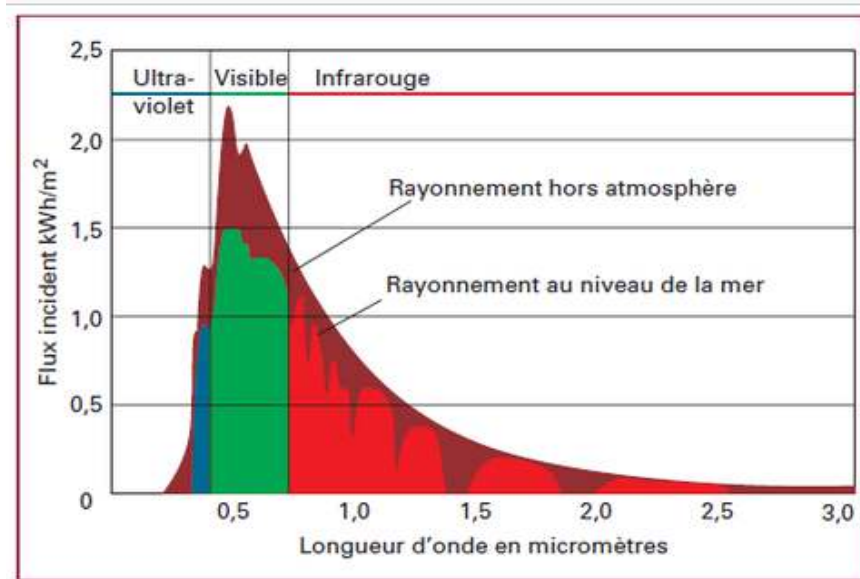


Fig I.1 Rayonnement solaire hors atmosphère et sur la surface terrestre [15]

I.3 Rayonnements spatiaux

I.3.1 Rayons cosmiques galactiques

Le rayonnement cosmique est le flux de noyaux atomiques et de particules de haute énergie qui circulent dans le milieu interstellaire. La source de ce rayonnement se situe selon les cas dans le Soleil, à l'intérieur ou à l'extérieur de notre galaxie. Ce rayonnement est constitué pour une bonne part (à environ 97%) [16] de noyaux légers ionisés (noyaux d'hydrogène ou protons, noyaux d'hélium ou particules alpha) le reste est constitué de noyaux lourds (parfois même du fer) et d'électrons. L'énergie dont sont dotées ces particules provient de leur vitesse relativiste que les physiciens traduisent en énergie cinétique exprimée en électron-volt (eV), soit l'énergie transmise à un électron lorsqu'on l'accélère dans un champ électrique de 1 Volt sur une distance de 1 m, Ainsi certaines des particules des rayons cosmiques galactiques atteignent par exemple 10^{20} eV [16], Soit l'équivalent de 106 milliards de protons au repos.

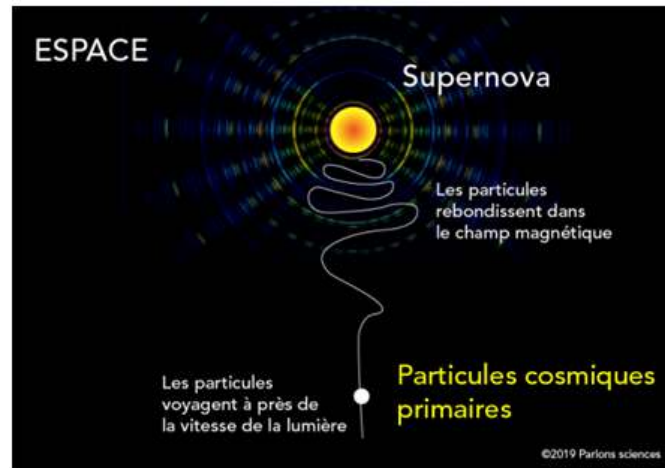


Fig I.2 Les particules cosmiques [17]

I.3.2 Particules solaires éjectées lors d'éruptions solaires

Les éruptions solaires sont une libération soudaine d'énergie par la surface du Soleil durant quelques minutes à quelques dizaines de minutes, sous forme d'ondes électromagnétiques sur un large spectre (des ondes radio aux rayons gamma en passant par les rayons X) et de particules de matières très énergétiques (des protons relativistes essentiellement). Les éruptions s'accompagnent de perturbations notables du champ magnétique solaire et de l'émission de particules de haute énergie. Elles ont des conséquences diverses : elles perturbent la propagation des ondes utilisées dans les télécommunications, elles risquent d'être une source d'erreurs dans le calcul des orbites des satellites engendrant des tumeurs, elles représentent un risque, généralement faible, d'irradiation pour les personnes embarquées à bord des avions, ou pour les astronautes, elles perturbent les dispositifs électroniques et, enfin, elles créent des courants induits dans les réseaux de distribution de l'électricité ou les câbles téléphoniques.

La première éruption solaire observée le fut par l'astronome anglais Richard Carrington en 1^{er} septembre 1859[18], lorsqu'il constata l'apparition d'une tache très lumineuse à la surface du Soleil, qui perdura pendant 5 minutes.

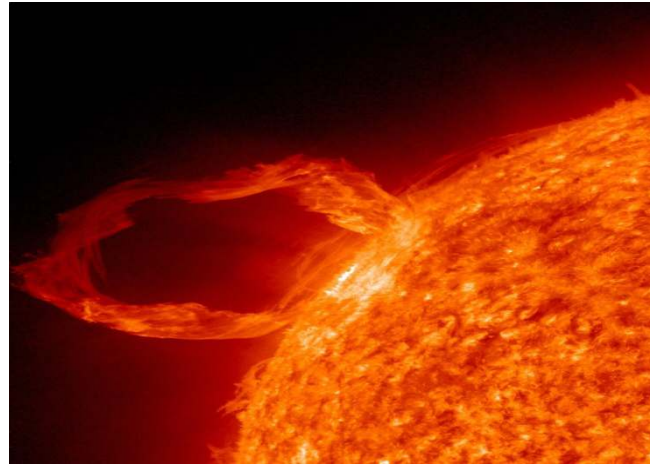


Fig I.3 Éruption solaire avec panaches émis en anneau [18]

I.3.3 Rayons piégés par le champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre, aussi appelé bouclier terrestre, est un champ magnétique présent dans un vaste espace autour de la Terre. Le champ magnétique terrestre dévie et canalise les électrons, protons et autres particules rapides provenant de l'espace.

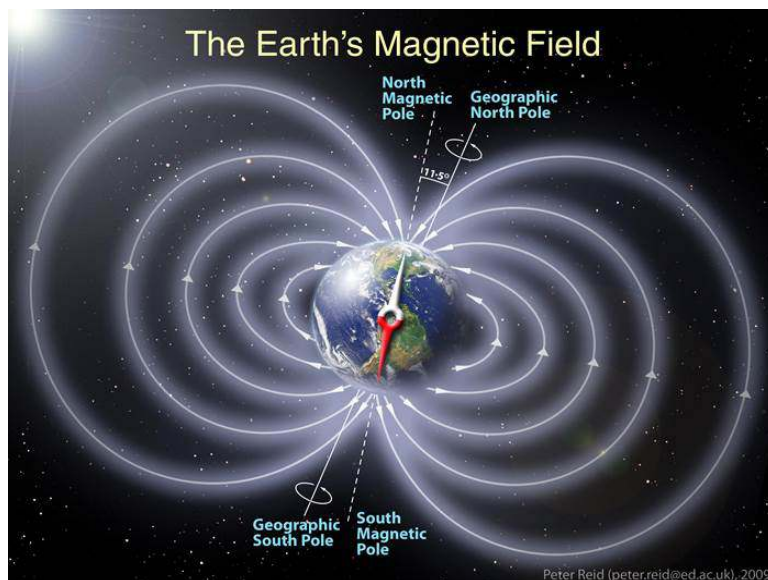


Fig I.4 champ magnétique de terre [19]

I.3.4 Vent solaire

Le vent solaire est un flux de plasma, sa composition est identique à celle de la couronne solaire :

73 % d'hydrogène et 25 % d'hélium [20]. Le Soleil perd environ 1×10^9 kg de matière par seconde sous forme de vent solaire. Le vent solaire est composé principalement d'électrons, de protons et de noyaux d'Hélium. Il est très fluctuant dans la couronne surchauffée du soleil (1 million de degrés) des atomes d'hydrogène sont ionisés, ce qui leur confère une charge électrique. Ce vent est très peu dense (10 particules par centimètre cube). Ce plasma brûlant est ensuite expulsé à une vitesse considérable. La vitesse du vent solaire varie de 400 à 800 km/s (de 1 440 000 à 2 880 000 km/h)[20], la moyenne étant de 450 km/s (1 620 000 km/h) c'est un vent supersonique (il se déplace plus vite que les ondes sonores). Le vent solaire est traversé par des ondes de choc. Il est émetteur d'émissions radio.

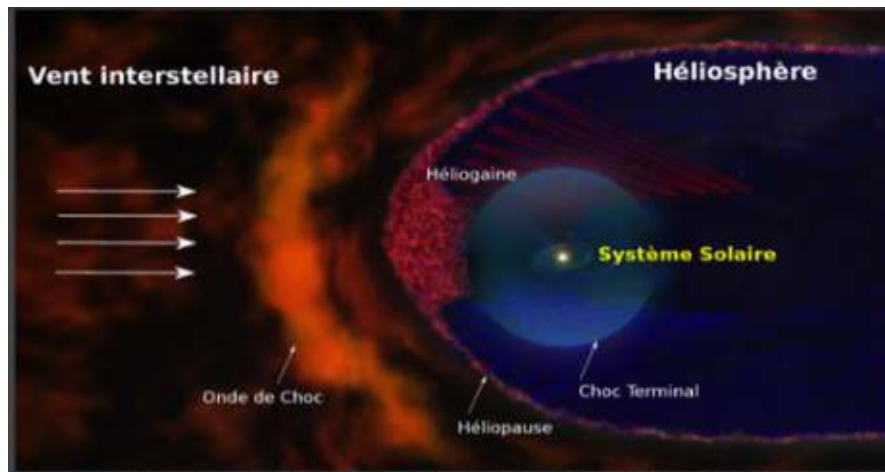


Fig I.5 vents solaires [22]

I.3.4.1 Ceinture de Van Allen

Détectées en 1958 par l'engin américain Explorer 1, ainsi nommées en l'honneur du physicien américain James Van Allen, puis explorées par les engins Explorer et Pioneer. Disposées parallèlement au plan de l'équateur magnétique elles sont inclinées d'environ 11° sur l'équateur géographique [23].

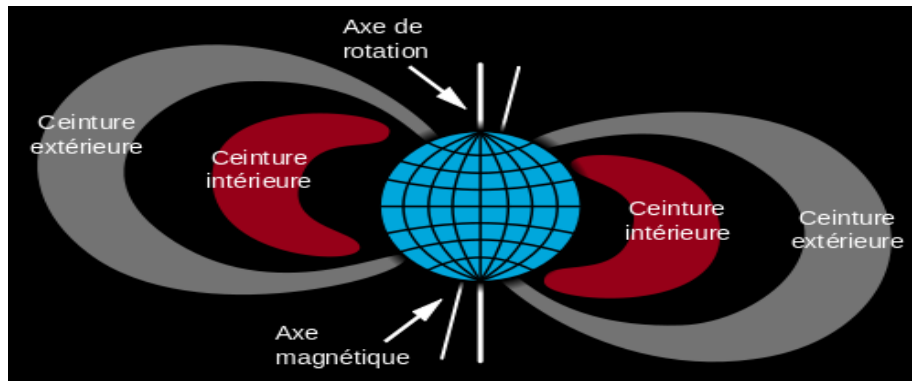


Fig I.6 Ceinture de Van Allen [24]

I.4 Orbites des satellites

Les orbites des satellites terrestres peuvent avoir de nombreuses formes et orientations : certaines sont circulaires ou au contraire en forme d'ellipse très allongée. Elles peuvent se situer à basse altitude juste au-dessus de l'atmosphère terrestre (250 km) ou dépasser 30 000 km [25].

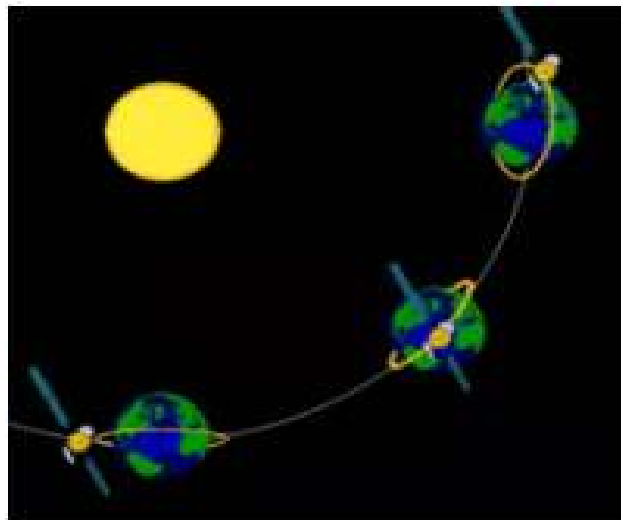


Fig I.7 Le plan d'une orbite héliosynchrone présente toujours le même angle par rapport à la direction du Soleil. [26]

I.4.1 Types des orbites

I.4.1.1 Orbite géostationnaire "GEO" (ou de Clarke)

Parmi les différentes trajectoires qu'un satellite peut avoir dans l'espace, il y a l'orbite géostationnaire. C'est une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur à une altitude

de 35 786 km du sol (le rayon de l'orbite est donc de 42 164 km). À cette altitude la période de révolution du satellite correspond exactement à la période de rotation de la Terre, soit 23 heures, 56 minutes et 4 secondes[27] en réalité C'est un cas particulier d'orbite géosynchrone qui entre dans la catégorie plus vaste encore des orbites géocentriques. Ces dernières désignent, comme leur nom l'indique, les trajectoires décrites par un engin spatial qui tourne autour de la Terre. La particularité de l'orbite géostationnaire, c'est qu'elle est décrite dans le même sens de rotation que la Terre. C'est-à-dire, d'ouest en est. Mais aussi qu'il s'agit d'une orbite circulaire soit d'une orbite d'excentricité nulle et qui présente une inclinaison nulle.

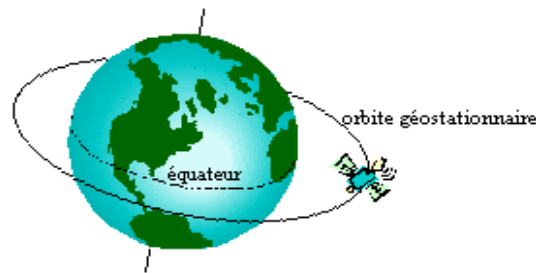


Fig I.8 Orbite géostationnaire

I.4.1.2 Orbite Héliosynchrone

C'est une orbite circulaire basse (par convention entre 300 et 1 000 km d'altitude) dont l'inclinaison, proche de 90° , la fait passer au-dessus ou près des pôles. Un satellite situé sur une orbite polaire passe régulièrement au-dessus de tous les points de la surface grâce à la rotation de la Terre. Ce type d'orbite conserve un angle constant avec la direction Terre-Soleil c'est-à-dire que le plan d'orbite tourne de 360° par an.

Les orbites héliosynchrones permettent de passer toujours à la même heure solaire locale au-dessus d'un lieu donné : l'éclairage identique des prises de photo du lieu permet de faire ressortir les changements. Cette caractéristique en fait une orbite idéale pour des satellites d'observation de la Terre.

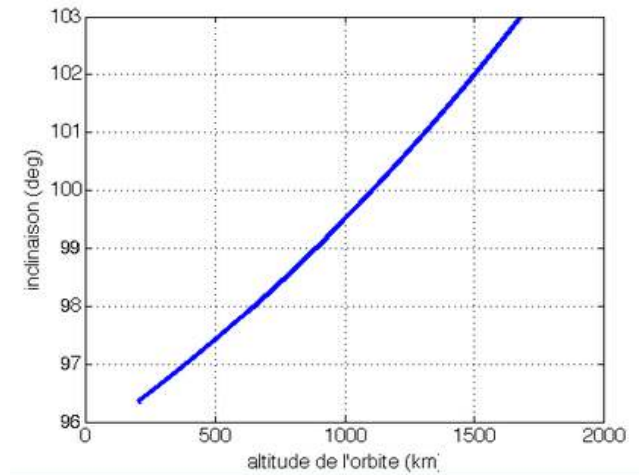


Fig I.9 L'inclinaison d'une orbite héliosynchrone circulaire pour différentes altitudes [28]

II.4.1.3 Orbite Basse

L'orbite terrestre basse ou **OTB (LEO** en anglais, pour low earth orbit) est une orbite circulaire, située entre 500 à 1500 km d'altitude [29]. Cette proximité offre deux avantages : un temps de latence (temps que met à parcourir un signal) très court et une puissance réduite pour entrer en contact avec eux.

La période d'un satellite est de l'ordre de quelques centaines de minutes. Comme l'orbite est basse, la vitesse de défilement doit être très élevée afin de compenser l'attraction terrestre. Un satellite fait le tour de la terre environ 14 fois par jour et sa couverture varie entre 3000 à 4000 km[30] : un observateur terrestre n'aura la possibilité d'apercevoir le satellite que pendant environ 20 minutes. Ce type de satellite est appelé aussi satellite défilant.

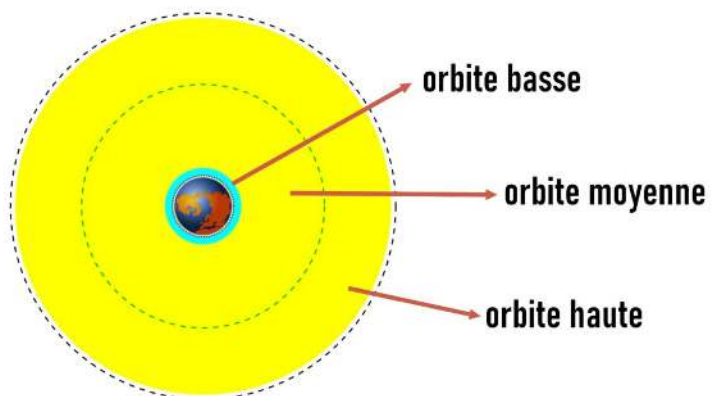


Fig I.10 Les différentes orbites

II.4.1.4 Orbite moyenne

L'orbite moyenne culmine généralement à une altitude de 20 000 km avec une période de 12 heures [31] L'orbite située en dehors de l'atmosphère terrestre est très stable. Les signaux envoyés par le satellite peuvent être reçus sur une grande partie de la surface du globe terrestre.

II.4.1.5 Orbite de Molniya

L'orbite haute a un apogée qui se situe à une altitude supérieure à l'orbite géostationnaire. La Russie utilise ce type d'orbite pour certains de ses satellites de télécommunications. L'orbite de Molniya se caractérise par une orbite très excentrique avec un apogée de 40 000 km pour un périégée de 500 km. L'inclinaison de 63,4° [32] permet d'échapper aux perturbations d'orbite découlant de l'aplatissement du globe. L'orbite de Molniya permet une couverture 24h sur 24 du territoire de la Russie avec une constellation de trois satellites. Cette orbite est utilisée car la Russie ne peut lancer de satellites géostationnaires depuis ses bases spatiales toutes situées à des latitudes trop élevées et les satellites géostationnaires ne peuvent pas couvrir la fraction du territoire russe située à une latitude supérieure à 81° [32].

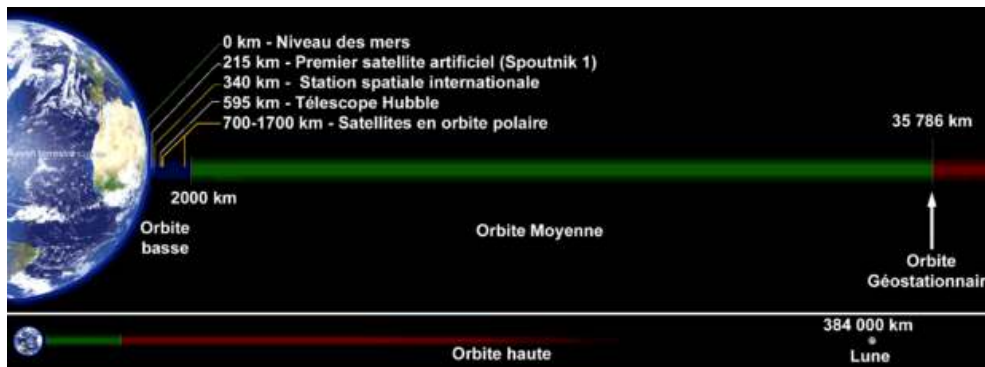


Fig I.11 Différents types d'orbites des satellites.

Type d'orbite	Apogée	Périégée	Période	Vitesse apogée	Vitesse périégée
Orbite basse (GOCE)	270 km	270 km	90 min	7.7 km/s	7.7 km/s
Orbite héliosynchrone (spot 1)	832 km	832 km	102 min	7.4 km/s	7.4 km/s
Orbite de Molnia	39900 km	500 km	12 h	1.49 km/s	10 km/s
Orbite géostationnaire	35786 km	35 786 km	23 h 56 min	3.1 km /s	3.1 km /s

Tab I.1 paramètres des différents types d'orbites [25]

I.5 Satellites équipés de panneaux solaires à travers l'histoire

Depuis de nombreuses années et à ce jour, de nombreux scientifiques développent des techniques d'utilisation de panneaux solaires dans des satellites pour des missions spatiales, notamment l'agence américaine NASA.

17 mars 1958 : Les américains effectuent le lancement de leur second satellite sur orbite terrestre, Vanguard 1. Cet appareil avait pour mission de relever des données concernant l'impact de l'environnement sur les satellites et le matériel embarqué. Il était le premier appareil alimenté par des modules photovoltaïques. Cette sphère en aluminium était en effet équipée de six cellules solaires d'environ 5cm de côté. [33]



Fig I.12 Satellite Vanguard 1 [33]

Aout 1959 : Le satellite Explorer 6, d'une masse de 40 kg, embarque à son bord une caméra dans le but de filmer la Terre. Son alimentation était assurée par un parc photovoltaïque de 9600 cellules. Chacune d'entre elles mesurant 1 cm par 2 cm. [34] .C'était le premier satellite scientifique American équipée de cellule à 10% de rendement et dont la collecte des porteurs se fait par le biais d'une grille pour réduire la résistance série. Ces cellules ont été développées par le groupe Hoffman Electronics.

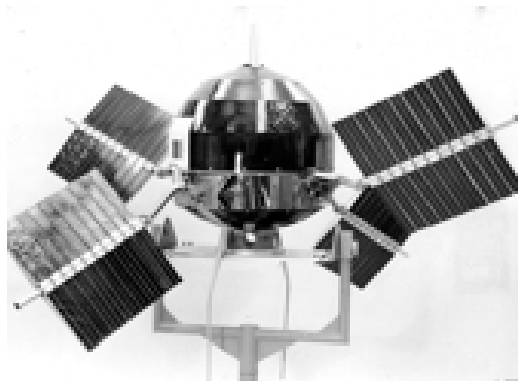


Fig I.13 Satellite Explorer 6 [35]

24 novembre 1962 [37] : Telstar avait pour mission de tester la viabilité des projets de télécommunication (relais d'appels téléphoniques, émissions télévisées). Il effectuera avec succès la première retransmission en mondovision. Telstar était également chargé d'une mission scientifique visant à réaliser des mesures de radiation. Recouvert de cellules solaires de 12 Watts de puissance. Le stockage de l'énergie était assuré par une batterie de nickel-cadmium.

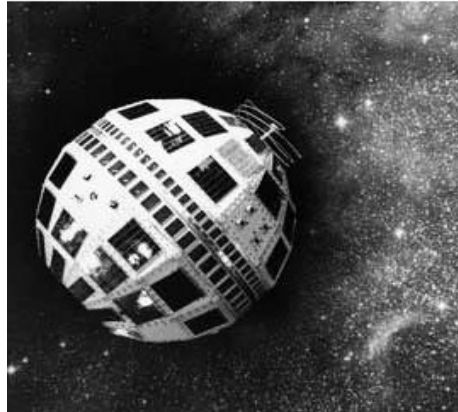


Fig I.14 Satellite Telstar [36]

1964 [39]: Nimbus 1, premier satellite du programme météorologique était mis sur orbite. Il est équipé de deux panneaux solaires orientables (470 W), contenant 10.500 cellules.



Fig I.15 Nimbus [38]

1965 : Peter Glaser et Arthur D. Little développent l'idée d'un central solaire satellite.

1966 : OAO-1 (Orbiting Astronomical Observatory) est lancé avec une gamme de puissance photovoltaïque de 1 kW [41].

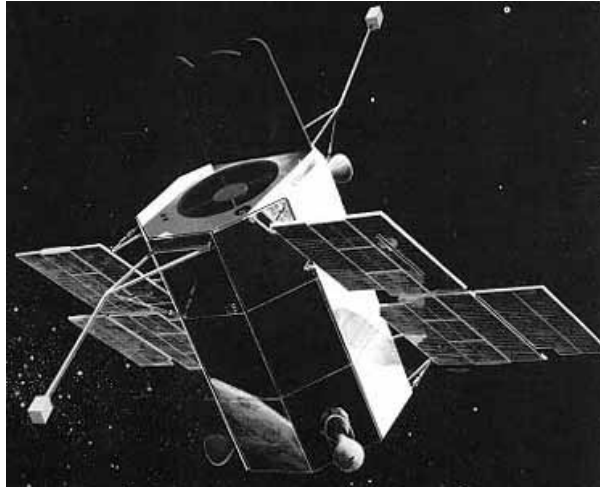


Fig I.16 OAO-1 [40]

1968 : mise en orbite de l'OVI-13 alimenté par deux panneaux de sulfure de cadmium.

1971 : Prospero (X-3) est le seul satellite anglais ayant orbité autour de la Terre. Celui-ci avait pour mission d'étudier le comportement des cellules solaires dans l'espace et également d'améliorer la détection des micrométéorites

1993 : les premières cellules III-V multi-jonctions voient le jour pour de futures applications spatiales.

2009 : débute le projet de la station spatiale internationale ISS (International Space Station).

I.6 Cellule solaire à base de GaInP

I.6.1 Matériau III-V

Les matériaux III-V sont des matériaux composite fabriqué à partir d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique des éléments (bore, aluminium, gallium, ...), et d'un ou plusieurs éléments de la colonne V (azote, phosphore, arsenic, antimoine). Utilisé comme matériaux semi-conducteur notamment dans la fabrication des cellules solaires photovoltaïques spatiales.

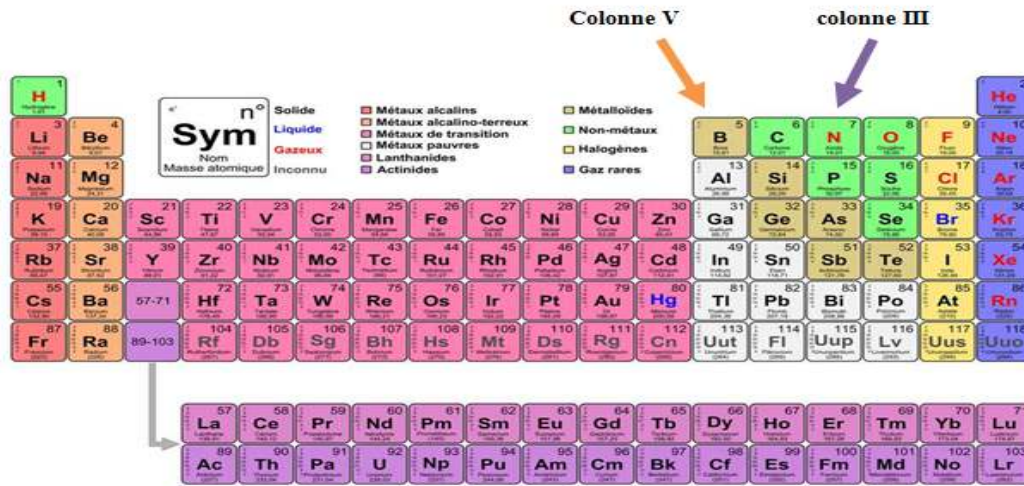


Figure I.17 Tableau périodique

I.6.2 Définition

Le phosphure d'indium et de gallium (InGaP) est un semi - conducteur composé d'indium (In), de gallium(Ga) et de phosphore(P). Il est utilisé dans l'électronique de haute puissance et de haute fréquence en raison de sa vitesse d'électrons supérieure par rapport aux semi-conducteurs les plus courants, tel que le silicium et l'arséniure de gallium.

I.3.3 Paramètres de base à 300 K pour GaInP

Les paramètres de la structure de la cellule GaInP utilisée pour la simulation sont indiqués dans les tableaux I.1et I.2 :

	$Ga_{0.51}In_{0.49}P$	$Ga_xIn_{1-x}P$
Structure en cristal	Zinc Blende	Zinc Blende
Nombre d'atomes dans 1 cm^3	$4,46 \cdot 10^{22}$	$(3,96 + 0,98x) \cdot 10^{22}$
Densité	$4,47\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$4,81 - 0,67x\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Constante diélectrique (statique)	11,8	$12,5 - 1,4x$
Constante diélectrique (haute fréquence)	9,35	$9,61 - 0,5x$
Masse d'électrons de densité d'état	$0,088 m_o$	$0,63 + 0,13x (x > 0,74) m_o$
Masses effectives des trous m_h	$0,7 m_o$	$0,6 + 0,19x m_o$
Affinité électronique	4,1	$4,38 - 0,58x\text{ eV}$
Constante de réseau	$5,653 \text{ \AA}$	$5,8687 - 0,4182x \text{ \AA}$

Tab I.2 : Paramètres de base à 300 K (GaInP) [4]

Paramètres	GaInP
Energie Gap, E_g	1.88 eV
Permittivité relative, ϵ_{PS}	12.05
Densité effective d'états dans la bande de conduction, N_c	$1,47 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Densité effective d'états dans la bande de Valence, N_v	$1,34 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$
Mobilité des électrons, μ_n	$400 \text{cm}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$
Mobilité des trous, μ_p	$40 \text{cm}^2/\text{v} \cdot \text{sec}$
Affinité des électrons, A_E	4.00 eV
Concentration intrinsèque des porteurs n_i	$3 \cdot 10^2 \text{cm}^{-3}$
vitesse thermique de l'électron et du trou V_{th}	$1 \cdot 10^6 \text{cm/s}$

Tab I.3 : paramètres physiques de GaInP [5]

I.7 Etat de l'art

Le composé ternaire GaInP est un matériau important pour la fabrication de dispositifs à semi-conducteurs en général et les cellules solaires spatiales en particulier. Afin de développer une multifonction basée sur InGaP cellules solaires pour les applications spatiales, il est nécessaire de comprendre la nature des défauts créés par irradiations à électrons, qui affectent les propriétés des matériaux et les performances de l'appareil.

En 2000 M. Aurangzeb Khan et autre [6] ont étudié une cellule solaire à base de $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ de structure n^+p Fig I.18 :

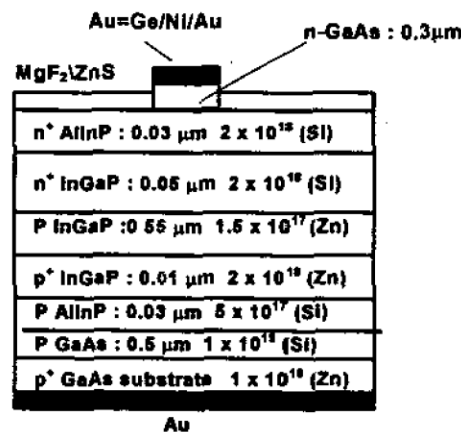


Fig I.18 Structure de la cellule solaire n^+p à base de InGaP [6]

Ils ont prouvé que l'irradiation électronique de 1 MeV à une fluence de 3.10^{16}cm^{-2} électrons produit trois pièges à trous : H1 (0.20 eV), H2 (0.50-0.55 eV) et H3 (0.76 eV) ayant des concentrations de $4,9.10^{14} \text{cm}^{-3}$, $1,6.10^{15} \text{cm}^{-3}$ et $1,3.10^{15} \text{cm}^{-3}$ respectivement.

En 2001, M. Aurangzeb Khan, Masafumi Yamaguchi et autre [2] ont étudié une nouvelle structure avec différentes couches **Fig I.19** :

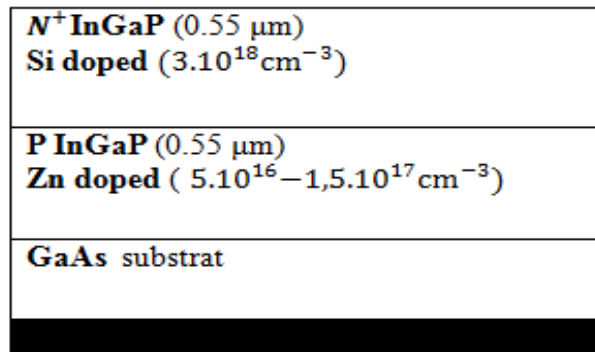


Fig I.19 Structure n^+p jonction de $Ga_{0,5}In_{0,5}P$

Après l'étude microscopique des défauts radio-induits de structure **Fig I.6**, l'irradiation à électron de 1 MeV avec 2.10^{17}cm^{-2} d'influence de l'électron produit trois pièges à trous : H1 (0.20 eV), H2 (0.50-0.55 eV) et H3 (0.71-0.76 eV) [2] ayant des concentrations de $6,8.10^{14} \text{cm}^{-3}$, $2,8.10^{15} \text{cm}^{-3}$ et $2,82.10^{15} \text{cm}^{-3}$ respectivement. De plus, trois nouveaux pièges pour électrons ont été observés qu'ils avaient étiquetés par E1 (0.20–0.29 eV), E2 (0.36 eV) et E3 (0.72 eV) ayant des concentrations de $3,1.10^{15} \text{cm}^{-3}$, $3,9.10^{15} \text{cm}^{-3}$ et $5,1.10^{15} \text{cm}^{-3}$ respectivement.

Afin de clarifier les effets de la température ambiante recuit du piège H2 sur les propriétés des cellules solaires, ils ont également surveillé les propriétés des cellules solaires InGaP contre l'effet du recuit dans l'obscurité à température ambiante pendant 40 jours sur les caractéristiques I –V d'une cellule solaire InGaP. La récupération du courant de court-circuit, surveillée sous Eclairage à AM 1.5.

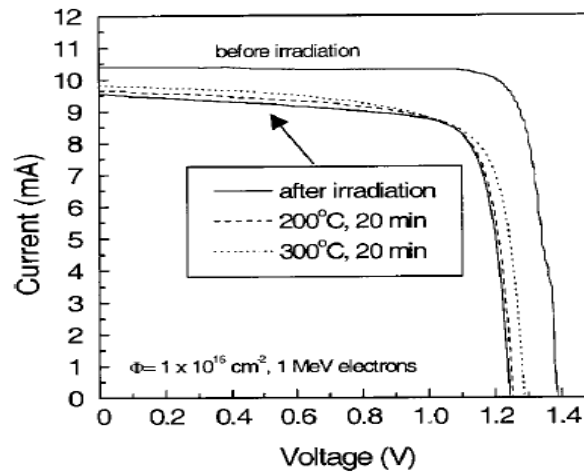


Fig I.20 Caractéristiques courant-tension de 1MeV électrons irradiation de cellule solaire n^+P InGaP à température ambiante en circuit ouvert pendant 40 jours dans l'obscurité [8]

En 2001, M. Aurangzeb Khan et autre [8] ont étudié une autre structure de n^+P Ga_{0.5}In_{0.5}P similaire à la structure **Fig I.18** Avec seulement une différence dans le dopage où ce dernier était dopé par le silicium et le deuxième par le zinc.

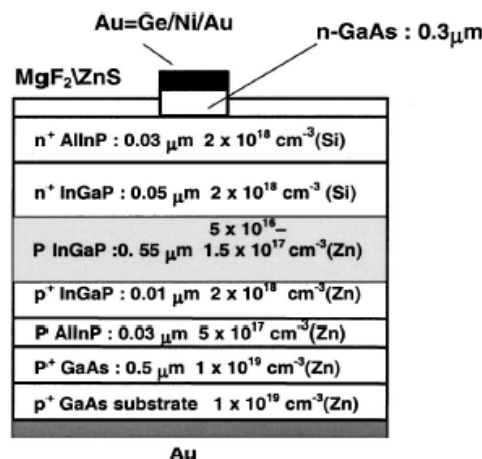


Fig I.21 Structure de la cellule solaire n^+P InGaP utilisée dans cette étude [8]

L'étude présente une récupération de recuit isotherme détaillée des paramètres photovoltaïques dans les cellules solaires n^+P InGaP après une irradiation électronique de 1 MeV. La corrélation des caractéristiques des cellules solaires avec les modifications des données de spectroscopie transitoire de niveau profond observées dans les diodes et cellules solaires n^+P InGaP irradiées et recuites montre que le H2 ($E_v + 0.50$) et H3 ($E_v + 0.76$ eV).

Irradiation électronique de 1 MeV avec $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ influence de l'électron montre les paramètres suivants :

Défauts	Niveau énergétique $E_a(eV)$	Concentrations $N_T(cm^{-3})$	$\sigma_{\infty}(cm^2)$	$\eta (cm^{-1})$
H1	0.20	$6,8.10^{14}cm^{-3}$	$3,1.10^{-17}$	0.02
H2	0.50-0.55	$2,8.10^{15}cm^{-3}$	$4,2.10^{-16}$	0.05
H3	0.71-0.76	$2,82.10^{15}cm^{-3}$	$5,2.10^{-16}$	0.04
E1	0.20-0.29	$3,1.10^{15}cm^{-3}$	$9,9.10^{-16}$	0.05
E2	0.36	$3,9.10^{15}cm^{-3}$	$3,3.10^{-17}$	0.14
E3	0.72	$5,1.10^{15}cm^{-3}$	$2,5.10^{-17}$	0.20

Tab I.4 Paramètres électriques mesurés des défauts induits par les électrons de 1 MeV

Ils notent également que la réponse spectrale du gallium s'étend de 370 à 650 nm[9] comme le montre cette Figure suivant :

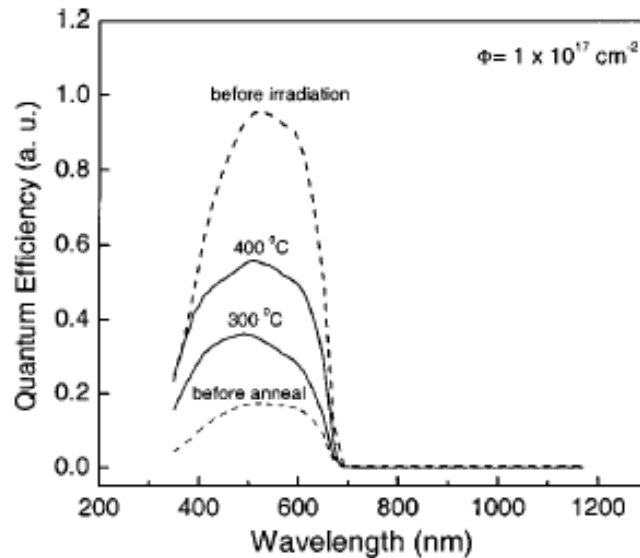


Fig I.22 Réponse spectral de n^+P InGaP avec $1.10^{17} cm^{-2}$ influence de l'électron [9]

En 20 juillet 2018, M.Heiniet autre [10] Ils ont étudié certaines des caractéristiques externes de la cellule solaire multi jonction GaInP/GaInAs/Ge après l'irradiation à électron de 1MeV.

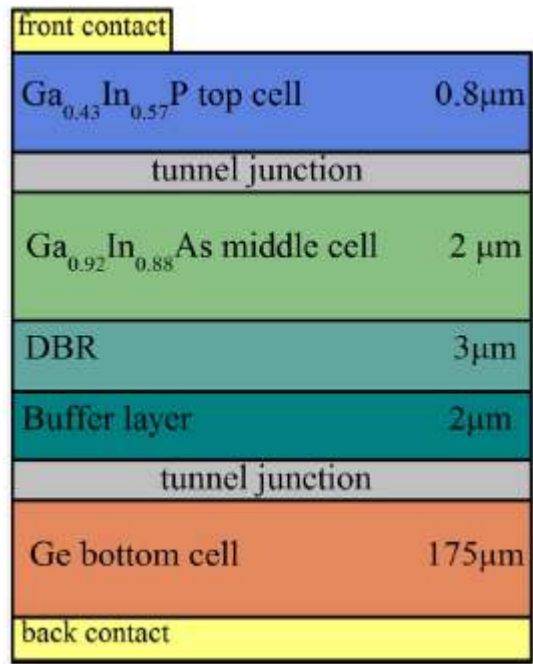


Fig I.23 Structure de la cellule solaire multijonction GaInP/GaInAs/Ge [10]

Parmi les caractéristiques les plus importantes qu'ils ont extraites la réponse spectral de Chaque composée Comme le montre la figure ci-dessous :

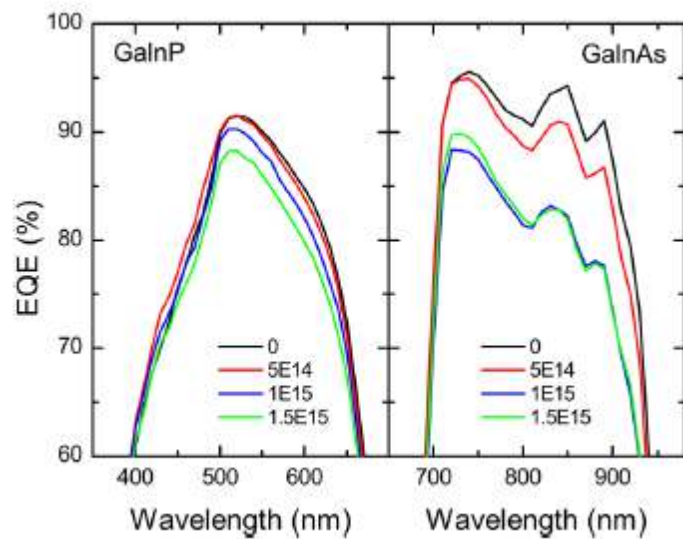


Fig I.24 La dégradation de rendement des sous-cellules supérieures en GaInP et intermédiaires en InGaAs de la cellule solaire irradiée par un électron de 1 MeV [10]

GaInP couvre entre 380 et 680 nm.

En 19 novembre 2019 M.Gang Yan et autre [12] ils ont étudié l'analyse de la dégradation de la tension ouvert V_{oc} des sous-cellules dans les cellules solaires spatiales GaInP/GaAs/Ge irradiées par des électrons de 1MEV comme le montre le *Tab I.5*:

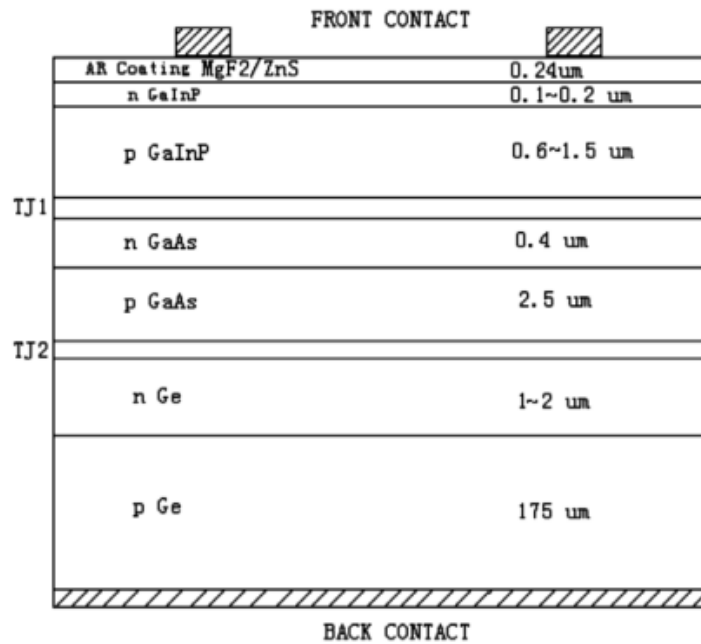


Fig I.25 Structure de la cellule solaire multijonction GaInP/GaAs/Ge utilisée dans cette étude [11]

sous-cellule	Electron influence(cm^{-2})	$\Delta V_{oc}(mv)$
GaInP	3.10^{13}	3.33
	1.10^{14}	10.01
	5.10^{14}	38.20
	1.10^{15}	71.25

Tab I.5 Valeurs de dégradation de la tension ouvert V_{oc} de la sous-cellule GaInP

Après toutes les études menées sur les structures de GaInP qui ont prouvé la présence d'un groupe de pièges dans son Énergie gap après l'irradiation de 1Mev on a appuyé sur cette structure suivant de M. Ahmed Belkhdim et Ali Cheknane qu'ils ont étudié en 2018[13] pour faire nos études de simulation numérique sur les défauts précédemment obtenues.

Window	n+	AlGaAs	5e+019 /cm ³	0.01 um
Emitter	N	InGaP	4.64e+017 /cm ³	0.17 um
Base	P	InGaP	1e+017 /cm ³	0.63 um
BSF	p+	InGaP	5e+019 /cm ³	0.01 um
Buffer	p+	AlGaAs	1e+018 /cm ³	0.03 um

Fig I.26 Structure optimisée de la cellule solaire InGaP [13]

La réponse spectrale d'une cellule solaire InGaP :

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g(\text{ev})} \quad (\text{I.1})$$

Avec $E_g=1.88 \approx 1.9$

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{1.9} = 0.652 \mu\text{m} \quad (\text{I.2})$$

Et les Paramètres externes obtenues après l'étude de la structure précédente (**Fig I.13**) sont:

- Courant de court circuit(Jsc) :0.0148A /cm²
- Tension de court circuit(Voc) :1.4096 V
- Puissance maximal(Pmax) :0.0185 W
- Facteur de forme(FF) :0.8867
- Rendement=18.55%

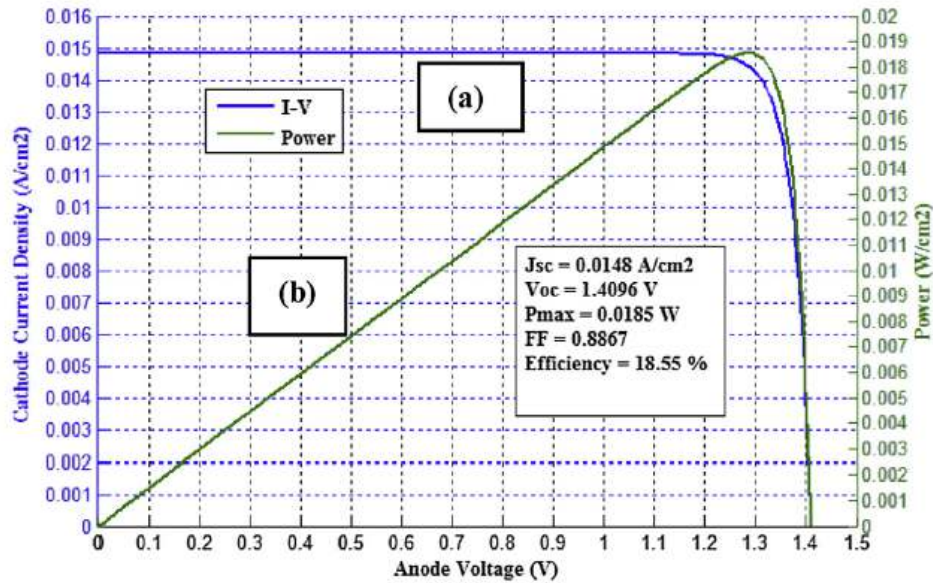


Fig I.27 Tracés simulés pour I-V Courbe (a) et P-V courbe (b) pour la cellule solaire InGaP optimisée [13]

Tous les chercheurs prouvent que l'irradiation d'une cellule solaire à base de GaInP par des électrons 1MeV, crée 3 pièges pour les électrons E1,E2,E3 et 3 pour les trous H1,H2,H3.Ce sont les pièges que nous allons simuler en les incluant à l'intérieur de la cellule afin de connaître leur effet sur les paramètres externe de la cellule solaire.

I.8 La spectroscopie transitoire de niveau profond

La spectroscopie transitoire de niveau profond (DLTS : *Deep-level transient spectroscopy*) est un outil expérimental pour étudier les défauts électriquement actifs (appelés pièges à porteurs de charge) dans les semi-conducteurs. DLTS établit les paramètres de défaut fondamentaux et mesure leur concentration dans le matériau. Certains paramètres sont considérés comme des « empreintes digitales » de défaut utilisées pour leur identification et leur analyse. La technique DLTS a une sensibilité plus élevée que presque toutes les autres techniques de diagnostic des semi-conducteurs. Par exemple, dans le silicium, il peut détecter des impuretés et des défauts à une concentration d'une partie sur 10^{12} des atomes hôtes du matériau [3]. Cette caractéristique, associée à la simplicité technique de sa conception, l'a rendu très populaire dans les laboratoires de recherche et les usines de production de matériaux semi-conducteurs. La technique DLTS a été mise au point par David Vern Lang aux laboratoires Bell en 1974[3].

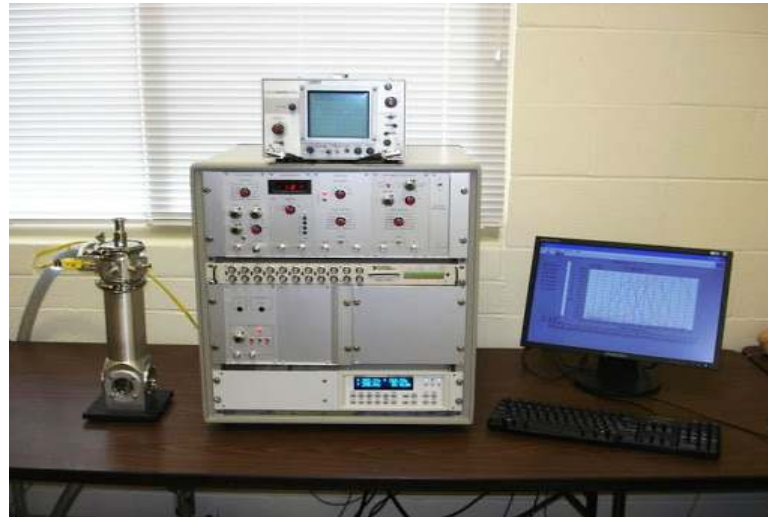


Figure I.28 : Instrument de DLTS (Deep-level transient spectroscopy)

I.9 Différentes types de recombinaison

La durée de vie des porteurs est un paramètre électronique très important. D'une part pour évaluer la qualité cristalline des semi-conducteurs et d'autre part pour déterminer le comportement des composants électroniques.

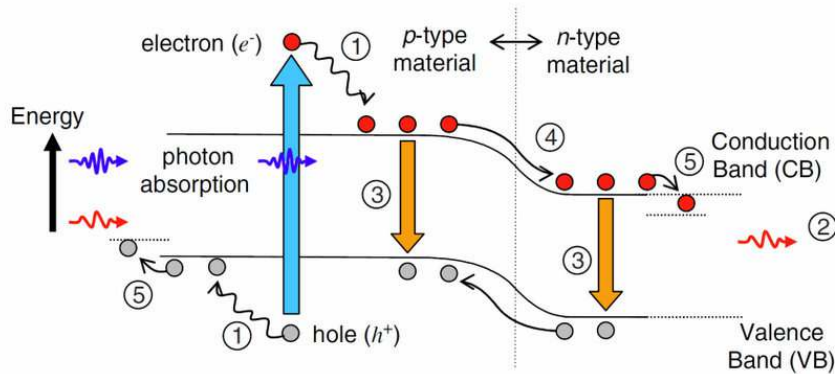


Fig I.29 Processus de perte énergétique dans une cellule photovoltaïque

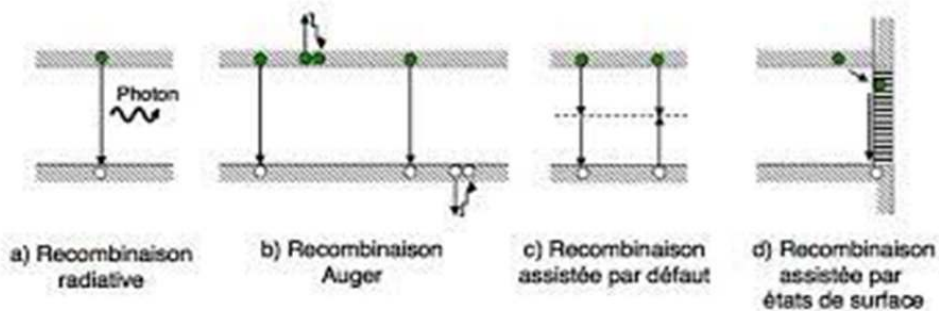


Fig I.30 Différentes types de recombinaisons.

I.9.1 Recombinaison radiative

Un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou de la bande de valence en émettant un photon le taux de recombinaison radiative est donne par :

$$R_r = B_r \cdot (N + \Delta n) + (P + \Delta p) \tag{I.3}$$

En tenant compte la relation de neutralité ($\Delta n = \Delta p$) en peut écrire sous la forme suivante :

$$R_r = B_r \cdot \Delta n \cdot (N + P + \Delta n) \tag{I.4}$$

Le taux de recombinaison radiative peut aussi être exprimé par la relation suivante :

$$R_r = \frac{\Delta n}{\tau_r} \tag{I.5}$$

D'après les relations (II.4) et (II.5) la durée de vie radiative est inversement proportionnelle à la densité totale des porteurs :

$$\tau_r = \frac{1}{B_r \cdot \Delta n \cdot (N + P + \Delta n)} \tag{I.6}$$

N et P sont les concentrations de dopage de type n et p Respectivement.

Δn et Δp sont les concentrations d'électrons et trous Respectivement.

τ_r est la durée de vie des recombinaisons radiatives.

I.9.2 Recombinaison Shockley- Read-Hall (SRH)

Les defaults dans les semi-conducteurs sont à l'origine de la présence de niveaux profonds dans la bande interdite, Selon le modèle Shockley-Read-Hall (SRH) qu'a été introduit en 1952[42] pour décrire les statistiques de recombinaison et de génération de trous et d'électrons dans les semi-conducteurs. Grâce au mécanisme de piégeage. Le transfert d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction est appelé la génération de paires électron-trou et le processus inverse est appelé recombinaison de paires d'électron-trou.

Le taux de Recombinaison SRH des porteurs dans le volume s'écrit :

$$R_{SRH} = \frac{V_{th} \cdot \sigma_n \cdot \sigma_p \cdot N_T [(N + \Delta n) \cdot (P + \Delta p) - n_i^2]}{\sigma_p \cdot \left(P + \Delta p + n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_T)}{KT}} \right) + \sigma_n \cdot \left(N + \Delta n + n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_T)}{KT}} \right)} \tag{I.7}$$

N et P sont les concentrations de dopage de type n et p Respectivement.

Δn et Δp sont les concentrations d'électrons et trous Respectivement.

V_{th} Est la vitesse thermique des porteurs (cm. s⁻¹)

σ_n Est la section efficace de capteur pour les électrons (cm²)

σ_p Est la section efficace de capteur pour les trous (cm²)

N_T Est la densité des centres de recombinants (cm⁻³)

n_i Est la densité intrinsèque des porteurs dans le matériau (cm⁻³)

E_T Est le niveau énergie introduit par les defaults (ev)

E_f Est le niveau de fermi intrinsèque (ev)

D'après la relation : $R_{SRH} = \frac{\Delta n}{\tau_{SRH}}$ l'expression de la durée de vie τ_{SRH} s'écrit :

$$\tau_{SRH} = \frac{1}{V_{th}\sigma_p N_T} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \cdot \frac{\frac{\Delta n}{N}}{1 + \frac{\Delta n}{N}} \right) \quad (I.8)$$

La durée de vie de Shockley-Read-Hall τ_{SRH} est inversement proportionnelle à la densité des centre de recombinaisons non-radiative N_T . Le type de recombinaison non radiative SRH est dominant dans la plupart des semi-conducteurs et particulièrement important dans le cas des semi-conducteurs à gap indirect.

I.9.3 Recombinaison Auger

La Recombinaison Auger est un processus de recombinaison bande a bande. Dans ce processus l'énergie libérée par la recombinaison d'un électron trou n'est pas émise sous forme d'un photon comme le cas de la recombinaison radiative mais elle est transmise à un autre porteur pour être transféré à un niveau énergétique plus élevée. Le taux total de la recombinaison Auger est donne par Takeshima :

$$R_a = C_n \cdot P \cdot n^2 + C_p \cdot n \cdot p^2 \quad (I.9)$$

C_n et C_p sont les coefficients de recombinaisons Auger des trous et des électrons respectivement (cm⁶.s⁻¹)

n et p sont les densités total des électrons et des trous cm⁻³

D'après la relation $R_A = \frac{\Delta n}{\tau_A}$ l'expression de la durée de vie s'écrit :

$$\tau_A = \frac{\Delta n}{C_n \cdot P \cdot n^2 + C_p \cdot n \cdot p^2} \quad (I.10)$$

I.9.4 Recombinaison en surface

La discontinuité des liaisons atomique et l'absorption d'atome étrangers entraînent l'apparition d'un grand nombre d'états d'énergie localisée et donc de centres de recombinaison non radiative à la surface d'un semi-conducteur. La recombinaison en surface est un paramètre important puisque la majorité des porteurs excédentaires sont générés près de la surface. Le taux de recombinaison a la surface pour un type de centre recombinaison non radiative s'écrit :

$$R_S = \frac{V_{th} \cdot \sigma_n \cdot \sigma_p \cdot N_{st} (p_s \cdot n_s - n_i^2)}{\sigma_p \cdot \left(p_s + n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_T)}{KT}} \right) + \sigma_n \cdot \left(n_s + n_i \cdot e^{\frac{(E_i - E_T)}{KT}} \right)} \quad (I.11)$$

n_s et p_s sont les concentrations des électrons et des trous proches de la surface (cm^{-3})

N_{st} est la densité des centres de recombinaisons par unité de surface (cm^{-3})

R_S est le taux de recombinaison à la surface ($\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

I.10 Conclusion

L'espace est un environnement complexe qui nécessite un travail avec des technologies avancées. Ces technologies spatiales comprennent les satellites, Mais il existe de nombreux dangers dans l'espace qui planent autour des satellites, ce qui affecte négativement sur les performances de leurs tâches et parmi ces dangers les défauts créés par irradiation à électron.

Chapitre II
Simulation de la cellule
solaire en présence des
défauts

II.1 Introduction

La simulation numérique des cellules solaires est un outil d'analyse et d'étude incontournable pour le développement de la technologie photovoltaïque. Elle permet de prédire les comportements et les performances des cellules solaires avant leur fabrication et de visualiser des phénomènes physiques difficilement observables intervenant dans le fonctionnement du composant, tels que les phénomènes de photo-génération et de recombinaison des porteurs de charges. Elle est aussi indépendante de la technologie utilisée, car on peut varier largement les paramètres comme on peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètre indépendant tel que la mobilité, la longueur de diffusion et la durée de vie.

En outre, la modélisation et la simulation numérique des cellules solaires permettent de réduire considérablement les cycles d'élaboration, de définir des objectifs technologiques précis afin de minimiser les coûts de développement. Pour ce faire, il est très important que les modèles Physiques utilisés, soient les plus réalistes possibles. Ces modèles doivent donc rigoureusement reposer sur des paramètres expérimentaux réels.

Dans ce chapitre, on va simuler une cellule solaire à base de GaInP avec l'inclusion des défauts d'électrons et trous résultant d'irradiation à électron de 1MeV que nous avons mentionné dans le chapitre I, afin de connaître l'influence de ces défauts sur les caractéristiques externes de la cellule solaire Et l'étendue de sa résistance face à la présence des pièges. Pour cela nous avons besoin d'outils numérique, les logiciels les plus utilisée pour une telle simulation numérique sont PC1D, TCAD-SILVACO et ComsolMultiphysics et beaucoup d'autre. Pour nous utiliserons ComsolMultiphysique.

II.2 Équations indispensables

Pour analyser tous les phénomènes (transport, création, recombinaison....) il faut disposer d'un ensemble d'équation décrivant l'évolution des concentrations de porteurs et de la charge électrique.

II.2.1 Équation de continuité

L'équation de continuité est une équation locale valable en chaque point du semi-conducteur et à chaque instant, elle s'écrit pour les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = +\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + g_n + r_n \quad (\text{II.1})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + g_p + r_p \quad (\text{II.2})$$

n = concentration des électrons libre dans la bande de conduction.

p =concentration des trous libres dans la bande de valence.

q =charge électrique.

J_n et J_p = Densité de courant d'électrons et trous respectivement.

g_n et g_p = Taux de génération des électrons et des trous respectivement.

r_n et r_p = Taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement.

II.2.2 Équation de transport

Le déplacement des porteurs de charges se fait soit sous l'effet d'un champ électrique soit sous l'action d'un gradient de concentration de porteurs de charges. Sous l'action d'un champ électrique, on a un courant appelé courant de dérive (ou courant de conduction) proportionnel au champ électrique, défini par la relation suivante :

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \vec{E} \quad (II.3)$$

$$\vec{J}_p = n \cdot q \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \quad (II.4)$$

\vec{E} : Le champ électrique

μ_n et μ_p : Les mobilités respectivement des électrons et des trous

Sous l'action d'un gradient de la densité des porteurs, le mouvement de ces derniers s'effectue des régions à forte concentration vers les régions à faible concentration. On a un courant qui porte le nom de courant de diffusion :

$$\vec{J}_n = q \cdot D_n \cdot \nabla_n \quad (II.5)$$

$$\vec{J}_p = -q \cdot D_p \cdot \nabla_p \quad (II.6)$$

D_n et D_p Sont les constantes de diffusion des électrons et des trous. Elles sont définies par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \mu_n \quad (II.7)$$

$$D_p = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \mu_p \quad (II.8)$$

k_B : La constante de Boltzmann.

T : la température.

En faisant la somme de ces deux types de courants (courant de dérive et diffusion) on obtient :

$$\vec{J}_n = n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + q \cdot D_n \cdot \nabla_n \quad (II.9)$$

$$\vec{J}_p = n \cdot q \cdot \mu_p \cdot \vec{E} - q \cdot D_p \cdot \nabla_p \quad (\text{II.10})$$

II.2.3 Équation de Poisson

L'équation de Poisson permet d'établir un rapport entre les variations du potentiel électrostatique et la densité volumique de charge électrique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad (\text{II.11})$$

Où ϵ désigne la permittivité absolue du matériau, qui peut être exprimée par le produit de sa permittivité relative multipliée par la permittivité du vide $\epsilon_0 \times \epsilon_r$. ρ est la densité volumique de charge, elle se calcule en tenant compte de toutes les charges qui existent en un point du semi-conducteur (électrons, trous, charges fixes, impuretés ionisées).

Le champ électrique est obtenu à partir du potentiel électrique par la relation suivante :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} \Phi \quad (\text{II.12})$$

II.3 Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics est une plate-forme logicielle générale qui autorise la modélisation et la simulation des phénomènes physiques à l'aide de méthodes numériques avancées (les éléments finis). COMSOL Multiphysics permet de coupler des physiques "simples" ou d'étudier des phénomènes multiphysiques. Pour étendre les simulations possibles, COMSOL Multiphysics comprend plus de 30 modules [45] complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluide et chimique.

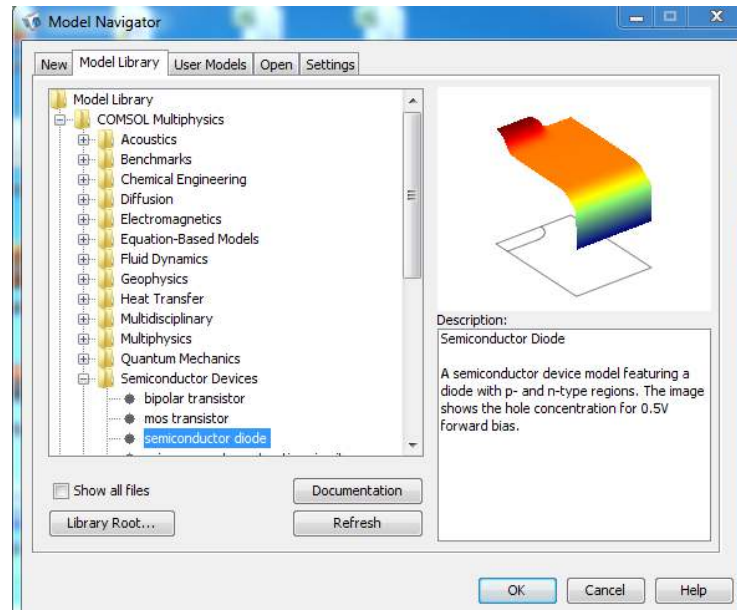


Figure II.1 Logiciel comsol3.5a Multiphysics

II.4 Simulation de la cellule solaire sous Comsol Multiphysics

Une cellule solaire de jonction NiP à base de $GaInP$ est modélisée sous Comsol Multiphysique. L'épaisseur de la région de type P est de $6 \mu m$ avec $10 \mu m$ de la largeur, et celle de la région de type N est de $1 \mu m$ d'épaisseur et la largeur de ce dernier est $6 \mu m$. La concentration des accepteurs N_a et des donneur N_d sont $1.10^{17} cm^{-3}$ et $4.68.10^{17} cm^{-3}$ respectivement.

Le tableau suivant regroupe tous les paramètres du $GaInP$ liés à la structure simulée :

Paramètre	Valeur
Energie Gap, E_g	1.88 eV
Permittivité relative, ϵ_{PS}	12.05
Densité effective d'états dans la bande de conduction, N_c	$1,47.10^{19} cm^{-3}$
Densité effective d'états dans la bande de Valence, N_v	$1,34.10^{19} cm^{-3}$
Mobilité des électrons, μ_n	$400 cm^2/v. sec$
Mobilité des trous, μ_p	$40 cm^2/v. sec$
Affinité des électrons, A_E	4.00 eV
Concentration intrinsèque des porteurs n_i	$3.10^2 cm^{-3}$

vitesse thermique de l'électron et du trou V_{th}	1.10^6 cm/s
Coefficient de réflexion r	0.37
Dopage maximal de type p	$1e17 [1/\text{cm}^3]$
Couche de dérive dopage de type N	$1e15 [1/\text{cm}^3]$
Dopage maximal de type n	$4.68e17 [1/\text{cm}^3]$
Permittivité ϵ	12.05
Coefficient de diffusion des électrons D_n	$0.001034 \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficient de diffusion des trous D_p	$1.033708 \text{ m}^2/\text{s}$

Tab II.1 : Les paramètres de GaInP

La maille à 12072 éléments.

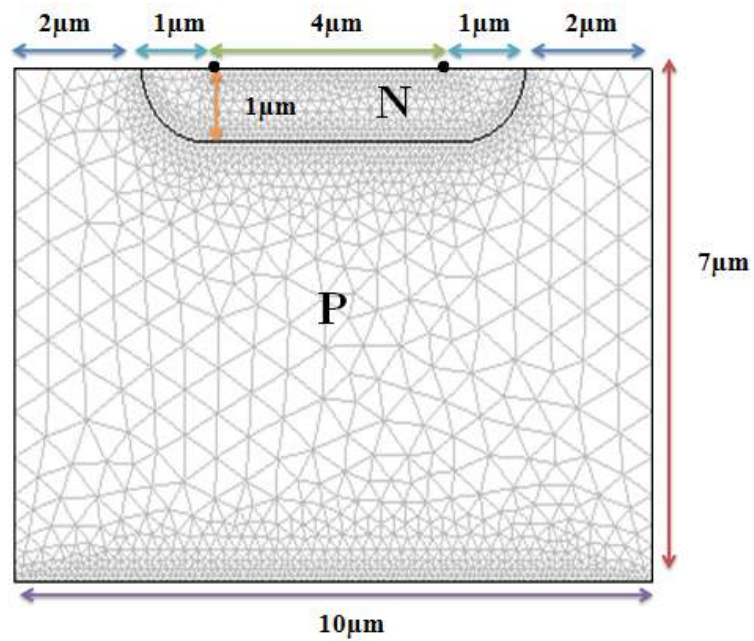


Fig III.2 Maillage et dimensions de la jonction NiP modélisée.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la jonction NiP de la cellule solaire GaInP avec ces dimensions que nous avons simulé par logiciel de comsol 3.5a et nous avons également mentionné tous les équations et paramètres utilisés dans cette simulation.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

La cellule solaire GaInP est caractérisée par plusieurs pièges produits par irradiation à électron de 1MeV qui sont E1, E2, E3, H1, H2, et H3, et qui affecte négativement sur les paramètres externes de la cellule solaire.

III.2 Avant irradiations à électrons

La simulation numérique est d'abord réalisée sans irradiations à électrons, comme un cas de référence. Les caractéristiques I-V et P-V sont représentés sur les figures III.1 et III.2 respectivement.

La densité de courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement avant irradiation sont 23.27mA/cm², 0.73 V, 0,81 et 13.83% respectivement.

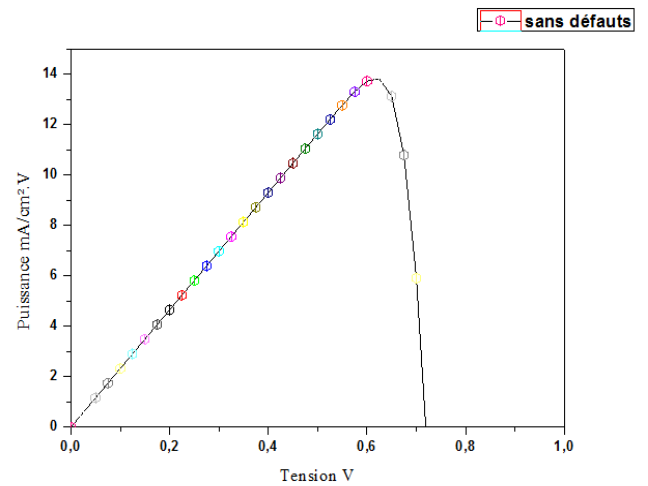
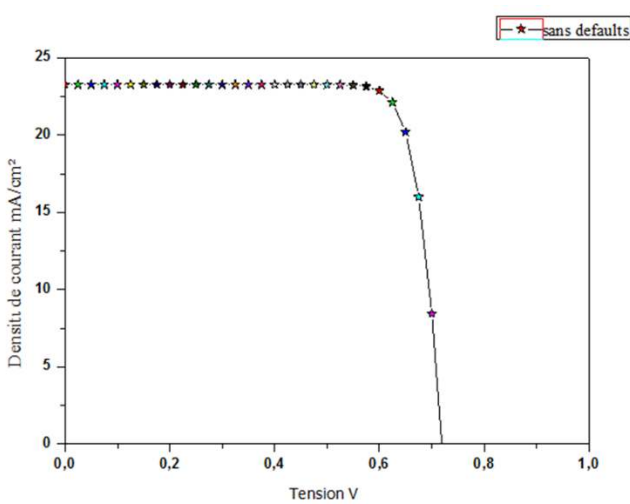


Fig III.1 Caractéristique I-V avant irradiations

Fig III.2 Caractéristique P-V avant irradiations

Afin de confirmer la validité de notre modèle, les résultats obtenue ont été comparais a des résultats de références [43], le tableau III.1présentes ces comparaisons.

Paramètre	I_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (V)	η (%)	FF
Cellule solaire simulé	23.27	0.73	13,83	0.81
Référence [43]	28.3	1.02	17.10	0.80

Tab III.1 Comparaison les paramètres de la cellule solaire sans défauts

Les résultats obtenus sont assez cohérents et proches. Où nous allons maintenant l'exposer par Irradiation à électron de 1MeV

III.3Après irradiations à électrons

Le Tab III.2 montre les paramètres I_{cc} , V_{oc} , η et FF de la cellule GaInP sans et avec défauts.

Paramètre	I_{cc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η (%)	FF
Cellule solaire simulé	23.27	0.73	13,83	0.81
H1+H2+H3+ E1+E2+E3	21.02	0.72	12.42	0.80

Tab III.2 Les paramètres externes avant et après l'irradiation

Les figures III.3 et III.4 représentent les variations des paramètres de la cellule solaire avant et après l'apparition des pièges. On remarque une diminution de la valeur de la densité de courant court-circuit et la puissance maximal de 23.27 à 21.02 mA /cm² et de 13.83 à 12.42 (mA /cm²) Respectivement. La tension ouvert presque même valeur une faible chute de 0.1V.

Cette diminution des paramètres externes de la cellule est due aux s defaults c'est un résultat évidence à propos de ce que nous avons expliqué plus tôt. Cela dépend de la concentration des pièges et leur emplacement dans la bande interdite.

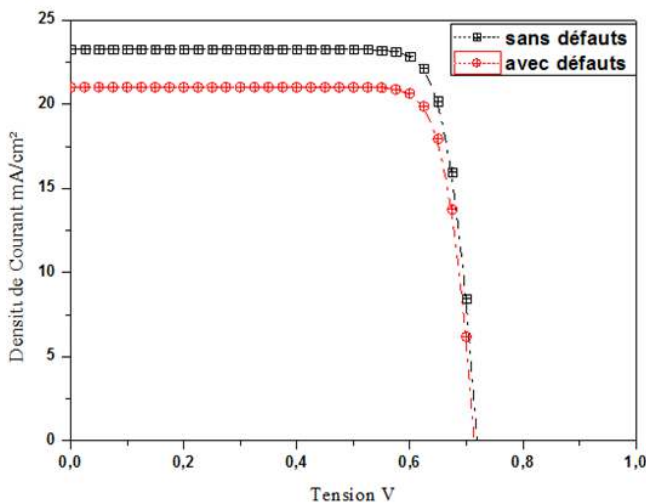


Fig III.3 Caractéristique I-V avant et après irradiation

à électrons

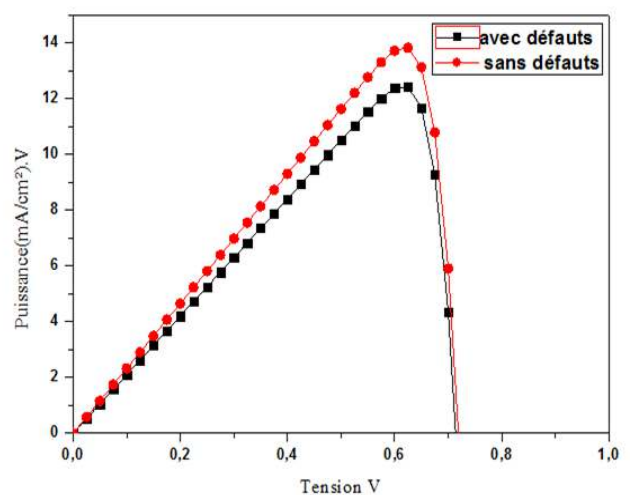


Fig III.4 Caractéristique P-V avant et

après irradiation à électrons

IV.4 Influence des pièges à électrons sur les paramètres externes

Cette partie consiste à étudier l'influence des irradiations à électrons sur les paramètres de la cellule solaire à base de GaInP.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tab III.3 :

Paramètre	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	η (%)	FF
E1	22.77	0.72	13.52	0.83
E2	22.84	0.73	13.56	0.81
E3	22.85	0.73	13.57	0.81

Tab III.3 Paramètres de la cellule solaire après les défauts à électrons

La figure III.3 représente les caractéristiques I-V de la cellule solaire en présence des défauts E1, E2 et E3.

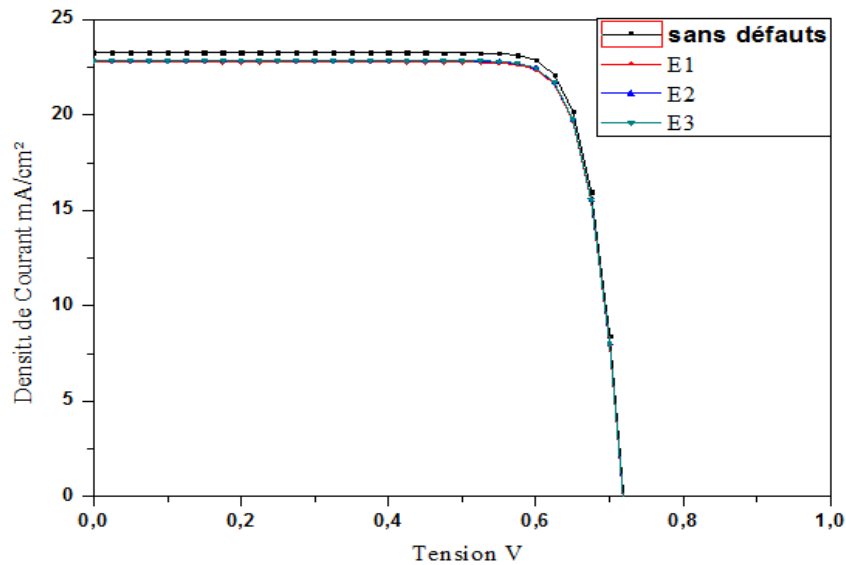


Fig III.5 Caractéristique I-V après irradiations (en présence des défauts à électrons)

Le défaut E1 (E_c+0.20-0.29eV) avec sa concentration de $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, est le défaut le plus influent sur les paramètres de la cellule solaire par rapport aux autres défauts E2 et E3. La valeur de la densité de courant de court-circuit diminue de 23.27 à 22.67 mA/cm² et celle du rendement de 13.83 à 13.52 %. Cette diminution peut être expliquée par la position d'E1 près de la bande de conduction. Par contre la tension à circuit ouvert reste presque inchangée.

III.5 Influence des pièges à trous sur les paramètres externes

Dans ce tableau, nous mettrons en évidence les changements les plus importants au niveau des paramètres externes de la cellule solaire à cause des pièges à trous.

Paramètre	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	η (%)	FF
H1	22.65	0.72	13.44	0.82
H2	22.74	0.73	13.50	0.81
H3	22.74	0.73	13.50	0.81

Tab III.4 Les paramètres de la cellule solaire après les défauts à trous

Le défaut H1 (E_v+0.20) eV c'est le défaut le plus influence Ceci est vérifié à l'emplacement du piège près de la bande de valence.

La Fig III.4 définir les changements de caractéristiques I-V de la cellule solaire en présences des défauts à trous.

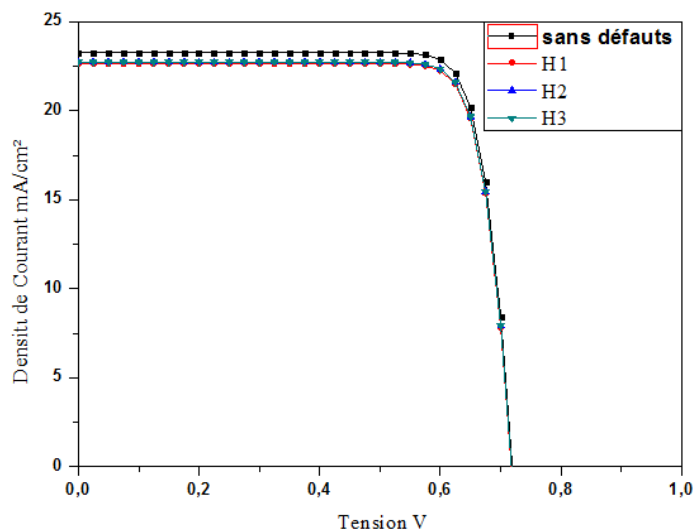


Fig III.6 Caractéristique I-V après irradiations (en présence des défauts à trous)

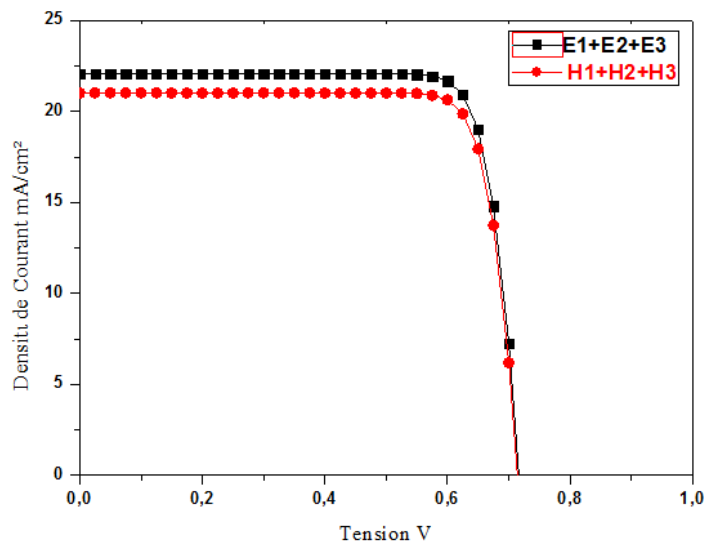
III.6 Comparaisons

Le tableau suivant constitue comparaisons entre les pièges à électrons et à trous afin de définir le type de défauts qui influe plus sur les paramètres externes de la cellule solaire en GaInP.

Paramètre	I _{cc} (mA/cm ²)	V _{co} (V)	η (%)	FF
E1+E2+E3	22.08	0.73	13.08	0.81
H1+H2+H3	21.02	0.73	12.42	0.80

Tab III.5 L'influence des pièges à électrons et trous sur les paramètres externes

La figure III.5 présente une comparaison de la caractéristique I-V en présence des défauts d'électrons et trous.



FigIV.7 Caractéristique I-V en présence des défauts à électrons et trous

Les pièges à trous plus influent par rapport à électrons Ceci est de voir la présence d'une grande concentration des pièges à trous dans la bande interdite.

IV.7 conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude des effets des irradiations d'électrons de 1MeV sur les paramètres externes d'une cellule solaire à base de GaInP de structure NiP. Nous avons tracé les caractéristiques I-V et P-V de la cellule solaire en présence des défauts créés par irradiations. Ces défauts affectent négativement les paramètres externes de la cellule solaire. D'après les résultats obtenus par la simulation numérique, la cellule solaire est plus sensible aux défauts à trous qu'aux défauts à électrons.

Conclusion Général

Conclusion

Les objets spatiaux évoluent dans un environnement très hostile. Passé le cap difficile du lancement, ils sont exposés au vide spatial, à de forts contrastes de température, à des flux de particules et à des rayonnements nocifs. Par conséquent, toutes les applications spatiales utilisent des panneaux solaires fabriqués à base des matériaux III.V tel que GaAs et GaInP Grâce à ses nombreux avantages, parmi les quels ils sont robustes et ont une bande interdite directe.

L'objectif de notre travail est l'étude et la simulation de l'influence des irradiations à électrons de 1MeV et les changements au niveau des paramètres externes d'une cellule solaire à base de GaInP.

Dans Le premier chapitre Nous avons fait une description générale sur l'environnement spatial et satellites et ce qu'il contient des diverses orbites qui nous entourent ainsi que des particules et des rayons du soleil et aussi on a parlé sur les différentes études et simulation réalisés ces dernières années par des chercheurs sur les défauts introduire après l'irradiation à électrons de 1MeV et les changements de paramètres externes.

Le deuxième chapitre consiste une simulation par comsol aux effets des irradiations à électrons de 1MeV pour un flux de $3.10^{16}e/cm^2$ sur une cellule solaire à base de GaInP. Enfin on a montrée tous les paramètres et équations utilisée dans la simulation.

Dans le dernier chapitre nous avons analysé et discuter les résultats obtenues. L'influence des défauts électrons et trous sur les paramètres externes de la cellule solaire densité de courant, tension, la puissance et le facteur de forme. Les résultats que nous avons obtenus nous ont montré que les pièges à trous plus influent par rapport les défauts à électrons À cause d'eux, il y a eu une dégradation de densité du courant court circuit I/S et le rendement de 23.27 à 21.02 mA /cm² et de 13.83 à 12.42 %

En perspective, on souhaite dans le future de développer ce travail afin de minimiser l'influence des irradiations sur les paramètres externes de la cellule solaire dans l'espace.

Références Bibliographiques

- [1] R.DECOURT. Futura sciences, télescope spatial Hubble, 2009.
- [2] A.KHAN, M.YAMAGUCHI, N.DHARMASO, J.BOURGOIN, K. ANDO and T.TAKAMOTO. Deep Level Transient Spectroscopy Analysis of 10 MeV Proton and 1 MeV Electron Irradiation-Induced Defects in p-InGaP and InGaP-based Solar Cells, 2001.
- [3] Lang, D. V. (1974). "Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors". *Journal of Applied Physics*. AIP Publishing. 45 (7): 3023–3032. ISSN 0021-8979.
- [4] IOFFE Physico-Technical Institute Nouveaux matériaux semi-conducteurs. Caractéristiques et propriétés 1998-2001.
- [5] E.T. Mohamed, Ali O.M.Maka, M.Mehmood, A.M. Direedar et N.Amin Performance simulation of single and dual-Junction GaInP/GaAs tandem Solar cells using AMPS-1D vol 44, April 2021.
- [6] A.KHAN, M.YAMAGUCHI, J.C.BOURGOIN and T.TAKAMOTO Fundamental Understanding of Radiation-Induced Defects in n^+P InGaP Solar Cells, 2000.
- [7] A. Khan, M. Yamaguchi. J.C. Bourgoin, N. de Angelis and T. Takamoto, *Appl. Phys. Left.* 76, 2000, pp. 2559.
- [8] A.KHAN, M.YAMAGUCHI, J.C.BOURGOIN and T.TAKAMOTO Thermal annealing study of 1 MeV electron-irradiation-induced defects in n^+P InGaP diodes and solar cells, *Journal of Applied Physics* vol 91, Number 4, 2002.
- [9] M. Meusel, C. Baur, G. Létay, A.W. Bett, W. Warta and E. Fernandez Spectral Response Measurements of Monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge Triple-Junction Solar Cells: Measurement Artifacts and their Explanation *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 11:499–514, 2003.
- [10] M. Heini, A. Aierken, Z. H. Li, X. F. Zhao, M. Sailai, X. B. Shen, Y. Xu, H. T. Liu, Y. D. Li, Q. Guo, and C. M. Liu Changes in output parameters of 1 MeV electron irradiated upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple junction solar cell *AIP ADVANCES* 8, 2018.
- [11] W.Rong, L.Yunhong, S.Xufang Effects of 0.28–2.80 MeV proton irradiation on GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells for space use *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266, 2008.
- [12] G.Yan, J.L.Wang, J.Liu, Y-yu.Liu, R.Wu, R.Wang Electroluminescence analysis of VOC degradation of individual subcell in GaInP/GaAs/Ge space solar cells irradiated by 1.0 MeV electrons *Journal of Luminescence LUMIN* 116905, 2019.

- [13] A.Benlekhdim, A. Cheknane, L. Sfaxi et H.S. Hilal Efficiency improvement of single-junction InGaP solar cells by advanced photovoltaic device modeling *Optik* 163,8–15,2018.
- [14] <https://ouisol.com> › Histoire et fonctionnement de la cellule photovoltaïque ,2012.
- [15] Techniques de l'Ingénieur - Nanostructures pour cellules photovoltaïques inorganiques, 2004.
- [16] N.A.Schwadrone et al. Space Weather, Athéna-magazine Exposition aux rayonnements cosmiques galactiques: ça craint, 2018.
- [17] Parlons sciences, Physique Sciences spatiales, L'Univers,2019.
- [18] V.Maendly, Tribune de Genève Une mégatempête solaire fait disjoncter les télégraphes, 2020.
- [19] Peter Ried, les-aurores-boreales Le champ magnétique terrestre, 2009.
- [20] M.Moisan and J. Pelletier, Plasmas collisionnels Physique des décharges RF et micro-onde, 2014.
- [21] Musée de Sismologie et collections de Géophysique - Jardins de l'Université – Strasbourg, 2012.
- [22] Revue Physical Review Letters, les travaux de chercheurs du Laboratoire de physique des plasmas (LPP) ,2018.
- [23] A.Khalatbari, Magazine Sciences et Avenir, 2014.
- [24] I. ELKASSIR emse.fr, Bouchardon-enseignement processus-naturels, 2006.
- [25] M. Capderou, satellite orbite et mission, Edition springer-Verlag France, 2003.
- [26] Pline, Creative Commons, 2009.
- [27] O.Defonte, Contributions de l'automatique et du traitement du signal à la navigation autonome en orbite géostationnaire, Thèse de doctorat de l'université de Nice, 1990.
- [28] Zarp, Creative Commons, 2014.
- [29] Ian F.Akyildiz, H.Uzunlio and M.D. Bender Hand over management in Low Earth Orbit (LEO) satellite networks, *App* 4, 1990.
- [30] <http://meteosat.pessac.free.fr/esil.univ-mrs.P98>, 2005.
- [31] M.Laas-Bourez, Détection des satellites artificiels dans les images astronomiques : application aux images TAROT, Thèse de doctorat de l'université Aix Marseille, 2009.
- [32] E. Ashurkov, V. Bartenev, E. Korchagin, K Malyshev, V. Shilov, V. Evenov Satellite Communication Systems with the Use of Long-Duration Satellites Intended for Operation in Highly Elliptical Orbit, *Sovetskoe radio-* 232p,1974.
- [33] H. Helvajian, S.Janson Small Satellites: Past, Present, and Future ISBN 978-1-884989-22-3, 2009.
- [34] M.Bellis, ThoughtCo.com Histoire et définition d'une cellule solaire-1992435,2009.

- [35] Scientific findings from Explorer 6, NASA, SP-54, Wash, D.C, 1965.
- [36] B. Granath, Kennedy Space Center, NASA History, Space Tech Telstar Opened Era of Global Satellite Television, 2012.
- [37] J. S. Mayo, H. Mann, F. J. Witt, D. S. Peck, H. K. Gummel, W. L. Brown, The Command System Malfunction of the Telstar Satellite Bell System Technical Journal Vol 42, Pages 1631-1657, 1963.
- [38] W.P. Nordberg, NASA's Science Communication Support Office Annual Report, 2017.
- [39] W.J. Boulton, La détermination et l'analyse de l'orbite de NIMBUS 1 fusée, 1964-52B : Variations de l'inclinaison orbitale Planetary and Space Science Volume 33, Issue 8, pages 965-982, 1985.
- [40] Nasa Gunter's Space Page, 1966.
- [41] A.K. Hyder, a Century of Aerospace Electrical Power Technology, Journal of Propulsion and Power, Vol 19, No 6, 2012.
- [42] J.D. Murphy, K. Bothe, R. Krain, V.V. Voronkov and R. J. Falster Paramétrage des mesures de durée de vie dépendantes de l'injection dans les semi-conducteurs en termes de statistiques Shockley-Read-Hall : une application aux précipités d'oxyde dans le silicium, Journal de physique appliquée Vol 111, Issue 11, 2012.
- [43] P. Bizony NASA Das Archive, 60 Jahre im All Edition Taschen, P56. 2019.
- [44] E.S. Harmon, M. Naydenkov Studies of GaInP based SPAD arrays University of Virginia, V9859, 2017.
- [45] <https://www.comsol.fr/support/updates/comsol35a.setlang=1>
- [46] S.A. Ringel, J.A. Carlin, C. L. Andre, M. K. Hudait¹, M. Gonzalez¹, D. M. Wilt, E. B. Clark, P. Jenkins, D. Scheiman, A. Allerman, E.A. Fitzgerald and C. W. Leitz Single-junction InGaP/GaAs Solar Cells Grown on Si Substrates with SiGe Buffer Layers Journal of Applied Physics, 2002.