

# **Caractérisations optiques de structures photovoltaïques tri-jonction**

**Par**

**Adama Moussa Diallo**

**Mémoire présenté au Département de physique  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)**

**FACULTÉ DES SCIENCES  
UNIVERSITE DE SHERBROOKE**

**Sherbrooke, Québec, Canada, Décembre 2011**



# Sommaire

Les cellules solaires tri-jonction font parties de la troisième génération des technologies photovoltaïques et détiennent actuellement tous les records de rendement énergétique. Cependant elles sont conçues à partir de matériaux III-V et de germanium qui ne bénéficient pas effectivement du savoir-faire de l'industrie de la microélectronique moderne basée essentiellement sur le silicium. Une des problématiques soulevées par nos partenaires industriels (Cyrium Technologies) est la non-uniformité des caractéristiques cristallines de cellules solaires fabriquées sur des gaufres de 100 mm de diamètre. Ils aimeraient pouvoir cerner l'origine de ce problème afin de limiter ultimement le taux de rejet des cellules fabriquées à grande échelle. Pour y parvenir il faudrait bien identifier les différentes raies d'émission des spectres de photoluminescence (technique standard de caractérisation sans contact) et comprendre comment évoluent l'intensité et la longueur d'onde de ces raies d'émission en fonction de la position d'excitation sur une gaufre. Des études en fonction de la densité d'excitation laser, en fonction de la longueur d'onde d'excitation, ainsi qu'en fonction de la température permettent de distinguer les signatures spectrales intrinsèques (émission bande à bande) des couches constituant les cellules solaires et d'analyser la nature des non-uniformités cristallines. Finalement des mesures de photoconductivité permettent d'évaluer l'effet de ces défauts sur le photocourant, par conséquent sur les performances des cellules solaires tri-jonction.

# Remerciements

Pour leurs collaborations, leurs contributions et leur courtoisie, de vives remerciements sont adressés à:

**Denis Morris** : Directeur du présent projet de maîtrise

**Gabriel Laliberté, Michael Lacerte** (Département de physique), **Khalid Moumanis, Artur Turala** (Département de génie électrique et informatique): Soutien technique et professionnel.

**Abdelatif Jaouad, Vincent Aimez** et **Richard Arès**: Professeurs-chercheurs participant au projet SUNRISE à l'UdeS.

**Denis Masson, Simon Fafard, Bruno Riel** (Cyrium Technologies Inc.): Conception et fabrication des structures semi-conductrices multicouches pour cellules solaires III-V sur substrat de Ge.

# Table des matières

Introduction . . . . .	1
Historique . . . . .	1
Contexte . . . . .	2
Objectifs . . . . .	2
Chapitre 1 : Design des cellules solaires tri-jonction . . . . .	4
1.1. Évolution des technologies photovoltaïques . . . . .	4
1.2. Principe général . . . . .	5
1.2.1. Jonctions tunnels entre les cellules . . . . .	8
1.2.2. Couches "fenêtres" . . . . .	8
1.2.3. Couche tampon . . . . .	9
1.2.4. Couche antireflet . . . . .	9
1.2.5. Couche de contact et contacts électriques . . . . .	10
1.2.6. Le dopage . . . . .	10
1.3. Bande interdite versus paramètre de maille . . . . .	10
1.4. Comparaison CSTJ et cellules solaires à une jonction . . . . .	11
1.5. Structure de bande et mécanisme de transport des porteurs . . . . .	12
1.6. Spectre solaire . . . . .	13

1.7. Gamme d'absorption et modulation des épaisseurs des couches . . . . .	15
1.8. Efficacité quantique . . . . .	16
1.9. Courbes courant-tension et facteur de forme. . . . .	16
1.10. Processus de perte d'efficacité énergétique . . . . .	18
1.11. Origine et nature des non-uniformités structurales . . . . .	19
1.12. Augmentation des performances des cellules solaires . . . . .	22
1.12.1. Concentrateurs . . . . .	22
1.12.2. Les cellules solaires à plus de trois jonctions . . . . .	23
1.12.3. Ajout de boîtes quantiques dans la cellule du milieu. . . . .	23
Chapitre 2 : Méthodes expérimentales . . . . .	24
2.1. Réalisation de cartographie en photoluminescence. . . . .	24
2.2. Mesures locales de photoluminescence . . . . .	26
2.3. Mesures de photoconductivité . . . . .	28
Chapitre 3 : Résultats et analyses . . . . .	31
3.1. Cartographie en photoluminescence. . . . .	31
3.1.1. Excitation à 532 nm . . . . .	31
3.1.2. Excitation à 1064 nm . . . . .	38
3.1.3. Perspectives . . . . .	41
3.2. Mesures locales de photoluminescence en fonction de la température . . . . .	42
3.3. Mesures de photoconductivité . . . . .	46
3.3.1. Balayage monochromatique avec lampe blanche . . . . .	47
3.3.2. Balayage monochromatique et excitation laser à 532 nm et à 786 nm . . . . .	50

Conclusion . . . . .	55
A.1 Préparation des échantillons. . . . .	56
A.1.1 Réalisation des contacts . . . . .	56
A.1.2 Précautions dans le procédé . . . . .	57
A.2 Exemple de composition de cellule solaire tri-jonction . . . . .	58
A.3 Composants du montage de photoluminescence . . . . .	59
A.4 Conditions expérimentales des mesures locales de photoluminescence. . . . .	59
A.5 Bilan de l'ensemble des processus de perte de rendement énergétique. . . . .	60
Bibliographie . . . . .	61

## Sommaire des figures

1.1	Evolution des technologies photovoltaïques . . . . .	5
1.2.1	Diagramme de bandes d'énergie d'une jonction PN . . . . .	6
1.2.2	Structures des cellules solaires tri-jonction . . . . .	7
1.3	couche fenêtre (a)avant et (b) arrière . . . . .	9
1.4	Diagramme bande interdite versus paramètre de maille . . . . .	11
1.5	Spectre solaire et gamme d'absorption (a) du Si et (b) d'une CSTJ . . . . .	12
1.6	Diagramme de bande d'énergie simplifiée d'une CSTJ . . . . .	13
1.7	Simulation du spectre solaire [ASTM] . . . . .	14
1.8	Coefficient d'absorption de différents matériaux . . . . .	15
1.9	Courbe I-V d'une cellule solaire . . . . .	17
1.10	Courbes courant-tension des photodiodes constituant une CSTJ . . . . .	17
1.11	Energie lumineuse insuffisante pour générer du photocourant . . . . .	18
1.12	Energie lumineuse de trop induisant des pertes par thermalisation . . . . .	18
1.14	Image transversale par microscopie électronique à balayage d'une CSTJ . . . . .	20
1.15	Mesure par rayons-X d'une structure tri-jonction métamorphique . . . . .	20
1.16	Effet d'arrangement d'In et de Ga suivant les plans (111) sur le gap d'InGaP . . . . .	22
1.17	Structure de cellule solaire avec plus de trois jonctions . . . . .	21

1.17 Schéma illustrant le PLM 150 utilisé dans ce projet . . . . .	25
2.1 Schéma du montage de PL utilisé dans ce projet . . . . .	27
2.2 Schéma de montage des échantillons des mesures de photoconductivité . . . . .	29
2.3 Schéma de montage pour les mesures de photoconductivité . . . . .	30
3.1 Cartographie en intensité maximale de photoluminescence . . . . .	31
3.2 (a) Tracé sur la cartographie en photoluminescence de l'échantillon 1 . . . . .	32
3.3 (a) Tracé sur la cartographie en photoluminescence de l'échantillon 2 . . . . .	33
3.4 (a) Cartographie en longueur d'onde de photoluminescence de l'échantillon 1 . . . . .	34
3.5 (a) Cartographie en longueur d'onde de photoluminescence de l'échantillon 2 . . . . .	34
3.6 (a) Cartographie de la pleine largeur à mi-hauteur . . . . .	35
3.7 (a) Cartographie en photoluminescence à une longueur d'onde fixe . . . . .	36
3.8 (a) Cartographie en intensité de photoluminescence à une longueur . . . . .	37
3.9 (a) Cartographie en intensité de photoluminescence 1064 nm . . . . .	38
3.10 (a) Tracé sur la cartographie en intensité de photoluminescence . . . . .	39
3.11 (a) Cartographie réduite en longueur d'onde de photoluminescence . . . . .	39
3.12 (a) Cartographie en longueur d'onde de photoluminescence de l'échantillon 1 . . . . .	40
3.13 Cartographie en photoluminescence et numérotation des positions . . . . .	41
3.14 Mesures de photoluminescence en fonction de la température . . . . .	42
3.15 Mesures de photoluminescence à 20 K en fonction de la position . . . . .	43
3.16 Origine des raies de la Figure 3.15 . . . . .	44
3.17 Caractéristique courant-tension de l'échantillon 1 . . . . .	45
3.18 Mesures de photoconductivité en fonction de la position de l'échantillon 1 . . . . .	46
3.19 Comparaison des intégrales des spectres de photoconductivité de la Figure 3.18 . . . . .	48
3.20 Mesures de photocourant AC sous illumination continue à l'aide du laser 786 nm . . . . .	49
3.21 Mesures comparatives du photocourant AC avec lasers à 532 nm . . . . .	50

3.22	Mesure du photocourant DC induit par l'excitation du laser 786 nm . . . . .	51
3.23	Diagramme explicatif du phénomène de saturation du photocourant . . . . .	52
3.24	Mesures comparatives de photocourant AC . . . . .	53
3.25	Mesures de photocourant en fonction de l'excitation de la cellule du milieu . . . . .	54

# Introduction

## Historique

Le réchauffement global de la planète causé par les émissions des gaz à effet de serre qui émanent de la combustion des énergies fossiles et leur quantité limitée, ouvrent la voie à la recherche d'alternatives énergétiques moins polluantes et renouvelables. Les technologies photovoltaïques font partie de ces solutions pour répondre aux exigences énergétiques modernes. Car le soleil est considéré comme une ressource non limitée à l'échelle humaine, non polluante et les matériaux utilisés pour la fabrication des cellules photovoltaïques sont réutilisables. Le grand obstacle est cependant d'une part le coût élevé de ces technologies et d'autre part leurs rendements limités les rendant ainsi de loin moins compétitives par rapport aux énergies fossiles. C'est pour cette raison qu'un grand effort est concentré sur la recherche d'autres solutions profitant des avancées technologiques contemporaines, notamment de l'industrie de la microélectronique, pour à la fois augmenter les rendements énergétiques mais aussi réduire les coûts de production. Les cellules solaires triples jonctions (CSTJ) constituées essentiellement de trois types de couches épitaxiées les unes après les autres (essentiellement du Ge, de l'InGaAs et de l'InGaP), promettent de répondre à ces exigences. En effet les CSTJ détiennent aujourd'hui tous les records de rendement énergétique parmi les technologies photovoltaïques. Pour réduire les coûts provenant principalement de la production de matériaux de haute qualité cristalline, l'utilisation de cellules de petites surfaces et des concentrateurs de lumière faits à partir de matériaux moins onéreux se présente comme l'option ultime.

## **Contexte**

C'est dans ce cadre que le projet SUNRISE pour Semiconductors Using Nanostructures for Record Increases in Solar-cell Efficiency, qui associe l'Université de Sherbrooke, l'Université d'Ottawa, le Conseil national de recherche du Canada (IRC-CNRC), l'Institut des sciences des microstructures (ISM-CNRC), Cyrium Technologies Inc. et Opel International Inc., a vu le jour.

Dans ce projet de maîtrise, le travail a été réalisé à partir d'une gaufre complète fournie par la compagnie Cyrium technologie. On s'est intéressé notamment aux non-uniformités structurales dues aux procédés de croissance par épitaxie. Les paramètres de croissance tels que la température, la pression des gaz, la concentration relative des composés, le temps ainsi que la quantité de dépôt, déterminent la qualité de la structure multi-couches des cellules solaires. L'enjeu ici est donc de fournir des informations sur la non-uniformité cristalline pouvant guider l'épitaxieur à trouver les paramètres adéquats à ajuster. Par ailleurs, comme les CSTJ sont une solution technologique récente, il n'est pas sans intérêt d'explorer des procédés de caractérisation qui leurs sont adaptées. Notamment dans ce travail des réponses spectrales du photo-courant et des profils de photoluminescence sont évaluées en fonction des paramètres tels que la position sur la gaufre, la puissance d'excitation lumineuse, la température, ainsi que le type de source lumineuse.

Deux techniques de mesures sont alors utilisées dans cette étude: la photoluminescence en continue et la photoconductivité avec illumination par lampe blanche et par rayons laser. La première technique permettra de visualiser et d'analyser les défauts et la seconde de voir leur influences sur la performance des CSTJ. Les mesures sont effectuées en plusieurs endroits de la gaufre. Ainsi cette démarche rendra compte des fluctuations de composition en plusieurs points d'une gaufre et les matériaux impliqués dans ces effets de non-uniformités structurales.

## **Objectifs**

L'ambition est d'établir un procédé cohérent définissant une méthode de caractérisation adaptée aux CSTJ pour évaluer la nature des non-uniformités cristallines d'une gaufre et analyser leurs réponses spectrales en fonction de la position sur la gaufre, de la puissance d'excitation et de la température. Et ceci essentiellement à travers les mesures de photocourant et des mesures de

photoluminescence. Les corrélations entre toutes ces données seront étudiées afin de développer une procédure permettant de maximiser l'information acquise par la photoluminescence uniquement, qui est une technique rapide et non destructive.

Dans le premier chapitre, seront discutés les aspects et les défis fondamentaux pour construire une cellule solaire tri-jonction fonctionnelle tant au niveau de la physique fondamentale que de l'ingénierie. Un accent est ainsi mis sur la raison derrière le choix de chaque composant constituant la CSTJ.

Puis le chapitre II sera consacré à décrire les méthodes et outils expérimentaux adoptés dans le cadre de cette maîtrise et les obstacles qui sont contournés.

Enfin le chapitre III présente l'ensemble des résultats obtenus et les analyses synthétiques qui en découlent.

# Chapitre 1 : Design des cellules solaires tri-jonction

## 1.1. Évolution des technologies photovoltaïques :

Rendre les technologies vertes aussi rentables que les énergies fossiles est le défi majeur qu'ambitionne de relever les cellules solaires tri-jonction (CSTJ). Ceci justifie les efforts de recherche actuels concentrés sur ce sujet tant au niveau fondamental que technique. Dans la figure 1.1 est présentée une évolution des technologies photovoltaïques au cours des 35 dernières années [21]. On observe un monopole des records de rendement énergétique détenu par les CSTJ. Elles profitent en effet de l'ensemble des avancées de la microélectronique moderne autour des semi-conducteurs, mais aussi ses performances ont hérité de l'évolution des générations précédentes des technologies photovoltaïques. Concrètement, le développement des techniques de croissance par épitaxie, la disponibilité des méthodes de caractérisation de pointe et la compréhension de la physique des semi-conducteurs III-V ternaires ou quaternaires, se mettent en synergie pour rendre possible la construction de cellules solaires à haut rendement.

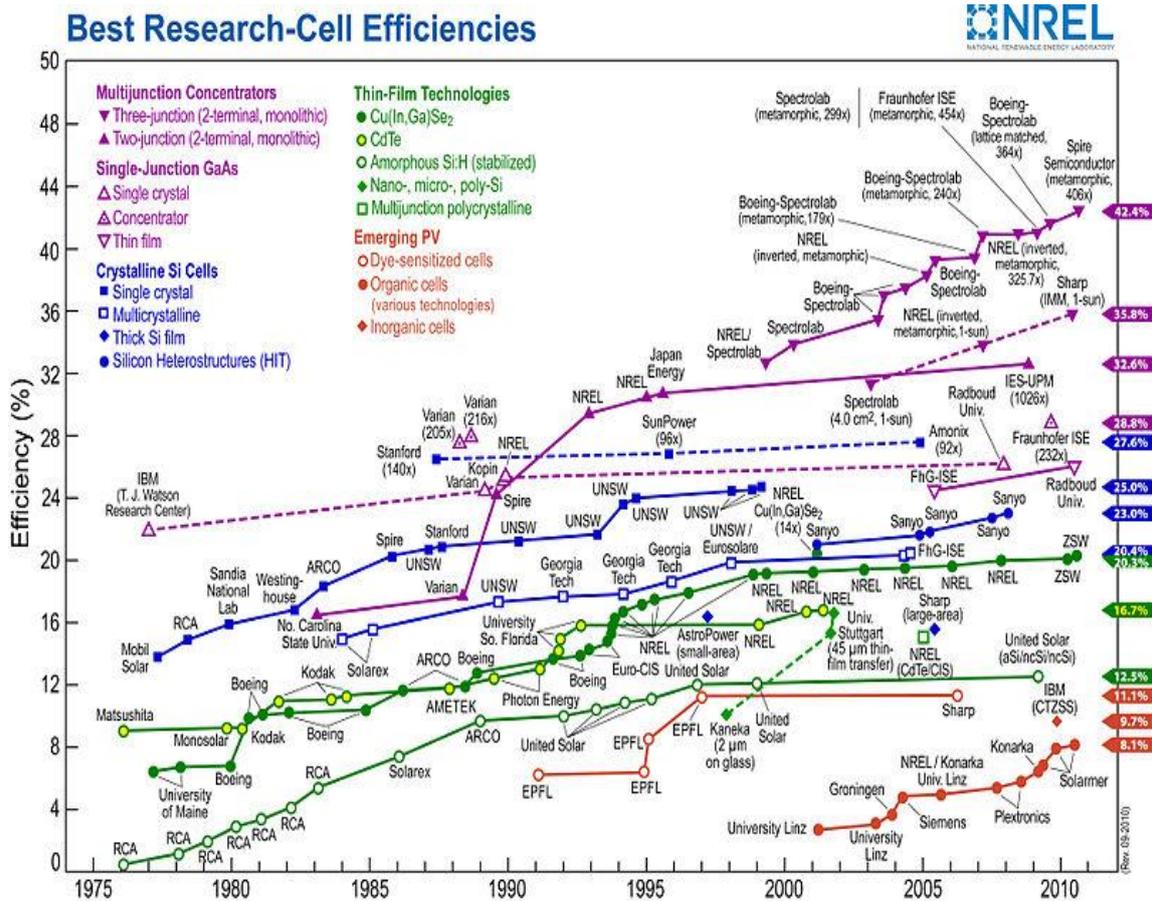


Figure 1.1 - Evolution des technologies photovoltaïques (les CSTJ sont représentées par les triangles violets plein avec une pointe vers le bas) [21]

### 1.2. Principe général

Une structure photovoltaïque est basée sur la propriété qu'ont certains matériaux, en l'occurrence les semi-conducteurs, à changer leur conductivité sous certaines excitations lumineuses dépendamment du matériau. En effet, dans un solide cristallin les niveaux énergétiques de l'ensemble des atomes sont couplés pour former des bandes d'énergie. Dans le cas des semi-conducteurs, deux bandes d'énergie séparée par une bande interdite d'énergie  $E_G$  (de l'ordre de quelque électron-volts), sont responsables de leurs propriétés de conductivité: la bande de valence remplie d'électrons et la bande de conduction qui est totalement vide à 0 K. Les électrons contenus dans la bande de valence peuvent absorber l'énergie  $h\nu$  des photons constituant la lumière incidente pour passer dans la bande de conduction, avec la condition que l'énergie absorbée soit supérieure ou égale à l'énergie  $E_G$  de la bande

interdite. Dans ce cas le matériau devient conducteur et sa conductivité est proportionnelle au nombre d'électrons présents dans la bande de conduction.

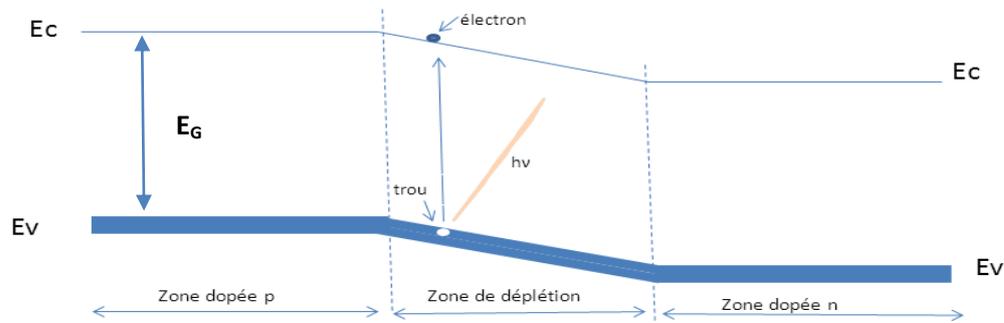


Figure 1.2 .1 – Diagramme de bandes d'énergie d'une jonction PN

Pour fabriquer une structure photovoltaïque, on fait croître par des procédés d'épitaxie deux types de semi-conducteurs issus du même matériau, l'un dopé aux électrons et l'autre dopé aux trous. On crée par ce procédé ce qu'on appelle une jonction PN ou une photodiode (Figure 1.2.1). En effet, grâce au dopage qui consiste à créer des électrons et des trous supplémentaires de part et d'autre de la structure PN, une diffusion de porteurs pour équilibrer le potentiel électrique engendre un fort champ électrique interne à l'interface des deux types de semi-conducteurs, on appelle cette région la zone de déplétion. Quand on illumine la photodiode, les électrons et les trous engendrés dérivent dans le champ électrique de la zone de déplétion en sens opposé, une différence de potentiel se crée ainsi entre la face avant et la face arrière de la structure photovoltaïque.

Les cellules solaires tri-jonction (CSTJ) sont constituées globalement par trois photodiodes semi-conductrices de bandes interdites différentes séparées par des jonctions tunnels. Les couches de la CSTJ sont de faibles épaisseurs (environ 6 microns au total et 140 microns pour le substrat) dopées aux électrons ou aux trous, épitaxiées les unes après les autres de telle sorte que le matériau à plus grande bande interdite  $E_G$  soit en surface, le matériau à  $E_G$  intermédiaire au milieu et le matériau à faible  $E_G$  au bas de la cellule. Cela permet de réduire les pertes thermiques dus à l'absorption de fréquences très supérieures à  $E_G$ . Les jonctions tunnels permettent le passage du courant entre les matériaux à bande interdite différente.

On distingue deux structures CSTJ (Figure 1.2.2) faites d'InGaP pour la cellule du haut, d'InGaAs au milieu et de Ge pour la cellule du bas [20]. La première, nommée "lattice matched" (ou en accord de maille), est épitaxiée avec une divergence de paramètre de maille relativement faible de sorte qu'aucune dislocation ne se crée dans les couches et les porteurs de charge se propagent sans beaucoup d'obstacles (Figure 1.2.2.a). La seconde structure est épitaxiée avec deux premières couches en désaccord de maille par rapport à celui du substrat de germanium (Figure 1.2.2.b). Des couches tampons sont alors successivement rajoutées avec des paramètres de maille variant graduellement entre celui du Ge et celui de l'InGaAs. Cette dernière structure a l'avantage de mieux répartir les  $E_G$  des trois photodiodes dans le spectre solaire pour une collection plus efficace de photons.

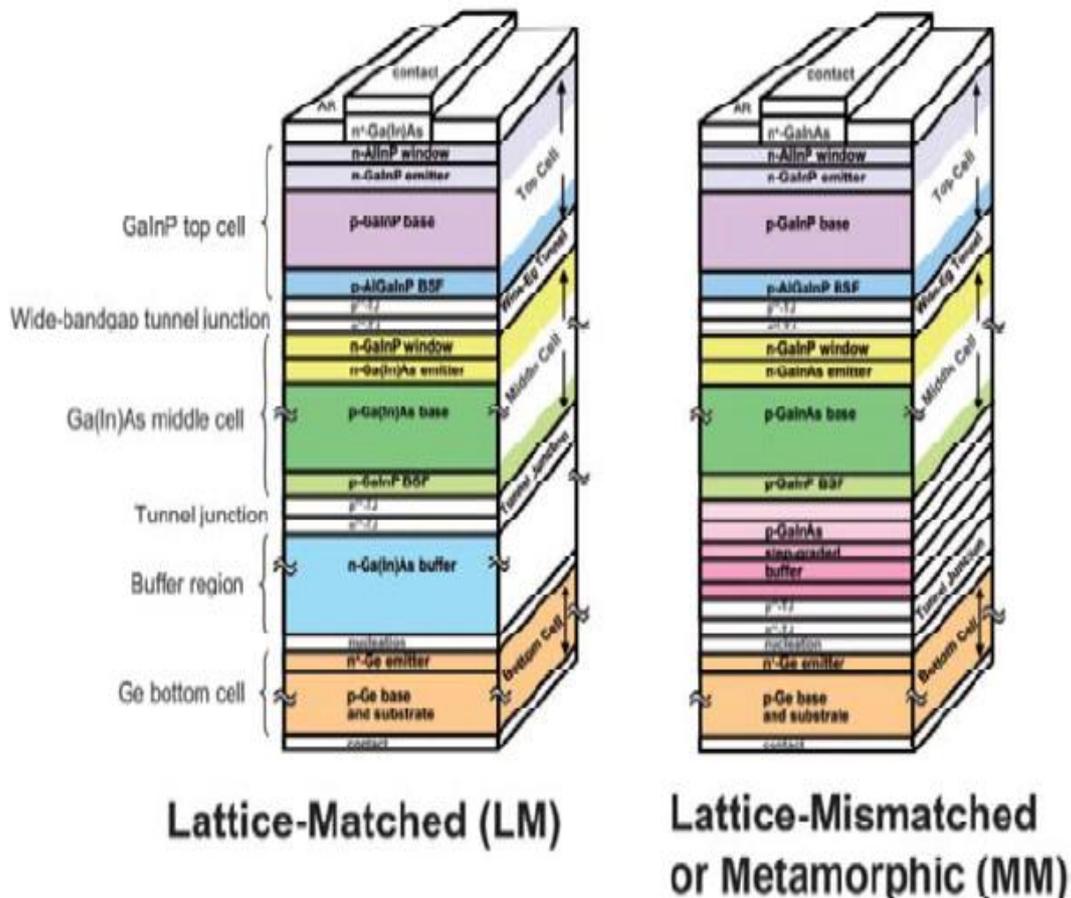


Figure 1.2.2 - Structures cellules solaires tri-jonction (a) avec accord de paramètre de maille entre le Ge et le reste des couches (b) avec désaccord de paramètre de maille [2]

Par ailleurs on rajoute à la structure CSTJ d'autres couches spécialisées telles que des couches d'encapsulation dites fenêtres avant et arrière ("window" et "back surface field" (BSF)), des couches tampons, des jonctions tunnels, ainsi que des couches de contact. Le rôle de ces différentes couches est décrit dans les paragraphes qui suivent :

### 1.2.1. Jonctions tunnels entre les cellules

Les jonctions tunnels ont pour but de séparer électriquement la zone dopée aux trous et la zone dopée aux électrons de deux diodes adjacentes (Figure 1.6). Ce sont aussi des diodes mais de sens inverse aux diodes destinées à la production de courant. Leurs épaisseurs sont très faibles de sorte que les électrons peuvent passer par effet tunnel d'une photodiode à une autre. De plus leurs  $E_G$  sont suffisamment grands pour laisser passer la lumière vers les photodiodes suivantes. Par exemple la jonction tunnel entre l'InGaAs et le Ge est faite de GaAs (p-n) et celle entre l'InGaAs et l'InGaP peut être faite d'AlGaAs dopé p et d'InGaP dopé n.

### 1.2.2 Couches "fenêtres"

Les couches "fenêtres" sont des couches d'encapsulation des jonctions p-n. La couche avant est appelée "window" et la couche arrière est appelée "back-surface-field (BSF)". Elles sont faites de matériaux à plus grand  $E_G$  que le matériau des photodiodes. Elles sont donc transparentes au rayonnement atteignant ces couches, d'où leur nom. Leur rôle est de limiter le taux de recombinaison des porteurs aux interfaces avant et arrière de la jonction p-n. La Figure 1.3 suivante illustre la structure de bandes d'énergie d'une couche fenêtre avant couplée à une homojonction p-n (figure 1.3 a), puis d'une homojonction p-n couplée à une couche fenêtre arrière (Figure 1.3.b). Dans les deux cas on observe une diffusion de charges électrons ou trous à l'interface de l'hétérojonction qui induit un champ électrique. Celui-ci tend à repousser les porteurs de nature différente et a pour effet de limiter leur taux de recombinaison.

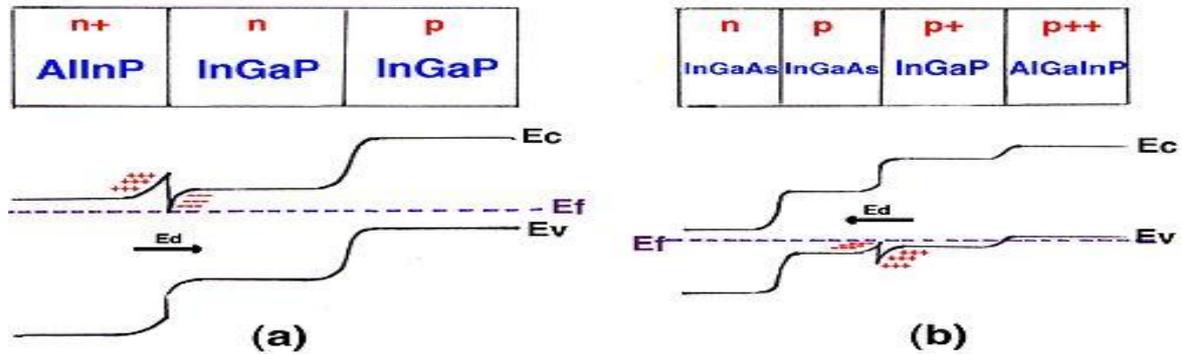


Figure 1. 3 - couche fenêtre (a)avant et (b) arrière [24]

### 1.2.3. Couche tampon

Cette couche sert à limiter la diffusion des défauts du substrat vers les couches épitaxiées. Dans le cas des structures métamorphiques la couche tampon se situe entre le Ge et l'InGaAs. En effet la relaxation des contraintes dues aux matériaux possédant des paramètres de maille différents se fait par introduction de dislocations dans cette couche tampon. Cette couche est alors épitaxiée entre deux matériaux de très bonne qualité cristalline pour accorder leurs paramètres de maille. Il est à noter que les dislocations ont tendance à bouger à plus hautes températures et ceci constitue un désavantage majeur des structures métamorphiques.

### 1.2.4. Couche antireflet

Elle permet une meilleure collection de la lumière en diminuant la réflectivité à l'interface air-couche fenêtre de la cellule du haut. Elle est constituée typiquement d'une couche de dioxyde de silicium et d'une couche mince d'oxyde d'indium. Cependant elle fait aussi l'objet de nombreuses recherches. Son choix dépend de la nature de la couche fenêtre de la première diode.

### 1.2.5. Couche de contact et contacts électriques

La couche de contact est faite d'InGaAs fortement dopée n. Elle permet d'avoir un bon contact ohmique. Elle est gravée après l'épitaxie, sauf en dessous des contacts électriques, afin de réduire au minimum l'absorption de lumière dans cette couche.

Des couches métalliques sont déposées au-dessus de la couche de contact (voir chapitre II). Elles doivent avoir une bonne adhésion avec la structure CSTJ pour limiter la résistivité à l'interface. De plus, son design doit être fait pour laisser passer assez de lumière et pour recueillir le maximum d'électrons. On utilise pour cette raison une structure constituée de longs et fins rubans métalliques pour les contacts avant des échantillons.

### 1.2.6. Le dopage

Le dopage des matériaux pour réaliser les CSTJ est celui généralement utilisé pour les semi-conducteurs ternaires. C'est-à-dire des éléments du groupe II pour doper aux trous et des éléments du groupe VI pour doper aux électrons. Des métaux comme le Zn et les éléments du groupe IV sont aussi souvent utilisés comme dopage. Le choix du dopage dépend de la composition du matériau. De plus le niveau de dopage est un paramètre important pour les rendements des CSTJ. Un fort dopage permet de baisser la résistivité des semi-conducteurs. Par ailleurs, les niveaux de dopage p et n de part et d'autre de la jonction tunnel doivent permettre aux porteurs dans une bande de conduction de passer par effet tunnel vers des états accessibles de la bande de valence de la cellule adjacente.

## 1.3. Bande interdite versus paramètre de maille

Dans la Figure 1.4 est représentée l'énergie de bande interdite des semiconducteurs (binaires, ternaires ou quaternaires) en fonction du paramètre de maille.  $E_G$  varie quasi-linéairement en fonction de la composition des atomes des ternaires ou des quaternaires. Ainsi, ce diagramme permet de choisir le  $E_G$  ou le paramètre de maille qu'on veut par le dosage des constituants du semi-conducteur : il constitue une référence générale pour toute conception d'un système optoélectronique. On remarque alors qu'il est possible d'obtenir un paramètre de maille adapté à celui du

Ge en utilisant une composition spécifique pour le ternaire InGaAs (faible pourcentage d'indium) et pour le ternaire InGaP; d'où la possibilité de croître ces matériaux sans engendrer de défauts structuraux majeurs. De plus, les bandes interdites de ces matériaux sont suffisamment bien repartis dans le visible et l'infrarouge, ce qui est intéressant pour la conception de cellules solaires tri-jonctions. On comprend à partir de ce diagramme pourquoi les CSTJ faits d'InGaP/InGaAs/Ge attirent autant l'attention des chercheurs et industriels dans la quête de cellules solaires à haut rendement énergétique.

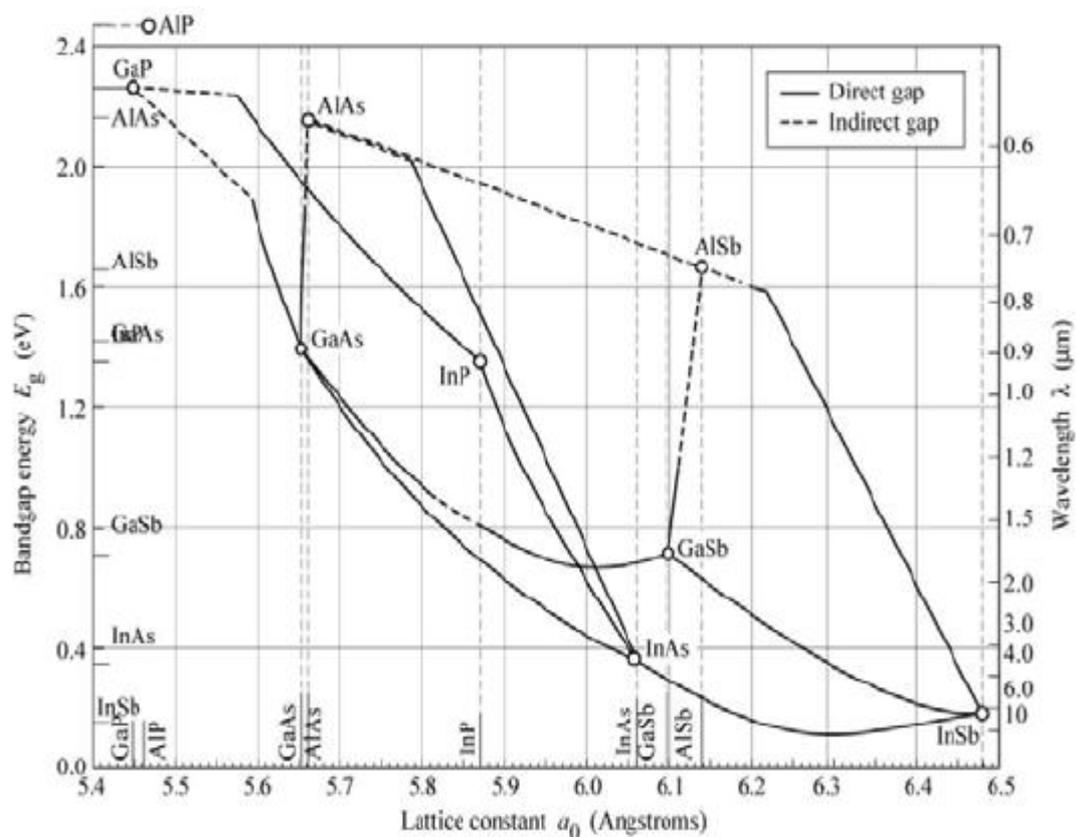


Figure 1.4 - Diagramme énergie de gap versus paramètre de maille [9]

### 1.4. Comparaison CSTJ et cellules solaires à une jonction

Les cellules solaires à homojonction parmi les plus connues sont fabriquées à base de silicium ou de GaAs. Le marché actuel est détenu par les cellules solaires au silicium du fait de l'abondance de ce matériau dans la nature. Cet important marché tire également profit de la maturité des procédés de la microélectronique basés aussi sur

le silicium. Néanmoins le rendement d'une cellule à homojonction (autour de 20% pour le silicium et 30% pour le GaAs) est limité parce que seulement une faible partie du spectre solaire est absorbée et que les photons d'énergie très grande par rapport au gap du matériau génèrent des électrons (trous) chauds qui vont perdre leur énergie en excès par rapport au minimum (maximum) de bande de conduction (valence) sous forme de chaleur (émission de phonons). L'élévation de la température qui en résulte peut dégrader les propriétés de conduction des différentes couches [10].

Les CSTJ contournent cet obstacle en permettant une plus grande absorption dans le spectre solaire tout en ayant une faible résistance (Figure 1.5). En effet les semi-conducteurs ternaires et quaternaires offrent la possibilité de faire varier leurs  $E_G$  et leurs paramètres de maille en fonction de leurs compositions relatives puis de croître des couches de faible épaisseur par les techniques d'épitaxie. Cependant, la rareté des matériaux III-V et les coûts de fabrication élevés des CSTJ est l'obstacle de taille pour son industrialisation à grand volume. C'est pourquoi on pense à utiliser des dimensions 100 fois plus petites que les cellules solaires conventionnelles à base de silicium. En contrepartie des concentrateurs doivent être utilisés pour recueillir le maximum de lumière et focaliser celle-ci sur la CSTJ. Il y a bien entendu des limitations pour des illuminations excessives qui, d'une part, induisent de la chaleur dans la structure et, d'autre part, rend le packaging difficile à concevoir.

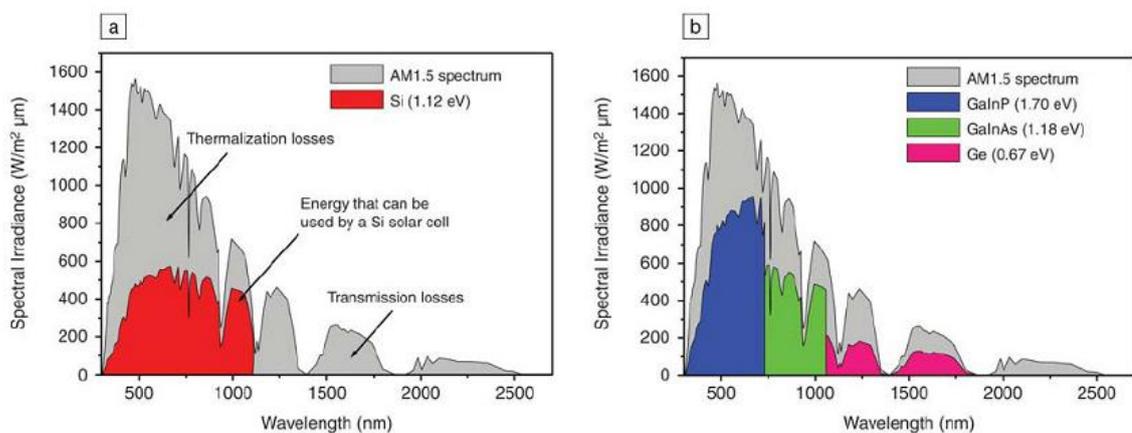


Figure 1.5 - Spectre solaire et gamme d'absorption (a) du Si et (b) d'une CSTJ [10]

## 1.5. Structure de bande et mécanisme de transport des porteurs

Un schéma simplifié de la structure de bandes des différentes couches d'une structure cellule solaire tri-jonction est illustré à la figure 1.6 suivante. Le niveau de Fermi à

l'équilibre est constant dans toute la structure. Sous illumination, il faut bien comprendre que la jonction sera polarisée suite au courant traversant la résistance de charge. Les électrons passent par effet tunnel de la bande de conduction d'une photodiode à la bande de valence de la photodiode adjacente. Cependant, afin que ce transfert de charges soit assuré, des trous doivent être présents dans la bande de valence de la photodiode en dessous pour permettre aux électrons d'occuper les états libres de cette bande. Le nombre de photoporteurs (électrons et trous) traversant les différentes jonctions est dans ce cas le même, par conséquent le courant est constant à travers toute la structure.

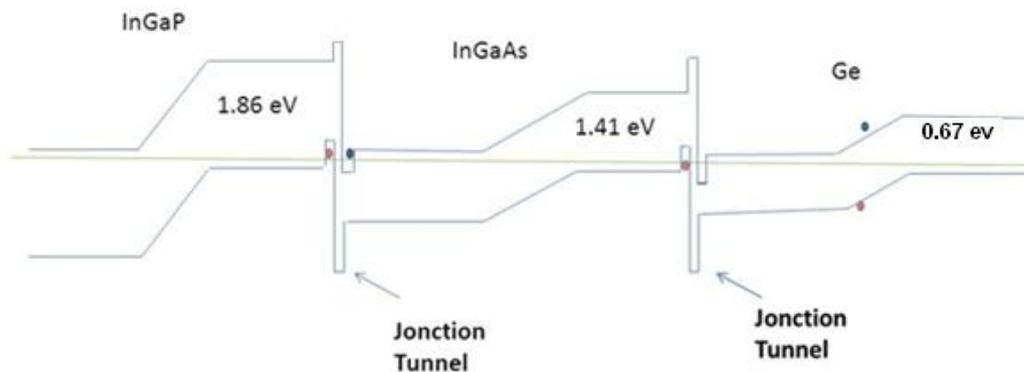


Figure 1.6 - Diagramme de bandes d'énergie simplifié d'une CSTJ

## 1.6. Spectre solaire

Le soleil est un corps noir qui a son maximum de radiance dans le jaune. Par leur traversée dans l'atmosphère terrestre, plusieurs photons sont absorbés. Il est donc important de tenir compte de ce fait pour concevoir les CSTJ destinés à un usage terrestre.

Cependant, pour la conception en laboratoire, on utilise généralement des sources artificielles de lumière qui sont soumises à des standards nationaux ou internationaux. La standardisation de ces sources permet d'avoir les mêmes références quant à la comparaison des rendements énergétiques des cellules solaires. Par conséquent, une même CSTJ n'aura pas forcément le même rendement suivant le point d'observation dans les différentes régions du globe.

Dans la Figure 1.7 est représenté trois spectres d'un simulateur solaire correspondant au standard américain ASTM G173-03 [1]. La norme est définie avec un AM (air mass) de 1.5 référé par une densité de molécules atmosphériques spécifiées en 33 couches , de la vapeur d'eau d'une colonne de 1.42 cm, de l'ozone d'une colonne de 0.34cm, les conditions standards de température et de pression, un zénith du soleil d'angle 48.19°, d'un AOF (aerosol optical depth ) défini par la densité d'aérosol en zone rurale , et l'albédo spectrale du sol.

La courbe en noire simule le spectre d'irradiance du soleil dans l'espace avec un AM zéro. Avec un AM 1.5, la courbe bleue correspond au spectre d'irradiance normale par rapport à une surface tandis que la courbe rouge correspond à une irradiance hémisphérique avec une lampe simulant un soleil positionné à 37 degrés par rapport à la normale.

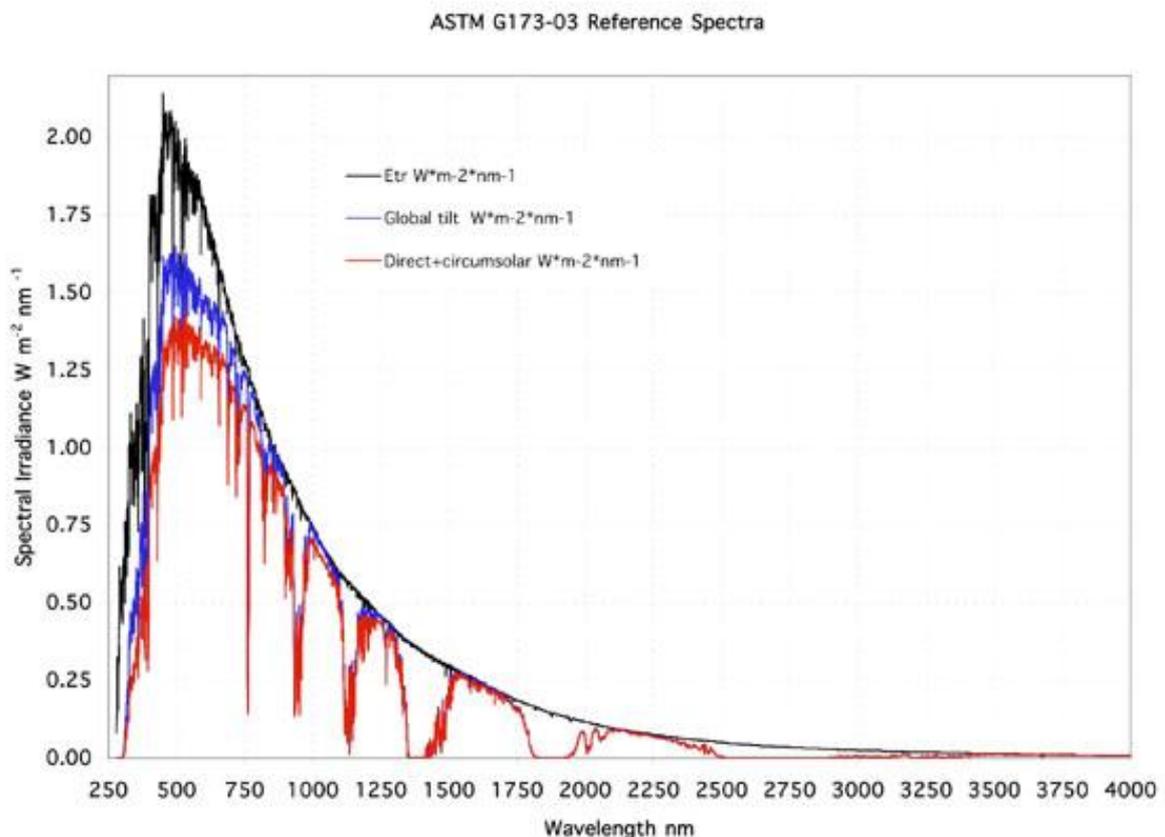


Figure 1.7 - Simulation du spectre solaire [1]

### 1.7. Gamme d'absorption et modulation des épaisseurs des couches

Comme les CSTJ sont constituées de trois photodiodes en série, le courant total délivré est limité par la photodiode qui produit le courant le plus faible. Il est donc important de concevoir les cellules de sorte que les trois photodiodes délivrent chacune la même valeur de courant. Étant donné que les matériaux constituant les photodiodes n'ont pas les mêmes coefficients d'absorption, il nous faut choisir des épaisseurs adéquates pour chaque cellule selon la loi exponentielle:  $I = I_0 e^{-\alpha x}$  (1.1), avec

$$\alpha(E) = \alpha_0 \left( \frac{E - E_g}{E_g} \right)^{1/2} \quad (1.2) \text{ pour un semiconducteur à bande interdite directe et}$$

$$\alpha(E) = \alpha_0 \left( \frac{E - E_g}{E_g} \right)^2 \quad (1.3) \text{ pour un semiconducteur à bande interdite indirecte.}$$

En effet le photocourant est proportionnel à l'intensité  $I$  d'absorption de photons.

Dans la figure 1.8 est représentée les valeurs des coefficients d'absorption de différents semi-conducteurs en fonction de la longueur d'onde.

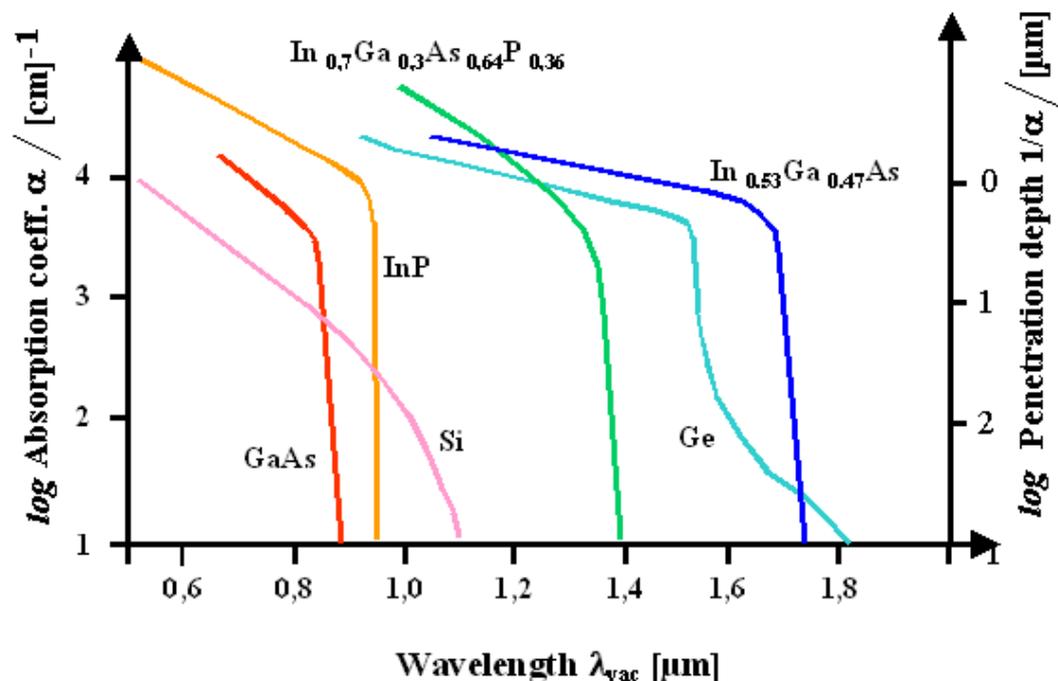


Figure 1.8 - Coefficient d'absorption de différents matériaux [12]

Un matériau qui a un faible coefficient d'absorption doit avoir une épaisseur plus grande par rapport à un matériau de plus grand coefficient d'absorption. On tient compte également de la longueur d'onde d'absorption et de l'intensité lumineuse que reçoit chaque photodiode dans le spectre solaire.

### 1.8. Efficacité quantique

L'efficacité quantique interne est le rapport du nombre de charges collectées sur le nombre de photons incidents et absorbés (à une longueur d'onde particulière) par le matériau. L'efficacité quantique externe est le rapport du nombre de charges collectées sur le nombre de photons incidents (à une longueur d'onde particulière) sur le matériau. Ces quantités sont toujours inférieures à un (ou 100%). La différence entre ces quantités provient des pertes par réflexion ou transmission de la lumière incidente. Les spectres d'efficacité quantique interne permettent d'estimer le courant total délivré par une cellule particulière ayant une certaine épaisseur de zone photosensible. La connaissance de ces spectres d'efficacité quantique interne est donc nécessaire pour concevoir une cellule tri-jonction avec un maximum de rendement de conversion lumière-électricité.

### 1.9. Courbes courant-tension et facteur de forme

Pour tester la performance d'une cellule solaire on mesure son courant en court-circuit  $I_{sc}$  et sa tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  (Figure 1.9). On définit alors un rectangle à partir de ces deux points. La cellule est d'autant plus performante que la puissance délivrée, donnée par le produit  $I.V$  est proche de la surface du rectangle  $I_{sc}.V_{oc}$ . On définit ainsi le facteur de forme  $FF = \frac{IV}{I_{sc}V_{oc}}$  qui est plus commode pour évaluer le rendement globale d'une CSTJ.

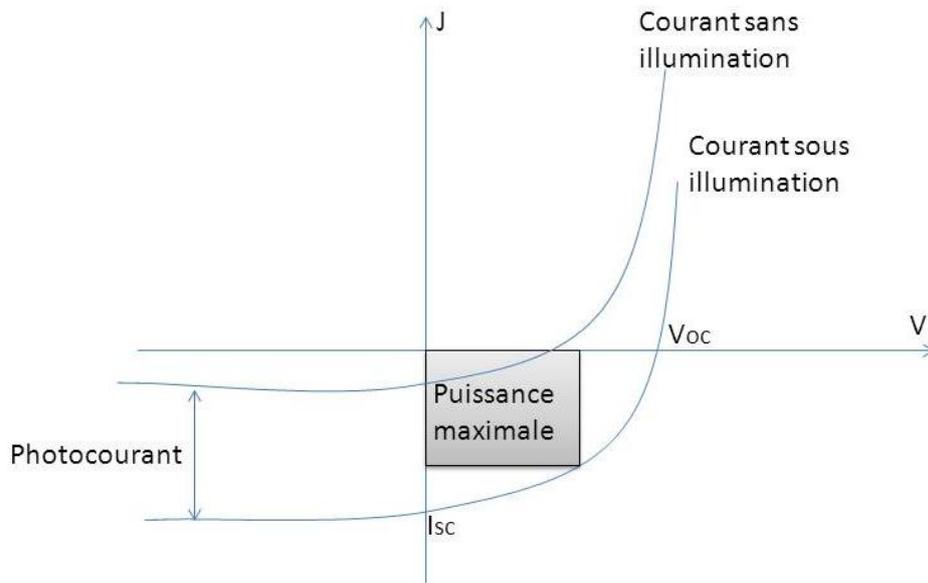


Figure 1.9 - Courbe I-V d'une cellule solaire

Dans la structure CSTJ le Ge a un grand  $I_{sc}$  mais un faible  $V_{oc}$  (Figure 1.10). Par contre l'InGaP et l'InGaAs ont un  $V_{oc}$  élevé grâce à leur grand gap. Comme les photodiodes sont en série, leurs  $V_{oc}$  s'additionnent et font alors augmenter la puissance de la structure globale CSTJ. C'est ce qui explique le rendement élevé des CSTJ par rapport à une cellule uni-jonction fait par exemple uniquement d'InGaP.

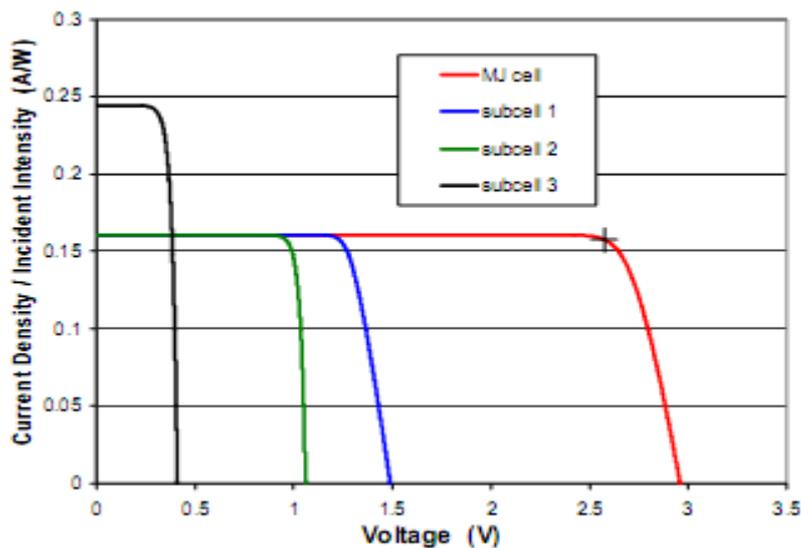


Figure 1.10 - Courbes courant-tension comparatives des photodiodes constituant une CSTJ [20]

### 1.10. Processus de perte d'efficacité énergétique

On distingue principalement deux types de processus qui contribuent à la perte de rendement énergétique :

i. Les photons de trop basse énergie par rapport à la bande interdite du matériau ne sont pas absorbés et ne génèrent donc pas d'électron. Ceci réduit par conséquent l'efficacité quantique de la cellule (Figure 1.11).

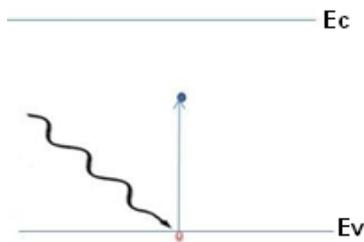


Figure 1.11 - Energie lumineuse insuffisante pour générer du photocourant

ii. Des photons d'énergie plus grande que la bande interdite du semiconducteur génèrent des électrons chauds qui vont se thermaliser dans la structure et donner naissance à des phonons. Cette énergie lumineuse supplémentaire se transforme ainsi en chaleur et contribue à la baisse de performance des CSTJ (Figure 1.12).

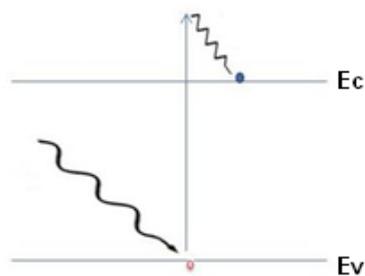


Figure 1.12 - Energie lumineuse de trop induisant des pertes par thermalisation

### 1.11. Origine et nature des non-uniformités structurales

L'épitaxie par MOCVD (metallo-organic chemical vapor deposition) est l'une des techniques les plus utilisées dans la fabrication des CSTJ. En effet, elle permet d'avoir des taux de croissance rapide entre 10 à 200 nm/min et une bonne qualité cristalline. De plus, elle ne requière pas un vide poussé comme l'épitaxie par jets moléculaires, ceci constituant un avantage de taille puisque cela permet une plus faible consommation d'énergie. Cependant, les paramètres de croissance tels que les flux des gaz et le ratio III/V sont moins bien contrôlables qu'en MBE. Cette limitation engendre les fluctuations de composition sur la gaufre. De plus, la fluctuation de température à la surface d'une gaufre se traduit par l'apparition de fluctuations de compositions d'un composé ternaire. Par exemple, le gallium étant plus volatile que l'indium, leurs pourcentages relatifs dans la composition de l'InGaAs varient en fonction de la température locale.

Les défauts cristallins dépendent eux principalement des accords de maille entre les différents matériaux. Le germanium par exemple a un paramètre de maille qui ne s'accorde pas bien généralement avec les compositions des ternaires choisis pour les deux photodiodes du dessus (Figure 1.14 et Figure 1.15). Parce que non seulement il faut un bon accord des paramètres de maille mais aussi il faut une bonne répartition de bande interdite entre les trois cellules en fonction du spectre d'illumination. Le plus souvent on privilégie la répartition des  $E_G$  car on pourrait croire des matériaux ayant des mailles graduellement et légèrement différentes pour un minimum de défauts. Dans la figure 1.14, l'image transversale par microscopie électronique d'une structure métamorphique révèle des dislocations confinées l'interface entre le Ge et l'InGaAs, ceci est dû à la différence de paramètre de maille importante de ces deux matériaux.

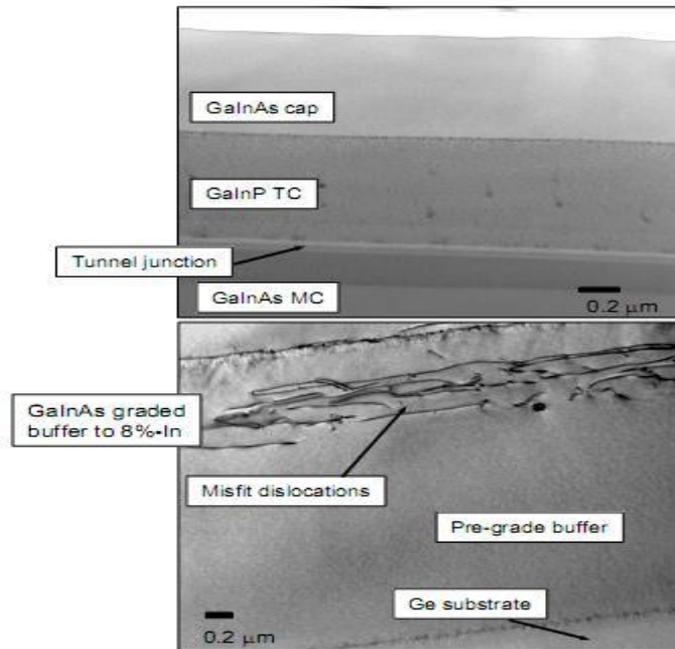


Figure 1.14 - Image transversale par microscopie électronique à balayage d'une CSTJ métamorphique [20].

La Figure 1.15 obtenue par diffraction aux rayons-x, illustre l'accordement graduel du paramètre de maille entre les différents matériaux composant une structure métamorphique. Ici une meilleure répartition des  $E_G$  dans le spectre solaire est privilégiée. Par ailleurs des effets dus à l'arrangement des atomes dans la structure cristalline conduisent aussi à des non-uniformités (Figure 1.16). Par exemple, pour la première cellule faite d' $\text{In}_{49}\text{Ga}_{51}\text{P}$ , selon l'arrangement des atomes d'In et de Ga suivant les plans (111), le gap varie légèrement. Ce phénomène dépend essentiellement des conditions de croissance. Dans la cellule du milieu, c'est-à-dire l'InGaAs, le faible pourcentage d'In utilisé rend négligeable les effets de ségrégation de phase cristalline mais les fluctuations de composition sont toujours présentes.

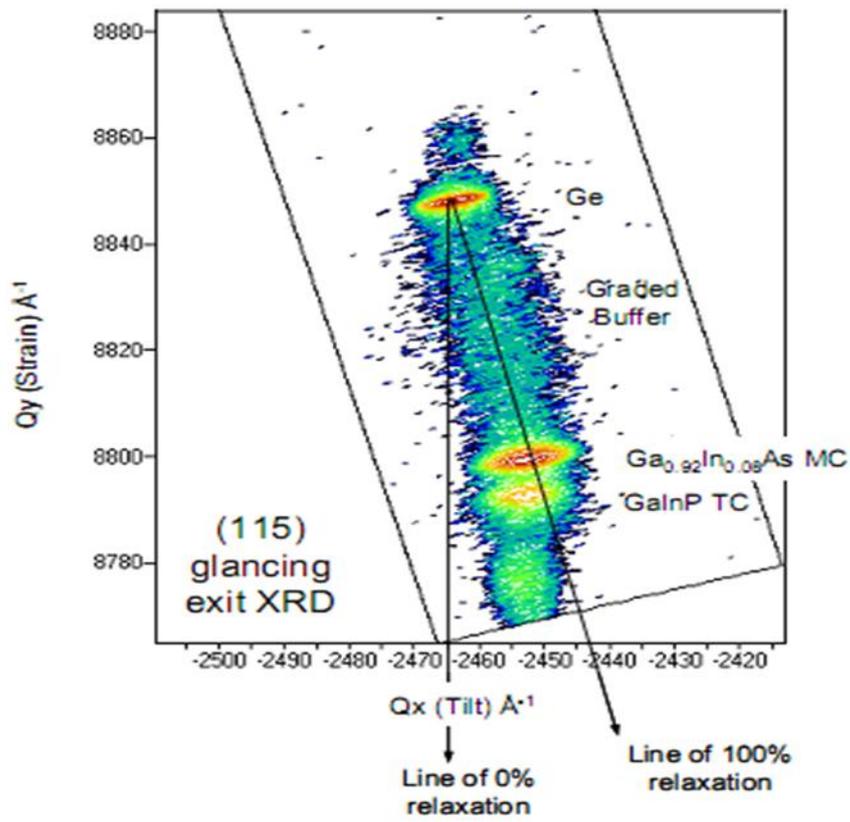


Figure 1.15 - Mesure par rayons-X d'une structure tri-jonction métamorphique [20]

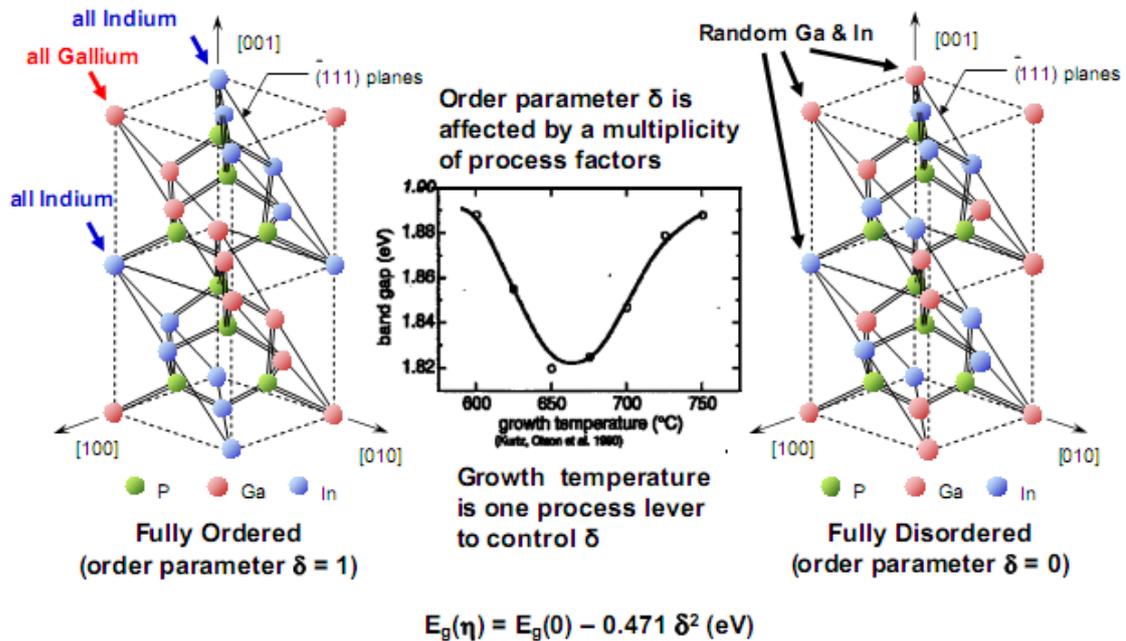


Figure 1.16 - Effet d'arrangement d'In et de Ga suivant les plans (111) sur la bande interdite d'InGaP [20]

## 1.12. Augmentation des performances des cellules solaires

### 1.12.1. Concentrateurs

Différents concentrateurs font l'objet d'intenses recherches pour recueillir plus de lumière afin de la concentrer sur une CSTJ. Cependant pour des illuminations trop intenses les performances de la CSTJ se dégradent à cause des effets de saturation et de réchauffement. Des concentrateurs à lentille de Fresnel sont souvent utilisés, mais aussi des réflecteurs paraboliques. La chaleur engendrée par une CSTJ sous une forte illumination doit être évacuée par de l'eau par exemple sinon elle contribuera à réduire ses performances.

L'eau récupérant la chaleur d'une CSTJ peut être réutilisée pour des usages domestiques ou industriels. Certaines compagnies ont utilisé ce principe pour comptabiliser cette énergie thermique comme faisant partie du rendement global de la CSTJ qui atteint dans ce cas plus de 70%.

### 1.12.2. Les cellules solaires à plus de trois jonctions

Le principe d'une CSTJ étant d'absorber plus de fréquence du spectre solaire, naturellement l'idée viendrait d'ajouter des photodiodes supplémentaires pour augmenter encore plus les rendements (Figure 1.17). Cependant on doit tenir aussi compte de la résistance en série des matériaux qui s'ajoutent. Le défi serait dans ce cas d'avoir des structures aussi minces que possible. Pour l'heure, les tri-jonctions détiennent encore les records de rendement énergétique.

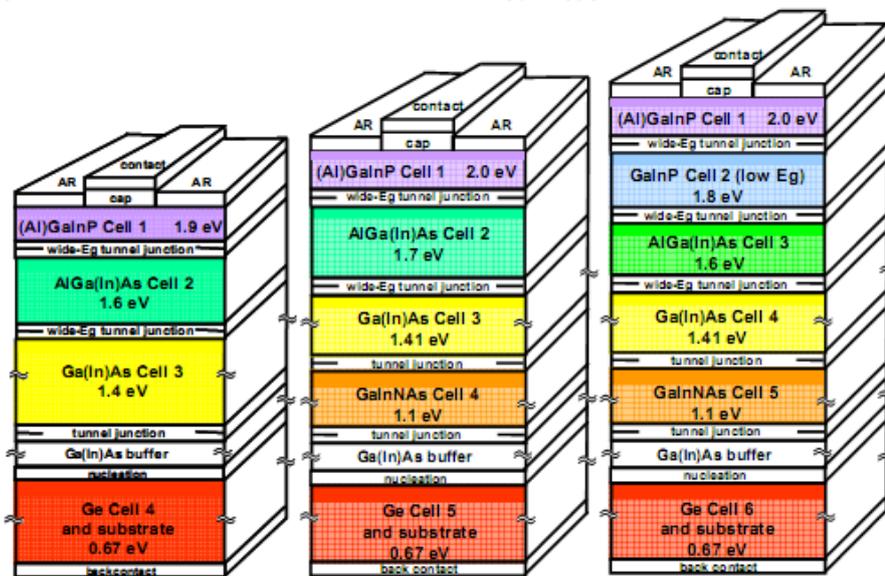


Figure 1.17 - Structure de cellule solaire avec plus de trois jonctions [20]

### 1.12.3. Ajout de boîtes quantiques dans la cellule du milieu

Pour augmenter le rendement des CSTJ, la compagnie Cyrium technologies a breveté le principe d'ajout de boîtes quantiques dans la cellule médiane (Simon Fafard, Solar cell with epitaxially grown quantum dot material, numéro de brevet 20110067752). Les boîtes quantiques assurent l'absorption accrue de photons dans la gamme du proche infrarouge et permettent ainsi d'augmenter le photocourant. La limitation viendrait du dé-piégeage des photo-porteurs des boîtes et leur recapture dans d'autres boîtes de la cellule. Ces mécanismes contribuent à augmenter la résistance globale de la CSTJ. Un équilibre doit donc être trouvé entre la densité des boîtes et la résistance de la structure CSTJ.

## Chapitre 2 : Méthodes expérimentales

Conformément à nos objectifs qui sont essentiellement d'explorer une méthode fiable, rapide et non destructive d'évaluation des non-uniformités structurales des CSTJ, un appareil commercial, le PLM 150, permettant de réaliser des cartographies en photoluminescence est apparu comme un outil de choix. Des montages de photoluminescence et de photoconductivité accessibles dans le laboratoire de Spectroscopie du Professeur Denis Morris, ont aussi été utilisés afin d'obtenir des mesures complémentaires utiles pour l'analyse des propriétés optiques locales sur de grandes surfaces des échantillons issus d'une même gaufre.

### 2.1. Réalisation de cartographie en photoluminescence :

La photoluminescence est la lumière, de longueur d'onde plus grande, que réémet un matériau après une excitation lumineuse. Dans le cas des semi-conducteurs, une excitation lumineuse dont l'énergie est plus grande que la bande interdite  $E_G$ , promeut un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Puis cet électron revient au minimum de la bande de conduction et fini par se recombiner avec un trou présent dans le maximum de la bande de valence en émettant un photon d'énergie égale à l'énergie de bande interdite  $E_G$  du matériau. Ainsi avec la photoluminescence on peut comparer et évaluer des semi-conducteurs pour se rendre compte de leurs non-uniformités à travers leurs  $E_G$ . Les cartographies en photoluminescence permettent de révéler les fluctuations de  $E_G$  et d'intensité de photoluminescence en fonction de la position du faisceau d'excitation sur la surface de l'échantillon.

Dans cette étude un appareil commercial, le PLM 150 a été utilisé. Le schéma du montage de photoluminescence utilisé pour réaliser la cartographie est illustré à la

Figure 2.1. La longueur d'onde d'excitation est de 532nm qui est dans ce cas-ci la seconde harmonique d'un laser Yag émettant à 1064 nm.

Le rayon laser est acheminé par des miroirs jusqu'à une fibre optique qui est placée à proximité de l'échantillon. Celui-ci est orienté à 45° par rapport à la fibre.

Le signal de photoluminescence est recueilli par un système de lentille de collimation. Le bras de détection contient un polariseur et un filtre passe-haut. Le faisceau est ensuite dispersé par un réseau de 600 L/mm. Le faisceau dispersé se dirige vers un miroir parabolique qui concentre chaque longueur d'onde sur un autre miroir pour le projeter enfin sur une barrette linéaire de détecteurs InGaAs.

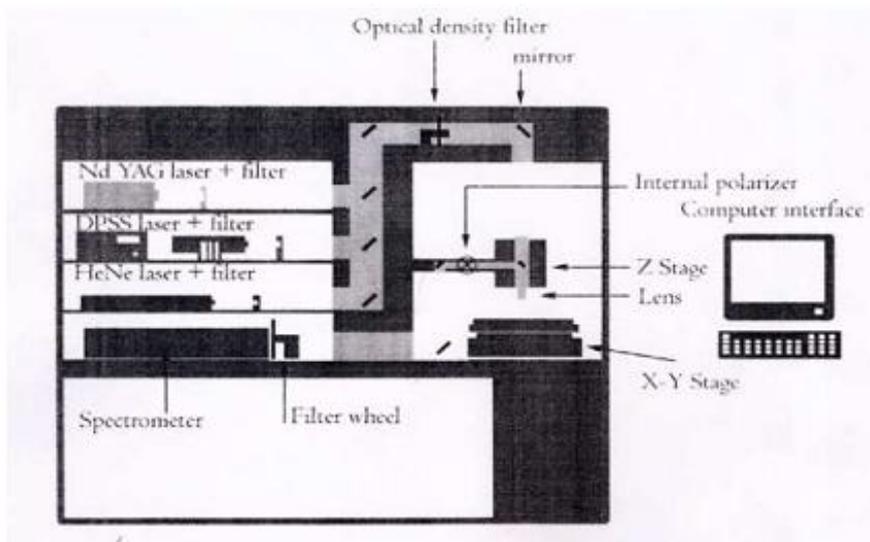


Figure 2.1 - Schéma illustrant le PLM 150 utilisé dans ce projet [8]

Dans l'appareil PLM150, le faisceau d'excitation est fixe mais un moteur commandé par ordinateur fait déplacer l'échantillon posé sur un support plan en x,y.

Le système de collimation peut être ajusté en se déplaçant uniquement sur z. Sur le trajet du faisceau, entre la source et l'échantillon sont intercalés des atténuateurs à densité optique variable et un filtre interférentiel laissant passer que la raie laser.

Néanmoins il faut noter que dans le PLM 150 l'opérateur n'a pas accès au montage optique ; tous les éléments du système sont confinés dans un bloc inaccessible et commandé par ordinateur. Seul le porte échantillon est déplacé par commande pour être accessible à l'opérateur. L'échantillon est placé au centre de celui-ci et est

maintenu par succion. Ainsi, des éléments de configuration du système essentiels pour avoir des mesures cohérentes peuvent dériver malgré l'existence de programme d'auto calibration. Par exemple, pour l'alignement du système optique, quand l'échantillon est sondé hors du point focal, une longueur d'onde différente à celle où l'échantillon est au point focal est mesurée [8]. En effet, comme le système optique est désaligné, le faisceau de photoluminescence recueilli atteint le réseau de dispersion spectrale à des endroits inattendus, puis le miroir parabolique concentre latéralement en fonction de l'angle d'incidence, chaque spectre sur la rangée de détecteurs InGaAs. Et ceci n'est pas tenu compte par le programme d'acquisition de données. Par ailleurs, on peut mesurer la puissance laser avant et après la fibre pour estimer approximativement la puissance d'excitation. De plus les mesures sont effectuées à température et à pression ambiante.

On cherche à limiter le temps d'acquisition à environ 1 heure à cause de la dérive des paramètres du système. Ainsi, des balayages de dimension autour de 20 mm par 20 mm sont réalisés dans une plage de longueur d'onde petite et avec une précision de 100  $\mu\text{m}$ .

Pour s'assurer de la fiabilité de nos mesures, il a été nécessaire de les confronter à des mesures de photoluminescence faites sur autre montage plus versatile (choix de la source et des détecteurs). Ce montage qui se situe dans le laboratoire de spectroscopie du Professeur Denis Morris au Département de physique, permet également de faire des études en fonction de la puissance d'excitation et de la température. Dans la section suivante est décrit en détail le schéma global du montage.

## **2.2. Mesures locales de photoluminescence:**

Dans la Figure 2.2 suivante est présenté un schéma simplifié du montage de photoluminescence utilisé dans ce projet :

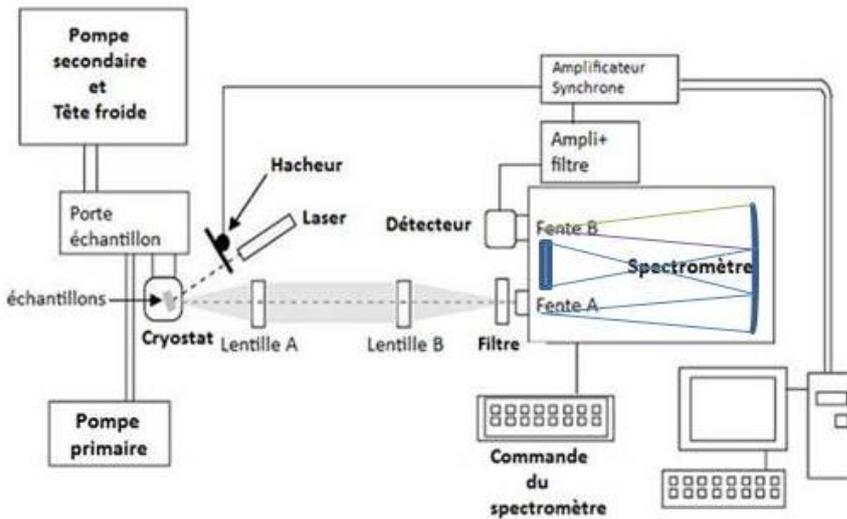


Figure 2.2 - Schéma du montage de PL utilisé dans ce projet [17]

Les échantillons sont fixés sur un porte échantillon en cuivre qui est collé au doigt froid du réfrigérateur à cycle fermé d'He. Une pompe mécanique fait le vide jusqu'à une pression de 20 mTorr. Le porte échantillon peut être refroidi jusqu'à 20K. Un élément chauffant et un contrôleur de température permet d'ajuster la température du porte-échantillon entre 20K et 300K. Un système de lentilles de collimation est placé face à la fenêtre optique du réfrigérateur pour diriger le faisceau de photoluminescence vers le détecteur. Les fentes d'entrée et de sortie du spectre sont ajustables à l'aide de vis micrométrique. Un spectromètre contrôlé par ordinateur disperse les longueurs d'onde du faisceau de photoluminescence vers un détecteur photomultiplicateur qui est refroidi à l'aide d'un module à effet Peltier. Le courant de sortie du photomultiplicateur est conduit vers l'entrée d'un amplificateur (de type SR 570 Stanford research) qui convertit le courant en une tension. La sortie de l'amplificateur est branchée à l'entrée d'un amplificateur synchrone (modèle SR530 de Stanford research) utilisé en mode tension. Le signal amplifié correspond au signal modulé à la fréquence d'un hacheur mécanique de fréquence réglée à 330 Hz pour éviter de travailler avec des fréquences correspondant aux sources de bruit les plus importants (60 Hz, 120Hz)

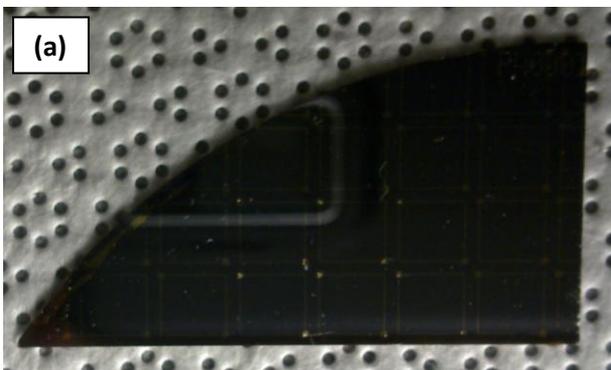
Un programme Labview permet de tracer l'intensité de photoluminescence en fonction de la longueur d'onde. Les sources d'excitation utilisées sont des diodes laser. Les longueurs d'onde choisies pour nos mesures de photoluminescence sont 532 nm, 683 nm, 786 nm, 840 nm et 890 nm.

Les faisceaux sont dirigés au centre de chaque carré de contact électrique réalisé sur la face avant des échantillons. Ainsi on recueille le signal de photoluminescence pour plusieurs endroits sur la gaufre pour comparer leurs caractéristiques spectrales.

### 2.3. Mesures de photoconductivité :

La photoconductivité est la propriété qu'ont certains matériaux de changer leur conductivité en fonction d'une excitation lumineuse. Dans le cas des semi-conducteurs, une excitation lumineuse d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de bande interdite  $E_G$  fait transiter un électron de la bande de conduction à la bande de valence. Plus le nombre d'électrons présent dans la bande de conduction est grand plus la conductivité du semi-conducteur augmente. Cette propriété est utilisée pour caractériser les non-uniformités structurales des cellules solaires. En effet, des variations dans la photoconductivité, impliquent une fluctuation de défauts dans les échantillons de CSTJ.

Le montage expérimental pour les mesures de photocourant sur les échantillons est présenté schématiquement dans la figure 2.3 suivante :



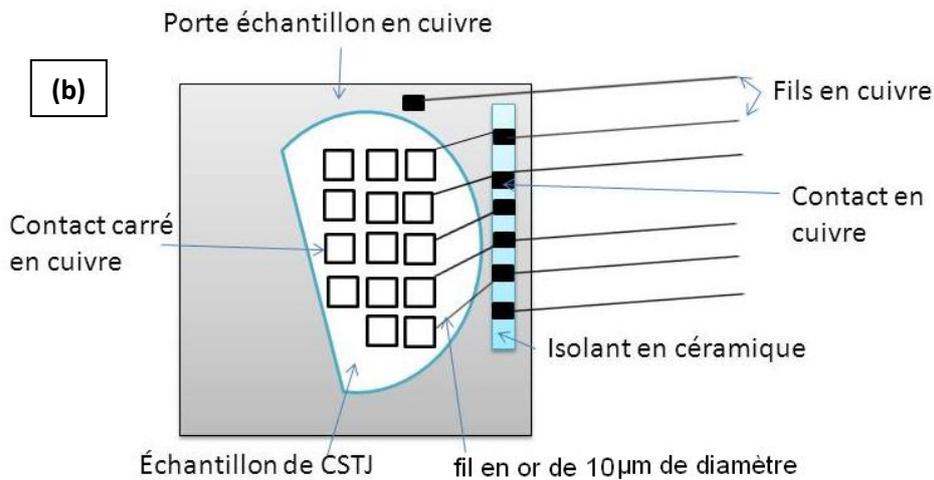


Figure 2.3 – (a) Photographie d'un échantillon de CSTJ et ses contacts électriques en carré sur sa face avant, (b) Schéma de montage des échantillons pour les mesures de photoconductivité

Les échantillons sont collés avec de la laque d'argent sur une plaquette de cuivre pour assurer un bon contact électrique. Des fils d'or relient électriquement les contacts avants de l'échantillon à une plaquette de cuivre isolée du porte échantillon par de la céramique. Puis un fil de cuivre gainé est soudé sur la plaquette de cuivre au-dessus de la céramique, l'autre extrémité est soudée à un connecteur. Le contact avec la face arrière est assuré par un fil de cuivre soudé sur le porte échantillon et terminé par un connecteur. Les deux connecteurs sont branchés sur une prise qui elle-même est reliée à un câble électrique par des fils de cuivre. Le câble est branché à l'amplificateur (modèle SR 570) de courant en entrée (Figure 2.4). La sortie de l'amplificateur de courant est branchée sur l'amplificateur synchrone de tension (modèle SR 530). Un hacheur mécanique module le faisceau d'excitation.

Une lampe blanche couplée à un monochromateur est utilisé comme source d'excitation à longueur d'onde variable. Les balayages couvrent la région comprise entre 400 nm et 1300 nm.

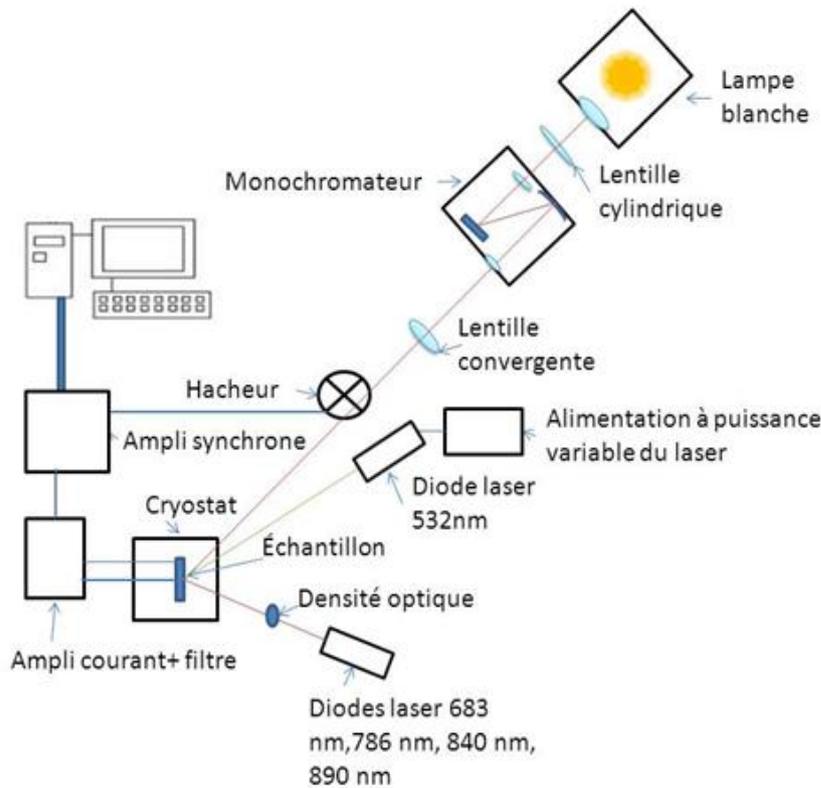


Figure 2.4 - Schéma de montage pour les mesures de photoconductivité

Un programme Labview permet d’acquérir des spectres de photocourant (intensité du photocourant versus longueur d’onde) de la CSTJ.

Les cellules peuvent également être excitées simultanément par des faisceaux laser en continu à diverses longueurs d’onde d’excitation. Ces mesures ont pour but d’étudier l’effet sur le photocourant total, des porteurs en excès photogénérés dans les diverses couches de la cellule.

On distingue le photocourant continu et le photocourant alternatif mesurés avec un tel montage. En effet, l’excitation par les rayons laser n’étant pas modulée par le hacheur mécanique, il induit un photocourant continu. Ce dernier est mesuré à l’aide d’un multimètre. Pour les mesures en alternatif, le photocourant continu est filtré par l’amplificateur de courant SR 570 qui est placé avant l’amplificateur synchrone.

L’ensemble des mesures de photoconductivité est effectuées à pression et à température ambiante du laboratoire.

## Chapitre 3 : Résultats et analyses

### 3.1. Cartographie en photoluminescence :

#### 3.1.1. Excitation à 532 nm :

Les logiciels « map-display » et « multi-curve display » permettent de visualiser les spectres et les cartographies en intensité de photoluminescence des échantillons.

Dans cette étude, sont évaluées l'intensité maximale de photoluminescence, la longueur d'onde au maximum de photoluminescence ainsi que la pleine largeur à mi-hauteur de la raie principale.

Le laser utilisé est de 532 nm. D'autres mesures effectuées avec une excitation laser à 1064 nm seront présentées par la suite. Les mesures sont faites à température ambiante. La puissance laser à la sortie de la fibre optique a pu être mesurée à 13 mW. A cette puissance d'excitation et à 300 K, le signal de photoluminescence est présent seulement entre 820 nm et 920 nm, correspondant à l'émission de la région médiane de la CSTJ faite d'InGaAs. Les cartographies sont donc réalisées entre 820 nm et 920 nm avec des pas de balayage de 100  $\mu\text{m}$ . Ainsi, avec ces paramètres, une cartographie de surface 20 mm sur 18 mm prend une durée d'une heure pour être réalisée (Fig.22)

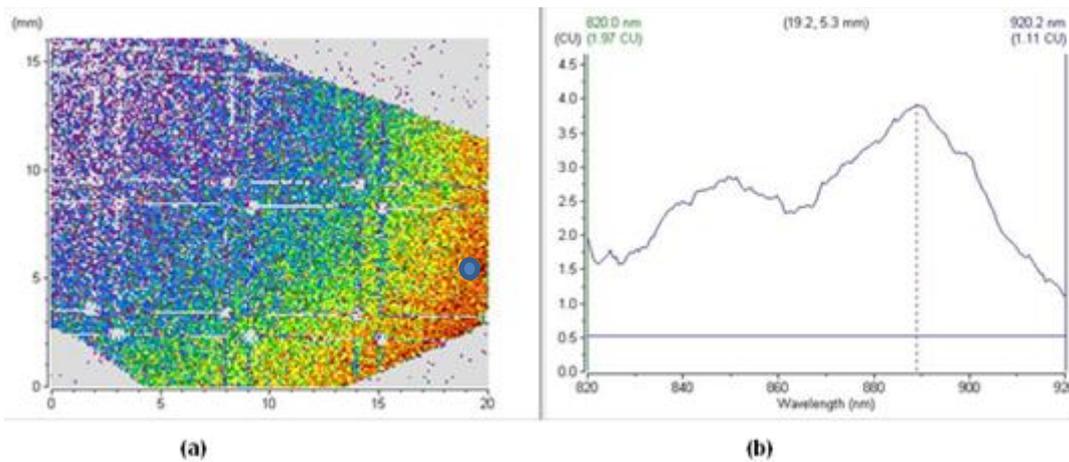


Figure 3.1 - (a) Cartographie en intensité maximale de photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Profil de spectre en un point sur la cartographie en (a).

On constate dans cette cartographie en intensité maximale de photoluminescence (figure 3.1.a), une inhomogénéité en intensité qui se matérialise ici par différentes couleurs. Le code de couleur va du rouge pour le maximum au violet pour le minimum. La décroissance en intensité de photoluminescence est généralement due à la présence d'une plus ou moins grande densité de défauts agissant comme centre de recombinaison non radiatif. Les régions en gris (sans photoluminescence) correspondent aux contacts métalliques sur l'échantillon. Il arrive aussi que le signal de photoluminescence soit plus faible que le niveau de bruit de fond, dans ce cas aussi la photoluminescence n'est pas évaluée. En outre avant chaque mesure la puissance d'excitation est mesurée pour s'assurer d'avoir les mêmes paramètres de comparaison et la source lumineuse est ramenée à l'origine par ordinateur. Aussi les échantillons sont nettoyés pour avoir des surfaces propres et comparables (voir annexe A).

La Figure 3.1.b montre le spectre mesuré en un point donné de la cartographie. Cependant, des points de mesure peuvent avoir les mêmes intensités maximales mais des spectres différents. C'est pour cette raison qu'il est important de comparer le profil de plusieurs spectres pour se rendre compte réellement des fluctuations. La raie autour de 850 nm provient de la photodiode d'InGaAs et la raie autour de 900 nm pourrait provenir de l'émission collective des boîtes quantiques présente dans la cellule intermédiaire. La Figure 3.2.b présente le profil des spectres suivant le tracé défini sur la Figure 3.2.a, et la Figure 3.2.c présente l'histogramme correspondant des fluctuations d'intensité de la cartographie. L'écart-type est de 0.81 comptes par rapport à une moyenne d'intensité de photoluminescence de 1.77 comptes, soit une amplitude de fluctuation d'environ 46%. Probablement que cette fluctuation d'intensité est associée à une densité de défauts agissant comme centre de recombinaison non radiative, et variant d'un point à l'autre sur la gaufre. On remarque que les variations spatiales sont toutefois assez lentes

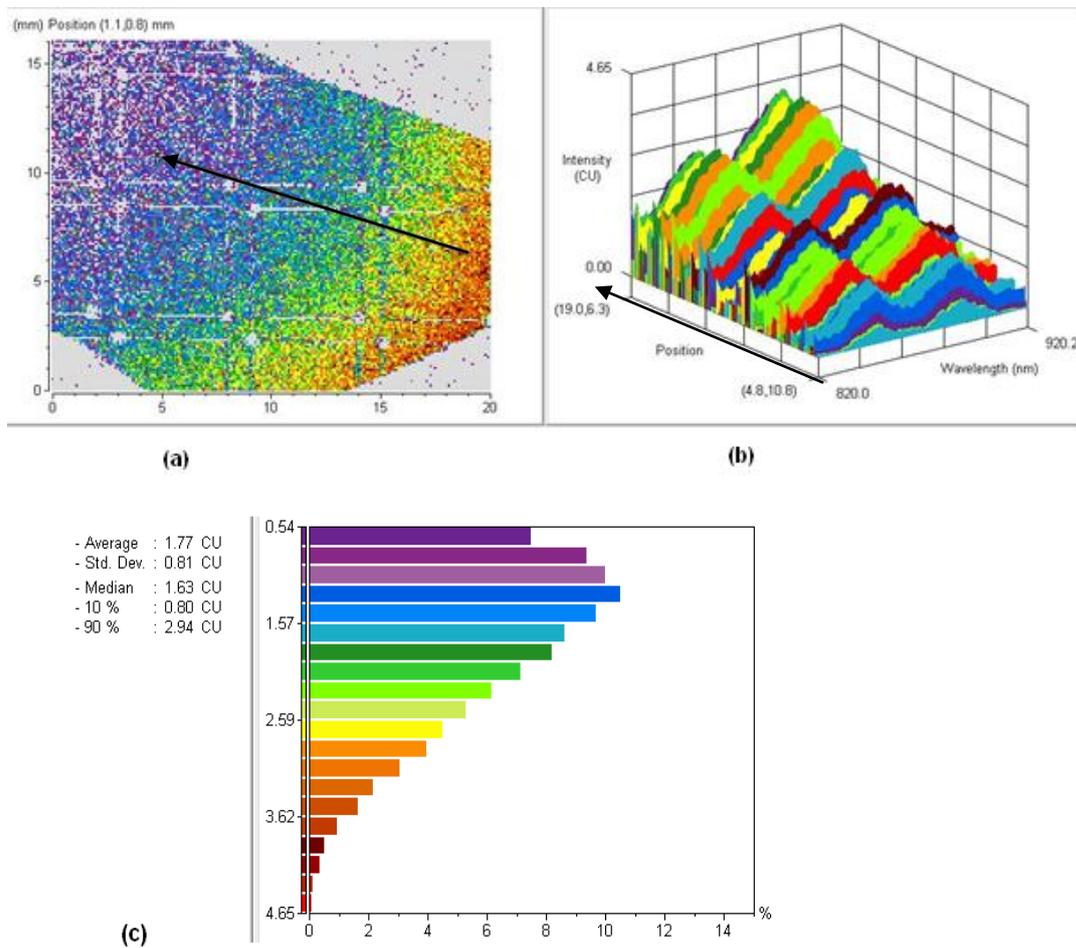


Figure 3.2 - (a) Tracé sur la cartographie en photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Spectres le long du tracé en (a), (c) Histogramme et échelle de couleur de (a)

La Figure 3.3 suivante présente une cartographie réalisée sur un autre échantillon issu de la même gaufre que l'échantillon présenté dans la Figure 3.2 et avec une zone sondée moins étendue. On remarque une moyenne des intensités (5.26 comptes) plus forte dans cette région de la gaufre. L'amplitude des fluctuations autour de la moyenne est de 19 % pour une cartographie de surface 12 mm sur 12 mm.

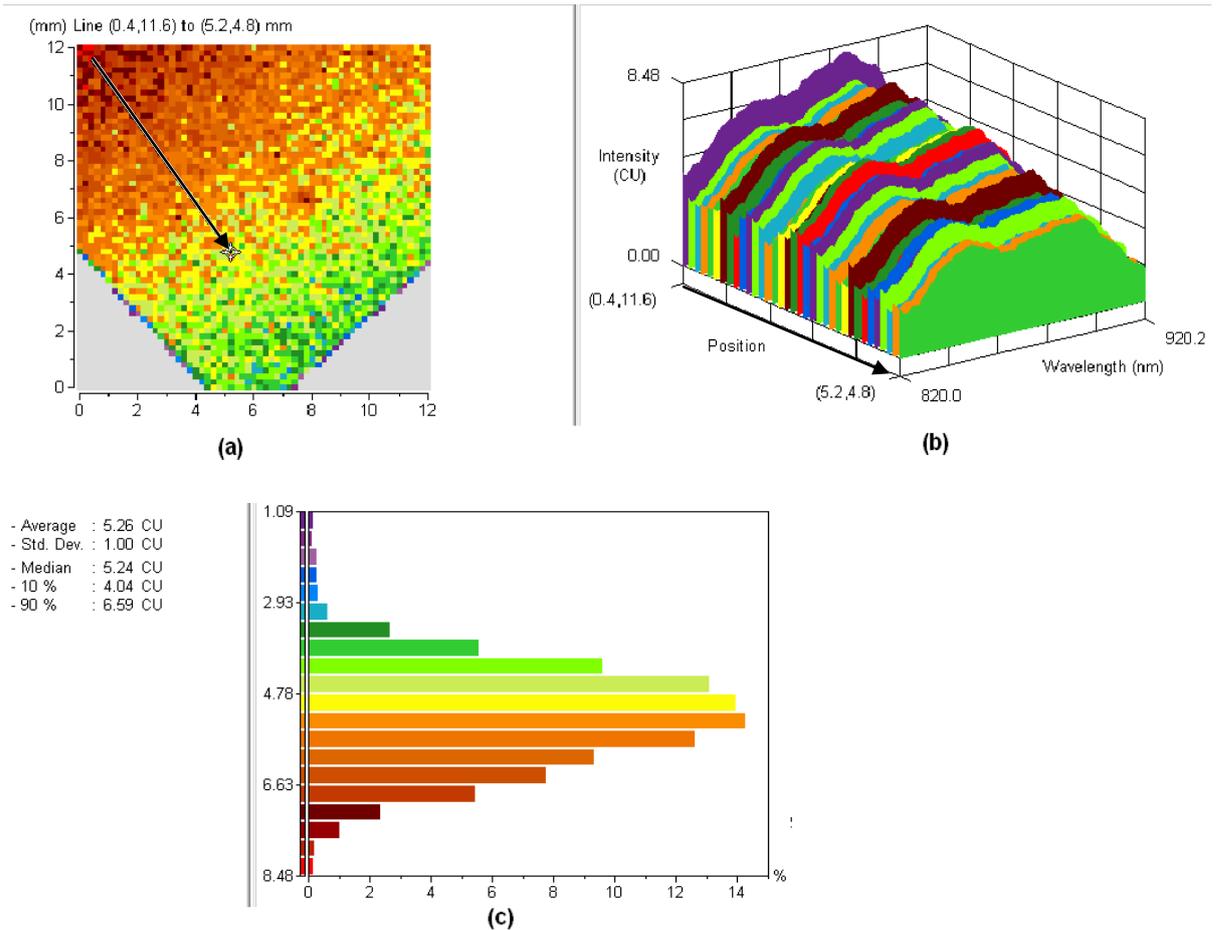


Figure 3.3 - (a) Tracé sur la cartographie en photoluminescence de l'échantillon 2, (b) Spectres le long du tracé en (a), Histogramme de (a)

Les Figures 3.4 et 3.5 suivantes montrent des cartographies en longueur d'onde de la raie d'intensité maximale pour les deux échantillons décrits précédemment. On remarque en effet une moindre fluctuation en longueur d'onde par rapport aux intensités: celle-ci est de 0.01 % dans la cartographie de la Figure 3.4, et une dispersion de 0.25 % dans la cartographie de la Figure 3.5. Un décalage en longueur d'onde pourrait être associé à des variations de composition qui peuvent être causées par une variation de température sur la surface de la gaufre lors de la croissance. En effet l'arsénique étant plus volatil que le gallium une fluctuation de température induit une variation de pourcentage de chaque élément dans la composition de l'InGaAs. A 300K, on observe toutefois très peu de décalage en longueur d'onde des raies d'émission de l'InGaAs (cellule médiane), ce qui montre que cette couche est très uniforme en composition. On verra à la section suivante que les mesures de photoluminescence à

basse température permettent de mieux mettre en évidence les fluctuations locales de composition dans cette couche ainsi que dans la cellule du dessus.

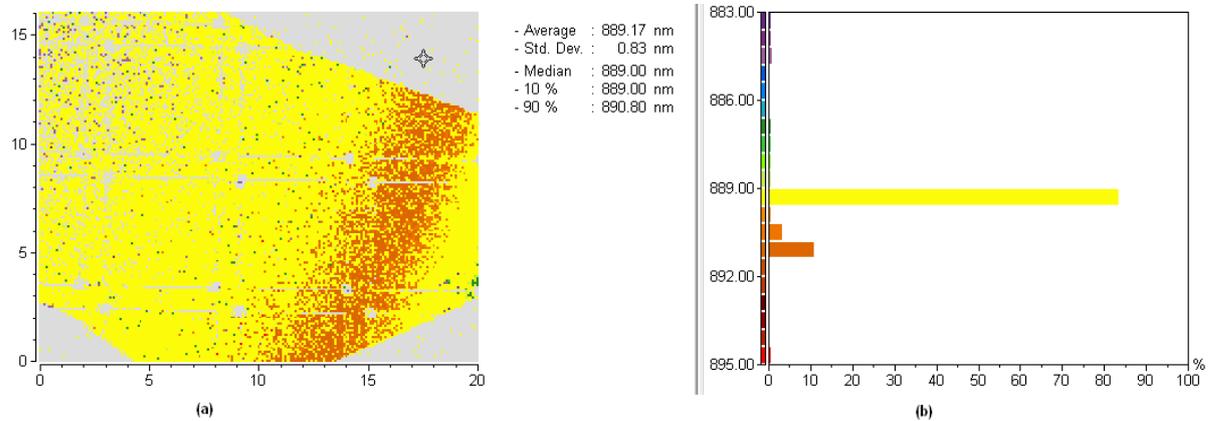


Figure 3.4 - (a) Cartographie en longueur d'onde de photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Histogramme de (a)

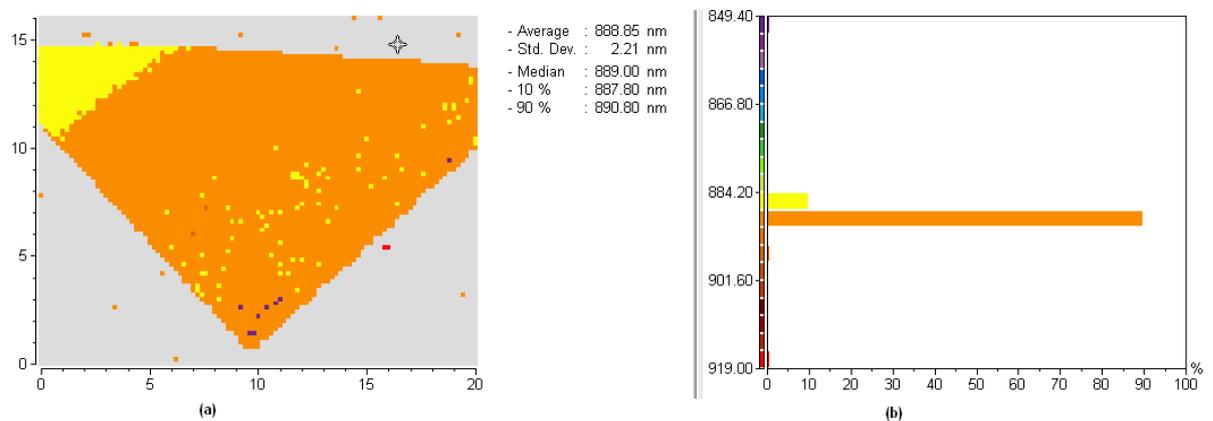


Figure 3.5 - (a) Cartographie en longueur d'onde de photoluminescence de l'échantillon 2, (b) Histogramme de (a)

La Figure 3.6 suivante montre la cartographie de la pleine largeur à mi-hauteur de la raie principale (la raie d'intensité maximale). Ce paramètre est relié à l'amplitude des variations locales de composition contrainte dans une couche. On remarque des régions de dispersion correspondant à des largeurs de moyenne autour de 32.5 nm et des largeurs plus grandes de moyenne d'environ 75 nm. Ceci est un artéfact qui

viendrait du fait que les deux bandes de photoluminescence sont non résolues pour certaines positions sur l'échantillon.

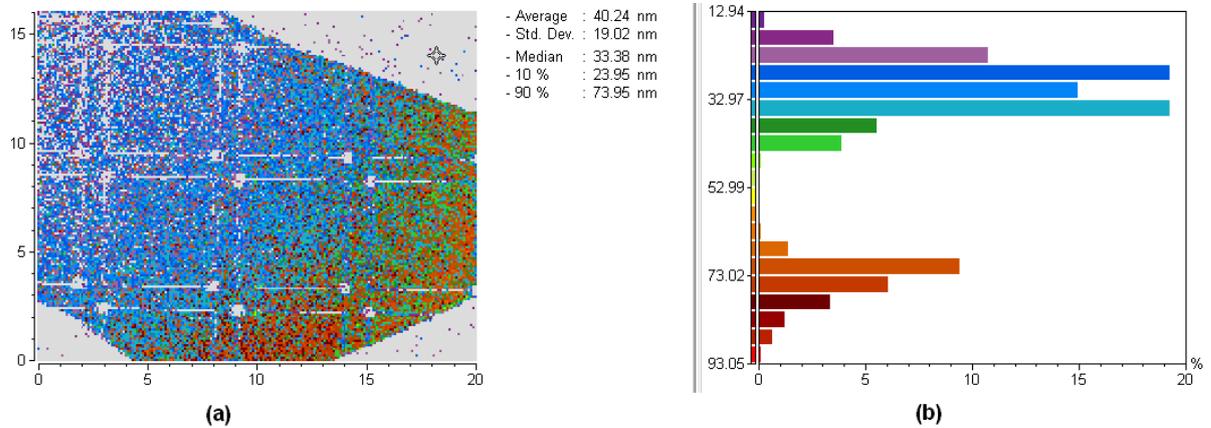
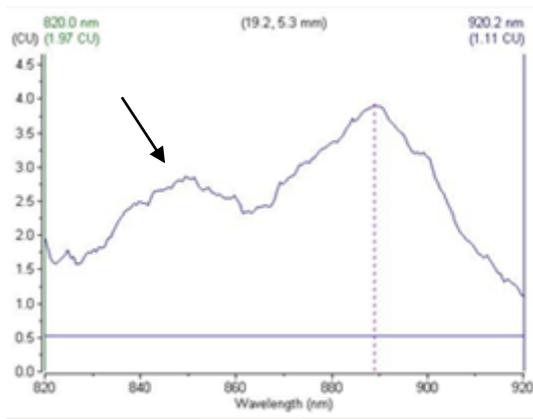
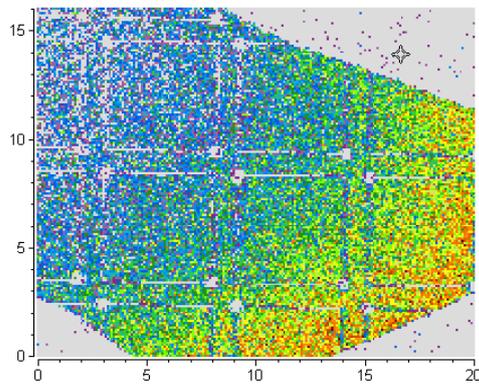


Figure 3.6 - (a) Cartographie de la pleine largeur à mi-hauteur de photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Histogramme de (a).

Pour cartographier la seconde raie plus petite en intensité, les données de mesure à une longueur d'onde fixe 850 nm sont présentées aux Figures 3.7 et 3.8. Les histogrammes des variations d'intensité pour les deux échantillons pris à des endroits différents d'une même gaufre révèlent des dispersions en intensité différentes : dans l'échantillon 2 de la Figure 3.8, les intensités sont plus fortes comparativement à la cartographie de l'échantillon de la Figure 3.7. Les variations sont respectivement de 16 % et 49 %. Cette différence indique encore une fois que les variations spatiales d'intensité de photoluminescence sont lentes.

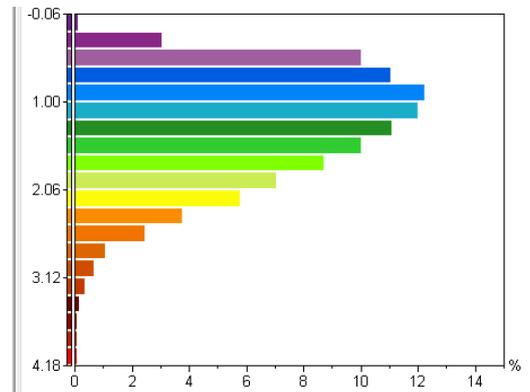


(a)



(b)

- Average : 1.32 CU  
 - Std. Dev. : 0.65 CU  
 - Median : 1.24 CU  
 - 10 % : 0.51 CU  
 - 90 % : 2.21 CU



(c)

Figure 3.7 - (a) Spectre de la plus petite raie de photoluminescence. (b) Cartographie en photoluminescence de cette raie à une longueur d'onde fixe : 850 nm de l'échantillon 1, (c) Histogramme de (b).

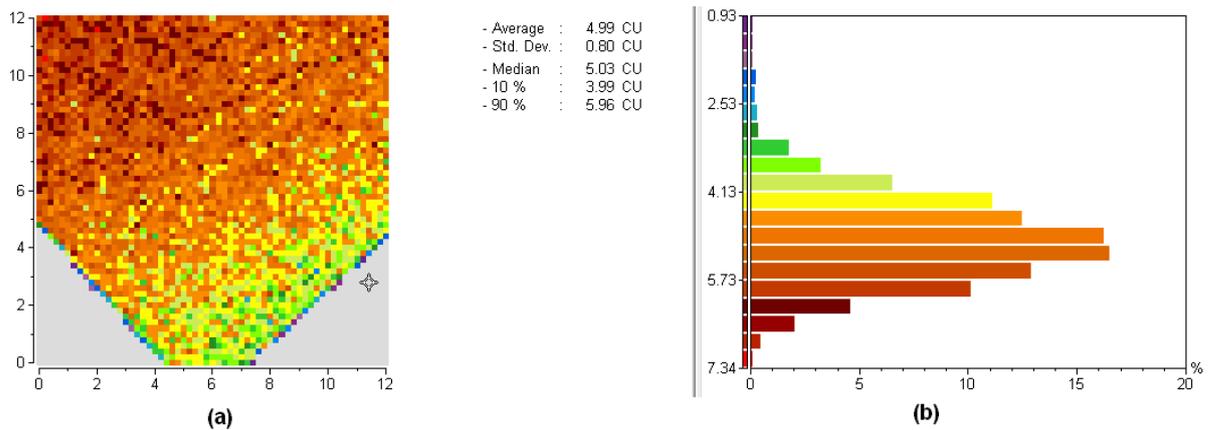
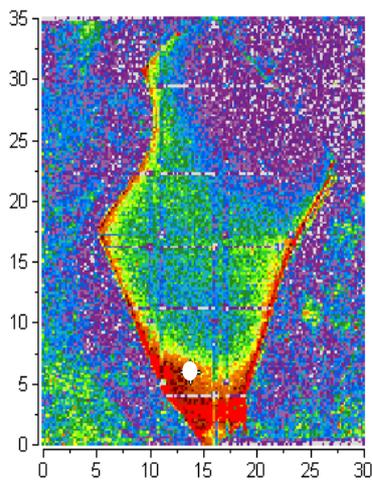


Figure 3.8 - (a) Cartographie en intensité de photoluminescence à une longueur d'onde fixe : 850 nm de l'échantillon 2, (b) Histogramme de (a).

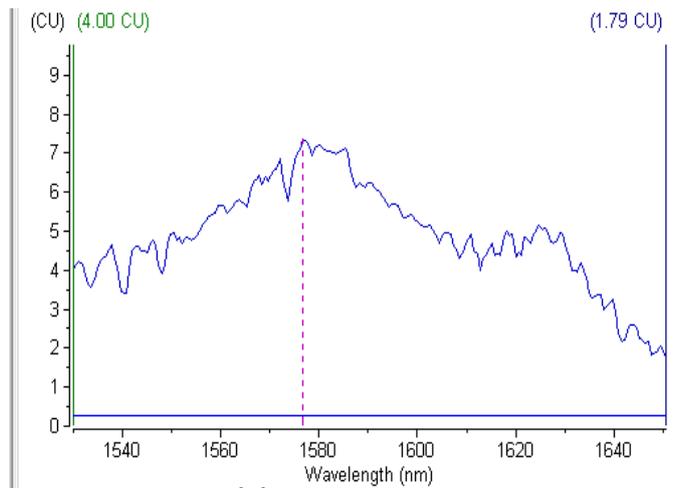
### 3.1.2. Excitation à 1064 nm

Dans les CSTJ, la qualité cristalline du substrat est déterminante pour minimiser les défauts des couches qui sont épitaxiées au-dessus d'elle. C'est pourquoi l'analyse de cette région est aussi importante pour se rendre compte des défauts dans les structures CSTJ.

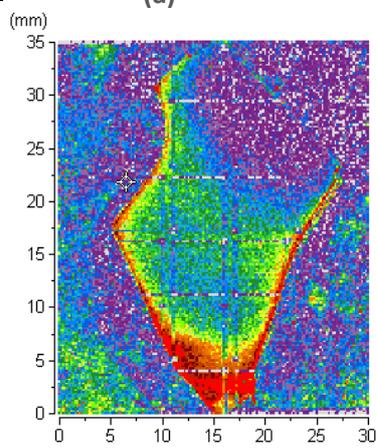
La cartographie réalisée avec un laser Yag à 1064 nm et à température ambiante révèle une raie d'émission très large entre 1520 et 1650 nm correspondant à la région du Ge (Figure 3.9, Figure 3.10). Ceci pourrait suggérer la présence importante de défauts dans cette partie de la CSTJ, mais le Ge qui a une bande interdite indirecte à un large spectre de luminescence. La puissance du laser est d'environ 15 mW sur l'échantillon et les mesures sont réalisées avec des pas de 200  $\mu\text{m}$ . Cependant, la cartographie de la Figure 3.9 révèle des intensités de même ordre sur l'échantillon que sur le porte échantillon. Ceci est dû à la gamme de détection dans l'infrarouge. Une zone centrée sur l'échantillon a été isolée pour l'analyse (Figure 3.11). On remarque en effet des fluctuations d'intensité avec beaucoup de bruit, et les spectres étant très larges, la position de la raie principale est moins bien définie. Dans la zone analysée, les fluctuations autour de la moyenne sont de 34 %. Ces variations pourraient être dues au fort dopage du Ge.



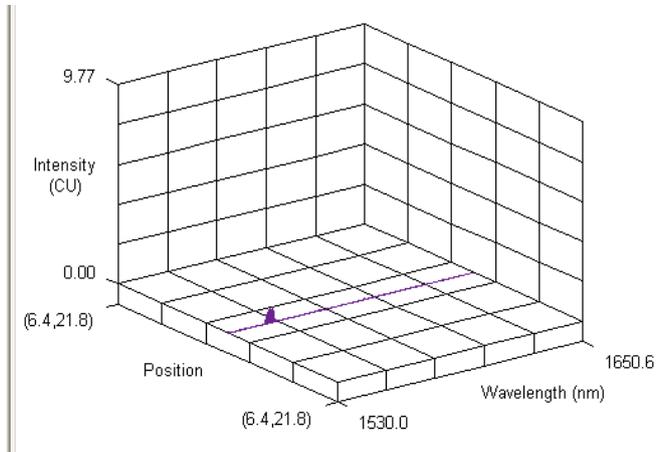
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.9 - (a)Cartographie en intensité de photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Spectre d'intensité maximale en un point sur la cartographie en (a). La région en rouge délimite la zone de l'échantillon. A l'extérieur de cette zone on voit un faible signal qui provient de la diffusion et de la radiation IR du porte échantillon. Le spectre du porte échantillon est totalement différent de celui du substrat de Ge ( (c) et (d) ).

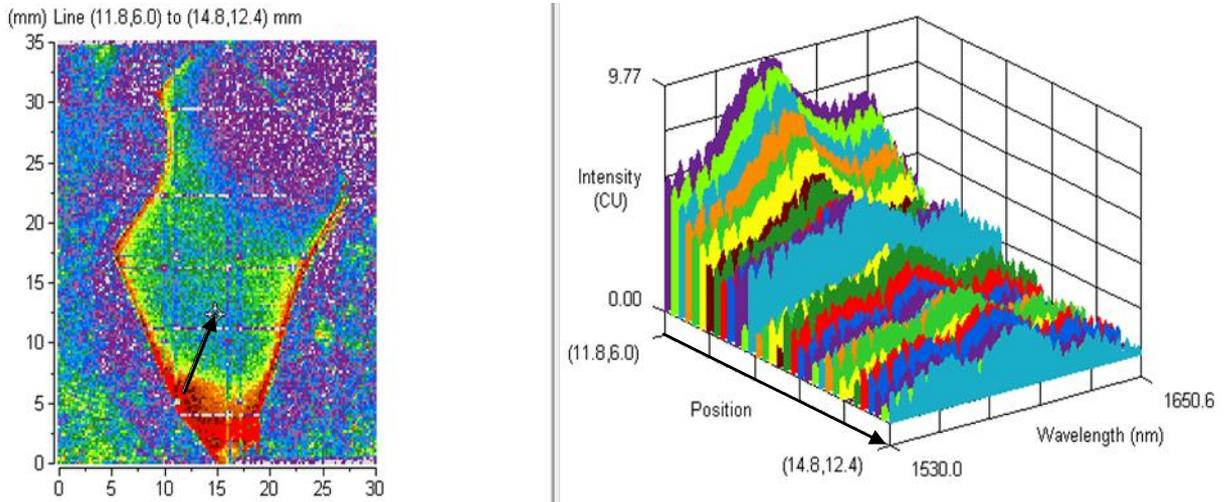


Figure 3.10 - (a) Tracé sur la cartographie en intensité de photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Spectres suivant le tracé sur la cartographie en (a)

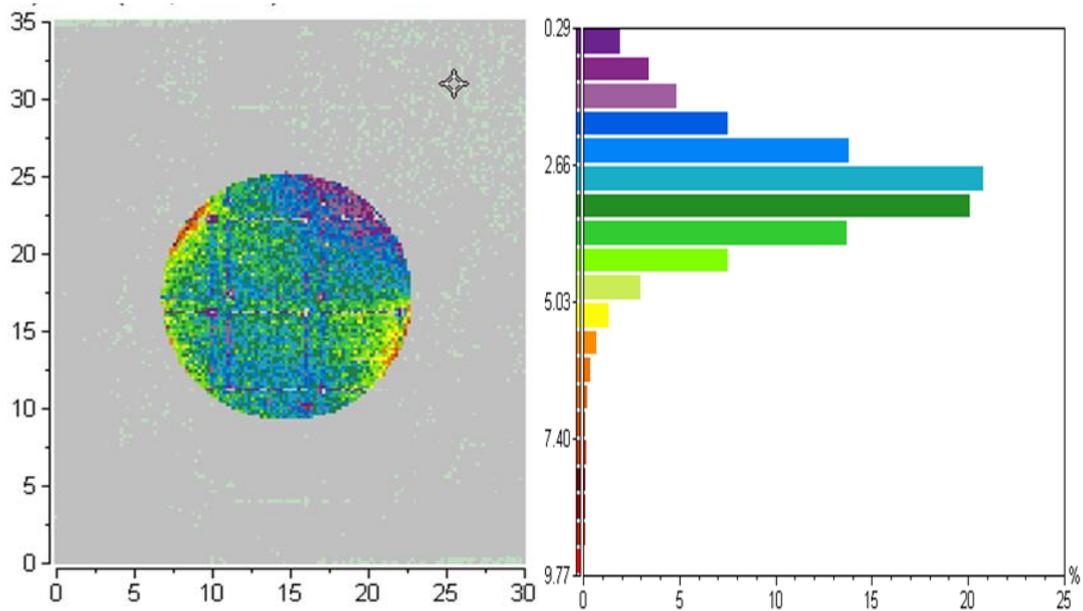


Figure 3.11 - (a) Cartographie en intensité de photoluminescence, sur une bande réduite en longueur d'onde de l'échantillon 1, (b) Spectre Histogramme de (a)

Pour la cartographie en longueur d'onde (Figure 3.12), on peut isoler la zone du porte échantillon puisque les spectres ne sont pas de même nature. La gamme d'émission de la raie principale est donc moins fluctuante par rapport aux intensités. Ceci suggère

que les défauts sont moins dus aux fluctuations de composition des matériaux mais aux défauts du type centre de recombinaisons non-radiatives. Car les fluctuations de composition en plus de baisser l'intensité de photoluminescence, induisent également des dispersions en longueur d'onde dans la région de la raie cherchée.

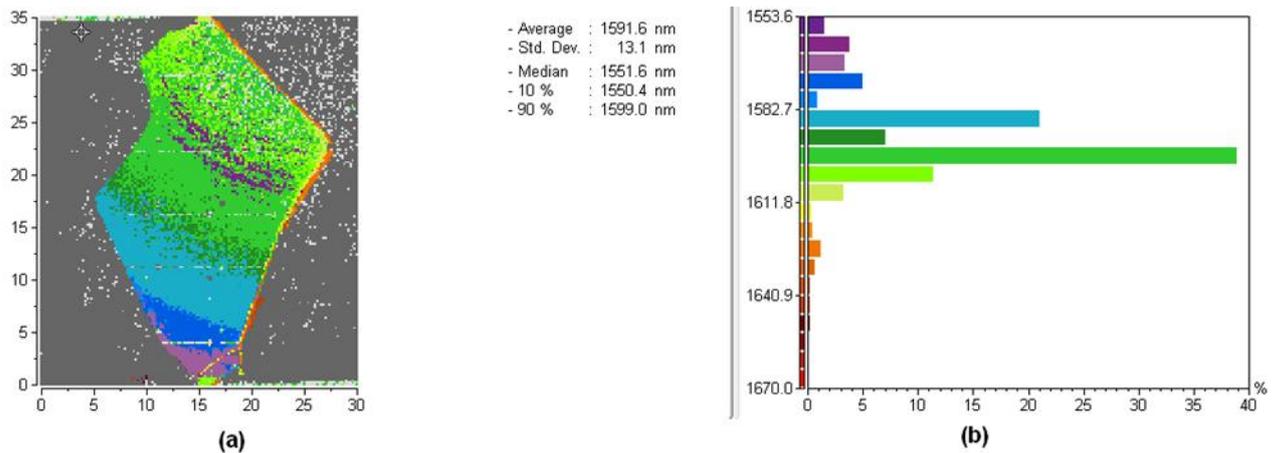


Figure 3.12 - (a) Cartographie en longueur d'onde de photoluminescence de l'échantillon 1, (b) Histogramme de (a)

### 3.1.3. Perspectives :

Les résultats présentés dans ce chapitre indiquent qu'il existe des variations d'intensité de photoluminescence importantes sur de grandes régions sondées. On observe toutefois peu de fluctuations en longueur d'onde des spectres, ce qui indique qu'à 300K les fluctuations de composition dans la photodiode du milieu de la structure CSTJ ont peu d'effet sur les spectres d'émission.

L'appareil de cartographie en photoluminescence est limité par le fait que le temps d'acquisition est trop long pour effectuer des balayages fins (pas inférieurs à 100  $\mu\text{m}$ ) sur de grandes surfaces d'échantillon (environ 100 mm). Puis il n'y a pas de possibilité de faire des mesures de photoluminescence à basse température. Par ailleurs la puissance d'excitation laser est trop faible pour voir la photoluminescence provenant de la couche InGaP. Enfin le logiciel ne fournit pas assez de données pour une analyse plus performante des mesures. Ainsi on est limité à des histogrammes d'intensité maximale, de longueurs d'onde à intensité maximale et de sa pleine largeur à mi-hauteur. Il serait intéressant d'avoir accès aux données d'intensité intégrée sur un

spectre et de pouvoir choisir une longueur d'onde fixe d'analyse quelconque après la mesure.

Alors pour révéler des pics qui n'ont pas été observé dans le PLM 150, un montage de photoluminescence avec un système de refroidissement pouvant atteindre 20K a été utilisé dans le laboratoire de spectroscopie du Professeur Denis Morris.

### 3.2. Mesures locales de photoluminescence en fonction de la température

La cartographie en photoluminescence de l'échantillon 1 utilisé pour les mesures locales de photoluminescence est présentée dans la figure 3.13 ci-dessous. L'illumination est centrée sur chaque carré correspondant aux positions numérotées de 1 à 7.

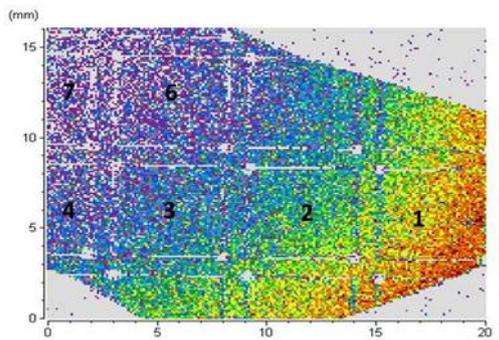


Figure 3.13 - Cartographie en photoluminescence et numérotation des positions d'excitation de l'échantillon 1

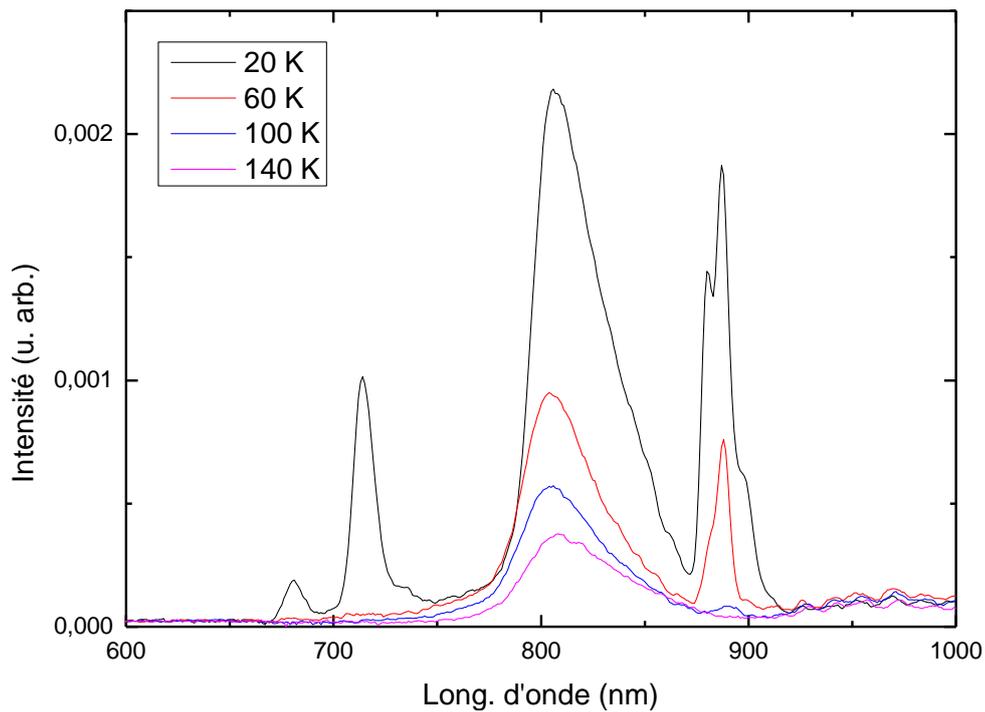


Figure 3.14 - Mesures de photoluminescence en fonction de la température à la position 6 de l'échantillon 1. L'excitation laser est à 532 nm. La puissance d'excitation est de 20 mW focalisée sur une tache d'environ 200  $\mu\text{m}$  de diamètre.

La photoluminescence à basse température permet d'observer différentes raies d'émission comme le révèle la figure 3.14. On remarque un changement d'intensité de photoluminescence des différentes raies en fonction de la température ; ceci est associé à deux effets combinés : i) la présence de phonons qui ouvrent un autre canal de recombinaisons non-radiatives , ii) l'effet de la température sur la diffusion des photoporteurs, car plus la température augmente plus les photo-porteurs entrent en collision avec les phonons et sont diffusés dans d'autres régions de la CSTJ.

La Figure 3.15 suivante présente les spectres de photoluminescence obtenus sur plusieurs endroits différents de la gaufre à 20 K, pour une excitation laser à 532 nm et une puissance de 20 mW. La figure 3.16 illustre l'origine des différentes raies observées. Les deux raies de photoluminescence autour de 700 nm (1,2) correspondant à la région d'émission de l'InGaP, disparaissent rapidement au fur et à mesure que la température augmente. C'est pourquoi ces raies n'avaient pas pu être observées dans les mesures de cartographie puisqu'elles se faisaient à température ambiante. Le fait qu'on observe deux raies dans cette région pourrait être dû au phénomène d'arrangement des atomes d'In et de Ga suivant les plans (111) de la structure zinc-blende de l'InGaP et qui a une influence sur la largeur de sa bande interdite (résultats observés également par le Professeur Denis Morris sur des

échantillons d'InGaP). La région de l'InGaAs se révèle aussi par une apparition de deux pics autour de 820 nm et 890 nm (3,5). Il s'agirait de l'émission collective des boîtes quantiques présentes dans la cellule en plus de l'émission de l'InGaAs car les boîtes quantiques de la compagnie Cyrium Technologies émettent autour de 900 nm. Aussi, on observe un dédoublement de cette raie émettant à 887 nm et à 890 nm (4,5) : ceci pourrait s'expliquer respectivement par l'émission de la couche de mouillage 2D et des boîtes quantiques.

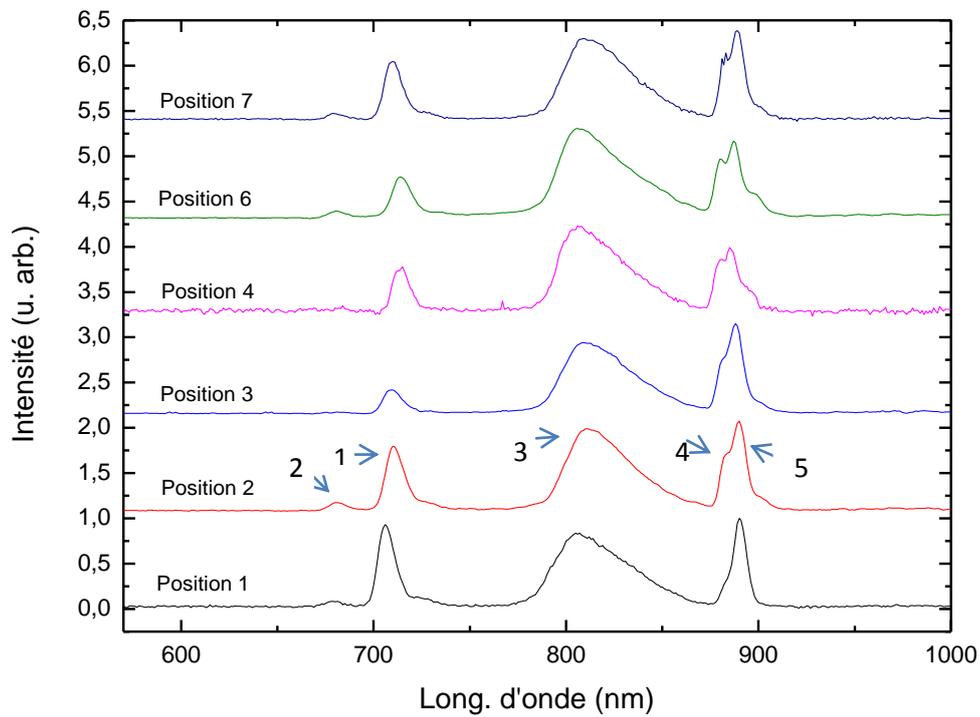


Figure 3.15 - Mesures de photoluminescence à 20 K en fonction de la position sur l'échantillon 1 (voir Figure 3.13). L'excitation laser est de 532 nm, sa puissance de 20 mW et le spot sur l'échantillon de diamètre 200 $\mu$ m. Les courbes sont normées par l'intensité maximale.

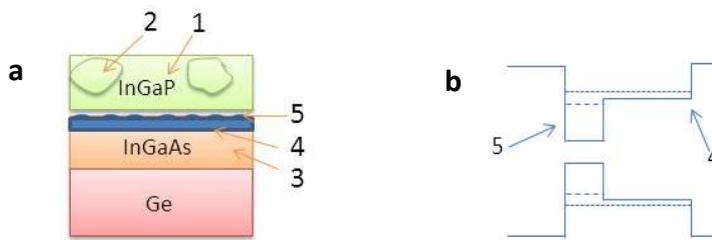


Figure 3.16 - Origine des raies de la Figure 3.15 : a) 1. Couches d'InGaP, 2. Illot d'InGaP dus aux ségrégations de phase, 3. Cellules d'InGaAs, 4. Couche de mouillage 2D, 5. Boîtes quantiques ; b) Diagramme d'énergie de la couche de mouillage 2D et des boîtes quantiques.

Dans ce montage de photoluminescence, l'intensité mesurée par le détecteur dépend de son efficacité quantique. Il est donc plus fiable de suivre l'évolution d'une seule même raie. Ainsi en observant la photoluminescence de l'InGaP par exemple sur plusieurs endroits de la gaufre, on observe des variations d'intensité témoignant des différences au niveau du matériau dans cette région de la CSTJ (Figure 3.15). L'écart-type pour ces 6 mesures est 0.2 comptes par rapport à une moyenne de 0.56 comptes, soit une fluctuation d'intensité d'environ 36 %. L'origine de cette variation d'intensité peut être due à plusieurs facteurs comme la fluctuation dans la densité de défauts piégeant les porteurs, ou simplement la migration des porteurs photo-générés vers d'autres photodiodes de la CSTJ pour émettre à une longueur d'onde différente. Il faut se rappeler que la photoluminescence des CSTJ est influée par différents matériaux plutôt que simplement une fluctuation de composition ou des impuretés venant d'un seul matériau. L'approche qui devrait être adoptée ici serait d'évaluer globalement les non-uniformités et leurs influences sur les performances des CSTJ. Il est pour cette raison intéressant d'effectuer des mesures de photoconductivité pour évaluer l'influence des non-uniformités sur le photocourant ; c'est l'objet de la prochaine section.

Par ailleurs, en suivant l'évolution de la raie émettant autour de 890 nm, on s'aperçoit que son dédoublement disparaît parfois en fonction de la position sondée : ceci suggère que les niveaux énergétiques dans le puits de la couche de mouillage est proche de ceux des boîtes quantiques.

### 3.3. Mesures de photoconductivité :

Le même échantillon et la même numérotation que pour les mesures de photoluminescence locale sont utilisés ici (voir Figure 3.13).

Afin de se rendre compte de la fiabilité des mesures de photocourant, des mesures de résistance et de courant-tension sont effectuées. La figure 3.17 suivante présente la caractéristique des échantillons mesurés dans ce projet. On s'assure ainsi qu'il n'y ait pas de court-circuit lors de la métallisation de la face arrière des échantillons pouvant altérer l'analyse des mesures.

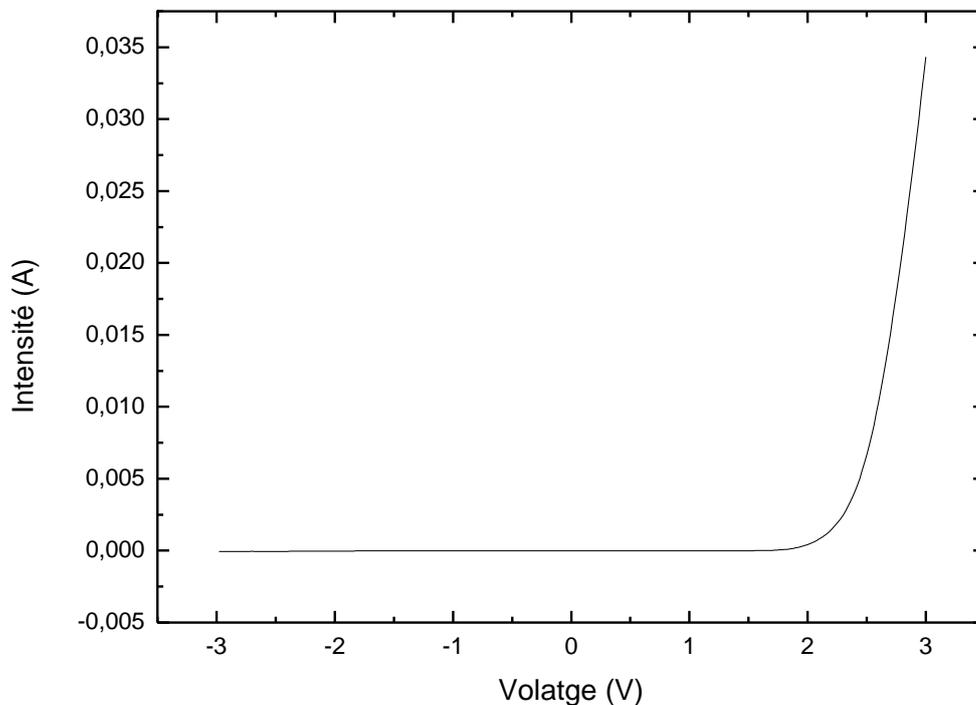


Figure 3.17 - Caractéristique courant-tension de l'échantillon 1

On remarque alors une allure normale de la caractéristique courant-tension. Lorsqu'on mesure la résistance totale entre les contacts du dessous et du dessus de nos cellules de 5 mm par 5 mm à l'aide d'un multimètre, on trouve 10 k $\Omega$ . En comparaison les

échantillons court-circuités à cause des opérations de fabrication ont une faible résistance de quelques ohms.

### 3.3.1. Balayage monochromatique avec lampe blanche :

Comme il est décrit dans la partie expérimentale, une lampe blanche illumine à l'aide d'un monochromateur le centre d'un des carrés sur l'échantillon. La taille du spot recouvre un tiers de la surface du carré. Le balayage est effectué entre 400 nm et 1300 nm. La Figure 3.18 montre les spectres de photoconductivité obtenus sur plusieurs endroits de la gaufre.

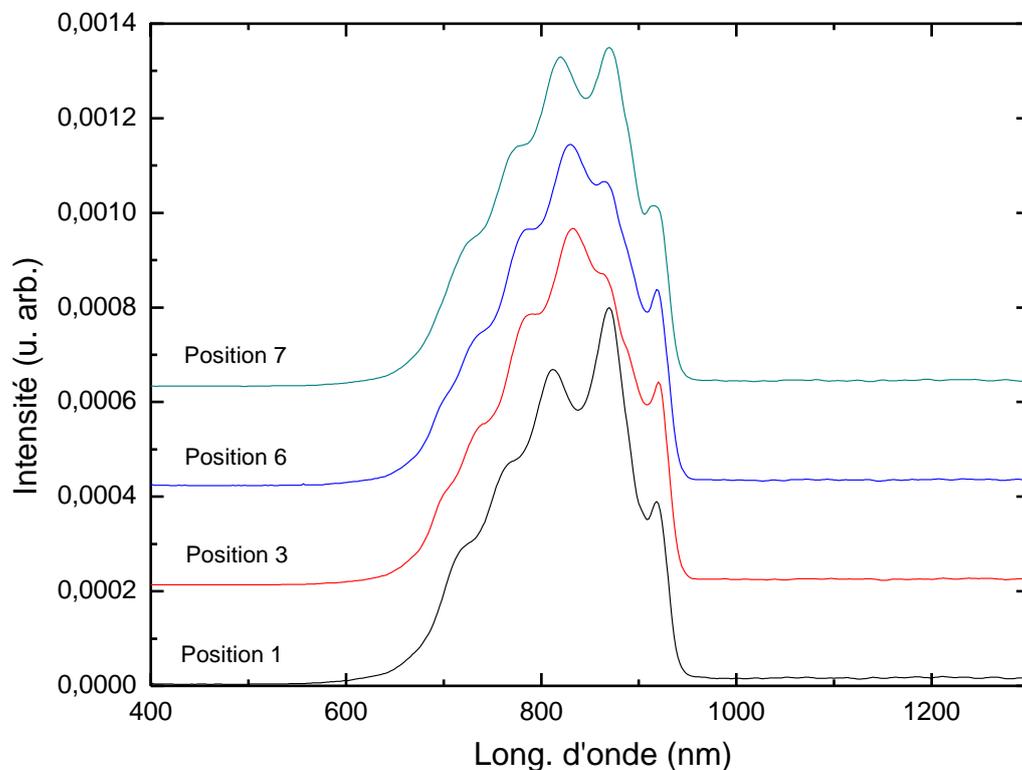


Figure 3.18 - Mesures de photoconductivité en fonction de la position de l'échantillon 1

Le photocourant devrait être observable lorsque chacune des trois jonctions p-n de la cellule possède des porteurs générés par la température ou la lumière. Le profil de photocourant correspond donc à la fenêtre de conduction électrique commune des

trois cellules car elles sont en série. Lorsqu'une des diodes n'a pas de porteurs, le photocourant devrait être nul.

Le résultat de nos mesures révèle de la photoconductivité entre 690 nm et 950 nm. C'est donc dans cette région où les trois photodiodes ont simultanément par excitation thermique ou lumineuse, des porteurs disponibles. La petite bande interdite du germanium fait que des porteurs excités thermiquement sont toujours disponibles en quantité suffisante pour permettre le transport électrique à température ambiante. Par conséquent c'est dans la cellule de l'InGaP où il y a moins de porteurs disponibles pour la conduction. De plus les oscillations apparaissant à 736 nm, 785 nm, 810 nm, 870 nm et 910 nm suggèrent un effet Franz-Keldish (oscillation de la courbe d'absorption de semi-conducteurs en présence d'un champ électrique) ou alors un effet de résonances de l'absorption optique dans les régions d'InGaP et d'InGaAs qui sont révélées ici par les différences de profil entre les spectres. On voit par ailleurs apparaître une variation spectrale révélant des non-uniformités dans la photoconductivité. Il faut comparer la surface des courbes pour se rendre compte effectivement de leur différence en quantité de photocourant. Dans la Figure 3.19 suivante les intégrales des courbes de photocourant de la Figure 3.18 précédente sont évaluées.

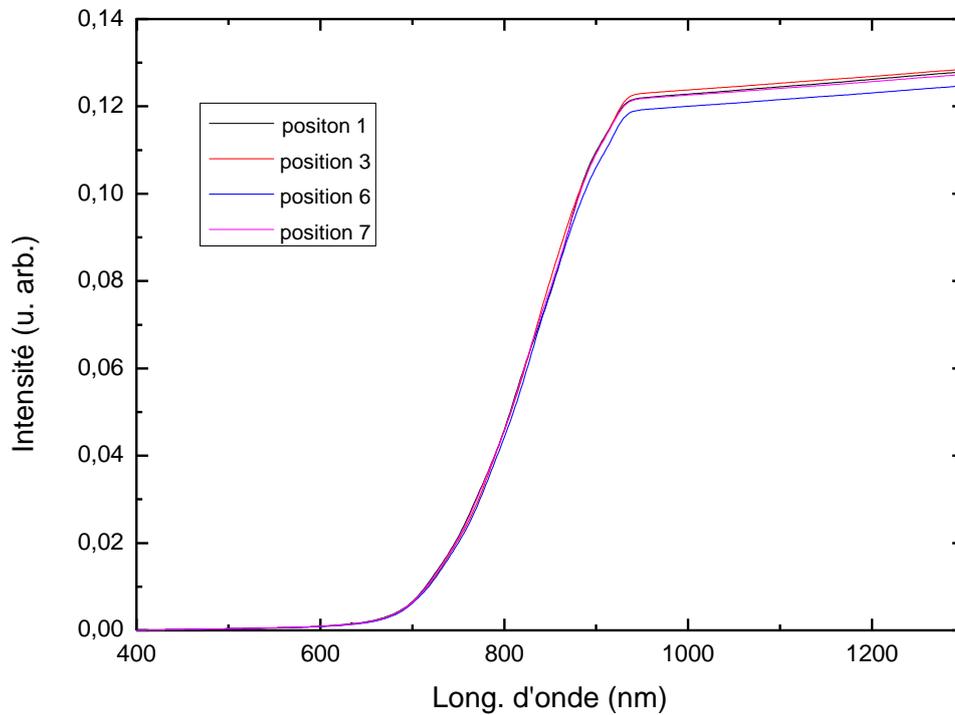


Figure 3.19 - Comparaison des intégrales des spectres de photoconductivité de la Figure 3.18

Pour ces mesures réalisées sur plusieurs endroits différents de la gaufre, les défauts induisent des différences d'intensité du photocourant. Ceci confirme la fluctuation spatiale de la performance des cellules solaires tri-jonctions, cependant, pour cet échantillon sondé ces variations sont très faibles en comparaisons avec les fluctuations de photoluminescence de la section précédente (cartographie en photoluminescence à 300K pour les positions 1 à 7). La démarche ici de comparaison des intensités intégrées est pertinente pour évaluer l'écart de photocourant entre les spectres. La corrélation entre les mesures de photoconductivité et de photoluminescence est très complexe pour les CSTJ car les phénomènes ne sont pas de même nature. En effet dans la photoluminescence les photo-porteurs sont sensibles aux défauts présents uniquement dans la photodiode où ils se recombinent, tandis que la photoconductivité implique toute la structure à la fois. On pourrait dire que les fluctuations en photoconductivité combinent les fluctuations observées en photoluminescence pour chacune des trois photodiodes, les boîtes quantiques et la couche de mouillage, en plus des variations qui peuvent être induits par les jonctions tunnels, les couche-

contacts et les contacts métalliques. L'information est plus sélective donc en photoluminescence. Alors pour évaluer la caractéristique du photocourant observé dans ce projet, des excitations sélectives des photodiodes de la CSTJ ont été réalisées à l'aide de rayons laser.

### 3.3.2. Balayage monochromatique et excitation laser à 532 nm et à 786 nm

Dans cette étude, les cellules tri-jonction ont été excitées en continu à l'aide essentiellement de deux sources laser à 532 nm et à 786 nm. Les spectres de photoconductivité obtenus sous illumination laser à 786 nm sont présentés à la Figure 3.20 pour différentes puissances d'excitation. La figure 3.21 présente les mesures avec une excitation laser à 532 nm.

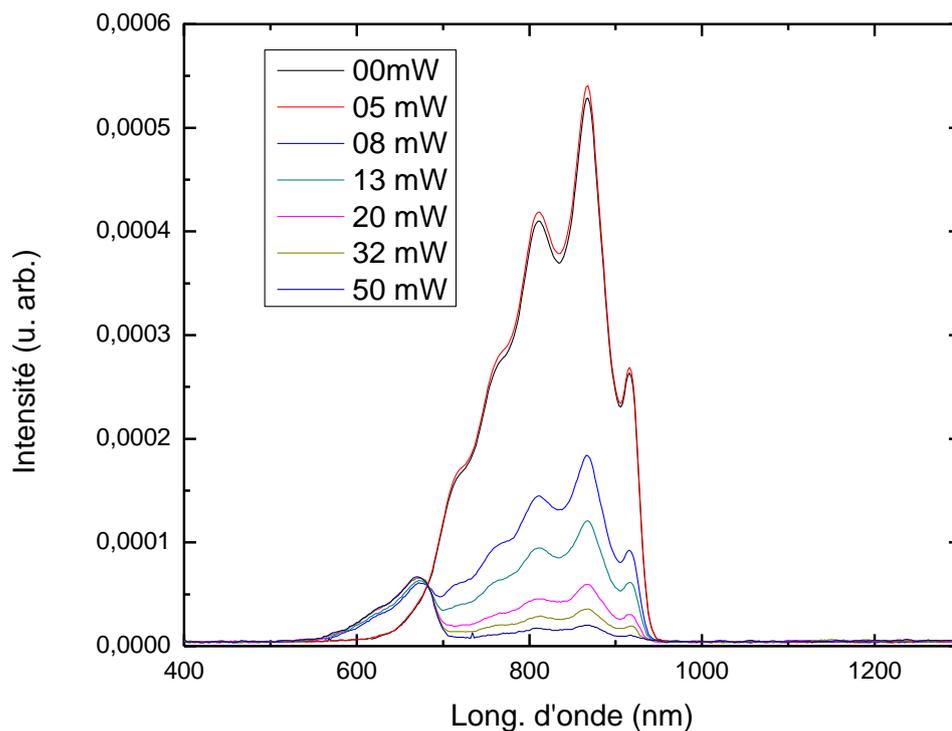


Figure 3.20 - Mesures de photocourant AC sous illumination continue à l'aide du laser 786 nm. T=300K, P<sub>exc. (laser)</sub>= de 5 à 50 mW, taille du spot laser sur l'échantillon-3 mm. Position 1

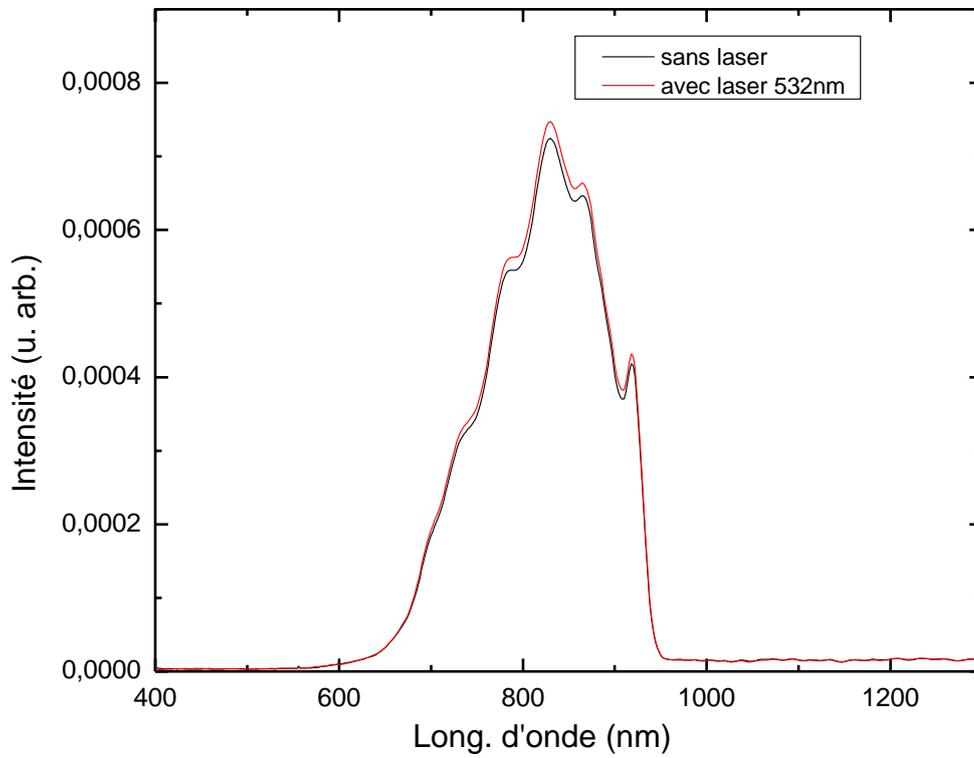


Figure 3.21 - Mesures comparatives du photocourant AC avec ou sans excitation lasers à 532 nm. Position 6

On remarque un comportement différent pour l'excitation à 786 nm par rapport à celle de 532 nm. En effet l'intensité du photocourant AC diminue lorsque la puissance d'excitation laser à 786 nm augmente tandis que l'illumination avec le laser 532 nm augmente légèrement l'intensité du photocourant sans changer l'allure du spectre observé avec uniquement l'illumination d'une lampe blanche. Notons, comme il est mentionné dans la partie expérimentale, que le faisceau laser n'est pas modulé par le hacheur mécanique à la fréquence de 350 Hz. L'illumination laser à 786 nm contribue à un photocourant DC d'environ 950  $\mu\text{A}$  pour une puissance de 40 mW (Figure 3.22). Ce photocourant continu augmente avec la puissance du laser et tend à saturer à partir de 20 mW. On s'attend donc à observer une augmentation du photocourant AC lorsque la puissance d'excitation croît, mais c'est l'inverse qui se passe (le courant AC tend vers 0  $\mu\text{A}$  à 50 mW). Par conséquent l'apport de photoporteurs supplémentaire dans la

cellule du milieu se traduit par un photocourant DC plus grand mais aussi par une saturation du photocourant AC induit par la lampe blanche.

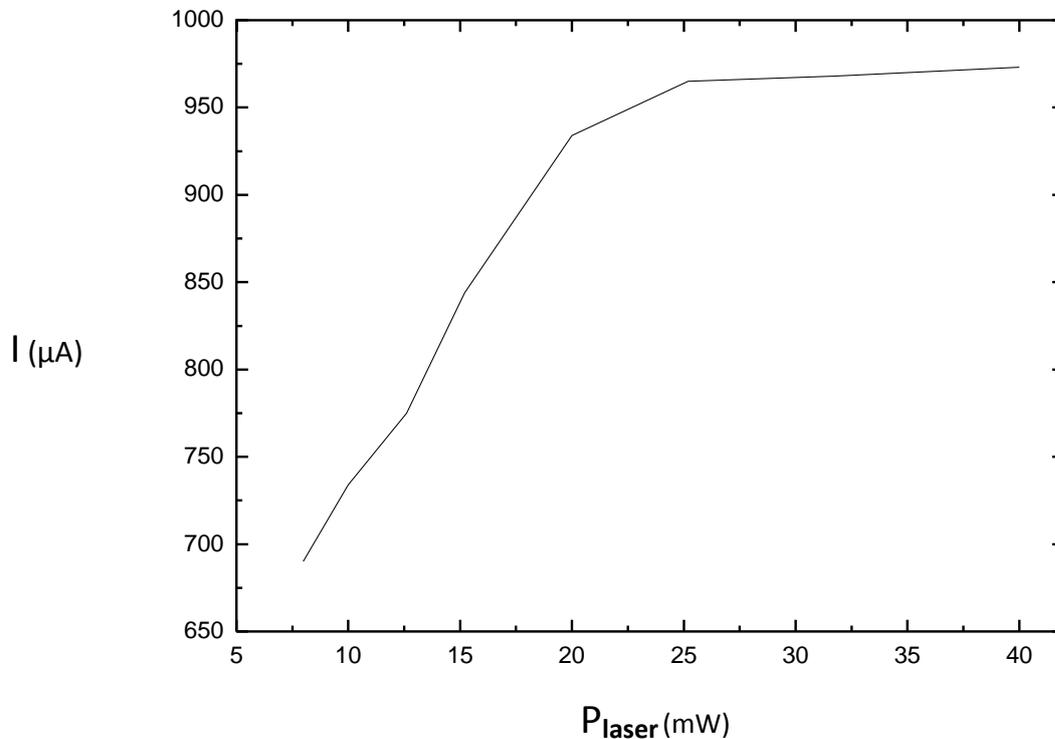


Figure 3.22 - Mesure du photocourant DC induit par l'excitation du laser 786 nm en fonction de sa puissance. Position 6

Par ailleurs l'illumination à 532 nm fait augmenter à la fois le courant alternatif et le courant continu. C'est donc bien un comportement caractéristique de la CSTJ et est indépendant des appareils de mesure. Son analyse paraît assez complexe au vu du mécanisme de transport des CSTJ.

Cependant selon notre compréhension, le nombre d'états libres de part et d'autre de la cellule du milieu (diode InGaAs) excité par le laser rouge 786 nm, détermine la quantité de courant maximale qui traverse la CSTJ (Figure 3.23). Quand ce courant arrive à saturation (plus de disponibilité d'états libres particulièrement dans la cellule d'InGaP), la lumière monochromatique et modulée de la lampe blanche n'induit plus de photocourant puisque le courant total n'augmente plus. Le pic de photocourant AC apparaissant autour de 690 nm est dû à une création de charges supplémentaires dans

la cellule de l'InGaP par la lampe blanche. Ce phénomène de diminution du courant AC est dû donc à la saturation du courant total que traverse la CSTJ et est défini par la possibilité pour les porteurs photogénéérés dans une photodiode à migrer vers les photodiodes suivantes. Il faudrait désormais tenir compte de ce fait pour des mesures de photoconductivité en alternatif.

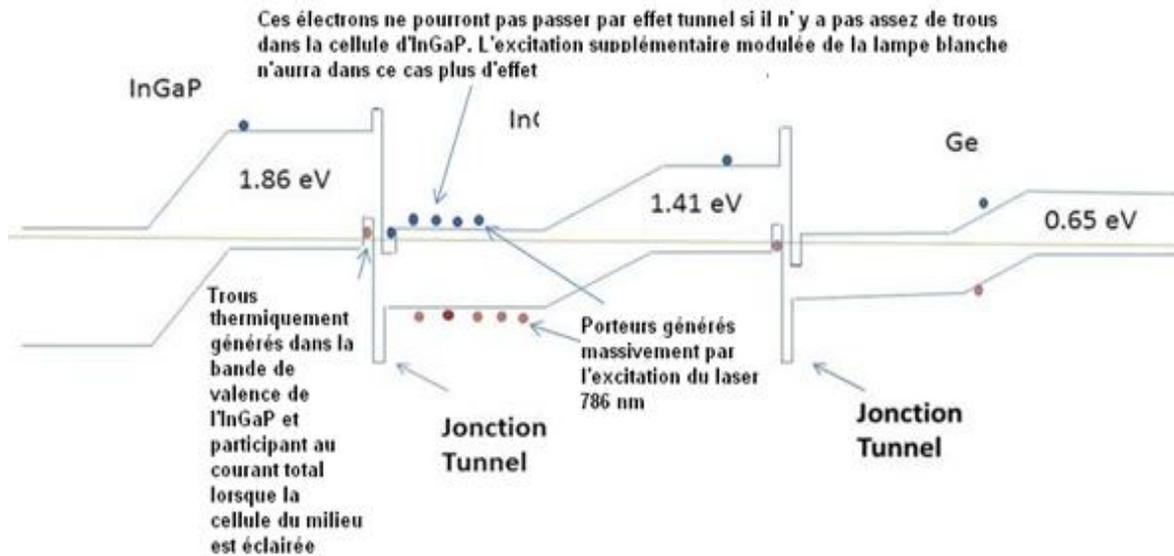


Figure 3.23 - Diagramme explicatif du phénomène de saturation du photocourant

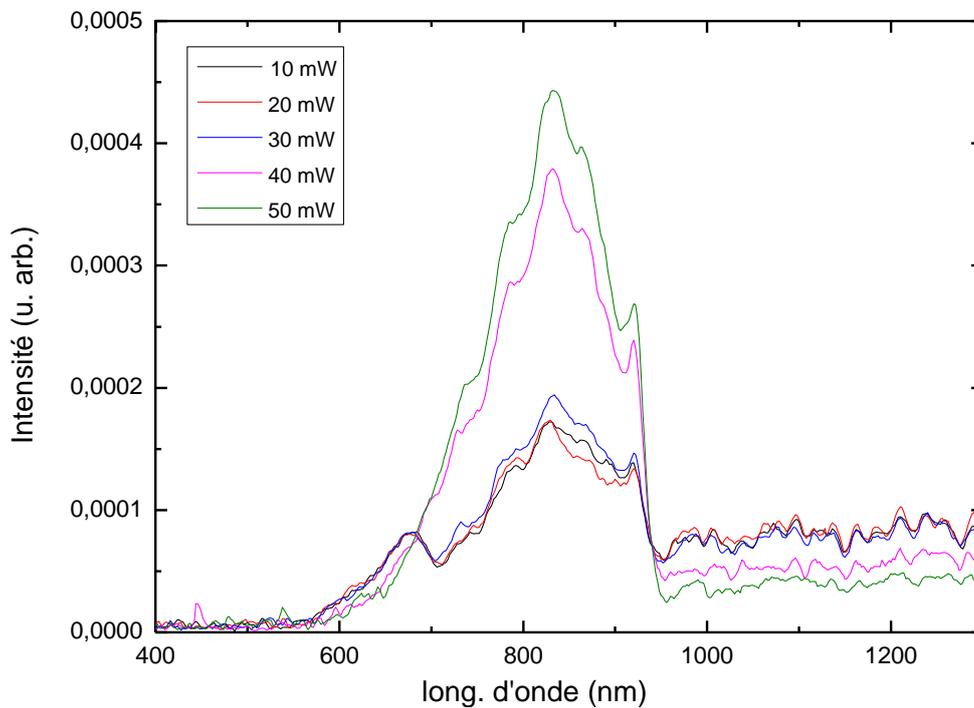


Figure 3.24 - Mesures comparatives de photocourant AC induits par la lampe blanche et deux excitations lasers simultanées à 786 nm pour 20 mW et à 532 nm pour 5 puissances de 10 mW à 50 mW. Position 6

La Figure 3.24 représente le photocourant AC avant que le photocourant DC dû au laser 786 nm ne sature. On retrouve le profil normal du photocourant AC quand on augmente graduellement la puissance du laser vert 532 nm, c'est-à-dire l'excitation de la première cellule InGaP. Donc la disponibilité d'états libres dans la première cellule se traduit par une augmentation du photocourant alternatif. Ce résultat est en accord avec l'analyse proposé dans le paragraphe précédent, car l'excitation de la cellule du Ge est aussi assurée par le laser rouge 786 nm en plus de l'excitation thermique, ce qui permet le courant de passer d'un bout à l'autre dans la CSTJ.

D'autres longueurs d'onde ont été testées dans le rouge et le proche infra-rouge (Figure 3.25). Le photocourant alternatif diminue pour toutes ces longueurs d'onde proportionnellement inverse à leurs puissances respectives. Pour l'excitation à 683 nm, bien que la puissance est élevée, elle induit une saturation du courant AC moindre par

rapport à l'excitation 786 nm : ceci s'explique par une meilleure absorption dans les deux premières cellules à 683 nm. Ces mesures assurent que le phénomène n'est pas spécifique à la source lumineuse de longueur d'onde 786 nm mais à l'excitation de la cellule du milieu et à la saturation du courant qui traverse toute la CSTJ.

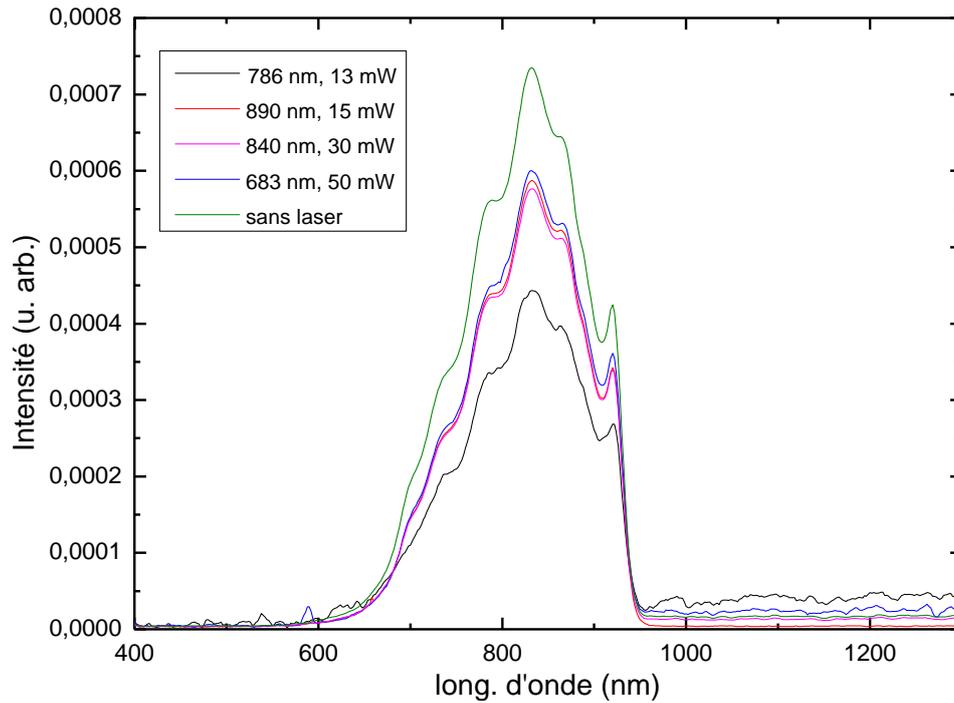


Figure 3.25 - Mesures de photocourant en fonction de l'excitation de la cellule du milieu InGaAs. L'intensité dépend de la puissance d'excitation de chaque laser mais aussi des longueurs d'onde. Position 6

## Conclusion :

Les cellules solaires tri-jonction ont un grand potentiel pour être la technologie verte par excellence dans le futur. Cependant, leur coût de fabrication plus élevé doit être compensé par des rendements de conversion bien supérieurs. Il faut également diminuer les coûts en limitant par exemple le taux de rejet des cellules qui sont fabriquées sur de grands substrats.

Dans ce projet, la technique de cartographie en photoluminescence proposée a permis de visualiser spatialement l'influence des défauts qui semblent varier en nombre sur de grandes régions sondées. Néanmoins, la raie de l'InGaP (cellule du haut) n'est pas apparue du fait que les mesures sont effectuées à température ambiante. Alors des mesures de photoluminescence locales à basse températures, réalisées sur un banc optique où le système au complet est monté par l'opérateur, ont permis de voir la raie issue de la première cellule faite d'InGaP. On y remarque également en fonction de la position sur un échantillon une fluctuation dans l'intensité de photoluminescence, témoignant des fluctuations spatiales dans la densité de défauts. Pour se rendre compte de ces fluctuations sur la performance des CSTJ, des mesures de photoconductivité sont effectuées sur les mêmes échantillons que ceux étudiés en photoluminescence. Des non-uniformités sont en effet observées indiquant que les défauts répartis spatialement sur les gaufres conduisent à des performances inégales des CSTJ. Par ailleurs, les mesures de photoconductivité ont révélées des caractéristiques spectrales dépendant explicitement des mécanismes de transport des porteurs. Ces résultats pourraient servir à suivre l'évolution de la performance des cellules solaires tri-jonction en fonction des paramètres des matériaux tel que le dopage, la composition, les bandes interdites, etc. Pour pousser plus loin les mesures de photoconductivité, il faudrait faire des mesures sous polarisation DC du dispositif en opérant au point de fonctionnement optimal de la cellule solaire. De même, si on avait accès à une lampe blanche de forte intensité on aurait pu effectuer des mesures de photocourant AC sous illumination avec un simulateur de 1 à 3 soleils.

La photoluminescence s'avère donc être une technique de caractérisation adaptée pour visualiser les non-uniformités structurales. La structure des CSTJ fait que ce ne sont pas uniquement les défauts surfaciques qui sont révélés, mais aussi ceux à l'intérieur des matériaux. En effet, les couches fenêtre limitent les recombinaisons aux interfaces et le champ électrique dans la zone de déplétion fait déplacer les porteurs le long d'une photodiode. En cartographiant donc les gaufres en photoluminescence, on obtient une image globale des fluctuations de qualité cristalline. Aussi, le montage de caractérisation pourrait inclure un système de refroidissement et une source laser de puissance plus grande pour cartographier des raies invisibles à température ambiante, et une vitesse de balayage plus élevée avec plus de précision spatiale pourrait rendre les applications aux gaufres de 100 mm de diamètre plus adaptées. Par ailleurs l'appareil de réalisation des cartographies en photoluminescence utilisé dans ce projet ne permettant pas un accès de l'opérateur pour mieux contrôler les objets du montage pouvant altérer le résultat de mesure, un système de cartographie versatile réalisé sur un banc optique pourrait être envisagé. Finalement, des mesures de photoluminescence résolues en temps seraient intéressantes en complément à ce travail. Ces mesures permettraient d'en dire un peu plus sur les mécanismes de recombinaison radiatifs et non radiatifs dans les différentes régions d'une CSTJ.

# Annexe

## A.1 Préparation des échantillons

### A.1.1 Réalisation des contacts :

Des contacts électriques ont été réalisés sur la face arrière et la face avant des échantillons afin de faire des mesures de photo-courant.

La géométrie que nous avons choisie pour le contact du dessus est un carré formé par de fins rubans métalliques de 0.5 mm. L'excitation lumineuse sera pointée au centre de chaque carré.

Les contacts sont réalisés par photolithographie. Le procédé adopté est décrit ci-dessous :

- Étalement de la résine :

Après un nettoyage classique successivement à l'acétone, à l'IPA et à l'eau déionisée, les échantillons sont séchés avec un flux d'azote.

- Avec un spinner une couche de LOL 3A est appliquée sur la surface. L'échantillon est chauffé ensuite par une plaque chauffante à 114°C. Puis une couche de résine S1818 est appliquée. La vitesse du spinner à 400 rpm est choisie pour avoir une épaisseur de couche de résine de 100 µm. Un autre chauffage est réalisé à 114°C pendant 1 mn pour évaporer les solvants résiduels.

- Alignement :

L'échantillon est ensuite aligné par rapport à un masque avec une aligneuse OAI. Des ajustements en  $x, y, \theta$  sont nécessaires pour l'optimisation.

En suite l'échantillon est exposé à la lumière UV 220 nm en mode contact pendant 10s.

- Développement :

Après l'exposition à l'UV, l'échantillon est mis dans une solution de MF29 pendant 5min. Puis un rinçage à l'eau est réalisé. Enfin un flux d'azote fini l'opération de nettoyage.

- Métallisation :

Des couches métalliques de Ni (10nm), Ge(15nm), Au(150nm) sont déposées par un évaporateur à faisceaux d'ions. Les échantillons sont désoxydés avec du BOE pendant 15s.

- Lift-off :

- Pour le soulèvement du métal, l'échantillon est mis dans une solution de remover 1165 à une température de 70°C jusqu'à l'apparition nette des motifs. Après deux heures, un rinçage à l'eau puis un séchage au flux d'azote est effectué.

- Par la suite, la face arrière est métallisée par le même procédé que pour la face avant. Sauf on n'y met plus du nickel qui servait à assurer une bonne adhérence du contact métallique sur la face avant de la structure CSTJ faite d'InGaAs dopé de type N.

- Recuit thermique : Après le dépôt de métal sur la face avant, un recuit RTA est réalisé à 350°C dans du forming gaz pendant 30s.

- Découpe : les échantillons sont découpés pour isoler les bords qui peuvent être contaminés lors de la métallisation. On obtient ainsi des échantillons non court-circuités.

### **A.1.2 Précautions dans le procédé:**

Les substrats de Ge sont de 146 micromètres d'épaisseur ce qui les rend très fragiles. Toutes les manipulations doivent être faites avec une extrême précaution.

Le dépôt de métal sur toute la face arrière peut se traduire par une évaporation sur les bords de l'échantillon. Lorsque ceci survient, la structure verticale est simplement court-circuitée. Pour s'en rendre compte des mesures de résistance ont été réalisées ; lorsque la résistance est de quelques ohm, on en déduit que l'échantillon est court-circuité.

Cependant pour des évaluations plus précises, nous mesurons le courant en fonction du voltage. Les caractéristiques I-V nous renseignent donc sur la fiabilité de nos échantillons que nous comparons aux échantillons de l'équipe d'Abdelatif Jaouad du Département de génie électrique et génie informatique de l'UDES.

C'est pour surpasser ce problème de court-circuitage que des coupes sont réalisées avec une scie à diamant afin d'enlever les bords recouvert de métal. Cependant les découpes aussi ne sont pas épargnées par la fragilité des échantillons. Ces derniers sont recouverts d'une couche de résine S 1818 lors de la coupe pour les protéger des débris et des usures. Les échantillons sont ensuite lavés à l'acétone pour décaper la résine.

## A.2 Exemple de composition de cellule solaire tri-jonction de la compagnie Cyrium technologies :

Matériaux	Dopage	Épaisseur en $\mu\text{m}$	
GaInAs	N $1 \text{ e}19$	0.4	} 6.2 $\mu\text{m}$
AlInP	N	0.04	
GaInP	N	0.1	
GaInP	P	0.75	
TJ combinaison de AlxGaxInxPx	P-N	0.13	
GaAs	N	0.1	
GaAs like	Und	2	
GaAs	P	1.5	
AlGaAs	P	0.05	
GaInAs	P	0.1	
TJ GaAs	P-N	0.44	
GaInAs	N	0.7	
GaInP	N	0.02	
Ge-substrat	P $5 \text{ e}18$	140	

### A.3 Composants du montage de photoluminescence disponibles au laboratoire du Professeur Denis Morris :

COMPOSANTES	FOURNISSEUR / MODÈLE	SPÉCIFICATIONS ET COMMENTAIRES
Spectromètre	SPEX / Model 1702 avec contrôleur CD2	Spectromètre de 1 mètre, avec un réseau holographique: - 1200 traits/mm, angle de miroitement optimisé pour 750 nm.
Réfrigérateur à cycle fermé d'He	CTI Cryogenics / Model 8200	Réfrigérateur à cycle fermé d'He couplé à un doigt froid sur lequel les échantillons sont montés.
Contrôleur de température	LakeShore / Model ARC 31CA	Un élément chauffant et un circuit électronique avec rétro-action permet le contrôle de la température entre typiquement 15K et 400K.
Détecteurs	PM Hamamatsu / Model R2658	Photomultiplicateur avec tube monté Head-on, photocathode de GaAs de réponse S1, tube refroidi à l'aide d'un module à effet Peltier.
Électroniques 1	1- Convertisseur courant-tension/ Model SR 570 2- Amplificateur synchrone de Stanford Research / Model 530 3- Hacheur mécanique de Stanford Research / Model SR540	

### A.4 Conditions expérimentales des mesures locales de photoluminescence :

Source laser: Diode laser 532 nm

Intensité du faisceau d'excitation (mesuré après le hacheur): 9 mW

Taille du spot laser sur l'échantillon (avec lentille de 10 cm de focale): environ 200  $\mu$ m

Température: 20 K à 200 K

Fréquence de modulation du hacheur: 330 Hz

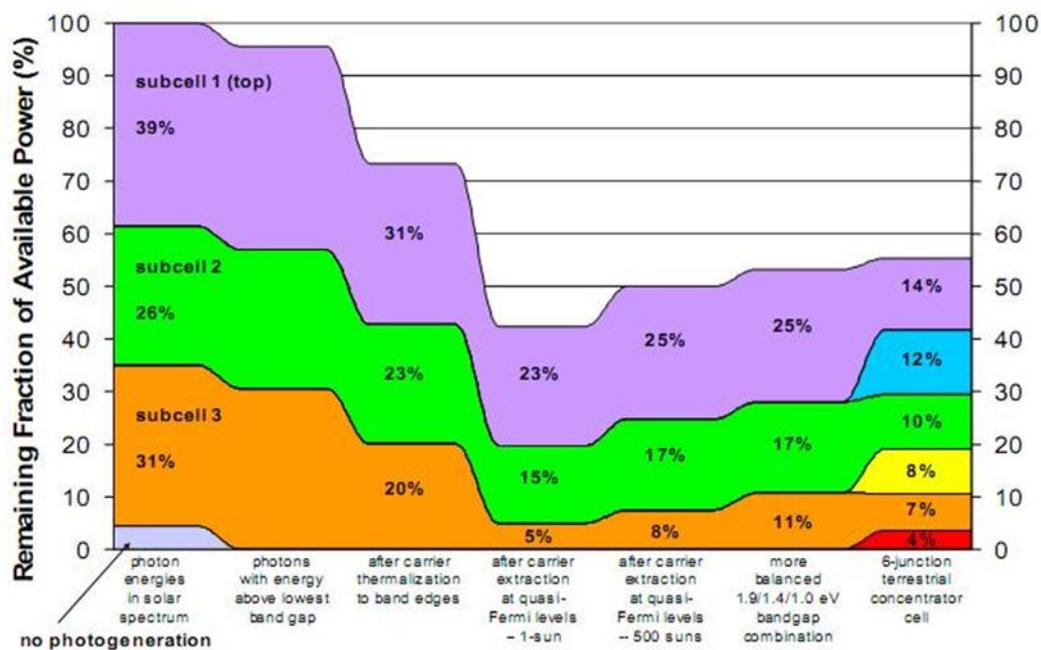
Détecteur: Photomultiplicateur avec filtre passe-haut 475 nm devant le spectromètre.

Spectromètre: Réseau 600 traits/mm; Vitesse de balayage: 10 nm/sec

Fentes d'entrée et de sortie à 500  $\mu\text{m}$  et 1000  $\mu\text{m}$ , respectivement.

Ajustements sur le lock-in (Model SR 510): Détection en mode (R,  $\theta$ ) en mode tension (branchement sur entrée A); Tous les boutons de filtre à ON; sensibilité fixée à 10 mV; bouton de réglage de la réjection de bruit à "Low noise"; Ajustement manuel de la phase à zéro pour avoir un maximum d'amplitude.

## A.5 Bilan de l'ensemble des processus de perte de rendement énergétique et les principales voies actuelles pour augmenter les performances des cellules solaires [20] :



## Bibliographie

- [1] ASTM G173-03 reference spectra, [www.astm.org/Standards/G173.htm](http://www.astm.org/Standards/G173.htm)
- [2] Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., Yoon and H. N. Karam, III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics, *Energy Environ. Sci.*, 2009, **2**, 174-192
- [3] Delta commercializing Spectrolab's high efficiency cells, March 9, 2007, <http://www.insidegreentech.com/node/863>
- [4] Ekins-Daukes N.J., Strain-balanced quantum well solar cells, *Physica E* **14**, p. 132, 2002
- [5] Green M. A., *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, Springer, 2003
- [6] Goetzberger A. et al., Photovoltaic materials, past, present, future, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **62**, 2000
- [7] Kasap S. O., *Optoelectronics and photonics: principles and practices*, New York: Prentice Hall, 2001
- [8] Lepage D., mémoire de maîtrise, UDES, 2006
- [9] *Light-Emitting Diodes*, 2nd edition, E. F. Schubert, (Cambridge University Press, Cambridge UK 2006); figure adaptée de Tien (1988)
- [10] Luque A. and Martí' A., in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., edited by Luque A. and Hegedus S. (John Wiley and Sons, Chichester, 2011)
- [11] Poortmans J., Arkhipov V., *Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications*, Hoboken, NJ: Wiley, 2006

- [12] Shur M., Physics of semiconductor devices, New York: Prentice Hall; first edition, 1990
- [13] Smestad G. P., Optoelectronics of solar cells, Bellingham, WA: SPIE Press, 2002
- [14] Sobolev N.A. et al., Enhanced radiation hardness of InAs/GaAs quantum dot structures, Phys. Stat. Sol. B, vol.**224**, no. 1, p. 93, 2001
- [15] Shockley W., Queisser H. J., Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. J. Appl. Phys., vol.**32**, no. 3, p. 510, 1961
- [16] Walters R.J. et al., Radiation hard multi-quantum well InP/InAsP solar cells for space applications, Progress in Photovoltaics, vol. **8**, no. 3, p. 349, 2000
- [17] Zirbi J., mémoire de maîtrise, UDES, 2008
- [18] Zweibel K., Basic photovoltaic principles and methods, New York: Van Nostrand Reinhold, 1984
- [19] [www.insidegreentech.com](http://www.insidegreentech.com) / Spectrolab solar cell breaks 40% efficiency barrier, December 7, 2006
- [20] [www.spectrolab.com](http://www.spectrolab.com) /solar cell explained
- [21] [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov) /best cell efficiencies
- [22] [www.solarbuzz.com](http://www.solarbuzz.com) / Marketbuzz 2007, Annual World Solar PV Industry Report
- [23] [www.thealarmclock.com](http://www.thealarmclock.com) / Industrial strength solar energy gets some good energy cash, March 03, 2006
- [24] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) /multijunction solar cell