

UNIVERSITÉ DE COCODY



N° d'ordre: 313/99

THESE DE DOCTORAT de 3^e CYCLE ES SCIENCES

Spécialité: Géophysique externe.

Option :Energie Solaire.

présentée par :

KABORE M'BI

Sujet de la thèse:

ETUDE ET MODELISATION DU TANDEM

GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe

soutenue le 18 décembre 1999 devant le jury composé de:

M ACHY SEKA	Professeur à l'Université de Cocody.	Président
M TOURE SIAKA	Professeur à l'Université de Cocody.	Examineurs
M KOUADJA KOMENAN	Maître de Conférences à l'Université de Cocody.	Examineurs
M YAO N'GUESSAN ALFRED	Maître de Conférences à l'ENS.	rapporteur
M MOHAMED CHARLES	Docteur d'Etat , Maître-assistant à l'Université de Cocody.	Examineurs

*A mon Père
A ma Mère
A mes Frères et Sœurs
A mes Amis Kargougou Issaka et Zongo Paul.
A mon parrain Tignègré Jean-Baptiste.
En témoignage de toute mon affection.*

- *A mon grand frère le Docteur KABORE N. Jean-Paul Médecin Cardiologue.*
- *Il m'a ouvert la voie aux études supérieures et m'a toujours apporté son soutien et ses encouragements tout au long de mes études.*

Avant propos

Le travail que nous présentons a été effectué à l'Institut de Recherche en Energie Nouvelle (IREN) de l'Université d'Abobo-Adjamé, au Laboratoire d'Energie Solaire et au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Technologie (LPMCT) de l'Université de Cocody.

Avant de présenter notre travail nous voudrions d'abord remercier tous ceux qui nous ont fait bénéficier de leur enseignement, de leur expérience ou de leur amitié.

Nous tenons à remercier le Professeur Achy Seka Antoine Directeur de la Recherche au Ministère de l'Enseignement Supérieur, Directeur du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides de l'Université de Cocody UFR-SSMT, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider notre jury de thèse. Nous lui exprimons ici notre profonde gratitude.

Nous tenons à exprimer notre gratitude au Professeur Touré Siaka, Directeur du Laboratoire d'Energie Solaire de l'Université de Cocody UFR-SSMT pour ses sages conseils et l'intérêt qu'il a porté à nos travaux et qui a accepté de participer à notre jury de thèse.

Au Professeur Kouadja Komenan, Maître de conférences à l'Université de Cocody, Directeur du Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Technologie (LPMCT), qui a assuré la direction scientifique de nos recherches. Nous tenons à lui témoigner notre profonde reconnaissance pour sa grande disponibilité et pour les nombreuses discussions que nous avons eues.

Nous remercions le Professeur Yao N'guessan Alfred, Maître de Conférences à l'Ecole Normale Supérieure (ENS) qui s'est toujours montré disponible et avec qui nous avons eu de nombreuses discussions fructueuses sur l'ensemble des travaux, discussions qui nous ont permis d'aboutir aux présents résultats.

Le Docteur Mohamed Charles Docteur d'état, Maître-assistant à L'Université de Cocody UFR-SSMT, a porté de l'intérêt à nos travaux et a accepté de participer à notre jury de thèse. Nous tenons à lui exprimer ici nos vifs remerciements

Nous exprimons notre vive reconnaissance au Docteur Sylla Adama Maître-assistant à l'Université de Cocody UFR-SSMT qui nous a initié à la recherche et pour avoir suivi nos travaux du début à la fin. Sa rigueur scientifique dans la rédaction et l'explication des phénomènes physiques nous a permis d'aboutir aux résultats exposés dans ce mémoire de thèse.

Je voudrais assurer ma gratitude au Docteur Guisso Atchélé Etienne Maître-assistant à l'Université de Cocody UFR-SSMT qui n'a ménagé aucun effort pour nous apporter son aide dans la modélisation et la construction du programme d'optimisation. Ses remarques pertinentes et ses conseils ont permis d'accélérer nos travaux.

Nos vifs remerciements également au Docteur N'guessan Kouamé sous Directeur de L'Institut de Recherche en Energie Nouvelle (IREN) de l'Université d'Abobo-Adjamé et au Docteur Kouassi Léonce Maître-assistant à l'Université de Cocody pour les discussions fructueuses que nous avons eues avec eux.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous les amis et camarades du Laboratoire d'Energie Solaire et du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des fluides qui nous ont apporté leur soutien moral et matériel durant tous nos travaux de recherches, en particulier aux Docteurs Fassinou. F. W, Gbané .A, Kafando.P, Ouattara. F, Bedou .M et Gbe.D et les Doctorants Salami. H et Aw .M. M.

LISTE DES SYMBOLES	6
INTRODUCTION GENERALE	8
<u>CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA CONVERSION</u>	
PHOTOVOLTAÏQUE.	10
INTRODUCTION	11
I-1: POSITION DU PROBLEME.	11
I-2: RAPPEL THEORIQUE SUR LA PHOTOPILE.	15
<i>I-2-1: Principe de fonctionnement du tandem.</i>	15
<i>I-2-2: Paramètres caractéristiques.</i>	17
I-3: FACTEURS LIMITATIFS.	19
<i>I-3-1: Pertes par réflexion.</i>	19
<i>I-3-2: pertes par transparence.</i>	21
<i>I-3-3: pertes par effet joule dans la cellule.</i>	22
<i>I-3-3-1: pertes par thermistance.</i>	23
<i>I-3-3-2: pertes dues à la résistance serie.</i>	25
<i>I-3-4: courant de génération-recombinaison.</i>	26
<i>I-3-5: réponse spectrale.</i>	29
CONCLUSION	30
<u>CHAPITRE II: MODELISATION DU TANDEM</u>	31
INTRODUCTION	32
II-1: STRUCTURE DU TANDEM	32
<i>II-1-1 : Utilisation d'une fenêtre AlyGa1-yAs</i>	33
<i>II-1-2 : Utilisation d'une jonction tunnel</i>	35

II-2 : EQUATIONS DE BASE	35
II-3 : METHODE DE RESOLUTION	37
II-3-1 : Détermination de la concentration des porteurs minoritaires.	37
II-3-2 : Détermination des courants.	38
II-4 : METHODE DE CALCUL	44
CONCLUSION	46
CHAPITRE III: RESULTATS ET ANALYSE	48
INTRODUCTION	49
III-1: TANDEM OPTIMISE	49
III-1-1: Résultats.	50
III-1-2: Analyse.	54
III-2: INFLUENCES DE LA RESISTANCE SERIE R_s SUR LE RENDEMENT DU TANDEM.	56
III-2-1: Résultats.	56
III-2-2: Analyse.	57
III-3 : INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LES PERFORMANCES DU TANDEM.	57
III-3-1: Résultats.	57
III-3-1-1: couche antireflet..	57
III-3-1-2: Caractéristiques de la fenêtre.	59
III-3-1-3: Profondeur de jonction y_{1p}.	62
III-3-1-4: Epaisseur de la couche y_{1n}.	64
III-3-1-5: Profondeur de jonction y_{2p}.	65
III-3-1-6: Epaisseur de la couche y_{2n}.	66

III-3-2: Analyse	67
III-4 : INFLUENCE DES PARAMETRES PHYSIQUES SUR LES PERFORMANCES DU TANDEM.	71
III-4-1: Résultats	71
III-4-1-1: Effet des vitesses s1n et s1p.	71
III-4-1-2: Effet des vitesses s2n et s2p.	72
III-4-1-3 : Influence des dopages Na1 et Nd1..	74
III-4-1-4 : Influence des dopages Na2 et Nd2.	77
III-4-2: Analyse	80
CONCLUSION	83
CONCLUSION GENERALE	84
ANNEXE	86
BIBLIOGRAPHIE	88

LISTE DES SYMBOLES

q :	Charge de l'électron en valeur absolue
D_n, D_p :	Coefficient de diffusion des électrons et des trous.
\vec{E} :	Champ interne appliqué.
τ_n, τ_p :	Durée de vie des électrons et des trous
N_a, N_d :	concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs.
n_i :	Concentration intrinsèque des électrons.
L_n, L_p :	Longueur de diffusion des électrons et des trous.
S_n, S_p :	Vitesse de recombinaison superficielle des électrons et des trous.
S_i :	Vitesse de recombinaison à l'interface fenêtre-cellule GaAs.
w :	épaisseur de la zone de déplétion.
k :	Constante de Boltzmann ($k=1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$).
h :	Constante de Planck ($h=6,62559 \cdot 10^{-34} \text{ JS}$).
Φ_0 :	Flux de photons incident
I_{cc} :	Courant de court-circuit.
V_{oc} :	Tension de circuit ouvert.
I_{os} :	Courant d'obscurité.
α :	Coefficient d'absorption.
P_{in} :	puissance incidente de l'éclairement.
P_m :	puissance maximale délivrée par le tandem.
n_0, p_0 :	Concentration des porteurs à l'équilibre.
E_{Fn}, E_{Fp} :	Niveau de Fermi des électrons et des trous.
y_n, y_p :	Epaisseurs des couches dopées de type N et P.
η :	Rendement de conversion photovoltaïque.
E_g :	Gap des matériaux.
V :	Tension aux bornes de la cellule.

I:	Densité de courant.
V_m, I_m :	Tension et densité de courant au point de rendement maximum du tandem.
I_{rg}, I_{in} :	Densité de courant de recombinaison et d'injection.
x_f :	Epaisseur de la fenêtre.
d_x :	Epaisseur de la couche d'oxyde.
I_d :	Courant diode.
E_{gi} :	Gap indirect.
E_{gdd} :	Gap direct.
I_{im} :	Courant d'injection au point de rendement maximum.
I_{rm} :	Courant de génération-recombinaison au point de rendement maximum.

Dans ce qui suit un indice complémentaire noté 1, 2 ou 3 précisera que les quantités précédemment indiqués sont calculées pour les cellules GaAs (1), $Hg_{1-x}CdxTe$ (2), ou la fenêtre $Al_yGa_{1-y}As$ (3).

INTRODUCTION GENERALE

La science photovoltaïque a connu un essor important grâce aux nombreux efforts consacrés à l'étude et à la réalisation des photopiles et panneaux solaires [1]. Destinées à convertir directement l'énergie solaire en électricité, les photopiles ont longtemps été utilisées exclusivement dans le domaine spatial. Cela pour le besoin d'autonomie en énergie des satellites et en raison de leur coût très élevé pour leur utilisation terrestre. Ainsi quelques millions de photopiles quittèrent l'atmosphère avant que leur utilisation sur terre (éclairage des villages, alimentation des installations sanitaires isolées, pompes solaires, ...) ne vit le jour.

Les premiers travaux de réalisation de photopiles solaires se sont orientés vers les matériaux simples mono cristallins tels que le silicium et le germanium. Ces photopiles ont donné des rendements de conversion relativement faibles de l'ordre de 10,4% et 13% [2] [3] avec le silicium. Les matériaux composés III-V, beaucoup plus prometteurs, ont été également étudiés. Ces matériaux présentent des propriétés optiques et électriques favorables à la conversion photovoltaïque, notamment le GaAs qui a une faible concentration intrinsèque ($n_i = 1,5 \cdot 10^7 \text{cm}^{-3}$), comparé au silicium et une grande mobilité ($\mu = 8500 \text{cm}^2/\text{Vs}$). Les progrès de la technologie des composants électroniques, la conception et la réalisation de structures très élaborées ont permis une nette amélioration du rendement. Ainsi avec le silicium, les structures PERC (Passivated Emitter and Red Cell) ont permis d'atteindre des rendements de 22,8% [4] et 23,6% [5] en AM1,5. Des rendements de 27.5% ont été atteints sous concentration ($10 \text{W}/\text{cm}^2$, AM1,5) [6]. Avec le GaAs un rendement de 20% peut être atteint en AM1. Ce rendement devient 24,7% sous concentration ($C=180$) avec les cellules à fenêtre $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ [2].

Les faibles rendements des photopiles classiques sont liés au mode de conversion à une cellule. En effet dans la conversion photovoltaïque à une cellule, ce sont les pertes intrinsèques qui limitent le rendement de conversion. Il s'agit des pertes par transparence des semi-conducteurs c'est - à - dire les portions d'énergie $h\nu < E_g$ et les pertes de l'excès d'énergie $h\nu - E_g$ lors du processus de thermalisation.

La conversion multispectrale est l'objet de notre étude. Elle permet de convertir tout le domaine du spectre solaire. Nous nous intéressons à l'ensemble multispectral (GaAs, HgCdTe).

Notre travail s'articulera autour de trois points. Dans le premier chapitre nous donnerons un aperçu général sur la conversion photovoltaïque et des résultats obtenus avec l'ensemble multiculturelle (GaAs,HgCdTe). Le second chapitre sera consacré à la modélisation du tandem GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe. Dans le troisième chapitre nous analyserons et nous discuterons les résultats obtenus.

CHAPITRE I:

GENERALITES SUR LA

CONVERSION

PHOTOVOLTAÏQUE

INTRODUCTION

Le choix des matériaux pour la réalisation d'une structure tandem est guidé par les propriétés optiques et électriques des deux matériaux, en particulier par les valeurs de leur bande interdite. Le gap de la deuxième cellule doit lui permettre d'absorber le rayonnement transmis par la première cellule. Il s'agit essentiellement des photons dont l'énergie est inférieure au gap de la première cellule. Dans ce chapitre nous présentons la possibilité d'utilisation de la structure monolithique GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe. comme structure photovoltaïque. Cette présentation sera suivie d'un rappel théorique sur la photopile. Ce rappel concernera son fonctionnement et ses paramètres caractéristiques. Nous ferons ensuite une analyse de quelques facteurs limitatifs du rendement de conversion. Il s'agira essentiellement des facteurs qui seront pris en compte dans notre étude. Les différentes pertes occasionnées par ces facteurs sont liées à la nature du matériau et au procédé technique de fabrication des cellules. Les possibilités de réduction de ces pertes seront aussi exposées.

I-1- POSITION DU PROBLEME

Le matériau Hg_{1-x}Cd_xTe dans le domaine des faibles valeurs de x (paramètre stœchiométrique) est très sensible au rayonnement infrarouge.[7] [8] [9]. Son gap E_g varie de celui du sémimétal HgTe ($x=0$; $E_g=-0,115\text{eV}$) à celui du semi-conducteur CdTe ($x=1$; $E_g=1,529\text{eV}$) [10] [11]. Le paramètre x peut être ajusté pour que ce matériau couvre tout le domaine de l'infrarouge. Il peut donc être utilisé comme photoconducteur dans les dispositifs à détection infrarouge.

Depuis quelques années, la structure monolithique GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe suscite un grand intérêt dans le domaine de l'infrarouge. Elle trouve aussi son application dans le domaine des télécommunications par fibre optique dans la bande 1,3 - 1,5 μm ou de l'imagerie thermique dans les fenêtres 3 - 5 μm et 8 - 12 μm [12]. Dans cette structure on associe une fonction optique grâce à l'élément sensible constitué par le photoconducteur Hg_{1-x}Cd_xTe et une fonction électronique grâce à l'élément amplificateur constitué par le transistor à effet de champ GaAs [12].

Compte tenu de la possibilité d'absorption de tout le rayonnement solaire par le tandem GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe (la bande interdite de Hg_{1-x}Cd_xTe varie avec x), une étude a été menée sur celui-ci pour vérifier l'opportunité de son utilisation comme structure photovoltaïque. A partir des courbes d'iso rendement (figure 1-1) [13] [14] des tandems idéaux à structure monolithique, le gap optimal de Hg_{1-x}Cd_xTe est estimé à 0,6eV pour son association avec GaAs dont le gap (1,43eV) se trouve dans la zone optimale pour la conversion du spectre solaire [15] [16]. Cette valeur correspond à x=0,53. L'étude a été menée sur le tandem GaAs/Hg_{0,47}Cd_{0,53}Te. Elle a montré que ce tandem peut fournir un rendement maximum de 30% avec des contributions de 25% et 5% respectivement pour les cellules GaAs et Hg_{0,47}Cd_{0,53}Te [13] [14] [17]. Mais dans le cas d'une conversion parfaite du rayonnement solaire, les calculs montrent que le rendement passe de 45% avec une cellule à 65% avec les deux cellules (figure 1-1) [13] [14]. La conversion parfaite du rayonnement solaire est basée sur le concept de la cellule solaire idéale. Dans cette considération, on suppose que tous les photons ayant une énergie supérieure au gap du matériau sont absorbés et créant ainsi des paires électron-trous, lesquelles peuvent être séparées tout en conservant leur différence d'énergie initiale égale au gap. Il faut signaler que l'étude menée sur le tandem GaAs/Hg_{0,47}Cd_{0,53}Te n'a pas pris en compte les facteurs limitatifs du rendement de conversion tels que la réflexion, les phénomènes de génération-recombinaison, la résistance série ...etc. Ainsi les pertes relatives au courant et à la tension ont été négligées.

Le rendement optimum du tandem est obtenu en optimisant les paramètres physiques et géométriques de celui-ci. Ceci à partir des expressions des paramètres caractéristiques de la cellule solaire. Dans les différents termes contribuant au courant de court-circuit, on dénombre dix huit paramètres. Chacune des quatre régions du système (deux régions de type N et deux régions de type P) est caractérisée par la longueur de diffusion des porteurs minoritaires, le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires, la vitesse de recombinaison superficielle et la profondeur de jonction. Les zones de déplétion sont caractérisées par leur épaisseur. Tous ces paramètres ne sont pas indépendants. En particulier la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires d'une même zone sont liés au dopage de la dite zone. La largeur de la zone de déplétion est aussi liée aux dopages des zones avoisinantes. Ces dépendances ont ramené les dix huit paramètres à quatorze paramètres. L'optimisation de ces paramètres a permis d'obtenir les résultats présentés aux tableau suivant (tableau 1-1) [13] [14].

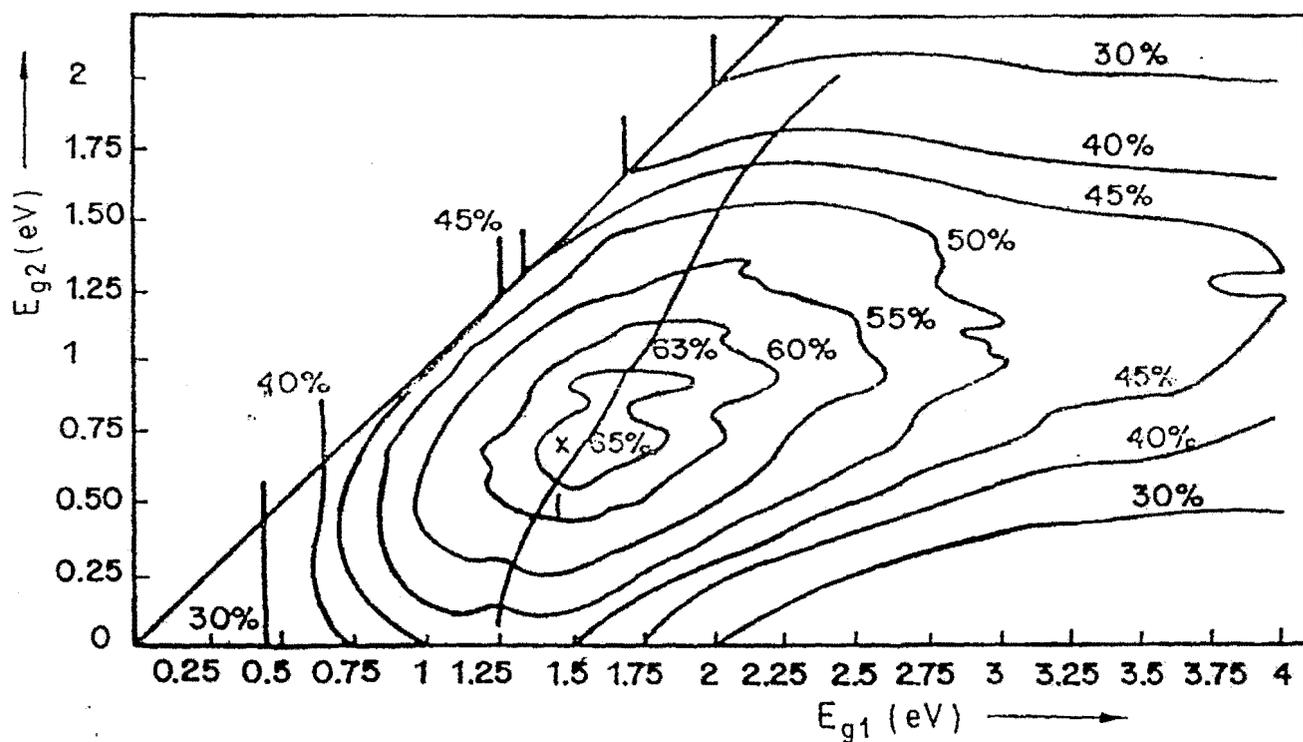


Figure 1-1 : Rendement idéal d'un système de deux cellules. Les courbes iso rendement correspondent au cas où les photopiles seraient dis connectées. L'intersection de ces courbes avec la courbe d'égal courant ($I_1=I_2$) donne le rendement du système quand les photopiles sont montées en série.

Paramètres caractéristiques	Tandem	GaAs	Hg _{0,47} Cd _{0,53} Te
I _{cc} (mA/cm ²)	29,2	29,3	29,2
V _{oc} (mV)	1188	939	249
I _m (ma/cm ²)	28	28	28
V _m (mV)	1031	861	170
rendement (%)	30	25	5
FF	0,83	0,88	0,65

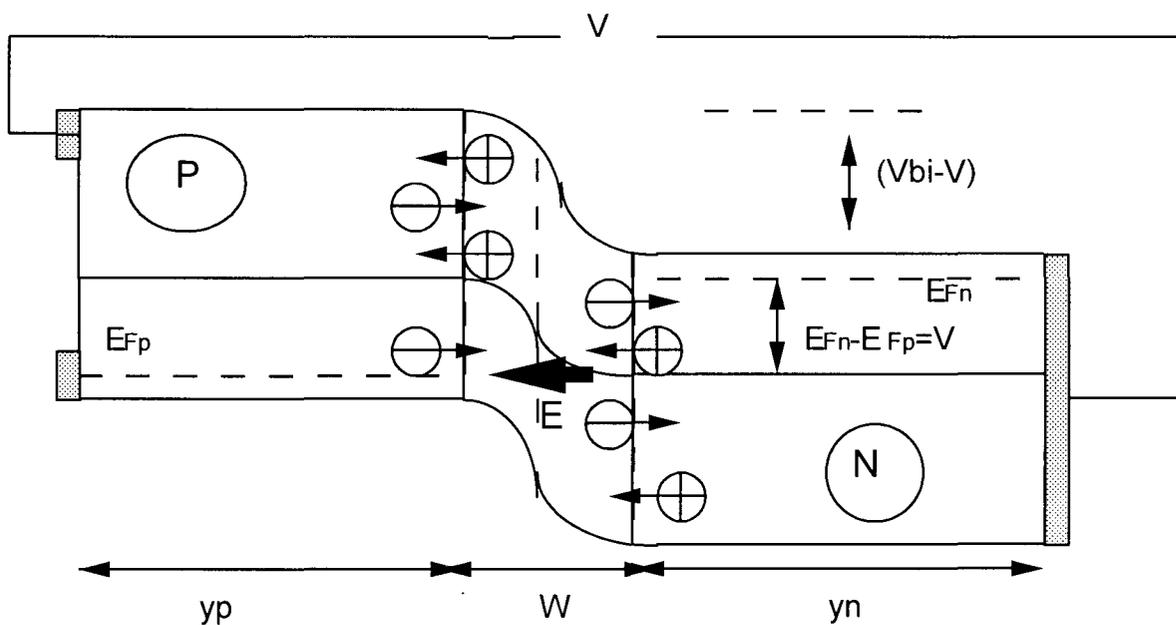
Tableau 1-1: Performances des cellules GaAs, Hg_{0,47}Cd_{0,53}Te et du tandem GaAs/ Hg_{0,47}Cd_{0,53}Te

Les résultats obtenus dans cette étude sont loin d'être réalistes. Ils ne tiennent pas compte des conditions réelles de fonctionnement des photopiles. En effet pour que les résultats des calculs théoriques se rapprochent de la réalité, il faut prendre en compte certains facteurs limitatifs du rendement de conversion. Ces facteurs seront exposés au paragraphe trois (III) de ce chapitre.

Pour notre travail, nous nous proposons dans un premier temps d'optimiser le tandem GaAs/ Hg_{1-x}Cd_xTe dans des conditions plus réalistes, ceci en tenant compte des différentes pertes. Il s'agit essentiellement des pertes par réflexion, des pertes dues aux phénomènes de génération-recombinaison, des pertes dues à la résistance série et à la recombinaison superficielle. Dans un second temps nous ferons un bilan énergétique de notre tandem optimal.

I-2 RAPPEL THEORIQUE SUR LA PHOTOPILE

I-2-1: Principe de fonctionnement du tandem



Figure

1-2: Schéma de la jonction P-N mouvement des porteurs de charges

$\ominus \rightarrow$: mouvement des électrons

$\oplus \rightarrow$: mouvement des trous

$\ominus ; \oplus$: charges d'espace.

\vec{E} : Champ électrique interne.

$V_{bi} - V$: hauteur de la barrière de potentiel.

E_{Fp} : niveau de Fermi des trous.

E_{Fn} : niveau de Fermi des électrons.

y_p : profondeur de jonction.

y_n : épaisseur de la base.

w : largeur de la zone de déplétion

V : potentiel délivré par la cellule.

\textcircled{P} : zone dopée P.

\textcircled{N} : zone dopée N.

L'élément de base de la photopile est la jonction P-N (figure1-2). Elle est réalisée en dopant un semi-conducteur avec des impuretés donneurs et accepteurs N et P respectivement. Ces deux régions ainsi créées dans le matériau ont des conductivités différentes. De ce fait, il apparaît à leur interface un champ électrostatique dirigé de N vers P. Son rôle est de collecter les paires électron-trous créées par l'absorption du rayonnement incident. Ces paires électron-trous sont créées dans les différentes régions N et P et à l'interface appelée zone de déplétion (figure1-2). Le nombre de porteurs créés varie suivant la profondeur d'absorption du rayonnement. Il est d'autant plus faible que cette profondeur est grande.

Les porteurs minoritaires des régions électriquement neutres diffusent vers l'interface où, sous effet du champ électrique, ils traversent la jonction vers les régions où ils sont majoritaires. Ces porteurs créent un courant de diffusion. Les électrons et trous, créés dans la zone de déplétion sont séparés par le champ respectivement vers les régions N et P. Ils créent ainsi un courant de génération. Le courant de la cellule est la somme des courants, issus de chacun de ces phénomènes. Dans le cas du tandem les deux cellules sont reliées par une jonction tunnel qui assure la circulation d'un même courant entre ces deux cellules. Cette jonction tunnel doit être optiquement inactive. Son gap doit être au moins égale à celui de la première cellule (figure1-3). Les barrières de potentiel ΔE_2 et ΔE_4 confinent les trous et les électrons dans les régions 2 et 5. Ainsi, le déplacement des électrons dans la jonction tunnel se fait de la région N de la première cellule vers la région P de la deuxième cellule et celui des trous dans le sens contraire.

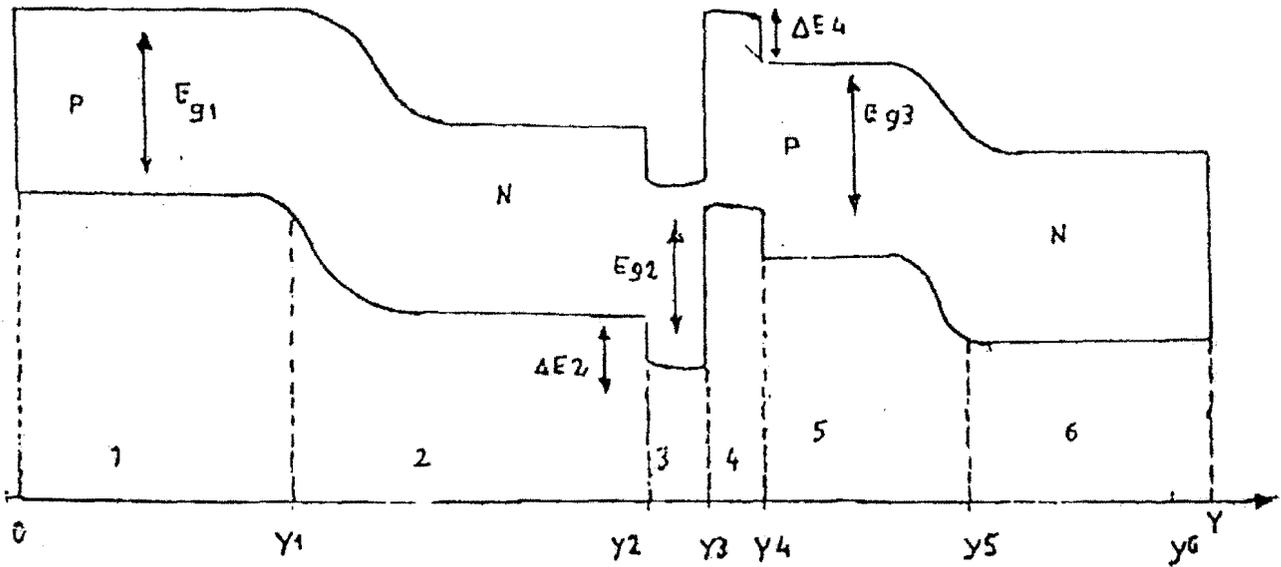


Figure 1-3 : Schéma du diagramme de bande de deux cellules montées en configuration monolithique [17]

I-2-2: Paramètres caractéristiques

La photopile est caractérisée par quatre paramètres importants:

* Le courant de court-circuit: I_{cc}

La connaissance de la réponse spectrale ($R_{sp}(\lambda)$) permet de le déterminer, ceci à l'aide l'expression (1-1).

$$I_{cc} = q \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) [1 - r(\lambda)] R_{sp}(\lambda) d\lambda \quad (1-1)$$

$r(\lambda)$: Coefficient de réflexion

$\Phi(\lambda)$: Flux incident.

* La tension de circuit-ouvert: V_{co} .

Elle représente la tension maximale que peut fournir la cellule.

$$V_{co} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_{os}} + 1 \right) \quad (1-2)$$

A : facteur d'idéalité

$A=1$ ou 2 suivant la prédominance du courant d'injection ou de celui provenant de la génération recombinaison dans la zone de charge d'espace [18].

* Le facteur de forme : FF

Il montre la déviation de la caractéristique I-V par rapport à un rectangle parfait correspondant à la photopile idéale.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{CO} I_{CC}} \quad (1-3)$$

* Le rendement: η

Il est donné par le rapport entre la puissance maximale fournie par la photopile et la puissance totale du rayonnement incident (p_{in}).

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (1-4)$$

Le schéma d'une photopile idéale est donné par la figure 1-4:

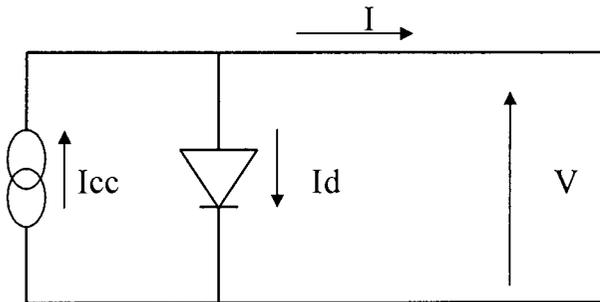


Figure 1-4: schéma d'une photopile idéale

Ces quatre paramètres varient suivant la nature du matériau (Ge, Si, GaAs,...) et la technologie de fabrication des photopiles.

I-3: FACTEURS LIMITATIFS

I-3-1 Pertes par réflexion.

Le rayonnement subit une réflexion partielle à la surface libre d'un solide. La portion de l'énergie réfléchie s'exprime à l'aide du coefficient de réflexion $r(\lambda)$. Ce coefficient est fonction de la longueur d'onde (λ) du rayonnement incident.

$$\Phi_r(\lambda) = r(\lambda) \cdot \Phi_i(\lambda) \quad (1-5).$$

$\Phi_i(\lambda)$: flux du rayonnement incident.

$\Phi_r(\lambda)$: flux du rayonnement réfléchi.

Dans le cas d'une incidence quasi-normale, le coefficient moyen de réflexion (R) est donné par la relation (1-6) [19].

$$R = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1} \right)^2 \quad (1-6)$$

ϵ_r étant le coefficient diélectrique relative du matériau.

Le coefficient moyen de réflexion (R) sur la surface libre de GaAs en incidence quasi-normale vaut 0.32 ($\epsilon_r = 13$) [20]. Trente deux pour-cent (32%) du rayonnement incident est donc réfléchi, ceci est énorme. Il est réduit si on dépose une couche mince d'oxyde sur la surface libre du semi-conducteur. Le dépôt d'une couche mince ($\sim 5.10^{-2} \mu\text{m}$) de SiO_2 sur GaAs réduit son coefficient de réflexion à 0.21. Ce coefficient ($r(\lambda)$), se calcule à l'aide de l'expression (1-7) [21].

$$r(\lambda) = \frac{\left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 + \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right) \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right) \cos \left(\frac{4\pi n_1 d}{\lambda} \right)}{1 + \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 + \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right) \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right) \cos \left(\frac{4\pi n_1 d}{\lambda} \right)} \quad (1-7)$$

n_0 : indice de l'air.

n_1 : indice de l'oxyde.

n_2 : indice du matériau.

d : épaisseur de la couche d'oxyde.

$r(\lambda)$ atteint sa valeur minimale pour une valeur de n_1 telle que (1-8):

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (1-8) \quad [22]$$

En plus du dépôt d'une couche d'oxyde, on peut texturiser la surface [23] [24] (Figure 1-5). Ceci permet de réduire énormément les pertes par réflexion. Ce type de cellule est appelée cellule noire. Le rayonnement réfléchi dans ce cas est alors:

$$\Phi_r(\lambda) = r^2(\lambda)\Phi_i(\lambda) \quad (1-9)$$

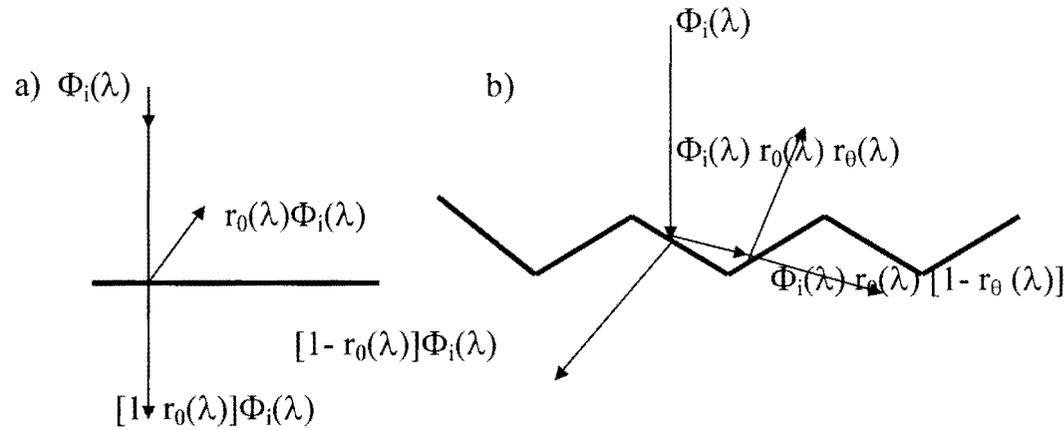


Figure 1-5: Comparaison des réflexions entre surface normale SN (a) et surface texturisée ST (b).

$r_0(\lambda)$: Coefficient de réflexion en incidence normale.

$r_\theta(\lambda)$: Coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence θ

Le flux transmis est alors $\Phi_i(\lambda)[1 - r^2(\lambda)]$ avec $r_\theta(\lambda) \neq r_0(\lambda)$

I-3-2 Pertes par transparence

Les photons dont l'énergie est insuffisante ($h\nu < E_g$) pour créer des paires électron-trou traversent la cellule sans être absorbés. Plus le gap est petit, plus la portion du spectre de l'énergie utilisée dans la conversion est large (figure 1- 6) [25]. Les matériaux dont la largeur de la bande interdite (gap) est petite absorbent une très grande partie de l'énergie reçue et par conséquent fournissent un courant de court-circuit élevé. L'inconvénient de ces matériaux est la valeur élevée de leur courant d'obscurité. Ceci se traduit par un abaissement de la tension. La variation du courant d'obscurité étant plus forte que celle du courant de court-circuit, il en résulte un rendement faible. Le gap est l'un des paramètres les plus importants dans le choix des matériaux utilisés pour la conversion photovoltaïque. L'énergie (P_{tr}) perdue par transparence est donnée par la relation (1-10).

$$P_{tr} = \int_0^{\infty} P_{in}(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot d) \cdot d\lambda \quad (1-10)$$

d: épaisseur du semi-conducteur.

P_{in} : puissance incidente du rayonnement.

Dans cette expression, on néglige l'absorption du rayonnement due aux impuretés. Les possibilités actuelles de réduction des pertes par transparence résident dans les modèles multijonctions ou dans l'introduction de niveau intermédiaire dans la bande interdite [25].

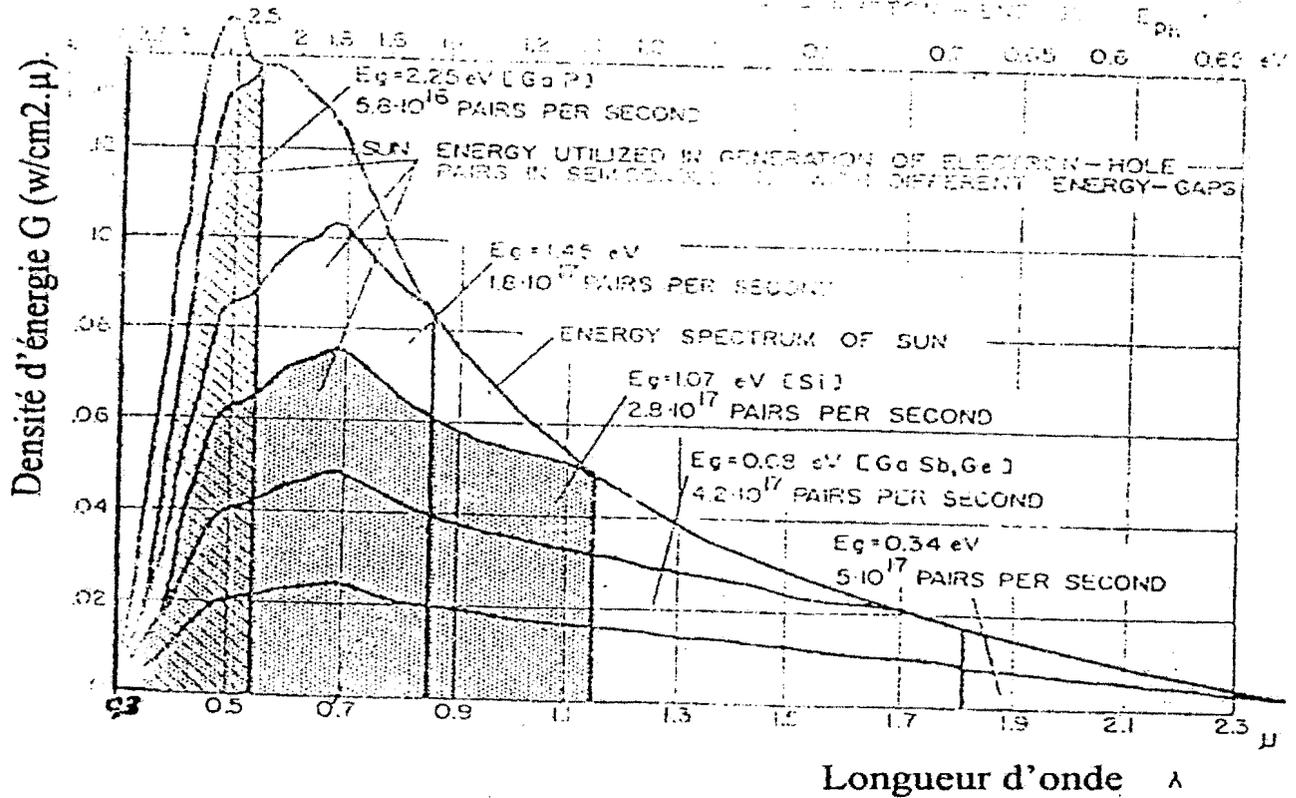


Figure 1-6: Spectre solaire au niveau de la mer pour une journée claire et ensoleillée utilisable pour la création des paires électron-trous dans un semi-conducteur en fonction de la largeur de la bande interdite (E_g) [25].

I-3-3: Effet joule dans la cellule

Les pertes d'énergie par effet Joule dans les photopiles peuvent être scindées en deux groupes:

- * Les pertes par effet joule dues à l'excès d'énergie des photons incidents, encore appelées les pertes par thermistance.

- * Les pertes par effet joule dues à la résistance série (R_s).

Toutes ces pertes provoquent un échauffement de la photopile. Cette élévation de la température entraîne une dégradation des performances de la cellule solaire [26] [27] [28]. En effet, la concentration intrinsèque (n_i) des porteurs croît avec la température. L'augmentation de n_i entraîne une dégradation de la tension de circuit-ouvert (V_{co}) et donc une baisse de la tension

de sortie. Le rendement de collecte des porteurs subit aussi une baisse provoquée par la diminution de la longueur de diffusion de ceux-ci. Les pertes par effet joule dans la résistance série peuvent être calculées en considérant chaque partie de la cellule.

I-3-3-1 Pertes par thermistance

Les pertes par thermistance sont dues à l'utilisation partielle de l'énergie du photon pour la création des paires électron-trous. Un grand nombre de photons absorbés possèdent une énergie plus grande que celle nécessaire pour la création des porteurs. L'énergie nécessaire pour la création des porteurs est égale à la largeur de la bande interdite (gap). L'excès de l'énergie du photon est perdue sous forme de chaleur. L'expression suivante permet d'évaluer cette perte [29]

$$P_{th} = \int_{\lambda_g}^{\infty} q \Phi_0(\lambda) [1 - r(\lambda)] [1 - \exp(-\alpha(\lambda)H)] [E(\lambda) - E_g] d\lambda \quad (1-10)$$

$\Phi_0(\lambda)$: flux de photons incident.

$r(\lambda)$: coefficient de réflexion

$\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption de la cellule.

H : épaisseur de la cellule.

$E(\lambda)$: énergie des photons incidents.

E_g : gap de la cellule.

.La figure 1-7 montre la proportion de l'énergie solaire utilisée pour la création des paires électron-trous. On suppose que tous les photons ayant une énergie supérieure au gap sont absorbés.

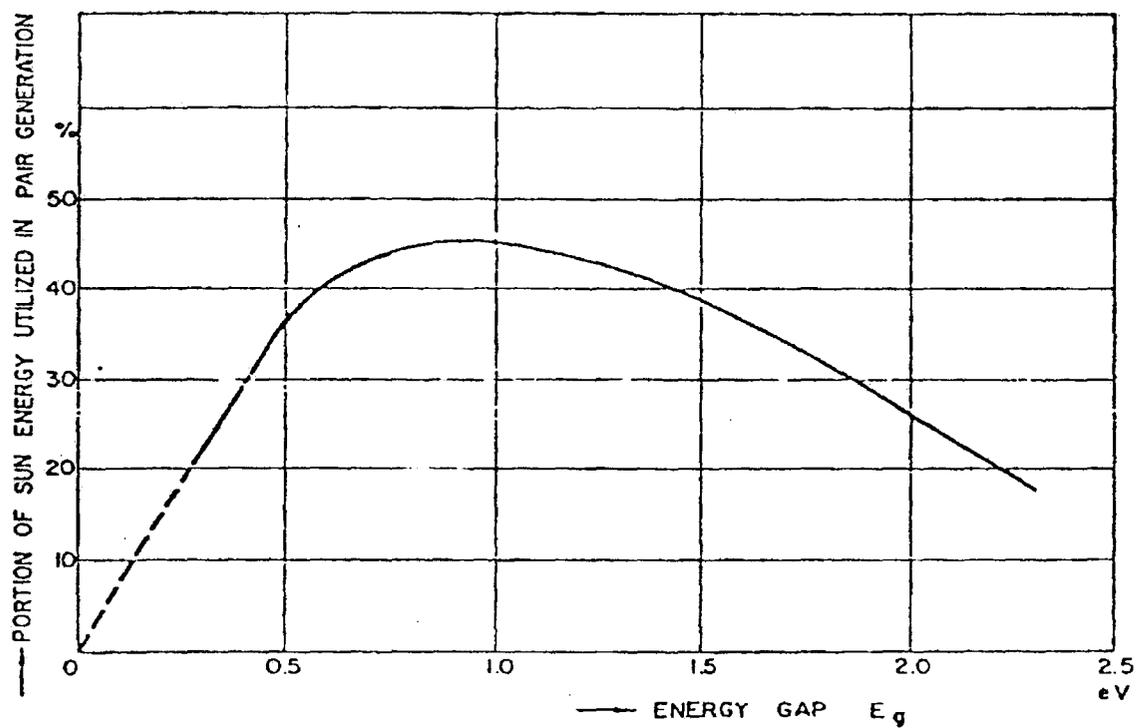


Figure 1-7: Proportion de l'énergie solaire qui peut être utilisée pour la création des paires électron-trous en fonction du gap du semi-conducteur [29].

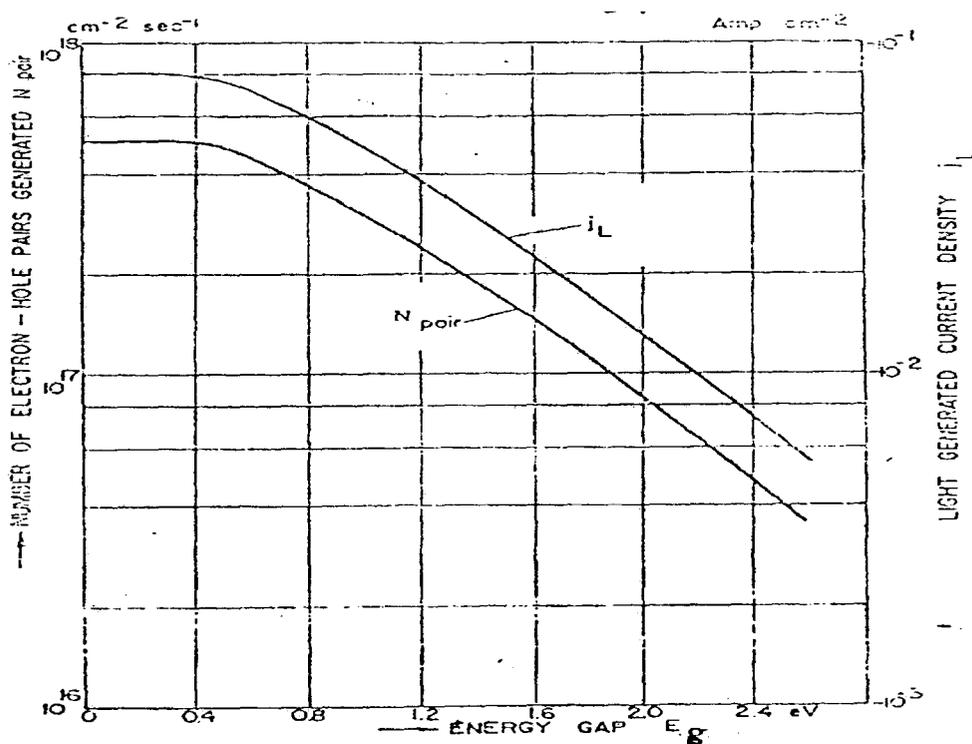


Figure 1-8: Densité des paires électron-trous créés et le photo courant J_L maximum théoriquement possible correspondante fonction de l'énergie du gap E_g [25].

Le photo courant généré dans la cellule est fonction du nombre de porteurs créés. La figure 1-8 présente la densité des paires électron-trous générés par l'absorption de la lumière du soleil et le photo courant engendré correspondant.

Ces pertes sont indépendantes des facteurs technologiques.

I-3-3-2 Pertes dues à la résistance série

La résistance série est un paramètre qui affecte sérieusement la performance des photopiles. Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau. Les résistances séries des premières cellules au silicium et au germanium sont dominées par la résistance de contact des électrodes. Les résistances séries des cellules d'aujourd'hui sont dominées par leur composante provenant de la couche diffusée [30]. La valeur élevée de cette résistance vient du fait que la section traversée par les porteurs dans cette région est très faible. Ces résistances peuvent être déterminées expérimentalement [31] [32] [33].

La relation (1-11) permet d'évaluer la puissance (P_{Rs}) perdue par effet joule due à la résistance série R_s .

$$P_{Rs} = R_s \cdot I^2. \quad (1-11).$$

I : intensité du courant fourni par la cellule.

La résistance série n'est pas une constante pour une cellule donnée. Elle dépend de l'éclairement qui modifie la résistivité du semi-conducteur (effet de photoconduction) et de la tension appliquée. Une étude minutieuse montre [34] que la tension appliquée crée un champ électrique dans tout le semi-conducteur et peut également modifier les hauteurs de barrière au niveau des contacts métalliques qui ne sont pas toujours parfaitement ohmiques.

I-3-4 courants de génération-recombinaison

Sans éclairage et en l'absence des résistances shunt et série, la caractéristique courant-tension (I - V) d'une cellule en polarisation directe est donnée par la somme de trois (3) courants d'obscurité. Ces courants sont dus à des mécanismes d'injection, de recombinaison et d'effet tunnel. Nous nous intéressons ici aux phénomènes de recombinaison et d'effet tunnel

La zone de charge d'espace est le siège de phénomènes de recombinaison. Des électrons sont injectés dans la zone de charge d'espace à partir de la région N et des trous à partir de la région P. Ces électrons et ces trous peuvent se recombiner et donner naissance à un courant appelé courant de recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace (J_{rg}). Ce courant s'écrit:

$$J_{rg} = \frac{q n_i w}{\sqrt{\tau_n \tau_p}} \left[\exp\left(\frac{qV}{2KT}\right) - 1 \right] \quad (1-22)[18]$$

Le second courant (J_t) auquel nous nous intéressons est dû au passage des porteurs par effet tunnel. L'électron franchit la barrière de potentiel non seulement pour des énergies supérieures à la hauteur de la barrière, mais aussi pour des énergies beaucoup plus faibles en traversant la barrière par dessous si elle est suffisamment mince. On n'observe le courant tunnel que dans les structures P-N de mauvaise qualité et dans les hétérojonctions [35]. Dans le cas des hétérojonctions, les défauts créés à l'interface par la différence des réseaux cristallins facilitent le phénomène. Dans le cas des photopiles GaAs on n'observe pratiquement pas de courant tunnel.

La probabilité de l'effet tunnel est proportionnelle à la quantité:

$$\exp(-10^8 \cdot d \cdot \sqrt{\Phi}) \quad [36]$$

Φ = hauteur de la barrière.

d = épaisseur de la barrière.

L'effet tunnel peut être assisté par des pièges [35] [37]. C'est le cas où existent des états localisés dans la bande interdite (effet tunnel assisté). Dans ce processus, les électrons de la bande de conduction de la région de type N traversent la jonction par l'intermédiaire des états

localisés pour rejoindre la bande de valence de la région de type p. Le courant dû à ce phénomène est donné par l'expression (1-23) [38].

$$J_t = \frac{v q^3 E \sqrt{2m^*}}{4 \Pi^2 \hbar^2 E_g^{\frac{1}{2}}} \exp\left(\frac{-4\sqrt{2m^*} E_g^{\frac{1}{2}}}{3q\hbar E}\right) \quad (1-23)$$

La figure 1-9: présente les mécanismes de passage de ces différents courants.

m^* : masse effective.

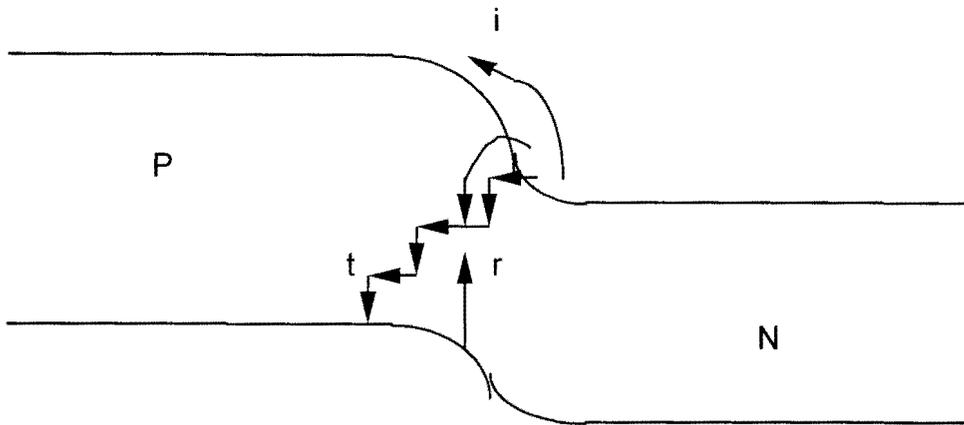


Figure 1-9: Mécanisme de passage des différents courants [35]

i: courant d'injection

r: Courant de génération recombinaison

t: Courant tunnel

En dehors de ces mécanismes qui affectent le courant fourni par la cellule éclairée, d'autres phénomènes tels que les effets de fuite contribuent également à la dégradation de ce courant.. Ces effets peuvent être représentés par la mise en parallèle avec la diode d'une résistance shunt (R_{sh}). (Figure 1-10).

Dans notre optimisation nous allons supposer R_p infinie afin de négliger les courants de fuite. En toute rigueur, bien qu'elle soit élevée, elle n'est pas infinie. La prise en compte de ce

paramètre nous donne l'équation (1-24) de la caractéristique d'une cellule solaire. Dans cette considération, la tension de circuit ouvert V_{co} de la cellule peut-être modifiée mais le courant de court-circuit I_{cc} reste inchangé [39].

$$I = I_{cc} - \frac{(V + IR_s)}{R_p} - I_{os} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{KT}\right) - 1 \right] - I_{rs} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{2KT}\right) - 1 \right] \quad (1-24)$$

Cette équation donne le schéma équivalent suivant pour la cellule solaire.

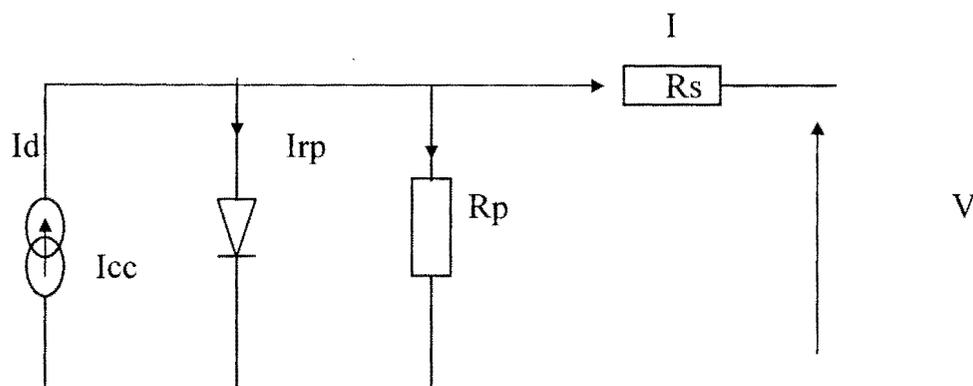


Figure 1-10 : Schéma équivalent de la cellule solaire avec la résistance parallèle R_p [40]

Avec $I_{rp} = (V + IR_s)/R_p$.

$$I = I_{cc} - I_{rp} - I_d.$$

L'équation (1-24) ne peut-être résolue de façon analytique et l'on ne peut calculer les paramètres qu'en faisant des approximations ou en utilisant des méthodes numériques d'ajustement. La méthode de KRAMMER et LUDINGTON [41] permet de déduire ces paramètres en utilisant la caractéristique I-V à l'obscurité et sous éclaircissement.

A partir du schéma équivalent (figure 1-10), la caractéristique inverse à l'obscurité prévoit une équation de droite donnée par l'équation (1-25).

$$V = I \cdot (R_p + R_s) - I_s \cdot R_p \quad (1-25)$$

I_s : Courant de saturation

La pente de cette droite est $(R_p + R_s)$ et cette quantité est pratiquement égale à R_p , R_p étant très supérieure à R_s ($R_p \gg R_s$).

I-3-5: Réponse spectrale

Les porteurs créés à une distance de la jonction inférieure à la longueur de diffusion sont collectés; alors que la majorité des porteurs générés à une distance plus grande se recombinaient. La réponse spectrale permet de rendre compte de la proportion des porteurs collectés. La réponse spectrale (R_{sp}) est le nombre de porteurs créés par un photon. Elle est donnée par l'expression (1-26).

$$R_{sp}(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{q\Phi(\lambda)[1 - r(\lambda)]} \quad (1-26)$$

$r(\lambda)$ = coefficient de réflexion à la surface du matériau.

$\Phi(\lambda)$ = flux de photons de longueur d'onde λ

L'insertion d'un champ accélérateur au niveau du front permet d'améliorer le rendement de collecte. Ce champ peut être créé en utilisant un gradient d'impuretés ou de gap. Il permet de réduire considérablement le nombre de porteurs qui se recombinaient en surface.

CONCLUSION

Après avoir rappelé quelques résultats d'études antérieures effectuées sur la structure monolithique GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe dans le cadre de la détection infrarouge, de la conversion photovoltaïque et situé l'objet de notre travail, nous avons rappelé le principe de fonctionnement et les paramètres caractéristiques d'une photopile. Nous avons ensuite passé en revue les principaux facteurs limitatifs du rendement de conversion et de même que quelques solutions susceptibles de réduire considérablement les pertes occasionnées par ces facteurs.

CHAPITRE II:

MODÉLISATION DU TANDEM

INTRODUCTION

La modélisation d'un système physique nécessite la connaissance de la structure physique du système et les équations qui régissent le fonctionnement de ce système. C'est ainsi que dans ce chapitre nous présentons dans un premier temps le modèle géométrique du tandem ainsi que les équations de base qui régissent le fonctionnement d'une photopile. Dans un second temps nous exposerons la méthode de résolution de ces équations appliquées au tandem. La résolution de ces équations appliquées au tandem nous permettra d'obtenir les expressions des courants de court circuit I_{cc} et d'obscurité I_{os} du tandem.. Nous terminerons par la description de l'algorithme du programme de calcul sur ordinateur.

II-1 : STRUCTURE DU TANDEM

La photopile que nous allons étudier a une structure monolithique. Elle est composée d'une fenêtre $Al_yGa_{1-y}As$ et de deux cellules GaAs et $Hg_{1-x}Cd_xTe$ reliées entre elles par une jonction tunnel. Une couche antireflet a été déposée sur la fenêtre afin d'atténuer les phénomènes de réflexion à la surface (figure 2-1).

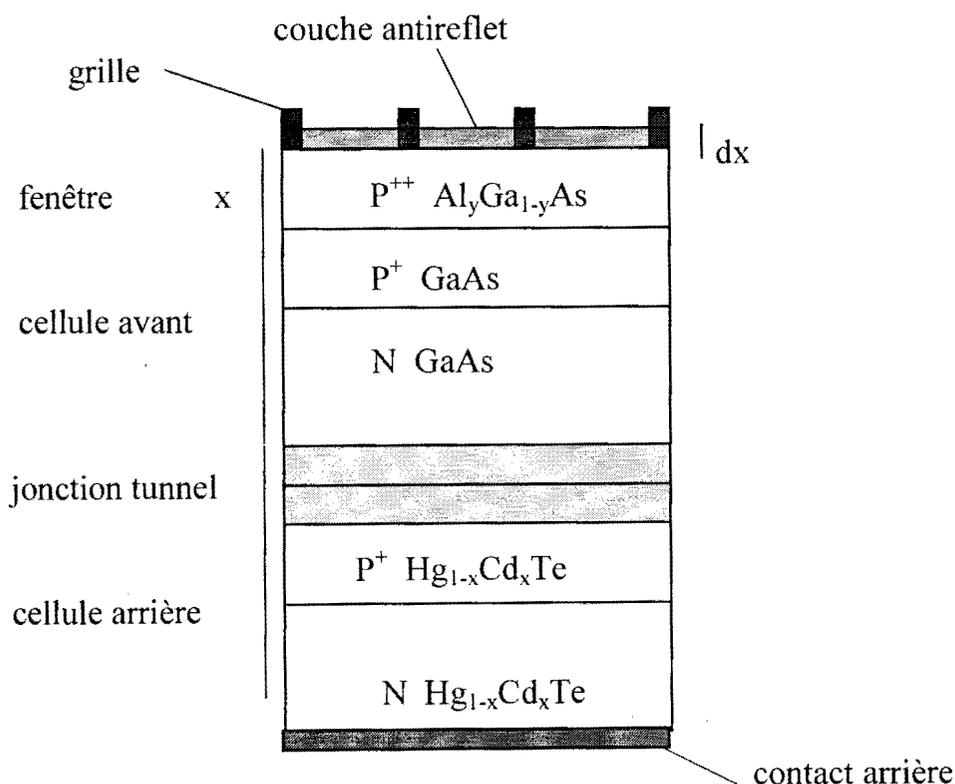


figure 2-1: structure physique du tandem

II-1-1 Utilisation d'une fenêtre

La surface de GaAs est très recombinaison avec une vitesse de recombinaison superficielle très élevée variant de 10^6 cm/s à 10^7 cm/s. La fenêtre a pour rôle de diminuer les phénomènes de recombinaison superficielle. Le matériau choisi est $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Il présente des qualités favorables à une utilisation comme fenêtre sur une cellule GaAs:

- * Sa surface est de meilleure qualité que celle de GaAs ($\sim 10^4$ cm/s).
- * Il a un gap indirect et celui-ci est supérieur à celui de GaAs.
- * La probabilité de transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction dans ce type de matériau est faible parce que l'absorption de la lumière fait intervenir une troisième particule (le phonon). Le coefficient d'absorption reste alors faible jusqu'à des valeurs de l'énergie des photons correspondant à la transition gap direct gap indirect (figure 2-2) [42] Cette nature fait que $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ nécessite une épaisseur élevée pour son absorption du rayonnement. En plus, la bande interdite de $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ croît avec la teneur du matériau en aluminium (figure 2-3) et son coefficient d'absorption est inférieure à celui de GaAs (figure 2-2). Il suffit donc d'utiliser une couche mince et riche en aluminium pour éviter que cette fenêtre n'absorbe le rayonnement solaire. Outre ces qualités, les matériaux possèdent presque le même paramètre cristallin [43].

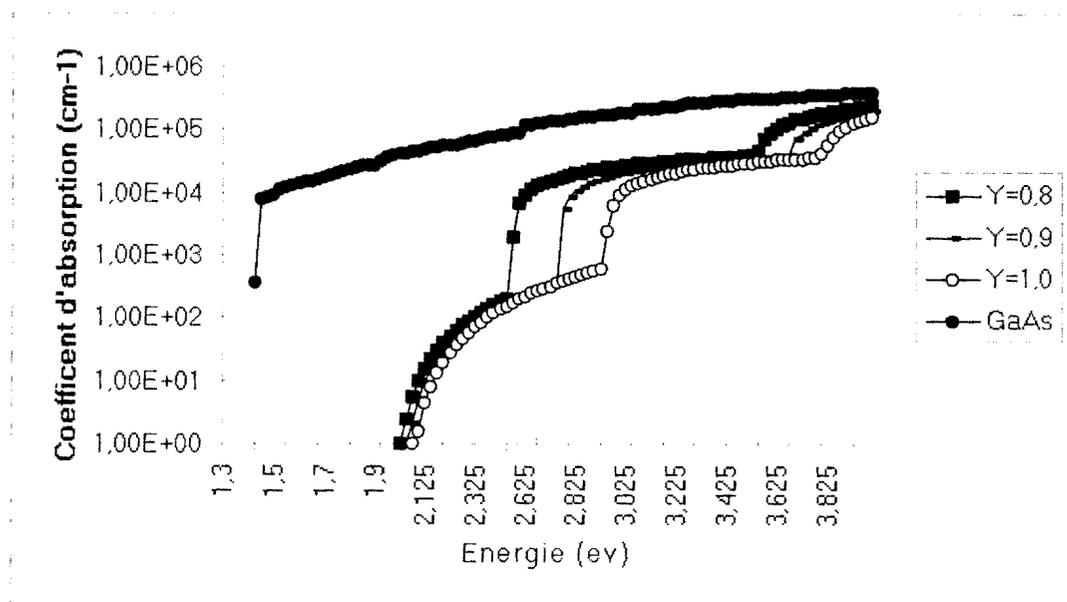


figure 2-2: Coefficient d'absorption de GaAs et de Al_yGa_{1-y}As pour $y = 0,8; 0,9; 1,0$ en fonction de l'énergie du photon

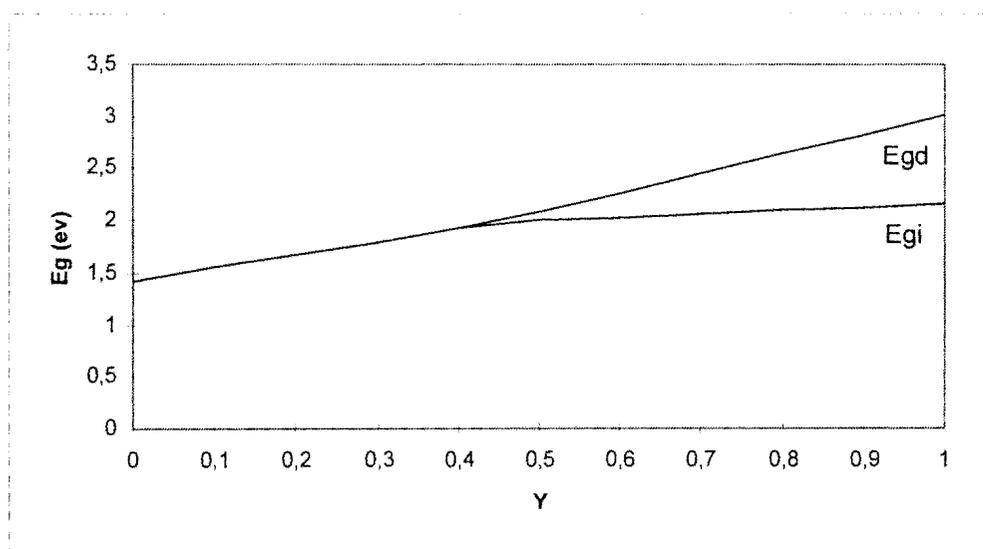


Figure 2-3: Variation du gap (E_g) de Al_yGa_{1-y}As en fonction de y [42].

Egd: gap direct; Egi: gap indirect.

II-2-2: Utilisation d'une Jonction tunnel

La circulation d'un même courant entre les deux cellules est assurée par une jonction tunnel. l'épaisseur de cette jonction doit être très faible (environ $0,1\mu\text{m}$) pour minimiser les pertes optiques. La jonction doit être en plus thermiquement stable et avoir un courant pic I_p (figure 2-4) supérieur au courant de court-circuit du tandem [44].

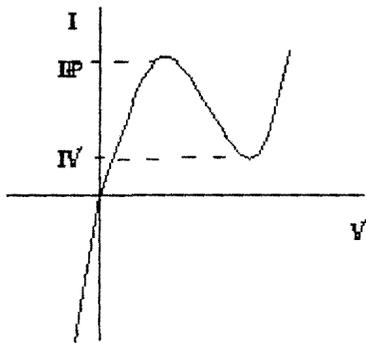


figure 2-4: Caractéristique d'une diode tunnel [45].

II-2 : EQUATIONS DE BASE

Pour mettre en place les équations qui gouvernent les caractères statiques et dynamiques des porteurs au sein du semi-conducteur, nous allons supposer qu'il n'y a pas d'intervention du champ magnétique. Dans ces conditions on obtient les deux équations [42] suivantes.

Pour les électrons:

$$\vec{i}_n = q \mu_n n \vec{E} + q D_n \text{grad}n \quad (2-1)$$

Pour les trous:

$$\vec{i}_p = q \mu_p p \vec{E} - q D_p \text{grad}p \quad (2-2)$$

Les équations de continuité [42] pour les deux types de porteurs s'expriment comme suit:

Pour les électrons:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - U_n + \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{i}_n \quad (2-3)$$

Pour les trous:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - U_p - \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{i}_p \quad (2-4)$$

Avec G le taux de génération des paires électrons-trous [46]:

$$G(\lambda) = \alpha(\lambda) \Phi(\lambda) [1 - R(\lambda)] \exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (2-5)$$

$$\text{avec: } \Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) \exp(-\alpha_3 x_{fe})$$

En supposant que le régime est de faible injection, les excès Δn et Δp des porteurs par rapport au régime d'équilibre sont faibles devant les concentrations des porteurs n_0 , p_0 ($\Delta n \ll n_0$, $\Delta p \ll p_0$). On peut écrire les expressions des taux de recombinaison U_n et U_p comme suit:

$$U_n = \frac{n - n_0}{\tau_n} = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (2-6)$$

$$U_p = \frac{p - p_0}{\tau_p} = \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (2-7)$$

En négligeant l'effet du champ électrostatique en dehors de la zone de déplétion et en supposant que les jonctions sont en régime stationnaire (éclairage permanent), les équations (2-3) et (2-4) en dimension un deviennent:

$$G - \frac{n - n_0}{\tau_n} + \frac{D_n \partial^2 n}{\partial x^2} = 0 \quad (2-8)$$

$$G - \frac{p - p_0}{\tau_p} + \frac{D_p \partial^2 p}{\partial^2 x} = 0 \quad (2-9)$$

II-3 : METHODE DE RESOLUTION

II-3-1 : Détermination de la concentration des porteurs minoritaires.

Les équations (2-8) et (2-9) nous permettent de déterminer les concentrations des porteurs minoritaires dans les différentes régions N et P du tandem (figure 2-5).

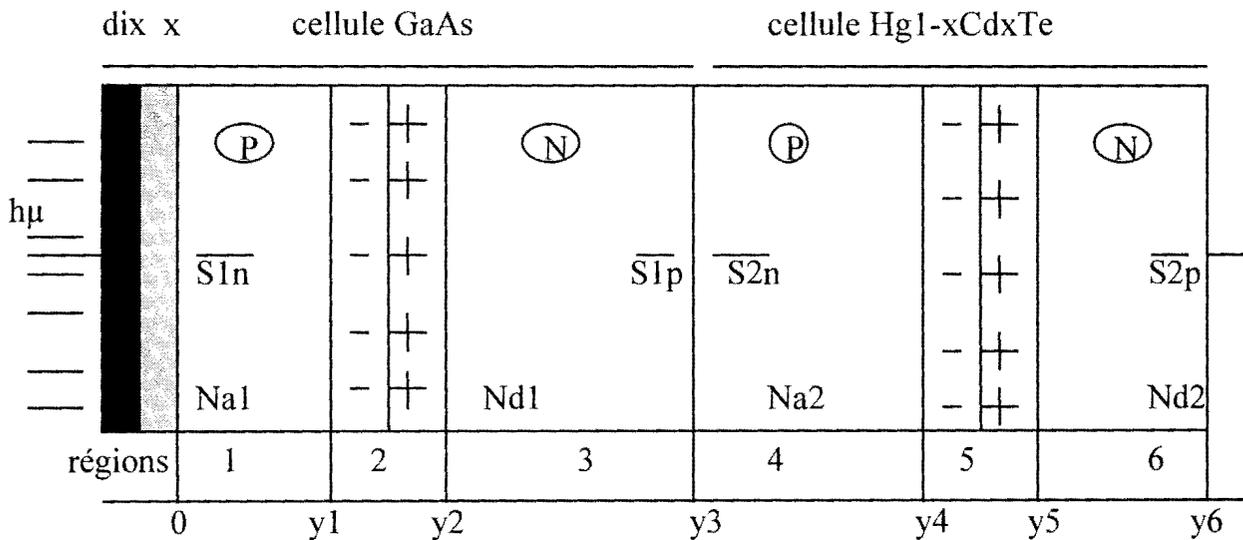


Figure 2-5: Différentes régions du tandem.

dix : épaisseur de la couche d'oxyde.

x : épaisseur de la fenêtre.

$y_{1p}=y_1$; $w_1=y_2-y_1$; $y_{1n}=y_3-y_2$; $y_{2p}=y_4-y_3$; $w_2=y_5-y_4$; $y_{2n}=y_6-y_5$; $H=y_3$.

Ces équations sont assujetties aux conditions aux limites suivantes:

* Sur les faces avant des couches P en $x=0$ et $x=y_3$:

$$D_n \frac{\partial (n - n_0)}{\partial x} = S_n (n - n_0) \quad (2-10)$$

* Sur les faces arrières des couches N en $x=y_3$ et $x=y_6$:

$$D_p \frac{\partial (p - p_0)}{\partial x} = -S_p (p - p_0) \quad (2-11)$$

* Aux bords des zones de déplétion:

- régions P

$$\text{en } x=y1 \text{ et } x=y4 \quad n = n_0 \exp(\beta v) \quad (2-12)$$

- régions N

$$\text{en } x=y2 \text{ et } x=y5 \quad p = p_0 \exp(\beta v) \quad (2-13)$$

Les équations (2-8) et (2-9) avec les différentes conditions aux limites permettent l'obtention des concentrations des porteurs minoritaires $n1$ et $p1$ pour la cellule GaAs et $n2$ et $p2$ pour la cellule $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

II-3-2 : Détermination des courants.

Dans les régions P et N uniformément dopées, les courants d'électrons et de trous sont essentiellement dominés par des courants de diffusion. Ces courants sont régis par une équation de diffusion:

* Pour les électrons:

$$\text{en } x=y1 \text{ et } x=y4 \quad I_n = qD_n \frac{\partial(n - n_0)}{\partial x} \quad (2-14)$$

* Pour les trous:

$$\text{en } x=y2 \text{ et } x=y5 \quad I_p = -qD_p \frac{\partial(p - p_0)}{\partial x} \quad (2-15)$$

Compte tenu des valeurs très élevées des vitesses de recombinaisons sur les faces arrières des cellules, nous les avons prises égales à l'infini ($s1p=\infty$, $s2p=\infty$). Dans ces conditions nous obtenons les expressions suivantes pour les courants dans les différentes régions du tandem (figure 2-5).

* Courants dans les régions 1 et 3 de la cellule GaAs.

Région1:

$$I_{n1}(\lambda) = -\frac{q D_{n1} n_{o1}}{L_{n1}} \left[\frac{\operatorname{sh}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \operatorname{ch}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \operatorname{sh}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right)} \right] [\exp(\beta v_{11}) - 1] +$$

$$\frac{q \Phi_0 (1 - r(\lambda)) L_{n1} \alpha_1 \exp(-x f e \alpha_3)}{1 - \alpha_1^2 L_{n1}^2} \left\{ L_{n1} \alpha_1 \exp(-\alpha_1 y_{1p}) \right.$$

$$\left. - \left[L_{n1} \alpha_1 + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \right] + \exp(-\alpha_1 y_{1p}) \left[\operatorname{sh}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \operatorname{ch}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) \right] \right\}$$

$$\frac{\quad}{\operatorname{ch}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \operatorname{sh}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right)} \quad (2-16)$$

S_{1n} est fonction des paramètres de la fenêtre et de N_{a1} . Elle s'exprime comme suit:

$$S_{1n} = \left(\frac{D_{n3} N_{a1}}{L_{n3} N_{a3}} \right) \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{x f e}{L_{n3}}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{x f e}{L_{n3}}\right)} \quad [47][48] [49] [50] [51] [52]. \quad (2-17)$$

Région3:

$$I_{p1}(\lambda) = -\frac{q D_{p1} p_{o1}}{L_{p1}} \left[\frac{\operatorname{Sh}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) + \frac{L_{p1} S_{1p}}{D_{p1}} \operatorname{Ch}\left(\frac{Y_{1n}}{L_{p1}}\right)}{\operatorname{Ch}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) + \frac{L_{p1} S_{1p}}{D_{p1}} \operatorname{Sh}\left(\frac{Y_{1n}}{L_{p1}}\right)} \right] [\exp(\beta v_1) - 1] +$$

$$\frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \alpha_1 L_{p1} \exp(-x f e \alpha_3)}{1 - \alpha_1^2 L_{p1}^2} \exp\left[-\alpha_1 (y_{1p} + w_1)\right].$$

$$\left\{ -\alpha_1 L_{p1} + \frac{\frac{S_{1p}L_{p1}}{D_{p1}} \operatorname{ch}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) + \operatorname{Sh}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) - \exp(-\alpha_1 y_{1n}) \left[\frac{S_{1p}L_{p1}}{D_{p1}} - \alpha_1 L_{p1} \right]}{\frac{S_{1p}L_{p1}}{D_{p1}} \operatorname{sh}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right)} \right\} \quad (2-18)$$

Le Champ électrique est intense dans la zone de charge d'espace. Les porteurs photo générés dans cette région sont accélérés hors de celle-ci avant qu'ils ne se recombinent. Le courant dû à ces porteurs est donné par l'expression (2-13).

$$I_{dz1}(\lambda) = q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \exp(-x_{fe}\alpha_3) \exp(-\alpha_1 y_{1p}) [1 - \exp(-\alpha_1 w_1)] \quad (2-19)$$

En tenant compte du courant de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace, le courant de la région 2 de la cellule GaAs. devient:

$$I_{dz1}(\lambda) = q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \exp(-x_{fe}\alpha_3) \exp(-\alpha_1 y_{1p}) [1 - \exp(-\alpha_1 w_1)] - \frac{qn_{i1}w_1\sqrt{D_{n1}D_{p1}}}{L_{n1}L_{p1}} \left[\exp\left(\frac{qV_1}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (2-20)$$

Dans ces différentes expressions, le facteur $\Phi_0(1 - r(\lambda)) \exp(-\alpha_3 x_{fe})$ exprime la quantité de flux transmise à la cellule GaAs à travers la couche d'oxyde et la fenêtre.

Le courant I_1 de la cellule GaAs est la somme de ces trois courant.

$$I_1 = I_{n1} + I_{p1} + I_{dz1} \quad (2-21)$$

* Courant des régions 4 et 6 de la cellule $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Région4: ¹

$$I_{n2}(\lambda) = -\frac{q D_{n2} n_{o2}}{L_{n2}} \left[\frac{\text{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \text{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \text{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right)} \right] [\exp(\beta v_2) - 1] +$$

$$\frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) L_{n2} \alpha_2 \exp(-x f e \alpha_3)}{1 - \alpha_2^2 L_{n2}^2} \exp(-\alpha_1 H) \left\{ L_{n2} \alpha_2 \exp(-\alpha_2 y_{2p}) \right.$$

$$\left. - \left[L_{n2} \alpha_2 + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \right] + \exp(-\alpha_2 y_{2p}) \left[\text{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \text{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) \right] \right\}$$

$$\left. \frac{\text{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \text{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \text{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right)} \right\} \quad (2-22)$$

Région6:

$$I_{p2}(\lambda) = -\frac{q D_{p2} p_{o2}}{L_{p2}} \left[\frac{\frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} \text{ch}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) + \text{sh}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) + \frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} \text{sh}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right)} \right] [\exp(\beta v_2) - 1] +$$

$$\frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \alpha_2 L_{p2} \exp(-x f e \alpha_3)}{1 - \alpha_2^2 L_{p2}^2} \exp(-\alpha_1 H) \exp[-\alpha_2 (y_{2p} + w_2)].$$

$$\left\{ -\alpha_2 L_{p2} + \frac{\frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} \text{ch}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) + \text{sh}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) - \exp(-\alpha_2 y_{2n}) \left[\frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} - \alpha_2 L_{p2} \right]}{\text{ch}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) + \frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} \text{sh}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right)} \right\} \quad (2-23)$$

De même que pour le courant de la région 2 de GaAs, le courant de la région 5 de la cellule $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ est composé de deux termes (courant de génération-recombinaison et courant de génération) (2-24).

$$I_{dz2}(\lambda) = q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha_1 H) \exp(-x f e \alpha_3) \exp(-\alpha_2 y_{2p}) \left[1 - \exp(-\alpha_2 w_2) \right] - \frac{q n_{i2} w_2 \sqrt{D_{n2} D_{p2}}}{L_{n2} L_{p2}} \left[\exp\left(\frac{q V_2}{2 k T}\right) - 1 \right] \quad (2-24)$$

Le facteur $\Phi_0 (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha_3 x f e) \exp(-\alpha_1 H)$ exprime la quantité de flux transmise à la cellule $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ à travers la couche d'oxyde, la fenêtre et la cellule GaAs.

Le courant I_2 de la cellule $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ est la somme de ces trois courants.

$$I_2 = I_{n2} + I_{p2} + I_{dz2} \quad (2-25)$$

Les courants I_1 et I_2 peuvent s'exprimer sous la forme:

$$I_1 = -I_{os1} \left[\exp(\beta V_1) - 1 \right] - I_{rgs1} \left[\exp\left(\frac{\beta V_1}{2}\right) - 1 \right] + I_{cc1} \quad (2-26)$$

$$I_2 = -I_{os2} \left[\exp(\beta V_2) - 1 \right] - I_{rgs2} \left[\exp\left(\frac{\beta V_2}{2}\right) - 1 \right] + I_{cc2} \quad (2-27)$$

Avec

$$I_{os1} = \frac{q D_{n1} n_{o1}}{L_{n1}} \left[\frac{\text{sh}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \text{ch}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \text{sh}\left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}}\right)} \right] + \frac{q D_{p1} p_{o1}}{L_{p1}} \left[\frac{\text{sh}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) + \frac{L_{p1} s_{1p}}{D_{p1}} \text{ch}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right)}{\text{ch}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right) + \frac{L_{p1} s_{1p}}{D_{p1}} \text{sh}\left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}}\right)} \right] \quad (2-28)$$

$$I_{ccl} = \frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) L_{n1} \alpha_1 \exp(-x f e \alpha_3)}{1 - \alpha_1^2 L_{n1}^2} \left\{ L_{n1} \alpha_1 \exp(-\alpha_1 y_{1p}) \right. \\ \left. - \left[L_{n1} \alpha_1 + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \right] + \exp(-\alpha_1 y_{1p}) \left[\operatorname{sh} \left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}} \right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \operatorname{ch} \left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}} \right) \right] \right\} \\ \frac{1}{\operatorname{ch} \left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}} \right) + \frac{L_{n1} s_{1n}}{D_{n1}} \operatorname{sh} \left(\frac{y_{1p}}{L_{n1}} \right)}$$

$$\frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \alpha_1 L_{p1} \exp(-x f e \alpha_3)}{1 - \alpha_1^2 L_{p1}^2} \exp[-\alpha_1 (y_{1p} + w_1)] \\ \left\{ -\alpha_1 L_{p1} + \frac{\frac{S_{1p} L_{p1}}{D_{p1}} \operatorname{ch} \left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}} \right) + \operatorname{sh} \left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}} \right) - \exp(-\alpha_1 y_{1n}) \left[\frac{S_{1p} L_{p1}}{D_{p1}} - \alpha_1 L_{p1} \right]}{\frac{S_{1p} L_{p1}}{D_{p1}} \operatorname{sh} \left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}} \right) + \operatorname{ch} \left(\frac{y_{1n}}{L_{p1}} \right)} \right\} \\ +$$

$$I_{dz1}(\lambda) = q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \exp(-x f e \alpha_3) \exp(-\alpha_1 y_{1p}) [1 - \exp(-\alpha_1 w_1)] \quad (2-29)$$

$$I_{os2} = \frac{q D_{n2} n_{o2}}{L_{n2}} \left[\frac{\operatorname{sh} \left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}} \right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \operatorname{ch} \left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}} \right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}} \right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \operatorname{sh} \left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}} \right)} \right] + \\ \frac{q D_{p2} P_{o2}}{L_{p2}} \left[\frac{\frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} \operatorname{ch} \left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}} \right) + \operatorname{sh} \left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}} \right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}} \right) + \frac{L_{p2} S_{2p}}{D_{p2}} \operatorname{sh} \left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}} \right)} \right] \quad (2-30)$$

$$\begin{aligned}
I_{cc2} = & \frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) L_{n2} \alpha_2 \exp(-x_{fe}\alpha_3)}{1 - \alpha_2^2 L_{n2}^2} \exp(-\alpha_1 H) \left\{ L_{n2} \alpha_2 \exp(-\alpha_2 y_{2p}) \right. \\
& \left. - \left[L_{n2} \alpha_2 + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \right] + \exp(-\alpha_2 y_{2p}) \left[\operatorname{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \operatorname{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) \right] \right\} \\
& \left. \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \operatorname{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right) + \frac{L_{n2} s_{2n}}{D_{n2}} \operatorname{sh}\left(\frac{y_{2p}}{L_{n2}}\right)} \right\} \\
& + \frac{q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \alpha_2 L_{p2} \exp(-x_{fe}\alpha_3)}{1 - \alpha_2^2 L_{p2}^2} \exp(-\alpha_1 H) \exp\left[-\alpha_2 (y_{2p} + w_2)\right] \\
& \left\{ -\alpha_2 L_{p2} + \frac{\frac{L_{p2} s_{2p}}{D_{p2}} \operatorname{ch}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) - \exp(-\alpha_2 y_{2n}) \left[\frac{L_{p2} s_{2p}}{D_{p2}} - \alpha_2 L_{p2} \right]}{\operatorname{ch}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right) + \frac{L_{p2} s_{2p}}{D_{p2}} \operatorname{sh}\left(\frac{y_{2n}}{L_{p2}}\right)} \right\} \\
& + q \Phi_0 (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha_1 H) \exp(-x_{fe}\alpha_3) \exp(-\alpha_2 y_{2p}) [1 - \exp(-\alpha_2 w_2)] \\
(2-31)
\end{aligned}$$

II-4 : METHODE DE CALCUL SUR ORDINATEUR

Les expressions des courants spectraux déterminés au paragraphe II-3-2 font intervenir la longueur d'onde du spectre et un certain nombre de paramètres (issus des quatre régions du système) qui sont:

- * Le dopage: $N_{a1}, N_{d1}, N_{a2}, N_{d2}$;
- * La longueur de diffusion des porteurs minoritaires: $L_{n1}, L_{p1}, L_{n2}, L_{p2}$;
- * Le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires: $D_{n1}, D_{p1}, D_{n2}, D_{p2}$;
- * La vitesse de recombinaison superficielle: $S_{1p}, S_{1n}, S_{2p}, S_{2n}$;
- * La profondeur de jonction: $Y_{1p}, Y_{1n}, Y_{2p}, Y_{2n}$.
- * L'épaisseur X_{fe} de la fenêtre.

* Le coefficient de réflexion (λ) qui est fonction de la longueur d'onde du spectre et de l'épaisseur d de la couche d'oxyde.

* Les zones de déplétion sont caractérisées par leur épaisseur $W1$ et $W2$

Tous ces paramètres ne sont pas indépendants. En particulier, la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion des porteurs minoritaires d'une même zone sont liés au dopage de la dite zone. La largeur de la zone de déplétion est aussi liée aux dopages des régions N et P. En tenant compte des liens entre certains de ces paramètres, le nombre de paramètres indépendants à étudier est quatorze. Il s'agit notamment des dopages ($N_{a1}, N_{d1}, N_{a2}, N_{d2}$), des profondeurs de jonction ($Y_{1p}, Y_{1n}, Y_{2p}, Y_{2n}$), des vitesses de recombinaison ($S_{1n}, S_{2n}, S_{1p}, S_{2p}$) et les épaisseurs de couche d'oxyde(d) et de la fenêtre (x). Nous avons donc au total quatorze paramètres indépendants dans les expressions spectrales des courants.

Pour chaque valeur du paramètre x , nous faisons varier les quatorze paramètres précités et nous intégrons les courants spectraux sur tout le spectre. Cette intégration nous donne pour chaque combinaison des douze paramètres, les courants d'obscurités I_{os1} et I_{os2} et des courants de court-circuits I_{cc1} et I_{cc2} (expressions 2-9 et 2-10) des cellules GaAs et $Hg_{1-x}Cd_xTe$. A partir de ces quatre courants nous déterminons les autres paramètres caractéristiques qui sont:

* La tension de circuit-ouvert V_{oc} ;

* Le facteur de forme FF ;

* Le rendement η .

Pour chaque tandem GaAs/Hg_{1-x}CdxTe (c-a d pour chaque valeur du paramètre stœchiométrique x), nous déterminons son rendement optimal. Ce rendement est obtenu par comparaison successive des différents rendements obtenus en faisant varier les quatorze paramètres. Le rendement obtenu et les quatorze paramètres qui concourent à ce rendement sont stockés dans un fichier.

Le spectre utilisé dans cette intégration est AM1. Il correspond au maximum de rayonnement solaire reçu au sol. Sa puissance est d'environ 96,26mW/cm² (annexe). L'optimisation a été faite à l'aide d'un programme Pascal sur IBM-RISC/6000 et exécuté au Centre d'Informatique Régionale de Côte d'Ivoire (C.I.R.C.I). Le programme numérique construit permet également de calculer:

- * Les pertes par transparence.
- * Les pertes par effet joule.
- * La réponse spectrale.

conclusion

L'application des équations caractéristiques d'une photopile simple au tandem étudié; nous a permis d'obtenir les expressions des courants de court-circuit I_{cc} et d'obscurité I_{os} de celui-ci.

A partir de ces expressions nous avons mis en place un modèle de calcul qui permet d'optimiser les paramètres caractéristiques du tandem notamment le rendement η , la tension de circuit ouvert V_{co} , le courant de court-circuit I_{cc} et le facteur de forme FF. L'optimisation du paramètre stœchiométrique x, des facteurs limitatifs et des

paramètres physiques et géométriques a donné le tandem GaAs/Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te comme structure optimale. Le rendement η maximum obtenu est de l'ordre de 27,8% avec les contributions de 22,2% pour la cellule GaAs et d'environ 5,6% pour la cellule Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te. Ces résultats seront analysés au chapitre suivant (chapitre III).

CHAPITRE III:

RESULTATS. ET ANALYSE

INTRODUCTION

Les valeurs des paramètres caractéristiques du tandem optimisé représentent des valeurs idéales à atteindre. Il est donc nécessaire d'étudier les variations de ces paramètres caractéristiques en fonction du paramètre caractéristique x et des paramètres physiques et géométriques. Cette étude fait l'objet de ce présent chapitre. Elle permettra de déterminer des intervalles dans lesquels ces paramètres peuvent varier sans avoir une incidence significative sur les performances de la structure. Ces intervalles sont indispensables pour le constructeur compte tenu des difficultés de en oeuvre du processus technologique.

III-1: TANDEM OPTIMISE

La figure 3-1 représente le schéma électrique équivalent du tandem. La jonction tunnel qui assure la circulation d'un même courant entre les cellules GaAs et $Hg_{1-x}Cd_xTe$ est remplacée par une résistance R_t . Le courant de diode relatif à une cellule s'écrit:

$$I_{di} = I_{osi} \left[\exp\left(\frac{qV_i}{kT}\right) - 1 \right] + I_{rsi} \left[\exp\left(\frac{qV_i}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (3-1)$$

Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$I_{di} = I_{osi}(Z_i^2 - 1) + I_{rsi}(Z_i - 1) \quad (3-2)$$

Avec

$$Z_i = \exp\left(\frac{qV_i}{2kT}\right)$$

$$I_{osi} Z^2 + I_{rsi} Z - (I_{cci} - I_i + I_{osi} + I_{rsi}) = 0$$

$$\Delta = I_{rsi}^2 + 4 I_{osi} (I_{cc} - I_i + I_{osi} + I_{rsi})$$

$$Z_i = \frac{-I_{rsi} + \sqrt{\Delta}}{2 I_{osi}}$$

$$V_i = \frac{2kT}{q} \ln Z_i$$

L'indice i prend les valeurs suivantes:

$i = 1$ pour la cellule GaAs (cellule 1);

$i = 2$ pour la cellule $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ (cellule 2).

Le courant de chaque cellule s'écrit alors:

$$I = I_{cci} - I_{di} \quad (3-3)$$

A l'équilibre, les deux cellules étant en série, elles sont parcourues par le même courant.

$$I = I_1 = I_2 = I_{cc1} - I_{d1} = I_{cc2} - I_{d2} \quad (3-4).$$

La tension de sortie du tandem est alors :

$$V = V_1 + V_2 - (R_{s1} + R_{s2} + R_t)I = V_1 + V_2 - R_s I \quad (3-5).$$

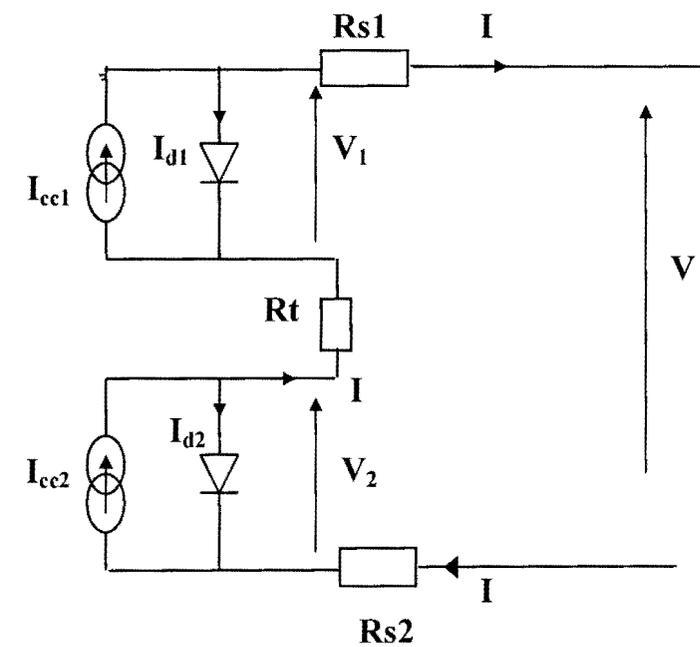


figure 3-1: Schéma électrique équivalent du tandem.

III-1-1: Résultats

Le tableau 3-1 présente les performances du tandem optimal et les contributions des cellules GaAs et $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$. Les différents paramètres physiques et géométriques qui conduisent à ces performances sont indiqués dans le tableau 3-2.

Performances	GaAs (cellule1)	$\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ (cellule2)	Tandem
I_{cc} (mA/cm ²)	26,79	26,00	26,00
V_{co} (mV)	949	297	1246
I_m (mA/cm ²)	25	25	25
I_{im} (mA/cm ²)	0,48	1,02
I_{rm} (mA/cm ²)	1,24	0,02
V_m (mV)	855	217	1072
FF	0,84	0,70	0,83
η (%)	22,20	5,60	27,80

Tableau 3-1 : Performances du tandem optimal et les contributions des deux cellules qui le composent.

Paramètres physiques		Paramètres géométriques	
$N_{a1}=10^{18}\text{cm}^{-3}$	$N_{a2}=2.10^{16}\text{cm}^{-3}$	$y_{1p}=0,8\mu\text{m}$	$y_{2n}\geq 50\mu\text{m}$
$N_{d1}=5.10^{17}\text{cm}^{-3}$	$N_{d2}=3.10^{15}\text{cm}^{-3}$	$y_{1n}=1,2\mu\text{m}$	$y_{2p}=20\mu\text{m}$
$N_{a3}=10^{20}\text{cm}^{-3}$	$S_{2p}=10\text{cm/s}$	$X_{fe}=0,02\mu\text{m}$	$dx=0,1\mu\text{m}$
$S_{1p}=10\text{cm/s}$	$S_{2n}=10\text{cm/s}$		
indice d'oxyde	nature de la surface:		

$n1=1.9$	texturisée(ST)		
$R_s=0\Omega$	teneur en Aluminium de la fenêtre $Y=1,0$.		

Tableau 3-2: Paramètres physiques et géométriques du tandem optimal.

Le tableau 3-1 nous permet de faire deux constats:

* le courant de génération-recombinaison (I_{rm}) de la cellule GaAs est largement supérieur à son courant d'injection I_{im} . Dans le cas de la cellule $Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te$, c'est plutôt le courant d'injection qui est prépondérant

* le courant de court-circuit I_{cc_1} est légèrement supérieur à I_{cc_2} . Cela provient de la différence entre les deux courants diode I_{d_1} et I_{d_2} ($I_{d_1}=1,72mA/cm^2 > I_{d_2}=1,02mA/cm^2$).

* le rendement optimal obtenu est environ 28% avec les contributions de l'ordre de 22% et 6% respectivement pour les cellules GaAs et $Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te$.

Nous représentons les variations des paramètres caractéristiques, η , V_{co} et I_{cc} du tandem en fonction du paramètre stœchiométrique x . La courbe du rendement (figure 3-2b) en forme de cloche présente un maximum de 27.8% au point $x=0,58$.

La figure 3-2a décrit l'évolution du rendement du tandem en fonction de x dans le cas n'incluant pas les facteurs limitatifs. On constate que le rendement maximum peut atteindre environ 29,6%.

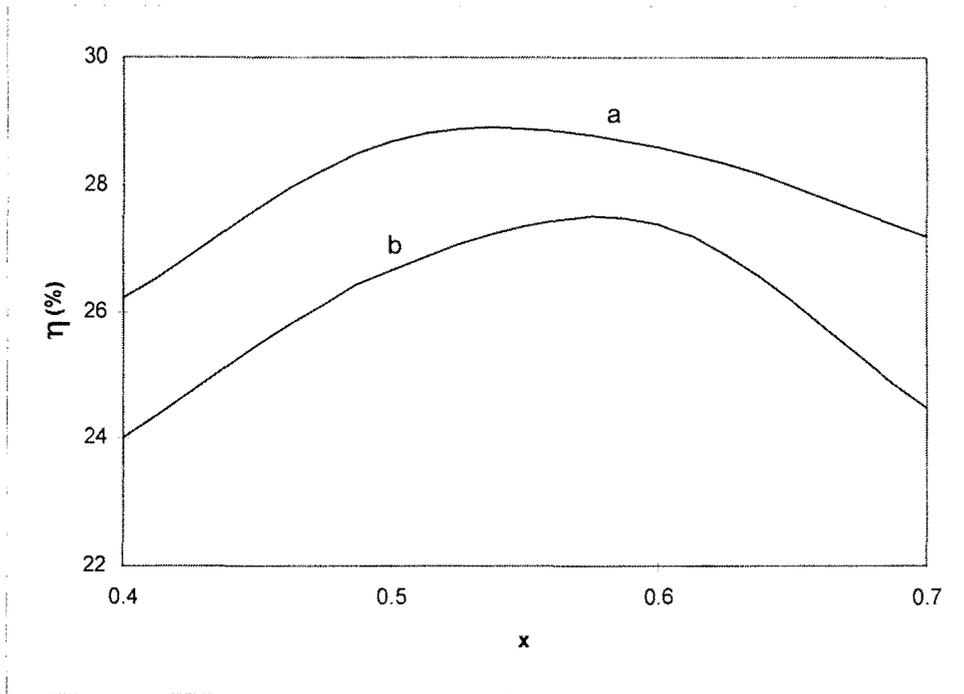


Figure 3-2: Evolution du rendement du tandem en fonction de x obtenue avec:(courbe b) et sans (courbe a) prise en compte des facteurs limitatifs.

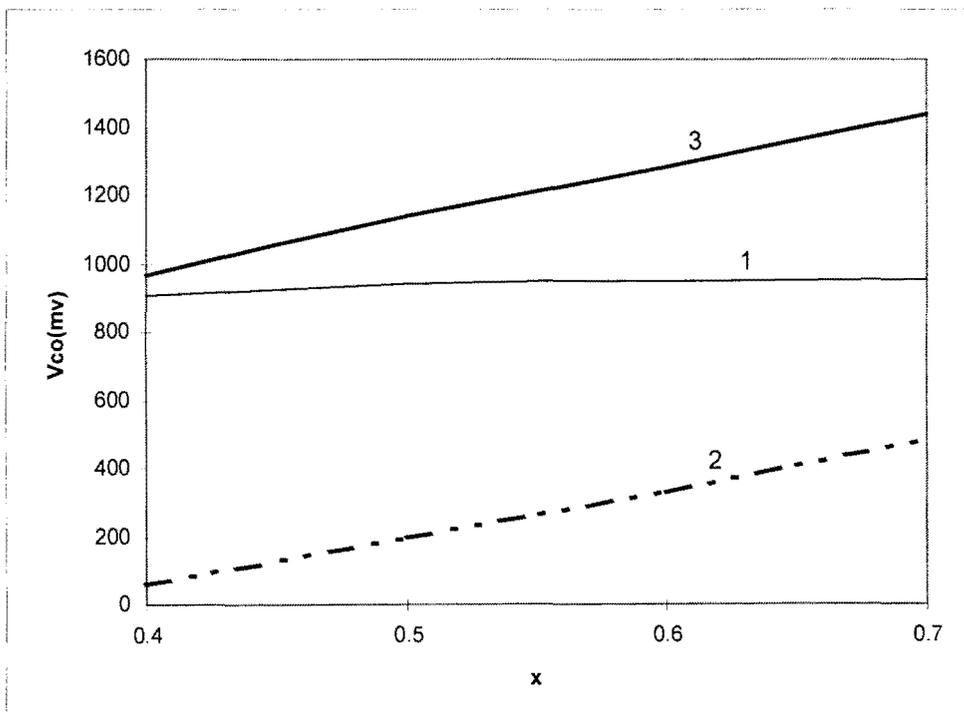


Figure 3-3:

tension de circuit ouvert en fonction de x .

(1): V_{co1} ; (2): V_{co2} ; (3): V_{co} .

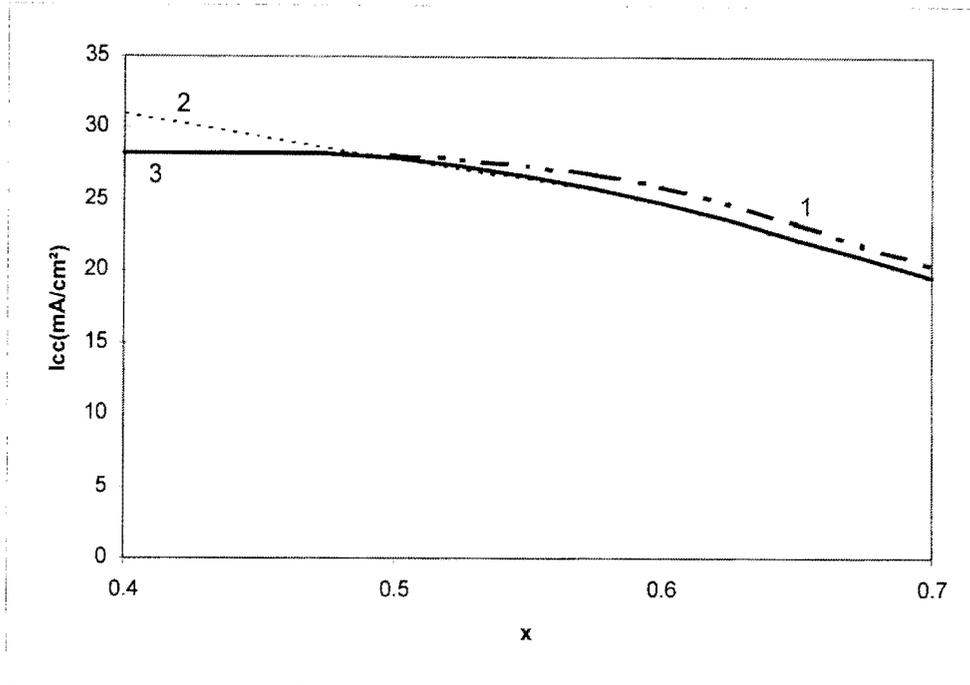


Figure3-4: Courants de court-circuit en fonction de x.

(1): Icc1; (2): Icc2; (3): Icc.

III-1-2: Analyse

Les résultats obtenus sont satisfaisants pour deux raisons essentielles:

* ils tiennent compte d'un certain nombre de facteurs limitatifs.

* le rendement obtenu est comparable aux rendements obtenus avec d'autres structures très élaborées telles que les PERC (Passivated Emitter and Red Cell) basées sur le silicium qui ont permis d'atteindre un rendement de 27,5% sous concentration (10w/cm^2) [6]. Un rendement de 28% a été obtenu avec le tandem $\text{Al}_{0,03}\text{Ga}_{0,97}\text{As/Ge}$ [54].

La prédominance du courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace de la cellule GaAs par rapport à son courant d'injection (tableau 3-1) montre que les phénomènes de transport dans la cellule GaAs sont dominés par les courants de recombinaison dans la zone de charge d'espace. Ceci provient de la faible durée de vie des porteurs dans cette zone. Dans le cas de la cellule $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ la prépondérance du courant d'injection par rapport au courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace s'explique par l'importance de sa densité de concentration intrinsèque n_{i2}

($n_{i2} = 4 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$) [55].

Le rendement η dépend du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension de circuit ouvert V_{co} qui représentent respectivement les valeurs maximales pour le courant et la tension du tandem. Les différentes pertes relatives aux facteurs limitatifs font que le courant et la tension du tandem restent inférieurs respectivement à I_{cc} et V_{co} .

La tension de circuit ouvert V_{co} augmente avec le paramètre x (figure 3-3). En fait le gap du matériau $Hg_{1-x}Cd_xTe$ croît avec x (expressions 3-6 et 3-7).

Quant au courant de court-circuit I_{cc} il décroît avec x (figure 3-4). En effet, lorsque x croît, le nombre de photon contribuant à la création des paires électron-trous dans la cellule $Hg_{1-x}Cd_xTe$ diminue. La dégradation du rendement avec x provient donc de la diminution du courant de court-circuit avec x (figure 3-4).

$$E_g(x, T) = -0,302 + 1,93x + 5,35 \cdot 10^{-4} T(1 - 2x) - 0,810x^2 + 0,832x^3 \quad (3-6) \quad [10]$$

pour $0 \leq x \leq 0,6$ et $x=1,0$.

$$E_g = -0,303 + 1,98x - 0,654x^2 + 0,579x^3 + (5,5 - 13,92x + 5,84x^2) 10^{-4} T \quad (3-7) \quad [10]$$

Pour $0,7 \leq x < 1,0$.

La figure 3-2a montre qu'une bonne maîtrise de la technologie de fabrication des jonctions, des contacts ($R_s \approx 0$) des traitements antireflets et des fenêtres est nécessaire. En effet, on note un écart pouvant dépasser 2% entre les rendements dans les deux cas (cas incluant et cas n'incluant pas les facteurs limitatifs). Pour la valeur de $x=0,58$ l'écart est d'environ 1,7%. Ceci traduit l'importance des pertes provoquées par les facteurs limitatifs.

III-2: INFLUENCE DE LA RESISTANCE SERIE R_s SUR LE RENDEMENT.

III-2-1: Résultats

L'influence de la résistance série R_s sur le rendement est présentée sur la figure 3-5 en faisant varier celle-ci de 0Ω à 10Ω . Le rendement varie décroît de 27,84% à 25,8% lorsque R_s passe de 0Ω à 3Ω . On note donc une dégradation d'environ 2%.

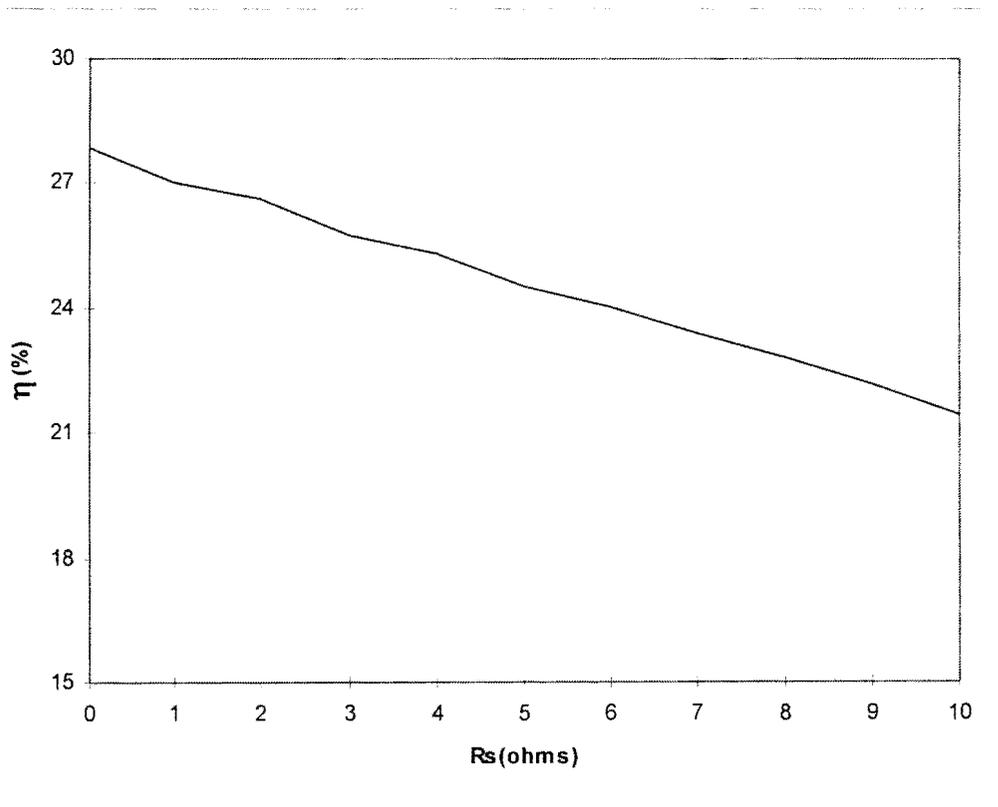


Figure 3-5: Evolution du rendement du tandem en fonction de la résistance série R_s .

III-2-2: Analyse

La courbe (figure 3-5) montre qu'un rendement compris entre 27% et 27.84% nécessite une résistance série inférieure à 1Ω . Une amélioration des grilles de prise de contact sur la face avant par des techniques telle que la microélectronique est nécessaire pour obtenir des résistances séries aussi basses [35].

III-3: INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LES PERFORMANCES DU TANDEM

III-3-1: Résultats

III-3-1-1: Couche antireflet.

Le matériau pour la couche antireflet doit satisfaire à plusieurs exigences:

- * il doit satisfaire à la condition de réflexion minimale pour tout le spectre du rayonnement incident.
- * il doit avoir une bonne tenue mécanique aux contraintes du milieu environnant.
- * son procédé de fabrication doit se révéler peu coûteux.

Quelques matériaux répondant à l'ensemble de ces critères sont répertoriés dans le tableau suivant:

Matériaux	Indices de réfraction
SiO; SiO ₂	1,7 -1,9
TiO ₂	2,1 -2,2
Ta ₂ O ₅	2,1 -2,3

Tableau3-3: Matériaux présentant les meilleures propriétés pour les traitements antireflet [56].

La couche antireflet est appliquée sur le matériau Al_yGa_{1-y}As qui constitue la fenêtre. L'indice de réfraction n_2 de Al_yGa_{1-y}As décroît avec y ($0 \leq y \leq 1$) (expression 3-8).

$$n_2(y) = 3,59 - 0,71y + 0,091y^2 \quad (3-8) [2].$$

Le traitement antireflet a été appliqué sur deux surfaces de nature différente. L'une est une surface normale ou plane (SN) et l'autre une surface texturisée (ST).

La figure 3-6 qui décrit les variations du rendement en fonction de l'indice de la couche d'oxyde pour les deux types de surface nous permet de noter que le maximum s'obtient avec une surface texturisée (figure 3-6a). Nous avons fait varier l'indice de réflexion de 1,4 à 3.

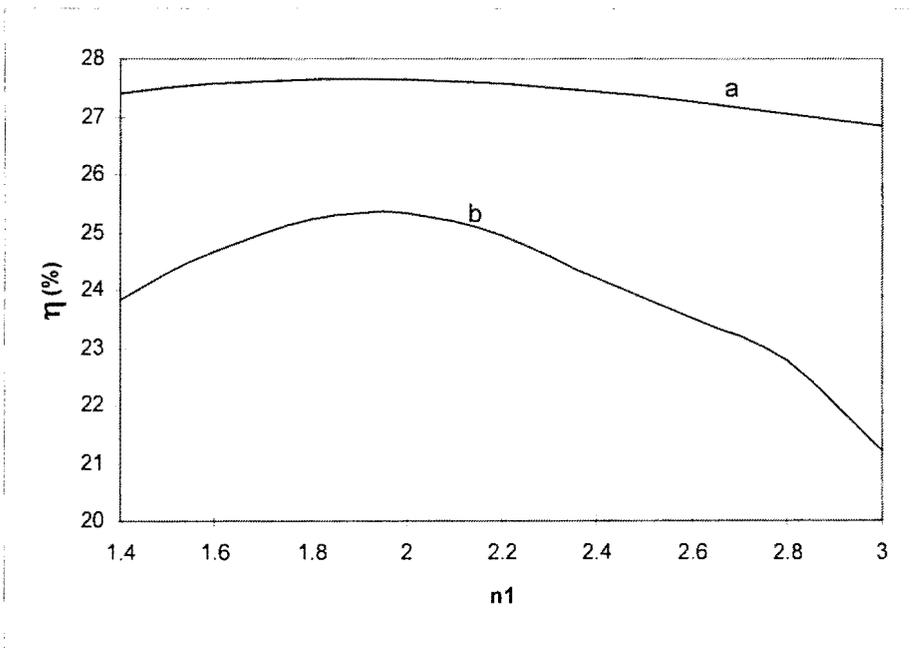


Figure 3-6: Courbes comparatives des rendements du tandem en fonction de l'indice n_1 de l'oxyde et suivant le type de surface:

(a): surface texturisée (ST); (b): surface normale (SN).

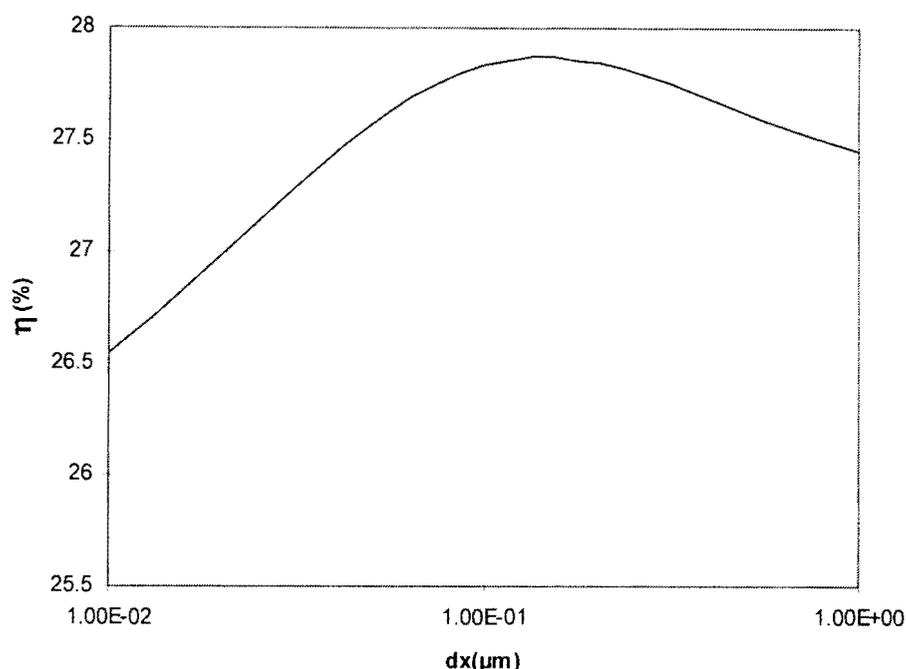


Figure 3-7: Rendement du tandem en fonction de l'épaisseur dx.

III-3-1-2: Caractéristiques de la fenêtre

Dans ce paragraphe nous déterminons les caractéristiques de la fenêtre afin de rendre minimale la vitesse de recombinaison à l'interface $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As-GaAs}$ et l'absorption du rayonnement incident due à l'épaisseur de la fenêtre. Ces caractéristiques dépendent essentiellement du gap du matériau, de son dopage et de son épaisseur x_{fe} . Nous avons tracé les courbes représentant l'évolution du rendement en fonction de la teneur y en aluminium du matériau $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ (figure 3-8) de l'épaisseur x_{fe} (figure 3-9) et du dopage (figure 3-10) de la fenêtre.

Nous avons également étudié les variations de la vitesse à l'interface fenêtre-cellule GaAs en fonction de l'épaisseur x_{fe} (figure 3-11). On note qu'elle diminue lorsque x_{fe} croît (figure 3-11).

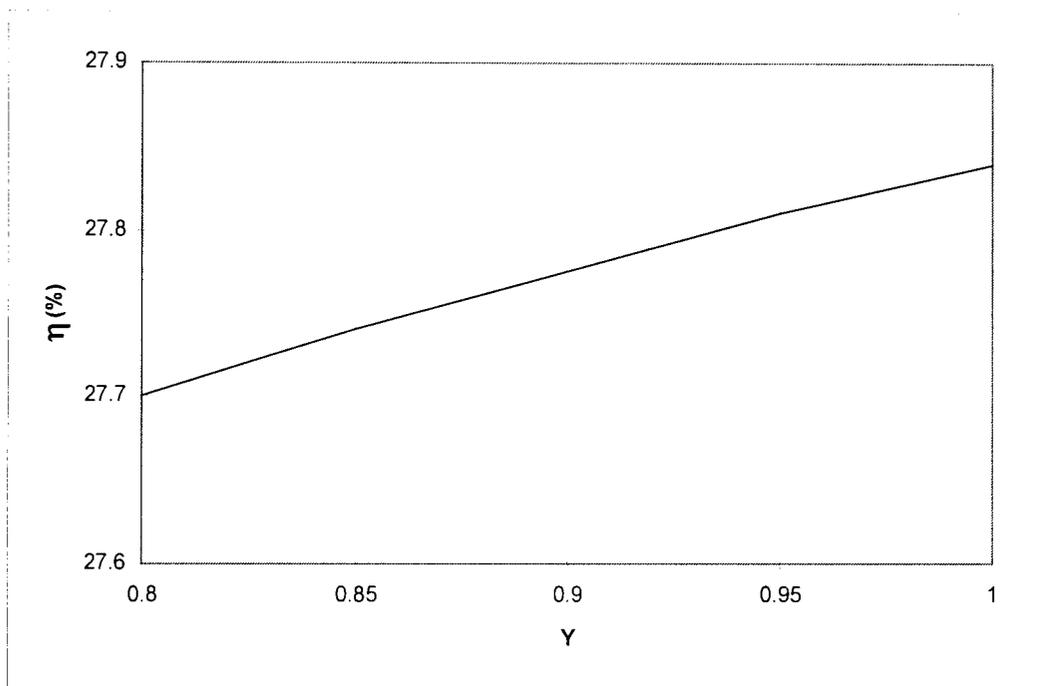


Figure3-8: Rendement du tandem en fonction de la teneur y de $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ en aluminium.

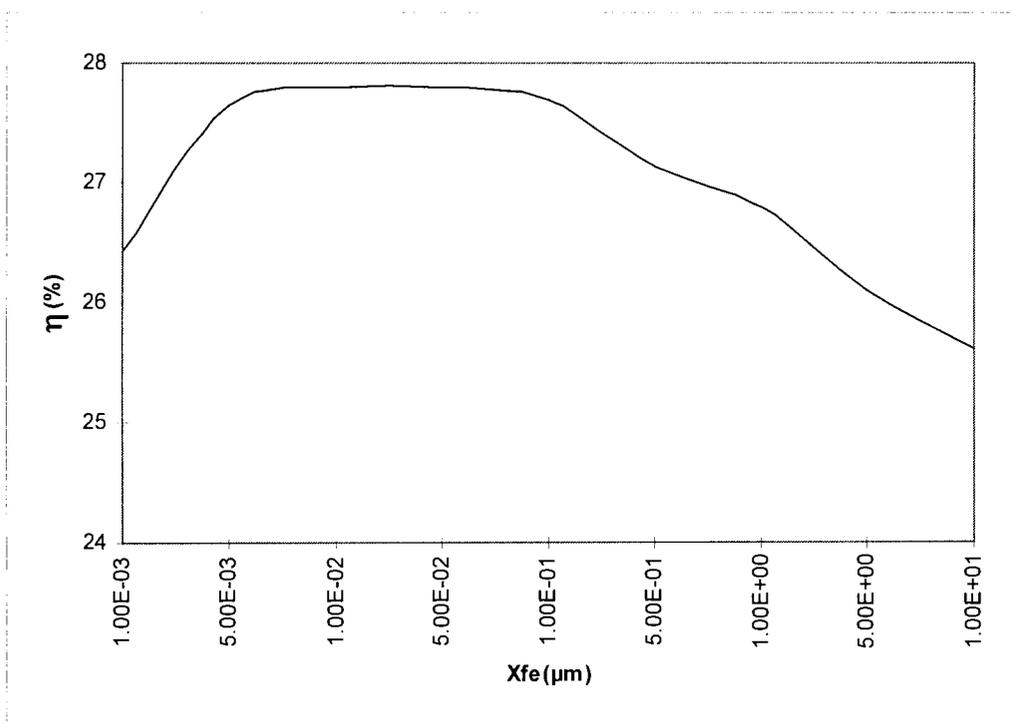


figure 3-9: rendement du tandem en fonction de l'épaisseur x_{fe} de la fenêtre.

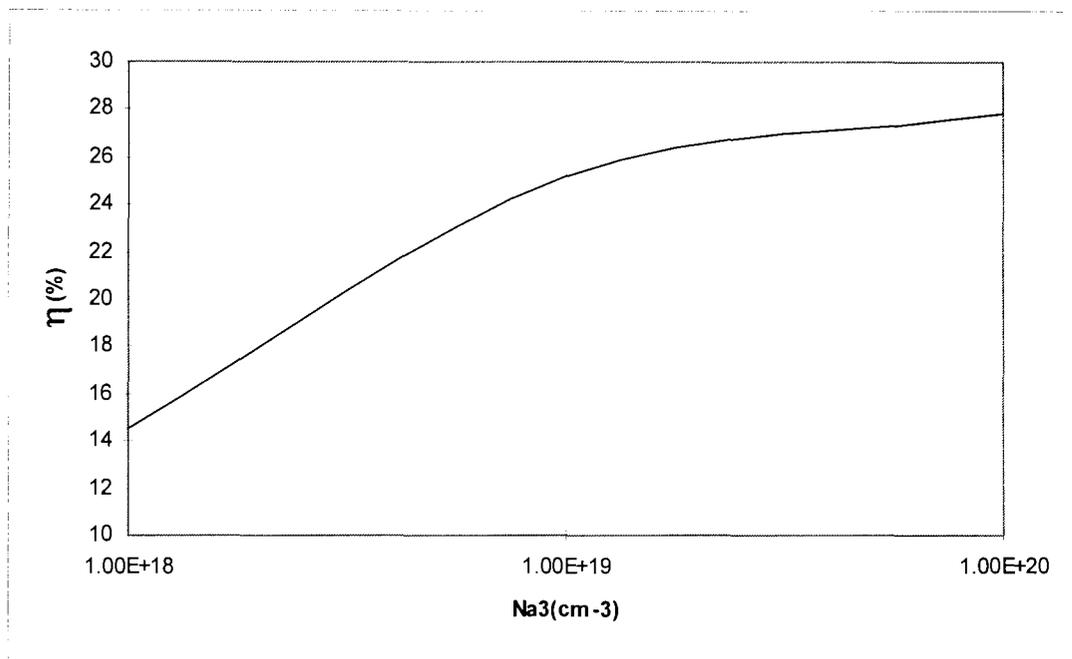


figure 3-10: Rendement du tandem en fonction du dopage de la fenêtre.

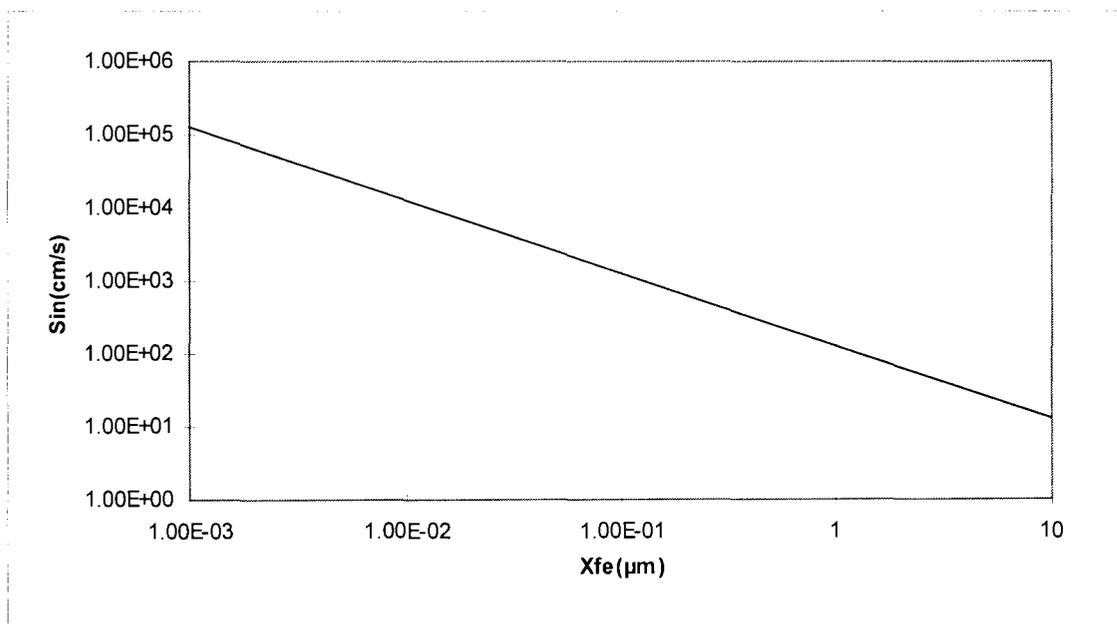


Figure 3-11 : Variation de la vitesse de recombinaison (S_i) à l'interface fenêtre-cellule GaAs avec l'épaisseur x_{fe} de la fenêtre.

III-3-1-3: Profondeur de jonction y_{1p}

Les courbes des figures 3-12 à 3-14 permettent de décrire l'influence de la profondeur y_{1p} . Le rendement η croît avec y_{1p} et atteint son maximum (27,84%) à $y_{1p} = 0,8\mu\text{m}$ (figure 3-12). Lorsque $y_{1p} > 0,8\mu\text{m}$ le rendement décroît. Ceci provient de l'évolution du courant de court-circuit du tandem avec y_{1p} (figure 3-14). La figure 3-13 montre que le courant de court-circuit I_{cc1} croît avec y_{1p} jusqu'à une valeur maximale $I_{cc1}=26,79\text{mA}/\text{cm}^2$ qui correspond à une valeur relativement faible $y_{1p}=0,8\mu\text{m}$. Au delà de cette valeur I_{cc1} décroît.

Lorsque y_{1p} augmente on observe un accroissement du courant de court-circuit I_{cc1} au détriment de I_{cc2} tant que y_{1p} est inférieure ou égale à $0,8\mu\text{m}$ (figure 3-13). Lorsque y_{1p} est supérieure à $0,8\mu\text{m}$ les deux courants décroissent

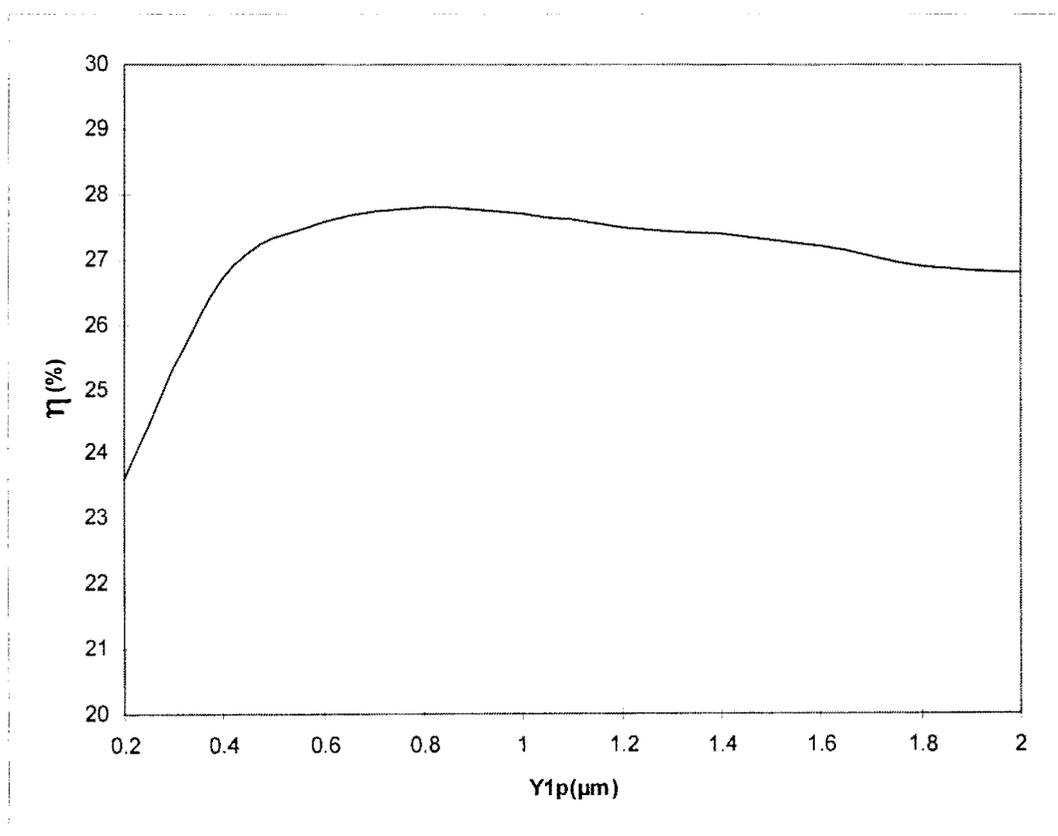


Figure 3-12: Rendement du tandem en fonction de y_{1p} .

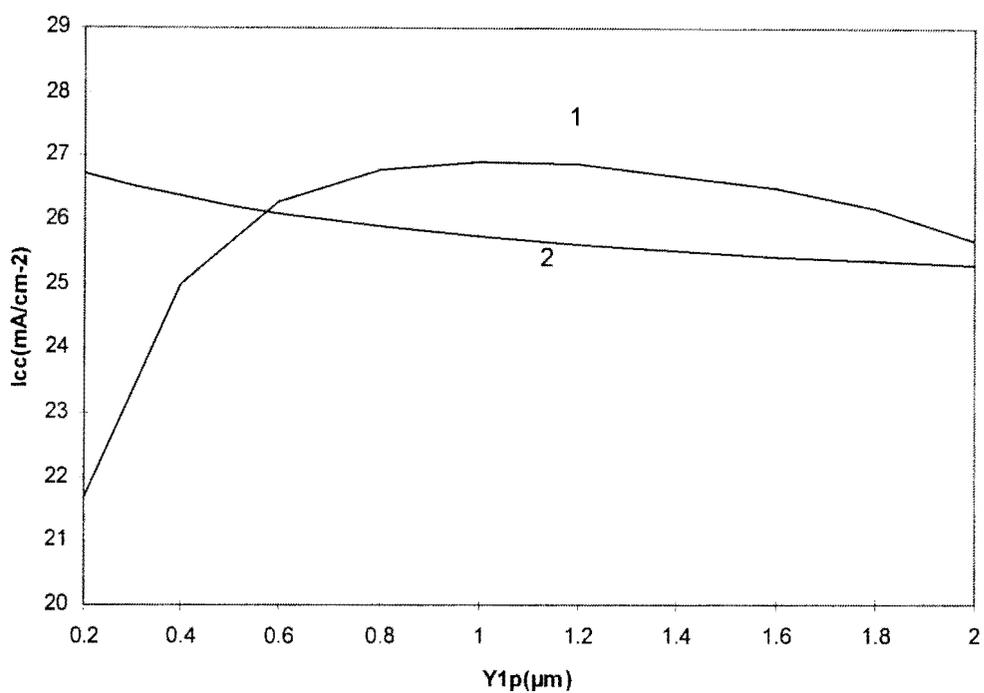


Figure 3-13: Courant de court-circuit des cellules GaAs(1) et de $\text{Hg}_{0.42}\text{Cd}_{0.58}\text{Te}$ (2) en fonction de $y1p$.

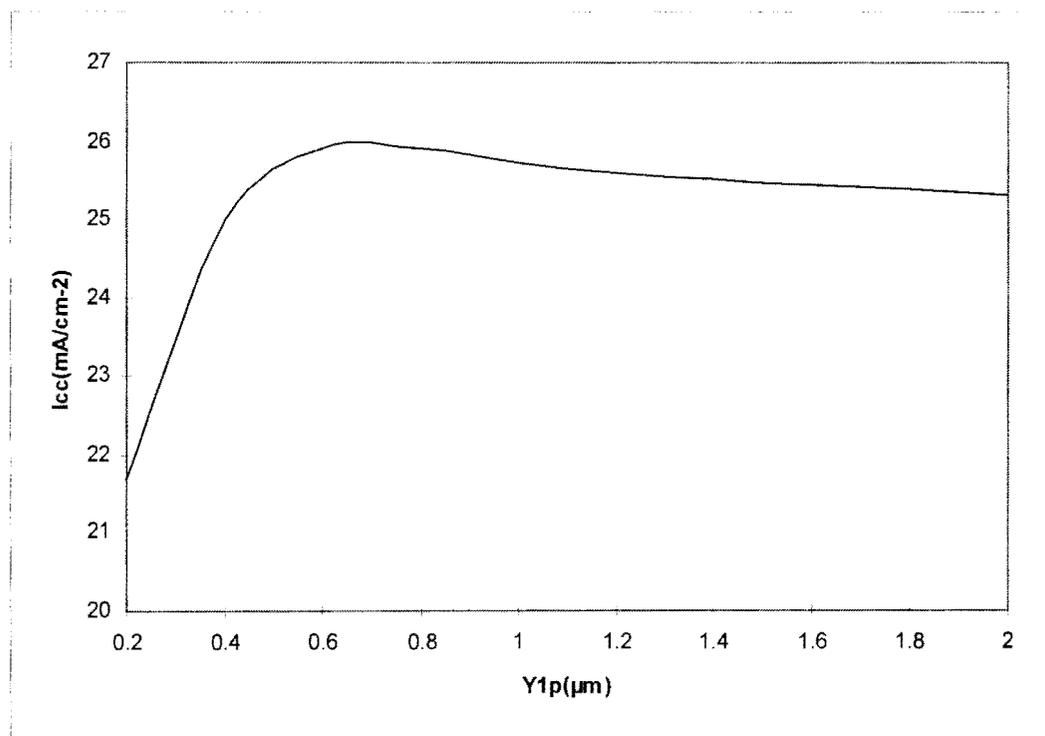


Figure 3-14: Courant de court-circuit du tandem en fonction de $y1p$.

III-3-1-4: Epaisseur de la couche y1n

L'évolution du rendement du tandem en fonction de y_{1n} (figure 3-15) nous permet de faire deux remarques:

* le rendement croît jusqu'à une valeur maximale égale à 27.84% puis décroît légèrement et se stabilise à environ 27,8%.

* la valeur de y_{1n} pour laquelle on atteint 27.84% dépend de la vitesse de recombinaison s_{1p} sur la face arrière de la cellule GaAs. Plus s_{1p} est élevée plus y_{1n} doit être élevée.

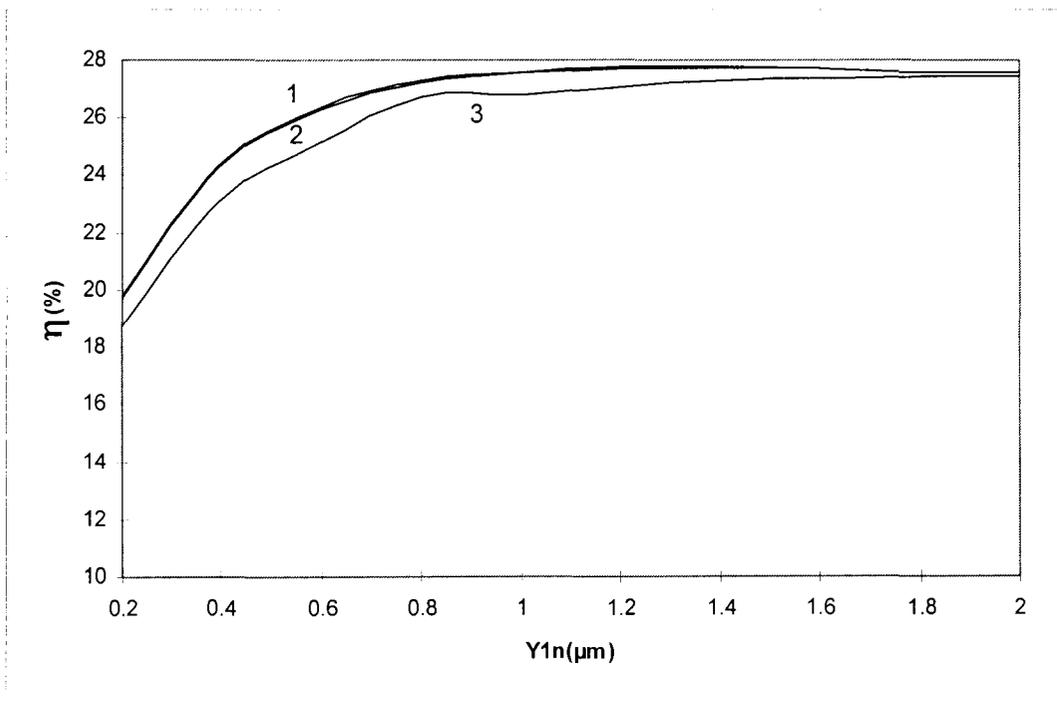


Figure 3-15: rendement du tandem en fonction de y_{1n} pour diverses valeurs de la vitesse de recombinaison s_{1p} : (1): $s_{1p} = 10 \text{ cm/s}$; (2): $s_{1p} = 10^2 \text{ cm/s}$; (3): $s_{1p} = 10^5 \text{ cm/s}$.

III-3-1-5: Profondeur de jonction y_{2p} .

Comme le montre la figure 3-16, le rendement du tandem croît avec y_{2p} jusqu'à 27.84% au point $y_{2p}=20\mu\text{m}$ et décroît au-delà de cette épaisseur. Le paramètre y_{2p} n'a aucune influence sur les caractéristiques de la première cellule, en particulier sur son courant de court-circuit I_{cc1} (figure 3-17).

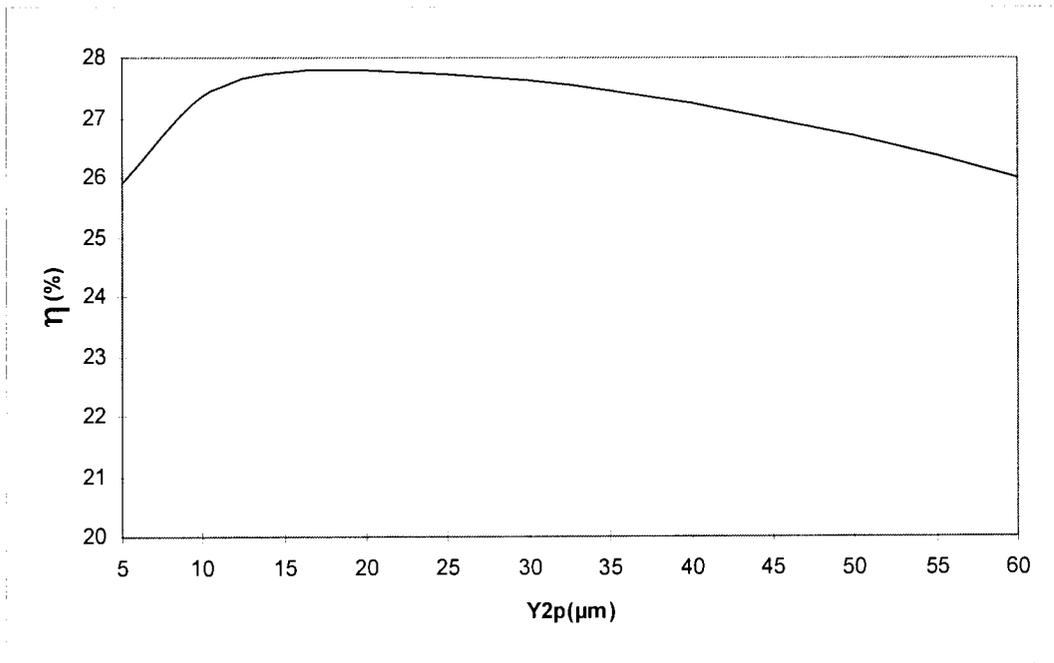


Figure 3-16: rendement du tandem en fonction de y_{2p} .

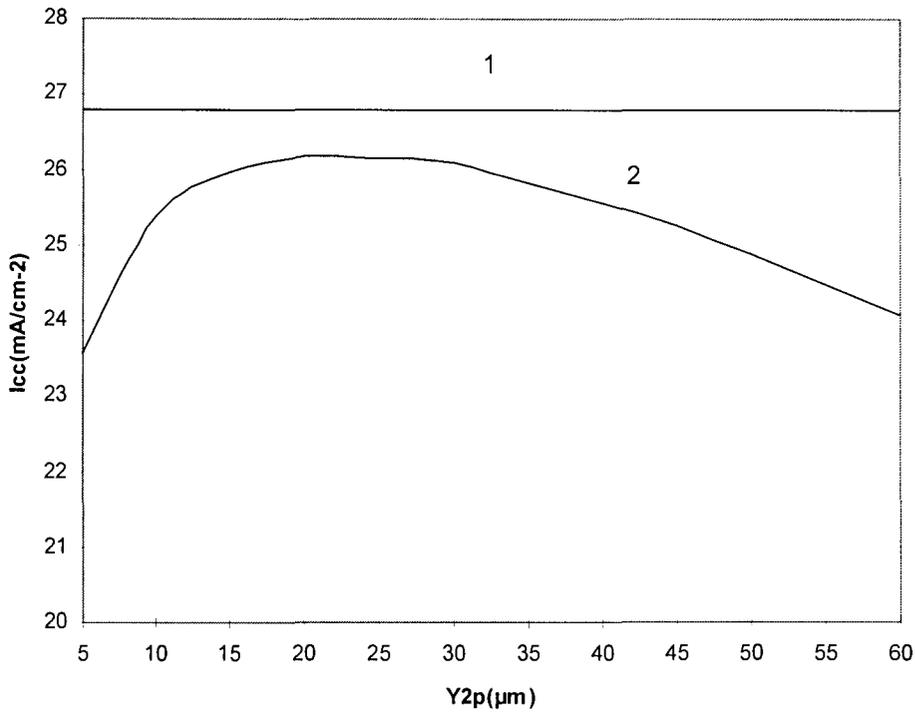


Figure 3-17: Courant de court-circuit des cellules
(1): Icc1; (2): Icc2.

III-3-1-6: Epaisseur de la couche y2n.

L'influence de l'épaisseur y_{2n} sur le rendement du tandem est décrite par la figure 3-18. Pour chaque valeur de la vitesse de recombinaison s_{2p} , le rendement atteint une valeur de saturation Cette valeur est égale à 27.84% pour $s_{2p}=10\text{cm/s}$ et $y_{2n} \geq 40\mu\text{m}$.

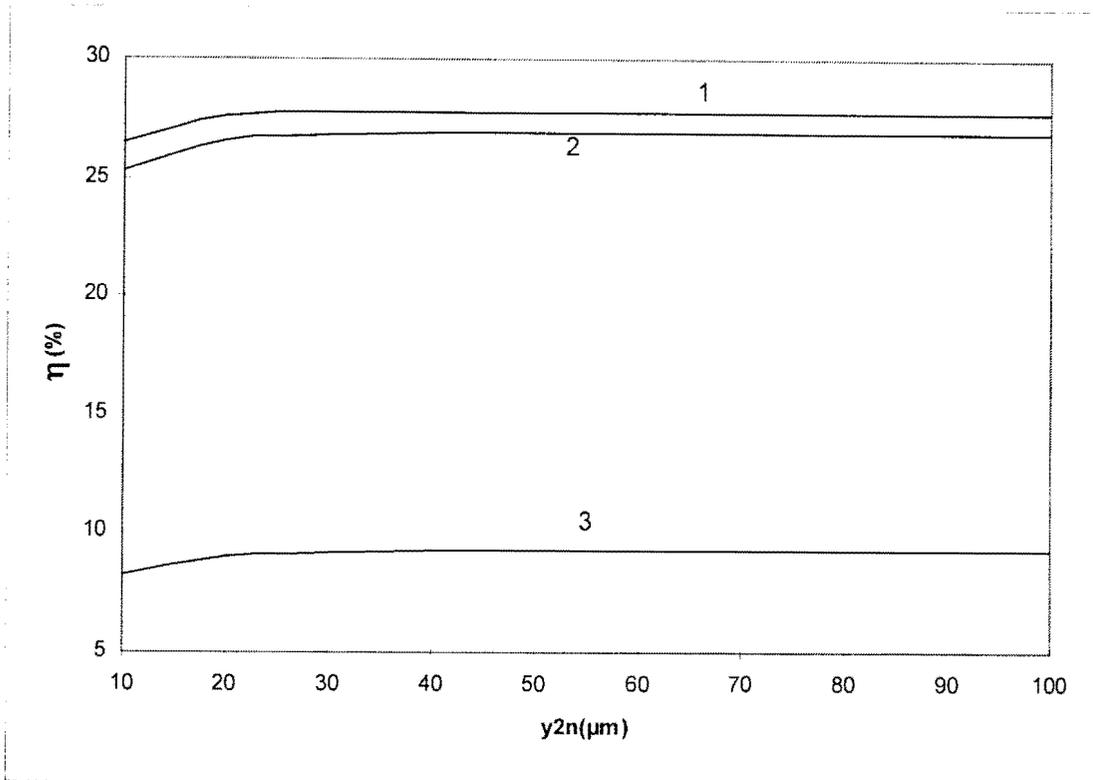


Figure 3-18: rendement du tandem en fonction de $y2n$ pour diverses valeurs de la vitesse de recombinaison S_{2p} .

(1): $S_{2p} = 10 \text{ cm/s}$.

(2): $S_{2p} = 10^2 \text{ cm/s}$.

(3): $S_{2p} = 10^5 \text{ cm/s}$.

III-3-2: Analyse

La figure 3-6 indique que les valeurs des indices permettant de rendre la réflexion minimale sont comprises entre 1,8 et 2. Les oxydes SiO et SiO_2 sont donc les mieux indiqués pour réaliser la couche antireflet. Nous avons déterminé également l'épaisseur dx optimale de la couche d'oxyde. La courbe de l'évolution du rendement en fonction de l'épaisseur de la couche d'oxyde montre que le rendement maximum de 27,84% est atteint pour $dx=0,1 \mu\text{m}$ (figure3-7).

La courbe de la figure 3-8 montre que pour obtenir un rendement élevé le matériau $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ doit être riche en aluminium. En fait ce matériau a un gap qui croît avec y . Le nombre de photons susceptibles d'être absorbés dans la fenêtre décroît donc avec y .

Au niveau de la figure 3-9 nous remarquons que le meilleur rendement s'obtient avec une épaisseur faible de la fenêtre (quelques centièmes de microns). Le gap de $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ est indirect

pour $y > 0,45$ (figure 2-3). Cette propriété fait que ce matériau a besoin d'une grande épaisseur pour absorber le rayonnement (pour $y > 0,45$).

La figure 3-10 quant à elle montre que le dopage doit être élevé ($N_A > 10^{19} \text{cm}^{-3}$) dans la limite de la technologie. En effet un fort dopage du matériau entraîne une dégénérescence de celui-ci.

La vitesse de recombinaison S_{in} à l'interface diminue avec x_{fe} Mais comme le montre la figure 3-9 une épaisseur élevée de la fenêtre dégrade le rendement. Ceci est une conséquence de la diminution du flux transmis à la cellule GaAs avec un accroissement de l'épaisseur x_{fe} .

Le matériau GaAs est à gap direct. Cette nature fait que l'absorption du rayonnement composé de photons ayant une énergie au moins égale au gap a lieu au voisinage de la surface. Ceci explique la faible valeur de y_{1p} ($y_{1p}=0,8\mu\text{m}$). Il faut noter aussi que pour des cellules à base de matériaux présentant des surfaces très recombinaisons et pour lesquelles il n'est pas prévu un gradient de dopage pour créer un champ accélérateur, la jonction doit être proche de la surface. Cela permet à la jonction de collecter le maximum de porteur qui sans cela iraient se recombiner en surface. Il y a un phénomène de compétition entre la recombinaison en surface et la diffusion vers la jonction.

La diminution de I_{cc1} au delà de $y_{1p}=0,8\mu\text{m}$ est due à l'éloignement de la surface de la jonction collectrice, celle de I_{cc2} provient de la faible quantité de rayonnement absorbée dans la cellule $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ (figure 3-13). Le courant de court-circuit I_{cc} du tandem est le plus petit des deux courants I_{cc1} et I_{cc2} . Cette situation explique le comportement du courant de court-circuit du tandem avec y_{1p} (figure 3-14). La dégradation du rendement avec y_{1p} au delà de $y_{1p}=0,8\mu\text{m}$ provient de la détérioration de I_{cc} au delà de cette valeur (figure 3-14).

Au niveau de l'épaisseur y_{1n} le rendement maximum s'obtient avec $y_{1n}=1,2\mu\text{m}$. Cette valeur est supérieure à $y_{1p}=0,8\mu\text{m}$. Comme nous l'avons signalé au paragraphe III-3-3-1, il y a un phénomène de compétition entre la collecte des porteurs par le champ interne et la recombinaison superficielle sur la face avant de la cellule GaAs. La collecte d'une quantité donnée de porteurs dépend du nombre de porteurs photo générés qui dépend de l'épaisseur y_{1n} et de la vitesse de recombinaison s_{1p} . Lorsque s_{1p} croît la collecte de la même

quantité de porteurs nécessite un accroissement du nombre de porteurs photo générés et donc une augmentation de y_{1n} . Il y a aussi le fait que le nombre de porteurs créés en un point de la cellule diminue avec la distance de ce point au lieu d'incidence du rayonnement. Cette diminution est beaucoup plus importante dans le cas des matériaux à gap direct où la quasi-totalité de la photo-génération a lieu au voisinage du lieu d'incidence. Au delà d'une certaine distance du lieu d'incidence, le rendement η décroît légèrement puis atteint une saturation (figure 3-15). En effet le nombre de porteurs créés en un point au delà de cette distance devient très faible et donc participe très peu au courant I_{cc1} . La légère décroissance du rendement provient de la diminution du courant de court-circuit I_{cc2} au profit de I_{cc1} . Cette diminution est due à l'absorption de la tranche spectrale dont les photons ont une énergie inférieure mais proche du gap E_g de GaAs ($E_g = 1,42$ eV) par la cellule GaAs. Ces photons sont absorbés loin de la jonction.

La proportion du rayonnement absorbé dans une cellule est fixée par les valeurs de ces paramètres physiques et géométriques. Ces paramètres ayant déjà été fixés pour la première cellule, le comportement de la deuxième cellule ne peut plus avoir d'influence sur celui de la première (figure 3-17). Par contre, il influe énormément sur les caractéristiques du tandem surtout sur son rendement (figure 3-16) et son courant de court-circuit I_{cc} (figure 3-17). $Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te$ étant à gap direct l'absorption s'effectue au voisinage de la surface. Les porteurs photo générés à une distance de la jonction supérieure à leur longueur de diffusion se recombinent. Ceci entraîne une détérioration du rendement de collecte et donc du courant de court-circuit. Il s'ensuit donc une dégradation du rendement du tandem au-delà de la valeur $y_{2p} = 20\mu m$ (figure 3-16).

La saturation atteinte par le rendement (figure 3-18) montre qu'au delà d'une certaine épaisseur tous les photons susceptibles d'être absorbés dans la deuxième cellule ont été entièrement absorbés. Cette variation du rendement avec y_{2n} montre que l'on peut prendre une épaisseur élevée pour cette couche. Ceci est un avantage car une épaisseur grande rend le tandem plus solide.

III-4: INFLUENCE DES PARAMETRES PHYSIQUES SUR LES PERFORMANCES DU TANDEM

III-4-1: Résultats

III-4-1-1: Effet des vitesses s_{1n} et s_{1p} .

L'étude de l'influence des vitesses s_{1n} et s_{1p} sur les performances du tandem (figures 3-19 et 3-20) montre que:

- * le rendement et le courant de court-circuit du tandem restent pratiquement invariables pour des vitesses inférieures ou égales à 10^4 cm/s

- * au delà de 10^4 cm/s le courant et le rendement se dégradent. L'importance de la dégradation du courant de court-circuit et du rendement varie suivant les deux vitesses s_{1n} et s_{1p} (figures 3-19 et 3-20).

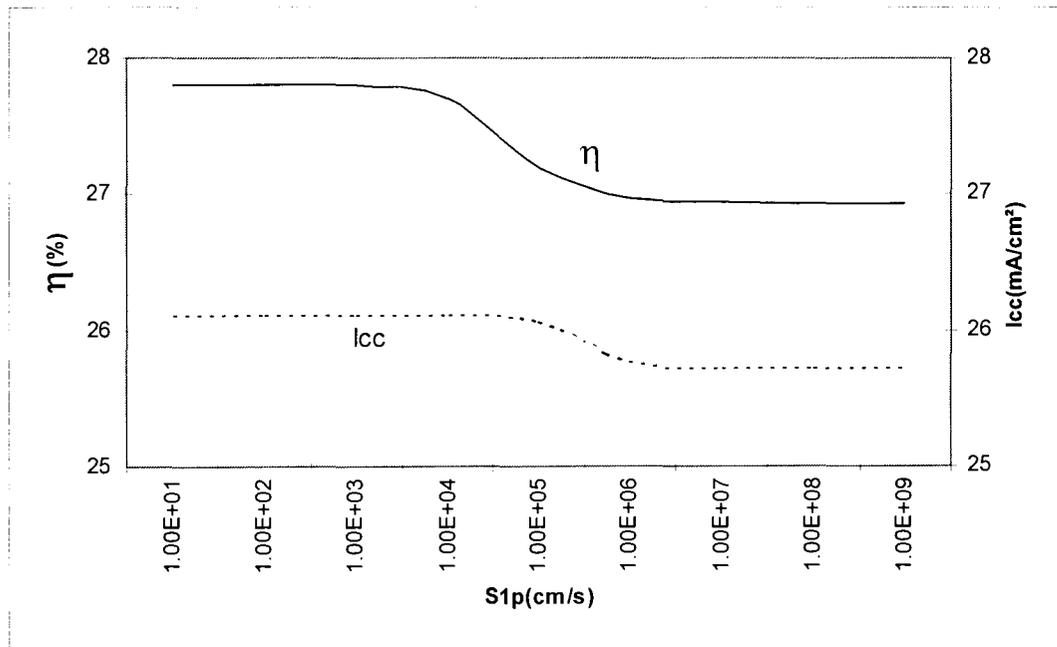


Figure 3-19: rendement η et le courant de court-circuit I_{cc} du tandem en fonction de la vitesse de recombinaison s_{1p} .

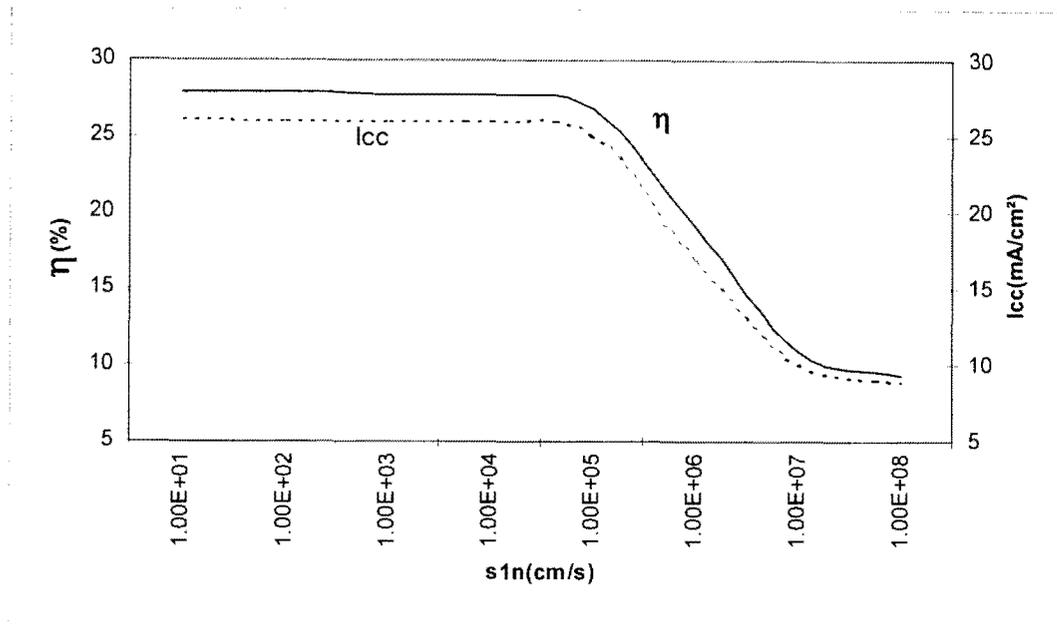


Figure 3-20: rendement η et le courant de court-circuit I_{cc} du tandem en fonction de la vitesse de recombinaison s_{1n} .

III-4-1-2: Effet des vitesses s_{2p} et s_{2n} .

Le rendement maximum et le courant de court-circuit du tandem calculés en fonction de s_{2n} et s_{2p} sont représentés par les courbes des figures 3-21 et 3-22. On note que les deux paramètres caractéristiques (rendement η et le courant de court-circuit I_{cc}) restent pratiquement constants quand $s_{2n} \leq 10^3$ cm/s (figure 3-21). Au delà de cette valeur ils décroissent rapidement. Par contre ces deux paramètres restent pratiquement invariables quelque soit la valeur de s_{2p} (figure 3-22). En effet, le rendement η et le courant I_{cc} varient respectivement de 27,84% à 5,25% et de 26mA/cm² à 5mA/cm² pour une variation s_{2n} de 10cm/s à 10⁷cm/s (figure 3-21), alors qu'ils restent voisins de 27.80% et 26mA/cm² lorsque s_{2p} passe de 10cm/s à 10⁷cm/s.

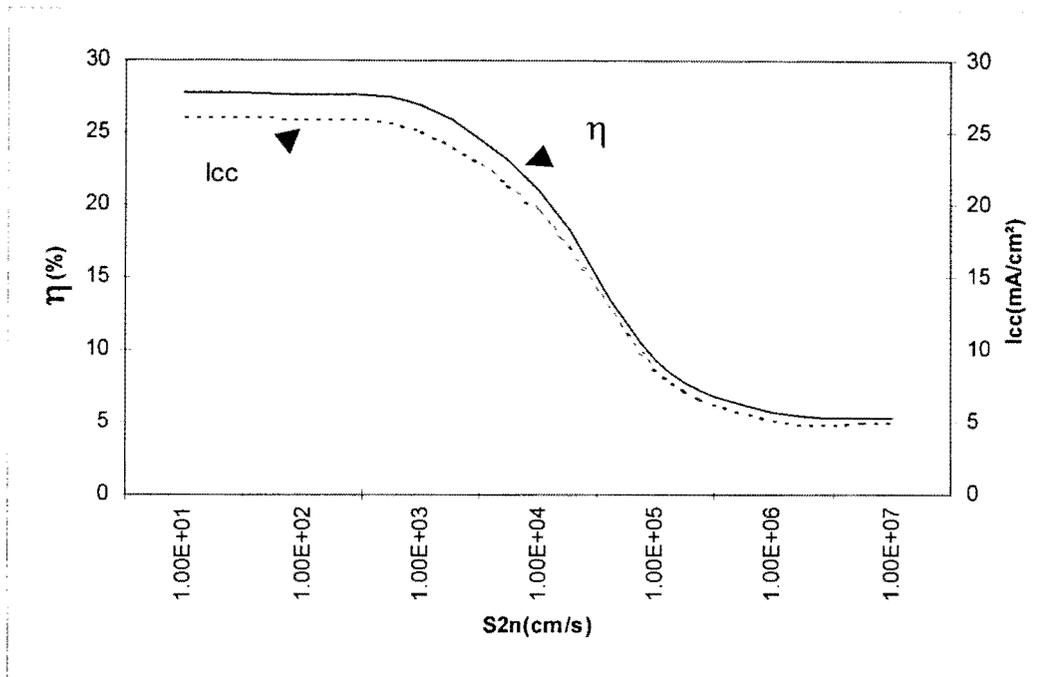


Figure 3-21: rendement η et le courant de court-circuit I_{cc} du tandem en fonction de la vitesse de recombinaison s_{2n} .

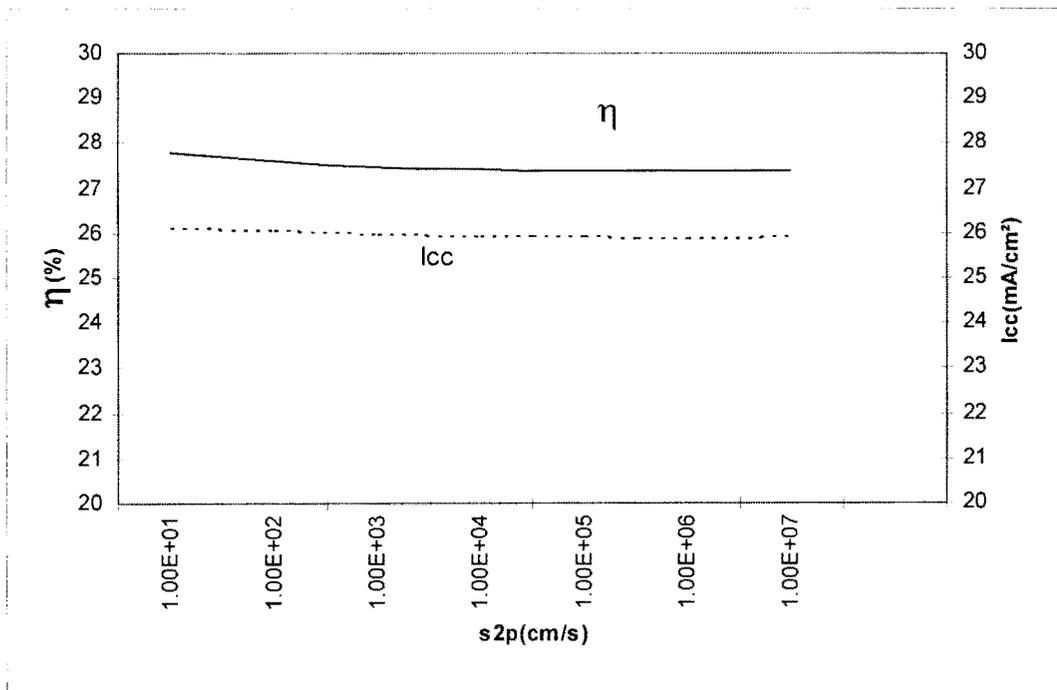


Figure 3-22: rendement η et le courant de court-circuit I_{cc} du tandem en fonction de la vitesse de recombinaison s_{2p} .

III-4-1-3: Influence des dopages Na1 et Nd1.

Pour l'étude de l'influence des dopages de la cellule GaAs sur les performances du tandem, nous avons tracé les courbes d'évolution du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de ces dopages (figures 3-23 à 3-28). Cette étude nous a permis de faire trois observations:

- * la courbe de la figure 3-23 qui décrit l'évolution de la tension V_{co} en fonction de Na1 et celle de la figure 3-24 qui décrit V_{co} en fonction de Nd1 montrent que la tension de circuit-ouvert V_{co} croît avec ces deux paramètres

- * le rendement η croît et atteint un maximum de 27,84% puis décroît (figures 3-25 et 3-26). La décroissance du rendement est plus importante avec le dopage Na1 (figure 3-25) qu'avec le dopage Nd1 (figure 3-26)

- * le courant de court-circuit du tandem reste pratiquement constant lorsque $Na1 < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Au delà de cette concentration, il décroît rapidement (figure 3-27). Par contre il reste pratiquement constant avec Nd1 (figure 3-28).

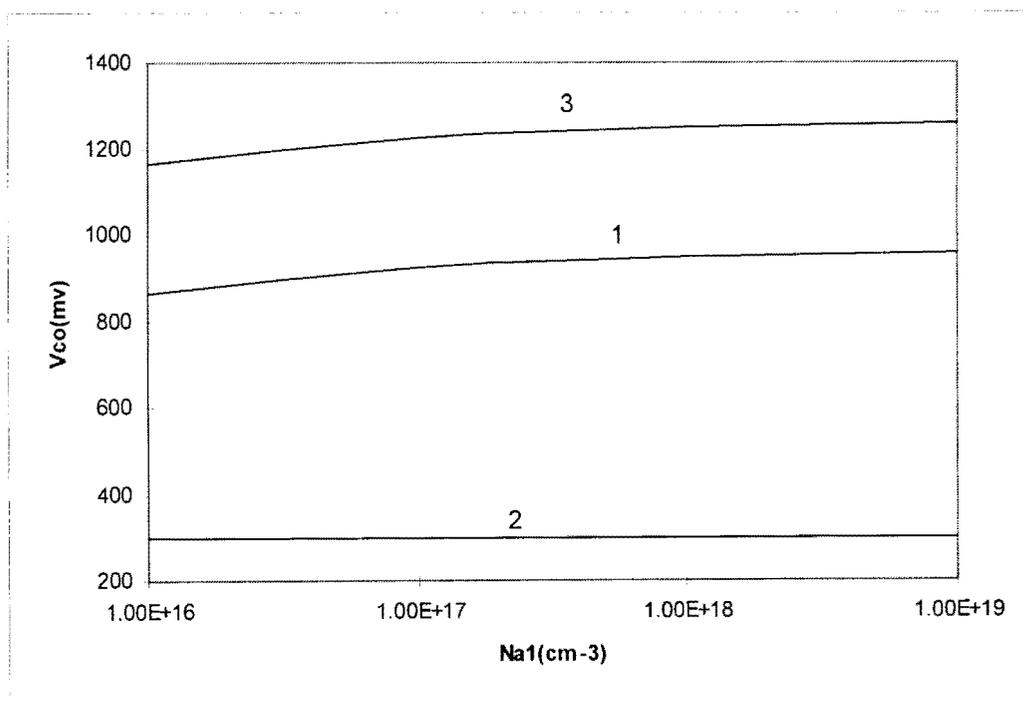


Figure 3-23: tension de circuit ouvert du tandem en fonction du dopage Na1

(1): V_{co1} ; (2): V_{co2} ; (3): V_{co}

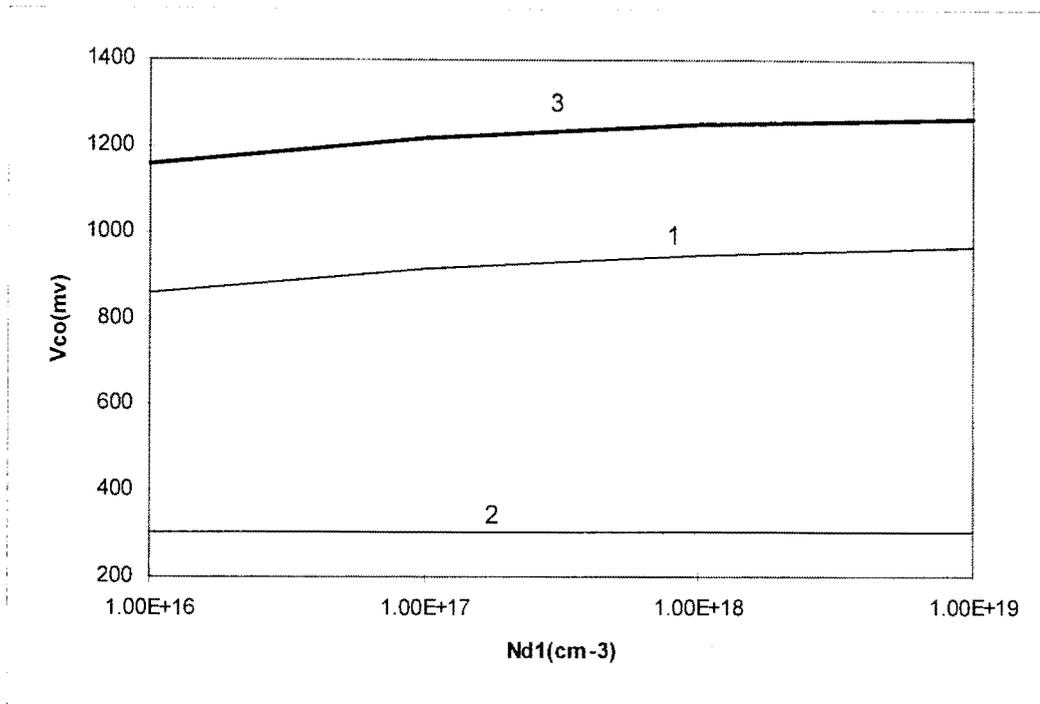


Figure 3-24: tension de circuit ouvert du tandem en fonction du dopage Nd1

(1): Vco1; (2): Vco2; (3): Vco

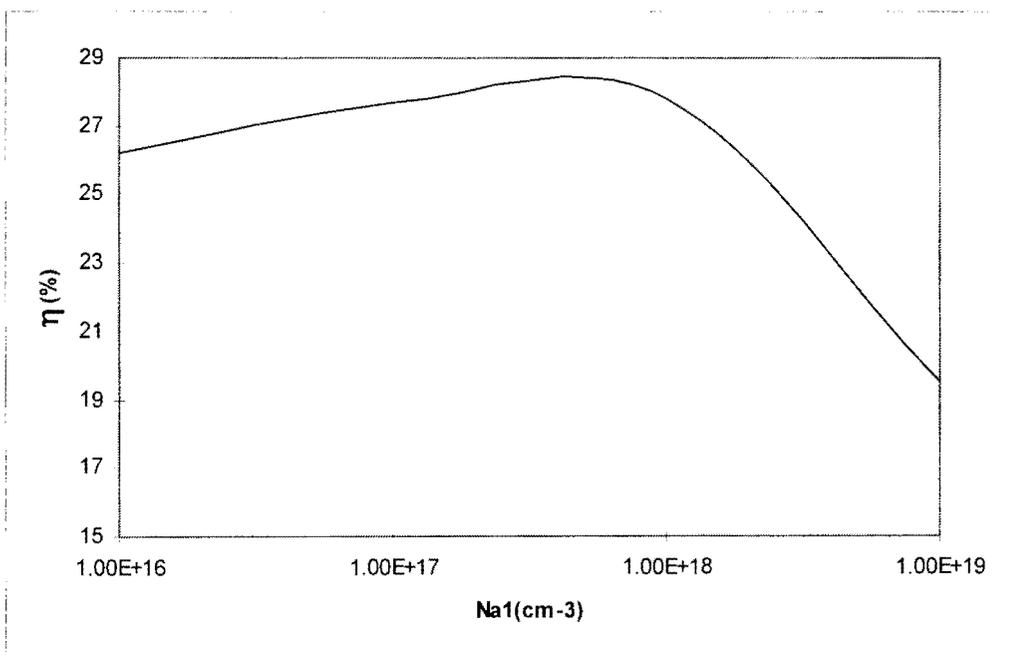


Figure 3-25: rendement du tandem en fonction du dopage Na1.

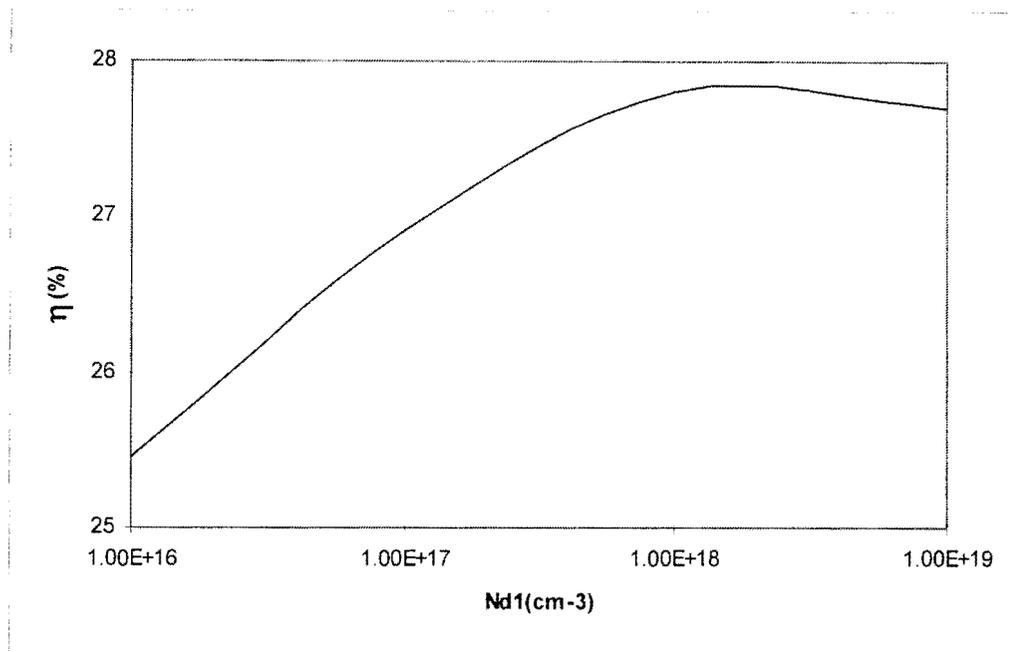


Figure 3-26: rendement du tandem en fonction du dopage Nd1.

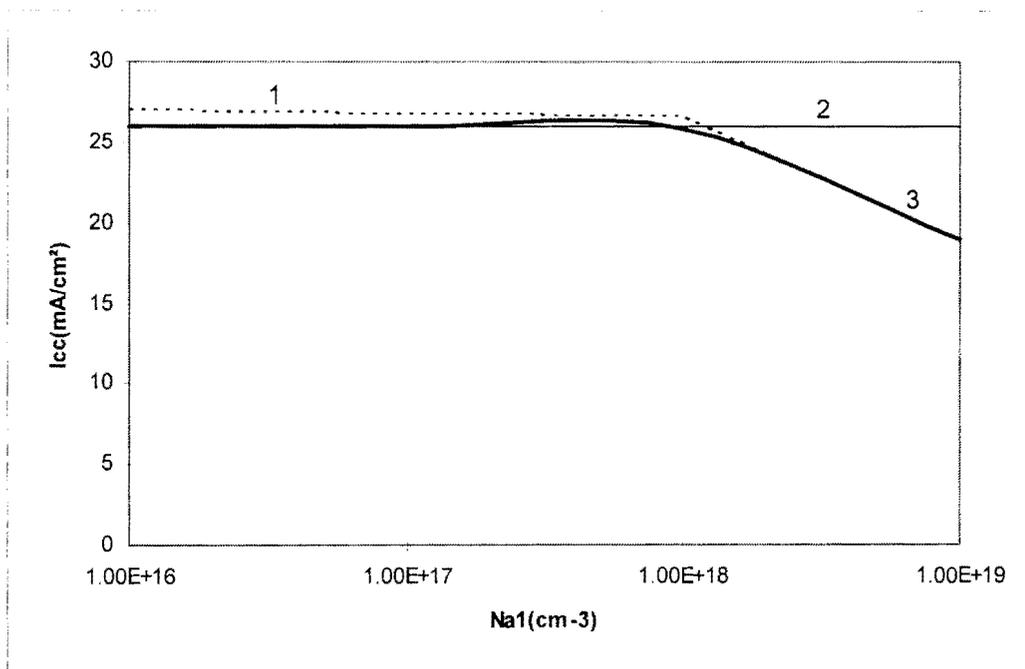


Figure 3-27: courant de court-circuit du tandem en fonction du dopage Na1:

(1): Icc1; (2): Icc2; (3): Icc.

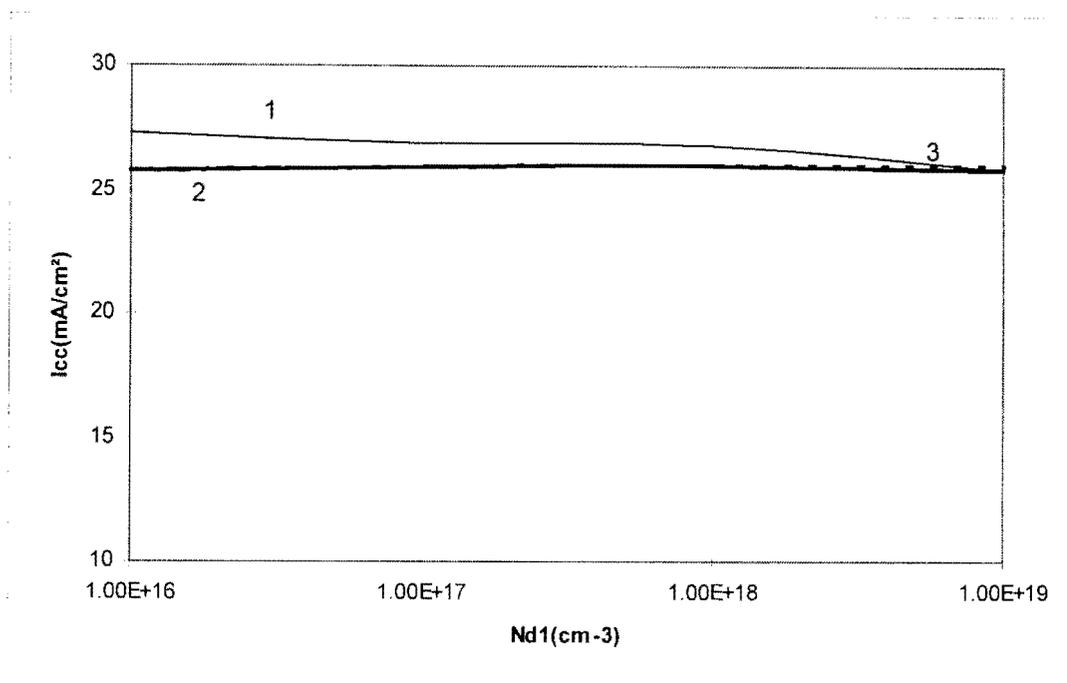


Figure 3-28: courant de court-circuit du tandem en fonction du dopage Nd1:

(1): Icc1; (2): Icc2; (3): Icc.

III-4-1-4: Influence des dopages Na2 et Nd2.

Les courbes des figures 3-29 à 3-31 donnent les limites de la concentration des impuretés dopants Na2 de la cellule $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ qui conduisent à des meilleures performances pour le tandem. Les courbes des figures 3-29 et 3-30 montrent que le rendement η et le courant de court-circuit I_{cc} se dégradent rapidement lorsque Na2 est supérieure à 10^{17}cm^{-3} . Quant à la tension de circuit ouvert V_{co} il croît légèrement jusqu'à $\text{Na}_2=10^{17}\text{cm}^{-3}$ puis décroît (figure 3-31).

Dans le cas du dopage Nd2 nous avons remarqué que son effet sur les paramètres caractéristiques du tandem est moins important que celui de Na2. Son influence est décrite par les courbes des figures 3-32 à 3-34. Le rendement reste au-dessus de 27% (figure 3-32) et le courant de court-circuit voisin de 26mA/cm^2 (figure 3-33) lorsque Nd2 varie de 10^{16}cm^{-3} à 10^{19}cm^{-3} . La tension de circuit ouvert subit une légère variation (figure 3-34).

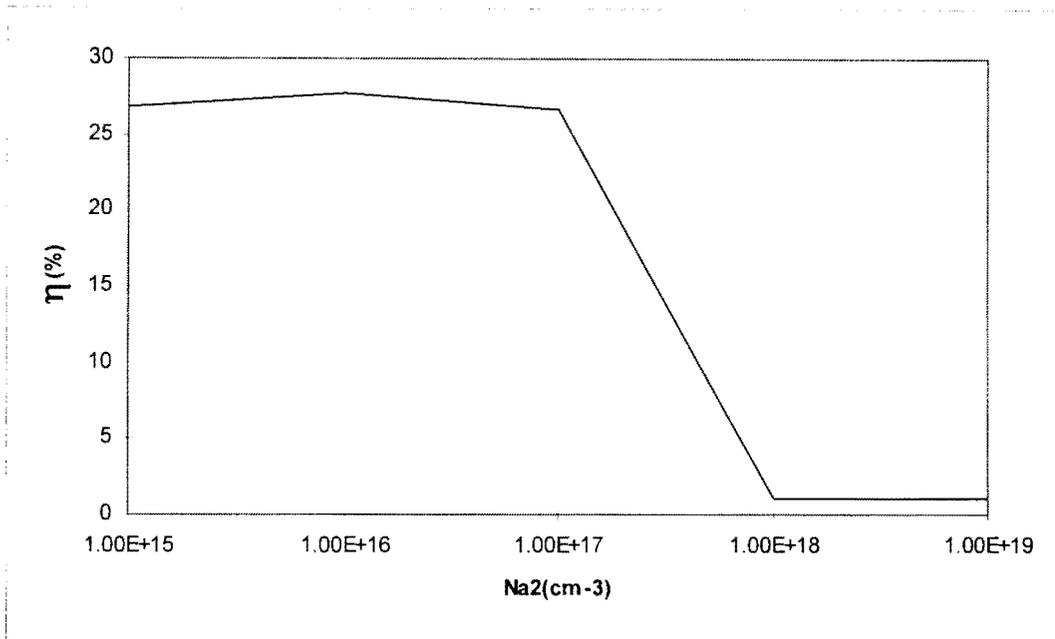


Figure 3-29: rendement du tandem en fonction du dopage Na_2 .

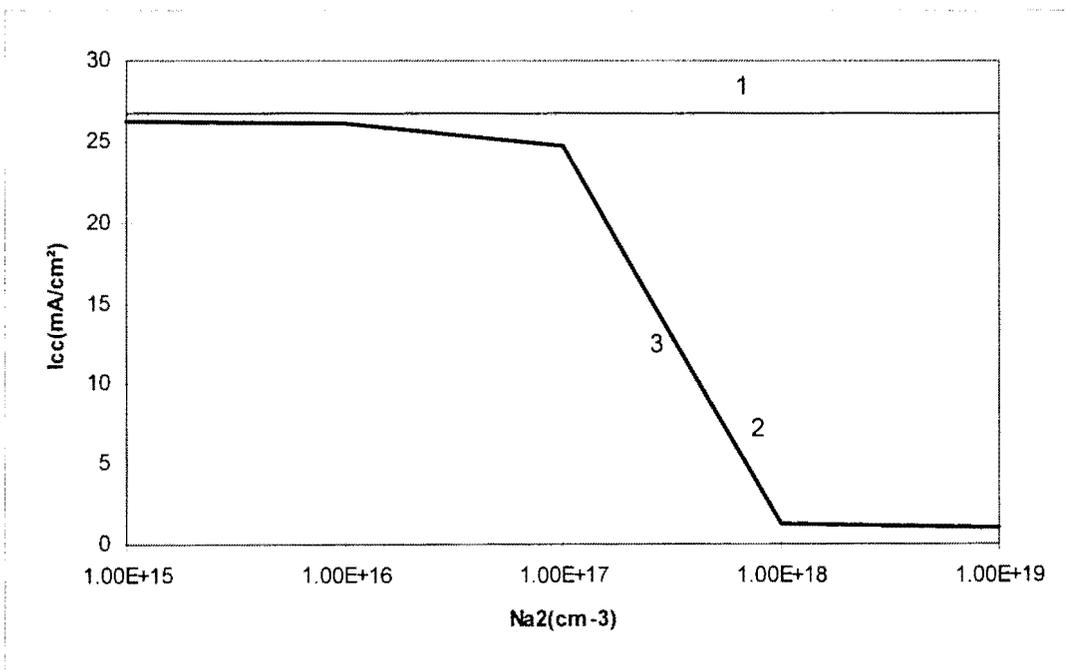


Figure 3-30: courant de court-circuit du tandem en fonction du dopage Na_2 :

(1): I_{cc1} ; (2): I_{cc2} ; (3): I_{cc} .

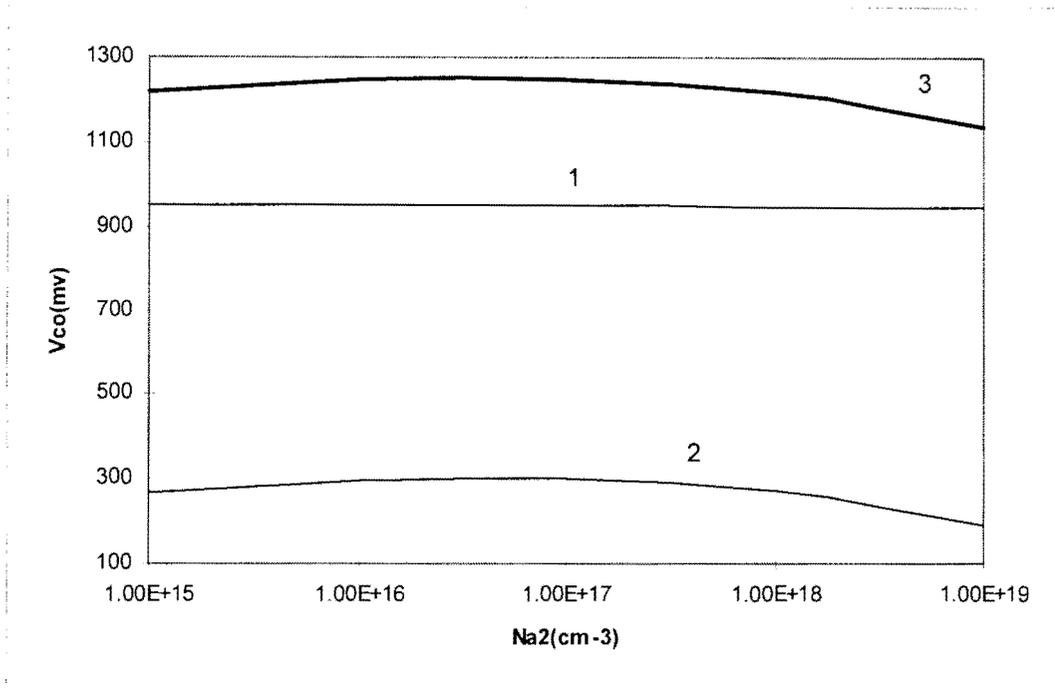


Figure 3-31: tension de circuit ouvert du tandem en fonction du dopage Na_2 :

(1): V_{co1} ; (2): V_{co2} ; (3): V_{co} .

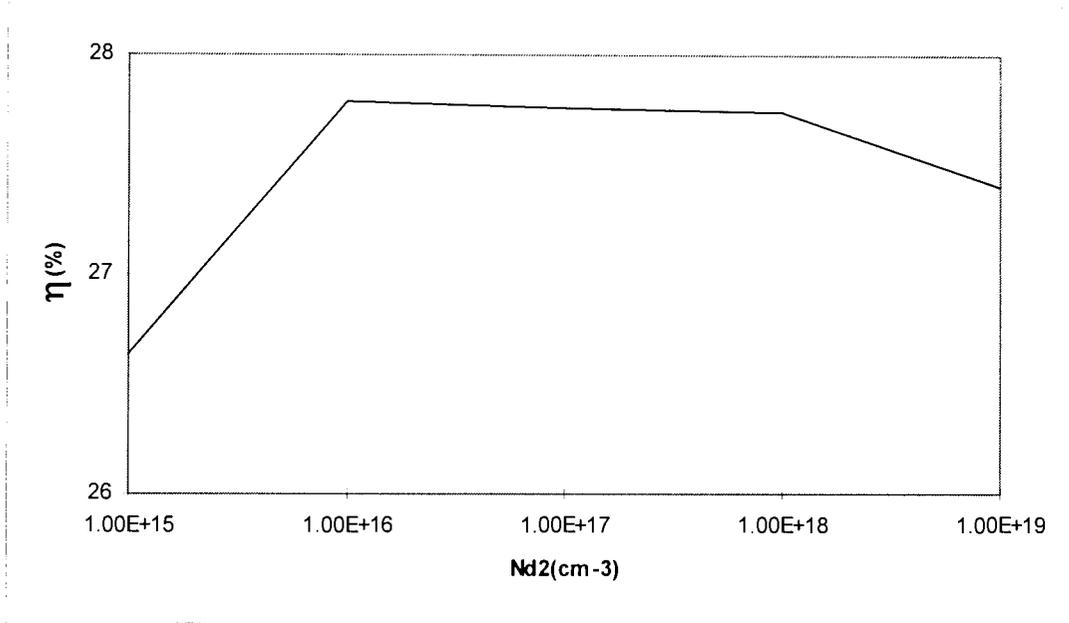


Figure 3-32: rendement du tandem en fonction du dopage Nd2.

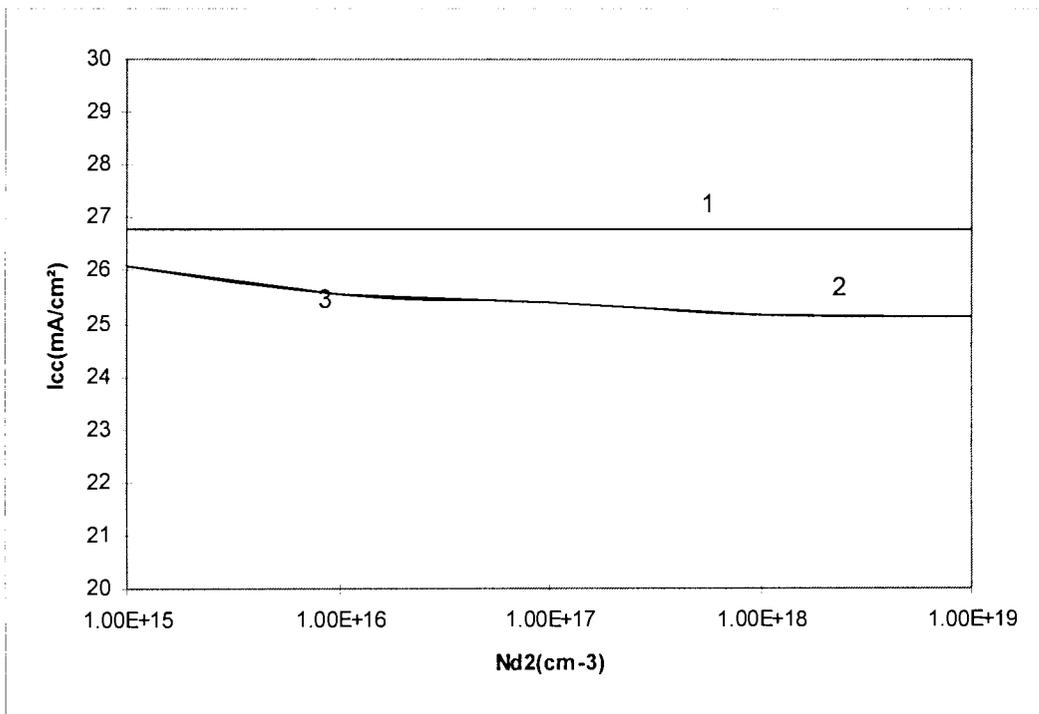


Figure 3-33: courant de court-circuit du tandem en fonction du dopage Nd2:

(1): Icc1; (2): Icc2; (3): Icc.

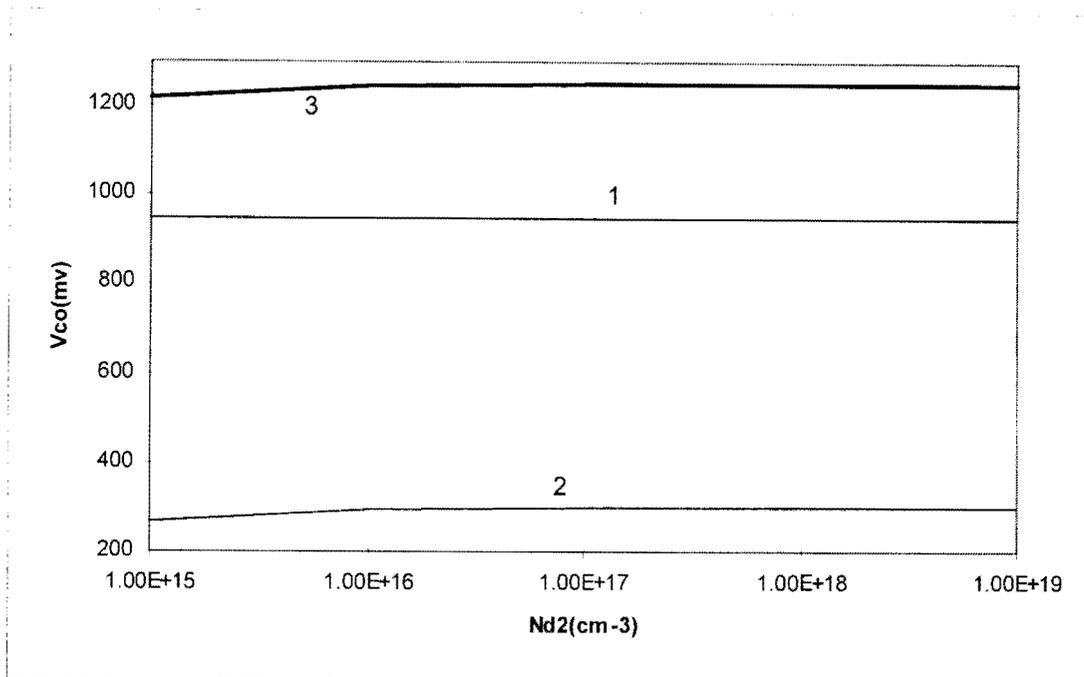


Figure 3-34: tension de circuit ouvert du tandem en fonction du dopage Nd2:
(1): Vco1; (2): Vco2; (3): Vco.

III-4-2: Analyse

La figure 3-19 montre que l'effet de la vitesse s_{1p} sur le rendement est faible. En effet, le rendement varie de 27,84% à 26,93% lorsque s_{1p} passe de 10^4 cm/s à 10^8 cm/s. Par contre le rendement se dégrade très rapidement avec la vitesse s_{1n} . La figure 3-20 décrit cette évolution. Le rendement décroît de 27,84% à 10,2% pour une variation de la vitesse s_{1n} de 10^4 cm/s à 10^8 cm/s.

Le courant de court-circuit a une variation similaire à celle du rendement en fonction des deux paramètres s_{1p} et s_{1n} . En effet le courant de court-circuit varie de 26 mA/cm^2 à $25,73 \text{ mA/cm}^2$ quand s_{1p} passe de 10^4 cm/s à 10^8 cm/s (figure 3-19) et il se dégrade de 26 mA/cm^2 à 10 mA/cm^2 quand s_{1n} varie de 10^4 cm/s à 10^8 cm/s (figure 3-20). Les variations du rendement s'expliquent donc par celles du courant de court-circuit. L'étude a permis de montrer que c'est la vitesse superficielle s_{1n} qui dégrade les performances du tandem. Il est donc nécessaire de réduire son effet pour un meilleur rendement du tandem.

Comme nous l'avons montré au paragraphe III-3-1-2, une optimisation des paramètres de la fenêtre permet de réduire la vitesse de recombinaison s_{1n} tout en minimisant l'absorption du rayonnement dans l'épaisseur de la fenêtre. On peut aussi réduire l'effet de la vitesse de recombinaison s_{1n} sur les performances du tandem en créant un champ d'entraînement dans la couche sensible P par gradient de dopage pour améliorer le rendement de collecte.

la faible influence de s_{2p} (figure 3-22) sur les performances du tandem s'explique par deux raisons essentielles:

- * la surface recombinante est loin de la jonction collectrice ($y_{2n} = 40\mu\text{m}$).
- * la photo génération est faible proche de la surface arrière.

Quant à la forte influence de s_{2n} (figure 3-21), elle est due au fait que la quasi-totalité de la photo génération se fait au voisinage du front (le matériau $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ est à gap direct). Les porteurs photo générés proche de la surface arrière participent peu ou presque pas au courant. La jonction tunnel joue aussi un rôle de fenêtre pour la cellule $\text{Hg}_{0,42}\text{Cd}_{0,58}\text{Te}$ et donc permet de réduire la vitesse de recombinaison s_{2n} [42]. La figure 3-11 montre que la fenêtre permet d'avoir des vitesses de recombinaison inférieures à 10^3cm/s . Cette possibilité nous permet de dire qu'un rendement compris entre 27% et 27,80% pour le tandem est possible.

L'importance des effets du dopage Na1 par rapport au dopage Nd1 sur les paramètres caractéristiques du tandem (figures 3-23 à 3-28) est due à la plus grande sensibilité de la couche P (zone dopée Na1) par rapport à la couche N (zone dopée Nd1) (figure 2-5).

Un accroissement du dopage entraîne une augmentation de V_{oc} (figure 3-23 et 3-24). En effet, un accroissement du dopage diminue le courant d'obscurité I_{os} (expressions 2-21 et 2-22) et par conséquent une augmentation de V_{co} (expression 1-2).

Ces variations des paramètres sont une conséquence de la décroissance des longueurs de diffusion L_n et L_p des porteurs. En effet, une augmentation des

dopages entraîne une diminution des durées de vie des porteurs. Le rendement de collecte des porteurs et par conséquent le courant de court-circuit subit une détérioration. La tension de circuit ouvert par contre subit un accroissement. Mais la variation de la tension de circuit ouvert est moins importante que celle du courant de court-circuit. Le comportement de ces deux paramètres explique l'évolution du rendement. Ceci est dû à la faible quantité de rayonnement absorbé dans cette couche. Le rendement optimum a été obtenu pour des valeurs des concentrations $Na1=10^{18}cm^{-3}$ et $Nd1= 5 \cdot 10^{17}cm^{-3}$. Ces niveaux de dopage sont techniquement réalisables. La technologie actuelle permet de contrôler des niveaux de dopage aussi élevés que $10^{19}cm^{-3}$ [17].

La dégradation du rendement (figure 3-29) et celle de la tension de circuit ouvert (figure 3-31) s'expliquent par la détérioration rapide du courant de court-circuit

(figure 3-30). En effet, le courant de court-circuit I_{cc} varie de $26mA/cm^2$ à $1,5mA/cm^2$ lorsque $Na2$ varie de $2 \cdot 10^{16}cm^{-3}$ à $10^{18}cm^{-3}$. Cette variation de I_{cc} est due principalement à la dégradation de la longueur de diffusion des porteurs avec l'accroissement du dopage. En effet, la diminution de la longueur de diffusion affecte le rendement de collecte et par conséquent le courant de court-circuit. L'importance de l'effet de $Na2$ sur I_{cc} est due au fait que la quasi-totalité de la photo génération dans la cellule $Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te$ a lieu dans le front (zone P) et donc une dégradation des longueurs de diffusion des porteurs dans cette zone affecte fortement le courant de court-circuit du tandem.

La faible influence du paramètre $Nd2$ sur les paramètres caractéristiques du tandem (figure 3-32 à 3-34) est due à la faible quantité de rayonnement absorbé dans la couche arrière de la cellule $Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te$. La quasi-totalité du rayonnement ayant été absorbé dans la couche avant.

CONCLUSION

L'étude a montré qu'en négligeant les facteurs limitatifs un rendement avoisinant 30% (29,6%) peut être obtenu.

La prise en compte des phénomènes de recombinaison dans la zone de charge d'espace et l'optimisation de la fenêtre et de la couche antireflet a montré qu'un rendement maximum de 27,84% peut être atteint. Ce rendement est atteint pour $x=0,58$. En outre l'étude a montré que c'est l'intervalle $0,5 \leq x \leq 0,6$ qui donne les meilleurs rendements. En effet, c'est dans ce domaine que nous avons des rendements de l'ordre 27%.

Nous avons étudié le comportement des paramètres caractéristiques du tandem par rapport aux paramètres physiques et géométriques de celui-ci. Cette étude nous a permis de montrer les limites des variations de ces paramètres physiques et géométriques sans une influence sensible sur les performances du tandem.

La résistance série R_s étant en partie fonction de la technologie de dépôt de la grille et de la nature du matériau utilisé, nous l'avons faite varier de 0 à 10Ω afin d'apprécier l'impact de son influence. Nous avons montré que le rendement passe de 27,8% à 21,5% quand R_s passe de 0Ω à 10Ω .

Dans cette optimisation la résistance parallèle a été prise égale à l'infinie, ce qui nous a permis de négliger les courants de fuite.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail a été de déterminer théoriquement la structure optimale du tandem GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe. Ceci en tenant compte des différents facteurs limitant les performances des cellules photovoltaïques.

Nous avons exposé dans un premier temps les différents facteurs limitatifs que nous avons pris en compte dans notre étude. Certains de ces facteurs sont liés à la nature et à la pureté du matériau (transparence, thermistance, ...), d'autres par contre dépendent de la technologie et de la structure de la photopile (résistance série, courants de fuite ...). Des solutions existent pour réduire les pertes liées à ces facteurs :

- les surfaces antiréflexives permettent de pallier le problème de réflexion sur la surface semi-conductrice.

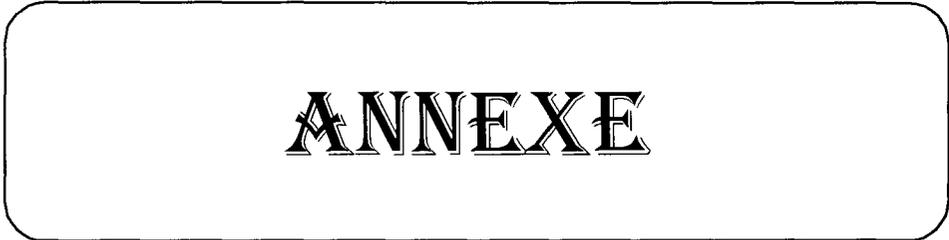
- les jonctions à champ accélérateur sur les faces avant permettent d'améliorer le rendement de collecte en favorisant l'éloignement des porteurs minoritaires de la surface. Elles permettent aussi de s'affranchir des difficultés technologiques des couches minces et de diminuer la résistance série en augmentant l'épaisseur de la couche sensible où est créé le champ.

Ensuite nous avons élaboré un programme d'optimisation de notre tandem. Ce programme permet d'optimiser les tandem à structure monolithique. Il nous a permis de déterminer théoriquement avec la prise en compte des facteurs limitatifs la structure optimale du tandem GaAs/Hg_{1-x}Cd_xTe. La structure optimale est le tandem GaAs/Hg_{0,42}Cd_{0,58}Te avec un rendement maximum de 27,84%. Ce rendement est élevé comparativement à ceux obtenus avec d'autres structures bien élaborées telles que les structures PERC (Passivated Emitter and Red Cell) basées sur le silicium qui ont permis d'atteindre un rendement de 27,5% sous concentration (10w/cm²) [6]. Un rendement de 28% a été obtenu avec le tandem AsAl_{0,03}Ga_{0,97}/Ge [55]. En outre

nous avons montré que les rendements compris entre 27% et 27,84% sont obtenus avec les valeurs de x comprises entre 0,5 et 0,6.

Il ressort aussi de notre étude que le courant dans les jonctions GaAs est dominé par le courant de recombinaison dans la zone de charge d'espace (tableau 3-1).

Ce travail peut être repris en s'orientant vers les cellules inter digitées ou en faisant intervenir un champ accélérateur pour améliorer le rendement de collecte. Une étude de l'influence de la température dans les cellule GaAs et $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ permettra de vérifier l'opportunité de l'utilisation de ce tandem dans le cas des cellules sous concentration.



ANNEXE

SPECTRE AMI [57]

pin (mW/cm ²)	λ (μm)								
0,02	0,3104	3,7	0,3881	21,32	0,5174	55,7	0,7761	86,01	1,5523
0,03	0,3124	3,91	0,3911	22,14	0,5229	57,04	0,7885	87,18	1,6024
0,04	0,3144	4,13	0,3942	22,99	0,5284	58,4	0,8012	88,32	1,6558
0,06	0,3164	4,38	0,3974	23,86	0,5341	59,66	0,8143	89,40	1,7129
0,09	0,3184	4,66	0,4006	24,73	0,5399	61,00	0,8279	90,40	1,7741
0,13	0,3205	4,99	0,4038	25,61	0,5458	62,28	0,8419	91,03	1,8398
0,19	0,3225	5,35	0,4071	26,49	0,5519	63,08	0,8564	91,16	1,9106
0,24	0,3246	5,74	0,4105	27,39	0,5581	63,86	0,8715	91,49	1,9870
0,31	0,3268	6,14	0,4139	28,3	0,5645	64,61	0,8870	92,09	2,0699
0,38	0,3289	6,56	0,4174	29,24	0,5709	65,38	0,9031	92,74	2,1599
0,46	0,3311	6,99	0,4209	30,21	0,5776	66,18	0,9199	93,40	2,2580
0,55	0,3334	7,42	0,4245	31,20	0,5844	66,69	0,9372	94,04	2,3656
0,64	0,3356	7,85	0,4282	32,22	0,5913	67,28	0,9553	94,44	2,4839
0,74	0,3379	8,29	0,4319	33,24	0,5985	68,05	0,9740	94,56	2,6146
0,85	0,3402	8,74	0,4357	34,28	0,6058	69,22	0,9935	94,61	2,7599
0,96	0,3426	9,23	0,4396	35,34	0,6132	70,48	1,0137	94,67	2,9223
1,08	0,3446	9,77	0,4435	36,42	0,6209	71,85	1,0349	94,78	3,1050
1,2	0,3473	10,34	0,4475	37,52	0,6288	73,19	1,0569	94,96	3,3120
1,32	0,3498	10,95	0,4516	38,63	0,6368	74,5	1,0799	95,23	3,5486
1,45	0,3523	11,6	0,4557	39,77	0,6451	75,75	1,1039	95,51	3,8216
1,59	0,3548	12,26	0,4599	40,92	0,6536	76,54	1,1289	95,75	4,1402
1,73	0,3573	12,94	0,4642	42,1	0,6623	77,03	1,1552	95,92	4,5167
1,88	0,3599	13,63	0,4686	43,29	0,6712	77,99	1,1827	96,07	4,9685
2,03	0,3626	14,34	0,4731	44,5	0,6804	79,25	1,2116	96,10	5,5207
2,19	0,3652	15,07	0,4776	45,12	0,6899	80,51	1,2419	96,10	6,2110
2,36	0,3679	15,83	0,4822	46,97	0,6996	81,68	1,2737	96,10	7,0986
2,54	0,3707	16,58	0,4870	48,23	0,7096	82,88	1,3072	96,13	8,2823
2,72	0,3735	17,33	0,4918	49,5	0,7199	83,78	1,3427	96,18	9,9397
2,91	0,3763	18,11	0,4967	50,72	0,7305	84,13	1,3798	96,22	12,4263
3,1	0,3792	18,9	0,5017	52,01	0,7414	84,21	1,4193	96,24	16,5723
3,3	0,3821	19,7	0,5069	53,32	0,7526	84,47	1,4610	96,26	24,8699
3,49	0,3850	20,51	0,5121	54,43	0,7642	84,98	1,5053	96,26	49,8090

λ= longueur d'onde

BIBIOGRAPHIE

[1] ROBERT G. SEIPPEL

photovoltaics 1983 Reston, Virginia 22090 p XI.

- [2] FAHRENBRUCH ALAIN .L, RICHARD H. BUBE
Fundamentals of solar cells , photovoltaic solar energy conversion
 department of materials science and engineering, stanford university,
 stanford , California. 1983.
- [3] M.F. LAMORTE and D . ABBOTT
Analysis of AlGaAs-GaInAs cascade solar cell under AM0-AM5 spectra.
 Research Triangle Institute, Research Triangle Parck, Nc 27709, USA
 23 october 1978
- [4] MARTIN A. GREEN and al
Characterization of 23-percent efficiency silicon solar cells
 IEEE transaction on electron devices vol 37 n° 2, february 1990 pp 331-335
- [5] S.E.D. HABIB and M.Y SOLIMAN
A high efficiency Si solar cell using tunnel MIS front and back contacts.
 Solid-State Electronics vol 33 n°8 pp 1029-1034 1990
- [6] R.A. SINTON, YOUNG KWARK and al
27,5-percent silicon concentrator solar cells.
 IEEE electron device letters vol 7 n°10 october 1986 pp 567-569
- [7] WALTER SCOTT, E. L. STELZER and R. J. HAGER
Electrical and far-infrared optical properties of P-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$
 Honeywell corporate Rechearch Center, Bloomington Minnesota 55420
 appl phys vol 47 n°4 appril 1976 pp 1408-1414.
- [8] A. A VERTIL and al
Investigation of bulk and surface transport properties of n-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ cristals in the temperature range $0,5K < T < 50K$.
 Institute of radophysic and electronics academy of sciences of Ukraine,
 Kharov
 sov; appl phys; semicond 26 (4), appl 1992 pp 331-334
- [9] A.V BUJANOV and al
Spectral dependance of the photoconductivity and photomagnetic effct in epitaxial $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe$ films with an anodically oxidized free surface.
 sov phys semiconductor 26(4) appril 1992
- [10] G.L. HANSEN, J.L. SCHMIT and T.N CASSELMAN
Energy gap versus alloy composition and temperature in $Hg_{1-x}Cd_xTe$
 Honeywell Corporate Technology Center, Boomington Minnesota.

55420 J.Appl. phys 53 (10) october 1982 pp 7099-7101

- [11] JUNHAO CHU and al
Energie versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}CdxTe.
Appl phys 42(11) september 1983.
- [12] JEAN LUC FILIPOZZI
Modélisation et intégration d'un détecteur infrarouge associant un photoconducteur HgCdTe à un transistor à effet de champ GaAs.
Thèse de l'université PAUL SABATIER DE TOULOUSE n°890 mai 1991
- [13] M. D. ROUHANI, A. SYLLA, K. KOUADJA and D. ESTEVE
Computer optimization of Multispectral Solar Cells Based on GaAs and Hg_{1-x}CdxTe
Phys. stat. sol 150 , 773 pp773-782 (1995)
- [14] M. D. ROUHANI, A. SYLLA, K. KOUADJA and D. ESTEVE
theoretical analysis of the two-junction monolithic cascade Hg_{1-x}CdxTe/GaAs.
solid-state electronic vol 38 n°2 pp 531-532 1994
- [15] E. BUCHER
Solar cell materials and their basic parameters.
Appl phys 17(1) 1978.
- [16] C. H. HENRY.
Limiting efficiencies of idéal single and multiple energy gap terrestrial solar cells.
J. Appl phys 51(8) 1980.
- [17] ADAMA SYLLA
Etude du tandem Hg_{0.47}Cd_{0.53}Te/GaAs
Thèse troisième cycle Université Nationale de Cote d'Ivoire 1991
- [18] S. M. SZE
Physics of semiconductor devices
2nd Edition 1981 pp 816-817
- [19] H. MATHIEU
Physique des sémicconducteurs et des composants électroniques.
Edition Masson 1987 pp 422-423.
- [20] A. VAPAILLE. R. CASTAGNE.
Dispositifs et circuits intégrés sémicconducteurs. physique et technologie.
Bordas; Paris 1987 p564.

- [21] MONICA VESZELEI.
Preparation and characterisation of sputtered metal oxyde and nitrides for optical application.
 ACTA Universitatis upsa liensis uppsala 1997 pp19-20.
- [22] RICHARD. B ADLER and Cie.
Electromagnetic energy transmision and radiation.
 edit John Wiley and sons inc 1960 pp341-358.
- [23] D. SIFLERT.
Nouvelles techniques de réalisation de photopiles au silicium. Structure superficielles texturisées ou cellules noires (black cells).
 rev physique appliquée 14(1) janv 1979 p 174.
- [24] R. A. ARNDT, J. F. ALLISON, J. G HAYOS, and MEULENBERG,Jr.
Optical proerties of comsat non-relective cell.
 Comsat Laboratories Clarksburg, Maryland 20734
- [25] M. WOLF. Senior,Member,Ire.
 Proc. Inst. Radio Engrs 48. 1960 pp 1248-1252 .
- [26] M. YA BAKIROV
Radiation effet in solar cells.
 Applied solar energy vol 27 n°6 pp 32-38
- [27] JOSEPH J COFERSKY.
The effet of electron and proton irradiation thin film solar cell.
 revue de physique appliquée tome 1 n°3 pp 221-227
- [28] MICHEL ROLAND
Les matériaux semiconducteurs et leurs propriétés. L'effet photovoltaïque et les phénomènes associés.
 III^e séminaire sur l'énergie solaire 6-17 septembre 1982 p 273
- [29] BERNARD BEAUMONT
Conversion photovoltaïque solaire multispectrale; propriétés des cellules (Ga,In)As épitaxiées sur InP.
 thèse de doctorat de l'université de Nice 1987
- [30] R. J. HANDY
Theoretical analysis of the series resistance of a solar cell.
 solid-state electronics vol 10 pp 765-775. 1967.
- [31] GERARD L and al

A new methode for experimental determination of the series resistance of a solar cell.

transaction on electron devices vol 29 n°10 october 1982

[32] P. MIATHE and al.

A review of techniques to determine the series resistance of solar cell.

phys stat. sol (a) s3 403 1984.

[33] MASATOTH WARASHINA and AKIO USHIKOKWA

Simple methode for the determination of serie resistance and maximum power of solar cell.

journal of applied physics vol 19 pp179-182 1980.

[34] ISSAKA YOUM

Cellule solaire $Cd_{1-y}Zn_yS/Cu_2S$ à base de couches minces polycristallines obtenues par pulvérisation chimique réactive et par bombardement électronique.

Thèse de troisième cycle Université de Dakar. 13 juillet 1983.

[35] A. LAUGIER , J A ROGER

Les photopiles solaires: du matériel au dispositif du dispositif aux applications

rue Lavoisier,F75384 Paris cedex 08 pp 92-93

[36] I. STEPANENKO

Principe de la microélectronique

Edition MIR Moscou 1983 p 64

[37] P. KIREEV.

La physique des semiconducteurs.

edition MIR-MOSCOU pp 133-141. 1975

[38] H. J. HOVEL

Semiconductors and semimetals

vol. 11, p 46

[39] KOUADJA KOMENAN.

Etude des structures à multijonctions planes: application à la conversion photovoltaïque.

Thèse d'état Université d'Abidjan 1986.

[40] P. MIATHE and al.

The quality factor of solar cells under illumination.

renewable energy 1994 pp 1651 - 1653.

- [41] D. W KRAMMER, M. A LUDINGTON
Am. J. physics 45 p602 1977
- [42] CHIKARA AMANO, HIDEO SUGIURA, MASAFUMI
YAMAGUCHI and KUNIO HANE
*Fabrication and Numerical Analysis of AlGaAs/GaAs Tandem Solar Cell
With Tunnel Interconnections.*
IEEE Transaction on Electron devices, Vol. 36, N°6, june 1989.
- [43] JAMES A. HUTCHBY, RICHARD L. FUDURICH
Theoretical analysis of $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs graded band-gap solar cell
Journal of Applied physics, vol. 47, N°7, july 1976.
- [44] BERNARD BEAUMONT
*Conversion photovoltaïque solaire multispectrale: propriétés des cellules
(Ga, In)As épitaxiées sur InP.*
Thèse Université de Nice 1987.
- [45] HIDEO SUGIURA, CHIKAO AMANO, AKIO YAMAMOTO and
MASAFUMI YAMAGUCHI
*Double hétérostructure GaAs Tunnel Junction for a AlGaAs Tandem
Solar Cell*
Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27, N°2,
February, 1988, pp. 269-272
- [46] ALBERT PAUL MALVINO
Principe d'électronique.
3^e édition MC GRAW-HILL 1988 pp 120-121
- [47] BERNARD EQUER
*Energie solaire photovoltaïque: physique et technologie de la
conversion photovoltaïque.*
Ellipse ed 1993 p 59.
- [48] ROGER LEGROS.
Physique des semiconducteurs; technologie- diode.
ed Eyrolles 1974 pp142-153.
- [49] G. SISSOKO and al.
Light spectral effect on recombination parameters of Si solar cell.

Renewable energy june 1996 pp 1487-1490.

- [50] J.R.HANSER and P.M.DUMBAR
*Minority carrier reflecting property of semi-conductor
 high-low junction*
 solid-state-electronics 1975 vol 18 pp715-716
- [51] CHANDRA GORADIA and B.L SATER
*A first order theory of the $p^+ - n - n^+$ edge -illuminated silicon solar cell at
 very high injection level*
 IEEE transactions on electron devices vol 24 pp 342-351 avril 1977
- [52] P.M.DUMBAR and J.R.HANSER
A theoretical analysis of the courant-voltage characteristics of solar cells.
 annual report ofn NASA grant NGR 34-002 0195 aug 1975, pp 29-36
- [53] WOODALL (J.M); HOVEL (H.J).
 appl letter; 21-379.
- [54]: YAO FREDERIC CNAN BRUNO.
*Modélisation et optimisation des photocellules à homojonction,
 hétérojonction, jonction à hétéroface et multicolores à structure
 basées sur larsénure de gallium.*
 Thèse Université Nationale de Côte d'Ivoire novembre 1993.
- [55] J. L. SCHMIT.
*Intrinsic carrier concentration of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ as a function of x using
 K.P calculation.*
 J. appl phys. vol 47 n°7 23february 1970.
- [56] MARC ORGERET.
Les piles solaires, le composant et ses applications.
 Mexico Sao Paulo Masson 1985 pp138-141.
- [57] A BAYE
Données solaires pour différentes caractéristiques atmosphériques
 CNRS Groupe de physique du solide-energie solaire.
 antipolis Bp 1- 06560 Vabonne 1980.