

# Etude comparative entre les systèmes de couplage des cellules photovoltaïques multijonctions.

DIDA.T<sup>#</sup>, Dennai.B<sup>#1</sup>, Bekhada.A<sup>#</sup>

<sup>#</sup> Département de Sciences et technologies Université de Béchar, Algérie  
<sup>1</sup>deennai\_benmoussa@yahoo.com

**Abstract**— Dans ce travail on étudie les systèmes de photopiles multi jonction mode mixte (tandem et dichroïque) nous considérons des associations avec des matériaux particuliers tels que  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  pour un dispositif de cinq cellules couplées 1 par 2 par 2 par un miroir dichroïque. On a fait une étude comparative entre les deux systèmes (le système indépendant et système de couplage électrique) pour obtenir les meilleures performances (les photo-courants et les rendements des cellules).

**Keywords**— cellules PV, multi jonctions, dichroïque, tandem, performances.

## I. INTRODUCTION

Parmi les pertes responsables du faible rendement des photopiles solaires, celles dues à l'excès d'énergie et à la non-absorption des photons sont les plus importantes. Le concept de l'utilisation simultanée de plusieurs photopiles de matériaux différents permet dans une certaine mesure, de limiter ces pertes et d'obtenir un meilleur rendement. Les cellules peuvent être couplées entre elles en les disposant les unes derrière les autres sur le trajet optique comme dans le système tandem [1] ou par l'intermédiaire de miroirs dichroïques qui envoient sur chacune d'elles, une partie bien définie du spectre solaire comme dans le système dichroïque [2]. Les différentes cellules sont donc placées sur le faisceau optique comme dans le système tandem, mais sont aussi, par définition même du dispositif, couplées électriquement.

Les travaux théoriques antérieurs ont surtout mis en évidence les augmentations possibles de rendement de systèmes de cellules indépendantes couplées en mode tandem ou en mode dichroïque. Cependant, il faut noter l'intérêt des groupements mixtes faisant intervenir des combinaisons des deux modes de couplage: tandem, dichroïque.

Dans ce travail, nous proposons une analyse de ce problème en considérant que le couplage optique entre les cellules est effectué non seulement par l'un ou l'autre des deux modes de couplage tandem ou dichroïque, mais encore par une ombinaison des modes dichroïque et tandem.

De plus, nous avons souvent considéré le cas où les cellules sont mises en série électrique par un simple fil conducteur qui relie entre elles les photopiles initialement indépendantes. Le but de cette étude est de mettre en évidence d'une part les différences qui existent entre les modes dichroïque et tandem couplés électriquement, d'autre part indépendantes.

Nous avons étudié des cinq et quatre cellules constitués de matériaux hypothétiques de largeurs de bande interdite respectives  $E_{g1}, E_{g2}, E_{g3}, E_{g4}, E_{g5}$  avec toujours  $E_{g1} > E_{g2}; E_{g2} > E_{g3}; E_{g3} > E_{g4}; E_{g4} > E_{g5}$ ; nous donnerons les valeurs optimales des  $E_{gk}$  et les maxima de rendement de nos systèmes.

Pour prélever les caractéristiques du composant photovoltaïque, et déterminer son comportement on doit étudier les paramètres suivants :

- le courant en court-circuit  $I_{CC}$ .
- la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$ .
- le rendement photovoltaïque  $\eta$ .

## II. LA STRUCTURE ÉTUDIÉE

Les cellules sont superposées par ordre décroissant des valeurs des hauteurs de bandes induites  $E_g$ , le dispositif ayant la plus grande valeur se trouve en tête et recevant tout les rayonnements [3]. Pour un spectre solaire donné, et un nombre fini de matériaux, il existe des valeurs imposées de  $E_g$  donnant un rendement maximum au système [4].

Par exemple le couplage optimum pour cinq cellules et avec un spectre AM1.5 serait obtenue pour des valeurs de  $E_g$  qui correspondent sensiblement  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ .

Pour cela, nous avons choisi  $E_{g1}=2.4\text{eV}$ ,  $E_{g2}=1.84\text{eV}$ ,  $E_{g3}=1.43\text{eV}$ ,  $E_{g4}=1.12\text{eV}$ ,  $E_{g5}=0.74\text{eV}$ , sous le spectre AM1.5.

### A. Le système GaAs :

La structure de bande directe du GaAs, lui confère des propriétés électroniques intéressantes. La masse effective des électrons est très faible dans la vallée centrale  $\Gamma$ , et par conséquent, la mobilité électronique est élevée. La hauteur de bande interdite est élevée (1,424 eV à 300K). Pour comparaison, les valeurs correspondantes dans le silicium et dans le germanium sont de 1,12 eV et 0,6 eV respectivement. A faible champ, la mobilité des électrons est plus importante dans le GaAs que dans le Silicium, même à fort niveau de dopage. Conjuguée à l'effet de survitesse dans le GaAs, ceci va permettre de réduire le temps de transit dans la base ainsi que les résistances de contact.

### B. Le système GaInP :

On peut obtenir le GaInP qui est un composé ternaire à partir des deux semi-conducteurs binaires InP et le GaP, l'énergie de sa bande interdite est de 1,87 eV, Ce matériau est utilisé pour la fabrication de l'émetteur des cellules photovoltaïques. La masse effective des électrons est plus faible dans le GaInP, ce qui permet une plus forte mobilité électronique : 1,6 fois plus importante que dans le GaAs et 9 fois plus que dans le Silicium, d'où une résistance de base plus faible. La vitesse de recombinaison en surface est plus faible dans le GaInP que dans le GaAs ce qui permet d'augmenter le courant. Le GaInP présente une conductivité thermique de substrat plus grande que le GaAs.

Comme le montre la figure 1, la structure étudiée avec système de cinq les cellules associées peuvent être dépendantes ou électriquement indépendantes.

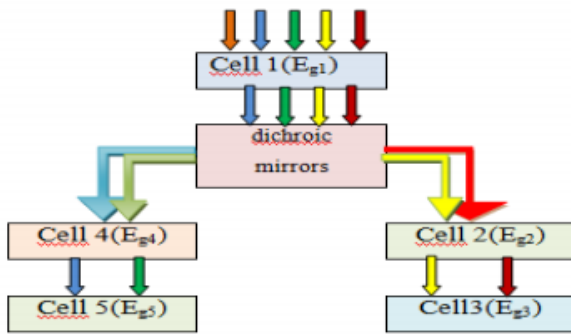


Fig. 1. Cinq cellules indépendantes avec un miroir dichroïque

### III. MODÉLISATION DE LA CELLULE SOLAIRE

#### A. Calcul de rendement cellule solaire multi spectral :

Pour des raisons de commodité, en particulier du fait de son universalité, le spectre solaire qui sera utilisé dans les calculs est à la base de données AM1.5, avec la constante solaire 1000W/m<sup>2</sup>. Les cellules sont conduites dans le cas de cellules solaires avec un diode. Fig. 2

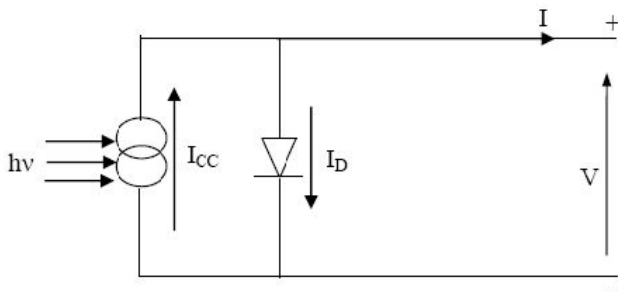


Fig. 2. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

Nous avons utilisé les mesures de [ ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2 (AM1.5)] qui donnent la division du spectre solaire AM1.5 en 2000 intervalles sur une échelle d'énergie allant de 4.42 et 0.3 eV.

Ce grand nombre d'intervalles nous permet d'avoir une grande précision en couvrant tout le spectre  $E_{gk}$ .

#### B. Le photo courant :

Dans le mode dichroïque le spectre solaire est découpé par des miroirs, (on suppose dans ce travail les miroirs parfaits) chaque miroir envoyant une partie du spectre solaire sur la cellule correspondante.

En prenant d'une part le rendement quantique de l'absorption et d'autre part le rendement de collecte des porteurs minoritaires par la barrière de la jonction p-n, Tous deux égaux à 1.0. On obtient aisément une table de base [3] donnant le photo-courant calculé à partir du nombre de photons  $N_{ph}$  pour les énergies comprises entre  $h\nu$  et le gap  $E_g$  du semi-conducteur.

Pour la première cellule :

$$N_{ph1} = \int_{E_{g1}}^{h\nu} n_{ph}(h\nu) d(h\nu)$$

Pour la k-ième cellule

$$N_{phk} = \int_{h\nu - E_{gk}}^{h\nu - E_{gk} - 1} n_{ph}(h\nu) d(h\nu)$$

Où  $n_{ph}(h\nu)$  est le flux de photons élémentaire à l'énergie  $h\nu$  du spectre solaire. On a évidemment :

$$\text{Pour la première cellule: } I_{ph1}(E_{g1}) = qN_{ph1}(h\nu)$$

$$\text{Pour la k-ième cellule : } I_{phk}(E_{gk}) = qN_{phk}(h\nu)$$

#### C. Caractéristique Courant –Tension (Mode tandem-dichroïque) :

1-Courant de court circuit  $I_{cck}$  :

$$I_{cck} = I_{phk} - I_{Ok} \left( e^{\frac{q}{kT}(R_{sk} I_{cck})} - 1 \right) - \frac{R_{sk} I_{cck}}{R_{pk}}$$

$$I_{CCK} = \frac{I_{phk}}{1 + \frac{R_{sk}}{R_{pk}}}$$

2-Tension en circuit ouvert :

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation.

$$V_{COk} = \frac{kT}{q} \times \text{Log} \left\{ 1 + \frac{I_{phk}}{I_{Ok}} \right\}$$

#### D. La puissance maximale délivrée à la charge :

$$P_{\text{max } k} = I_{mpk} \cdot V_{mpk}$$

Avec: 
$$V_{mpk} = V_{COk} - \frac{K.T}{q} \cdot \log\left(1 + \frac{q.V_{COk}}{K.T}\right)$$

Et 
$$I_{mpk} = \frac{I_{phk} - I_{Ok} \left( e^{\frac{q.V_{mpk}}{K.T}} - 1 \right) - \frac{V_{mpk}}{R_{pk}}}{1 + \frac{R_{Sk}}{R_{Pk}}}$$

**E. Rendement :**

Le rendement de cellule k est :

$$\eta_{mk} = \frac{P_{\max k}}{P_{in}} = \frac{I_{mk} \cdot V_{mk}}{\phi_k \cdot S_k}$$

Ou  $P_{in}$  est la puissance totale lumineuse incidente par unité de surface.

Pour le mode mixte (tandem-dichroïque) il y'a deux rendements calcule :

Si les cellules sera indépendantes on s'appelée (le système indépendant) donc le rendement de n cellules solaire dans le mode mixte (tandem-dichroïque) est égale :

$$\eta = \sum_{k=1}^n \eta_k$$

Lorsque les cellules sont liées entre elles par un fil conducteur, il faut alors noter qu'un même courant traverse toutes les cellules et que la tension électrique totale aux bornes de du dispositif sera simplement la somme des tensions aux bornes de chaque cellule.

Après avoir déterminé le point de fonctionnement  $I_{mk}, V_{mk}$  des cellules indépendantes, nous avons imposé un courant série  $I$  égal au plus petit des courants  $I_{mk}$  soit  $I = \inf(I_{mk})$ . on obtiendra une tension d'utilisation  $V_{mk}$  et une puissance utile  $P_k = V_{mk} \cdot \inf(I_{mk})$

Le rendement global sera:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{P_{in}}$$

**IV. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS**

**A. Caractéristique I(V) et P(V) du premier système cinq cellule indépendant avec un miroir :**

Dans ce système les cinq cellules associées optiquement sont électriquement indépendantes.

Sur la figure .3 est représentée la caractéristique I (V) pour le premier système .On remarque que le système donne un meilleure rendement.

Sur la figure .4 est représentée la caractéristique P (V) pour le premier système.

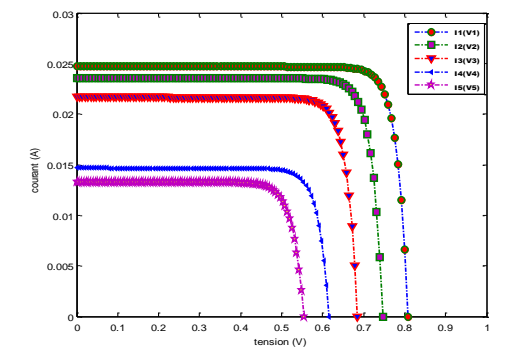


Figure 3.Caractéristique I(V) du premier système

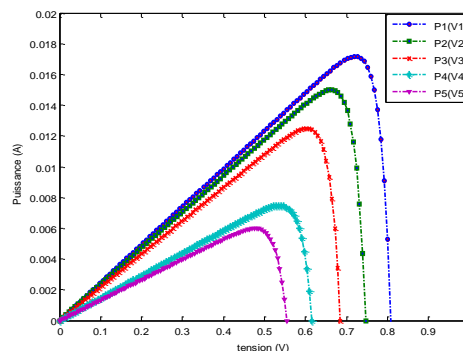


Figure 4. Caractéristique P (V) du premier système

Le tableau I donne des résultats de modélisation (courant de court-circuit  $I_{sc}$ , tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , rendement de conversion  $\eta$ ) du premier système. En outre indiqué dans le même tableau les tendances de nos résultats calculés ont été comparées à quelques résultats de [9].

TABLEAU I  
GRANDEURS PHOTOVOLTAÏQUES DU PREMIER SYSTEME

Materials	Eg(e V)	Notre calcul			ref [der]
		Icc(mA)	Vco(V)	$\eta$ (%)	
	2.4	24.74	0.808	17.17%	14.72%
GaInP X=0.47/ y=0	1.84	23.58	0.747	14.98%	15.52%
GaAs X=1 y=1	1.43	21.68	0.685	12.49%	13.19%
GaInAsP X=0.47/ y=0.63	1.12	14.67	0.616	7.48%	8.78%
GaInAs X=0.47/ y=1	0.74	13.30	0.554	5.99%	4.93%
Le rendement global est =				58.11%	57.14%

**B. Caractéristique I-V et P(V) du deuxième système 1par2par2 par un miroir :**

Dans ce système les cinq cellules associées électriquement indépendantes 1par2par2 par un miroir dichroïque.

Les figures 5 et 6 représentent respectivement les caractéristiques I (V) et P (V) pour le deuxième système.

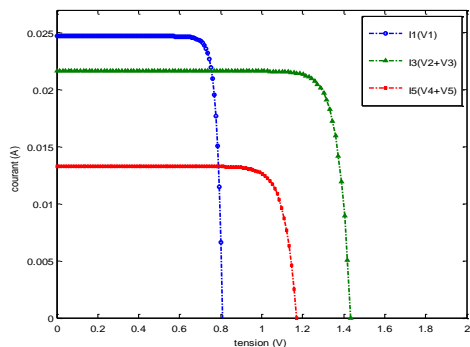


Figure 5 Caractéristique I(V) du deuxième système

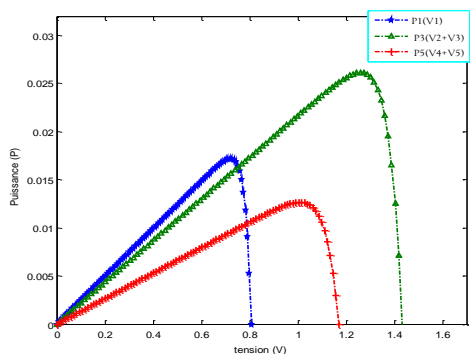


Figure 6 Caractéristique P (V) de la deuxième système

Les grandeurs photovoltaïques du deuxième système sont données dans le tableau II.

TABEAU I

GRANDEURS PHOTOVOLTAÏQUES DU DEUXIEME SYSTEME

Materials		GaInP/ GaAs	GaInAsP/ GaInAs
Eg(eV)	2.4	1.83 1.41	1.12 0.74
$V_{CO}(Volt)$	0.808	1.43	1.17
$I_{CC}(mA)$ inf	24.74	21.68	13.30
rendement $\eta(\%)$	17.17	26.23	12.74

D'après ce tableau, on remarque que le rendement du deuxième système inférieur que le rendement du premier système .cela est parce que le courant traversant le dispositif est prédominé par la cellule au courant le plus faible.

**C. Caractéristique I-V et P(V) pour le troisième système de couplage électrique avec un miroir:**

Les cinq cellules étant connectées en série, le courant traversant le dispositif est prédominé par la cellule au courant le plus faible.

Sur la figure 7 et la figure 8, on représente la caractéristique I (V) et P(V) respectivement pour les cinq cellules en série électrique.

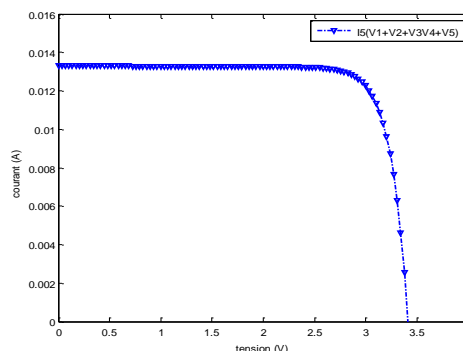


Figure 7. Caractéristique I(V) du troisième système

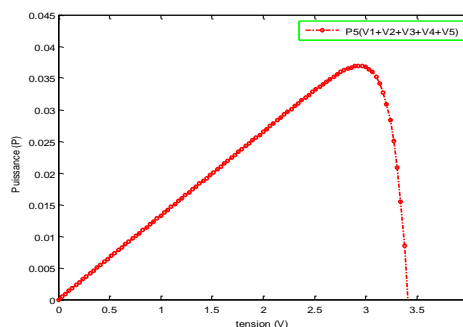


Figure 8. Caractéristique P(V) du troisième système

D'après la caractéristique électrique, représentée sur les figures 7 et 8:

Le courant traversant le dispositif est imposé par la cellule qui en fournit le plus faible.

La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est la somme des tensions en circuit ouvert de chaque cellule.

Mais en remarque que la puissance maximale de ce dispositif n'est pas la somme de puissance maximal de chaque cellule donc le rendement de ce dispositif n'est pas la somme des rendements.

Cellule mode mixte système couplage électrique:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

$$I_{Ph} = \min(I_{phk})$$

Les grandeurs photovoltaïques du système de couplage électrique sont données dans le tableau III.

TABLEAU I  
 GRANDEURS PHOTOVOLTAÏQUES DU TROISIEME SYSTEME

Grandeurs photovoltaïques	couplage électrique les cinq cellules
$V_{CO}(Volt)$	3.408
$I_{CC}(mA)$ inf	13.30
rendement $\eta(\%)$	37.77

The entire document should be in Times New Roman or Times font. Type 3 fonts must not be used. Other font types may be used if needed for special purposes.

D. Le rendement du système de couplage électrique avec un miroir :

En utilisant le tableau III on peut calculer le rendement de ce système.

$$\eta_{c-él} = \frac{\min(I_{\max k}) * (V_{\max 1} + V_{\max 2} + V_{\max 3} + V_{\max 4} + V_{\max 5})}{P_{in}}$$

Après les calculs on a trouvé  $\eta_{c-él} = 37.77\%$  .

F. Conclusions

Dans ce travail chapitre nous sommes intéressés à sortir les caractéristiques photovoltaïque des deux système : le système indépendant et celui du couplage électrique de cellule solaire mode mixte (tandem-dichroïque).

En plus, comme il est indiqué dans le début de cette partie que nous avons comparé nos résultats calculés à quelques résultats de [9]

Pour le système indépendant nous avons obtenu le rendement  $\eta_{ind} = 58.11\%$  .et pour le système de couplage électrique nous avons obtenu le rendement  $\eta_{c-él} = 37.77\%$  pour cinq cellules mode mixte, et le rendement  $\eta_{ind} = 53.44\%$  .

REFERENCES

- [1] A. Hamidat, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïques destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen 2004.
- [2] T. Zdanowicz, T. Rodziewicz, M. Zabkowski-Waclawek "Theoretical analysis of the optimum energy band gap of semiconductors for fabrication of solar cells for applications in higher latitudes locations" Solar Energy Materials & Solar Cells 87 (2005) 757-769
- [3] J. R. Leguerre et M. Leroy « Une étude comparative de dispositifs photovoltaïques multiples » Revue Phys. Appl. 19 (1984) 889-903
- [4] M. Orgeret, 'Les piles Solaires, le Composant et ses Applications', Edition Masson, 1985.
- [5] Efficiency Of Multijunction photovoltaic Systems J. L. Gray, A. W. Haas, J. R. Wilcox, and R. J. Schwartz School of Electrical & Computer Engineering and Sirck Nanotechnology Center Purdue University, West Lafayette, IN 47907
- [6] 978-1-4244-1641-7/08/\$25.00 ©2008IEEE
- [7] : F. Benyarou, « Conversion des énergies », Document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001- 2002.
- [8] R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.
- [9] [J. L. Gray, A. W. Haas, J. R. Wilcox, and R. J. Schwartz 978-1-4244-1641-7/08/\$25.00 ©2008IE