

CARACTERISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A L'AIDE D'UN DISPOSITIF OPTIQUE

**K. TEPE^{1*}, Y. LARE¹, G. DJETELI¹, G. ALLOGHO²,
S. OURO-DJOBO¹, L. PICHON³, K. NAPO¹ et A. STRABONI³**

¹*Laboratoire sur l'Energie Solaire - Chaire Unesco des énergies
renouvelables- Faculté des Sciences Université de Lomé – Togo*

²*Université de Masuku : Faculté des sciences et Techniques de Masuku – Gabon*

³*Laboratoire de Métallurgie Physique - UMR 6630 CNRS - Université de
Poitiers – France*

(Reçu le 15 Février 2009, accepté le 03 Mai 2009)

* Correspondance et tirés à part, e-mail: *kossi.tepe@yahoo.fr*

RÉSUMÉ

Le présent article décrit les bancs de caractérisation des cellules photovoltaïques mis au point par le Laboratoire de Physique des Matériaux (LPHYMAT) de Poitiers et le Laboratoire sur l'Energie Solaire (LES) de l'Université de Lomé.

Ces bancs de caractérisation, permettent d'étudier les réponses spectrales des cellules photovoltaïques en fonction des radiations afin de déterminer les paramètres fondamentaux des cellules photovoltaïques.

En effet, toutes les méthodes utilisées dans les caractérisations des cellules photovoltaïques reposent sur des modèles analytiques et certains paramètres sont déterminés à partir de séries de mesures expérimentales.

Les bancs de caractérisation mis au point permettent de faire l'analyse de la réponse spectrale en fonction de la lumière et de prédire ainsi la réponse des cellules à tout rayonnement, surtout sur un site de fonctionnement réel avec le soleil.

Ces bancs de caractérisation mis au point ont un double objectif :

- servir de matériels didactiques dans le cadre de l'enseignement sur les matériaux photovoltaïques,
- servir à la recherche sur les matériaux photovoltaïques.

Mots-clés : *Energie solaire, Cellules photovoltaïques, paramètres de caractérisation des photopiles*

ABSTRACT**Characterization of photovoltaic cells by using an optical device**

The present article describes the devices of characterization of the photovoltaic cells realised by two universities (Université de Poitiers - Laboratoire de Métallurgie Physique (LMP) and Université de Lomé - Laboratoire sur l'Energie Solaire LES).

These devices named "bench of characterization", permit to study the photovoltaic cell's spectral response according to various radiations in order to determine the fundamental parameters of photovoltaic cells.

Indeed, all methods used in the photovoltaic cell characterizations rest on analytic models and certain parameters are determined from sets of applied measures.

The bench of characterization realised permits to make the analysis of the spectral response according to incident radiation and so to predict the response of the cells to all radiance and especially on a real working site with sun light.

The bench of characterization finally has a double aim:

- serve as a didactic equipment in the setting of teaching on the photovoltaic materials,
- serve for the research on the photovoltaic materials.

Keywords : *Solar energy, photovoltaic Cells, parameters of characterization of the photo-batteries.*

I - INTRODUCTION

L'importante croissance de la production mondiale des panneaux photovoltaïques ces dernières années [1], témoigne de l'intérêt porté au développement de ce type de production d'électricité surtout avec le prix élevé du baril des énergies fossiles comme le pétrole sans cesse en augmentation (plus de 120\$ US en août 2008). Si l'on se réfère au Protocole de Kyoto [2], qui se donne pour objectif la réduction des gaz toxiques comme le CO₂ de - 5.2% de 1990 à 2012 ; de même en Europe une prévision de production en énergies renouvelables de 6% en 1996 à 12% en 2010, les problèmes de délestage électriques que connaît certains pays africains aujourd'hui, on comprend bien les enjeux pour des énergies renouvelables comme l'énergie solaire.

De nombreuses études ont été menées sur le silicium qui reste incontestablement le matériau le plus utilisé pour la fabrication des panneaux solaires [3]. C'est en particulier le cas des pays du Sud qui disposent du

gisement solaire favorable et qui devront à terme disposer des compétences pour appréhender au mieux les problèmes liés à la conception, la mise en oeuvre et la maintenance des installations photovoltaïques.

Si au niveau de l'élaboration et de la conception de cellules photovoltaïques performantes, les laboratoires, surtout ceux du Sud ne disposent pas des infrastructures adéquates, il n'en demeure pas moins qu'au niveau de la recherche, quelques opportunités existent. C'est dans ce cadre que ces bancs ont été mis au point.

Le présent article décrit ces dispositifs de caractérisation des matériaux photovoltaïques mis au point par le Laboratoire de Physique des Matériaux de l'Université de Poitiers et le Laboratoire sur l'Energie Solaire de l'Université de Lomé.

II – MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Dispositifs expérimentaux

L'objectif de ces dispositifs est d'étudier la réponse spectrale et la réponse électriques sous éclairement des cellules photovoltaïques suivant la nature des matériaux et la nature du rayonnement afin de déterminer les paramètres électriques fondamentaux de caractérisation de ces matériaux.

II-1-1. Banc de caractérisation spectrale

Il est constitué :

- d'un micro-ordinateur,
- d'un spectromètre optique,
- d'un multimètre programmable et contrôlable à partir d'un port RS232 du micro-ordinateur.

Le micro-ordinateur commande via des interfaces IEEE les alimentations électriques, le multimètre ainsi que le système de balayage en longueur d'onde du spectromètre. Il enregistre par le biais des appareils de mesure et de la carte d'acquisition les réponses des cellules aux différentes excitations grâce à un programme que nous avons conçu. Le circuit synoptique de mesure est présenté sur la *Figure 1*.

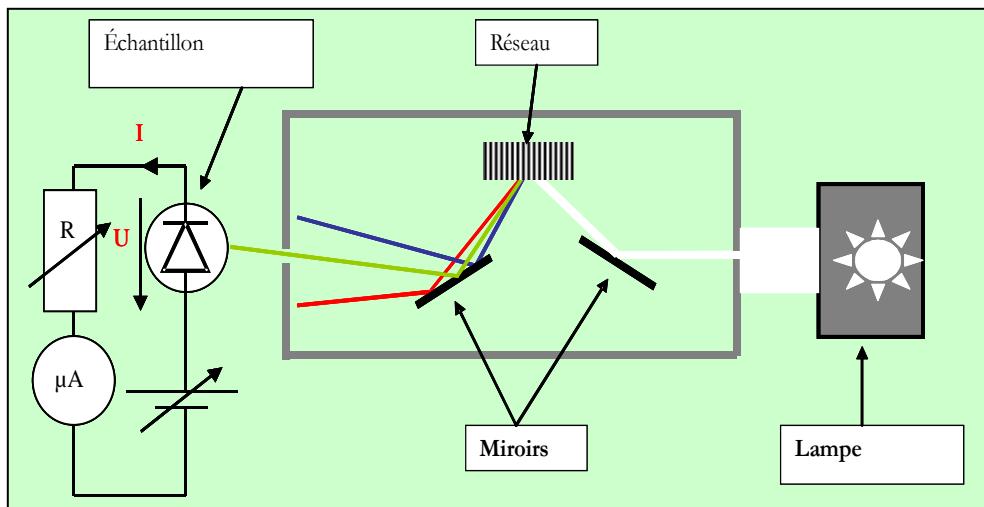


Figure 1 : Schéma synoptique du principe de caractérisation spectrale

II-1-2. Banc de caractérisation en lumière blanche

Le dispositif de réponse en lumière blanche est présenté sur la **Figure 2** ; il est constitué :

- d'une source de lumière blanche éclairant sous incidence normale la cellule ;
- d'une alimentation de courant programmable ;
- d'un multimètre mesurant la chute de tension aux bornes de la cellule et raccordé à l'interface RS232 d'un micro-ordinateur d'acquisition de données ;
- d'un multimètre servant d'ampèremètre contrôlable via un port RS232 d'un micro-ordinateur ;
- d'une cellule dont on veut déterminer les caractéristiques photospectrales ;
- d'un capteur de température de contact de type PT100 ;
- d'un micro-ordinateur permettant de piloter le dispositif grâce à un programme que nous avons conçu et facilement manipulable sous un système d'exploitation comme Windows.

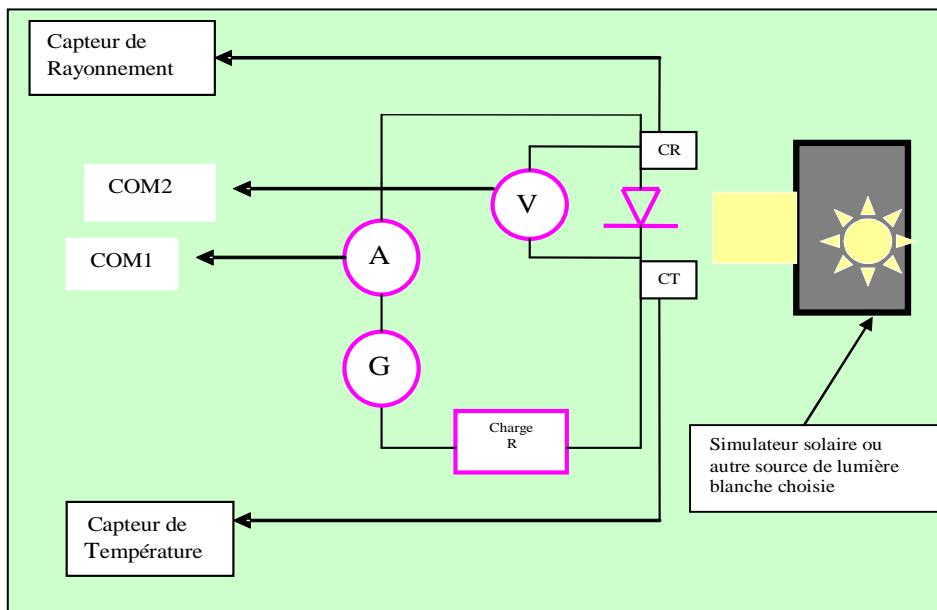


Figure 2 : Circuit du banc de caractérisation en lumière blanche

Les panneaux solaires étant constitués de plusieurs cellules, la réponse d'une cellule élémentaire déterminera la façon dont le panneau répondra à l'exposition au rayonnement. Il s'agit donc d'examiner la réponse d'une cellule photovoltaïque, lorsqu'elle est soumise à un rayonnement reproduisant au mieux le spectre et l'intensité du rayonnement solaire moyen au niveau du sol avec la normalisation A.M.1,5 [4, 5].

Un photodéTECTeur calibré en intensité lumineuse situé au voisinage de la cellule et dans son plan sert à mesurer l'intensité de l'éclairement.

II–2. Méthodes

Les manipulations ont été réalisées :

- sur une cellule commerciale de référence à base de silicium mono cristallin qui est une diode de 1cm^2
- les échantillons D10, D20 et D21 de la firme Photowatt, qui sont des cellules découpées suivant des surfaces variables, et convenablement préparé suivant un protocole approprié (soudure à l'étain des connecteurs en aluminium).

II-2-1. Expérimentation spectrale

Le principe de fonctionnement découle essentiellement de la relation bien connue d'Einstein et mise à jour par Louis de Broglie en 1924 [4] :

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1),$$

h = constante de Planck
 λ = longueur d'onde du rayonnement
 c = célérité de la lumière
 ν = fréquence du rayonnement

Cette relation qui exprime que l'effet photoélectrique ne commence pour un matériau donné que pour une énergie d'éclairement $E > E_g$ et qui se traduit par un certain nombre de rayonnements spectraux bien donnés. E_g étant l'énergie de gap du matériau considéré.

Pour le silicium dont $E_g = 1,2$ ev, on a la courbe spectrale pour une radiation solaire normalisée A.M. 1,5 [4] avec les longueurs d'ondes efficaces situées dans la zone III (*Figure 3*).

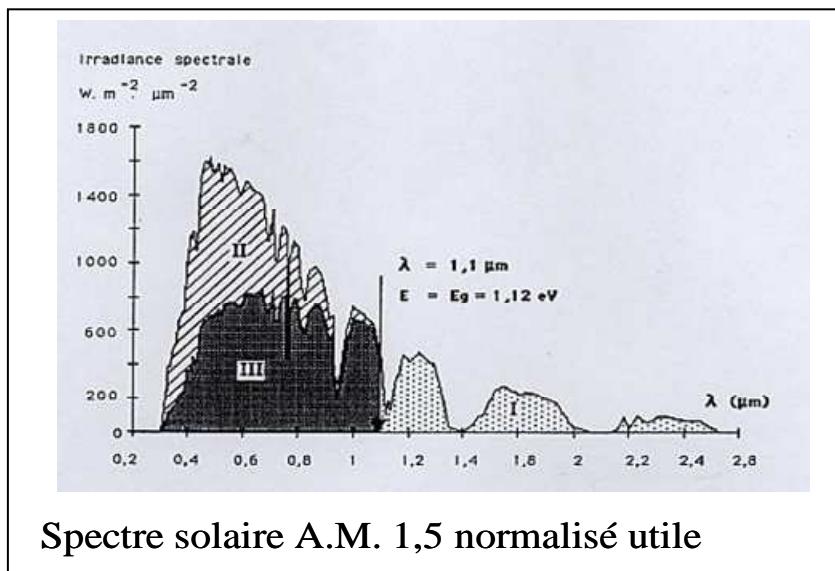
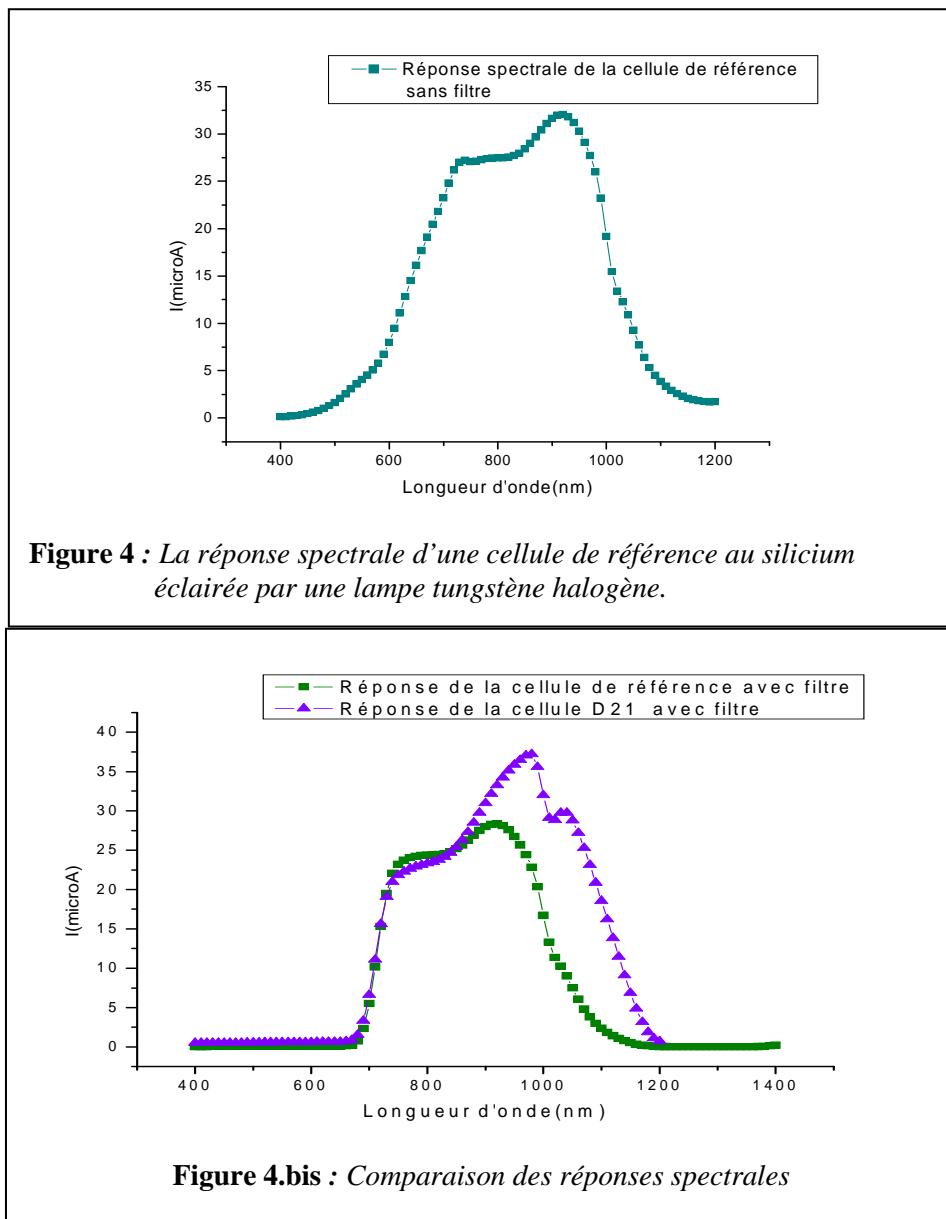


Figure 3 : Le spectre solaire AM 1,5 donné par un matériau en silicium

Le banc de réponse spectrale donne pour une lampe de tungsten-halogène les courbes de la *Figure 4* et *4.bis*, avec la cellule de référence (diode en silicium mono cristallin à jonction PN isolé) et des cellules testées (échantillons de

cellules monocristallins au silicium reliés entre elles). La longueur d'onde maximale de réponse se situe autour de 920 nm pour la cellule de référence, avec une bande de réponse en longueur d'onde entre 550 et 1100 nm. Les réponses de la cellule de test D21 sont presque identiques avec un léger décalage représenté sur la **Figure 4.bis**. L'utilisation du filtre permet de bloquer l'effet des interférences avec les rayonnements de deuxième ordre de faibles longueurs d'onde ($\lambda < 700$ nm) et qui influencent le phénomène observé sur la **Figure 4** (large bande de longueurs d'onde efficaces)



II-2-2. Expérimentation en lumière blanche

Le principe de fonctionnement repose ici sur l'utilisation des modèles de cellules photovoltaïques. Les modèles électriques des cellules photovoltaïques [6-8], découlent en général des schémas des circuits électriques équivalents de ces cellules qui incluent le courant généré par l'éclairement, le courant de saturation inverse d'une diode, les résistances séries et de shunt comme indiqués sur la **Figure 5** [4,5,9].

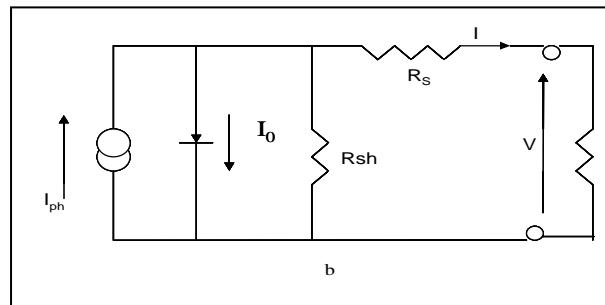


Figure 5 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ce circuit électrique permet d'évaluer le courant produit analytiquement par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

I_{ph} = Courant générés sous éclairement
 V_m = Tension au point de puissance maximale
 I_0 = Courant de saturation inverse inverse de diode
 V = Tension aux bornes de la cellule
 I = Courant généré par la cellule
 R_s = Résistance Série
 R_{sh} = Résistance Shunt
 n = facteur d'idéalité de la diode

Avec

$$V_t = \frac{KT_c}{q} \quad (3)$$

T_c = Température de la cellule
 K = Constante de Boltzmann
 q = Charge électronique ($1,60218 \cdot 10^{-19} C$)

Les courbes de caractérisation I en fonction de V obtenues expérimentalement (**Figure 6** et **Figure 7**), avec des échantillons de référence et de test D10 traduisent bien une relation de type équation (2) et les paramètres comme R_s , et R_{sh} sont déterminés expérimentalement [10-12].

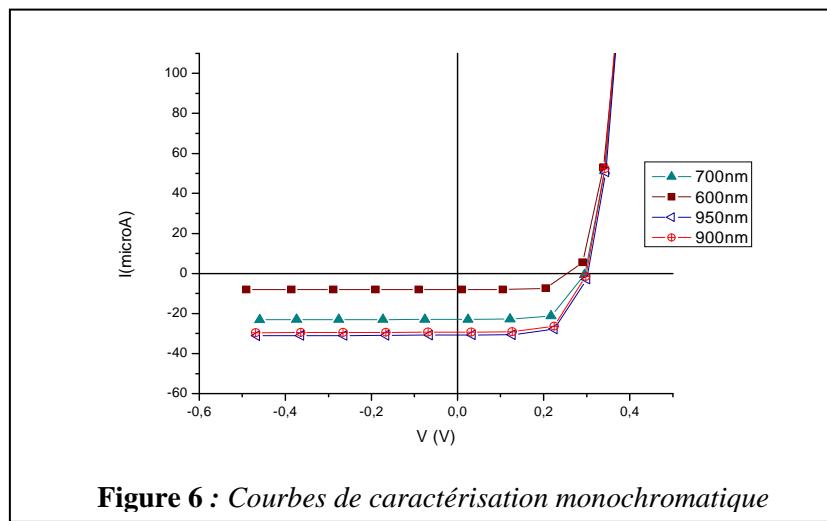


Figure 6 : Courbes de caractérisation monochromatique

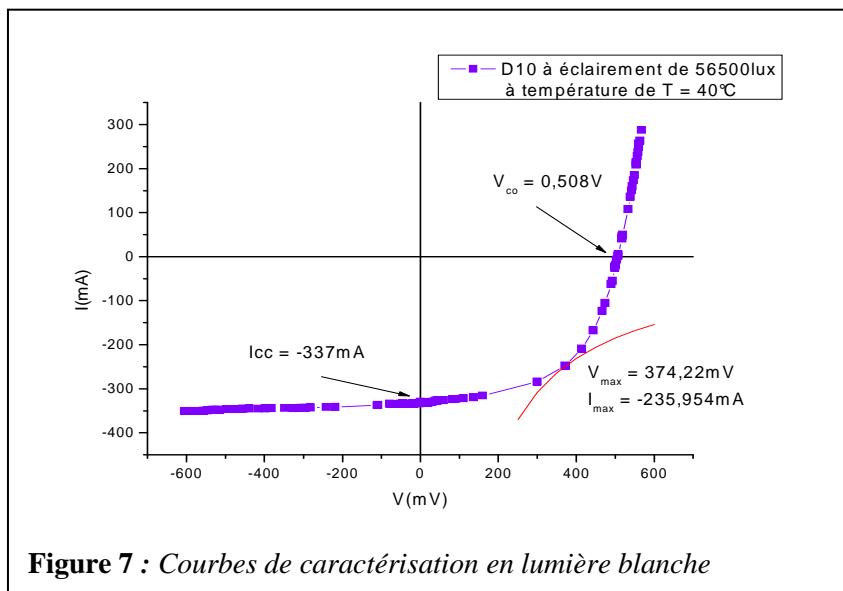


Figure 7 : Courbes de caractérisation en lumière blanche

III – RÉSULTATS

Les courbes de réponse spectrale obtenues pour des tensions appliquées constantes et des longueurs d'onde variables sur une cellule (**Figure 5 et Figure 5.bis**) donnent les composantes lumineuses qui excitent la cellule avec de meilleures réponses.

Pour les courbes de caractérisation I (V) (**Figure 6 et 7**); on distingue suivant la longueur d'onde trois zones principales [4, 5, 9] :

Zone 1 : caractérisée par $U > 0$ et $I > 0$: Polarisation directe, la photodiode fonctionne comme un récepteur.

Zone 2 : caractérisée par $U > 0$ et $I < 0$: Cette zone est la plus intéressante où la photodiode se comporte comme un générateur.

Zone 3 : caractérisée par $U < 0$ et $I < 0$: Polarisation inverse. Le courant inverse est dû aux photo-porteurs générés par le rayonnement. Ce courant est très faible en inverse à l'obscurité en absence de rayonnement [7].

Les paramètres caractéristiques [5, 13, 15], des cellules photoélectriques ou photogénérateurs découlent essentiellement de leur comportement de générateur lorsqu'elles sont éclairées par une source de lumière (Zone 2).

La plupart de ces paramètres sont obtenus expérimentalement grâce à l'analyse de la courbe de réponse $I = f(V)$. C'est le cas de nos résultats expérimentaux présentés sur les figures (**Figure 9.a**, **Figure 9.b** ; **Figure 9.c** et **Figure 9.d**) et qui permettent d'accéder aux paramètres comme :

- **la puissance crête P_c ou puissance maximale P_m** : l'utilisation optimale d'un photo-générateur consiste à le faire fonctionner sous une charge à sa tension maximale et à un courant maximal ce qui correspond à une puissance maximale P_m , elle est fonction de l'éclairement et de la nature du photo-générateur. Sous les conditions normalisées d'ensoleillement STC ($1000W/m^2$, $25^\circ C$, spectre solaire AM 1,5, **Figure.3**), cette puissance prend le nom de puissance crête ou watts crête (W_c).
- **la tension en circuit ouvert V_{co}** : tension mesurable directement quand le photo-générateur n'a aucune charge placée à ses bornes. C'est une valeur constante pour une cellule élémentaire et variant avec la technologie et l'éclairement.
- **le courant de court-circuit I_{cc}** : c'est le courant mesuré aux bornes du photo-générateur en branchant directement un ampèremètre. On dit dans ce cas qu'on place le générateur en court-circuit et le courant débité est alors maximal mais sans aucune tension.
- **la résistance shunt R_{sh}** : c'est une résistance imaginaire intrinsèque qui prend en compte les pertes inévitables de courant entre les bornes opposées positives et négatives d'une photopile, et qui est déductible des lois d'électricité dans le circuit équivalent.
- **la résistance série R_s** : c'est une résistance qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches et des contacts), elle est déductible également des lois d'électricités dans le circuit équivalent.
- **le facteur de forme FF (en anglais fill factor)** [4, 5, 9, 13, 15, 16,17] : Il est donné par la relation (4) :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{co} V_{co}} \quad (4) \quad \begin{cases} I_m = \text{Courant au point de puissance maximale} \\ V_m = \text{Tension au point de puissance maximale} \\ I_{co} = \text{Courant de court de court - circuit} \\ V_{co} = \text{Tension en circuit ouvert} \end{cases}$$

Il donne une idée sur la forme de la courbe caractéristique et donc de la réponse de la cellule. Plus ce facteur s'éloigne de 1 plus la cellule est moins idéale ; dans tous les cas ce facteur est inférieur à 1.

- **le rendement électrique ou énergétique η** : Il est donné par la relation (5) : C'est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photo-générateur ; ce rendement est variable suivant les matériaux semi-conducteurs utilisés et suivant les conditions d'éclairement.

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \quad (5) \quad \begin{cases} P_m = \text{Puissance au point de puissance maximale} \\ E = \text{Eclairement de la source lumineuse} \\ S = \text{Surface éclairée de la cellule} \\ P_c = \text{Puissance - crête} \end{cases}$$

Dans les conditions Standard de température et de pression STC [4,5], $P_m = P_c$ et $E = 1000 \text{ W/m}^2$, cette relation devient (6) :

$$\eta = \frac{P_c}{1000.S} \quad (6)$$

Les résultats expérimentaux obtenus pour deux cellules (la cellule de référence du commerce et la cellule échantillon D10) sont présentés dans les tableaux de mesure **Tableau 1** et **Tableau 2** :

- Pour la cellule de référence nous trouvons les valeurs caractéristiques du **Tableau 1** d'après les courbes de mesure des **Figures 8.a et 8.b** :

Ce résultat montre bien que le facteur de forme est très faible et donc la cellule de référence du commerce est loin d'être un générateur de courant idéal de plus son rendement énergétique est très faible confirmant la très faible valeur des porteurs de charge produits avec la source d'éclairement utilisée; la valeur du spectre solaire AM 1,5 étant de 100000 Lux soit 100 W/m^2 .

La résistance shunt est bien élevée par rapport à la résistance série conformément aux valeurs théoriques d'un générateur de courant. Ici la cellule de référence est une cellule élémentaire (diode) de 1 cm^2 sans liaison avec d'autres ce qui explique la faiblesse de ces valeurs.

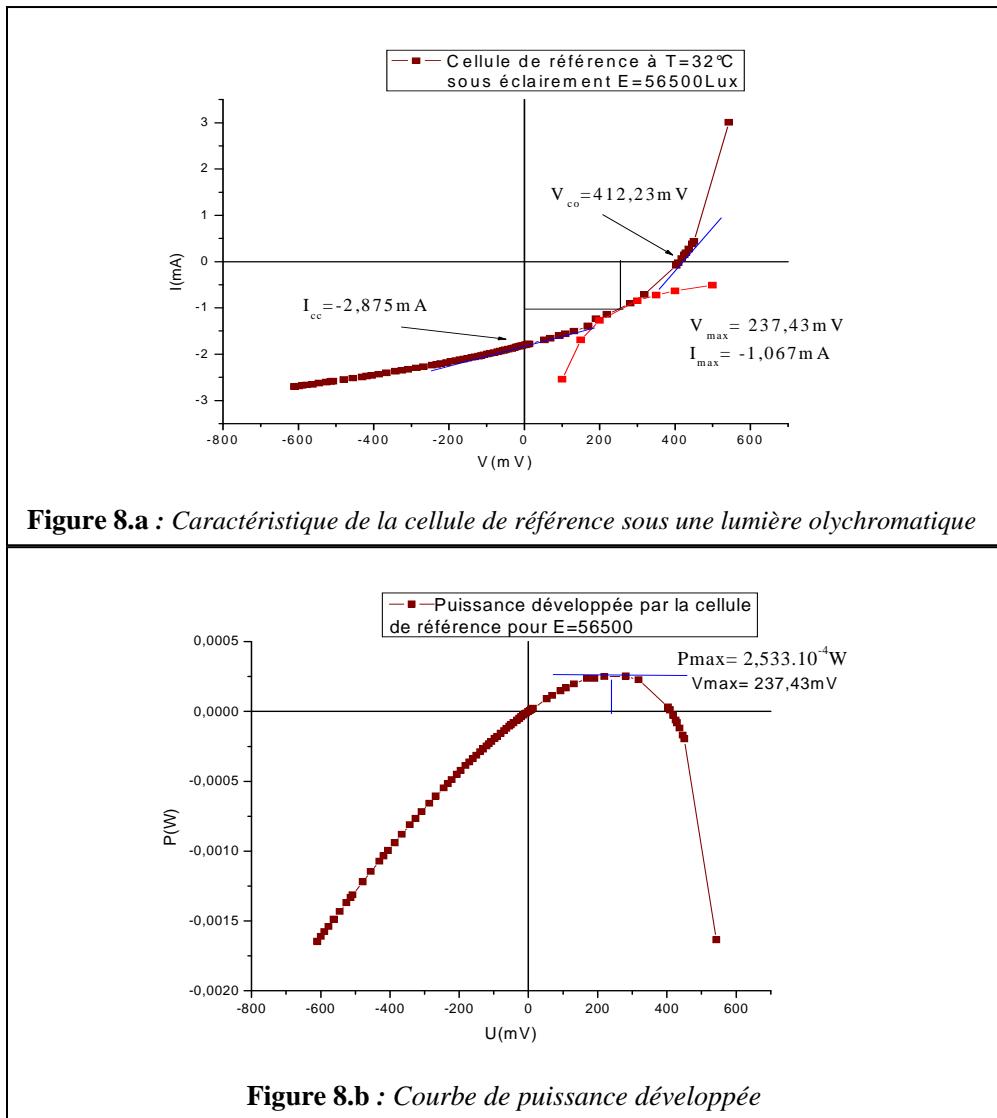


Tableau 1 : Valeurs de mesure pour une cellule au silicium élémentaire de Surface $S = 1 \text{ cm}^2$ sous éclairement $E = 56500 \text{ Lux} = 565 \text{ W/m}^2$

Paramètres caractéristiques de la cellule de référence	Valeurs expérimentales de la cellule de référence
V_{co}	412,2 mV
I_{cc}	2,87 mA
R_s	0,67 Ω
R_{sh}	2,93 Ω
P_{max}	0,253 mW
FF	0,213
η	0,45%

- Pour la cellule échantillon D10 nous trouvons les valeurs caractéristiques du **Tableau 2** d'après les courbes de mesure des **figures 8.c et 8.d**

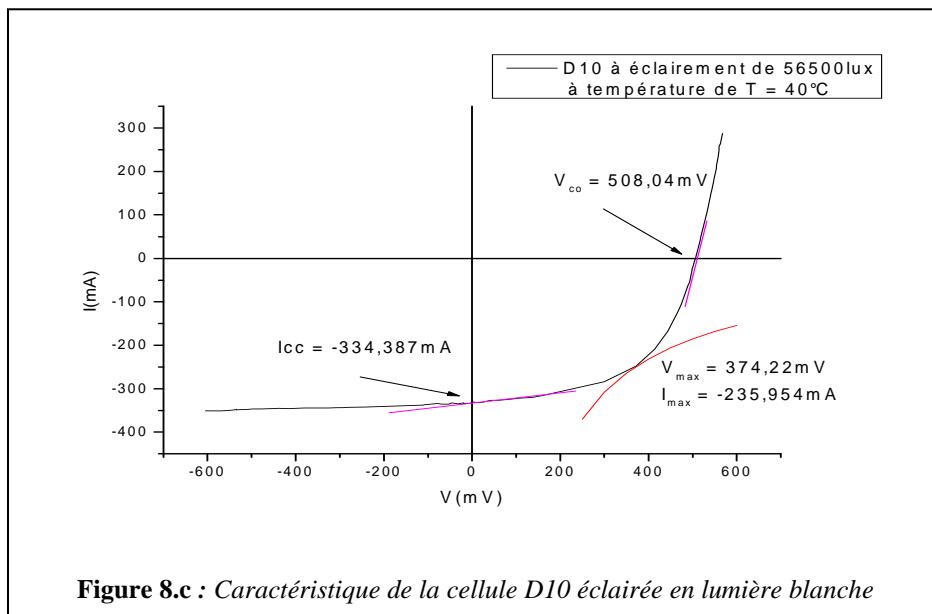


Figure 8.c : Caractéristique de la cellule D10 éclairée en lumière blanche

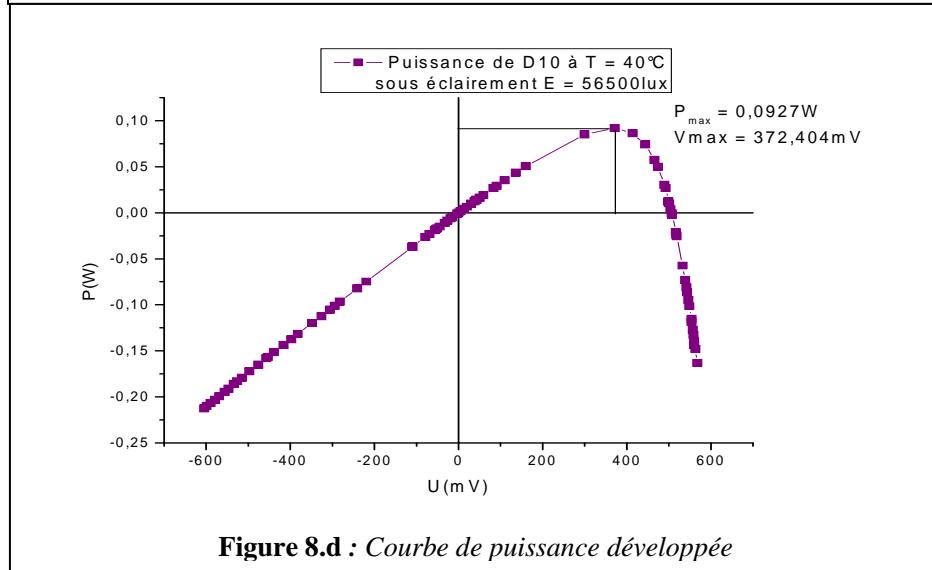


Figure 8.d : Courbe de puissance développée

Ce **Tableau 2** de résultats montrent que la cellule D10 de surface plus grande ($25,2 \text{ cm}^2$) a un comportement de générateur un peu proche du générateur de courant idéal avec un facteur de forme supérieur à 50% et le rendement électrique traduit un nombre élevé de porteurs de courant libérés grâce à la source d'éclairement utilisée dans les même conditions de laboratoire que

précédemment (56500 Lux). Les résistances shunt et série sont à peu près dans les mêmes ordres de grandeur (résistance shunt élevée par rapport à la résistance série)

Tableau 2 : Valeurs de mesure pour une cellule échantillon D10 au silicium de surface $S = 25,2 \text{ cm}^2$, sous éclairement $E = 56500 \text{ Lux} = 565 \text{ W/m}^2$

Paramètres caractéristiques	Valeurs expérimentales de l'échantillon D10
V_{co}	508,04 mV
I_{cc}	334,387 mA
R_s	0,19Ω
R_{sh}	6,53 Ω
P_{max}	91,6 mW
FF	0,54
η	6,4%

IV – DISCUSSION

Pour mieux apprécier ces résultats, un tableau comparatif des grandeurs paramétriques caractéristiques (**Tableau 3**) permet de faire les analyses suivantes :

Tableau 3 : Comparaison des valeurs de mesure avec les valeurs de références

Paramètres caractéristiques	Valeurs expérimentales de la cellule de référence (Diode de type PN de 1cm^2)	Valeurs expérimentales de l'échantillon D10 (Cellule de type PN de $25,2\text{cm}^2$)	Valeurs de référence Pour une cellule au silicium monocristallin
V_{co}	412,2 mV	508,04 mV	500 à 750 mV
I_{cc}	2,87 mA	334,387 mA	0,35A/W
R_s	$0,67 \Omega/\text{cm}^2$	$0,19\Omega/\text{cm}^2$	1 à $3 \Omega/\text{cm}^2$
R_{sh}	$2,93 \Omega/\text{cm}^2$	$6,53 \Omega/\text{cm}^2$	1000 à 10 000 Ω/cm^2
P_{max}	0,253 mW	91,6 mW	
FF	0,213	0,54	1
η	0,45%	6,4%	11 à 15%

Le rendement de la cellule échantillon D10 bien que meilleur à celui de la cellule élémentaire de référence, reste encore faible par rapport aux valeurs théoriques standard de 11 à 15% pour les cellules de silicium de ce genre; ce qui nous permet de faire l'hypothèse que notre cellule D10 est un peu dégradée.

La valeur du facteur de forme est très faible par rapport à 1 c'est la preuve que la cellule est loin de l'idéal ou du moins n'est pas utilisée dans les conditions les plus idéales possibles. Mais en s'intéressant à la source de lumière utilisée, la décomposition spectrale montre bien les composantes d'une source de lumière blanche non loin d'un spectre solaire normalisé dans la gamme de rayonnements

efficaces pour une cellule au silicium d'après la figure 3 se situant entre 300 et 1100 nm. Ces résultats nous permettent de retenir notre hypothèse.

La faiblesse des valeurs de résistance série et shunt bien que dans les proportions raisonnables confirment également cette hypothèse.

Les deux systèmes de caractérisation sont donc complémentaires et les mêmes paramètres de caractérisation peuvent être déterminés pour une couleur ou une radiation bien déterminée.

Les valeurs des paramètres de caractérisation d'une cellule donnée, permettront de prévoir le comportement du panneau solaire. Ces valeurs sont comparées à celles fournies par le fabriquant de cellule et des panneaux afin de confirmer ou d'infirmer leurs caractéristiques opérationnelles.

Elles permettent également de vérifier les modèles de cellules photoélectriques notamment les modèles à 4 ou 5 paramètres [7, 8, 10].

V - CONCLUSION

Les résultats obtenus avec nos bancs de caractérisation sont concluants, et permettent de retenir les informations suivantes :

- Les bancs de caractérisations sont fonctionnels : nous avons pu déterminé les caractéristiques spectrales de différentes cellules avec différentes radiations ; ce qui nous a permis de déterminer les bandes des radiations excitatrices et d'isoler les radiations qui donnent les meilleures réponses de même que les courbes de caractérisation I (V) dont l'exploitation permet de déterminer les paramètres caractéristiques fondamentaux.
- L'utilisation des bancs de caractérisation facilite l'acquisition des mesures de réponse des cellules photovoltaïques,
- La source lumineuse utilisée a un spectre proche de la zone efficace du spectre solaire : ce qui confirme que notre expérience se fait avec des rayonnements situés dans la zone de bonne réponse donnée par le spectre solaire A.M. 1,5 ; ($300 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm}$). L'environnement du laboratoire n'influence pas les prévisions solaires.
- Les courbes typiques de caractérisation obtenues permettent de déterminer les principaux paramètres fonctionnels des cellules photovoltaïques : les différents paramètres de caractérisation des cellules photoélectriques ont été déterminés avec des radiations polychromatiques d'une source lumineuse ayant des composantes situées dans la zone efficace du spectre solaire.
- Ces bancs de caractérisation peuvent donc être utilisés tant dans les environnements dépourvus de soleil que sous les radiations solaires afin de déterminer les paramètres caractéristiques des matériaux photovoltaïques.

La maîtrise de ces paramètres permettra de déterminer la qualité des cellules photovoltaïques et donc des panneaux solaires correspondants.

RÉFÉRENCES

- [1] - RENEWABLE ENERGY WORLD
 - a- July-Aug 2002, vol 2 N° 4 (2002)147-160
 - b- July-Aug 2003, vol 6 N°4, (2003)86-100
- [2] - http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/serre/textes/se_kyoto.htm
- [3] - Jacques PERCEBOIS. L'énergie solaire -perspectives économiques-, éditions du centre national de la recherche scientifique, (1975).
- [4] - A. Labouret P. Cumunel, J-P Braum, B. Farragi. Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque. 3è d'ETSF, (2001)22-39
- [5] - Alain RICAUD. Photopiles solaires ; Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), Collection « Cahiers de Chimie », (1997) (De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés).
- [6] - Durisch W, Tille D, Worz A, Plapp W. Characterisation of photovoltaic generators. *Applied Energy*, 65 (2000) 273-84.
- [7] - De Soto W,Klein SA, Beckman W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Solar Energy*, 80 (2006) 78–88.
- [8] - Karatepe E, Boztepe M, Colak M. Neural network based solar-cell model. *Energy Convers Manage*, 47 (2006) 59–78.
- [9] - A. Labouret & M. Villoz. Énergie solaire photovoltaïque, Dunod, Paris, (2003) 48 – 51
- [10] - Ali Naci Celik, Nasir Acikgoz. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models *Applied Energy* 84(2007) 1–15
- [11] - Stutenbaeumer U, Mesfin B. Equivalent model of monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon solar-cells. *Renew Energy*, vol.18 (1999) 501–12.
- [12] - Kuo YC, Liang TJ, Chen JF. Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system. *IEEE Trans Indust Electron*, 48 (2001) 594-601.
- [13] - GREEN, MARTIN A. ENGLEWOOD Cliffs – Solar cells. Operating Principles, Technology and System Applications; N.J. ; Sydney : Prentice Hall, (la bible anglosaxonne des physiciens du solaire).(1992)
- [14] - Meyer EL, van Dyk EE. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature. *Renew Energy*, 21 (2000) 37-47.
- [15] - Jean-Paul BRAUN, Pascal CUMUNEL, Benjamin FARRAGGI, Anne LABOURET, Les cellules solaires,Collection ETSF, édition DUNOD, (2001).
- [16] - Bernard EQUER, Energie solaire photovoltaïque, collection Ellipse, Edition EYROLLES, Tome 2 (sept-1993)
- [17] - H. MATHIEU, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques. Edition Masson, (2001)-5^e édition.