



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Présenté par

Idriss HADJ MAHAMMED

Pour l'obtention du titre de

MAGISTER EN ELECTRONIQUE

Option: Electricité Solaire

Thème

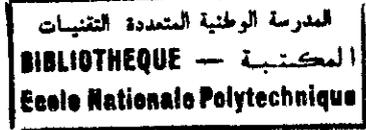
Modélisation du Générateur Photovoltaïque

Soutenu, devant le jury composé de :

Dr M. HADDADI	Maître de Conférences (ENP)	Président
Dr A. HADJ ARAB	Maître de Recherche (CDER)	Rapporteur
Mr. C. LARBES	PhD, Chargé de Cours (ENP)	Co-Rapporteur
Dr M. BELHAMEL	Directeur de Recherche (CDER)	Examineur
Dr M. BENGHANEM	Maître de Conférences (USTHB)	Examineur
Mr. M.S. AIT CHIKH	Chargé de Cours (ENP)	Examineur
Dr E. BERKOUK	Maître de Conférences (ENP)	Invité

Décembre 2002

AVANT PROPOS



Ce Travail à été effectué au Centre de Développement des Energies Renouvelables sous la direction scientifique du Dr A. Hadj ARAB, Maître de Recherche au CDER de Bouzareah et de Mr C. LARBES, PhD et Chargé de Cours, à l'E.N.P. Je tiens à leurs exprimer mes plus vifs remerciements, et surtout ma profonde et respectueuse reconnaissance pour l'intérêt et la bienveillance avec lesquels ils ont dirigé mes recherches.

Je remercie Dr M. BELHAMEL, Directeur de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables de m'avoir offert la possibilité d'effectuer des études de Post-Graduation et pour son soutien moral, ainsi que pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également au Dr M. HADDADI, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également au Dr M. BENGHANEM, Maître de Conférences à l'U.S.T.H.B, à Mr. M.S. AIT CHIKH, Chargé de Cours à l'ENP, pour avoir accepté de faire partie du jury d'examen de ce travail.

Je remercie Dr E. BERKOUK, Maître de Conférences à l'ENP, pour avoir accepté d'être l'invité à la soutenance de ce mémoire.

Je tiens à remercier mon collègue Mr Y. BAKELLI, Chargé d'Etude au CDER pour son aide et son soutien moral.

Je remercie également toute ma Famille pour son soutien moral durant toute la durée de préparation du diplôme de Magister.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont apportés leur soutien et leurs encouragements, pour l'accomplissement de ce travail.

Nomenclature

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A,B,C	Paramètres du modèle d'Akbaba
AM	Air masse (masse d'air)
B_0	Constante solaire (1367 W/m^2)
$B(0)$	Eclairement direct sur plan horizontal (W/m^2)
$B_h(0)$	Irradiation horaire directe sur plan horizontal (Wh/m^2)
$D(0)$	Eclairement diffus sur plan horizontal (W/m^2)
$D_h(0)$	Irradiation horaire diffuse sur plan horizontal (Wh/m^2)
D_p	Constante de diffusion des trous (cm^2s^{-1})
D_n	Constante de diffusion des électrons (cm^2s^{-1})
E	Champ électrique (Vm^{-1})
E_c	Energie du point le plus bas de la bande de conduction (eV)
E_v	Energie du point le plus haut de la bande de valence (eV)
E_F	Niveau d'énergie de Fermi (eV)
E_g	Largeur de la bande interdite (eV)
ET	Correction de l'équation du temps
FF	Facteur de forme
G	Eclairement global sur le plan du générateur ou de la cellule (W/m^2)
$G(0)$	Eclairement global sur plan horizontal (W/m^2)
$G_h(0)$	irradiation horaire globale sur plan horizontal (Wh/m^2)
$G_{\text{ref}}(\hat{\alpha})$	Eclairement global sur plan incliné aux conditions de référence (W/m^2)
G_e	Eclairement extraterrestre sur plan normal (W/m^2)
G_0	Eclairement extraterrestre sur plan horizontal (W/m^2)
h	Constante de Planck (J_s)
h_s	Hauteur du soleil (Deg.)
I	Courant débité par la cellule ou par le générateur (A)
I_0	Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)
I_{01}	Courant de génération (A)
I_{02}	Courant de recombinaison (A)
I_D	Courant de la diode (A)
I_{d+}	Courant de diffusion des trous (A)
I_{d-}	Courant de diffusion des électrons (A)

I_g	Courant de génération thermique (A)
I_L, I_{L0}	Courant photogénéré par le générateur sous éclairage (A)
I_m	Courant maximal (A).
I_{SC}	Courant de court-circuit (A)
J_C	Densité de courant de conduction (A/m^2),
J_{Ct}	Densité de courant de conduction totale (A/m^2)
J_d	Densité du courant de diffusion (A/m^2)
$J_n(x)$	Densité du courant due aux électrons (A/m^2)
$J_p(x)$	Densité de courant due aux trous (A/m^2)
k	Constante de Boltzmann ($J/^\circ K$)
L_n	Longueur de diffusion des électrons ($\hat{i} m$)
L_p	Longueur de diffusion des trous ($\hat{i} m$)
L_{st}	Méridien standard pour le temps local (Deg.)
L_{loc}	Longitude (Deg.)
m, m_1, m_2	Facteurs d'idéalité.
m_e	Masse effective de l'électron (g)
m_t	Masse effective des trous (g)
n	Concentration des électrons (cm^{-3})
N_a	Concentration des atomes accepteurs (cm^{-3})
N_C, N_V	Densités effectives des états (cm^{-3})
N_d	Concentration des atomes donneurs (cm^{-3})
n_i	Concentration en électrons intrinsèque (cm^{-3})
N_j	Numéro du jour dans l'année ($1 \leq N \leq 365$)
n_{n0}	Concentration des électrons majoritaires à l'équilibre (cm^{-3})
n_{p0}	Concentration des électrons minoritaires à l'équilibre (cm^{-3})
N_p	Nombre de branches en parallèle
N_s	Nombre de cellules en série
p	Concentration des trous (cm^{-3})
P_i	Puissance incidente sur la surface de la cellule ou du générateur (W)
P_m	Puissance maximale débitée par la cellule ou par le générateur (W)
p_{n0}	Concentration des trous minoritaires à l'équilibre (cm^{-3})
p_{p0}	Concentration des trous majoritaires à l'équilibre (cm^{-3})
q	Charge de l'électron (C)
R	Rapport d'irradiation globale sur un plan incliné et celle sur un plan horizontal

R_b	Rapport d'irradiation directe sur un plan incliné et celle sur un plan horizontal
R_s, R_{s0}	Résistance série (Ω)
R_{sh}, R_{sh0}	Résistance shunt (Ω)
r_s	Résistance série corrigée (Ω)
S_j	Surface de la jonction PN (m^2)
S	Surface totale de la cellule (m^2)
T	Température de la cellule ($^{\circ}K$)
T_a	Température ambiante ($^{\circ}K$)
$T_{max}(j)$	Température maximale du jour j ($^{\circ}K$)
$T_{min}(j)$	Température minimale du jour j ($^{\circ}K$)
TSV	Temps soleil vrai (h)
$NOCT$	Température nominale de fonctionnement de la cellule ($^{\circ}C$)
V_j	Tension de polarisation de jonction (V)
V	Tension aux bornes de la cellule ou du générateur (V)
V_m	Tension maximale (V)
V_{oc}	Tension à circuit ouvert (V)
v_{oc}	Tension à circuit ouvert corrigée (V)
V_t	Tension thermique (V)
ω	Angle horaire (Deg.)
ΔQ	Variation d'éclairement relatif
ΔT	Variation de température ($^{\circ}K$)

Lettres Grecques

α_T	Coefficient de température pour le courant ($A/^\circ C$)
β	Inclinaison du générateur PV par rapport au plan horizontal (Deg.)
β_T	Coefficient de température pour la tension ($V/^\circ C$),
ω	Angle horaire (Deg.)
ω_s	Angle correspondant à l'heure du lever ou du coucher du soleil (Deg.)
ρ	L'albédo du sol
δ	Déclinaison solaire (Deg.)
φ	Longitude (Deg.)
Φ	Barrière de potentiel due au champ électrique E (V)
μ_n	Mobilité des électrons ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)
μ_p	Mobilités des trous ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)

بعد إعطاء لمحة وجيزة عن المبادئ الأساسية المتعلقة بالتحويل الكهروضوئي، نعرض مختلف أنماط التقليد الرياضي للمولد الكهروضوئي الموجودة في المراجع. لقد درست هذه التقليدات الرياضية في الشروط النظامية من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة (1000 واط/م²، 25°م). اعتمادا على معطيات تجريبية متحصل عليها في الخير، نقترح إثبات هذه التقليدات الرياضية في ظروف الإستعمال الحقيقية من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. نعرض طريقتان لتحويل منحى شدة التيار فرق الكمون (ش-ف) معطى في شروط معلومة من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة إلى شروط أخرى مقصودة. بعد دزاستنا للميل الأمثل للمولد الكهروضوئي لختلف المناطق، نستطيع تمييز ثلاثة حالات للميل : سنوي، صيفي، شتوي.

Résumé

Après une description succincte des principes de base liés à la conversion photovoltaïque, nous présentons les différents modèles du générateur photovoltaïque existants dans la littérature. Ces modèles sont étudiés dans des conditions standards d'éclairement et de température (1000 W/m², 25°C).

En se basant sur des données expérimentales obtenues au Laboratoire, nous proposons une validation de ces modèles dans les conditions réelles de fonctionnement d'éclairement et de température. Nous présentons deux méthodes de translation de la courbe courant-tension (I-V) donnée à des conditions déterminées d'éclairement et de température vers d'autres conditions distinctes désirées. On étudie l'inclinaison optimale du générateur photovoltaïque pour différents sites. Nous distinguons trois types d'inclinaison : Annuelle, estivale et hivernale.

Abstract

After a brief description of the basic principles related to photovoltaic (PV) conversion, we present different models of photovoltaic generator existing in literature. These models are studied in standard illumination and temperature conditions (1000 W/m², 25°C).

From experimental data obtained in the laboratory, we propose a validation of those models in real illumination and temperature working conditions. We present two methods of the translation of the curve current-voltage (I-V) given under determined conditions of illumination and temperature to other desired distinct conditions. We study the optimal inclination of the PV generator for different sites. We can distinguish three types of inclination : Yearly, summerly and winterly.

Mots clés :

Conversion photovoltaïque, Modélisation, Simulation, Modèles de la cellule solaire, Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque, Générateur photovoltaïque.

Introduction	1
Chapitre 1 – Théorie de la conversion photovoltaïque	
1.1 Introduction	3
1.2 Rappels sur les semiconducteurs	3
1.3 Semiconducteur Intrinsèque	3
1.3.1 Modèle des bandes d'énergies	4
1.3.2 Densité des porteurs libres	4
1.3.3 Niveau de Fermi intrinsèque	7
1.4 Semiconducteur extrinsèque	8
1.4.1 Densité des porteurs libres	8
1.4.2 Position du niveau de Fermi extrinsèque	10
1.5 Courant électrique dans un semiconducteur	11
1.5.1 Conduction	11
1.5.2 Diffusion	11
1.6 Jonction PN	12
1.6.1 Caractéristique de la jonction	13
1.7 Cellule photovoltaïque	15
1.7.1 Effet photovoltaïque et la jonction PN	15
1.7.2 Rendement d'une cellule photovoltaïque	16
1.8 Générateur photovoltaïque	17
1.9 Conclusion	18
Chapitre 2 – Présentation des modèles du générateur photovoltaïque	
2.1 Introduction	19
2.2 Différents modèles	19
2.2.1 Modèle explicite	19
2.2.2 Modèle à deux paramètres	20
2.2.3 Modèle à cinq paramètres	23
2.2.4 Modèle d'Appelbaum	25
2.2.5 Modèle simplifié	26

2.2.6 Modèle d'Akbaba	27
2.2.7 Modèle à deux exponentielles	28
2.2.8 Modèle à quatre paramètres	30
2.3 Conclusion	31

Chapitre 3 – Modélisation du générateur Photovoltaïque

3.1 Introduction	32
3.2 Calcul d'erreur	32
3.2.1 Calcul de la racine carré de l'erreur quadratique moyenne	33
3.2.2 Calcul de l'erreur relative	33
3.3 Résultats et commentaires	33
3.3.1 Modèle explicite	34
3.3.2 Modèle à deux paramètres	36
3.3.3 Modèle à cinq paramètres	40
3.3.4 Modèle d'Appelbaum	42
3.3.5 Modèle simplifié	42
3.3.6 Modèle d'Akbaba	47
3.2.7 Modèle à deux exponentielles	49
3.2.8 Modèle à quatre paramètres	49
3.4 Corrections à d'autres conditions de température et d'éclairement	52
3.4.1 Méthode selon la norme CEI 891	52
3.4.2 Méthode simplifiée	53
3.4.3 Résultats et comparaison	54
3.5 Modèle de la température du générateur photovoltaïque	56
3.5.1 Modèle de la température ambiante	56
3.5.2 Modèle de la température de la cellule	57
3.6 Conclusion	59

Chapitre 4 – Optimisation de l'angle d'inclinaison du générateur Photovoltaïque

4.1 Introduction	60
4.2 Eclairement direct sur plan horizontal	61
4.3 Irradiation horaire directe sur plan horizontal	62

4.4 Eclairage diffus sur plan horizontal	63
4.5 Irradiation horaire diffuse sur plan horizontal	63
4.6 Irradiation horaire globale sur plan horizontal	63
4.7 Irradiation horaire globale sur plan incliné	63
4.8 Application	66
Conclusion générale	72
Bibliographie	74
Annexe A1 Détermination des paramètres du modèle à cinq paramètres	76
Annexe A2 Calcul des paramètres du modèle à deux exponentielles	81

Introduction

La grande partie de l'énergie consommée par l'homme provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...etc.) dont l'utilisation massive conduit à l'épuisement de ses réserves et suppose une menace réelle à l'environnement, qui se manifeste, principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

D'autre part, il y a inégalité extrême de la distribution de la consommation de l'énergie. Beaucoup de populations, spécialement dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement qui bénéficient d'un fort ensoleillement, sont confrontées à de grands problèmes pour satisfaire leurs besoins en énergie.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) de part ses caractéristiques de modularité qui permet de l'adapter à des besoins énergétiques divers, autonomie, fiabilité et viabilité sur le plan économique, permet d'apporter de réelles solutions telles que l'éclairage public et domestique, le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation, le balisage, ... etc.

Pour améliorer la connaissance de ces systèmes, plusieurs voies sont possibles. L'expérimentation en vraie grandeur peut apporter des réponses aux questions posées, mais cette solution est longue et coûteuse à mettre en œuvre, et ne permet pas de généraliser les résultats. L'autre voie fait appel à la modélisation et à des programmes de simulation sur ordinateur permettant de traiter un grand nombre de cas en un temps et avec un coût très réduit.

Pour la réalisation de ces programmes de simulation et d'optimisation des systèmes PV, il est indispensable de disposer de modèles mathématiques les plus précis possible des différentes parties qui constituent le système. La plupart des modèles du générateur PV existants sont validés dans des conditions standards d'éclairement et de température.

Le principal objectif de ce travail est de modéliser le générateur PV dans les conditions réelles de fonctionnement d'éclairement et de température.

Au préalable, une recherche et étude des différents modèles existants dans la littérature et les plus utilisés par les spécialistes du PV sont nécessaires.

Dans ce travail, nous allons valider et de comparer les performances de ces modèles pour différentes températures et différents éclairagements sur la base de données expérimentales obtenues au Laboratoire.

Nous proposons aussi de valider et de comparer deux méthodes de translation de la caractéristique courant-tension (I-V) donnée à des conditions déterminées d'éclairage et de température vers d'autres condition distinctes désirées, dans l'éventualité de palier à un manque de données.

Afin d'obtenir un outil de développement du générateur PV aussi complet que possible, il faut s'intéresser aussi au modèle de température du générateur PV et à l'optimisation de son orientation. Dans ce travail nous nous limiterons à un seul modèle d'estimation de la température et à l'inclinaison seulement concernent l'orientation. Ce travail est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons un rappel sur les principes de base liés à la conversion photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous présentons différents modèles du générateur photovoltaïque couramment utilisés dans la littérature. L'étude et simulation de ces différents modèles, ainsi que la confrontation des résultats théoriques et expérimentaux sont données au troisième chapitre. Enfin, l'optimisation de l'angle d'inclinaison du générateur photovoltaïque est effectuée au chapitre quatre.

Chapitre 1

Théorie de la Conversion Photovoltaïque

1.1 Introduction

Dans le but de modéliser le Générateur photovoltaïque (PV), il s'avère nécessaire d'introduire quelques notions de base sur la théorie des semiconducteurs, éléments de base de la cellule PV.

1.2 Rappels sur les semiconducteurs

La conductivité électrique est due à la présence des électrons libres qui sont mis en mouvement par un champ électrique.

Les semiconducteurs ont une conductivité intermédiaire entre celle des métaux (excellents conducteurs) et celle des isolants (mauvais conducteurs).

Quand la lumière du soleil frappe un semiconducteur, les photons qui la constituent sont capables de transmettre leur énergie aux électrons de valence du semiconducteur pour rompre la liaison qui les maintient liés aux atomes respectifs. Pour chaque liaison rompue, on obtient un électron libre pour circuler dans le solide. Le manque de l'électron dans la liaison rompue s'appelle trou, peut aussi se déplacer à l'intérieur du solide. Les trous se comportent, sous différents aspects, comme des particules avec charge positive égale à celle de l'électron [1].

1.3 Semiconducteur Intrinsèque

Un semiconducteur intrinsèque est un semiconducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs.

1.3.1 modèle des bandes d'énergies

A chaque électron sur une orbite correspond un niveau d'énergie bien défini. Pour passer du niveau d'énergie E_1 à un autre niveau E_2 , il faut fournir une énergie égale à la différence des deux énergies ($E_2 - E_1$).

- Si les orbites d'excitation contiennent des électrons, l'atome est dans un état excité.
- Si les orbites d'excitation ne contiennent pas des électrons, l'atome est dans un état stable.

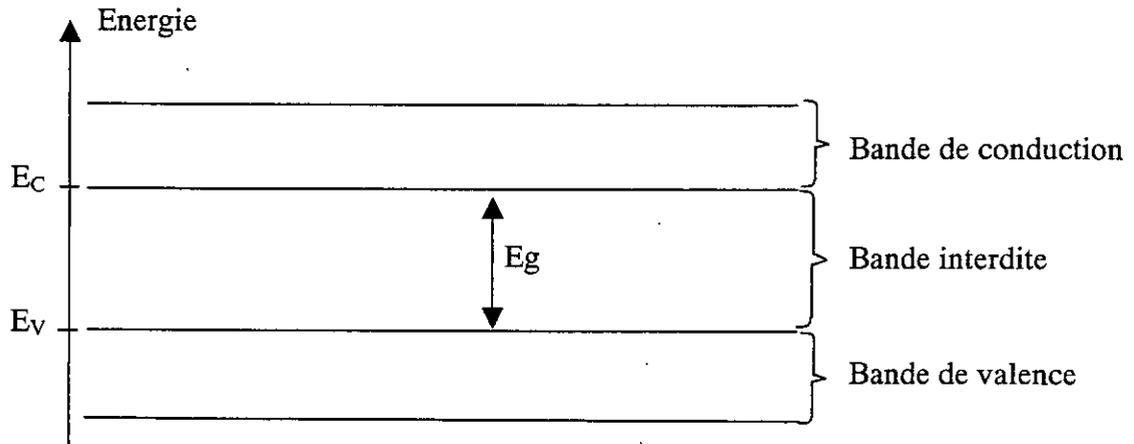


Figure 1.1 Diagramme de bandes d'énergies d'un semiconducteur intrinsèque

A 0° K la conductivité est nulle car tous les états de la bande de valence sont remplis et tous les états de conduction sont libres. La bande interdite est la différence d'énergie entre le point le plus bas de la bande de conduction (E_C) et le point le plus haut de la bande de valence (E_V). La largeur de la bande interdite (gap) est l'énergie d'ionisation (E_g).

1.3.2 Densité des porteurs libres

Afin d'évaluer le nombre de porteurs à l'équilibre thermodynamique il faut connaître deux paramètres [2] :

- Le nombre d'états possibles $N(E)$ entre les niveaux d'énergie E et $E+dE$ de la bande.
- La probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E , donnée par la statistique de Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{KT}\right)} \quad (1.1)$$

avec :

K : Constante de Boltzmann ($1,3810^{-23}\text{J}/^\circ\text{K}$)

E_F : Niveau d'énergie de Fermi, pour lequel la probabilité d'occupation $f(E)$ est égale à 0,5

T : Température absolue du cristal ($^\circ\text{K}$)

La densité d'énergie des états permis $N(E)$:

$$N(E) = \alpha(E - E_C)^{1/2} \quad (1.2)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{8\Pi\sqrt{2} m_e^{3/2}}{h^3} \quad (1.3)$$

De même pour les trous :

$$N(E) = \alpha' (E_V - E)^{1/2} \quad (1.4)$$

Avec :

$$\alpha' = \frac{8\Pi\sqrt{2} m_t^{3/2}}{h^3} \quad (1.5)$$

Où :

m_e : Masse effective de l'électron (g)

m_t : Masse effective du trou (g)

h : Constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}\text{Js}$)

Dans la bande de conduction qui s'étend de la valeur E_C à l'infini, le nombre d'électrons (n) est donné par :

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N(E) f(E) dE \quad (1.6)$$

Si $E - E_F \gg KT$ (E_F est suffisamment éloigné de la bande de conduction), la fonction de Fermi $f(E)$ a une distribution de Boltzmann [3] :

$$f(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{KT}\right) \quad (1.7)$$

L'expression (1.6) devient :

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{8\Pi\sqrt{2}m_e^{3/2}}{h^3} (E - E_C)^{1/2} \exp\left(-\frac{E - E_F}{KT}\right) dE \quad (1.8)$$

Le résultat d'intégration donne :

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{KT}\right) \quad (1.9)$$

où la densité effective des états (N_C) est donnée par :

$$N_C = 2 \left(\frac{2\Pi m_e K}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \quad (1.10)$$

Dans la bande de valence, le nombre de trous (p) est donné par :

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} (1 - f(E)) N(E) dE \quad (1.11)$$

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{KT}\right) \quad (1.12)$$

où la densité effective des états N_v et donnée par :

$$N_v = 2 \left(\frac{2\Pi m_i K}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \quad (1.13)$$

Le produit des densités des porteurs s'écrit :

$$np = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (1.14)$$

avec :

$$E_g = E_C - E_V \quad (1.15)$$

L'avantage du produit $n.p$ est qu'il est constant à température donnée, de plus le niveau de Fermi n'intervient pas. Dans un matériau intrinsèque, chaque fois qu'un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, il apparaît un trou. Il en résulte qu'il existe autant de trous que d'électrons libres (n égale p). On note n_i ce nombre commun, l'indice i rappelant que le matériau est intrinsèque. D'où la relation :

$$np = n_i^2 \quad (1.16)$$

La relation (1.16) reste valable si le matériau possède des impuretés car leur effet est de déplacer le niveau de Fermi.

1.3.3 Niveau de Fermi intrinsèque

On obtient la position du niveau de Fermi en égalisant n et p . A partir de l'égalité des équations (1.9) et (1.12) on obtient :

$$E_F = \left(\frac{E_V + E_C}{2} \right) - \frac{K.T}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) \quad (1.17)$$

Comme le rapport N_C/N_V est proche de l'unité [5], le niveau de Fermi se situe presque au milieu de la bande interdite d'où :

$$E_F \approx \left(\frac{E_V + E_C}{2} \right) \tag{1.18}$$

1.4 Semiconducteur extrinsèque

Le semiconducteur est dit extrinsèque lorsqu'il n'est pas pur. En lui incorporant une quantité infime d'impuretés constituée par les atomes possédant un nombre d'électrons de valence différent (supérieur ou inférieur) de celui des atomes du cristal, les électrons vont circuler plus facilement puisque la probabilité de recombinaison est très faible. Le semiconducteur acquiert alors une conductibilité très élevée : on dit que le semiconducteur est dopé.

1.4.1 Densité des porteurs libres

A - Semiconducteur de type N

On confère le caractère N au Silicium par exemple en introduisant dans son réseau cristallin des atomes dits donneurs de la colonne V du tableau de Mendeleïev (phosphore, arsenic ou antimoine). Cela permet de rendre libre un des cinq électrons appartenant à la couche de valence, les quatre autres assurant les liaisons avec les quatre électrons de valence du Silicium (figure 1.2). A température ambiante, la presque totalité des atomes donneurs cèdent un électron, ils s'ionisent donc et prenant une charge positive égale à celle de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C). On désigne par N_d la concentration de ces atomes et par n_{n0} celle des électrons libres (dits porteurs majoritaires) et par p_{n0} celle des trous (dits porteurs minoritaires).

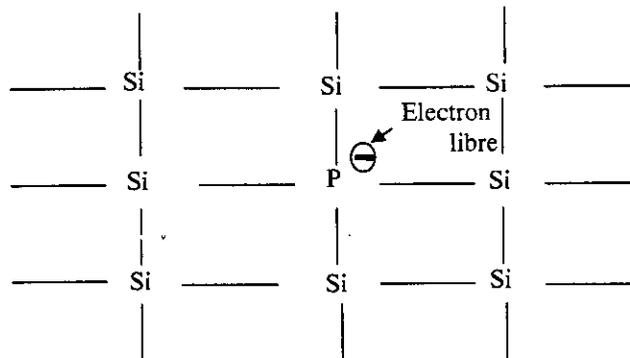


Figure 1.2 Exemple de dopage type N du silicium (Si) avec du phosphore (P)

La concentration en charges positives (ions fixes et trous) est la somme de la concentration des donneurs (N_d) et celle des trous (p_{n0})

La concentration en charges négatives (électrons), est n_{n0} .

La neutralité électrique s'écrit donc :

$$N_d + p_{n0} = n_{n0} \quad (1.19)$$

On a à la température ambiante : $p_{n0} \ll N_d$

donc :

$$n_{n0} \approx N_d \quad (1.20)$$

Comme pour le semiconducteur intrinsèque on a :

$$p_{n0} n_{n0} = n_i^2 \quad (1.21)$$

ce qui donne :

$$p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1.22)$$

B- Semiconducteur de type P

L'introduction d'atomes de la colonne III du tableau de Mendeleïev confère le type P au semiconducteur intrinsèque. Par exemple on dope le silicium avec du bore. Cet atome est dit accepteur et, comme sa bande de valence ne possède que trois électrons pour assurer ses liaisons avec le silicium, il s'ionise négativement en captant un électron qui provient de la bande de valence du silicium. La capture de cet électron va créer un trou positif dans la bande de valence.

Tout se passe comme si la conduction se faisait avec des charges positives. On a donc une conduction par trous.

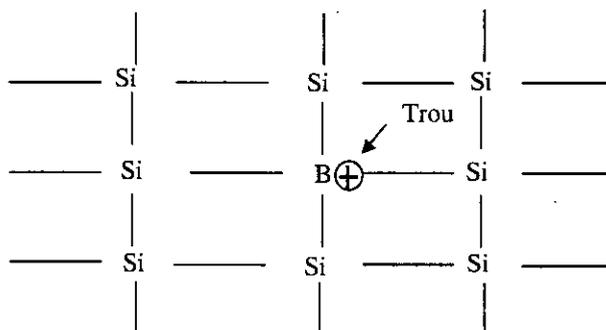


Figure 1.3 Exemple de dopage type P du silicium (Si) avec du bore (B)

En désignant par N_a la concentration de ces atomes et par p_{p0} celle des trous libres (dits porteurs majoritaires) et par n_{p0} celle des trous (dits porteurs minoritaires).

La concentration en charges négatives, (ions fixes et électrons), est la somme de la concentration des accepteurs (N_a) et celle des électrons (n_{p0}). La concentration en charges positives (trous), est p_{p0} .

La neutralité électrique s'écrit donc :

$$N_a + n_{p0} = p_{p0} \quad (1.23)$$

On a à la température ambiante : $n_{p0} \ll N_a$

d'où :

$$p_{p0} = N_a \quad (1.24)$$

Comme pour le semiconducteur intrinsèque on a :

$$p_{p0}n_{p0} = n_i^2 \quad (1.25)$$

ce qui donne :

$$n_{p0} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1.26)$$

1.4.2 Position du niveau de Fermi extrinsèque

Le niveau de Fermi pour un dopage N est calculé à l'aide des équations (1.9) et (1.20) ce qui donne :

$$E_F = E_C - kT \ln \left(\frac{N_C}{N_d} \right) \quad (1.27)$$

De même le niveau de Fermi pour un dopage P est calculé à l'aide des équations (1.12) et (1.24) on trouve :

$$E_F = E_V + kT \ln \left(\frac{N_V}{N_a} \right) \quad (1.28)$$

1.5 Courant électrique dans un semiconducteur

Les deux phénomènes qui entrent en jeu dans le courant électrique sont la conduction et la diffusion [6].

1.5.1 Conduction

Sous l'action d'un champ électrique \vec{E} les électrons et les trous peuvent se déplacer avec une vitesse V et l'expression de la densité de courant est donnée par :

$$\vec{J}_C = (ne\mu_n + pe\mu_p)\vec{E} \quad (1.29)$$

où la mobilité des électrons (\hat{i}_n) et des trous (\hat{i}_p) sont :

$$\mu_n = \frac{e}{kT}D_n \quad (1.30)$$

$$\mu_p = \frac{e}{kT}D_p \quad (1.31)$$

avec :

J_c : Courant de conduction total

E : Champ électrique

n : Concentration des électrons

p : Concentration des trous

e : Charge d'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

1.5.2 Diffusion

En présence d'un gradient de concentration les porteurs libres diffusent, donnant lieu à la densité de courant suivante :

$$J_d(x) = +eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (1.32)$$

avec :

J_d : Densité du courant de diffusion

D_p : Constante de diffusion des trous.

D_n : Constante de diffusion des électrons.

Le courant électrique total provient de la conduction et de la diffusion, des trous et des électrons, donc la densité du courant totale est :

$$J(x) = J_n(x) + J_p(x) \tag{1.33}$$

avec :

$$J_n(x) = e \left(n\mu_n E(x) + D_n \frac{dn}{dx} \right) \tag{1.34}$$

$$J_p(x) = e \left(n\mu_p E(x) - D_p \frac{dp}{dx} \right) \tag{1.35}$$

1.6 Jonction PN

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions de type différent d'un même monocristal de semiconducteur.

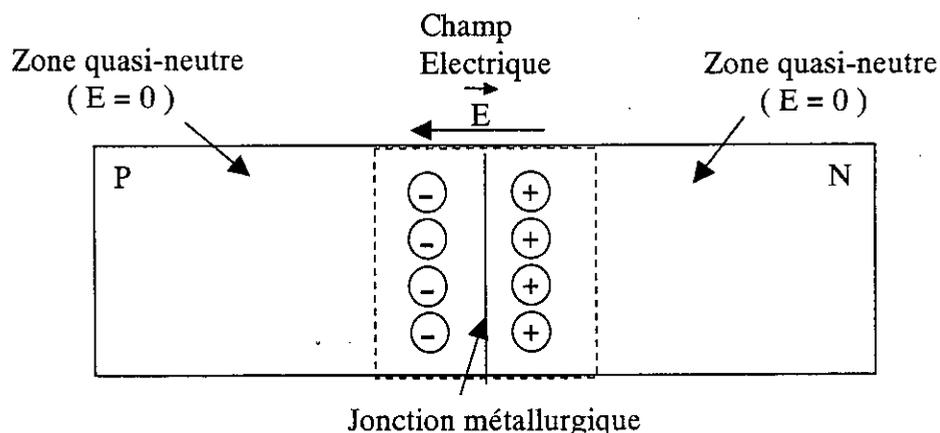


Figure 1.4 Schéma synoptique d'une Jonction PN

Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre.

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives.

Il apparaît ainsi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse.

Ce champ provoque une différence de potentiel \hat{O} entre la région P et la région N : on l'appelle barrière de potentiel dont l'expression est [5] :

$$\Phi = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (1.36)$$

1.6.1 Caractéristique de la jonction :

La caractéristique d'une jonction est la relation entre le courant I circulant de P vers N (sens direct) et la tension positive appliquée V . Le courant total s'écrit [6] :

$$I = I_{d+} + I_{d-} - I_s - I_g \quad (1.37)$$

avec :

I_{d+} : Courant de diffusion des trous

I_{d-} : Courant de diffusion des électrons

I_s : Courant de saturation

I_g : Courant de génération thermique

Nous supposons négligeable le courant de génération thermique des paires électrons-trous ($I_g=0$). On prendra par ailleurs une statistique de Boltzmann : seuls les porteurs de concentration proportionnelle à $\exp[-e(\hat{O}-V)/kt]$ ont une énergie suffisante pour franchir la barrière de potentiel $(\hat{O}-V)$ [6]:

pour le courant I_{D+}

$$p_0 = N_a \exp\left(-\frac{e(\Phi - V)}{kT}\right) \quad (1.38)$$

pour le courant I_D .

$$n_0 = N_d \exp\left(-\frac{e(\Phi - V)}{kT}\right) \quad (1.39)$$

avec :

Φ : Barrière de potentiel due au champ électrique \vec{E} .

V : Tension de polarisation.

L'expression du courant s'écrit :

$$I = eSp_0 \frac{D_p}{L_p} + eSn_0 \frac{D_n}{L_n} - I_S \quad (1.40)$$

avec :

L_n : Longueur de diffusion des électrons

L_p : Longueur de diffusion des trous

S : Section droite du composant

les relations (1.38), (1.39), (1.40) et (1.41) conduisent à :

$$I = eSn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - I_S \quad (1.41)$$

Pour $V=0$: le courant I est nul, ce qui nous donne une expression de I_S :

$$I_S = eSn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right) \quad (1.42)$$

on déduit la caractéristique I-V de la jonction PN :

$$I = I_S \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.44)$$

1.7 Cellule photovoltaïque

La conversion de l'énergie des radiations optiques en énergie électrique est un phénomène connu comme l'effet photovoltaïque. La cellule solaire est, sans doute, le dispositif le plus important pour la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.7.1 Effet photovoltaïque et la jonction PN

Une cellule photovoltaïque est principalement constituée par une jonction PN. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure (1.5) [3]. Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions 1, 2 et 3. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres p et n, les photoporteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion. Dans la région de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type N et le trou vers la région de type P. Ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photocourant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode.

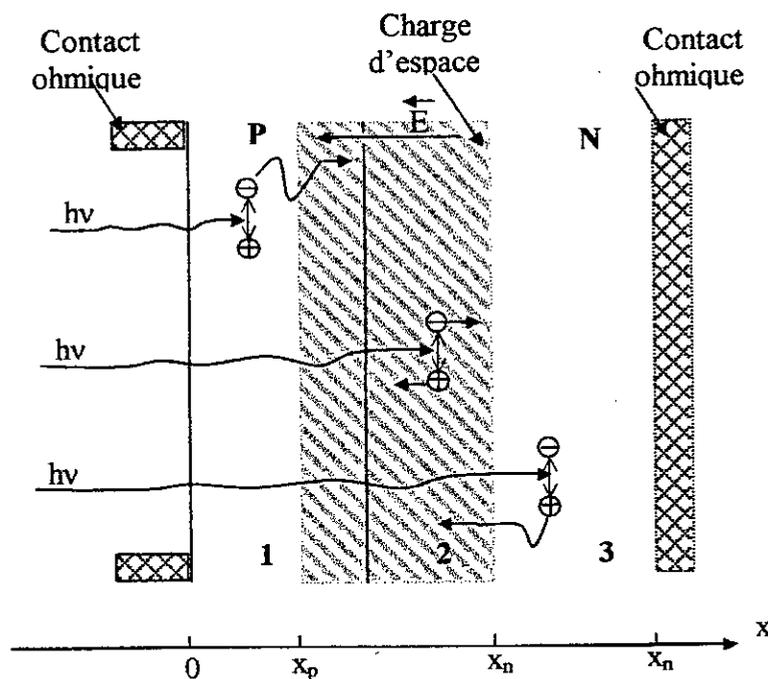


Figure 1.5 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

1.7.2 Le rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement de la cellule est donné par le rapport de la puissance maximum disponible sur la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{I_m V_m}{G S} \quad (1.45)$$

où :

P_m : Puissance maximale débitée par la cellule (Watt)

I_m : Courant maximal de la cellule (Ampère)

V_m : Tension maximale de la cellule (Volt)

P_i : Puissance incidente sur la surface de cellule (Watt)

G : Eclairement globale incident sur la cellule (W/m^2)

S : Surface totale de la cellule (m^2).

Les principaux facteurs qui limitent le rendement d'une cellule solaire [7] :

- Absorption incomplète des photons : seuls les photons d'énergie $h\nu$ supérieur à E_g sont absorbés.
- Excès d'énergie : l'énergie en excès ($h\nu - E_g$) des photons qui sont absorbés ne sert pas à générer les paires électrons-trous. Elle est perdue sous forme de chaleur.
- Réflexion à la surface : une partie seulement du flux incident est absorbée dans le matériau. L'autre partie, réfléchi par la surface, est généralement perdue. Cette perte qui dépend du semiconducteur peut être réduite par des traitements de surface pour forcer le rayonnement à pénétrer dans le semiconducteur [8]. Par exemple en déposant une couche d'anti-réflexion sur la cellule solaire, le rayonnement réfléchi par le matériau est réinjecté grâce à cette couche, ainsi les pertes sont réduites, comme est illustré par la figure (1.6) qui représente le trajet des rayons incidents. Une autre préparation de la surface du semiconducteur c'est la texturisation. Cette opération consiste en une attaque chimique de la surface du semiconducteur. Cette attaque est sélective en ce qui concerne les plans cristallographiques du matériau et conduit alors à la création de pyramides de quelques microns de hauteur (figure 1.7)

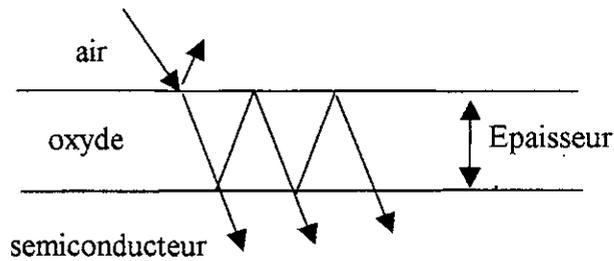


Figure 1.6 Effet de la couche antireflet

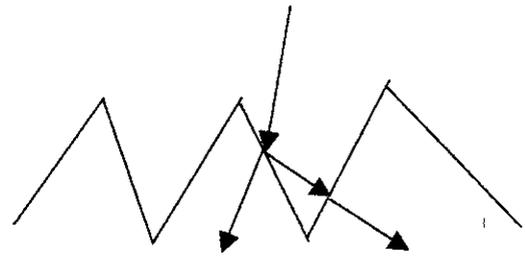


Figure 1.7 Effet de la texturisation

- Résistance série R_S : traduit le phénomène de résistance de contact (métallisation de la grille avant et la face arrière), de la couche de base et de la zone avant de la cellule solaire [2].
- Résistance parallèle ou shunt (R_{Sh}) : rend compte d'effets tels que le courant de fuite par les bords de la cellule [2].

1.8 Générateur photovoltaïque

La tension générée par une cellule étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec les charges à alimenter, il faudra associer en série plusieurs cellules. Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module.

L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux rôles principaux [9]:

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière, etc.).
- Contrôle de température des cellules qui va permettre une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie de l'énergie incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique.

Actuellement, la puissance d'un module est de quelques Watt-crêtes à quelques dizaines de Watt-crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle des modules formant ainsi le générateur photovoltaïque.

Comme nous avons indiqué, un générateur photovoltaïque est constitué de cellules associées entre elles électriquement. En général ces cellules ne sont pas identiques, donc pour la détermination de la caractéristique (I-V) de l'ensemble, (bien que l'hypothèse de

connaître la caractéristique de chaque cellule individuellement peut se convertir en un

problème de calcul très complexe) on considère que toutes les cellules, d'un même générateur, sont identiques et travaillent dans les mêmes conditions de température et d'éclairement.

Les chutes de tension dans les conducteurs qui assurent l'interconnexion des cellules sont négligeables.

En se basant sur ces suppositions, la caractéristique (I-V) d'un générateur est obtenue directement de celles de la cellule en considérant :

$$I_G = IN_p$$

$$V_G = VN_s$$

Où I_G et V_G sont le courant et la tension du générateur, N_p et N_s sont le nombre de cellules associées en parallèle et en série, respectivement.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre quelques notions de base sur la théorie des semiconducteur et de la cellule PV ont été introduits dans le but de la modélisation du générateur photovoltaïque; objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

Présentation des différents modèles du générateur photovoltaïque

2.1 Introduction

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles du générateur photovoltaïque, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension (I-V) pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principaux modèles du générateur photovoltaïque, existants dans la littérature.

2.2 Différents modèles

2.2.1 Modèle explicite

Ce modèle nécessite les données de quatre paramètres à savoir le courant de court-circuit (I_{SC}), la tension à circuit ouvert (V_{OC}), le courant maximal (I_m) et la tension maximale (V_m) [10]. La relation entre le courant I et la tension V est donnée par :

$$I = I_{SC} \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{V}{C_2 V_{OC}} \right) - 1 \right) \right] \quad (2.1)$$

avec.:

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right) \exp \left(\frac{-V_m}{C_2 V_{OC}} \right) \quad (2.2)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{OC}} - 1}{\text{Ln} \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right)} \quad (2.3)$$

Les constantes C_1 et C_2 sont évalués au début de l'itération, tandis que l'équation (2.1) est évaluée à chaque pas d'itération.

2.2 2 Modèle à deux paramètres

Ce modèle suppose que la résistance shunt est très grande. Le circuit équivalent est le suivant [11,12] :

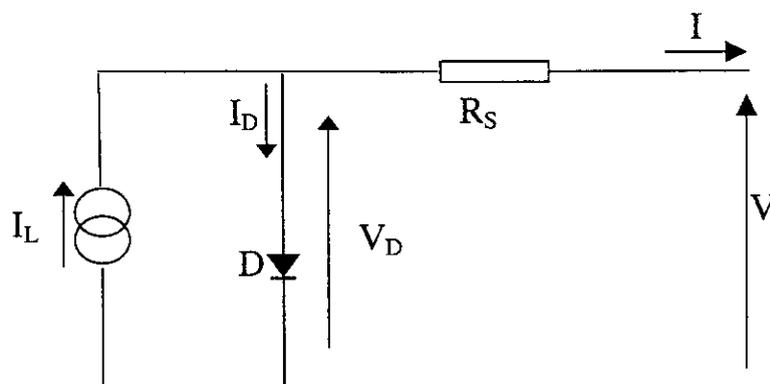


Figure 2.1: Circuit équivalent selon le modèle à deux paramètres

I et V sont respectivement le courant et la tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_L = I_D + I \quad (2.4)$$

Le courant de diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT} \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

On remplace l'expression de I_D dans (2.4):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

avec :

I_L : Courant photogénéré par le générateur sous éclairement (A)

I_0 : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)

R_S : Résistance série du générateur (Ω)

m : Facteur d'idéalité

k : Constante de Boltzmann ($1,3810^{-23}$ J/°K)

T : Température absolue (°K)

L'équation (2.6) est implicite avec plusieurs inconnues (I_L , I_0 , R_S , m).

Les deux paramètres de ce modèle sont le courant maximal (I_m) et la résistance série (R_S).

Il sont déterminés à partir du courant de court-circuit (I_{SC}), de la tension à circuit ouvert (V_{OC}) et de la puissance maximale (P_m).

Ce modèle se base sur les simplifications suivantes :

$$\exp \frac{qV}{mkT} \gg 1 ; \quad I_L = I_{SC}$$

$$\text{Si on pose. } \xi = \frac{mkT}{q}$$

L'expression de I-V devient :

$$I = I_{SC} \left[1 - \left(\frac{I_0}{I_{SC}} \right) \exp \left(\frac{(V + R_S I)}{\xi} \right) \right] \quad (2.7)$$

Comme ξ et R_S sont inconnues, deux conditions doivent être remplies pour résoudre cette équation.

a) pour $I = 0$: $V = V_{OC}$

b) la courbe $P = IV$ est tangente à la caractéristique $I-V$ au point de fonctionnement maximal.

- La condition (a) donne :

$$V_{OC} = V_{I=0} = \xi \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right) \quad (2.8)$$

Il a été montré que la valeur type du rapport I_{SC}/I_0 pour les cellules au silicium aux conditions standards (1000 W/m^2 ; 25°C) varie dans la gamme de $[10^{-8} - 10^{-10}]$. Cette variation n'affecte que légèrement la précision du modèle. Ainsi pour réduire le nombre de paramètres on pose $I_0/I_{SC}=10^{-9}$, l'équation devient alors :

$$I = I_{SC} \left[1 - 10^{-9} \exp \frac{20,7}{V_{OC}} (V + R_S I) \right] \quad (2.9)$$

et l'équation (2.9) donne :

$$V = V_{OC} \left[1 + \frac{1}{20,7} \ln\left(\frac{I_{SC} - I}{I_{SC}}\right) \right] - R_S I \quad (2.10)$$

- La condition (b) peut être exprimée par :

$$V \Big|_{I=I_m} = \frac{P_m}{I_m} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial I} \Big|_{I=I_m} = \frac{\partial}{\partial I} \left(\frac{P_m}{I} \right) \Big|_{I=I_m} = -\frac{P_m}{I_m^2} \quad (2.12)$$

Le courant I_m est inconnu. En remplaçant l'équation (2.11) dans (2.10) on trouve :

$$\frac{P_m}{I_m} = V_{OC} \left[1 + \frac{1}{20,7} \ln \left(\frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \right) \right] - R_S I_m \quad (2.13)$$

Si on dérive l'équation (2.10) selon l'équation (2.12) on trouve :

$$\frac{P_m}{I_m^2} = \frac{1}{20,7} \left(\frac{1}{I_{SC} - I_m} \right) + R_S \quad (2.14)$$

La combinaison de (2.13) et (2.14) conduit à :

$$I_m \left[1 + \frac{1}{20,7} \left(\frac{I_m}{I_{SC} - I_m} + \ln \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \right) \right] - \frac{2P_m}{V_{OC}} = 0 \quad (2.15)$$

A partir de l'équation (2.15) on tire le courant maximal (I_m) par une méthode numérique. La résistance série (R_S) est calculée en utilisant l'équation (2.14). Cette valeur est substituée dans l'équation (2.9) pour avoir la caractéristique I-V.

2.2.3 Modèle à cinq paramètres

Dans ce modèle l'effet de la résistance shunt (R_{Sh}) n'est pas négligeable, contrairement au modèle à deux paramètres [13]. Son circuit équivalent est donné par la figure 2.2.

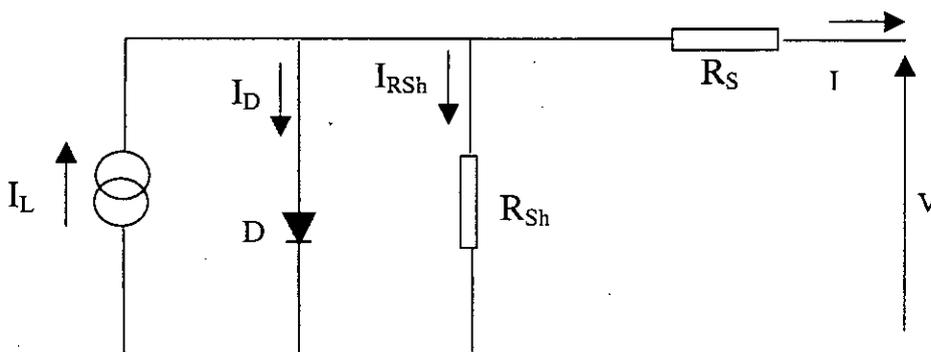


Figure 2.2: Circuit équivalent selon modèle analytique à cinq paramètres

Le courant qui passe dans la résistance R_{Sh} est donné par :

$$I_{Rsh} = \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (2.16)$$

Donc l'expression de la caractéristique I-V est :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (2.17)$$

Pour un éclairement et une température donnés, les cinq paramètres I_L , I_0 , R_S , R_{Sh} et m peuvent être déterminés à partir des données suivantes qui sont la tension à circuit ouvert (V_{OC}), le courant de court-circuit (I_{SC}), la tension et le courant au point de maximum de puissance (V_m et I_m) et les pentes au voisinage de V_{OC} et de I_{SC} (voir annexe A1).

En appelant :

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)_{V=V_{OC}} = -R_{S0} \quad (2.18)$$

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{SC}} = -R_{Sh0} \quad (2.19)$$

Les équations obtenues sont :

$$m = \frac{V_m + I_m R_{S0} - V_{OC}}{V_t \left[\ln\left(I_{SC} - \frac{V_m}{R_{Sh}} - I_m\right) - \ln\left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}}\right) + \left(\frac{I_m}{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh0}}}\right) \right]} \quad (2.20)$$

$$I_0 = \left(I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{Sh}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) \quad (2.21)$$

$$R_S = R_{S0} - \frac{mV_t}{I_0} \exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) \quad (2.22)$$

$$I_L = I_{SC} \left(1 + \frac{R_S}{R_{Sh}} \right) + I_0 \left(\exp \frac{I_{SC} R_S}{m V_t} - 1 \right) \quad (2.23)$$

$$R_{Sh} = R_{Sho} \quad (2.24)$$

2.2.4 Modèle d'Appelbaum

Ce modèle utilise la même équation (2.6), mais il propose d'exprimer la caractéristique I-V de manière explicite ($V=f(I)$) [14].

Cette expression est déduite du même circuit équivalent donnée par la figure 2.1 :

$$V = m V_t \ln \left(1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right) - R_S I \quad (2.25)$$

les trois paramètres inconnus qui sont I_L , I_0 , R_S . sont obtenus en faisant les suppositions suivantes :

- Le courant photogénéré, I_L , et le courant de court-circuit, I_{SC} sont égaux.
- La résistance R_S est obtenue en dérivant l'équation (2.30) à $V = V_{OC}$ on trouve :

$$R_S = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC}} - m V_t / I_{SC} \quad (2.26)$$

La condition de circuit ouvert donne :

$$I_0 = \frac{I_L}{\left(\exp \left(- \frac{V_{OC}}{m V_t} \right) - 1 \right)} \quad (2.27)$$

avec :

$$V_t = \frac{kT}{q}$$

m : Facteur d'idéalité ($m=1$)

k : Constante de Boltzmann

q : Charge d'électron

I_L : Courant photogénéré par le générateur sous éclairement

R_S : Résistance série

T : Température absolue

2.2.5 Modèle simplifié

Pour utiliser ce modèle simplifié, il convient de faire les hypothèses suivantes [1] :

- La résistance R_{Sh} est très grande : $V_{OC} / R_{Sh} \ll I_{SC}$
- Le courant photogénéré, I_L , et le courant de court-circuit, I_{SC} , sont égaux
- $\exp \frac{V + IR_S}{mV_t} \gg 1$
- $m = 1$
- Condition de circuit ouvert :

$$I_0 = I_{SC} \exp\left(-\frac{V_{OC}}{mV_t}\right) \quad (2.28)$$

Le schéma équivalent est le même que celui de la figure 2.1. On obtient :

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + IR_S}{mV_t}\right) \right] \quad (2.29)$$

avec:

$$FF_0 = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1} \quad (2.30)$$

$$FF = \frac{\ln Vm}{I_{SC} V_{OC}} = FF_0 (1 - r_S) \quad (2.31)$$

étant:

$$r_S = R_S \left(\frac{I_{SC}}{V_{OC}} \right) \quad \text{et} \quad v_{OC} = \frac{V_{OC}}{m \cdot V_t}$$

La valeur empirique 0,72 de l'équation (2.30) est valable uniquement pour des modules de silicium cristallin.

2.2.6 Modèle d'Akbaba

L'expression analytique de ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$I = \frac{V_{OC} - V}{A + BV^2 - CV} \quad (2.32)$$

A, B, et C sont des paramètres de ce modèle [15], ils sont déterminés de la manière suivante :

$$A = V_{OC}/I_{SC} \quad (2.33)$$

V_{OC} et I_{SC} représentent respectivement la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit. Les coefficients B et C sont obtenus par le choix des deux points, a et b, sur la caractéristique (I-V), Ces deux points sont définis par ses courants et ses tensions (I_a , I_b , V_a , V_b) tel que :

$$I_a = 0,94I_{SC} \quad (2.34)$$

$$I_b = 0,68I_{SC} \quad (2.35)$$

$$V_a = -I_a R_S + mV_t \ln \left(\frac{I_L - I_a + I_0}{I_0} \right) \quad (2.36)$$

$$V_b = -I_b R_S + mV_t \ln \left(\frac{I_L - I_b + I_0}{I_0} \right) \quad (2.37)$$

La substitution des tensions et des courants de ces deux points dans l'équation de base de ce modèle (2.32) permet d'obtenir les valeurs B et C.

$$B = (K_1 - K_2) / K_3 \quad (2.38)$$

$$C = (K_1 V_a - K_2 V_b) / K_3 \quad (2.39)$$

Avec :

$$K_1 = V_a I_a (V_{OC} - V_b - A I_a); \quad K_2 = V_b I_b (V_{OC} - V_a - A I_a); \quad K_3 = V_a V_b I_a I_b (V_b - V_a)$$

Avec :

I_L : Courant photogénéré

I_0 : Courant de saturation

V_t : Tension thermique

R_S : Résistance série du générateur

T : Température de la cellule

2.2.7 Modèle à deux exponentielles

L'expression analytique de ce modèle est déduite du schéma électrique de la figure 2.3 [16] :

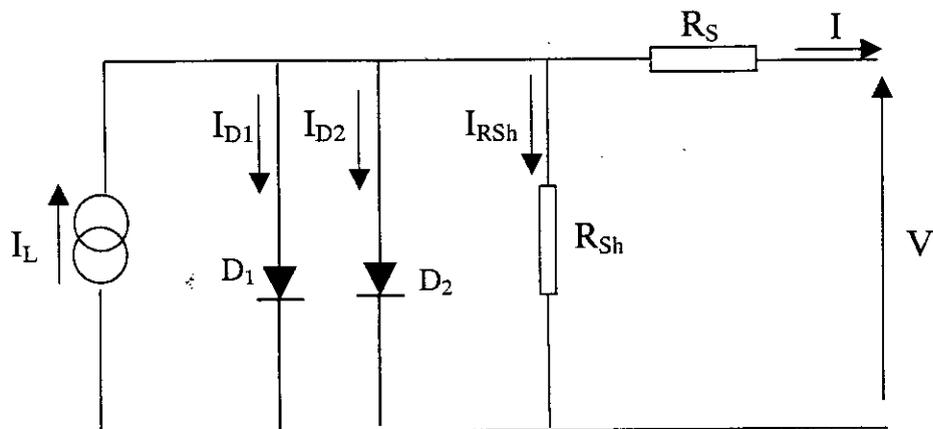


Fig 2.3: Circuit équivalent du modèle à deux exponentielles

$$I = I_L - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + IR_S}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{Sh}} \quad (2.40)$$

La détermination des différents paramètres du modèle (I_L , m , I_{01} , I_{02} , R_S , R_{Sh}) se fait en se basant sur les approximations suivantes :

- Le facteur d'idéalité m est supposé constant :

$$m = m_1 = m_2 = 2$$

- I_L est approximé à I_{SC} tel que :

$$I_L = I_{SC}$$

- Les deux courants de saturation sont déterminés par les équations:

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_L}{\left(\exp\left(\frac{eV_{OC}}{kT}\right) - 1 \right)} \quad (2.41)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_L}{\left(\exp\left(\frac{eV_{OC}}{2kT}\right) - 1 \right)} \quad (2.42)$$

- Le calcul de R_S est obtenu par la dérivation de l'équation (2.40) à $V=V_{OC}$:

$$R_S = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC}} + \frac{1}{\left(X_{1v} + X_{2v} + \frac{1}{R_{Sh}} \right)} \right] \quad (2.43)$$

tel que

$$X_{1v} = \frac{eI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{eV_{OC}}{kT}\right) \quad (2.44)$$

$$X_{2v} = \frac{eI_{02}}{mkT} \exp\left(\frac{eV_{OC}}{mkT}\right) \quad (2.45)$$

le terme $\frac{1}{R_{Sh}}$ est négligeable par rapport à $(X_{1v}+X_{2v})$ d'où l'expression finale :

$$R_S = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC}} + \frac{1}{(X_{1v} + X_{2v})} \right] \quad (2.46)$$

La résistance R_{Sh} est déterminée à partir de l'équation 2.43 pour $I=I_{SC}$; ce qui donne :

$$R_{Sh} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\left(\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_{SC}} + R_S \right)} + X_{1i} + X_{2i} \right)} \quad (2.47)$$

tel que

$$X_{1i} = \frac{I_{01}}{V_t} \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{V_t}\right) \quad (2.48)$$

$$X_{2i} = \frac{I_{02}}{mV_t} \exp\left(\frac{I_{SC} R_S}{mV_t}\right) \quad (2.49)$$

Une autre approche pour le calcul de R_{Sh} consiste à évaluer l'équation (2.40) au point de fonctionnement maximal et en utilisant la valeur de R_S (2.46); ce qui donne :

$$R_{Sh} = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_S}{I_{mpp} - I_{L0} + I_{01} \left[\exp\left(\frac{e(V_{mpp} + I_{mpp} R_S)}{kT}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp\left(\frac{e(V_{mpp} + I_{mpp} R_S)}{mkT}\right) - 1 \right]} \quad (2.50)$$

Une autre méthode de calcul de R_S et R_{Sh} est donnée en Annexe A2.

2.2.8 Modèle à quatre paramètres

Ce modèle ne tient pas compte de la résistance shunt, son circuit équivalent est donné par la figure 2.2. L'expression analytique de ce modèle est donnée par l'équation (2.6).

La différence avec ce modèle réside dans la détermination des quatre paramètres (I_L , I_0 , R_S , et V_t), [17] :

$$I_L = I_{SC} \quad (2.51)$$

$$I_0 = \frac{I_L}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1} \quad (2.52)$$

$$R_S = \frac{m \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_L}\right) - V_m + V_{OC}}{I_m} \quad (2.53)$$

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad (2.54)$$

Avec :

- I_L : Photocourant (A)
- I_{sc} : Courant de court circuit (A)
- V_{oc} : Tension à circuit ouvert (A)
- V_t : Tension thermique (V)
- R_S : Résistance série (Ω)
- I_m : Courant au point de puissance maximale (A)

2.3 -Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit différents modèles de la caractéristique courant–tension du générateur photovoltaïque. Il y a des modèles explicites et des modèles implicites. La majorité des modèles sont à une exponentielle, et diffèrent entre eux par le nombre de paramètres pris en compte et leur méthode de calculs.

Dans le chapitre qui suit, nous proposons de les comparer pour différentes conditions d'éclairement et de température.

Chapitre 3

Modélisation du générateur photovoltaïque

3.1 Introduction

Dans la recherche de modèles qui décrivent mieux le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement, nous proposons d'étudier et de comparer différents modèles couramment utilisés pour la simulation du générateur photovoltaïque.

Nous allons comparer les résultats de simulation avec les données expérimentales, pour chaque modèle en se basant sur le calcul d'erreur.

Pour chacun des modèles nous donnerons les résultats de simulation sous forme de tableaux et de graphes.

Afin de compléter notre étude nous validons deux méthodes de translation de la caractéristique I-V données à des conditions déterminées d'éclairement et de température vers d'autres conditions distinctes désirées.

3.2 Calcul d'erreur

Pour estimer la précision de chaque modèle sous différentes conditions de fonctionnement, nous proposons de calculer la racine carrée de l'erreur quadratique

moyenne de la caractéristique I-V, et l'erreur relative moyenne des paramètres caractérisant le générateur.

3.2.1 Calcul de la racine carré de l'erreur quadratique moyenne

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Square Error) est une mesure de la variation des valeurs prévues autour des valeurs mesurées [19]. Elle est définie par la relation :

$$RMSE = \left[\frac{\sum (I_{cal} - I_{exp})^2}{N} \right]^{0,5} \quad (3.1)$$

Où I_{cal} et I_{exp} sont les courants calculés et mesurés respectivement et N le nombre de points de mesure.

3.2.2 Calcul de l'erreur relative

L'erreur relative est calculée par la relation suivante:

$$E_x = \frac{X_{cal} - X_{exp}}{X_{exp}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

avec X représentant : I_{sc} , V_{oc} et P_m .

X_{exp} : La valeur expérimentale

X_{cal} : La valeur calculée

E_x est exprimée en %.

3.3 Résultats et commentaires

Le tableau 3.1 résume les caractéristiques électriques du module utilisé sous différentes conditions de fonctionnement de température et d'éclairement.

Eclairement (W/m ²)	1000	800	600	1000	800	600	400
Température (°C)	25	25	25	45	45	45	45
I _{sc} (A)	3,01	2,40	1,81	3,06	2,46	1,85	1,25
V _{oc} (V)	35,89	35,42	34,85	32,82	32,36	31,80	31,03
V _m (V)	29,15	29,19	29,22	26,09	26,29	26,19	25,68
P _m (W)	82,40	65,65	48,69	74,65	59,75	44,65	29,63

Tableau 3.1 Données caractéristiques du module utilisé (BP saturne)

Dans ce qui suit nous donnons sous forme de tableaux et de graphes, les résultats de simulation et le calcul d'erreur relative à chaque modèle.

3.3.1 Modèle explicite

Les caractéristiques obtenues pour ce modèle sont données par les figures 3.1.a et 3.1.b. On constate que la caractéristique calculée ajuste la caractéristique expérimentale avec des écarts faibles pour les différentes conditions de fonctionnement. L'erreur relative et la RMSE obtenue à partir de ce modèle sous différentes conditions de fonctionnement de température et d'éclairement sont données dans le Tableau 3.1.a et 3.1.b

On remarque que ce modèle ajuste bien la caractéristique expérimentale aux points de courant de court-circuit, de la tension à circuit ouvert et au point de puissance maximale; ceci est évident car ce modèle est basé sur ces trois points.

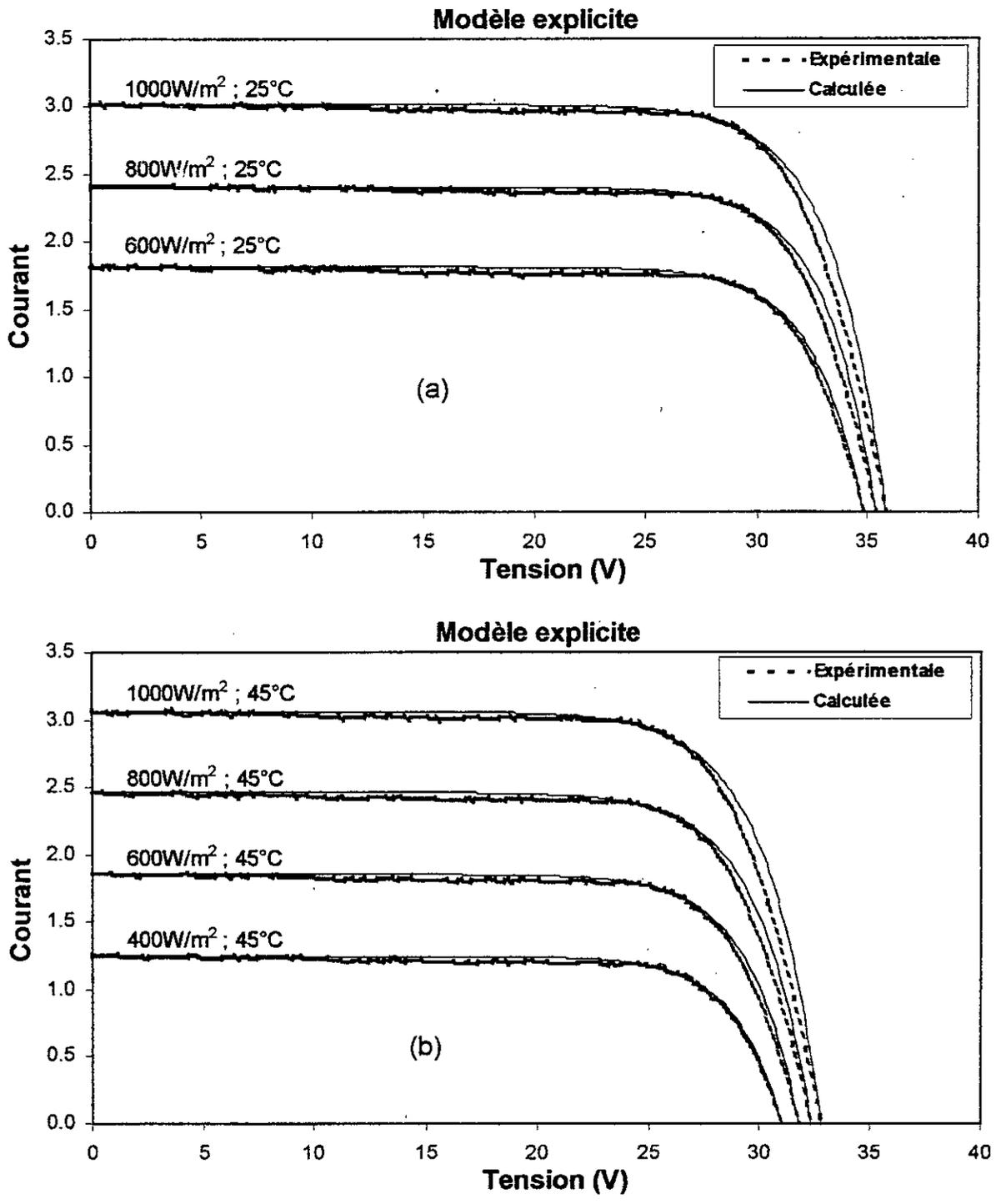


Figure 3.1 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle explicite pour différents éclaircements et températures (a) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (b) $T=45^{\circ}\text{C}$

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,08	0,05	0,03
E_{ISC} (%)	7E-6	-1E-5	-2E-5
E_{VOC} (%)	-0,001	-0,001	-0,002
E_{PM} (%)	0,25	0,10	0,07

Tableau 3.1.a- Résultats relatifs au modèle explicite à 25°C

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,08	0,06	0,04	0,02
E_{ISC} (%)	-7E-6	-1E-5	6E-6	-1E-5
E_{VOC} (%)	-0,002	-0,002	-2,8E-4	-0,001
E_{PM} (%)	0,18	0,06	0,03	-0,13

Tableau 3.1.b- Résultats relatifs au modèle explicite à 45°C

3.3.2 Modèle à deux paramètres

Les résultats obtenus par ce modèle sont donnés dans les tableaux 3.2 a et 3.2 b. On constate d'après ces résultats que ce modèle présente des écarts importants quand on s'éloigne des conditions standards de fonctionnement comme le montrent les caractéristiques I-V obtenues à partir de ce modèle (figures 3.2.a et 3.2.b). Par exemple dans le cas de $400W/m^2$, $45^{\circ}C$, l'erreur relative sur la puissance est de $-21,08\%$. Pour améliorer ce modèle, au lieu d'utiliser l'équation (2.19) qui détermine la résistance série R_s , on a utilisé l'équation (2.30) qui est celle du modèle à cinq paramètres. D'après les figures 3.2.c et 3.2.d, les allures des caractéristiques I-V sont améliorées. Ainsi l'erreur maximale obtenue est de $2,96\%$ (Voir tableaux 3.2.c et 3.2.d).

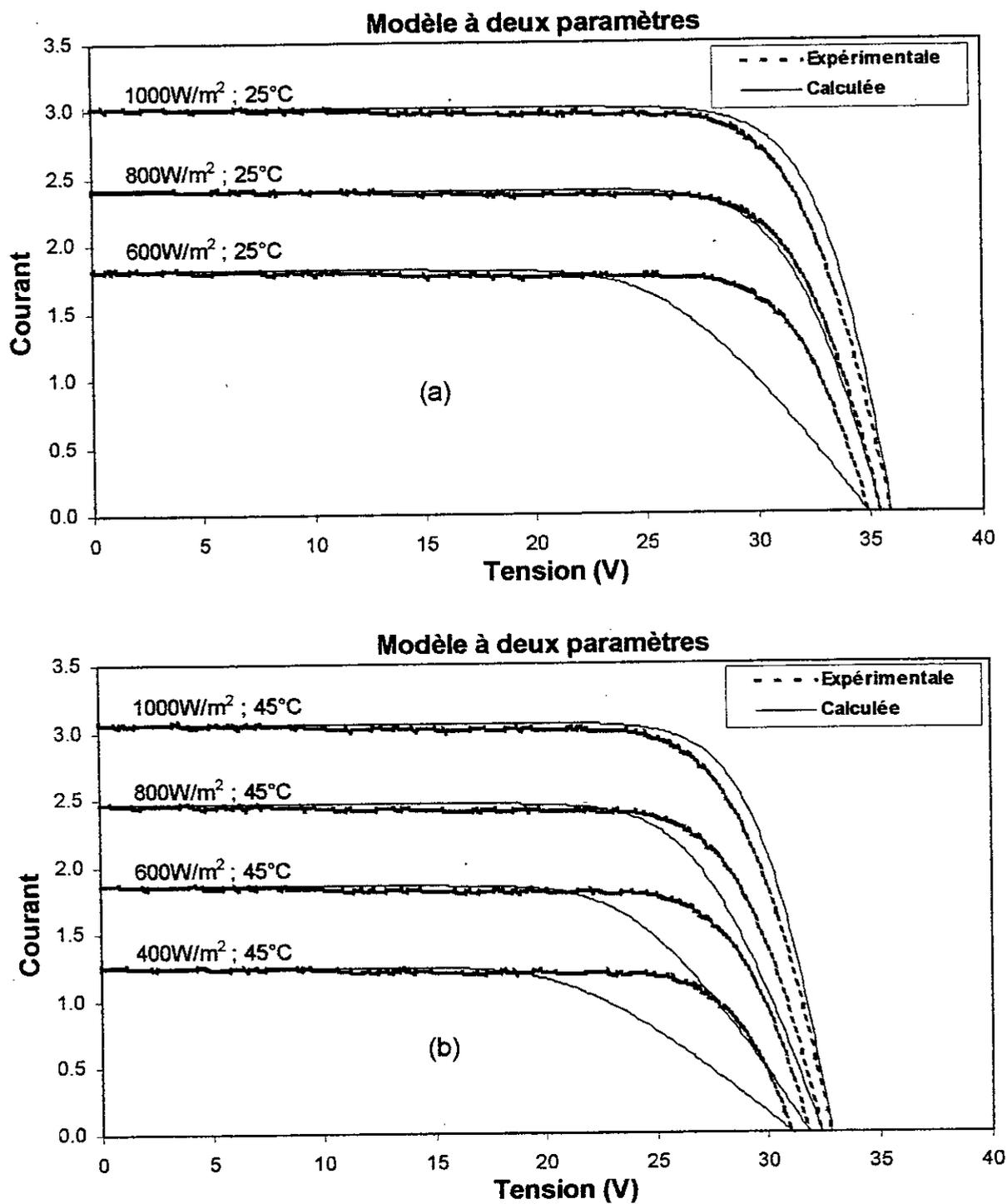


Figure 3.2 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle à deux paramètres pour différents éclaircements et températures (a) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (b) $T=45^{\circ}\text{C}$

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température (°C)	25	25	25
RMSE (A)	0,10	0,03	0,24
E_{ISC} (%)	7E-6	-1E-5	-2E-5
E_{VOC} (%)	-0,11	0,11	0,11
E_{PM} (%)	3,35	-0,98	-15,75

Tableau 3.2.a- Résultats relatifs au modèle à deux paramètres à 25°C

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température (°C)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,09	0,11	0,21	0,21
E_{ISC} (%)	7E-6	-1E-5	6E-6	-1E-5
E_{VOC} (%)	0,11	0,11	-0,11	-0,11
E_{PM} (%)	4,05	-4,40	-13,06	-21,08

Tableau 3.2.b- Résultats relatifs au modèle à deux paramètres à 45°C

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température (°C)	25	25	25
RMSE (A)	0,03	0,02	0,03
E_{ISC} (%)	8E-6	-2E-5	-2E-5
E_{VOC} (%)	0,11	0,11	0,11
E_{PM} (%)	-0,07	-0,08	-0,83

Tableau 3.2.c- Résultats relatifs au modèle à deux paramètres modifié à 25°C

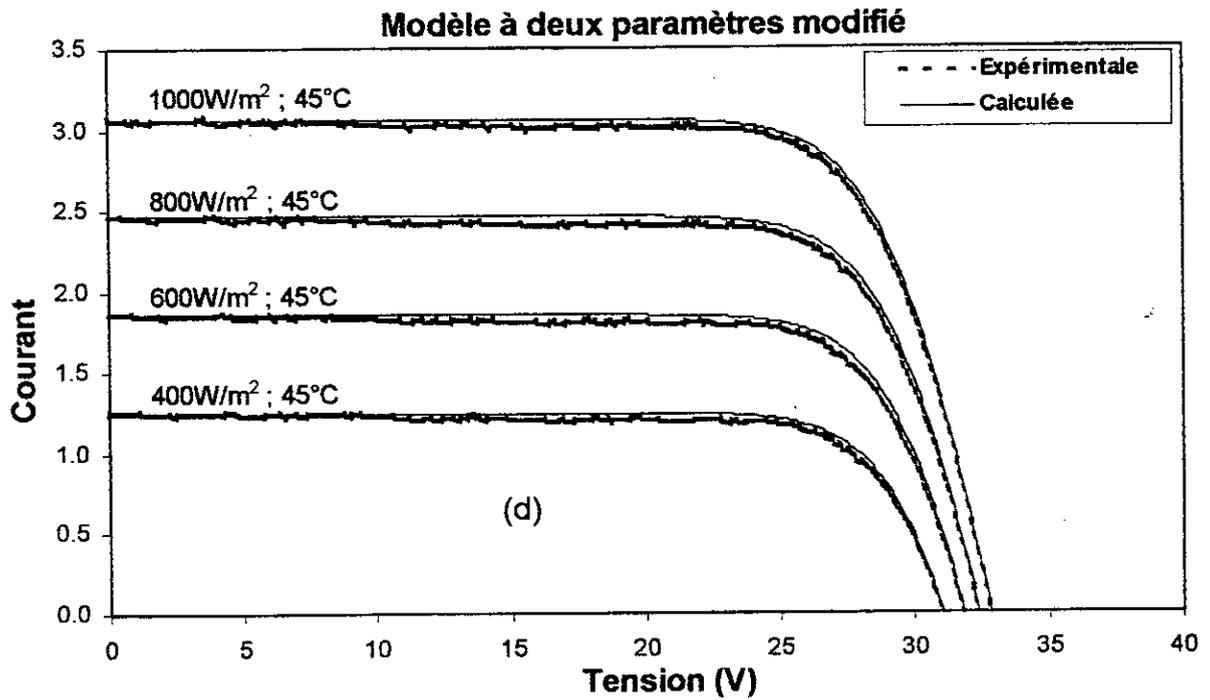
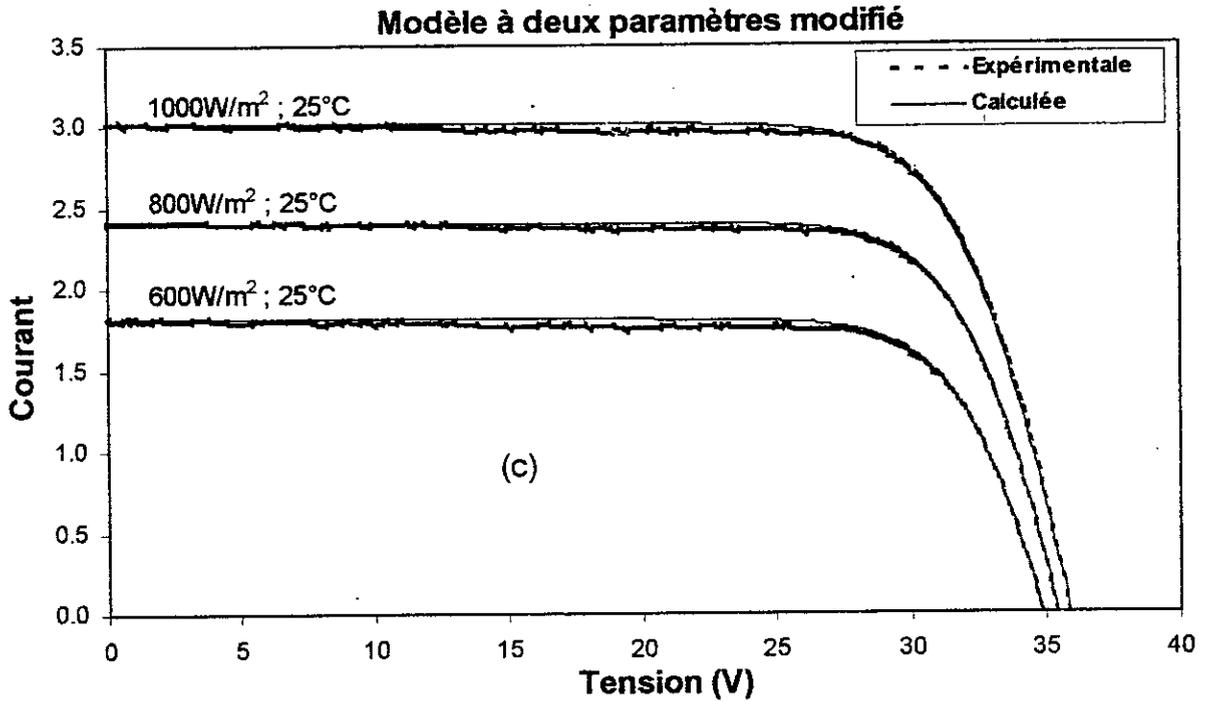


Figure 3.2 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle à deux paramètres modifié, pour différents éclaircements et températures (c) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (d) $T=45^{\circ}\text{C}$

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,04	0,04	0,04	0,03
E_{ISC} (%)	8E-6	-2E-5	6E-6	-2E-5
E_{VOC} (%)	0,11	0,11	0,11	0,11
E_{PM} (%)	1,60	2,14	2,79	2,96

Tableau 3.2 d- Résultats relatifs au modèle à deux paramètres modifié à $45^{\circ}C$

3.3.3 Modèle à cinq paramètres

Les tableaux 3.3.a et 3.3.b donnent les résultats de calcul d'erreurs relatifs à ce modèle. Nous constatons que ce modèle ajuste avec une grande précision toute la caractéristique I-V sous différentes conditions de fonctionnement comme le montrent les figures 3.3.a et 3.3.b.

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,01	0,01	0,03
E_{ISC} (%)	0	8E-3	2E-5
E_{VOC} (%)	0,006	0,006	0,005
E_{PM} (%)	0,55	0,17	0,04

Tableau 3.3.a- Résultats relatifs au modèle à cinq paramètres à $25^{\circ}C$

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,01	0,01	0,01	0,06
E_{ISC} (%)	4E-3	-2E-5	6E-6	-9E-6
E_{VOC} (%)	-0,005	0,006	0,008	-0,010
E_{PM} (%)	-0,05	0,04	0,05	0,55

Tableau 3.3.b- Résultats relatifs au modèle à cinq paramètres à $45^{\circ}C$

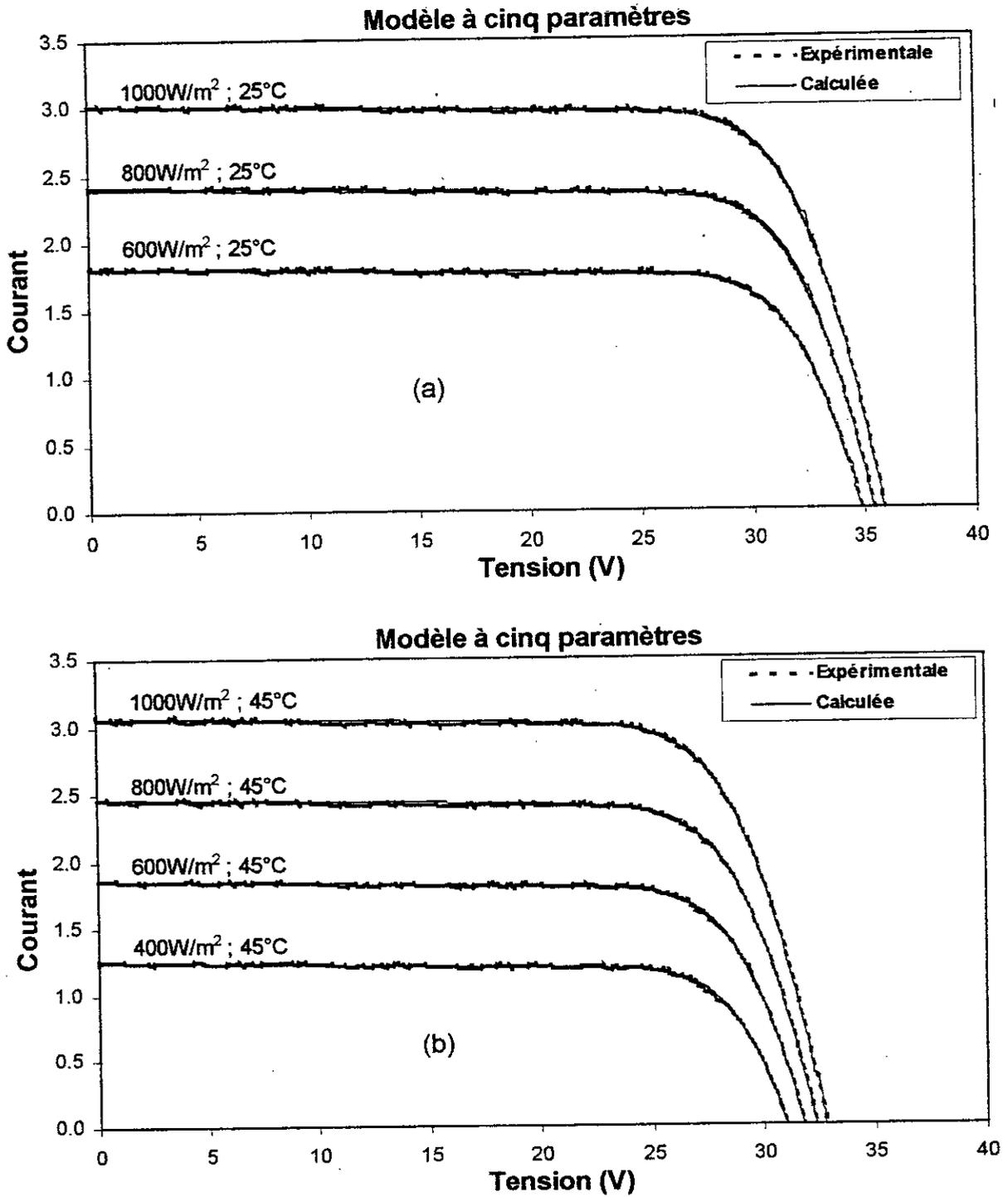


Figure 3.3 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle à cinq paramètres pour différents éclairagements et températures (a) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (b) $T=45^{\circ}\text{C}$

3.3.4 Modèle d'Appelbaum

La superposition des caractéristiques expérimentales avec celles calculées est représentée dans les figures 3.4.a et 3.4.b. On peut remarquer que ce modèle ajuste bien la caractéristique I-V en particulier la partie décroissante de la courbe où il y a une concordance du modèle avec les valeurs mesurées sous différentes conditions de fonctionnement. Ceci est confirmé par le calcul d'erreurs données dans les tableaux 3.4 a et 3.4 b.

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,03	0,03	0,03
E_{ISC} (%)	8E-6	-2E-5	- 2E-5
E_{VOC} (%)	- 3E-4	-5E-4	- 4E-4
E_{PM} (%)	1,58	1,48	1,5

Tableau 3.4.a- Résultats relatifs au modèle d'Appelbaum à 25C°

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,03	0,03	0,03	0,02
E_{ISC} (%)	8E-6	-2E-5	6E-6	-2E-5
E_{VOC} (%)	- 7E-4	-8E-4	-1E-4	- 8E-4
E_{PM} (%)	0,72	1,00	1,22	0,82

Tableau 3.4.b - Résultats relatifs au modèle d'Appelbaum à 45C°

3.3.5 Modèle simplifié

Les figures 3.3.a et 3.3.b montrent les caractéristiques expérimentales et calculées. On peut remarquer les écarts entre les deux courbes, ceci est confirmé par la RMSE qui relativement faible (Tableaux 3.5.a et 3.5.b). Cependant avons pu améliorer ce modèle en utilisant m égale 1,2 au lieu de 1. Ainsi l'ajustement est meilleur.

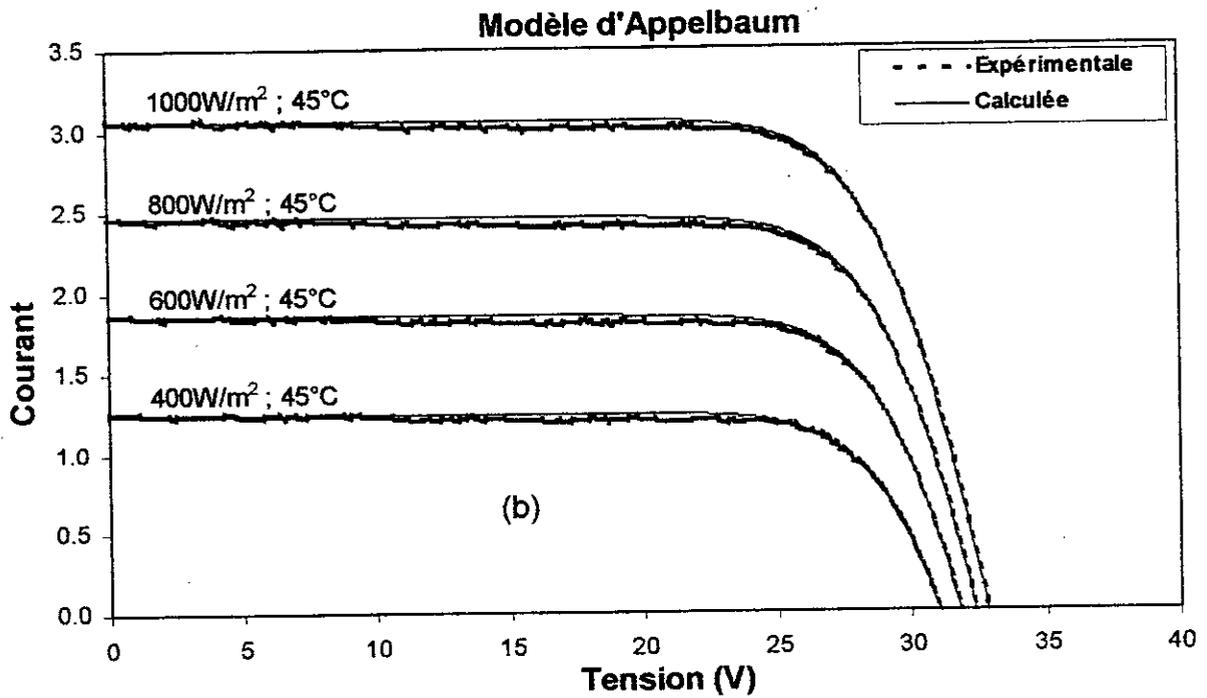
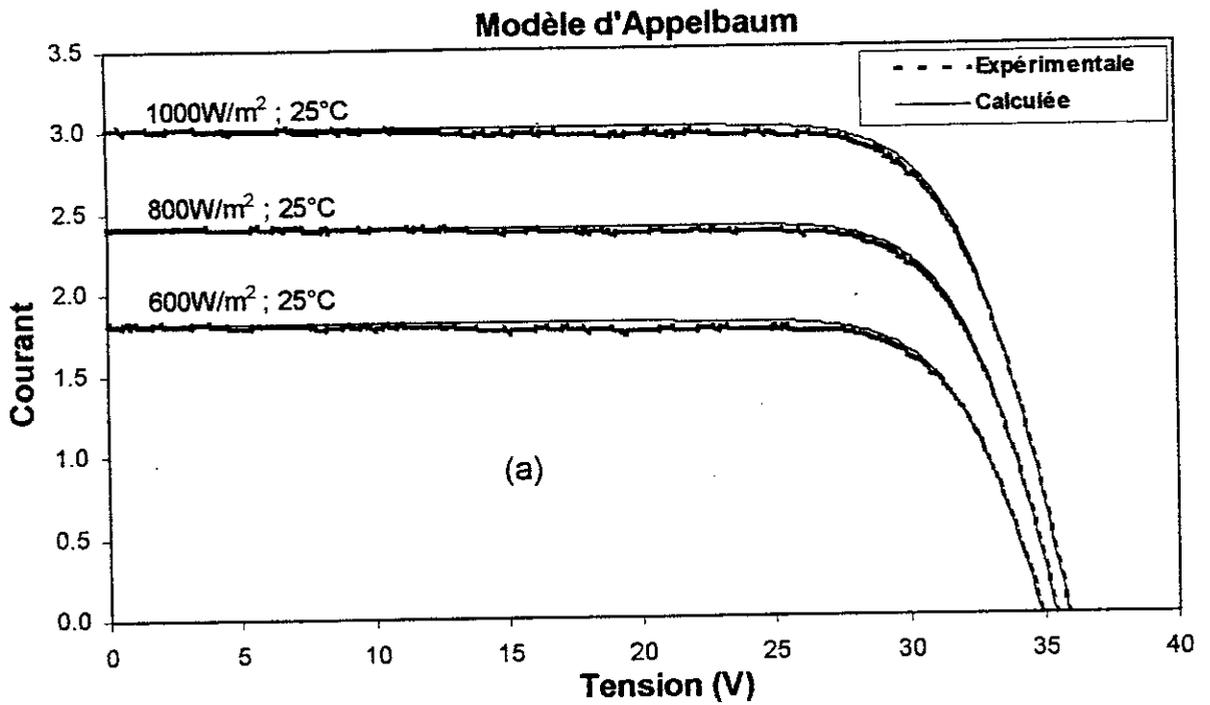


Figure 3.4 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle d'Appelbaum pour différents éclaircements et températures (a) T=25°C et (b) T=45°C

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,06	0,05	0,05
E_{ISC} (%)	-1E-4	-2E-5	-5E-5
E_{VOC} (%)	1E-4	-2E-3	2E-3
E_{PM} (%)	-0,77	-0,70	-0,65

Tableau 3.5.a- Résultats relatifs au modèle simplifié à 25C°

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,04	0,04	0,04	0,04
E_{ISC} (%)	-3E-5	-9E-5	6E-5	-1E-5
E_{VOC} (%)	-3E-4	1E-3	3E-3	5E-3
E_{PM} (%)	-0,82	-0,71	-0,62	-0,78

Tableau 3.5.b- Résultats relatifs au modèle simplifié à 45C°

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,03	0,03	0,03
E_{ISC} (%)	-5E-5	0	-3E-5
E_{VOC} (%)	-2E-4	6E-5	2E-3
E_{PM} (%)	-0,56	-0,47	-0,41

Tableau 3.5.c- Résultats relatifs au modèle simplifié modifié à 25C°

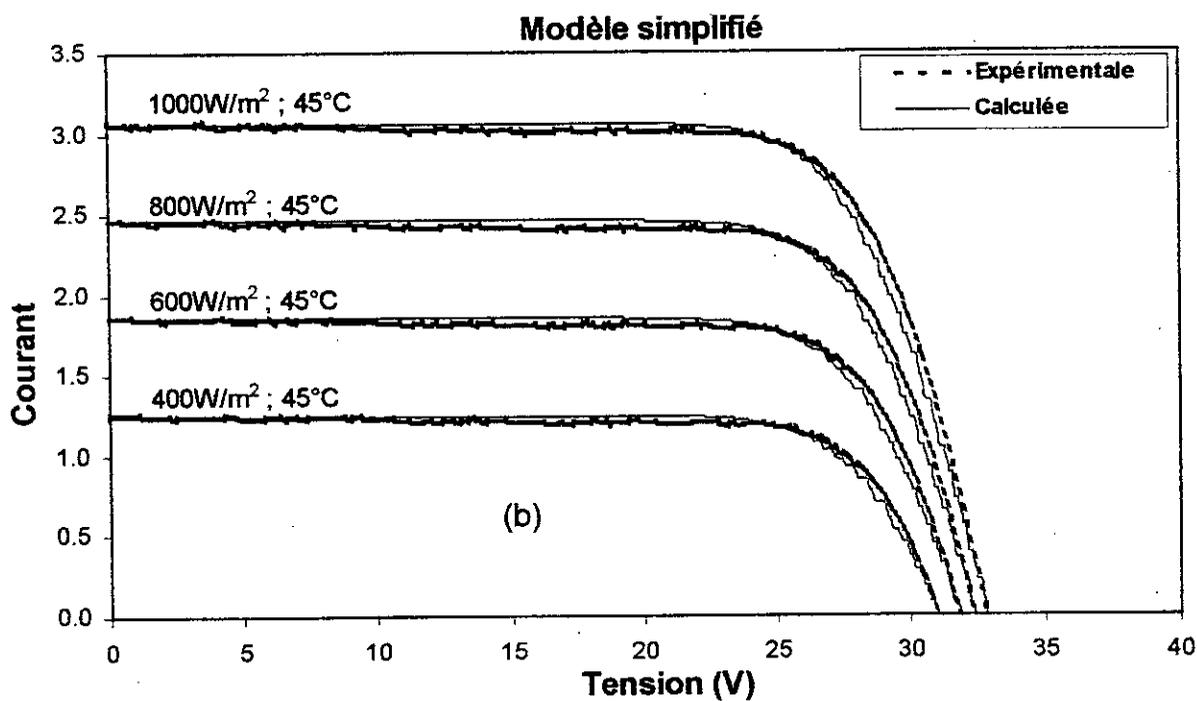
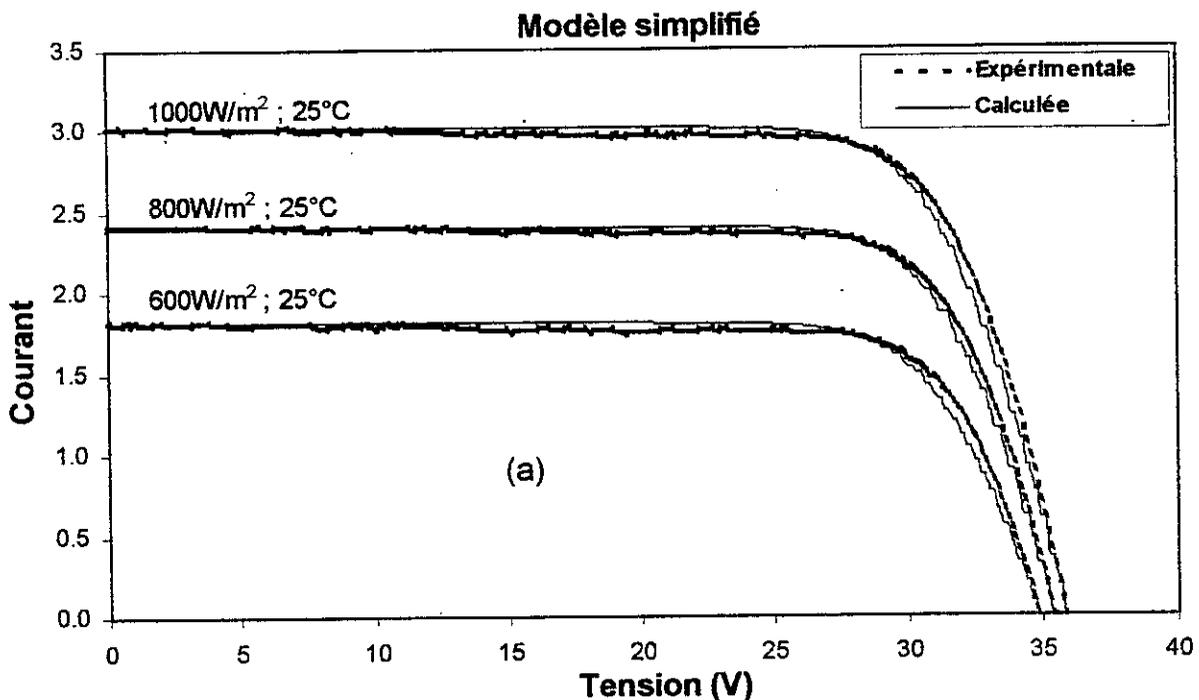


Figure 3.5 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle simplifié avec $m=1$ pour différents éclairagements et températures (a) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (b) $T=45^{\circ}\text{C}$

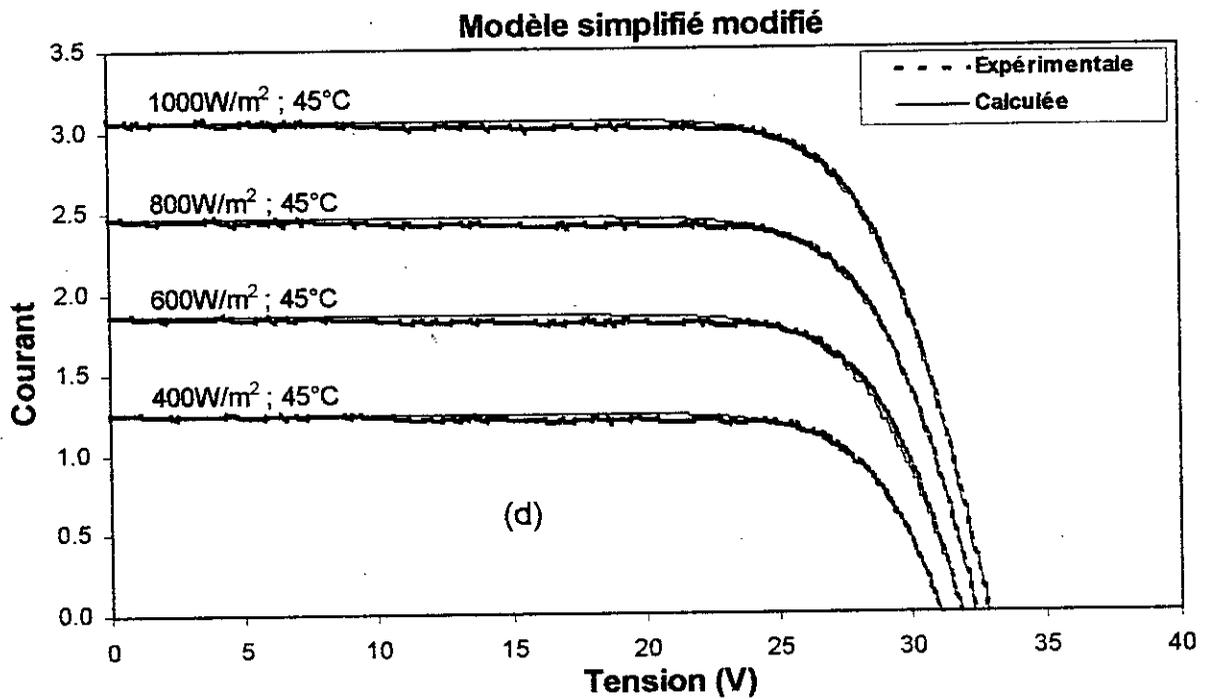
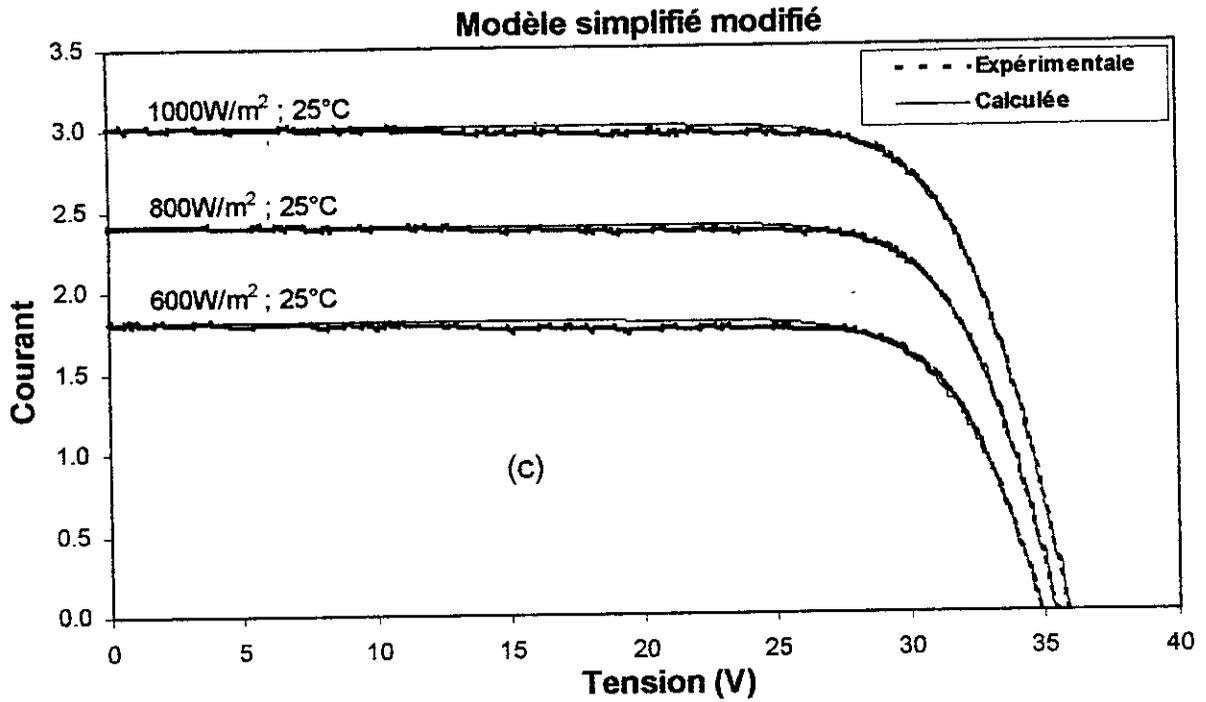


Figure 3.5 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle simplifié avec $m=1,2$ pour différents éclaircements et températures (c) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (d) $T=45^{\circ}\text{C}$

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,03	0,03	0,03	0,04
E_{ISC} (%)	3E-5	-5E-5	6E-5	-1E-5
E_{VOC} (%)	1E-3	-5E-4	-3E-3	3E-3
E_{PM} (%)	-0,55	-0,42	-0,33	0,59

Tableau 3.5.d- Résultats relatifs au modèle simplifié modifié à 45C°

3.2.6 Modèle d'Akbaba

Les résultats obtenus par ce modèle sont donnés dans les tableaux 3.6 a et 3.6 b. Nous constatons que ce modèle présente des écarts remarquables (voir figures 3.6 (a) et (b)). La courbe calculée ne donne pas un bon ajustement de la caractéristique expérimentale.

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,12	0,09	0,06
E_{ISC} (%)	-7E-6	0	-2E-5
E_{VOC} (%)	-2E-3	-3E-3	0,23
E_{PM} (%)	-2,87	-2,99	-3,02

Tableau 3.6.a- Résultats relatifs au modèle d'Akbaba à 25C°

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,12	0,09	0,06	0,04
E_{ISC} (%)	-2E-5	-1E-5	1E-5	1E-5
E_{VOC} (%)	-5E-3	-7E-3	0,46	0,12
E_{PM} (%)	-2,95	-3,07	-3,09	-3,24

Tableau 3.6.b- Résultats relatifs au modèle d'Akbaba à 45C°

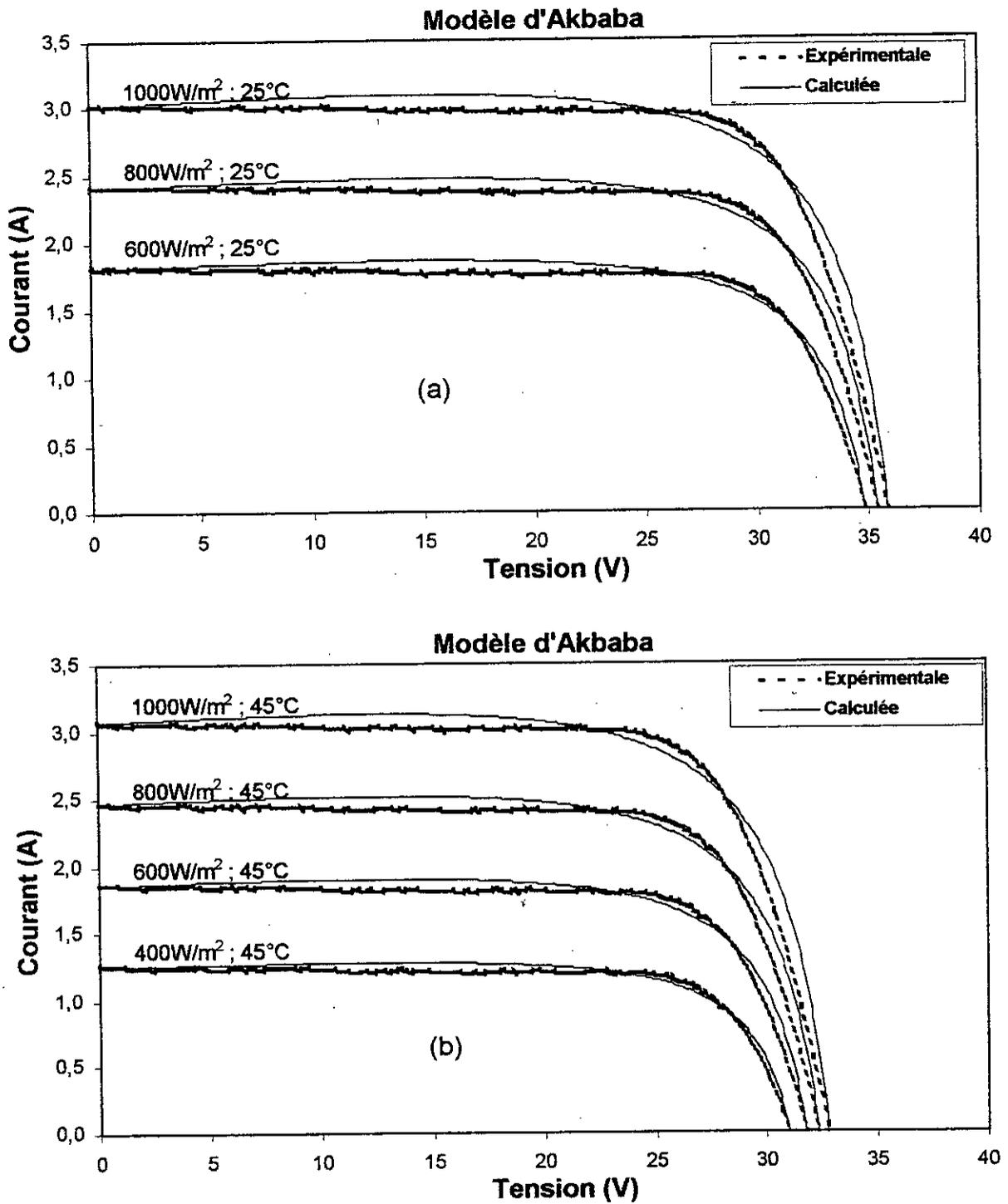


Figure 3.6 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle d'Akbaba pour différents éclairagements et températures (a) $T=25^\circ\text{C}$ et (b) $T=45^\circ\text{C}$

3.2.7 Modèle à deux exponentielles

Les caractéristiques I-V relatives à ce modèle sont données par les figures 3.7.a et 3.7.b, nous remarquons des écarts nets entre les courbes calculées et les courbes expérimentales, le calcul d'erreur correspondant est donné dans les tableaux 3.7.a et 3.7 b, en particulier à proximité du point de puissance maximale jusqu'au point de circuit ouvert. En effet il y a des écarts nets entre la puissance maximale calculée et celle mesurée.

Eclairement (W/ m ²)	1000	800	600
Température (°C)	25	25	25
RMSE (A)	0,08	0.07	0,06
E _{ISC} (%)	-0,11	-0,10	-0,10
E _{VOC} (%)	-0,14	-0,18	-0,21
E _{PM} (%)	-6,60	-7,29	-7,39

Tableau 3.7 a- résultats relatifs au modèle à deux exponentielles à 25C°

Eclairement (W/ m ²)	1000	800	600	400
Température (°C)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,09	0,07	0,07	0,06
E _{ISC} (%)	-0,09	-0,09	-0,10	-0,09
E _{VOC} (%)	-0,12	-0,16	-0,27	-0,42
E _{PM} (%)	-7,28	-7,52	-8,72	-10,74

Tableau 3.7 b- résultats relatifs au modèle à deux exponentielles à 45C°

3.2.8 Modèle à quatre paramètres

Les caractéristiques I-V obtenues à partir de ce modèle, sont données par les figures 3.8.a et 3.8.b. L'erreur relative et la RMSE obtenues à partir de ce modèle sous différentes conditions de fonctionnement de température et d'éclairement sont données par les Tableaux 3.8.a et 3.8.b. Nous constatons que ces erreurs sont faibles pour les différentes conditions de travail, nous pouvons considérer que la courbe théorique ajuste bien la caractéristique (I-V).

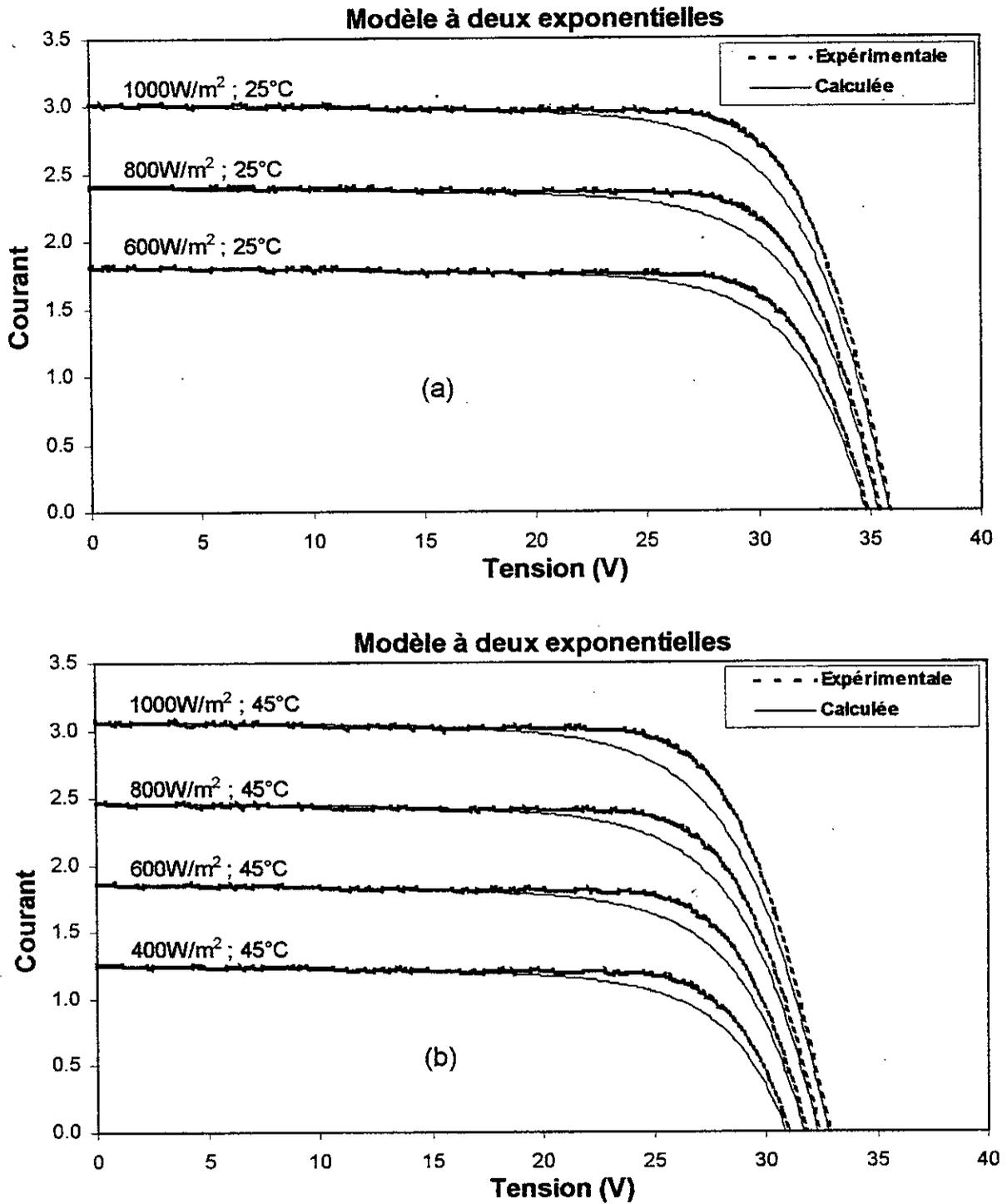


Figure 3.7 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle à deux exponentielles pour différents éclaircements et températures (a) $T=25^{\circ}\text{C}$ et (b) $T=45^{\circ}\text{C}$

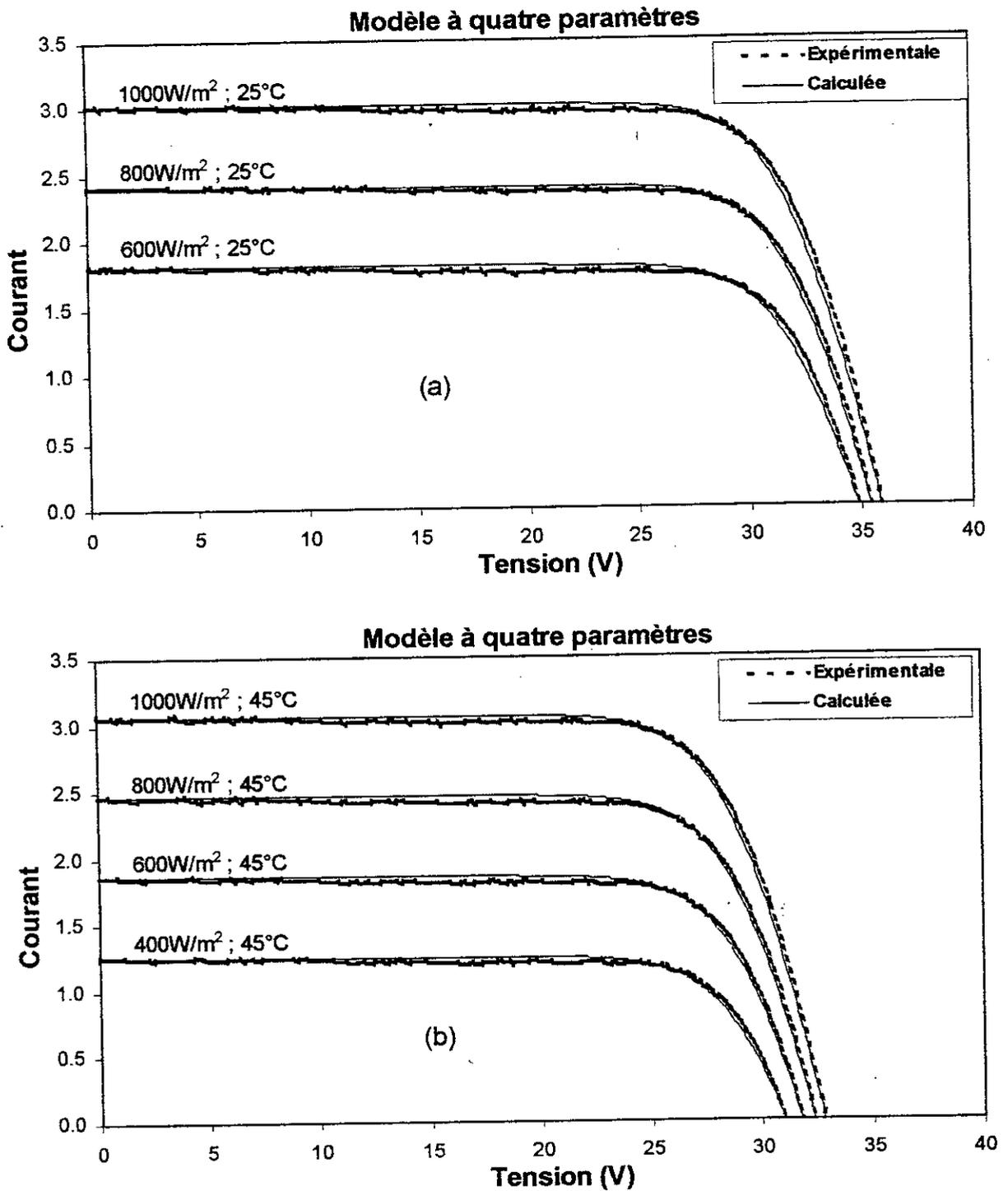


Figure 3.8 Caractéristiques I-V expérimentales et calculées en appliquant le modèle à quatre paramètres pour différents éclaircements et températures (a) T=25°C et (b) T=45°C

Eclairement (W/m^2)	1000	800	600
Température ($^{\circ}C$)	25	25	25
RMSE (A)	0,04	0,03	0,06
E_{ISC} (%)	7E-6	-1E -5	-2E-5
E_{VOC} (%)	-2E-4	-3E -4	-8E-4
E_{PM} (%)	0,12	0,14	0,55

Tableau 3.8.a- Résultats relatifs au modèle à quatre paramètres à 25C°

Eclairement (W/ m^2)	1000	800	600	400
Température ($^{\circ}C$)	45	45	45	45
RMSE (A)	0,03	0,03	0,04	0,07
E_{ISC} (%)	7E-6	-1E-5	6E-6	- 1E-5
E_{VOC} (%)	- 6E-4	- 7E-4	- 1E-4	- 7E-4
E_{PM} (%)	- 0,11	0,16	0,28	0,03

Tableau 3.8.a- Résultats relatifs au modèle à quatre paramètres à 45C°

3.4 Corrections à d'autres conditions de température et d'éclairement

Vu que les fabricants des modules PV fournissent généralement les données relatives aux conditions standards. On est amené assez souvent à utiliser des méthodes de translation de la caractéristique I-V afin de palier au manque de données.

Dans cette partie on décrit et on valide deux méthodes de translation de la courbe I-V donnée à certaines conditions déterminées d'éclairement et de température à d'autres conditions distinctes désirées.

3.4.1 Méthode selon la norme CEI 891

La présente norme est appliquée aux caractéristiques I-V mesurées de dispositifs photovoltaïques au silicium cristallin seulement [20,21]. Avec cette méthode, la caractéristique courant-tension peut être corrigée par rapport aux valeurs de température et d'éclairement choisies.

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha_T (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

$$V_2 = V_1 - R_S (I_2 - I_1) - K I_2 (T_2 - T_1) + \beta_T (T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

- I_1, V_1 : Coordonnées d'un point de la courbe de référence
 I_2, V_2 : Coordonnées d'un point de la courbe corrigée
 I_{sc} : Courant de court-circuit de la courbe de référence
 G_1, T_1 : Eclairement et température dans les conditions de mesure
 G_2, T_2 : Eclairement et température dans les conditions désirées
 α_T, β_T : Coefficients de température du courant et de la tension
 K : Facteur de correction de la courbe (0,00125 Ohm/°C)

Cette méthode présente des limitations : la gamme de l'éclairement à corriger maximum est de +/- 30%, celle de la température n'est pas spécifiée.

3.4.2 Méthode simplifiée

Cette méthode est basée sur la translation de la courbe I-V à partir des corrections en I_{sc} et V_{oc} [22]

$$I_{sc2}(G_2, T_2) = I_{sc1}(G_1, T_1) \frac{G_2}{G_1} + \alpha_T (T_2 - T_1) \quad (3.5)$$

$$V_{oc2}(G_2, T_2) = V_{oc1}(G_1, T_1) + m V_t \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) + \beta_T (T_2 - T_1) \quad (3.6)$$

Les équations de translation sont :

$$I_2 = I_1 + \Delta I_{sc} \quad (3.7)$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_{oc} \quad (3.8)$$

où :

$$\Delta I_{sc} = I_{sc2} - I_{sc1} \quad (3.9)$$

$$\Delta V_{oc} = V_{oc2} - V_{oc1} \quad (3.10)$$

α_{Tm} , β_{Tm} et m_m sont des valeurs définies pour le dispositif complet (module, générateur photovoltaïque, etc.). Dans le cas où on utiliserait α_T , β_T et m d'une cellule on fera le calcul préalable suivant :

$$\alpha_{Tm} = \alpha_{TC} \cdot N_p$$

$$\beta_{Tm} = \beta_{TC} \cdot N_s$$

$$m_m = m_C \cdot N_s$$

avec:

N_s : nombre de cellules du module ou du générateur photovoltaïque connectées en série

N_p : nombre de cellules du module ou du générateur photovoltaïque connectées en parallèle.

3.4.3 Résultats et comparaison

La comparaison des erreurs d'extrapolation de courbes I-V à d'autres conditions d'éclairement et de température à partir des deux conditions initiales de référence 1000 W/m², 25°C et 800 W/m², 45°C appliquées au même module photovoltaïque que dans le tableau antérieur et en utilisant les deux méthodes de translation : selon CEI-891 (voir tableaux 3.4.1.a et 3.4.1.b) et selon la méthode simplifiée (voir tableaux 3.4.2a et 3.4.2b). Comme on peut voir dans les erreurs obtenues entre les équations de translation et les valeurs mesurées, la méthode CEI-891 est plus précise pour les paramètres fondamentaux analysés du générateur photovoltaïque (I_{sc} , V_{oc} et P_m). Par conséquent, cette méthode est la plus adéquate pour être utilisée.

a)-Référence I : 1000 W/m², 25°C

Eclairement (W/m ²)	Valeurs extrapolées						
	1000	800	600	1000	800	600	400
Température (°C)	25	25	25	45	45	45	45
E_{ISC} (%)	--	-0,06	-0,13	-0,80	-1,33	-1,79	-2,23
E_{VOC} (%)	--	0,23	0,55	1,11	1,67	1,74	3,08
E_{PM} (%)	--	0,32	0,63	0,39	0,48	0,41	-0,03

Tableau 3.4.1.a. Translation selon la norme CEI – 891

b)-Référence II : 800 W/m², 45°C

Eclairement (W/m ²)	Valeurs extrapolées						
	1000	800	600	1000	800	600	400
Température (°C)	25	25	25	45	45	45	45
E _{ISC} (%)	1,48	1,65	0,37	0,37	--	-0,73	-2,16
E _{VOC} (%)	-1,93	-1,57	-1,51	-0,97	--	-0,36	0,48
E _{PM} (%)	-0,01	0,14	0,16	-0,07	--	-0,41	-1,57

Tableau 3.4.1.b. Translation selon la norme CEI – 891

c)-Référence I : 1000 W/m², 25°C

Eclairement (W/m ²)	Valeurs extrapolées						
	1000	800	600	1000	800	600	400
Température (°C)	25	25	25	45	45	45	45
E _{ISC} (%)	--	0,30	-0,19	-0,88	-1,25	-1,49	-1,95
E _{VOC} (%)	--	0,34	0,69	0,93	1,29	1,67	2,19
E _{PM} (%)	--	-2,29	-4,95	0,71	-2,13	-5,49	-10,08

Tableau 3.4.2.a Translation selon la méthode simplifiée

d)-Référence II : 800 W/m², 45°C

Eclairement (W/m ²)	Valeurs extrapolées						
	1000	800	600	1000	800	600	400
Température (°C)	25	25	25	45	45	45	45
E _{ISC} (%)	2,10	2,41	1,90	0,53	--	-0,51	-1,51
E _{VOC} (%)	-1,10	-0,84	-0,59	-0,27	--	0,26	0,61
E _{PM} (%)	3,05	0,62	-2,20	3,16	--	-3,83	-9,22

Tableau 3.4.2. b Translation selon la méthode simplifiée

3.5 Modèle de la température du générateur photovoltaïque

L'objet de cette partie est de déterminer la température (T) du générateur PV, qui est dans la plupart des cas pratiques non disponible. Pour cela on a besoin de la température ambiante (Ta) qui peut être soit mesurée soit estimée. Dans ce qui suit nous présentons d'abord un modèle d'estimation de Ta, puis un autre modèle d'estimation de T.

3.5.1 Modèle de la température ambiante

La température ambiante et l'éclairement solaire déterminent la température de fonctionnement du générateur photovoltaïque et par conséquent elle influe sur la caractéristique I-V du générateur. D'autres facteurs comme la vitesse du vent, la température équivalente du ciel, l'émissivité de l'encapsulant, l'émissivité du sol, la position des modules, l'absorbance des cellules, sont moins importantes et sont prises en considération dans la dénommée température nominale de fonctionnement NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), caractéristique de chaque technologie de fabrication.

Pour représenter ce paramètre le long d'une journée j, généralement on utilise les valeurs de la température maximale Tmax et minimale Tmin. C'est une méthode simple de modéliser la température ambiante quand on ne dispose pas des données horaires mesurées de ce paramètre et on a uniquement les mesures de Tmax et Tmin du jour; données normalement disponibles au niveau des centres de météorologie. En supposant que :

a) Tmax est obtenue à deux heures après-midi $\left(\omega = \frac{\pi}{6} \right)$

b) Tmin est obtenue au lever du jour $(\omega = \omega_s)$

Entre ces deux instants, nous utilisons une fonction cosinus [1, 21] pour caractériser la variation de la température durant le jour j :

• Pour l'intervalle $-\pi < \omega < \omega_s$

$$T_a = T_{max}(j-1) - \frac{T_{max}(j-1) - T_{min}(j)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (3.11)$$

où:

$$a = \frac{\pi}{\left(\frac{\pi}{6} - \omega_s - 2\pi \right)} ; \quad b = -a\omega_s$$

- Pour l'intervalle $\omega_s < \omega < \frac{\pi}{6}$

$$T_a = T_{min}(j) + \frac{T_{max}(j) - T_{min}(j)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (3.12)$$

où:

$$a = \frac{\pi}{\left(\omega_s - \frac{\pi}{6}\right)} ; \quad b = -\frac{a\pi}{6}$$

- Pour l'intervalle $\frac{\pi}{6} < \omega < \pi$

$$T_a = T_{max}(j) - \frac{T_{max}(j) - T_{min}(j+1)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (3.13)$$

où:

$$a = \frac{\pi}{\left(2\pi + \omega_s - \frac{\pi}{6}\right)} ; \quad b = -\left(\pi + \frac{a\pi}{6}\right)$$

Un exemple d'application à été donné pour une journée d'été (21 Juin) et une journée d'hiver (21 Décembre) est illustré dans la figure 2.9. Nous remarquons que le modèle donne un bon ajustement entre les valeurs mesurées et calculées avec une RMSE maximale de 0,23.

3.5.2 Modèle de la température de la cellule

En négligeant les effets de l'inertie thermique du module dans les processus transitoires, les effets non linéaires du rayonnement thermique et la présence de vents élevés, nous pouvons exprimer la température de la cellule (T) approximativement comme une fonction linéaire de la température ambiante (T_a) et de l'éclairement (G) [1] :

$$T = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800}\right).G \quad (3.14)$$

Où NOCT est la température de fonctionnement nominal de la cellule (Nominal Operating Cell Temperature) en °C, définie comme la température que les cellules atteignent quand G est de 800W/m², T_a est de 20°C, la vitesse du vent est de 1m/s et la distribution spectrale est AM1,5.

Cette expression peut être considérée valable pour des dimensionnements et simulations horaires de systèmes photovoltaïques.

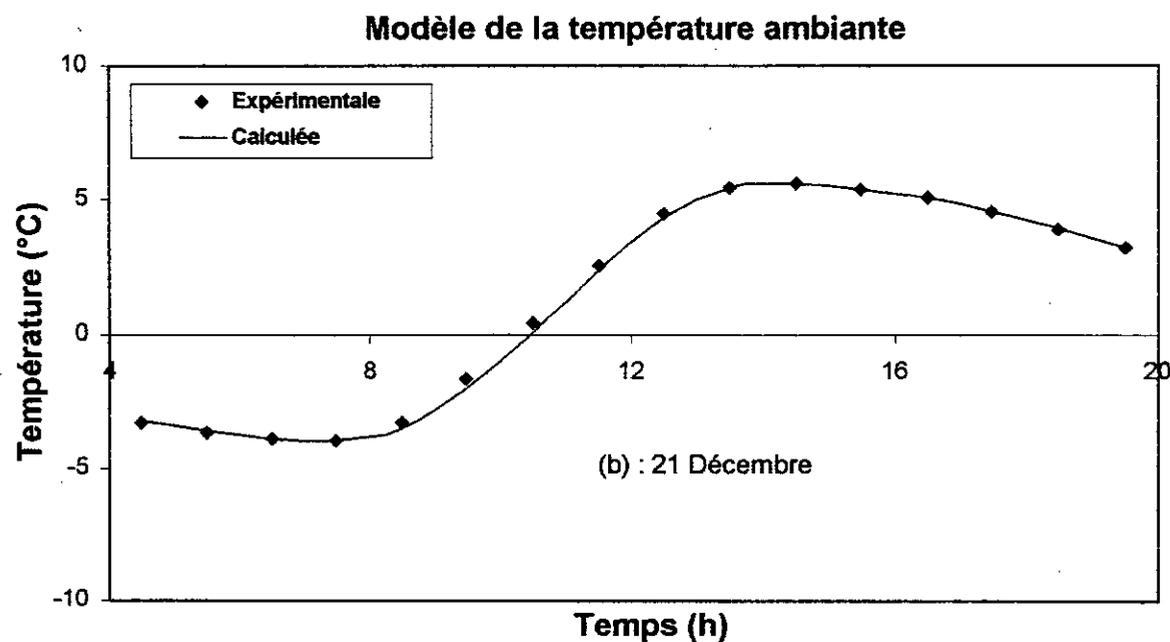
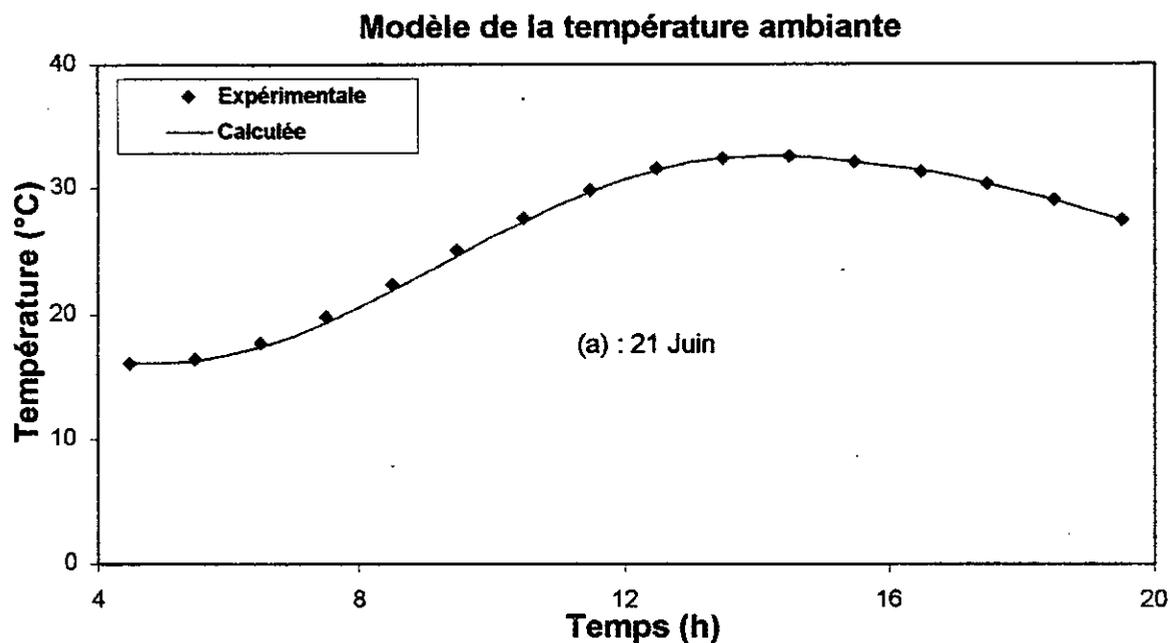


Figure 3.9 Exemple d'application du modèle de la température ambiante pour deux jours de l'année météorologique type (Madrid) :

(a) : 21 Juin

(b) : 21 Décembre

3.6 Conclusion

Nous avons comparé différents modèles de la caractéristiques I-V du générateur photovoltaïque nécessaires pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. Nous avons étudié leur validité pour différents éclairagements (400, 600, 800 et 1000 W/m²) et températures (25 et 45°C) en concluant que le modèle à cinq paramètres est le plus précis. Alternativement la méthode explicite a montré qu'elle est simple à utiliser.

La comparaison de deux méthodes pour assurer la translation des courbes I-V de certaines conditions d'éclairément à d'autres conditions s'est avérée favorable pour la méthode selon la norme CEI-891.

Enfin on a appliqué une méthode qui détermine la température du générateur photovoltaïque en fonction de la température ambiante, l'éclairément solaire et la température de fonctionnement nominale de la cellule NOCT.

Chapitre 4

Optimisation de l'angle d'inclinaison du générateur photovoltaïque

4.1 Introduction

Dans le but d'obtenir un outil de développement du généralement PV aussi complet que possible nous avons jugé nécessaire d'étudier son inclinaison pour un meilleur rendement.

L'application de l'énergie solaire pour un site donné nécessite une analyse de l'ensoleillement du site. Ainsi dans notre cas, cette analyse permet de déterminer l'influence de l'inclinaison du générateur photovoltaïque sur l'énergie qu'il délivre durant toute l'année.

Partant de ces résultats, le choix d'un angle d'inclinaison optimal est possible en tenant compte des caractéristiques de la charge à alimenter.

Dans beaucoup de cas, les applications photovoltaïques ne présentent pas de système de poursuite de soleil (coût élevé).

Le générateur doit être incliné par rapport à l'horizontale d'un angle de telle façon à avoir une densité d'énergie absorbée maximale. Dans le cas idéal, le module doit être toujours perpendiculaire aux rayons solaires incidents. Cependant, ceci ne peut être obtenu pour l'installation fixe car la déclinaison et la hauteur du soleil varient durant l'année. D'où on doit avoir une inclinaison du module pour une moyenne annuelle (ou saisonnière selon la charge à alimenter) d'énergie captée optimale.

En générale, l'inclinaison du générateur peut être optimisée seulement en définissant objectivement sa fonction. Cette dernière dépend généralement de la demande d'énergie (courbe de charge). On distingue trois types d'inclinaison :

- Inclinaison annuelle (Janvier à Décembre)
- Inclinaison estivale (Juin – Juillet – Août)
- Inclinaison Hivernale (Décembre – Janvier – Février)

Pour trouver l'inclinaison optimale du générateur photovoltaïque pour un site donné nous évaluons l'irradiation globale sur le plan du générateur PV pour différentes inclinaisons de ce générateur par rapport au plan horizontal.

4.1 Eclairage direct sur plan horizontal

L'éclairage direct sur plan horizontal $B(0)$ peut être estimé par la formule de Hottel [22, 23] :

$$B(0) = T_b G_e \quad (4.1)$$

avec :

$$G_e = B_0 \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \quad (4.2)$$

$$T_b = A_0 + A_1 \exp\left[-\frac{K}{(\cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(L)\sin(\delta))} \right] \quad (4.3)$$

$$A_0 = 0,97 \left[0,4237 - 0,0821(6 - ALT)^2 \right] \quad (4.4)$$

$$A_1 = -0,99 \left[0,5055 - 0,00595(6,5 - ALT)^2 \right] \quad (4.5)$$

$$K = -1,02 \left[0,2711 - 0,01858(2,5 - ALT)^2 \right] \quad (4.6)$$

$$\delta = 23,45 \sin\left[\frac{360(284 + N_j)}{365} \right] \quad (4.7)$$

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (4.8)$$

$$\cos(\omega_S) = -\operatorname{tg}(LAT)\operatorname{tg}(\delta) \quad (4.9)$$

$$TSV = \text{Temps sandart} + 4(L_{loc} - L_{St}) + ET \quad (4.10)$$

où la correction de l'équation du temps ET est donnée par :

$$ET = 9,87 \sin(2b) - 7,53 \cos(b) - 1,5 \sin(b) \quad (4.11)$$

$$b = \frac{360 (N_j - 81)}{365} \quad (4.12)$$

où :

ω : Angle horaire

ω_S : heure du lever ou du coucher du soleil

B_0 : Constante solaire (1367 W/m^2)

TSV : Temps soleil vrai

L_{St} : Méridien standard pour le temps local

L_{loc} : Longitude

G_e : Eclairement extraterrestre sur plan normal

L : Latitude du lieu

δ : Déclinaison du soleil

N_j : Numéro du jour dans l'année ($1 \leq N \leq 365$)

ALT : Altitude du lieu.

4.3 Irradiation horaire direct sur plan horizontal

L'irradiation horaire s'obtient par l'intégration de l'équation (4.1); ce qui donne :

$$B(0) = T_b G_e \sin(h_S) \quad (4.13)$$

$$\sin(h_S) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (4.14)$$

avec :

h_S : hauteur du soleil

4.4 Eclairement diffus sur plan horizontal

L'éclairement diffus peut être estimé par la formule empirique de Lieu et Jordan [22, 23] :

$$D(0) = T_d G_0 \quad (4.16)$$

avec :

$$T_d = 0,271 - 0,293T_b \quad (4.17)$$

G_0 : Eclairement extraterrestre sur plan horizontal

4.5 Irradiation horaire diffuse sur plan horizontal

L'irradiation horaire s'obtient par l'intégration de l'équation (4.13) ce qui donne :

$$D_h(0) = T_d G_e \sin(h) \quad (4.18)$$

4.6 Irradiation horaire globale sur plan horizontal

L'irradiation horaire globale sur le plan horizontal est la somme d'irradiation direct et diffus soit :

$$G_h(0) = B_h(0) + D_h(0) \quad (4.19)$$

4.7 Irradiation globale horaire sur plan incliné

L'irradiation globale recueillie sur une surface inclinée est donnée en fonction de celle reçue sur une surface horizontale par l'expression :

$$G_h(\beta) = R G_h(0) \quad (4.20)$$

avec :

$$R = \frac{B_h(0)}{G_h(0)} R_b + \frac{D_h(0)}{G_h(0)} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \rho \quad (4.21)$$

$$R_b = \frac{\cos(L)\cos(\delta)\cos(AH) + \sin(L - \beta)\sin(\delta)}{\cos(L)\cos(\delta)\cos(AH) + \sin(L)\sin(\delta)} \quad (4.22)$$

avec :

R_b : Rapport d'irradiation directe sur un plan incliné et celle sur un plan horizontal

R : Rapport l'irradiation globale sur un plan incliné et celle sur un plan horizontal

$B(0)$: Irradiation directe sur plan horizontal

$D(0)$: Irradiation diffuse sur plan horizontal

ρ : L'albédo du sol

L'irradiation journalière recueillie sur une surface inclinée est obtenue par une sommation des irradiances horaire entre le levé et le couché du soleil, de même l'irradiation mensuelle est une sommation des irradiances journalières sur le mois considéré, et l'irradiation annuelle est une sommation à l'échelle de l'année des irradiances mensuelles.

L'organigramme de calcul qui permet d'obtenir ces différentes irradiances est donné par la figure 4.1.

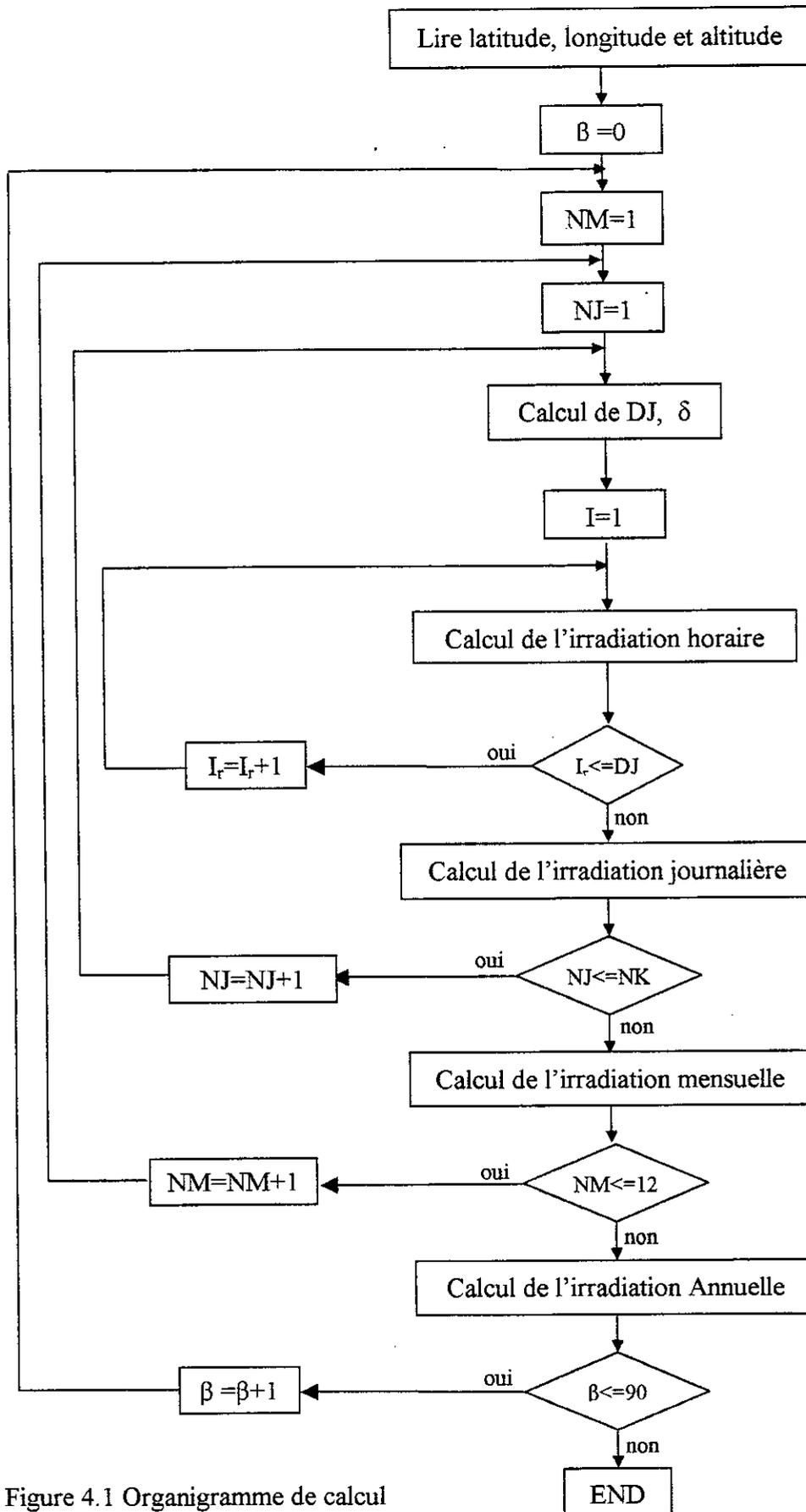


Figure 4.1 Organigramme de calcul des irradiances sur plan incliné

Avec :

- β : Angle d'inclinaison du générateur
 DJ : Durée du jour
 NJ : Numéro du jour dans le mois
 Nk : Nombre de jour dans le mois correspondant
 NM : Numéro du mois dans l'année (varie de 1 à 12)

4.8 Application

Pour notre application nous avons choisi quatre sites Algériens. Deux sites du nord : Alger et Oran. Deux sites du sud : Bechar et Tamanrasset (tableau 4.1).

L'évolution de l'irradiation moyenne en fonction de l'inclinaison annuelle, estivale et hivernale est donnée par les figures 4.2 à 4.6. Les angles d'inclinaison optimale annuelle, estivale et hivernale pour les différents sites sont donnés dans le tableau 4.2.

Site	Altitude (°)	Longitude (°)	Latitude (m)
Alger	36,72 N	3,17 E	24
Oran	35,32 N	3,17 O	119
Bechar	31,62 N	2,22 O	772
Tamanrasset	22,78 N	5,52 E	1377

Tableau 4.1 Localisation Géographique des différents sites

Site	Angle d'inclinaison optimale (°)		
	Annuelle (Janvier à Décembre)	Estivale (Juin-Juillet-Aout)	Hivernale (Décembre-Janvier-Février)
Alger	31	9	58
Oran	31	8	57
Bechar	29	4	55
Tamanrasset	22	0	48

Tableau 4.2 Angle d'inclinaison optimale des différents sites

Conclusion

Ces résultats nous permettent de tirer les conclusions suivantes : pour tous les sites, l'inclinaison optimale annuelle est comprise entre la latitude du lieu et la latitude moins 6° . L'inclinaison estivale est faible; elle est inférieure à 9° pour tous les sites. l'inclinaison hivernale est forte ; elle est supérieure à 48° pour les différents sites. Ainsi, selon la charge à alimenter, nous choisirons une inclinaison annuelle, estivale ou hivernale.

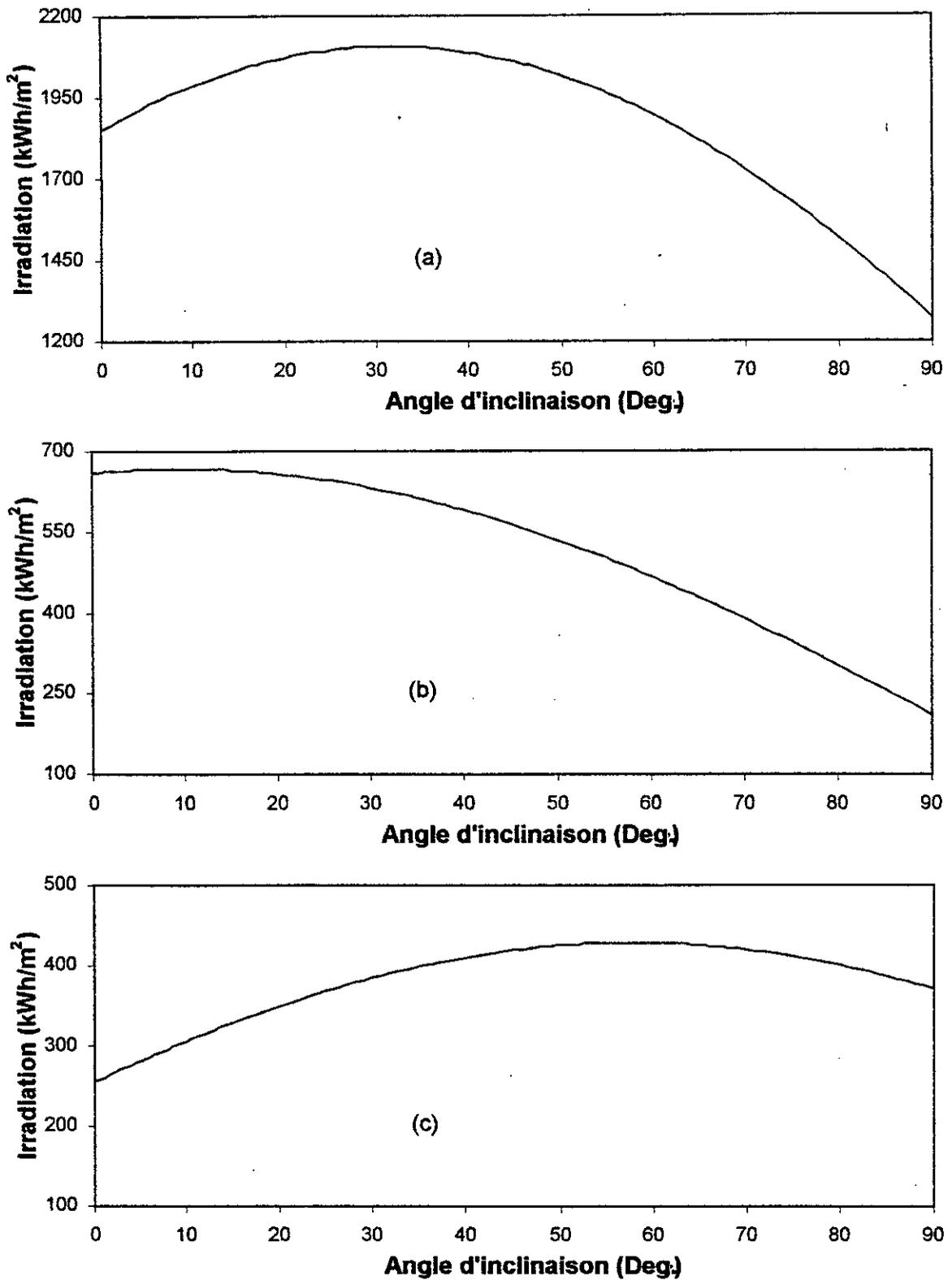


Figure 4.2 Evolution de l'irradiation en fonction de l'inclinaison pour le site d'Alger :
 (a) Annuelle; (b) Estivale; (c) Hivernale

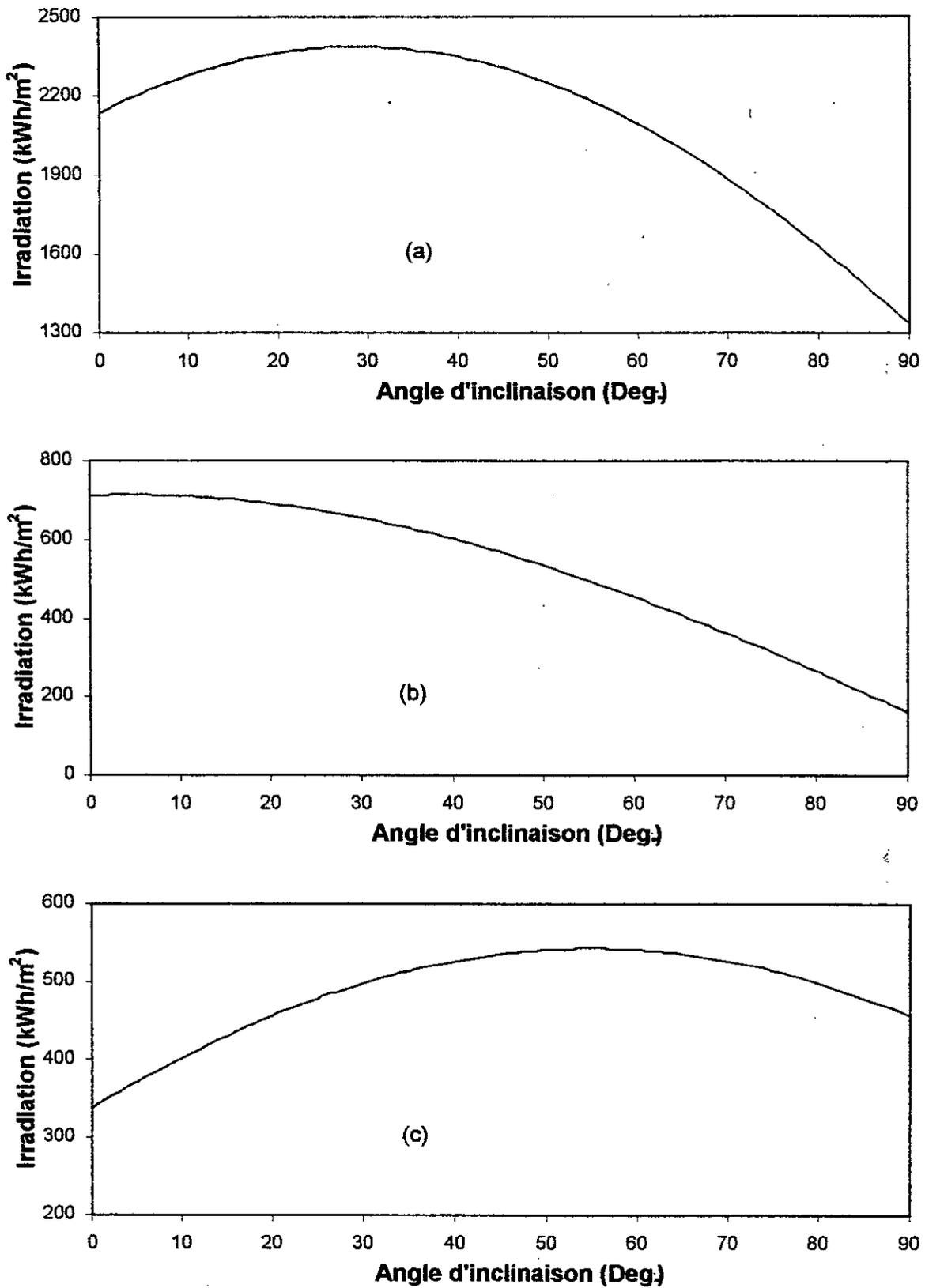


Figure 4.3 Evolution de l'irradiation en fonction de l'inclinaison pour le site de Bechar : (a) Annuelle; (b) Estivale ; (c) Hivernale

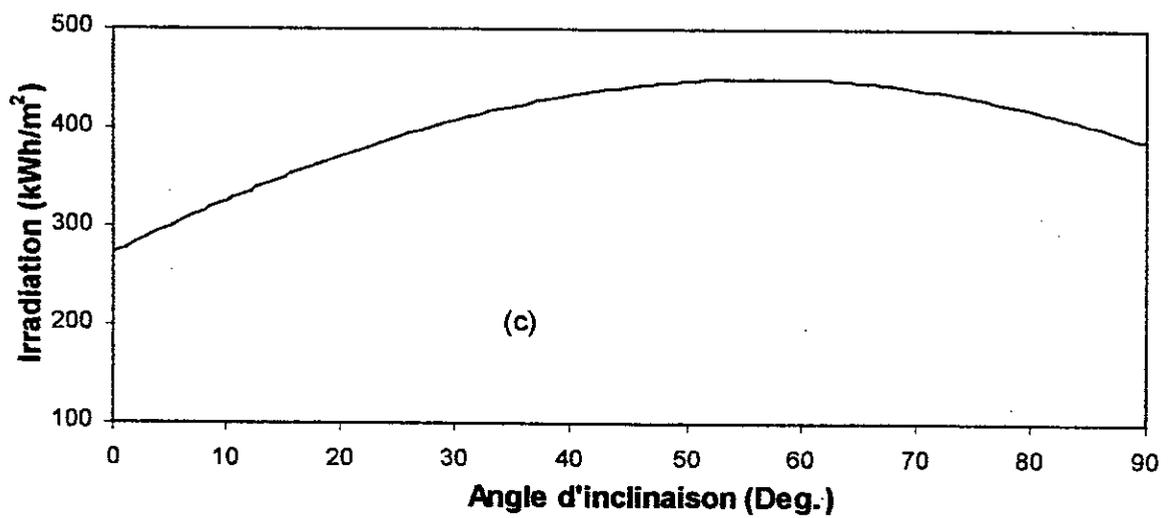
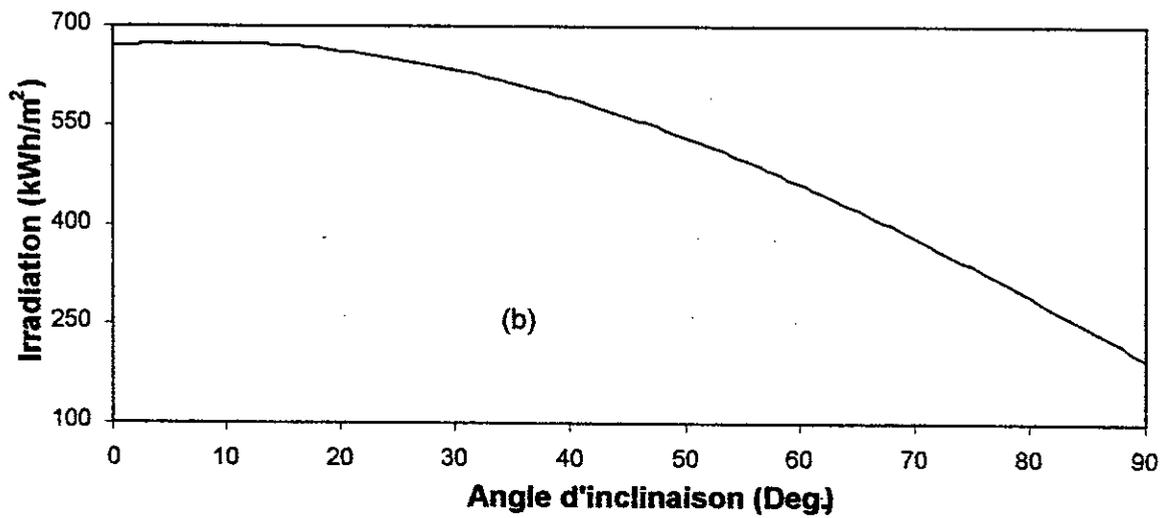
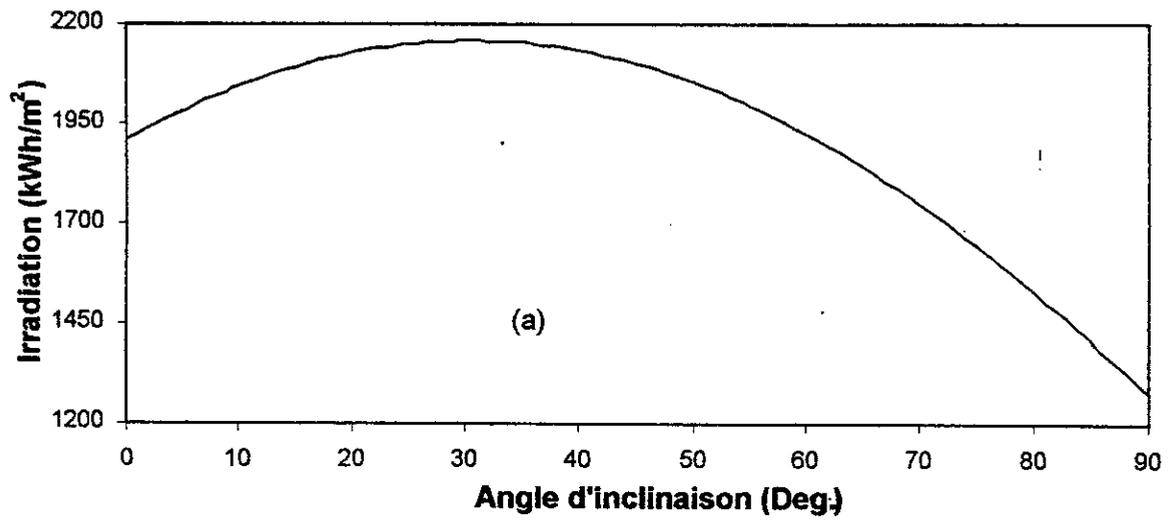


Figure 4.4 Evolution de l'irradiation en fonction de l'inclinaison pour le site d'Oran :
 (a) Annuelle; (b) Estivale ; (c) Hivernale

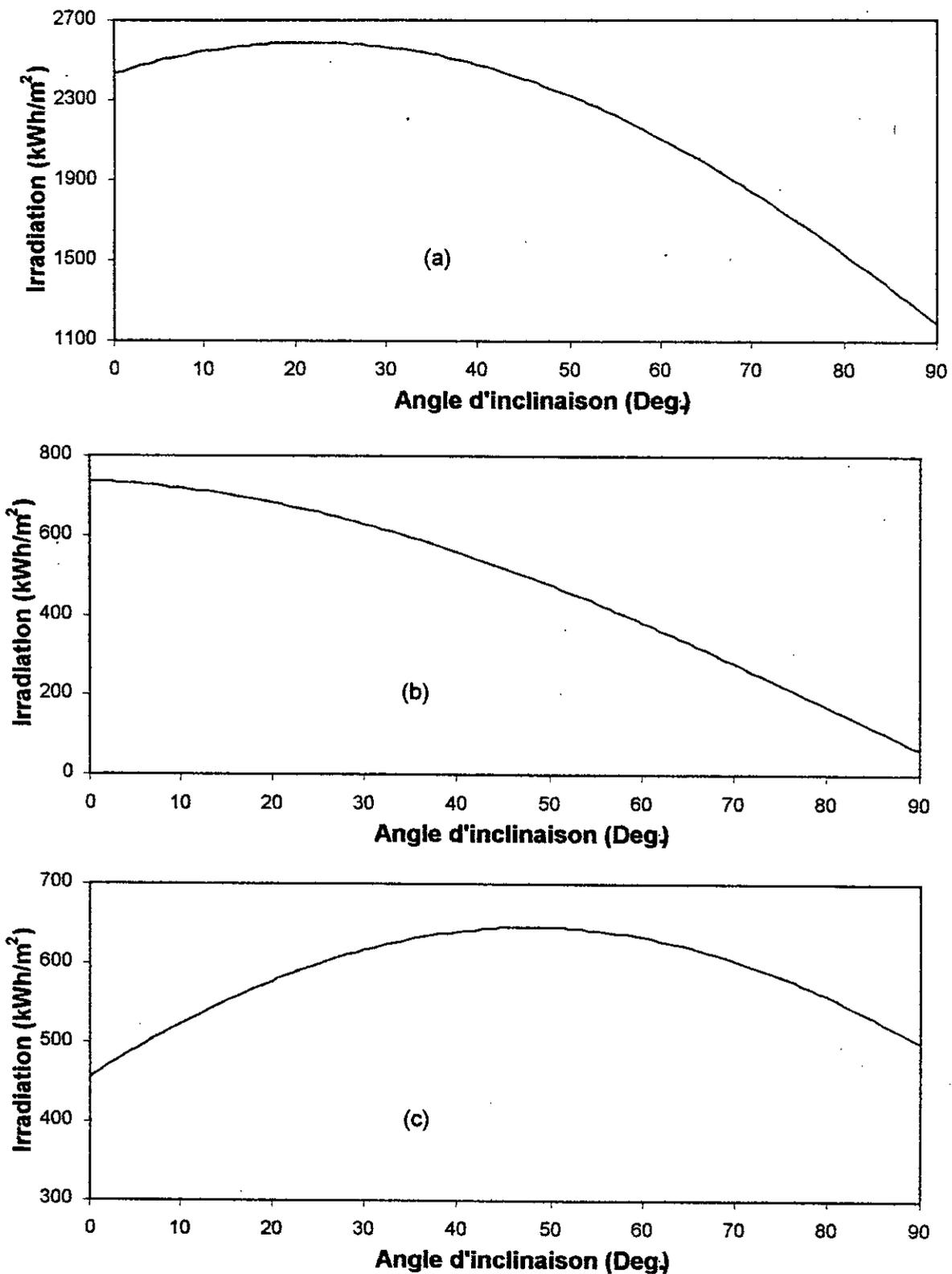


Figure 4.5 Evolution de l'irradiation en fonction de l'inclinaison pour le site de Tamanrasset : (a) Annuelle; (b) Estivale ; (c) Hivernale

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de modéliser le générateur photovoltaïque. Cette modélisation du générateur photovoltaïque tient compte des conditions réelles de fonctionnement d'éclairement et de température.

La prise en compte du fonctionnement dans des conditions réelles est importante car la plupart des modèles du générateur PV existants sont validés dans les conditions standards d'éclairement et de température (1000 W/m^2 ; 25°C).

A cet effet, nous avons comparé et validé différents modèles de la caractéristique Courant-Tension du générateur photovoltaïque, les plus utilisés, pour différents éclairements (400 ; 600 ; 800 et 1000 W/m^2) et différentes températures (25°C et 45°C).

En se basant sur les résultats obtenus pour les différents modèles, nous avons conclu que le modèle à cinq paramètres est le plus précis et converge dans tous les cas étudiés.

Le modèle explicite est le plus simple de ces modèles car il ne nécessite pas de méthodes itératives pour sa résolution, mais donne des résultats acceptables.

Le modèle à deux paramètres a présenté un mauvais ajustement. Une amélioration a été faite en utilisant l'équation de la résistance série du modèle à cinq paramètres au lieu de celle utilisée avec le modèle à deux paramètres.

De même, une amélioration de la précision a été faite dans le cas du modèle simplifié, en utilisant le facteur d'idéalité de 1,2 au lieu de 1.

Pour compléter notre étude sur la modélisation, deux méthodes de translation de la caractéristique I-V ont été aussi validées et évaluées pour différentes conditions d'éclairement et de température. Il ressort de cette étude que la méthode selon la norme CEI 891 est la plus précise.

Vu que la température du générateur PV est une donnée importante dans la modélisation, nous avons présenté à cet effet une méthode d'estimation de cette dernière, en fonction de la température ambiante, l'éclairement solaire et la température nominale de fonctionnement de la cellule NOCT.

Pour obtenir un outil de développement complet du générateur PV nous avons jugé utile d'introduire l'orientation du générateur. Dans ce travail on s'est limité à l'inclinaison optimale seulement. Selon la charge à alimenter, nous choisirons une inclinaison annuelle, estivale ou hivernale.

- En perspective à ce travail, nous pensons que pour avoir un outil de développement du générateur PV aussi complet que possible, qu'il faut :

- Augmenter la base de données avec d'autres températures et éclairagements et élargir cette étude avec différents types de modules et de configurations. Une modélisation floue serait envisagée dans ce cas sur la base des résultats obtenus.

Enfin, la présente étude a généré une communication qui à été présentée au sixième séminaire international de la physique énergétique SIPE6, (Bechar Octobre 2002).

Bibliographie

- [1] E. LORENZO. Solar electricity, proceedings of conference of engineering of photovoltaic systems, Progenza, Spain (1994).

- [2] M. ORGERET. Les piles solaires, le composant et ces applications, Masson (1985).

- [3] H. MATHIEU. Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Masson (1996).

- [5] J.D. CHATELIN. Traité d'électricité Vol. VII. Dispositifs à semiconducteur, Giorgi (1979).

- [6] I. JELINSKI. Composants électroniques de puissance, Vuibert (1996).

- [7] J. A. ROGER, A. LAUGIER. Les piles solaires du matériau au dispositif, du dispositif aux applications, Documentation Paris (1981).

- [8] B. EQUER. Energie solaire photovoltaïque Vol.1 Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, Ellipse (1993).

- [9] A. HADJ ARAB. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance. Thèse de magister Centre de Développement des Energies Renouvelables (1989).

- [10] G. W. HART. Residential photovoltaic system simulation electrical aspect, IEEE pp: 281-288 (1982).

- [11] S. SINGER, B. ROZENSHTEIN and S. SAURAZI. Characterisation of PV array output using a small number of measured parameters. Solar Energy, Vol.32, N°5, pp : 603-607 (1984).

- [12] M. HADDADI. Conception et optimisation de générateur à conversion photovoltaïque. Thèse de doctorat d'état en électronique Ecole Nationale Polytechnique (1994).

- [13] D. S. H. CHAN, J. R. PHILIPS and J. C. H. PHANG. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. *Solid State Electronics*, Vol.29, N° 3, pp :329-337 (1986).
- [14] J. APPELBAUM. Starting and steady-state characteristics of Dc motors powered by solar cell generators. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol EC-1, N°01 (1986).
- [15] M. AKBABA and M. A. A. ALATTAWI. A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications. *Solar Energy Mater Solar Cells* 37, pp :123-132. (1995).
- [16] J. A. GOW, C. D.MANNING. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proc.-Electr.Power Appl.*, Vol 146 N°2 pp : 193-200 (1999).
- [17] Q.KOU, S.A.KLEIN and W.A.BECKMAN. A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems. *Solar energy* Vol. 64, N°1-3, pp : 33-40, (1998).
- [18] M. Iqbal. *An introduction to solar irradiation*. Academic Press Toronto, (1983).
- [19] International Electrotechnical commission IEC. Publication 891. Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices. 15p. (1987).
- [20] A. RICAUD. *Photopiles solaires de la physique de la conversion PV aux filières, matériaux et procédés*. Presses polytechniques et univesitaires romandes Ch-1015 Lausanne, (1997).
- [21] F. CHENLO, F. FABERO and M.C. ALONSO. A comparative study between indoor and outdoor measurements. Informe final de proyecto: Testing, Norms, Reliability and Harmonisation. Joule II – Contract N. JOU2-CT92-0178. (1995).
- [22] R. BBERNARD, G. MENGUY and M. SCHWARTZ. *Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications*, Technique et documentation Lavoisier, Paris, (1983).
- [23] JOHN A. DUFFIE, WILLIAM A. BECKMAN. *Solar engineering of thermal processes*, Second edition. by John Wiley et Sons, Inc. USA, (1991).

Annexe A1

Détermination des paramètres du modèle à cinq paramètres

La caractéristique (I-V) est donnée par l'équation suivante :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{V + IR_s}{mV_t} - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{A1.1})$$

Pour $V=V_{oc}$, $I = 0$ on a :

$$0 = I_L - I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - 1 \right) - \left(\frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{A1.2})$$

Pour $V=0$; $I = I_{sc}$ on a :

$$I_{sc} = I_L - I_0 \left(\exp \frac{I_{sc}R_s}{mV_t} - 1 \right) - \left(\frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{A1.3})$$

remplaçant I_L par sa valeur dans l'équation A1.3 :

$$I_{sc} = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - I_0 \left(\exp \frac{I_{sc}R_s}{mV_t} - 1 \right) - \left(\frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{A1.4})$$

$$I_{sc} = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - \exp \frac{I_{sc}R_s}{mV_t} \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (\text{A1.5})$$

$$I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - \exp \frac{I_{sc}R_s}{mV_t} \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (\text{A1.6})$$

Dérivons l'équation (A1.1) par rapport au courant I :

$$1 = I_0 \left(\frac{dV}{dI} \frac{1}{mV_t} + \frac{R_s}{mV_t} \right) \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} - \frac{1}{R_{sh}} \frac{dV}{dI} - \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (\text{A1.7})$$

$$1 = - \frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} \frac{dV}{dI} - \frac{I_0 R_s}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} - \frac{1}{R_{sh}} \frac{dV}{dI} - \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (\text{A1.8})$$

$$-\frac{dV}{dI} \left(\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - \frac{I_0 R_s}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 = 0 \quad (\text{A1.9})$$

Pour $V=V_{oc}$ on a :

$$\left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} = -R_{s0} \quad (\text{A1.10})$$

On remplace (A1.10) dans (A1.9) on trouve :

$$R_{s0} \left(\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - \frac{I_0 R_s}{mV_t} \exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 = 0 \quad (\text{A1.11})$$

$$(R_{s0} - R_s) \left(\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (\text{A1.12})$$

Pour $I=I_{sc}$ on pose :

$$\left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{sc}} = -R_{sh0} \quad (\text{A1.13})$$

On remplace (A1.13) dans (A1.9) on trouve :

$$R_{sh0} \left(\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V + IR_s}{mV_t} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - \frac{I_0 R_s}{mV_t} \exp \frac{I_{sc} R_s}{mV_t} - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 = 0 \quad (\text{A1.14})$$

$$(R_{sh0} - R_s) \left(\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{I_{sc} R_s}{mV_t} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (\text{A1.15})$$

divisant (A1.15) par $(R_{sh0} - R_s)$ on trouve :

$$\frac{1}{R_{sh}} - \frac{1}{R_{sh0} - R_s} + \frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{I_{sc} R_s}{mV_t} = 0 \quad (\text{A1.16})$$

au point de puissance maximale on a :

$$I_m = I_L - I_0 \left(\exp \frac{V_m + I_m R_s}{m V_t} - 1 \right) - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (\text{A1.17})$$

de (A1.2) on a :

$$I_L = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{m V_t} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (\text{A1.18})$$

substituant I_L dans (A1.17) on obtient :

$$I_m = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{m V_t} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - I_0 \left(\exp \frac{V_m + I_m R_s}{m V_t} - 1 \right) - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (\text{A1.19})$$

$$I_0 \exp \frac{V_{oc}}{m V_t} + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} - \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - I_0 \exp \frac{V_m + I_m R_s}{m V_t} = 0 \quad (\text{A1.20})$$

Simplification :

Kennerud et Charles ont montré que les quatre paramètres m , R_s , I_0 , et R_{sh} peuvent être déterminés par la méthode de Newton-Raphson en résolvant simultanément les équations non linéaires (A1.6), (A1.12), (A1.16) et (A1.20). Cependant, cette méthode nécessite des calculs longs et des conditions initiales strictes pour avoir la convergence d'où; il est difficile de déterminer ces paramètres. Donc il convient d'avoir des expressions analytiques qui permettent de déterminer directement ces paramètres.

De l'équation (A1.6) : $\exp \frac{V_{oc}}{m V_t} \gg \exp \frac{I_{sc} R_s}{m V_t}$

comme $R_{sh} \gg R_s$ alors : $1 + R_s/R_{sh} \approx 1$

de l'équation (A1.12) : $\frac{I_0}{m V_t} \exp \frac{V_{oc}}{m V_t} \gg \frac{1}{R_{sh}}$

de l'équation (A1.16) : $\frac{I_0}{m V_t} \exp \frac{V + I R_s}{m V_t} \ll 10\%$ des termes restants .

A partir de ces simplifications, on obtient :

$$I_0 \exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - I_{sc} + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \quad (A1.21)$$

$$(R_{s0} - R_s) \frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V_{oc}}{mV_t} - 1 = 0 \quad (A1.22)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (A1.23)$$

$$I_0 \exp \frac{V_{oc}}{mV_t} + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} - I_m - I_0 \exp \frac{V_m + I_m R_s}{mV_t} = 0 \quad (A1.24)$$

à partir de ces quatre dernières équations, on obtient une expression analytique de m.
de l'équation (A1.21) :

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(- \frac{V_{oc}}{mV_t} \right) \quad (A1.25)$$

de l'équation (A1.22) :

$$R_{s0} - R_s = \frac{1}{\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V_{oc}}{mV_t}} \quad (A1.26)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{1}{\frac{I_0}{mV_t} \exp \frac{V_{oc}}{mV_t}} \quad (A1.27)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{1}{\frac{1}{mV_t} \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right)} \quad (A1.28)$$

substituant dans (A1.12) :

$$I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} + \frac{V_{oc} - V_m}{R_{sh}} - I_m = I_0 \exp \frac{V_m + I_m R_s}{mV_t} \quad (A1.29)$$

$$I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} - I_m = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(- \frac{V_{oc}}{mV_t} + \frac{V_m + I_m R_s}{mV_t} \right) \quad (A1.30)$$

$$\frac{I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} - I_m}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} = \exp \left(\frac{-V_{oc} + V_m + I_m R_{s0} - \frac{I_m m V_t}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}}{m V_t} \right) \quad (\text{A1.31})$$

$$\ln \left(\frac{I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} - I_m}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \right) = \frac{-V_{oc} + V_m + I_m R_{s0}}{m V_t} - \frac{I_m}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \quad (\text{A1.32})$$

finalement :

$$m = \frac{V_m + I_m R_{s0} - V_{oc}}{V_t \left[\ln \left(I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} - I_m \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \left(\frac{I_m}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \right) \right]} \quad (\text{A1.33})$$

et I_0 , R_s et I_L s'obtiennent par :

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(-\frac{V_{oc}}{m V_t} \right) \quad (\text{A1.34})$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{m V_t}{I_0} \exp \left(-\frac{V_{oc}}{m V_t} \right) \quad (\text{A1.35})$$

$$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{m V_t} - 1 \right) \quad (\text{A1.36})$$

Une fois ces paramètres (m , I_L , R_s et I_0) sont déterminés, la caractéristique I-V sera calculée par l'équation A1.1 en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

Annexe A2

Calcul des paramètres du modèle à deux exponentielles

Valeurs initiales :

$$R_{S0} = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{OC}} \quad (A2.1)$$

$$R_{Sh0} = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_{SC}} \quad (A2.2)$$

$$I_{L0} = I_{SC1} \quad (A2.3)$$

$$m_0 = 2 \quad (A2.4)$$

$$I_{010} = \frac{1}{2} \frac{I_{SC}}{\left(\exp\left(\frac{eV_{OC}}{kT}\right) - 1 \right)} \quad (A2.5)$$

$$I_{020} = \frac{1}{2} \frac{I_{SC}}{\left(\exp\left(\frac{eI_{SC}R_{S0}}{2kT}\right) - 1 \right)} \quad (A2.6)$$

La boucle d'itération :

$$X_{1v} = \frac{I_{01}}{v_t} \exp\left(\frac{eV_{OC}}{kT}\right) \quad (A2.7)$$

$$X_{2v} = \frac{I_{02}}{mv_t} \exp\left(\frac{eV_{OC}}{mkT}\right) \quad (A2.8)$$

$$R_{S0} = - \left[\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{OC}} + \frac{1}{X_{1v} + X_{2v} + \frac{1}{R_p}} \right] \quad (A2.9)$$

$$X_{1i} = \left[\frac{I_{01}}{v_t} \exp\left(\frac{eI_{SC}R_{S0}}{kT}\right) \right] \quad (\text{A2.10})$$

$$X_{2i} = \left[\frac{I_{02}}{mvt} \exp\left(\frac{eI_{SC}R_{S0}}{mkT}\right) \right] \quad (\text{A2.11})$$

$$R_{S0} = - \frac{1}{\frac{1}{\frac{dV}{dI} \Big|_{I_{SC} + R_{S0}} + X_{1i} + X_{2i}}} \quad (\text{A2.12})$$