

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre :

N° de Série :

MEMOIRE

PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTER EN PHYSIQUE

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

THEME

**Calcul des paramètres internes d'un Module Photovoltaïque
à partir des paramètres externes mesurés**

Présenté Par:

Maifi Iyes

Soutenu le : / /2010

Devant le jury :

Président : M. MARIR	Prof. Université Mentouri	Constantine
Rapporteur : T. KERBACHE	Prof. Université Mentouri	Constantine
Examineur : A.ZAATRI	Prof. Université Mentouri	Constantine
Examineur : R. CHENNI	M.C.A Université Mentouri	Constantine

∞ Dédicace ∞

Merci mon dieu de m'avoir permis d'arriver jusqu'ici et de m'avoir donné l'aptitude d'achever ce modeste travail que je dédie particulièrement à mes très chers et adorables parents d'avoir m'inculquer toutes les bases de mon savoir, que dieu nous les garde.

Je dédie aussi ce travail à mes frères et soeurs : Ramzi, Mohamed, Lamia, Basma.

A Douib Mourad.

A mes très chères amies : Mohamed, Fateh, Ouided.

Je n'oublierai pas de dédier cet ouvrage à tous ceux ou celles qui ont ne serai-ce qu'un moment partagé ma vie.

Lyes.M

❧ Remerciements ❧

Le grand merci revient encore et toujours à notre dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience et qui a éclairé mon chemin pour achever ce travail.

La réalisation de ce mémoire est indissociable de son contexte familial, scientifique et matériel. Nombreux sont ceux qui m'ont soutenu, aidé ou supporté. Je suis reconnaissante à tous d'avoir été là quand il le fallait, de s'être investi, d'avoir partagé, d'avoir contribué autant que possible, pour que ce mémoire se fasse.

Je tiens tout d'abord à remercier :

- Monsieur. Kerbache Taher, Professeur à l'université de Constantine, qui a tout d'abord accepté de m'encadrer, puis a soutenu, orienté, enrichi, critiqué, bref, dirigé... ma recherche. Je lui dois évidemment aussi beaucoup pour le soutien moral et quotidien qu'il m'a apporté, ainsi que la patience qu'il a su montrer.

-Les membres de mon Jury :

- ❖ Madame M.Marir Professeur à l'Université de Constantine qui a bien voulu présider ce jury.*
- ❖ Monsieur A.Zaatri, Professeur à l'Université de Constantine et M. R.Chenni, Maître de Conférences à l'Université de Constantine auxquels je suis très reconnaissante d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.*

Tableau de acronymes

Variables	Description	Unité
A	Aire du capteur PV	m²
b	Coefficient déterminant le taux de variation de la température en fonction de la vitesse du vent	(s/m)
C	Capacité calorifique du module PV	(J/K)
E	Force électromotrice de l'accumulateur	V
G	Rayonnement incident	(W/m²),
I	Courant aux bornes du capteur,	A
K	Rendement faradique de l'accumulateur	/
L	Longueur	m
P	Puissance	W/m².
P	Périmètre du capteur	m
T	Température	K⁰
R	Résistance	(Ω)
U	La tension	V
W	Vitesse du vent	(m/s)
w	Largeur	m
Fc	Facteur de transfert par conduction	
Fv	Facteur de transfert par convection	
Sm	La surface de capteur (0.3745 m ² pour notre etude)	m²
Constante	Description	
k	Constante de Boltzmann, $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K.	
D	Canstant.	
Nc	Paramètre d'ajustement, est égal au nombre de cellules en série	
G_r	Rayonnement de référence (1000W/m ²).	
G_{NOCT}	Rayonnement correspondant au NOCT (800 W/m ²).	
T_{ext.NOCT}	Température ambiante correspondant au NOCT (20°C).	
T_r	Température de jonction de référence (25 °C).	
ε_g	Gap du matériau, vaut 1.12eV pour le silicium cristallin).	
q	Charge élémentaire, $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C.	
c0, c1, c2	Constantes	
Indice	Description	
a	Ambiante , air	
am	ambiante	
ar	Arriere	
av	Avant	
bat	batterie	
c	Cellule, convectif	
ch	Charge	
d	Diode	
dch	Décharge	
eff	Effectif	
el	Electrique	
ext	Exterieur	
i, n, j	Nombre de cellule.....	
id	Incident direct	
if	Incident diffus	
in	Entre	
inf	Inferieure	
l	lumiere	
m	Mesures	
max	Maximum	

min	Minimum	
mod	Module	
mp	Puissance maximale	
oc	Circuit ouvert	
out	Sortie	
p	Paroi, parallele	
pv	Module Photovolotaique	
r	Reference, radiatif	
ref	Reflechi	
s	Serie	
sc	Court circuit	
stoct	Stocker	
sup	Superieure	
te	Total effectif	
o	Saturation	
Lettres grecques	Description	Unité
β	Angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du capteur.	rad
μ	Coefficients de dépendance en température	/
γ	Paramètre d'ajustement	/
α, τ	Coefficient d'absorption	/
η	Rendement électrique	/
\emptyset	Flux	W/m²
ε	Emissivité	
λ	Conductivité	W/m.K
τ	Taux de transmission du vitrage	
Coefficient	Description	
AM	Nombre d'air -masse	
C₀, C₁, C₂, C₃	Coefficients déterminés expérimentalement	
f₁	Fonction du nombre d'air -masse,	
f₂	Fonction de l'angle d'incidence β du rayonnement sur le capteur PV ,	
F	Facteur de forme	
h	Coefficient d'échange thermique global	
P₁, P₂, P₃, P₄	Paramètres à déterminer expérimentalement	
P	Coefficients constantes	
Q	Etat de charge	
T₁	Coefficient déterminant la limite supérieure de température pour une vitesse de vent faible	
T₂	Coefficient déterminant la limite inférieure de température pour une vitesse de vent élevée	
ΔT	Coefficient déterminant la différence de température entre la face arrière du module et la cellule PV	

Sommaire

Table des figures	
Table des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre I : La conversion de la lumière en électricité	
1. Introduction.....	3
2. L'absorption de la lumière.....	4
3. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.....	5
4. La collecte des charges.....	9
4.1. Dopage des semi-conducteurs	9
4.2. Jonction p-n et p-i-n.....	10
5. Caractéristique courant tension	11
6. Puissance et rendement	14
7. Conclusion	16
Chapitre II : Etude Théorique	
1. Introduction.....	17
2. Modèle 'Sandia'.....	17
3. Modèle 'Cenerg'.....	19
4. Modèle 'Madison'.....	20
5. Sélection d'un modèle.....	21
6. Calcul de la puissance électrique.....	22
6.1. Le modèle à une diode.....	22
6.2. Courbe caractéristique du module PV.....	23
6.3. Modèle a plusieurs diodes.....	24
7. Méthode générale de résolution en fonction des 'données constructeur'.....	25
7.1. Calcul de la puissance disponible.....	33
7.2. Prise en compte de l'angle d'incidence.....	34
8. Température de jonction.....	35
8.1. Modèle 'Noct'.....	35
8.2. Modèle 'Sandia'.....	37
8.3. Modèle détaillé.....	38
9. Autres composants.....	43
9.1. Stockage.....	43
9.2. Onduleur.....	44
10. Conclusion	45
Chapitre III : Modélisation électrique d'un modèle Photovoltaïque	
1. Introduction	46
2. Ecrire le modèle électrique.....	46
3. Déterminations des paramètres	49
3.1. Le paramètre de R_p	49
3.1.1. Théorie	49
3.1.2. Application numérique.....	50
3.2. Le paramètre R_S	52
3.2.1. Théorie	52
3.2.2. Application numériques.....	52
3.3. Les paramètres de I_{0ref} et γ	54

3.3.1. Théorie.....	54
4. Régressions linéaires.....	54
5. Analyses des résultats.....	55
6. Facteur de conversion	66
6.1. Application numérique	67
7. Première simulation	70
8. conclusion	73

**Chapitre IV:Modélisation thermique d'un module
Photovoltaïque**

1. Introduction	74
2. comportement thermique des cellules photovoltaïques.....	74
3. Détermination d'un modèle thermique équivalent.....	75
3.1. Le modèle thermique.....	76
3.2. Détermination de paramètres de modèle thermiques.....	77
3.3. Influence du vent	78
3.4. Détermination des paramètres du modèle thermique.....	80
4. Deuxième simulation.....	83
5. Conclusion.....	85
Conclusion générale	86
Référence bibliographique	
Annexe	
Résumé	

Table des figures

Figure I .1. Réflexion, transmission et absorption.....	4
Figure I.2. Spectre solaire et portions exploitables par le silicium cristallin.....	6
Figure I.3. Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur : a) Dans l'obscurité. B) Sous illumination.....	8
Figure I.4. a) Silicium par (intrinsèque). b) Silicium de type n. c) Silicium de type p.....	10
Figure I.5. Représentation schématique d'une jonction p-n.....	11
Figure I.6. Caractéristique courant tension d'une diode au silicium dans l'obscurité et sous illumination.....	12
Figure I.7. Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	14
Figure I.8. Puissance maximale sur une caractéristique courant tension..	15
Figure II.1 . modèle à une diode.....	22
Figure II.2 . courbe caractéristique d'un module PV de puissance nominale 50W.....	23
Figure II.3. Modèle à plusieurs diodes.....	25
6. Figure II.4. Exemple de variation du coefficient $\square U_{oc}$ en fonction de la résistance série, pour une cellule à base de silicium cristallin.....	29
Figure II.5. Algorithme de résolution des paramètres intermédiaires du modèle Madison.....	30
Figure II.6. Coefficient de variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la résistance série, avec zone de convergence en dehors des limites physiques.....	31
Figure II.7. Illustration de la méthode qui consiste à calculer les	33
Figure II.8. Bilan thermique du module PV	38
Figure II.9. Exemple de courbe de rendement de l'onduleur \square en fonction de la puissance de sortie Pont., pour un onduleur de puissance nominale 4kW. Le rendement est en général supérieur à 90 % dans les limites normales de fonctionnement.....	45
Figure III.1. Le schéma équivalent de module photovoltaïque à deux diodes.....	47
Figure III.2. Le schéma équivalent de module photovoltaïque à une diode.....	48
Figure III.3. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèle a une température 296.15 °k.....	57
Figure III.4. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèle a une température 291.95 °k.....	58
Figure III.5. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèle a une température 295.95 °k.....	58
Figure III.6. Comparaison entre les trois température mesures pour le silicium poly cristallin pour le modèle a deux diode.....	59
Figure III.7. Comparaison entre les trois température mesures pour le silicium poly cristallin pour le model a une diodeonstructeur'.....	59

Figure III.8. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium mono cristallin pour les deux modèle a une température 296.15 °k.....	61
Figure III.9. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium mono cristallin pour les deux modèle a une température 291.95°k.....	62
Figure III.10. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèle a une température 295.95 °k.....	62
Figure III.11. Comparaison entre les trois températures mesures pour le silicium poly cristallin pour le model a une diode.....	63
Figure III.12. Comparaison entre les trois t températures mesures pour le silicium mono cristallin de notre modèle à deux diodes.....	63
Figure III.13. Comparaison entre mesures et calculs pour le silicium poly cristallin éclairé pour les deux modèle a une température 296.15 °k	65
Figure III.14. Comparaison entre mesures et calculs pour le silicium mono cristallin éclairé pour les deux modèle a une température 296.15 °k.....	65
Figures III.15. Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium.....	68
Figures III.16. Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium mono cristallin.....	68
Figures III.17. Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium poly cristallin des jours de beau temps.....	69
Figures III.18. Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium mono cristallin des jours de beau temps.....	69
Figure IV.1. Influence de la température sur le comportement électrique des modules photovoltaïques.....	75
Figure IV.2. Calcule hv et hc pour le silicium poly cristallin modèle UD...	81
Figure IV.3. Calcule hv et hc pour le silicium poly cristallin modèle DD...	81
Figure IV.4. Calcule hv et hc pour le silicium mono cristallin modèle UD.	82
Figure IV.5. Calcule hv et hc pour le silicium mono cristallin modèle DD.	82

Table des tableaux

Tableau I.1. Performances photovoltaïques théoriques maximales des semi conducteurs pour un rayonnement AMO d'une puissance de 1350 W/m ²	8
Tableau II.1. Paramètres intermédiaires du module PV (type 'PWX 500', puissance crête : 50 Wc, et cellules à base de silicium poly cristallin), calculés dans CA-SIS et COMFIE.....	32
Tableau II.2. Exemple de valeurs pour deux types d'encapsulation.....	37
Tableau III.1. calcule de la résistance parallèle du silicium poly cristallin.....	51
Tableau III.2. Calcule de la résistance parallèle du silicium mono cristallin.....	51
Tableau III.3. Calcule de la résistance série du silicium poly cristallin.....	53
Tableau III.4. Calcule de la résistance série du silicium mono Cristallin.....	53
Tableau III.5. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=296.15 °K.....	56
Tableau III.6. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=291.95 °K.....	56
Tableau III.7. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=295.95 °K.....	57
Tableau III.8. Résultat du calcul du silicium mono cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=296.15 °K.....	60
Tableau III.9. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=291.95 °K.....	60
Tableau III.10. Résultat du calcul du silicium mono cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=295.95 °K.....	61
Tableau III.11. Résultat du modèle a double diode et avec une diode pour le silicium poly cristallin éclairé.....	64
Tableau III.12. Résultat du modèle a double diode et avec une diode pour le silicium mono cristallin éclairé.....	64
Tableau III.13. Simulation de résultats pour le silicium poly cristallin.....	72
Tableau III.14. Simulation de résultats pour le silicium mono cristallin... ..	72
Tableau IV.1. Calculs du facteur Fc pour le model a seule diode.....	77
Tableau IV.2. Calculs du facteur Fc pour le model a double diode.....	78
Tableau IV.3. résultats de mesures effectuées de nuit pour le model a une seule diode.....	79
Tableau IV.4. résultats de mesures effectuées de nuit pour le model a double diode.....	79
Tableau IV. 5. Simulation de résultats pour le silicium poly Cristallin.....	84
Tableau IV.6. Simulation de résultats pour le silicium mono cristallin.....	84

Introduction

Historique :

Les énergies renouvelables ont connus une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2% des émissions de gaz à effet de serre des pays riches sur la période 2002-2012 par rapport à 1990. A cette même période il a été mis en place au niveau national le Plan National de Lutte Contre le Changement Climatique ainsi que le Plan National d'Amélioration de l'efficacité énergétique.

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité, elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïque composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Problématique :

Qu'il s'agisse d'une petite installation indépendante dans un endroit non relié au réseau électrique, d'une centrale photovoltaïque alimentant un sous réseau important, ou d'un système appartenant à un particulier et connecté au réseau, il est utile, voire même, indispensable de pouvoir estimer correctement la taille et la structure de l'installation photovoltaïque, compte tenu des besoins énergétiques et des contraintes qui s'imposent à l'utilisateur.

Lorsque l'on veut dimensionner une installation photovoltaïque, c'est-à-dire évaluer le nombre de modules nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques, il importe de connaître les caractéristiques précises des modules utilisés, ainsi que les données météorologiques correspondant au lieu d'installation.

De même, afin de simuler de manière approchée le fonctionnement à moyen ou long terme d'un module, nous devons disposer d'un modèle reflétant au mieux la réalité, c'est-à-dire prenant en compte un nombre de paramètres tels qu'il conduise à une précision satisfaisante, celle-ci peut s'apprécier par exemple sur la base d'une erreur relative sur la production d'électricité au moins inférieure à 10%.

Les logiciels de simulation existant sur le marché, dont il est difficile d'évaluer la fiabilité étant donné l'absence de précisions concernant les modèles qu'ils utilisent, ne s'appuient souvent que sur un nombre restreint de paramètres électriques, thermiques.

Cela est sans doute dû au souci d'imposer un minimum de contraintes à l'utilisateur, qui ne souhaite pas toujours devoir effectuer une série de mesures destinées à déterminer ces différents paramètres.

Nos objectifs :

Nous allons tenté dans cette étude de proposer une modélisation plus complexe, laissant plus de choix à l'utilisateur quant au nombre de paramètres et aux degrés de précision, les éléments de cette étude on été structurées dans quatre chapitres de la façon suivante :

Chapitre premier, on définit les caractéristiques de base et le principe de fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque.

Suivi du second chapitre, on expose les modèles de calculs les plus connus et utilisés dans le domaine du photovoltaïque, est suivant les données disponibles on sélectionne un modèle de calcul qui répond a notre problématique.

Dans le chapitre trois, Au moyen de mesures effectués sur les panneaux, nous tenterons d'abord d'établir un modèle électrique des cellules photovoltaïque en déterminant les divers paramètres : courants de fuites et facteurs de qualité des diodes, résistances série et parallèle.

La prise en compte de l'échauffement des panneaux, a partir de mesures réalisées avec éclairage naturel, nous entraînera ensuite dans le chapitre IV à introduire et à affiner de nouveaux paramètres, caractérisant les pertes thermiques et l'influence du vent.

Chapitre I

La conversion de la lumière en électricité

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons aborder le cœur du phénomène photovoltaïque, c- a -d, la conversion de la lumière en électricité.

Le mot photovoltaïque vient du mot grec photos qui signifie lumière et du mot volta relatif au nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique .Mais c'est le savant français Antoine becquerel qui le premier, en 1839 [2], mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie : la variation de la conductivité d'un matériau sous de la lumière.

C'est dans les appareils photos que les premières cellules furent utilisées, pour mesurer le taux de lumière, alors qu'avant l'arrivé du silicium, elles étaient a base de sélénium.

A la différence d'une pile classique, dont l'énergie est stockée et restituée a volonté, la photopile ne produit de l'électricité que si elle est exposée a la lumière,cette différence est fondamentale,tout élément photovoltaïque est un convertisseur d'énergie qui transforme la lumière en courant électrique.

En se servant d'une analogie hydraulique, on pourrait comparer la pile électrique à une citerne d'eau, et la photopile à une source naturelle dont le débit serait proportionnel à l'ensoleillement a un instant donné.

La conversion d'énergie, met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

-  l'absorption de la lumière dans le matériau
-  le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
-  la collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque.

2. L'absorption de la lumière :

La lumière se compose de photons, (grains de lumière), chacun, porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon).

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer à travers les objets transparents pour notre œil et laissent passer la lumière visible.

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques (figure I.1):

- ✚ la réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- ✚ La transmission : la lumière traverse l'objet.
- ✚ L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

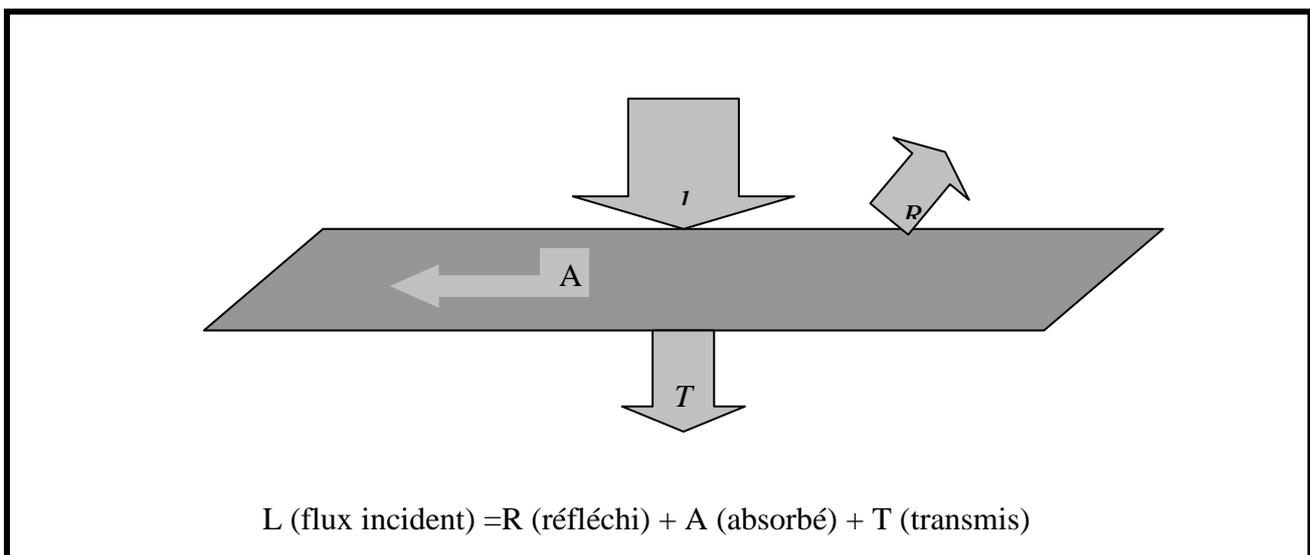


Figure I .1. Réflexion, transmission et absorption

Ce sont les propriétés optiques du matériau rencontrés qui conditionnent la répartition de ces diverses contributions.

Prenons l'exemple d'un morceau de verre coloré en rouge, il transmet la lumière rouge, puisque notre œil la perçoit, la partie réfléchie s'élève à 8% du flux lumineux, toutes couleurs confondues, du fait de l'indice de réfraction du verre.

Et le reste de la lumière bleu, jaune, etc. Sera absorbé par la matière.

Cette absorption sera perceptible au toucher sous éclairage intense car le verre va s'échauffer. En effet, dans la plupart des matériaux, la part absorbée de la lumière est convertie en chaleur, c'est-à-dire en rayonnement infrarouge (de longueur d'onde comprise entre $1 \mu\text{m}$, limite rouge du spectre visible, et 1mm , début des ondes radio).

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique, il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir.

La lumière du soleil ou des autres sources artificielles, on prendra le soin également de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission.

3. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques :

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité.

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi-conductrice, tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) est un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leurs énergies aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leurs permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau, ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur.

En régime permanent, l'électron libéré laisse un trou qui se traduit par une charge positive, si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite, on génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

Ce phénomène physique, dit de photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car ils comportent des électrons libérables ; contrairement à un isolant où tous les électrons sont fortement liés ; et à un conducteur électrique, dans lequel il existe une forte densité d'électrons totalement libres.

On comprend aisément qu'il existe, tout dépend du matériau, un seuil d'énergie minimum, nécessaire à cette libération des électrons par les photons. Si ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes (nombre d'orbitales et quantité d'électrons par atome) et donc les énergies mises en jeu également.

On appelle ce seuil le gap optique du matériau ou la largeur de la bande interdite. En effet, si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électrons-trou et ne sera pas absorbé. Les propriétés optiques et électroniques sont donc intimement liées.

Si un photon a une énergie supérieure ou égale au gap optique, c'est qu'il a une longueur d'onde inférieure à une certaine valeur, puisque ces deux grandeurs sont inversement proportionnelles :

$$\epsilon_g = \frac{H.C}{\lambda} \dots\dots\dots(I.1)$$

Ce qui se traduit par : ϵ_g (En ev) = $\frac{1.24}{\lambda}$ (en nm)

Pour le silicium cristallin, le gap optique est de $\epsilon_g = 1.12$ ev, un photon possédant cette énergie a une longueur d'onde de $1.13\mu\text{m}$ (dans le proche infrarouge). Pour le silicium amorphe, $\epsilon_g = 1.77$ ev. Un photon ayant cette énergie est en lumière rouge, avec une longueur d'onde de 700nm ($=0.7\mu\text{M}$). Tous les photons d'énergie supérieure à ces seuils, et donc de longueurs d'onde inférieures, sont opérationnels pour la conversion photovoltaïque [4].

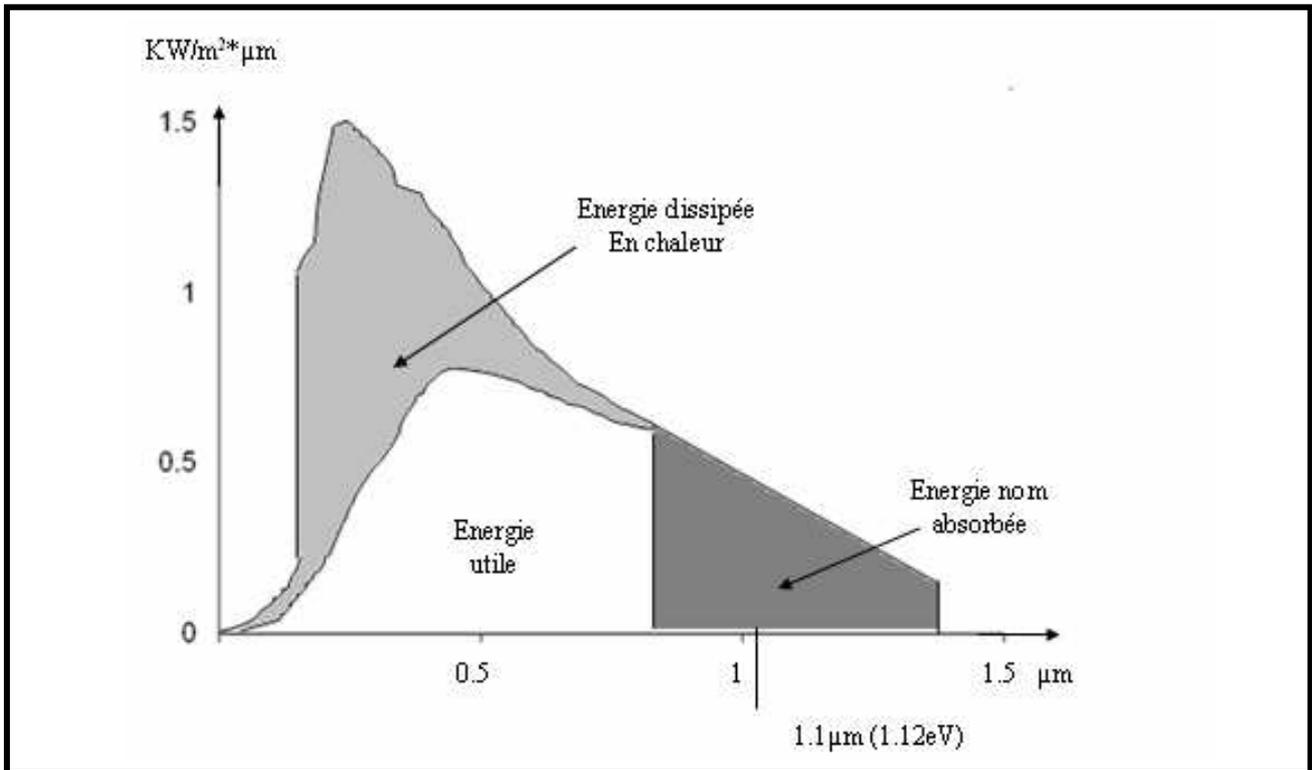


Figure I.2. Spectre solaire et portions exploitables par le silicium cristallin

La figure I.2 permet de visualiser la portion du spectre solaire qui peut être convertie en énergie électrique dans le cas du silicium cristallin. La partie du spectre et gris foncé est donc impossible à convertir car elle n'est pas absorbée dans le matériau.

Expliquons maintenant ce qu'il devient de la portion en gris clair, et pour ce faire, nous aurons recours à une autre représentation du transfert énergétique des photons aux particules chargées. La figure I.3 représente les différents états d'énergie dans le matériau semi-conducteur.

Dans le domaine d'énergie situé sous le gap optique se trouvent les électrons de valence du matériau, c'est-à-dire ceux qui sont liés aux atomes. Dans la bande de conduction se trouvent ceux qui en ont été extraits et sont libres de circuler dans le matériau. Elle est donc vide quand le semi-conducteur n'est pas illuminé. Lorsqu'un photon a une énergie suffisante, il est absorbé et fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Que se passe-t-il s'il a une énergie supérieure à ε_g , le photon 2 de la figure I.3b génère une paire électron-trou à un niveau supérieur, mais l'excédent est perdu par un processus de désexcitation spontanée qui produit de la chaleur et ramène son énergie à ε_g donc quelle que soit son énergie, pourvu qu'elle soit supérieure à ε_g chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou d'énergie ε_g .

Puisque l'on connaît l'énergie disponible à chaque longueur d'onde d'un spectre solaire donné (AMO ou AMI1, 5 par exemple), on peut quantifier la quantité de photons (énergie solaire totale à cette longueur d'onde divisée par l'énergie du photon) et en additionnant tous ces photons calculer, le courant et la puissance totale qu'ils peuvent générer, en fonction du gap optique du matériau. Il s'agit de performances électriques purement théorique, que l'on pourrait qualifier d'« ultimes » : elle ne prennent pas en compte les pertes par réflexion, et supposent que toutes les paires électrons-trous photons générées sont collectées, ce qui n'est pas le cas, nous le verrons au paragraphe suivant.

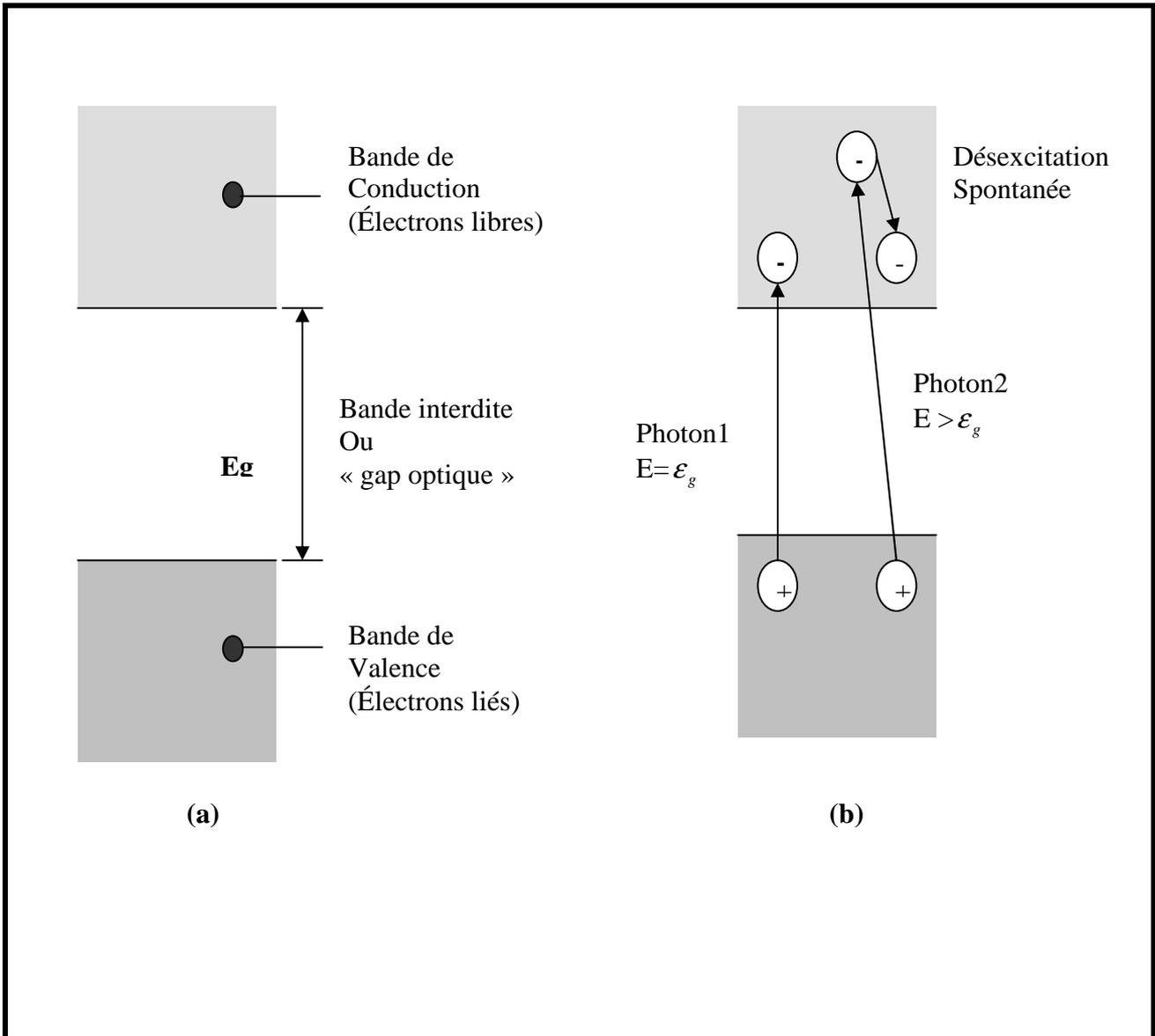


Figure I.3. Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur : a) Dans l'obscurité. B) Sous illumination

	Silicium cristallin $\epsilon_g = 1.1 \text{ ev}$	Arséniure de gallium $\epsilon_g = 1.4 \text{ ev}$
Courant (mA/cm^2)	53.5	39
Puissance (Mw/cm^2)	58.8	55
rendement	0.44	0.41

Tableau I.1. Performances photovoltaïques théoriques maximales des semi conducteurs pour un rayonnement AMO d'une puissance de 1350 W/m²

Ces données sont intéressantes car elles donnent le rendement théorique maximal [13], que l'on ne pourra jamais dépasser avec les matériaux photovoltaïques dont on dispose à ce jour, et avec l'énergie lumineuse disponible sur terre, celle du soleil. On voit donc qu'à ce jour, il n'est pas possible de convertir plus de 44% du spectre solaire présent au-dessus de l'atmosphère [4].

Rappelons que cela tient compte de deux types de pertes inévitables :

- ✚ l'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap optique ;
- ✚ la perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique.

Pour convertir un taux plus élevé d'énergie lumineuse, il faudrait que tous les photons de la source de lumière aient la même énergie (un soleil rouge, par exemple !) et que l'on dispose d'un matériau dont le gap optique correspond exactement à cette énergie.

4. La collecte des charges :

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent, il faut donc les « attirer » hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique. Sinon, elle se recombinent : l'électron, chargé négativement, neutralisant le « trou » chargé positivement. Autrement dit, les électrons libérés retrouveraient leur état initial à la périphérie de leurs atomes : cela libérerait de l'énergie thermique (chaleur) mais aucune énergie électrique.

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans le semi-conducteur. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté.

C'est possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constituée d'une partie dopée au phosphore (p), dite de type « n », accolée à une partie dopée au bore (B), dite de type « P ». C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives. Voyons cela plus en détail.

4.1. Dopage des semi-conducteurs :

Le dopage des semi-conducteurs purs va permettre d'amener des charges excédentaires qui amélioreront la conductivité du matériau.

Dans la figure I.4 on représente une vue schématisée, à plat, des atomes de silicium (à quatre électrons dans la couche externe) qui sont chacun liés à quatre atomes de silicium.

À l'état pur, le silicium dit intrinsèque n'est pas très photoconducteur.

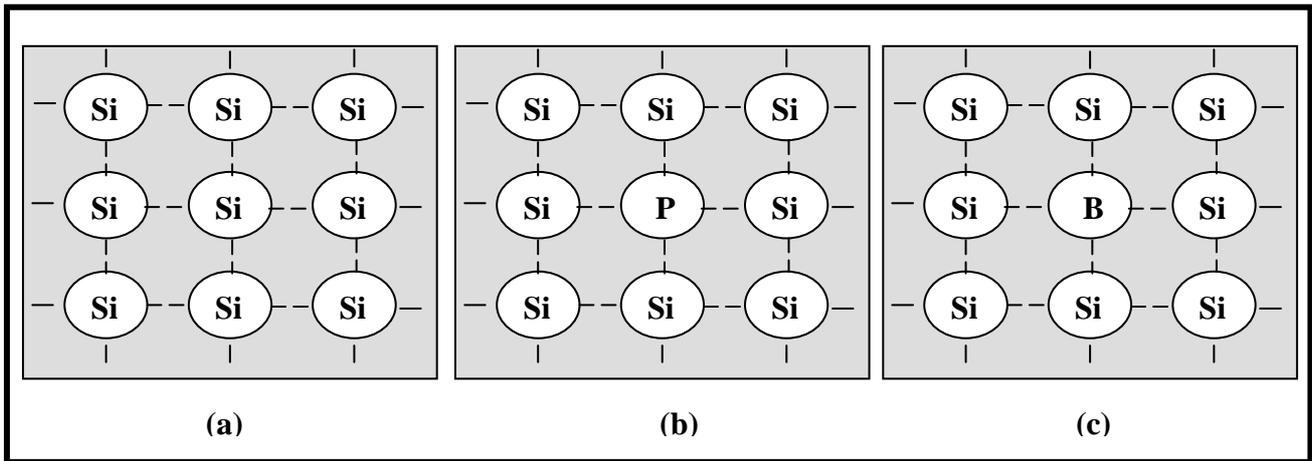


Figure I.4. a) Silicium pur (intrinsèque). b) Silicium de type n. c) Silicium de type p

On le dope avec les atomes étrangers du phosphore, qui ont cinq électrons dans leurs couches externes, un électron par atome de phosphore ne pourra pas se lier avec ces correspondant du silicium, il y'aura alors un excédent de charges négatives dans le cristal (figures I.4 b).le matériau sera donc potentiellement (donneur) d'électrons, disponible pour la conduction électrique, et le silicium ainsi dopé est appeler silicium de type n.

Par symétrie, on peut également dopé le silicium avec du Bor qui a seulement trois électrons dans sa bande de valence. Le résultat est l'apparition d'un excédent de trous, donc de charges positives, puisqu'il manque un électron a chaque atome de Bor pour compléter les quatre électrons du silicium (figure I.4 c) .le matériau est a l'inverse du précédent (accepteur) d'électrons. Ce matériau ainsi dopé est appeler silicium du type p.

4.2. Jonction p-n et p-i-n :

La mise en contacte des deux zones a dopage opposé dans un semi conducteur constitue un élément fort connu : la diode. A l'interface ou les concentrations d'atomes étrangères font passer le silicium du type p au type n, apparaît une région appeler zone de charge d'espace qui provient de la tendance des électrons excédentaires de la couche n a vouloir passer du coté p ou ils sont attirer par les trous excédentaires, et de la tendance des trous a vouloir passer du cote n par réciprocité. Cet échange de porteurs de la zone de charges spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange de charges et rétablir l'équilibre thermique.

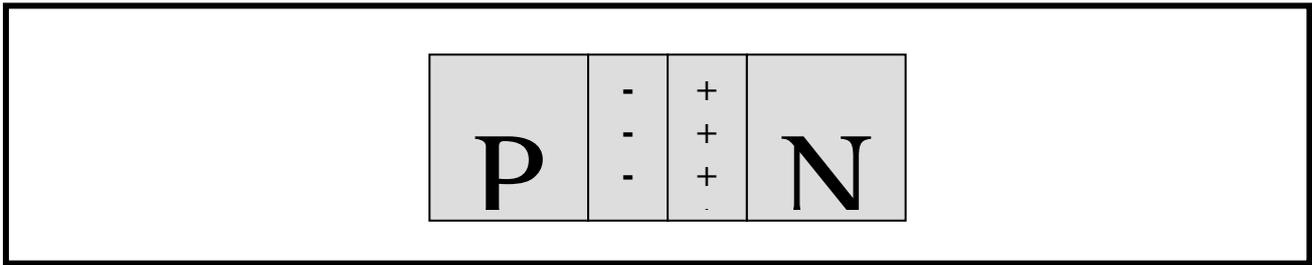


Figure I.5. Représentation schématique d'une jonction p-n

La cellule solaire est donc le plus souvent une tranche de silicium dopé p d'un côté et, n de l'autre, à laquelle on ajoute des contacts électriques pour collecter le courant. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, l'apparition d'un photo courant indépendant de la tension est proportionnel au flux lumineux et la surface de la cellule.

Mais cette simple structure p-n, adaptée au silicium cristallin, n'est pas suffisante dans tous les cas. Par exemple, un silicium amorphe dopé du type p n'est pas un très bon photoconducteur, et il est préférable que la conversion photovoltaïque se produise dans un matériau non dopé, donc intrinsèque, et noté i. La cellule au silicium amorphe classique se compose donc de trois couches : p-i-n.

La couche i placée au centre du dispositif est la plus épaisse, et sert à la conversion des charges. Les couches p et n, quant à elles permettent la création du champ électrique interne qui s'étend dans toute la couche i, ce qui favorise la séparation des charges.

Cette jonction p-i-n peut même être doublée ou triplée pour la forme multi jonction.

5. Caractéristique courant tension

On a vu que la jonction servant de base à la photopile est une diode. Lorsqu'elle est illuminée, il apparaît dans cette diode un photo courant qui dépend de la quantité de la lumière incidente. D'où le terme photodiode, également employé pour désigner une photopile.

On a représenté sur la figure I.6 les deux caractéristiques courant tension de cette photodiode : dans l'obscurité est en pointillés, et sous illumination en trait plein.

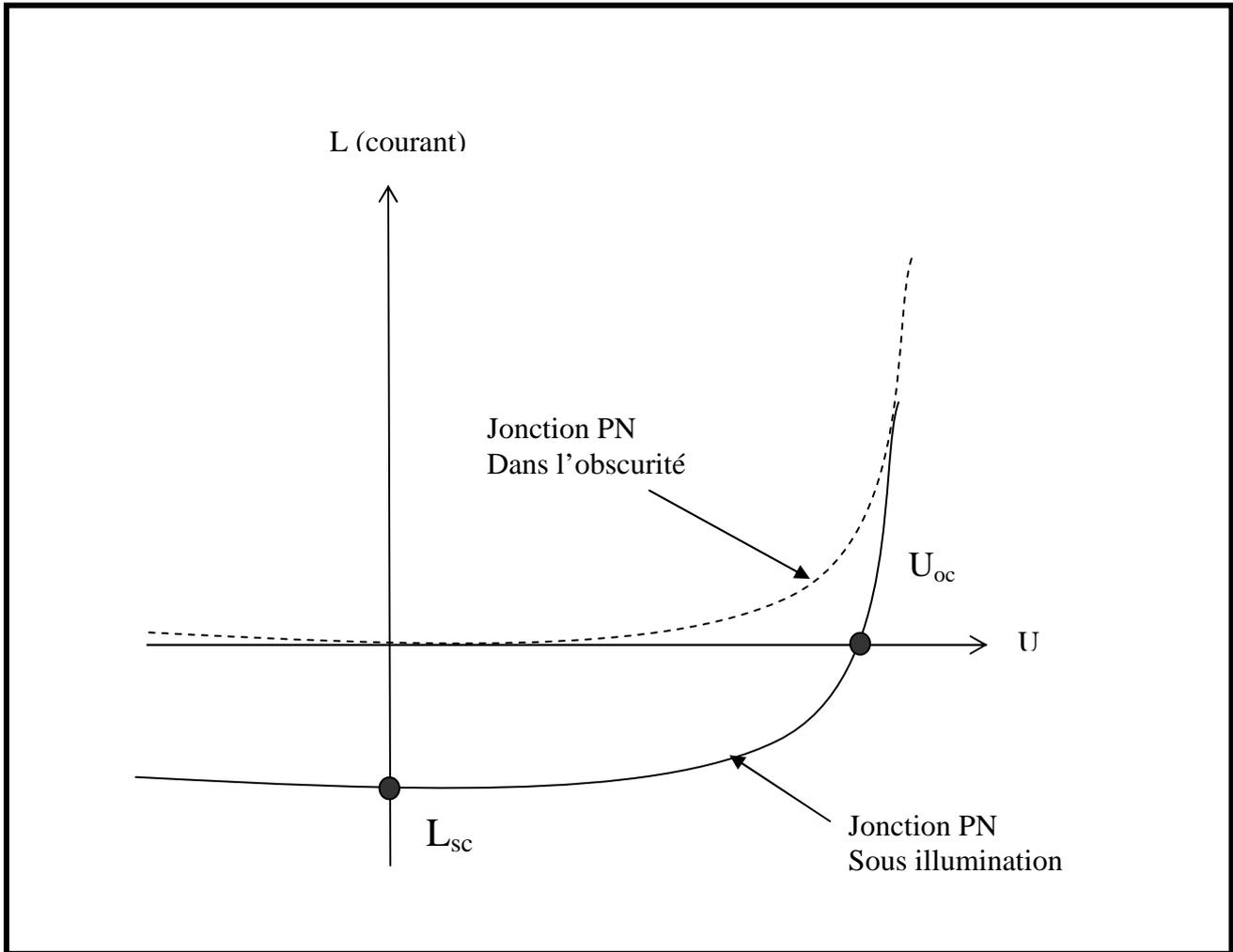


Figure 1.6. Caractéristique courant tension d’une diode au silicium dans l’obscurité et sous illumination

On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d’une valeur : I_{cc} , qui traduit le génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appeler courant de court circuit, puisque le courant que génère la photopile sous la lumière est à tension nulle (en court circuit). La valeur U_{co} a l’inverse, est à tension de circuit ouvert, tension de la photopile sous la lumière a courant nul.

$$I = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U}{U_t}} - 1 \right) \dots\dots\dots (I.2)$$

Avec :

- U** : la tension imposé à la diode.
- $U_t = kT/q$** : constante
- $K=1.38 \times 10^{-23}$** : la constante de Boltzmann
- $q= 1.602 \times 10^{-19}$** : charge de l’électron
- T** : température absolue en K^0
- I_0** : le courant de saturation de la diode.

Sous illumination, avec un changement de signe purement conventionnel pour le courant, cette relation devient :

$$I = I_l - I_s \left(e^{\frac{U}{U_i}} - 1 \right) \dots\dots\dots(I.3)$$

Avec :

I_l : le photo courant.

A l'aide de cette équation, on peut quantifier les paramètres suivants :

Le courant de court-circuit, **I_{sc}**, valeur du courant lorsque la tension **U=0**.

Il vaut : **I_{oc}=I_l**

Et la tension de circuit ouvert, **U_{oc}**, lorsque le courant est nul :

$$U_{oc} = \frac{KT}{q} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_l}{I_0} \right)$$

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le ln de **I_l**, donc avec le ln de l'illumination. On revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme **KT/q**. En effet, le courant de saturation, **I₀**, dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme **KT/q**. donc la tension du circuit ouvert **U_{oc}** baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

On peut compléter le schéma équivalent de la cellule solaire (figure I.6) en ajoutant deux résistances pour tenir compte des pertes internes.

R_s : représente la résistance serrée qui tient compte des pertes ohmiques du matériau, de la métallisation et du contacte métal/semi-conducteur.

R_p : représente une résistance parallèle (ou résistance de fuites) provenant des courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, par le bord en particulier à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés.

L'équation de la caractéristique courant tension devient alors :

$$I = I_l - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_s)}{K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \dots\dots\dots(I.4)$$

Et l'on remarque que le courant de court circuit **I_{sc}**, lorsque **I=0**, n'est pas strictement égale à **I_l**.

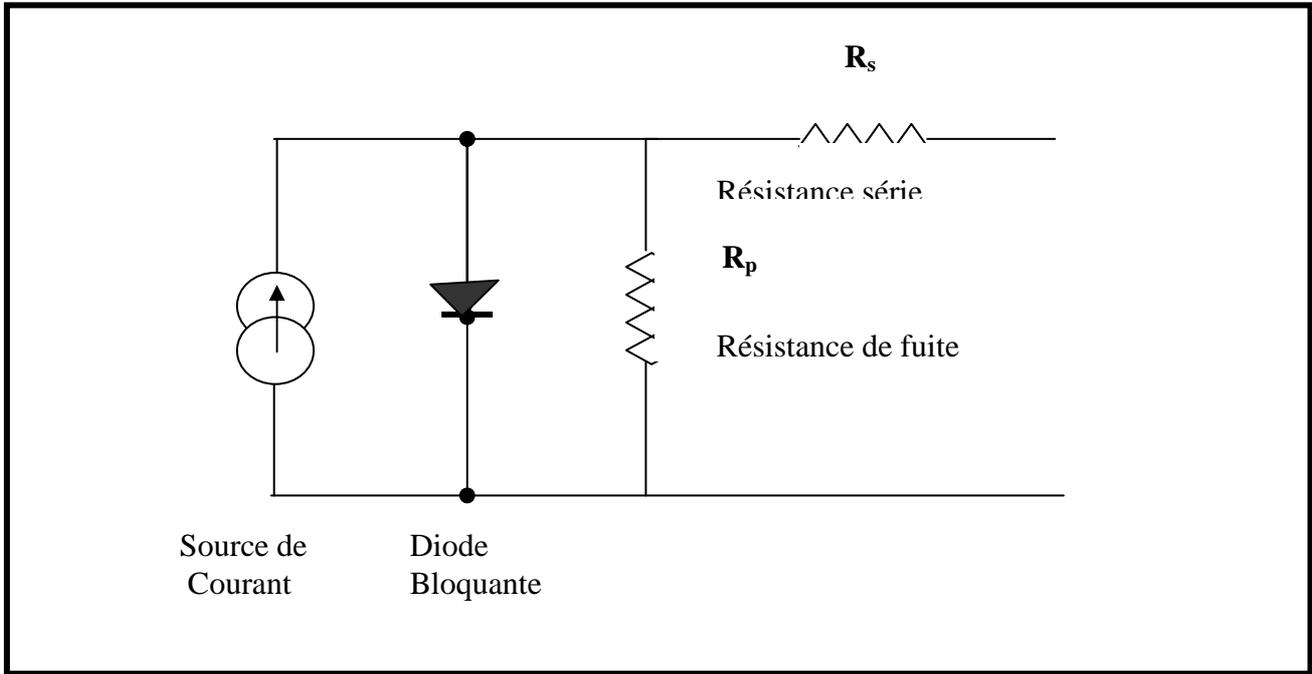


Figure I.7. Schéma équivalent d'une cellule solaire

6. Puissance et rendement :

La partie intéressante de la caractéristique courant tension, pour l'utilisateur, et celle qui génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court circuit, qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, ce qui est montré sur la figure I.8.

La caractéristique sous lumière de la photopile ainsi que des courbes théorique de la puissance constante (en pointillés).

Au point P_m , situé au « coude », de la caractéristique, la puissance de la photopile est maximale pour l'éclairement considéré, ce point dit de puissance maximale, est associée à une tension dite de tension maximale U_m et de courant maximale I_m .

Remarquons cependant que la photopile peut être sollicitée également à plus faible puissance, par exemple à une tension inférieure à U_m (point P_2 sur la figure I.8).

On voit bien que plus la courbe est « carrée », plus la puissance maximale est élevée, on mesure cette propriété par le facteur de forme défini comme suit :

$$FF = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \dots\dots\dots(I.5)$$

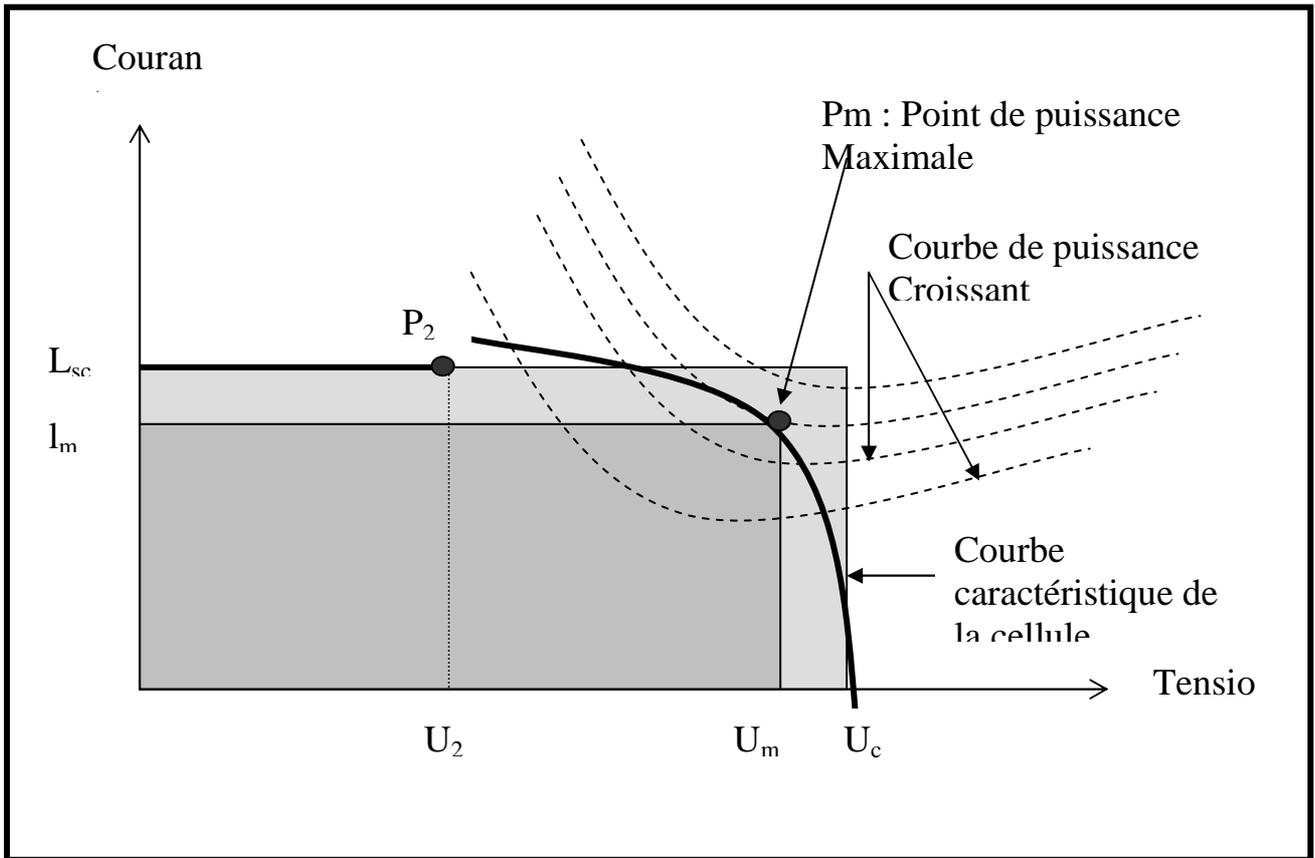


Figure I.8. Puissance maximale sur une caractéristique courant tension

Le rendement énergétique est défini quant à lui comme le rapport entre cette puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module photovoltaïque.

Si S est la surface de ce module, et E l'éclairement en W/m^2 , le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \dots\dots\dots(I.6)$$

Ce rendement est souvent mesurer dans les conditions de références,c-à-d sous l'ensoleillement de $1000 W/m^2$, à la température de $25^\circ C$ et sous un spectre AM 1.5.ces conditions normalisées sont dite STC pour Standard Teste Condition .

7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu les définitions et les mécanismes de bases du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique sur lesquels on a construit un schéma équivalent type d'un panneau solaire.

Ce schéma est basé sur une analogie électrique définie à partir d'une source électrique (lumière), une diode (panneau) et des résistances (pertes), cette analogie est une représentation parfaite d'un panneau solaire idéale travaillant dans des conditions parfaites avec un minimum de pertes.

En pratique ces panneaux solaires présente des pertes électriques et thermiques importantes, pour cela on est emmené à construire des modèles équivalents reflétant le mieux un panneau solaire réel.

Chapitre II

Etude Théorique

1. Introduction :

Une étude bibliographique a permis de sélectionner un modèle permettant de calculer les paramètres internes qui caractérise le fonctionnement réel d'un capteur photovoltaïque, et la puissance électrique disponible aux bornes d'un capteur photovoltaïque, et de l'adapter ensuite au cas d'une installation électrique.

En ce qui concerne la modélisation des capteurs photovoltaïque, l'étude bibliographique a fait ressortir l'existence de deux approches, la première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur photovoltaïque une fois installé, c'est le cas des modèles 'Sandia' et Cenerg' exposés ci-dessous, la deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs, ce qui est le cas du modèle 'Madison'.

2. Modèle 'Sandia' :

Le Sandia National Laboratory (Albuquerque, USA) à élaborer un modèle de capteur photovoltaïque, permettant à la fois de tester des capteurs et estimer leurs productivités [16] [27].

Les principaux avantages du modèle sont les suivants :

La variation du spectre solaire en fonction de la position du soleil dans le ciel, et son influence sur le rendement photovoltaïque, est prise en compte ; le modèle prend aussi en compte l'angle d'incidence du rayonnement directe sur le capteur photovoltaïque.

La face avant du module photovoltaïque étant en général composée d'une vitre, celle-ci ne laisse pas passer le rayonnement de la même manière suivant l'angle d'incidence du rayonnement, ce phénomène apparaît dès que l'angle d'incidence (par rapport à la normale du module photovoltaïque) dépasse 60° ; la méthode permet de prendre en compte le fait que les STC (Standard Test Conditions), c'est à dire les conditions de référence suivant lesquelles les grandeurs représentantes le module sont mesurés par les constructeurs, sont bien différentes des conditions normales de fonctionnement. Dans ces conditions de référence, la température de fonctionnement des cellules photovoltaïque est égale à 25° , ce qui correspond à une température ambiante au

alentour de 0°, ce qui est rarement le cas dans la pratique ; le modèle peut s'appliquer à la caractérisation d'un capteur photovoltaïque constitué de plusieurs modules, les équations déterminantes sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sc} = \frac{G}{G_r} \cdot f_1(AM) \cdot f_2(\beta) \cdot (I_{sc_r} + \mu_{I_{sc}} (T_c - T_{cr})) \\ I_{mp} = C_0 + C_e (I_{mpr} + \mu_{I_{mp}} (T_c - T_{cr})) \\ U_{oc} = U_{ocr} + C_1 \cdot \ln(G_e) + \mu_{U_{oc}} \cdot (T_c - T_{cr}) \\ U_{mp} = U_{mpr} + C_2 \cdot \ln(G_e) + C_3 \cdot [\ln(G_e)]^2 + \mu_{U_{mp}} \cdot (T_c - T_{cr}) \\ G_e = \frac{I_{sc}}{I_{scr}} \end{array} \right. \dots\dots (II.1)$$

Avec :

- G** : Rayonnement incident (**W/m²**),
- T_c** : Température de jonction (**°K**), ou cellule
- AM** : Nombre d'air -masse
- β** : Angle d'incidence entre le rayonnement direct du soleil et la normale au plan du capteur,
- G_r** : Rayonnement de référence (**1000 W/m²**),
- T_{cr}** : Température de jonction référence (**25°C**),
- f₁** : Fonction du nombre d'air -masse,
- f₂** : Fonction de l'angle d'incidence **β** du rayonnement sur le capteur **PV**,
- I_{scr}** : Courant de court-circuit de référence,
- U_{ocr}** : Tension de circuit ouvert de référence,
- U_{mpr}** : Tension de puissance maximale de référence,
- I_{mpr}** : Courant de puissance maximale de référence,
- μ_{Isc} (resp. μ_{Uoc}, μ_{Ump}, μ_{Imp})**: Coefficients de dépendance en température du courant de court circuit (resp. de la tension de circuit ouvert, de la tension et du courant de puissance maximale)
- C₀, C₁, C₂, C₃** : Coefficients déterminés expérimentalement.

L'hypothèse qui est utilisée est que les grandeurs **U_{oc}**, **U_{mp}** et **I_{mp}** sont fonctions uniquement de **I_{sc}** et de la température de fonctionnement des cellules **T_c**. Autrement dit, la courbe caractéristique **I (U)** (qui donne le courant **I** en fonction de la tension **U** aux bornes du capteur) est connue pour un couple (**T_c**, **I_{sc}**) donné et ne dépend ni de la distribution spectrale du rayonnement incident (fonction de **AM**) ni de sa distribution angulaire (fonction de l'angle **β**).

Les paramètres de la liste ci-dessus tels que **G_r**, **T_{cr}**, **I_{scr}**, **U_{ocr}**, **U_{mpr}**, **I_{mpr}**, **μ_{Isc}**, **μ_{Uoc}**, **μ_{Ump}**, **μ_{Imp}** sont à déterminer expérimentalement pour un module **PV**, et sont ensuite calculés simplement par

proportionnalité suivant les lois de l'électricité pour l'ensemble (ou champ) de modules. Les fonctions f_1 et f_2 sont des polynômes du 5^è degré, les coefficients de ces polynômes étant déterminés expérimentalement, quant aux coefficients C_0, C_1, C_2, C_3 , ils sont déterminés expérimentalement sur l'ensemble du champ de modules. Ces coefficients intègrent alors les pertes du :

Aux dissymétries ('mismatch losses' en anglais) : les courbes caractéristiques de chaque module peuvent ne pas correspondre, ce qui entraîne des déséquilibres électriques aux connections entre modules à la présence de diodes anti-retour.

Le principal avantage de ce modèle est qu'il permet de prendre en compte les différentes pertes électriques mentionnées ci-dessus, cependant celui-ci nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur une fois installé.

3. Modèle 'Cenerg' :

Le modèle développé par le Centre d'énergétique se base sur le modèle à une diode. Un bilan électrique sur ce schéma permet d'établir une expression donnant le courant I en fonction de la tension U disponible aux bornes du capteur :

$$I = P_1 \cdot G \cdot [1 + P_2 \cdot (G - G_r) + P_3 \cdot (T_c - T_{cr})] - P_4 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-\epsilon_g}{K \cdot T_c}\right) \left[\exp\left(\frac{q}{N_c \cdot K} \cdot \frac{(U + R_s \cdot I)}{T_c}\right) - 1 \right] - \frac{U}{R} \dots\dots\dots(II.2)$$

Avec :

- I** : Courant aux bornes du capteur,
- U** : Tension aux bornes du capteur,
- G** : Rayonnement incident (**W/m²**),
- T_c** : Température de jonction du capteur **PV**,
- P₁, P₂, P₃, P₄, R_s, R_p** : Paramètres à déterminer expérimentalement (**R_s** et **R_p** étant les résistances séries et parallèle des cellules),
- N_c** : Paramètre d'ajustement, est égal au nombre de cellules en série (**36** par exemple) pour un module **PV** parfait, et est supérieur dans la pratique,
- G_r** : Rayonnement de référence (**1000 W/m²**),
- T_c** : Température de jonction de référence (**25 °C**),
- ε_g** : Gap du matériau, vaut **1.12eV** pour le silicium cristallin.

L'expression (2.2) donne le courant I comme étant égal à la somme de trois termes.

Les coefficients P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , R_s , et R_p sont déterminés expérimentalement, le calcul de la puissance électrique P disponible aux bornes du capteur se fait en multipliant la tension U et le courant I calculés avec l'équation 2.2, la résolution de ce type d'équation sera exposée dans le paragraphe suivant.

Ce modèle a été validé expérimentalement par le Centre d'Energétique à Sophia Antipolis [7]. Dans tous les cas, la différence entre calculs et résultats expérimentaux pour la productivité électrique est inférieure à 5%.

Lors de la caractérisation du champ de modules, et donc de la mesure des différents coefficients, il est noté que ces coefficients intègrent les pertes électriques du aux 'Mismatch losses' (dissymétrie entre modules) ainsi que les pertes dans les connexions, la puissance électrique perdue est estimée à environ 3%.

Nous retrouvons pour ce modèle la même problématique que pour le modèle 'Sandia': les paramètres expérimentaux permettent une caractérisation plus fiable du système PV , mais cela nécessite une phase de mesures relativement lourde.

4. modèle 'Madison' :

Ce modèle a été développé par l'université de Madison pour la programmation d'un module de simulation de capteurs PV appelés 'PHANTASM' chaînés au programme de simulation thermique de bâtiment 'TRNSYS'. [8], Tout comme le modèle 'Cenerg', il se base sur le modèle électrique des cellules appelés 'Modèle à une diode'. Par contre, le modèle développé propose une méthode qui permet de calculer les performances du module PV à partir des données fournies par les constructeurs.

L'équation qui donne le courant I en fonction de la tension U aux bornes du capteur est la suivante :

$$I = I_l - I_0 \left[\exp \left[\frac{q}{\gamma \cdot K \cdot T_c} \cdot (U + R_s \cdot I) \right] - 1 \right] - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p} \dots\dots\dots (II.3)$$

Avec

- I : Le courant aux bornes du capteur (A),
- U : Tension aux bornes du capteur (V),
- I_l : Photo courant (A),
- I_0 : Courant de saturation inverse de diode (A),
- γ : Paramètre d'ajustement,
- T_c : Température de jonction,
- R_s : Résistance série,
- R_p : Résistance shunt (parallèle)

Le membre de droite de l'équation (II.3) représentant le modèle 'Madison' il fait apparaître trois termes équivalents aux trois termes de l'équation (II.2) représentant le modèle 'Cenerg'. Il existe quelques différences à noter entre les deux modèles :

Le premier terme de l'équation du modèle 'Cenerg' (équivalent au photo-courant I_L du modèle 'Madison') est fonction de la température de jonction T_c , et dépend aussi d'un terme en G , ce qui n'est pas le cas pour l'expression du photo-courant I_L du modèle 'Madison' (expression qui sera développée dans le § II.3). Pour ce calcul, le modèle 'Madison' utilise une hypothèse simplificatrice qui dit que le photo-courant est proportionnel au rayonnement incident G , et qu'il ne dépend pas de la température T_c .

Dans l'équation du modèle 'Madison' le calcul du troisième terme, qui est le courant traversant la résistance shunt R_p , fait intervenir la tension aux bornes de la résistance série R_s , cette résistance série n'intervient pas dans l'équation du modèle 'Cenerg', car dans ce modèle, pour calculer l'intensité traversant la résistance shunt R_p , la tension aux bornes de la résistance série est négligée.

5. Sélection d'un modèle :

Les deux modèles 'Sandia' et 'Cenerg' offrent certainement une meilleure précision que le modèle 'Madison'. Cependant, ces deux derniers nécessitent soit d'effectuer des mesures sur site en ce qui concerne le modèle 'Sandia', soit des mesures en plus de celles généralement effectuées par les constructeurs en ce qui concerne le modèle 'Cenerg'. Cet inconvénient est incompatible avec le but pratique de notre mémoire, à savoir le développement d'un logiciel destiné.

Le type de base de données (données qui correspondent aux paramètres d'entrée du modèle sélectionné) d'un tel logiciel doit pouvoir se mettre en place en fonction des données fournies par la majorité des fabricants de modules PV. Le modèle 'Madison' répond à cette exigence, car il propose une méthode de calcul des paramètres du modèle en fonction des 'données constructeur', c'est pour cette raison la qu'on a choisi ce modèle.

L'inconvénient du modèle 'Madison' est que le calcul de la puissance P disponible aux bornes du capteur avec ce modèle est a priori moins précise qu'avec les deux autres modèles 'Sandia' et 'Cenerg'. Néanmoins, la disponibilité de données expérimentales collectées par le Centre d'Energétique, concernant un type de module pour lequel nous disposons également des 'données constructeur' va nous permettre de comparer le modèle 'Cenerg' avec le modèle 'Madison'. L'écart constaté entre les deux modèles permettra de conclure quant à la justification d'un tel choix.

6. Calcul de la puissance électrique :

6.1. Le modèle à une diode :

Pour connaître l'énergie produite par un module **PV**, il faut calculer la puissance disponible aux bornes de celui-ci. Pour cela, il faut connaître la relation qui donne l'intensité **I** en fonction de la tension **U**.

Le modèle sélectionné est ce que nous appellerons le modèle 'Madison'. Il se base sur le modèle électrique des cellules appelé 'Modèle à une diode' et permet de calculer les performances du module **PV** à partir des 'données constructeur' usuelles.

Le modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est le suivant :

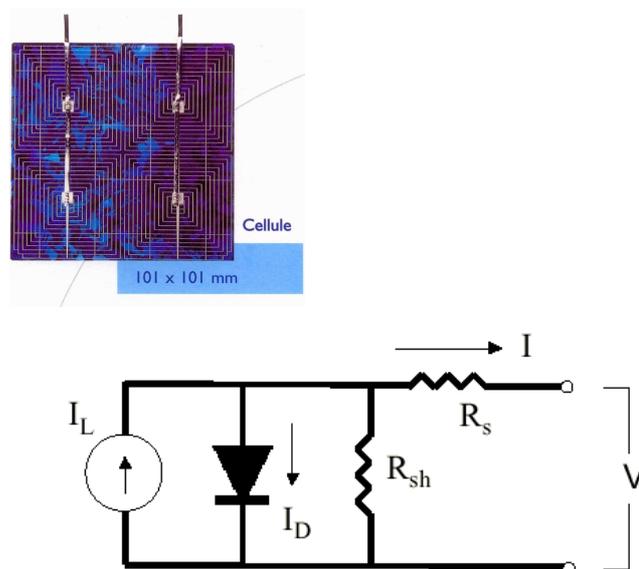


Figure II.1. Modèle à une diode

Les paramètres apparaissant dans la figure ci-dessus sont les suivants :

- I_l : Photo courant créé par les cellules (proportionnel au rayonnement incident) (A),
- I_d : Courant de diode, représente le courant de fuite interne à la cellule causée par la jonction **p-n** de la cellule (A),
- R_p : Résistance shunt, représente un autre courant de fuite, présent notamment pour les cellules amorphe (Ω),
- R_s : Résistance série, représente les pertes provoquées notamment par le contact électrique des cellules

entre elles (Ω),
U : Tension disponible aux bornes du module (Volts),
I : Courant disponible aux bornes du module (A).

En établissant le bilan électrique du circuit (**figure II.1**), nous obtenons la relation entre la tension et le courant disponible aux bornes de la cellule **PV** :

$$I = I_l - I_d - \frac{U + R_s \cdot I}{R_p} \dots\dots\dots (II.4)$$

Le membre de droite de cette équation fait apparaître trois termes :

Le premier est le photo-courant **I_l**, c’est le courant crée par l’effet photovoltaïque ; le deuxième et troisième terme représentent les courants de perte.

6.2 Courbe caractéristique du module PV :

Comme indiqué dans le paragraphe de titre 3 de ce chapitre, un module **PV** est constitué par exemple de 36 cellules **PV** branchées en série. Le bilan des courants à partir du modèle à une diode permettant de calculer la puissance **P** disponible aux bornes de la cellule, est par extrapolation appliqué à l’ensemble du module **PV**. Cette méthode est d’autant plus justifiable que les données caractéristiques qui sont mesurées pour l’ensemble du module **PV**, ce qui permet de prendre en compte les pertes dû notamment aux connexions des cellules entre elles. Par la suite, le modèle à une diode s’appliquera donc au module **PV** tout entier.

L’expression (II.4) permet de connaître la courbe caractéristique du module PV qui donne le courant ‘**I**’ en fonction de la tension ‘**U**’. Cette courbe, pour des modules **PV** fabriqués à partir de cellules de silicium amorphe ou cristallin à la forme suivante :

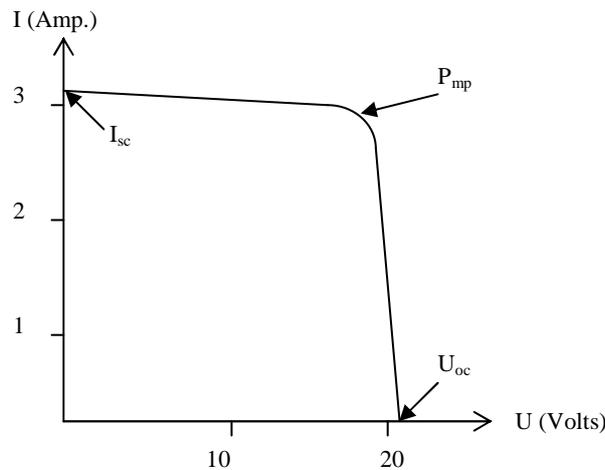


Figure II.2. Courbe caractéristique d’un module PV de puissance nominale 50W.

L'intersection de cette courbe avec l'axe des abscisses donne la tension de circuit ouvert U_{oc} , et l'intersection avec l'axe des ordonnées donne le courant de court-circuit I_{sc} . Le point de puissance maximal P_{mp} se situe au niveau du coude de cette courbe.

La résolution de l'équation (II.4), permet de connaître le courant I ainsi que la tension U aux bornes des modules PV , et donc la puissance électrique disponible aux bornes de celui-ci. Puis, par extension, si un capteur PV est constitué de N_c modules PV , la puissance disponible aux bornes du capteur PV sera $N_c \times P$.

6.3 Le modèle à plusieurs diodes :

Pour les phénomènes liés à la recombinaison génération de porteurs au sein de la jonction, on a une forme légèrement différente, parce que ces phénomènes dépendent de l'épaisseur de la jonction, qui dépend elle-même de la tension de jonction, on aura donc la forme :

$$I_d = I_0 \cdot (1 - b \cdot U)^n \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot U}{\gamma \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (II.5)$$

Où n est un exposant qui vaut 1/2 dans le cas d'une jonction abrupte et 1/3 dans le cas d'une jonction graduelle. C'est ce dernier cas que nous considérerons par la suite dans le cadre des cellules photovoltaïques.

Des formules comme (II.3) ou (II.5) sont souvent adoptées pour modéliser les diodes à semi-conducteur utilisées en électronique, ces termes sont dès lors représentés dans le schéma ci-dessous par plusieurs "diodes" en parallèle, chacune de ces diodes représente le courant de jonction dû à un des phénomènes en présence (diffusion de porteurs, génération recombinaison de porteurs dans la zone de déplétion...). Nous supposons que ces phénomènes n'interagissent pas (chaque "diode" est définie par son propre jeu de paramètres).

Il peut aussi être utile de prévoir des branches pour tenir compte de phénomènes moins bien identifiés et que nous représenterons par une résistance non linéaire " de fuite" R_p . Le courant correspondant à cet élément ne sera pas considéré comme faisant partie du "courant de jonction" car il représente surtout un courant perdu aux bords de la cellule, dans les joints de grain ...

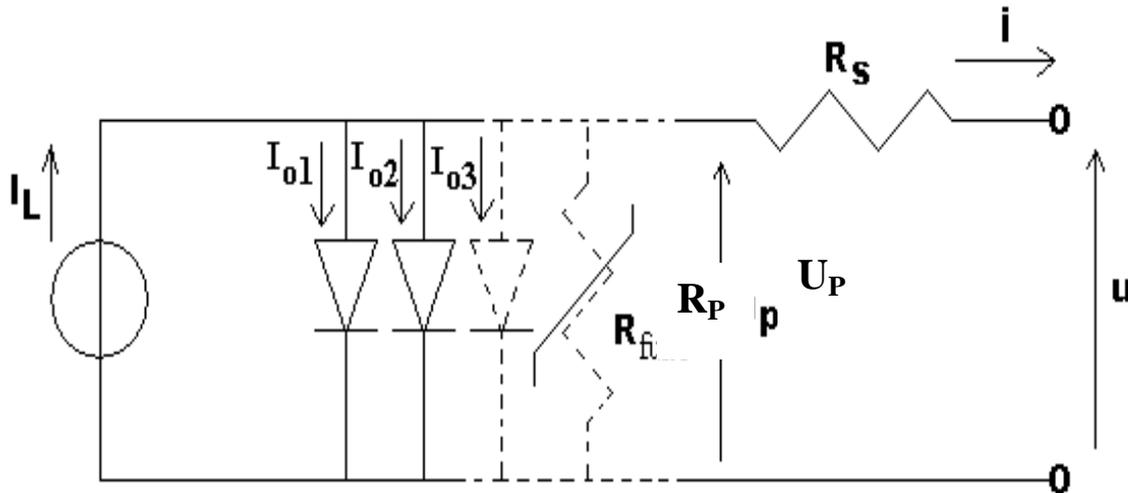


Figure II.3. Modèle à plusieurs diodes

En établissant le bilan électrique au circuit (figure II.3), nous obtenons la relation entre la tension et le courant disponible aux bornes de la cellule **PV** :

$$I = I_l - \frac{U + I.R_s}{R_p} - \sum_n I_{Dn} \dots\dots\dots (II.6)$$

Avec **n** le nombre de diode en parallèle et :

$$I_{dn} = I_{0n} \cdot \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma_n \cdot k \cdot T_c} \cdot (U + I.R_s) \right) - 1 \right) \dots\dots\dots (II.7)$$

$$I_{0n} = I_{0rn} \cdot \left(\frac{T_c}{T_r} \right)^3 \cdot \exp \left(\frac{q \mathcal{E}_g}{\gamma_n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \dots\dots\dots (II.8)$$

7. Méthode générale de résolution en fonction des ‘données constructeur’ :

Avant de résoudre l’équation (II.4), il faut d’abord développer les différents termes.

Le courant de diode **I_d** s’exprime sous la forme :

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp \left[\frac{q}{\gamma \cdot K \cdot T_c} \cdot (U + R_s \cdot I) \right] - 1 \right] \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec :

γ : Le facteur de qualité de la diode.
 I_0 : Courant de saturation inverse de diode (A),

T_c : température de jonction (°K).

Le courant de saturation inverse de diode I_0 a pour expression :

$$I_0 = D.T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot \mathcal{E}_g}{\frac{\gamma}{N_c} \cdot K.T_c}\right) \dots\dots\dots (II.10)$$

Avec :

D : Constante,
 \mathcal{E}_g : Gap du matériau, vaut 1.12eV pour le silicium cristallin.

Pour une température de jonction de référence T_{cr} donnée, nous obtenons l'expression du courant de référence I_{0r} :

$$I_{0r} = D.T_{cr}^3 \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot \mathcal{E}_g}{\frac{\gamma}{N_c} \cdot K.T_{cr}}\right) \dots\dots\dots (II.11)$$

Si, grâce à l'équation (II.10) on exprime la constante D en fonction des paramètres I_{0r} et T_{cr} , le courant de saturation inverse de diode I_0 aura pour expression :

$$I_0 = I_{0r} \cdot \frac{T_c^3}{T_{cr}^3} \cdot \exp\left(\frac{q \cdot \mathcal{E}_g}{\gamma \cdot K} \left(\frac{1}{T_{cr}} - \frac{1}{T_c}\right)\right) \dots\dots\dots (II.12)$$

D'autre part, le photo-courant I_1 est supposé être proportionnel au rayonnement incident G :

$$I_1 = \frac{G}{G_r} \cdot I_{cr} \dots\dots\dots (II.13)$$

Nous aboutissons alors à l'expression suivante en ce qui concerne l'équation caractéristique :

$$I = \frac{G}{G_r} \cdot I_{cr} - I_{0r} \cdot \frac{T_c^3}{T_{cr}^3} \cdot \exp\left(\frac{q \cdot \epsilon_g}{\gamma \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_{cr}} - \frac{1}{T_c}\right)\right) \left(\exp\left(\frac{q \cdot (U + I \cdot R_s)}{\gamma \cdot K \cdot N_c \cdot T_c}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} \dots\dots\dots(II.14)$$

Cette dernière équation fait apparaître que le courant disponible est le photo-courant diminué du courant de diode ainsi que des courants de fuite.

Mais pour la suite de cet mémoire, il faut repartir de l'expression (II.14) qui fait intervenir les paramètres suivants : **I₁**, **I_{0r}**, **R_p**, **R_s**, et **γ**, ces paramètres, que nous appellerons par la suite paramètres internes, et qui représentent le module **PV** ne sont pas mesurés par les constructeurs. Cependant, il est possible de calculer ces paramètres à partir des données constructeur, et dont la liste est la suivante :

- I_{scr}** : Courant de court circuit de référence ;
- U_{ocr}** : Tension de circuit ouvert de référence (**Volts**) ;
- U_{mpr}** : Tension de puissance maximale de référence (**Volts**) ;
- I_{mpr}** : Intensité de puissance maximale de référence (**A**) ;
- μ_{uoc}** : Coefficient de dépendance en température de la tension de circuit ouvert (**Volts/K**) ;
- μ_{isc}** : Coefficient de dépendance en température du courant de court circuit (**A/K**) ;
- T_{cr}** : Température de jonction de référence (25°C) ;
- G_r** : Rayonnement de référence (1000W/m²).

Tout d'abord, si la résistance shunt **R_p**, n'est pas donnée par le constructeur, elle peut être déduite des courbes **I = f (U)** tracées par ce constructeur. En effet cette résistance peut être exprimée comme étant l'inverse de la pente de cette courbe pour le point de court-circuit ou la tension et minimum:

$$R_p = \frac{-1}{\left(\frac{dI}{dU}\right)_{U=0}} \dots\dots\dots(II.15)$$

Remarque : déterminer cette résistance de cette manière suppose qu'il s'agit d'une constante, c'est à dire que la courbe a la même pente quel que soit la température ou l'éclairement.

Si les courbes ne sont pas données ou si, celles-ci sont trop imprécises, alors la solution consiste à déterminer une valeur par défaut, par exemple ; une valeur de 5000 Ω pour un module à base de silicium cristallin est acceptable, alors qu'il faut prendre une valeur bien inférieure pour le silicium amorphe (500 Ω par exemple).

Ensuite, en se plaçant dans les conditions de court-circuit, et dans les conditions de référence, et en supposant que dans ce cas de figure l'intensité traversant la diode est négligeable (diode non polarisée), nous obtenons à partir de l'équation (II.14) le photo courant de référence I_{lr} en fonction du courant de court-circuit de référence I_{scr} et des résistances séries (R_s) et shunt (R_p) (Remarque : le calcul de la résistance R_s est exposé plus loin):

$$I_{Lr} = I_{scr} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \dots\dots\dots(II.16)$$

Puis, en partant également de l'équation (II.14) mais cette fois-ci en se plaçant dans les conditions de circuit ouvert (toujours dans les conditions de référence) nous pouvons calculer le courant de saturation inverse de la diode I_{0r} (en supposant que le '1' dans l'expression du courant de diode soit négligeable devant le terme exponentiel) :

$$I_{0r} = \frac{I_{cr} - \frac{U_{ocr}}{R_p}}{\exp\left(\frac{q \cdot U_{ocr}}{K \cdot \gamma \cdot N_c \cdot T_c}\right)} \dots\dots\dots(II.17)$$

Cette dernière expression dépend du paramètre γ , ce coefficient peut être calculé toujours à partir de l'équation (II.14) mais en écrivant cette relation pour le point de fonctionnement à puissance maximale dans les conditions de référence, et en utilisant la relation (II.17) :

$$\gamma = \frac{q}{K \cdot N_c \cdot T_{cr}} \cdot \frac{U_{mpr} - U_{ocr} + I_{mpr} \cdot R_s}{\ln\left(\frac{I_{clr} - I_{mpr} - \frac{U_{mpr} + I_{mpr} \cdot R_s}{R_p}}{I_{scr} - \frac{U_{ocr}}{R_p}}\right)} \dots\dots\dots(II.18)$$

Pour la résolution, en mettant de côté R_p , nous avons 4 inconnues : I_0 , I_l , γ , et R_s , pour trois équations (II.16), (II.17), et (II.18) Il faut introduire une relation qui utilise le coefficient de

variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la température μ_{Uoc} , ce qui est obtenu en utilisant l'équation (II.14) pour la condition de tension de circuit ouvert ($I=0$), puis en dérivant cette expression par rapport à la température de jonction T_c , avec comme hypothèses le terme '1' négligeable devant le terme exponentiel, et que $I_1 \approx I_{sc}$.

Ensuite, il faut calculer ce coefficient pour les conditions de référence, Nous obtenons :

$$\frac{\partial U_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{Uoc} = \frac{\mu_{Ioc} - \frac{I_{0r}}{T_c} \left(3 + \frac{q \cdot \epsilon_g}{\gamma \cdot K \cdot T_c} - \frac{q U_{ocr}}{\gamma \cdot K \cdot N_c \cdot T_c} \right) \cdot \exp\left(\frac{q U_{ocr}}{\gamma \cdot K \cdot N_c \cdot T_c}\right)}{\frac{q}{K \cdot \gamma \cdot N_c \cdot T_c} \cdot I_{0r} \cdot \exp\left(\frac{q U_{ocr}}{K \cdot \gamma \cdot N_c \cdot T_c}\right) + \frac{1}{R_p}} \dots (II.19)$$

Or, comme illustré dans la figure II.4 le coefficient μ_{Uoc} est croissant et linéaire en fonction de R_s .

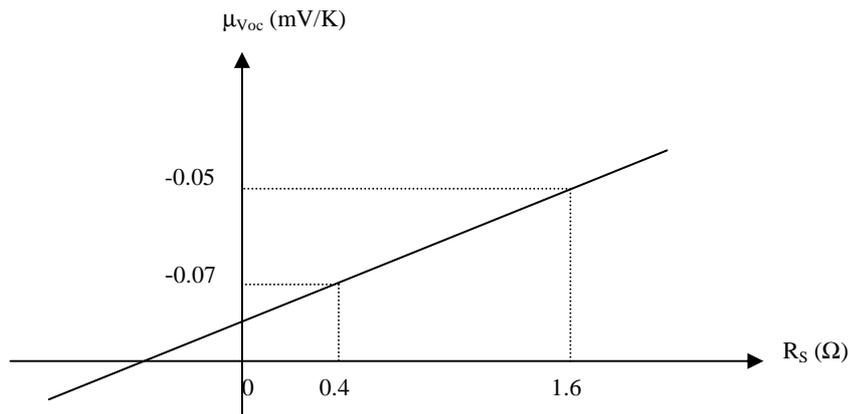


Figure II.4. Exemple de variation du coefficient μ_{Uoc} en fonction de la résistance série, pour une cellule à base de silicium cristallin.

Par conséquent, on peut alors calculer R_s (et par la même occasion les autres variables) par la méthode de la bissectrice, et l'algorithme de résolution numérique des paramètres intermédiaires est le suivant (figure II.4):

Si on connaît les limites supérieures (R_s, Sup) et inférieures (R_s, Inf) de R_s , on peut alors choisir comme valeur initiale pour cette variable la moyenne $(R_s, Sup + R_s, Inf)/2$, puis on calcule γ avec l'expression (II.18) puis I_{0r} avec l'expression (II.17), et ensuite μ_{Uoc} avec l'expression (II.19). Si la différence entre la valeur calculée et la valeur expérimentale du coefficient μ_{Uoc} dépasse l'intervalle

$\Delta\mu$ souhaité, alors il faut recalculer R_s (en remplaçant $R_{s,Sup}$ ou $R_{s,Inf}$ par la valeur initiale de R_s , suivant le signe de $\Delta\mu$), et répéter l'opération jusqu'à ce que la convergence soit atteinte.

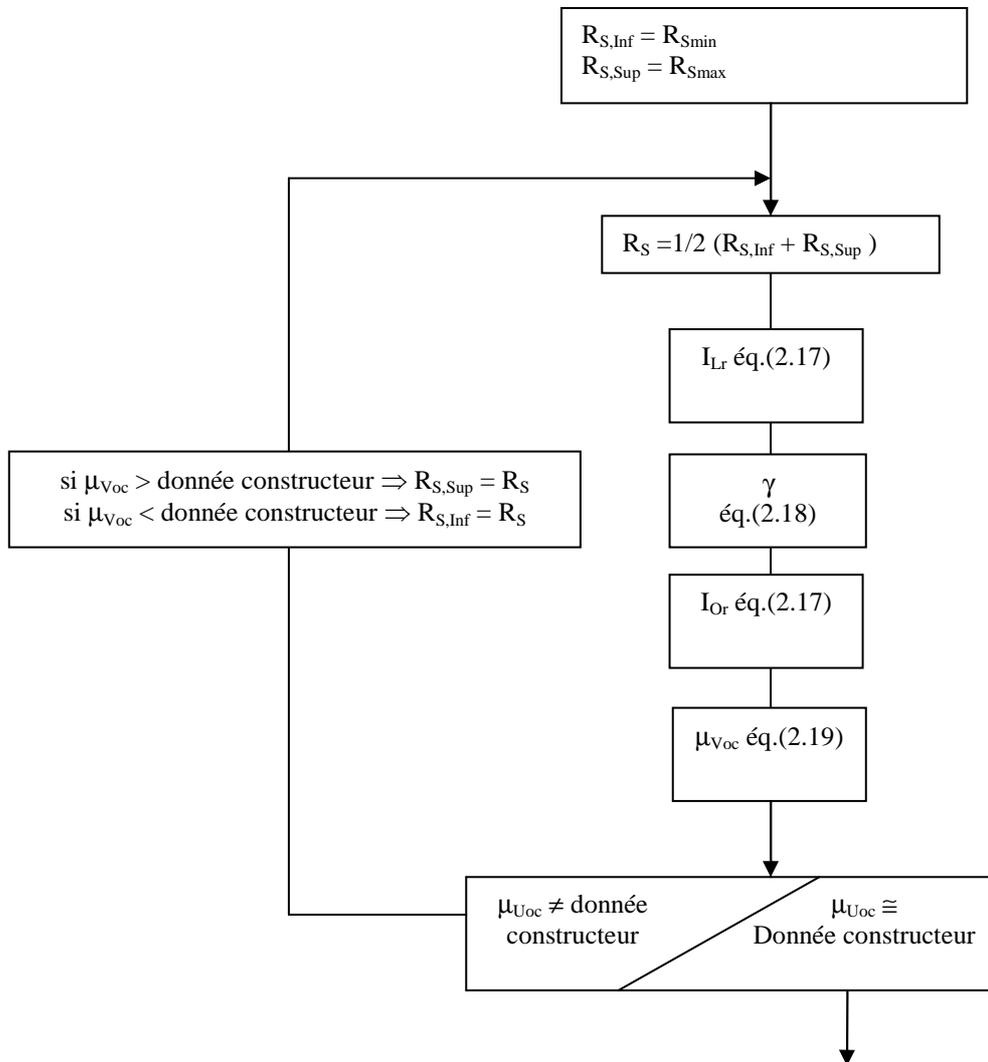


figure II.5. Algorithme de résolution des paramètres intermédiaires du modèle Madison.

A ce stade, nous avons les valeurs des paramètres intermédiaires R_s , R_p , γ , I_{Lr} , et I_{Or} qui correspondent aux caractéristiques du module PV. Si on connaît les sollicitations climatiques (qui sont le rayonnement incident et la température extérieure par l'intermédiaire de la température de jonction T_c), et qui interviennent notamment dans le calcul des courants I_l et I_o avec les expressions (II.12) et (II.13), tous les paramètres de l'équation (II.14) seront connus, et il sera possible de calculer la puissance disponible aux bornes du module PV.

Remarque : Sur la méthode de calcul des paramètres intermédiaires en fonction des données constructeur 'Lors des travaux de comparaison menés par EDF et le Centre d'Energétique sur les outils de simulation CA-SIS et COMFIE, il a été constaté que l'algorithme

de calcul des paramètres intermédiaires exposé précédemment ne converge pas

systématiquement, et que cela dépend du type de module, et donc des données constructeur. ’

L’algorithme doit faire converger le coefficient de variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la température μ_{uoc} vers la valeur donnée par le constructeur. Or il se peut qu’en fonction de certains jeux de données du constructeur, la convergence à tendance à se concrétiser à un point hors du domaine physique acceptable. Par exemple, comme illustré dans la figure II.6 ci-dessous, il se peut que le point de convergence théorique se trouve à un endroit où la résistance série $R_s < 0$, ce qui n’est pas acceptable.

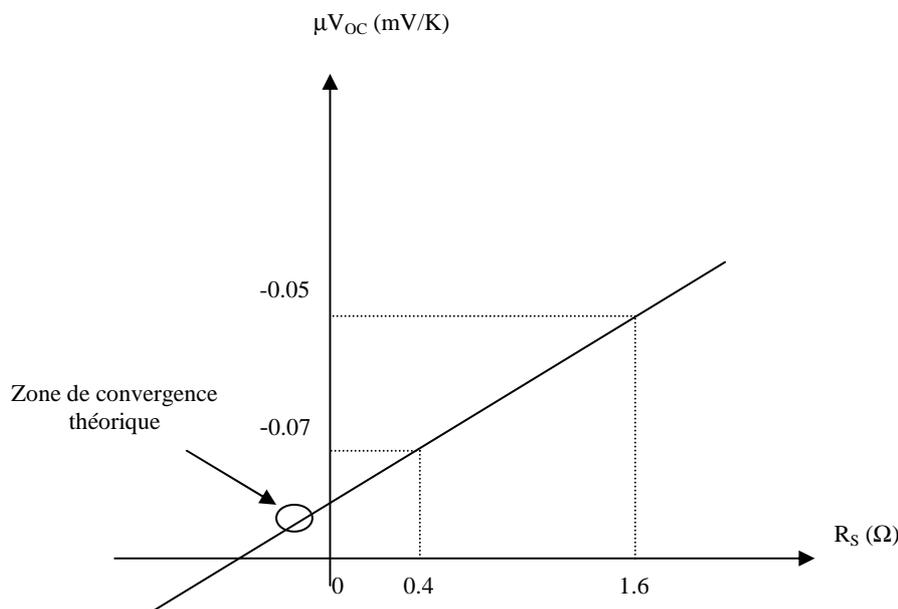


Figure II.6. Coefficient de variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la résistance série, avec zone de convergence en dehors des limites physiques.

Il faut donc adapter l’algorithme en conséquence pour que, lorsque la convergence ne se situe pas dans le domaine physique, les paramètres intermédiaires prennent des valeurs acceptables. Le choix de l’algorithme dans ce cas devient quelque peu arbitraire, ce qui explique que (comme l’indique le **(tableau II.1)** les paramètres intermédiaires calculés par CA-SIS et COMFIE soient différents.

Paramètre	CA-SIS	COMFIE
RS (Ω)	0.642	0
γ (-)	36	58.96
IO _r (A)	2.12 10 ⁻¹⁰	2.2 10 ⁻⁶
μ Voc (V/K)	-0.078	-0.0773

Tableau II.1. Paramètres intermédiaires du module PV (type 'PWX 500', puissance crête : 50 Wc, et cellules à base de silicium poly cristallin), calculés dans CA-SIS et COMFIE.

Il est possible de choisir une méthode qui reste arbitraire, mais qui laisse le choix à l'utilisateur, cela consiste à fixer la résistance série R_s , et de calculer les autres paramètres intermédiaires en utilisant toujours les mêmes équations que dans l'algorithme mentionné précédemment. C'est la méthode utilisée dans le logiciel PVSYST. Ce logiciel donne une vision très claire de l'influence du choix de la résistance série R_s sur la forme de la courbe caractéristique $I=f(U)$ (figure II.7 ci-dessous).

Cette figure montre bien que les données constructeur tels que la tension de circuit ouvert U_{oc} , l'intensité de court circuit I_{sc} , et le point de puissance maximale définissent la forme générale de la courbe, puis le choix de R_s (et donc des autres paramètres intermédiaires) permet d'affiner la forme de cette courbe, le choix de R_s doit se faire selon un domaine défini par deux limites :

R_{smin} pour la limite inférieure.

R_{smax} pour la limite supérieure.

La solution au problème posé ci-dessus, peut être la suivante :

Si l'algorithme qui calcule les paramètres intermédiaires ne converge pas, il faut fixer le paramètre R_s , et calculer les autres paramètres en fonction de R_s . Comme démontré ci-dessus, les bornes R_{smax} et R_{smin} sont connues ou calculables, il faut choisir pour R_s une valeur arbitraire comprise dans l'intervalle $[R_{smin}, R_{smax}]$, la solution adoptée dans le logiciel COMFIE est (lorsque l'algorithme ne converge pas) de prendre la valeur moyenne de cet intervalle.

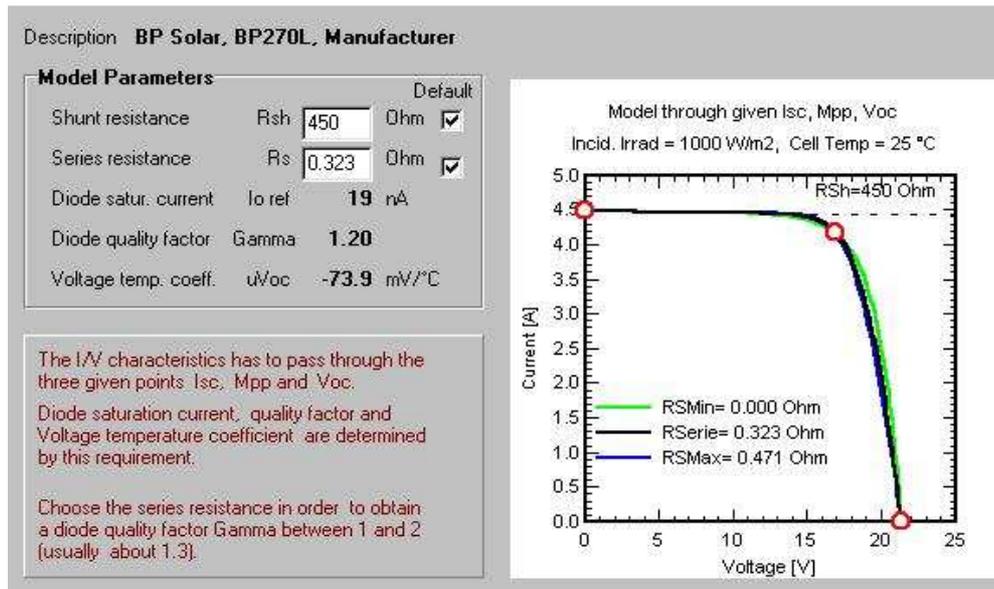


Figure II.7. Illustration de la méthode qui consiste à calculer les Paramètres I_{Or} , γ , et en μV_{oc} fonction de R_S (logiciel PVSYS*Ti*)

7.1. Calcul de la puissance disponible :

Pour la résolution de l'équation (II.4), il faut distinguer deux méthodes suivant la configuration électrique du système photovoltaïque.

- S'il s'agit d'un système dans lequel le capteur **PV** est relié à une batterie d'accumulateurs, alors la tension **U** est fixée par la batterie. Dans ce cas la résolution l'équation (II.4) se fait par la méthode de Newton pour une tension **U** donnée.
- S'il s'agit d'un système dans lequel le capteur **PV** est raccordé au réseau, alors dans ce cas un onduleur est branché aux bornes du capteur **PV**. Un onduleur, qui a pour fonction de convertir le courant continu en courant alternatif, intègre très généralement un système appelé 'MPPT' (Maximum Power Point Tracker), ce système permet au capteur **PV** de fonctionner à sa puissance maximale, on l'utilise le fait que, dans ce cas, la dérivée de la puissance électrique par rapport à la tension est nulle :

$$\frac{dP}{dU} = 0 = I + U \cdot \frac{dI}{dU} \dots\dots\dots(II.20)$$

L'équation (II.17) est maintenant soluble, la méthode de résolution numérique de cette équation est la suivante :

Il faut déterminer d'abord les limites du domaine de la variable U , pour la limite inférieure on peut prendre 0 et pour la limite supérieure on peut prendre U_{oc} , pour calculer U_{oc} , il est possible d'utiliser le coefficient μ_{uoc} grâce à la relation:

$$U_{oc} = U_{ocr} - \mu_{Uoc} \cdot (T_c - T_{cr}) \dots \dots \dots (II.21)$$

Une fois les bornes calculées, il faut ensuite calculer I et dI/dU par la méthode de Newton (en prenons comme valeur initiale $U=U_{oc}/2$), puis la méthode de la bissectrice qui est appliquée à l'équation (II.17) pour enfin calculer U (il faut remplacer les bornes de calculs de U par la valeur précédente suivant le signe de dP/dU ; Si $dP/dU > 0$ c'est la borne inférieure qui sera remplacée par la valeur calculée de U . Puis, il faut recalculer I et dI/dU , et ainsi de suite...).

7.2. Prise en compte de l'angle d'incidence :

La modélisation développée prend en compte l'effet de l'angle d'incidence sur la productivité du module. Il faut dans l'expression (II.13) multiplier le rayonnement incident par un coefficient nommé 'IAM' (pour 'Incidence Angle Modifier' en anglais), en prenant soin de différencier les trois composantes du rayonnement incident. Ce qui donne l'expression :

$$G_{te} = G_{id} \cdot IAM_{id} + G_{if} \cdot IAM_{if} + G_{ref} \cdot IAM_{ref} \dots \dots \dots (II.22)$$

Avec

G_{te}	: Rayonnement total effectif (W/m^2)
G_{id}	: Rayonnement incident direct (W/m^2)
G_{if}	: Rayonnement incident diffus (W/m^2)
G_{ref}	: Rayonnement incident réfléchi par le sol (W/m^2)
IAM_{id}	: Coefficient de modification angulaire du rayonnement direct (-)
IAM_{if}	: Coefficient de modification angulaire du rayonnement diffus (-)
IAM_{ref}	: Coefficient de modification angulaire du rayonnement réfléchi (-)

Le coefficient IAM_{id} relatif au rayonnement direct est donné par l'expression (II.23) ci dessous (β étant l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à la normale au plan du module) :

$$IAM_{id} = 1 - (1.09810^4) \cdot \beta - (6026710^6) \cdot \beta^2 + (6.58310^7) \cdot \beta^3 - (1.427210^8) \cdot \beta^4 \dots\dots\dots(II.23)$$

Il est considéré que les coefficients IAM_{if} et IAM_{ref} relatifs aux rayonnements diffus et réfléchi ne dépendent que de l'angle d'inclinaison θ du module, et sont donc constants quelle que soit la position du soleil. Pour calculer ces deux coefficients, l'expression (II.23) est toujours utilisée, mais en remplaçant dans cette équation l'angle d'incidence β par un angle effectif qui ne dépend que de l'inclinaison θ du module. Voici l'expression de l'angle effectif pour les deux types de rayonnement (diffus et réfléchi) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{eff.if} = 59.7 - 0.1388\theta + 0.001497\theta^2 \\ \beta_{eff.ref} = 90 - 0.5788\theta + 0.002693\theta^2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots(II.24)$$

8. Température de jonction :

La température de jonction T_c est la température de fonctionnement des cellules PV , cette température intervient dans le modèle qui permet de calculer la puissance produite par le capteur. Une augmentation de température se traduit par une baisse relative de la puissance disponible d'environ **0.5%/°K** pour des cellules PV fabriquées à partir de silicium de type cristallin.

8.1 Modèle 'Noct' :

Un bilan thermique simplifié permet de calculer cette température :

$$(\tau_{pv} \cdot \alpha_{pv}) \cdot G = \eta_{pv} \cdot G + h_{pv} \cdot (T_c - T_{ext}) \dots\dots\dots(II.25)$$

Avec

- T_c : Température de cellule (K),
- τ_{pv} : Taux de transmission du vitrage du module PV à incidence normale (-),
- α_{pv} : Coefficient d'absorption des cellules PV (-),
- η_{pv} : Rendement électrique du module PV (-),
- G : Rayonnement incident (W/m²),
- T_{an} : Température extérieure (K),
- h_{pv} : Coefficient d'échange thermique global entre le module PV et l'extérieur.

Le rendement η_{pv} du module **PV** est connu et peut être pris en première approximation égale au rendement nominal mesuré par les constructeurs. Le produit ($\tau_{pv} \cdot \alpha_{pv}$) qui représente le coefficient d'absorption du module PV n'est pas mesuré directement par les constructeurs. Cependant, si on connaît le coefficient d'absorption des cellules (0.90 par exemple) et le coefficient de transmission du vitrage (0.90 par exemple) alors nous pouvons en déduire ($\tau_{pv} \cdot \alpha_{pv}$) \cong **0.80**. Le coefficient de transfert thermique h_{pv} est difficile à mesurer, par contre les constructeurs mesurent la température normale de fonctionnement des cellules PV appelée '**NOCT**' (Normal Operating Cell Temperature), cette température est mesurée sous un rayonnement incident de 800 W/m², une température extérieure de 20°C, et une vitesse de vent de 1 m/s. En utilisant l'expression (II.24), il est possible d'exprimer le coefficient h_{pv} en fonction du NOCT, ce qui donne :

$$T_c = T_{ext} + G \left(\frac{NOCT - T_{extNOCT}}{G_{NOCT}} \right) \left(1 - \frac{\eta_{pv}}{\tau_{pv} \cdot \alpha_{pv}} \right) \dots\dots\dots(II.26)$$

Avec

- NOCT** : Température normale de fonctionnement des cellules PV (K),
- G_{NOCT} : Rayonnement correspondant au NOCT (800 W/m²),
- $T_{extNOCT}$: Température ambiante correspondant au NOCT (20°C).

8.2 Modèle 'Sandia' :

Un modèle développé par le Sandia National Laboratoires permet de calculer la température de jonction en fonction (en plus du rayonnement incident et de la température ambiante) de la vitesse du vent et du type d'encapsulation :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ar} = \frac{G}{G_r} \cdot (T_1 \cdot e^{aw} + T_2) + T_{ext} \\ T_c = T_{ar} + \frac{G}{G_r} \cdot \Delta T \end{array} \right\} \dots\dots\dots(II.27)$$

Avec

- T_{ar}** : Température de la surface arrière du module (K),
- W** : Vitesse du vent (m/s).

L'expression ci-dessus fait apparaître différents paramètres tels que

- T₁ (°K)** : Coefficient déterminant la limite supérieure de température pour une vitesse de vent faible ;
- T₂ (°K)** : Coefficient déterminant la limite inférieure de température pour une vitesse de vent élevée ;
- b (s/m)** : Coefficient déterminant le taux de variation de la température en fonction de la vitesse du vent ;
- ΔT** : Coefficient déterminant la différence de température entre la face arrière du module et la cellule PV.

Les paramètres ci-dessus sont déterminés expérimentalement.

Le tableau II.1 ci-dessous donne un exemple de valeurs pour deux types d'encapsulation :

Type d'encapsulation	T ₁ (K)	T ₂ (K)	b (s/m)	ΔT (K)
Verre/cellule PV/Verre	298.1	281.3	-0.112	2
Verre/Cellule PV/Tedlar	292.7	284.7	-0.223	3

Tableau II.2. Exemple de valeurs pour deux types d'encapsulation

L'avantage de ce modèle est qu'il fait apparaître la vitesse du vent, ainsi que le type d'encapsulation. Par contre, les paramètres d'entrée de ce modèle ne font pas partie de ceux mesurés par les constructeurs. De plus ce modèle ne s'applique qu'aux capteurs PV montés sur une structure indépendante de l'enveloppe du bâtiment, comme en toiture terrasse par exemple.

8.3 Modèle détaillé :

Des études ont été effectuées pour calculer la température de jonction à partir de bilans thermiques utilisant des coefficients de transfert thermique comme dans l'expression (II.24), mais de manière plus détaillée comme le montre le bilan thermique illustré par la figure ci-dessous :

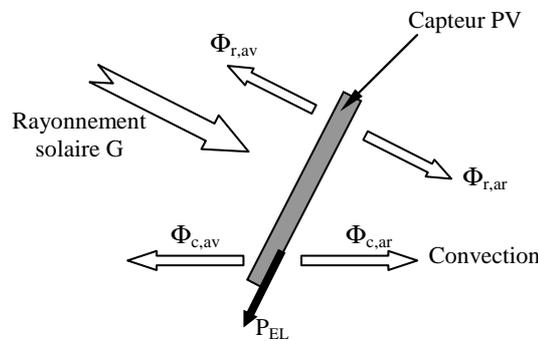


Figure II.8. Bilan thermique du module PV.

Le bilan thermique effectué à partir de la figure II.8 ci-dessus s'exprime comme suit :

$$C_{mod} \cdot \frac{dT}{dt} = (\tau_{pv} \cdot \alpha_{pv}) \cdot G + \Phi_{c,ar} + \Phi_{c,av} + \Phi_{r,ar} + \Phi_{r,av} - P_{el} \dots \dots \dots (II.28)$$

Avec

- C_{mod} : Capacité calorifique du module PV (J/K),
- $(\tau_{pv} \cdot \alpha_{pv})$: Coefficient d'absorption du module PV (-),
- $\Phi_{c,av}$: Flux convectif face avant du module (W/m²),
- $\Phi_{c,ar}$: Flux convectif face arrière du module (W/m²),
- $\Phi_{r,av}$: Flux radiatif face avant du module (W/m²),
- $\Phi_{r,ar}$: Flux radiatif face arrière du module (W/m²),
- P_{el} : Puissance électrique produite par W/m².

Il s'agit d'un bilan à une dimension (la dissipation de chaleur par les bords du module ainsi que par les pattes de fixation est négligée). La température du module est supposée uniforme et égale à la température de jonction.

Pour calculer l'énergie échangée par rayonnement entre la face avant du module et l'extérieur, il faut calculer les échanges entre la surface du module et les N surfaces en regard :

$$\Phi_{r,av} = \sum_{i=1}^N \epsilon_{pv} \cdot \epsilon_i \cdot F_{i-pv} \cdot \sigma \cdot (T_c^4 - T_i^4) \dots \dots \dots (II.29)$$

Avec

- ϵ_{pv} : Emissivité du module PV (-),
- ϵ_i : Emissivité de la ième surface (-),
- F_{i-pv} : Facteur de forme de la surface i vue de la face avant du module PV (-),
- T_i : Température de la surface i supposée uniforme (K),
- T_c : Température de jonction du module PV.

Il est à noter dans ce cas que la température du capteur est considérée comme étant homogène et égale à la température de jonction, et donc la température à la surface du capteur sera donné par cette même température de jonction.

Si la surface avant du module échange, uniquement, par rayonnement avec le ciel et le sol alors $\Phi_{r,av}$ devient après linéarisation des différences de température :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{r,av} = h_{r,av-ciel} \cdot (T_{ciel} - T_c) + h_{r,av-sol} \cdot (T_{sol} - T_c) \\ h_{r,av-ciel} = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{pv} \cdot \frac{(1 - \cos \theta)}{2} \cdot \epsilon_{ciel} \cdot \left(\frac{T_{ciel} + T_c}{2} \right)^3 \\ h_{r,av-sol} = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{pv} \cdot \frac{(1 - \cos \theta)}{2} \cdot \epsilon_{sol} \cdot \left(\frac{T_{sol} + T_c}{2} \right)^3 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (II.30)$$

Avec :

- T_{ciel} (resp. T_{sol}) : température de ciel (resp. du sol)

Si le module PV est placé par exemple en toiture terrasse et qu'il est incliné du même angle θ par rapport à l'horizontale, le même type de calcul s'applique pour estimer le flux échangé par rayonnement entre la face arrière et l'extérieur, ce qui donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{r,ar} = h_{r,ar-ciel} \cdot (T_{ciel} - T_c) + h_{r,ar-sol} \cdot (T_{sol} - T_c) \\ h_{r,ar-ciel} = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{pv} \cdot \frac{\left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right)}{2} \cdot \epsilon_{ciel} \cdot \left(\frac{T_{ciel} + T_c}{2}\right)^3 \\ h_{r,ar-sol} = 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{pv} \cdot \frac{\left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right)}{2} \cdot \epsilon_{sol} \cdot \left(\frac{T_{sol} + T_c}{2}\right)^3 \end{array} \right\} \dots(\text{II.31})$$

Par contre si le capteur est fixé sur une toiture ou une façade, alors pour calculer le flux échangé par rayonnement, il faut considérer deux plaques planes parallèles et infinies, ce qui nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{r,ar} = h_{r,ar-par} \cdot (T_p - T_j) \\ h_{r,ar-par} = 4\sigma \cdot \left(\frac{T_p + T_j}{2}\right)^3 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{pv}} - 1} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(\text{II.32})$$

Avec

- T_p** : Température de paroi du bâtiment,
- ε_p (resp. ε_{pv})** : Emissivité de la paroi du bâtiment (resp. du module PV).

Pour calculer les flux convectifs, il faut utiliser les corrélations afin de calculer les coefficients de transfert. Il faut distinguer deux cas de figure :

- Si le vent est suffisamment important (à partir d'environ 2m/s par exemple), le régime de convection est forcé.

Pour calculer le coefficient de transfert par convection h_{c,av} entre la face avant du capteur et l'extérieur, la corrélation en convection forcée recommandée pour un capteur PV intégré au bâtiment est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu = 0.86 \cdot Re_{L_c}^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \\ L_c = \frac{4 \cdot A_{pv}}{P} \\ h_{c,av} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{w} \\ \text{Avec} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (II.33)$$

- L_c** : Longueur caractéristique de l'écoulement, dont dépend le nombre de Reynolds (m),
- A_{pv}** : Aire du capteur PV (m²),
- P** : Périmètre du capteur PV (m),
- λ_a** : Conductivité de l'air (W/m/K),
- w** : Largeur du capteur PV (m).

Cette corrélation est valable pour une surface isotherme, pour { 2×104 < Re.L_c < 9×104 } et un écoulement de type laminaire. Pour calculer le coefficient de transfert h_{pv}, c'est la largeur w du capteur PV qui est utilisée, car la direction du vent est supposée être horizontale et parallèle au capteur PV (ce qui est concevable dans la mesure où le capteur est intégré en façade du bâtiment). La corrélation ci-dessus est valable en écoulement de type laminaire. Or, les mesures de vitesses du vent effectuées par [6] font remarquer que seules 5 mesures sur 13250 font état d'une vitesse supérieure à 5m/s, alors que la transition laminaire/turbulent se situait à 6.2 m/s.

- Si le vent est nul ou très faible, il faut utiliser une corrélation valable en convection naturelle :

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu = 0.56 \cdot (Ra_c \cdot \sin \theta)^{0.25} + 0.13(Ra^{0.333} - Ra_c^{0.333}) \\ Ra = Pr \cdot \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (T_j - T_{ext})}{\nu} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (II.34)$$

- T_c** : Température de jonction (K),
- T_{ext}** : Température moyenne de l'air ambiant (K).

Dans une étude menée par [14], ils ont utilisé une expression du coefficient de transfert en convection naturelle pour une surface plane verticale, et un écoulement de type turbulent. Cette expression fait apparaître directement la différence de température entre le capteur PV et la température moyenne de l'air:

$$h_c = 1.31 \cdot (T_c - T_{ext})^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (II.35)$$

Dans le cas d'une convection mixte, [6] propose de calculer les corrélations dans les deux cas (convection forcée et convection naturelle), et de garder la valeur du nombre de Nusselt la plus élevée pour calculer les échanges par convection.

Pour la face arrière, si le capteur est fixé sur le toit, une lame d'air sépare la face arrière du capteur de la toiture et dans ce cas l'écoulement dans cette lame d'air se fait en convection naturelle.

De même, si le capteur est intégré en couverture du bâtiment (intégration en véranda par exemple), l'écoulement se fait aussi en convection naturelle. La corrélation recommandée par [6] est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu = 0.476.Gr_i^{\frac{1}{4}} \\ h_{c,ar} = \frac{Nu.\lambda_a}{L} \\ Avec \end{array} \right\} \dots\dots\dots(II.36)$$

L : longueur du capteur PV.

Cette expression est employée dans le cadre d'une étude menée sur des capteurs PV intégrés en façade de bâtiment, donc avec un angle d'inclinaison θ égal à 90° . Une autre étude menée par [18] emploie une corrélation similaire mais qui fait apparaître l'angle d'inclinaison θ du capteur :

$$Nu = 0.56(Ra.\sin \theta)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots(II.37)$$

Cette corrélation est valable pour une surface isotherme, pour $Pr=0.72$, et un écoulement de type laminaire. La dimension caractéristique qui intervient dans le nombre de Grashof est la longueur L du capteur.

9. Autres composants :

9.1 Stockage :

Les phénomènes électrochimiques qui se produisent au sein même des accumulateurs sont très complexes. Cependant il existe des modèles qui donnent la tension aux bornes d'une batterie ainsi que son état de charge de manière satisfaisante.

Le modèle développé par le Centre d'Energétique sur le site de Sophia Antipolis est un modèle empirique. L'expression de la tension U_{bat} aux bornes de la batterie est la suivante :

Pour la charge :

$$U_{bat} = E_{ch} + R_{ch} \cdot I = P_{c1} + P_{c2} \cdot \frac{Q_{bat}}{P_{c5}} + \left(P_{c3} + \frac{P_{c4}}{1 - \frac{Q_{bat}}{P_{c5}}} \right) \cdot I \dots\dots\dots (II.38)$$

Pour la décharge :

$$U_{bat} = E_{dch} + R_{dch} \cdot I = P_{d1} + P_{d2} \cdot \frac{Q_{bat}}{P_{d5}} + \left(P_{d3} + \frac{P_{d4}}{1 - \frac{Q_{bat}}{P_{d5}}} \right) \cdot I \dots\dots\dots (II.39)$$

Avec :

- $P_{c1}..P_{d4}$** : Coefficients constants pour toutes les batteries -
- P_{c5}** : 1.122 C100,
- P_{d5}** : C100,
- C100** : Capacité de la batterie (Ah), donnée pour une décharge complète en 100 heures et avec un courant constant,
- R_{ch}** : Résistance interne de l'accumulateur lors de la charge (Ω),
- R_{dch}** : Résistance interne de l'accumulateur lors de la décharge (Ω),
- E_{ch}** : Force électromotrice de l'accumulateur lors de la charge (Volts),
- E_{dch}** : Force électromotrice de l'accumulateur lors de la décharge (Volts),
- P_{stock}** : Coefficient d'autodécharge (-),
- Q_{bat}** : Etat de charge de la batterie (C).

La variation de l'état de charge d' Q_{bat} se calcule selon l'équation suivante :

$$dQ_{bat} = K \cdot (U_{bat} - R \cdot I) \cdot \frac{I}{U_{bat}} \cdot dt - \frac{P_{stock}}{U_{bat}} \cdot dt \dots\dots\dots (II.40)$$

Avec

- K** : rendement faradique de l'accumulateur (-).

Les paramètres C_{100} , K , et P_{stock} sont donnés par les constructeurs. Le rendement faradique K est supposé être le même aussi bien pour la charge que pour la décharge.

9.2 Onduleur :

L'onduleur est le composant qui sert à convertir le courant continu issu du capteur PV en courant alternatif. Il est possible d'exprimer la puissance à la sortie de l'onduleur P_{out} en fonction de la puissance à l'entrée de l'onduleur P_{in} avec une fonction polynomiale du second ordre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P=} \\ \text{Avec} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} c_0 + c_1 \cdot P_{in} + c_3 \cdot P_{in}^2 \quad \text{si} \quad P_{in, \min} \leq P_{in} \leq P_{in, \max} \\ 0 \quad \text{si} \quad P_{in} \leq P_{in, \min} \quad \text{ou} \quad P_{in} \geq P_{in, \max} \end{array} \right. \right\} . \text{ (II.41)}$$

c_0, c_1, c_2 : Constantes,
 P_{in} : Puissance à l'entrée de l'onduleur (W),
 P_{out} : Puissance à la sortie de l'onduleur (W).

Si la puissance à l'entrée de l'onduleur $P_{in, \min}$ est inférieure à la puissance minimale ou supérieure à la puissance maximale $P_{in, \max}$, la puissance en sortie P_{out} est nulle. Si les coefficients (c_0, c_1, c_2) ne sont pas donnés par les constructeurs, il est possible de les calculer par la méthode des moindres carrés. Pour cela, il faut connaître quelques paires de points (P_{in}, P_{out}). La courbe caractéristique d'un onduleur donne le rendement de l'onduleur en fonction de la puissance en sortie (figure II.9).

Des travaux expérimentaux menés par le Centre d'Energétique de Sophia Antipolis ont permis de valider le modèle polynomial du second ordre [7].

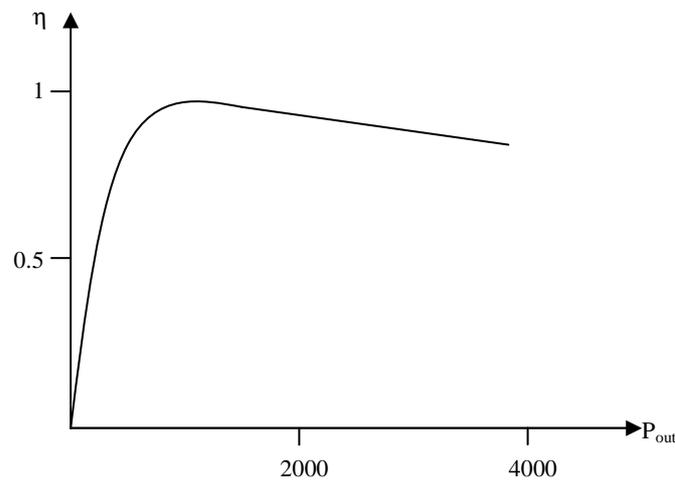


Figure II.9. Exemple de courbe de rendement de l'onduleur η en fonction de la puissance de sortie P_{out} , pour un onduleur de puissance nominale 4kW. Le rendement est en général supérieur à 90 % dans les limites normales de fonctionnement.

10. Conclusion :

Les modèles exposés dans ce chapitre donnent des résultats satisfaisants, par conséquent on est amené à choisir le model de Madison (une seule Diode) comme model d'étude .Ce choix ce justifie par le fait que ce dernier se base sur les données constructeur, issues de résultat expérimentale.

Dans nos prochaines approches on va faire des optimisations à ce model en ajoutant une diode au model électrique équivalente de Madison (model à plusieurs diodes) et comparée les résultats obtenus.

Chapitre III

**Modélisation électrique d'un modèle
Photovoltaïque**

1. Introduction :

Pour pouvoir simuler le fonctionnement des modules photovoltaïques, nous devons établir un modèle qui reflétera le plus fidèlement possible le comportement étudié dans le chapitre précédent. Il n'y a malheureusement pas de modèle parfait. Ce modèle doit résulter d'un compromis entre simplicité et précision correspondant le mieux possible à l'usage que nous allons en faire.

Dans ce chapitre on va calculer les paramètres électriques (**U, I, P**) à partir de l'équation générale du modèle. Cependant cette dernière présente des difficultés mathématiques pour sa résolution à cause du nombre élevé d'inconnues des paramètres constants, qui caractérisent le modèle (**R_p, R_s, γ , I_{rf}, ...**). Pour cela on est obligé à faire certaines simplifications et suppositions afin de pouvoir calculer les paramètres voulus (en obscurité **I_f=0, T_c=T_a**, avec éclairage, etc.....).

À l'issue des résultats obtenus théoriquement on va faire une comparaison, avec ceux obtenus lors de l'expérimentation pour valider nos résultats.

2. Ecrire le modèle électrique :

Nous avons vu que la caractéristique d'une cellule photovoltaïque dérivait de celle d'une diode, il est donc tout naturel de baser le modèle équivalent sur celui d'une diode (modèle de Madisan). Cette diode appelée diode d'obscurité, sera définie par l'équation de Shockley modifiée [16].

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{q \cdot U_d}{\gamma \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

Où

U_d	: est la tension, I le courant,
q	: le quantum de charge (1.602. 10 ⁻¹⁹),
K	: la constante de BOLTZMANN (1,381 10 ⁻²³),
T_c	: La température de la cellule
γ	: Le facteur de qualité de la diode.

Si l'on parle de I_0 qui représente le courant de fuite de la diode idéale, constant, l'utilisation de cette équation nous montre une influence de la température inversée par rapport à ce que l'on observe expérimentalement [19].

Selon N_c , l'effet de la température se manifeste surtout par son influence sur le courant de fuite de la manière suivant (chapitre II) :

$$I_0 = I_{rf} \cdot \left(\frac{q \cdot \mathcal{E}_g}{\gamma \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \dots \dots \dots (III.2)$$

Où

\mathcal{E}_g : La largeur de la zone interdite (1.12 ev pour le silicium cristallin).

L'équation de la diode n'admet donc que deux degrés de liberté : la tension et la température.

Le schéma équivalent de module photovoltaïque avec une et deux diodes est:

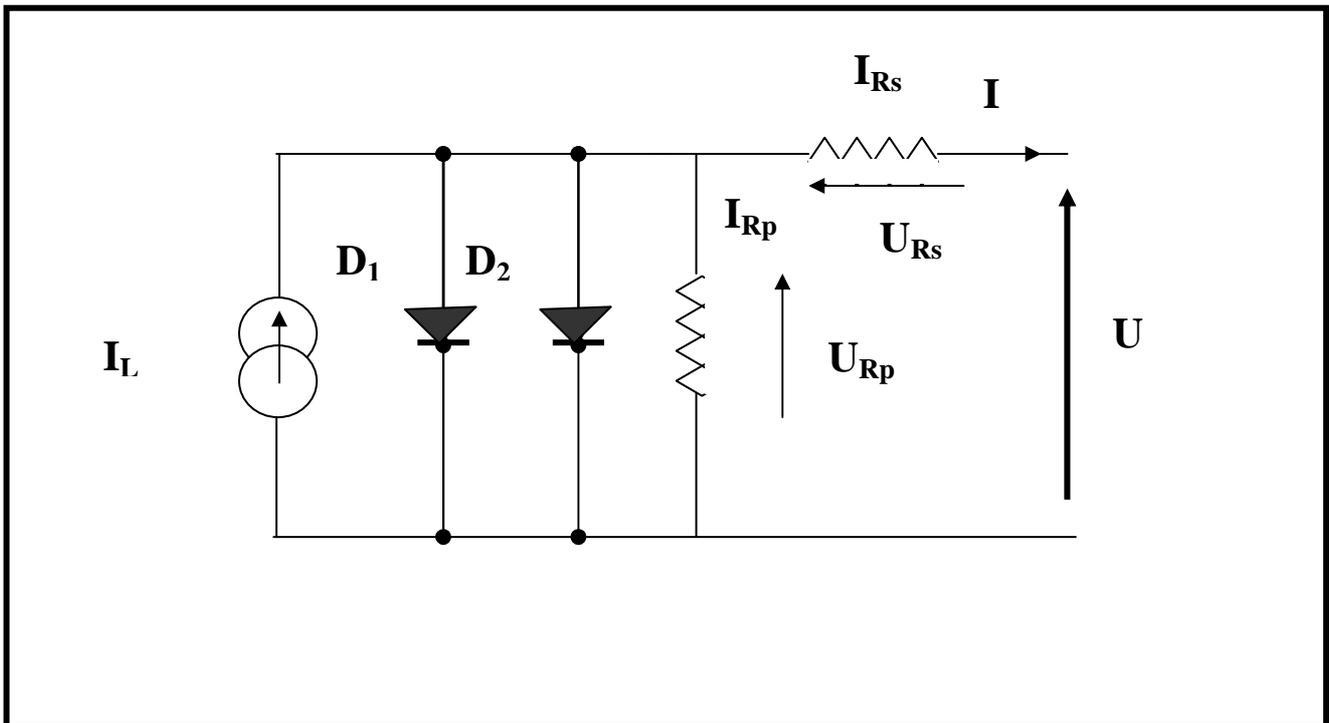


Figure III.1. Le schéma équivalent de module photovoltaïque à deux diodes

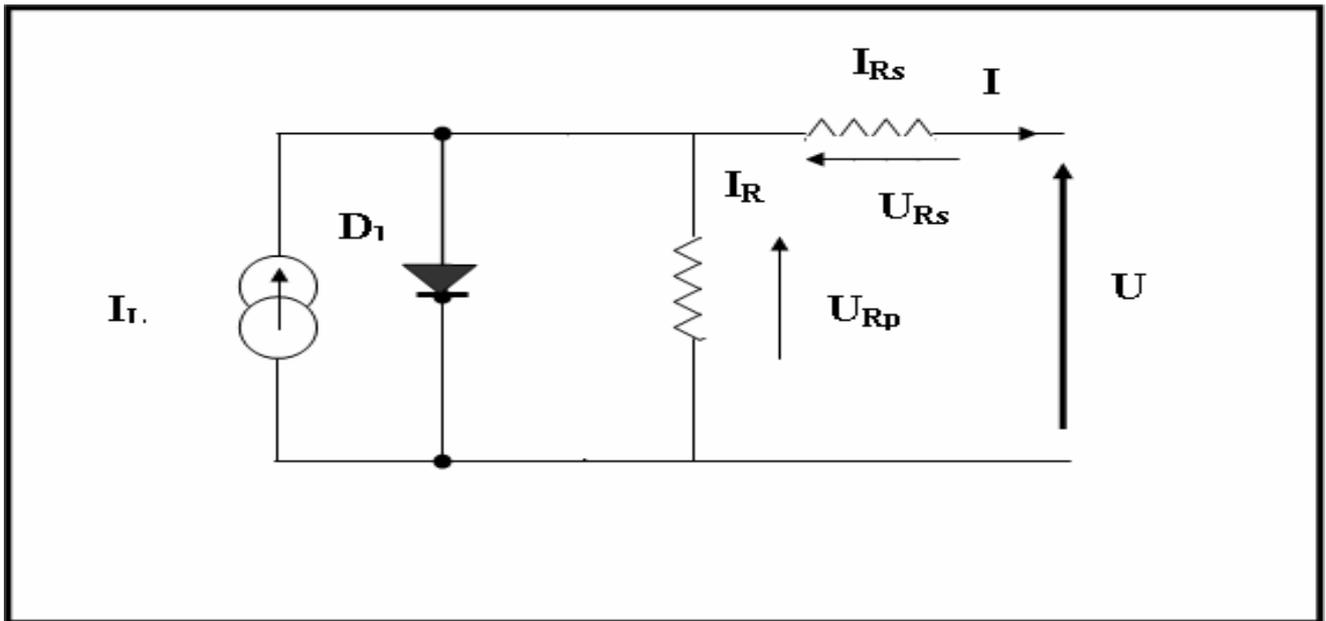


Figure III.2. Le schéma équivalent de module photovoltaïque à une diode

Si on tient compte du fait qu'un module est constitué de N_c cellules on obtient donc l'équation suivante :

Pour un modèle avec deux diodes.

$$I = I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{e(U + R_s \cdot I)}{N_c \cdot \gamma_2 \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right] + I_{01} \left[\exp\left(\frac{e(U - R_s \cdot I)}{N_c \cdot \gamma_1 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] + \frac{(U - R_s \cdot I)}{R_p} - I_l \dots\dots (III.3)$$

Pour un modèle avec une diode.

$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{e(U - R_s \cdot I)}{N_c \cdot \gamma \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] + \frac{(U - R_s \cdot I)}{R_p} - I_l \dots\dots\dots (III.4)$$

Où I est le courant entrant dans le module.

Le photo courant I_L , qui dépend du rayonnement incident et de la température de la cellule peut être déterminé sur la base de la valeur donnée dans des conditions de référence [26]:

$$I_l = \frac{G}{G_{ref}} \cdot [I_{ref} + \mu(T_c - T_{ref})] \dots \dots \dots (III.5)$$

G : est le rayonnement incident

μ : Le coefficient de température du photo courant.

Pour pouvoir utiliser ce model, il nous reste donc de déterminer expérimentalement les différents paramètres mentionnés ici, il faudra également voir comment déterminer la température exacte des cellules en fonction de la température ambiante, du rayonnement, de la vitesse du vent,...etc. (Chapitre suivant).

3. Déterminations des paramètres :

Pour pouvoir déterminer les paramètres du model de la manière la plus fiable possible, il faut disposer d'un maximum de données expérimentales (modèle de Madisan) de manière à diminuer le risque d'erreurs. On aura la possibilité de faire des mesures en obscurité ou avec éclairage, avec ou sans échauffement par effet Joule, en ambiance calme ou agitée, etc...., toutes ces données seront nécessaires pour déterminer le modèle de la manière la plus complète et la plus précise.

3.1 Le paramètre de R_p :

3.1.1 Théorie :

L'idéale est de pouvoir déterminer chaque paramètre à son tour à l'aide de données pouvant être interprétées grâce à des équations à une inconnue, cela dit, en procédant par approximations, on peut réduire le nombre d'inconnues d'une équation [10].

Les simplifications que nous pouvons faire concernent les conditions opératoires, il est plus simple de se placer en laboratoire, sans vent ni pluie, et de réaliser des mesures suffisamment rapides pour pouvoir négliger l'échauffement dû au courant et on fait les mesures en obscurité. De cette manière, nous pouvons considérer que la température des cellules est égale à la température ambiante.

L'équation III.3 et III.4 peut se résumer à :

$$I = I_L - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rp}$$

pour le modèle avec deux diodes

$$I = I_L - I_d - I_{Rp}$$

pour le modèle avec une diode

Dans cette forme d'équation, il y a 4 inconnues : I_{D1} , I_{D2} , I_{Rp} , et I_L . Cela nous fait 3 inconnues de plus, pour y remédier, le plus simple consiste à négliger I_{d1} et I_{d2} , ce choix est justifié du fait que le comportement d'une diode idéale, son courant ne prend de valeur significative que si la tension de la diode est suffisamment élevée, par conséquent, si nous disposons de mesures à faible tension, on peut écrire pour les deux modèles :

$$I = I_{Rp} - I_L$$

Un deuxième choix se présente c'est de supprimer de l'équation le courant I_L , en mode obscurité. on aura donc :

$$I = I_{Rp}$$

$$\Rightarrow R_p = U_d / I = (U + R_s \cdot I) / I$$

$$\Rightarrow R_p - R_s = U / I$$

Tant que : R_p est plus grande que R_s

$$\Rightarrow R_p = U / I$$

3.1.2 Application numérique :

Nous pouvons faire le calcul pour les différentes mesures reprises dans les annexes.

Ces mesures étant prises à l'aide de modules de 36 cellules, nous retenons les points dans les tensions variants de -1V et +1V. Ces points sont suffisamment proches de l'axe des ordonnées pour appartenir à la zone linéaire et assez éloignés pour minimiser l'erreur de la pente.

Les résultats du calcul pour chacune des courbes prises en obscurité pour un module de silicium poly cristallin et mono cristallin sont donnés dans les tableaux III-1 et III-2 :

	Tension (V)	Courant (A)	$\Delta(U)$	$\Delta(I)$	R_p
Courbe 1	-1	0.00019	-1	-0.00019	5263.1578
	0	0			
	0	0	-1	-0.00019	5263.1578
	1	-0.00019			
	-1	0.00019	-2	-0.00038	5263.1578
	1	-0.00019			
Courbe 2	-1	0.000175	-1	-0.000175	5714.2857
	0	0			
	0	0	-1	-0.000175	5714.2857
	1	-0.000175			
	-1	0.000175	-2	-0.00035	5714.2857
	1	-0.000175			
Courbe 3	-1	0.000195	-1	-0.000195	5128.2051
	0	0			
	0	0	-1	-0.00017	5882.3529
	1	-0.00017			
	-1	0.000195	-2	-0.000365	5479.4520
	1	-0.00017			

Tableau III.1 : calcul de la résistance parallèle du silicium poly cristallin

Ce qui donne une moyenne : $R_p = 5485.6315$

	Tension (V)	Courant (A)	$\Delta(U)$	$\Delta(I)$	R_p
Courbe 1	-1	0.000215	-1	-0.000215	4651.1627
	0	0			
	0	0	-1	-0.00021	4761.9047
	1	-0.00021			
	-1	0.000215	-2	-0.000425	4705.8823
	1	-0.00021			
Courbe 2	-1	0.00023	-1	-0.00023	4347.826
	0	0			
	0	0	-1	-0.0002	5000
	1	-0.0002			
	-1	0.00023	-2	-0.00043	4651.1627
	1	-0.0002			
Courbe 3	-1	0.000215	-1	-0.000215	4651.1627
	0	0			
	0	0	-1	-0.0002	5000
	1	-0.0002			
	-1	0.000215	-2	-0.000415	4819.2771
	1	-0.0002			

Tableau III.2. Calcul de la résistance parallèle du silicium mono cristallin

Ce qui donne une moyenne : $R_p = 4732.042044$

3.2 Le paramètre R_s :

3.2.1 Théorie :

La méthode de calcul de R_s est relativement similaire à l'équation suivante.

On sait que pour les deux modèles:

$$U = U_d + I.R_s \dots\dots\dots (III.6)$$

On a là, deux inconnues pour une seule équation. Éliminer l'inconnue U_d n'est pas très compliqué. On sait que lorsqu'une diode est passante, sa tension se fixe entre 0,5 et 0,7 V et reste presque constant alors que le courant peut subir de fortes augmentations [10].

Par conséquent, si l'on dispose de mesures à tension suffisamment élevée, on peut considérer La tension U_d comme constante et calculer R_s en terme de pente , on aura :

$$\begin{aligned} du / di &= R_s \\ \Rightarrow R_s &= \Delta U / \Delta I \end{aligned}$$

3.2.2 Application numériques :

Il faut ici prendre en considération les points situés aux tensions les plus élevées de la courbe. Nous pouvons par conséquent baser notre calcul sur les derniers points de chaque courbe. Les résultats du calcul pour le silicium poly cristallin et mono cristallin se trouvent dans les tableaux III-3 et III-4

	Tension (V)	Courant (A)	$\Delta(U)$	$\Delta(I)$	R_s
Courbe 1	23	-3.3	0.5	0.76	0.6578
	23.5	-4.06			
	23.5	-4.06	0.5	0.94	0.5319
	24	-5			
	23	-3.3	1	1.7	0.5882
	24	-5			
Courbe 2	23.5	-3.3	0.5	0.685	0.7299
	24	-3.985			
	24	-3.985	0.5	0.96	0.5208
	24.5	-4.945			
	23.5	-3.3	1	1.645	0.6079
	24.5	-4.945			
Courbe 3	23	-2.99	0.5	0.75	0.6666
	23.5	-3.74			
	23.5	-3.74	0.5	0.835	0.5988
	24	-4.575			
	23	-2.99	1	1.585	0.6309
	24	-4.575			

Tableau III.3. Calcul de la résistance série du silicium poly cristallin

Ce qui donne une moyenne $R_s=0.614422$

	Tension (V)	Courant (A)	$\Delta(U)$	$\Delta(I)$	R_s
Courbe 1	24.5	-3.43	0.5	0.595	0.8403
	25	-4.025			
	25	-4.025	0.5	0.655	0.7633
	25.5	-4.68			
	24.5	-3.43	1	1.25	0.8
	25.5	-4.68			
Courbe 2	24.5	-3.08	0.5	0.52	0.9615
	25	-3.6			
	25	-3.6	0.5	0.775	0.6451
	25.5	-4.375			
	24.5	-3.08	1	1.295	0.7722
	25.5	-4.375			
Courbe 3	24.5	-3.4	0.5	0.59	0.8474
	25	-3.99			
	25	-3.99	0.5	0.62	0.8064
	25.5	-4.61			
	24.5	-3.4	1	1.21	0.8264
	25.5	-4.61			

Tableau III.4. Calcul de la résistance série du silicium mono Cristallin

Ce qui donne une moyenne $R_s=0.806956$

3.3 Les paramètres de I_{0rf} et γ :

3.3.1 Théorie :

Nous avons donc dégagé deux zones linéaires dont les pentes représentent les deux résistances du modèle (R_p et R_s). Dans ces zones, la valeur précise du courant sera déterminée par l'équation générale du courant (III.3), cette équation comporte encore deux inconnues qui sont I_{0rf} et γ . Malheureusement, ces paramètres sont difficilement dissociables.

Cela dit, nous savons que γ prend une valeur située entre 1 et 5 (le nombre de cellules en séries) par conséquent, il nous suffira de fixer arbitrairement une valeur à γ et de calculer alors I_{0rf} , par itérations successives, nous devrions alors arriver à la bonne valeur [13].

La question est alors de savoir sur quelles mesures se baser pour ce calcul. Il est évidemment préférable de se baser sur des mesures en obscurité. L'endroit de la courbe où les valeurs du courant seront les plus dépendantes des deux paramètres est la partie où la tension est la plus élevée. Nous savons en effet que I_{0rf} et γ sont négligeables à faible tension.

Nous aurons donc intérêt à calculer, I_{0rf} et γ , avec les mêmes points que ceux qui ont servi à calculer R_s , avant de vérifier à l'aide d'autres points la validité des valeurs obtenues.

4. Régressions linéaires :

Pour améliorer les valeurs des paramètres internes. On peut réaliser une régression non linéaire à l'aide d'un programme adapté à cette problématique. Evidemment, il faut bien choisir les points des courbes en fonction desquels on va recalculer chaque paramètre. Ainsi il ne faut pas essayer d'améliorer R_p en fonction des points à tension élevée, ni R_s en fonction de ceux à faible tension. Si nous essayons d'effectuer cette régression sur plusieurs paramètres en même temps, en sélectionnant de mauvaises parties de la courbe, soit la régression n'aboutirait pas pour cause de dépassement des capacités du programme, soit les paramètres prendraient des valeurs rendant le modèle inexact. Les valeurs atteintes peuvent même être négatives.

Pour R_p , nous utilisons donc les points dont la tension est située entre -1V et 1V, alors que pour R_s nous prenons ceux dont la tension se trouve au-delà de 23V. Ce sont des valeurs choisies de manière arbitraire comme limite des zones linéaires. Ces limites n'étant pas définies de manière évidente, nous devons faire un choix.

En ce qui concerne I_{rf} et γ , nous prenons les deux zones décrites ci-dessus. Si nous ne gardons pas toute la courbe, c'est parce que notre modèle présente des imperfections vis-à-vis des points situés

entre ces deux zones, pour l'instant, nous allons essayer d'avoir des paramètres qui s'adaptent le mieux possible aux points choisis. Avec le programme de régression non linéaire, on peut donc modifier successivement chaque paramètre de manière à s'approcher progressivement des courbes mesurées expérimentalement.

En utilisant les trois courbes en obscurité de silicium poly et mono cristallin, on peut, en relançant de nombreuses fois la régression, trouver des valeurs vers lesquelles convergent les paramètres. Ces valeurs sont les suivantes :

$$\mathbf{R_p = 5388} \quad \mathbf{R_S = 0.2712} \quad \mathbf{I_{ref} = 3.68E^{-7}} \quad \mathbf{\gamma = 1.491}$$

Pour une diode

$$\mathbf{R_p = 4999} \quad \mathbf{R_S = 0.549} \quad \mathbf{I_{ref1} = 3.9385.E^{-6}} \quad \mathbf{\gamma_1 = 1.889}$$

$$\mathbf{I_{ref2} = 3.225.E^{-6}} \quad \mathbf{\gamma_2 = 1.679}$$

Pour le modèle de deux diodes relatif au silicium poly cristallin

$$\mathbf{R_p = 4658} \quad \mathbf{R_S = 0.4414} \quad \mathbf{I_{ref} = 2.45E^{-7}} \quad \mathbf{\gamma = 1.502}$$

Pour une diode

$$\mathbf{R_p = 4656} \quad \mathbf{R_S = 0.761} \quad \mathbf{I_{ref1} = 1.9528E^{-6}} \quad \mathbf{\gamma_1 = 1.9}$$

$$\mathbf{I_{ref2} = 1.9001E^{-6}} \quad \mathbf{\gamma_2 = 1.77}$$

Pour le modèle de deux diodes pour le silicium mono cristallin ces valeurs sont donc les valeurs optimisées au maximum en fonction des mesures qui ont été prises, elles sont définitives.

5. Analyses des résultats :

L'étape suivante consiste alors à éprouver la validité du modèle en le confrontant aux mesures effectuées sur les modèles. Nous disposons pour cela des trois courbes en obscurité utilisées précédemment et d'une courbe avec éclairage des panneaux (voir les annexes).

Nous effectuons le calcul pour tous les points caractéristiques de chaque courbe et nous retenons la différence relative entre mesures et calculs pour le modèle d'une diode et pour le modèle avec deux diodes.

Les résultats sont donnés dans les tableaux ci-dessous.

U mod	Im (T1)	Ic (T1) DD	Ic(T1)UD	DRDD %	DRD %
-3	0,000545	0,00053	0,000523	2,75229358	4,03669725
-2	0,00036	0,00033	0,00032	8,33333333	11,1111111
-1	0,00019	0,00018	0,000176	5,26315789	7,36842105
0	0	0	0	0	0
1	-0,00019	-0,00018	-0,00017	5,26315789	10,5263158
2	-0,0004	-0,00039	-0,000377	2,5	5,75
3	-0,00064	-0,00062	-0,000477	3,125	25,46875
5	-0,00116	-0,00116	-0,0011	0	5,17241379
8	-0,002865	-0,002865	-0,00266	0	7,15532286
12	-0,0102	-0,0102	-0,00936	0	8,23529412
15	-0,0352	-0,0349	-0,031	0,85227273	11,9318182
18	-0,183	-0,176	-0,174	3,82513661	4,91803279
20	-0,642	-0,638	-0,574	0,62305296	10,5919003
21	-1,265	-1,23	-1,08	2,76679842	14,6245059
21,5	-1,61	-1,58	-1,48	1,86335404	8,07453416
22	-2,055	-2,05	-1,88	0,243309	8,51581509
22,5	-2,64	-2,6	-2,4	1,51515152	9,09090909
23	-3,3	-3,2	-3	3,03030303	9,09090909
23,5	-4,06	-4,01	-3,88	1,23152709	4,43349754
24	-5	-4,95	-4,74	1	5,2

Tableau III.5. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=296.15 °K

U mod	Im (T2)	Ic (T2) DD	Ic(T2)UD	DRDD %	DRD %
-3	0,000535	0,00053	0,0005	0,934579439	6,542056075
-2	0,00036	0,00034	0,00032	5,555555556	11,11111111
-1	0,000175	0,000171	0,00017	2,285714286	2,857142857
0	0	0	0	0	0
1	-0,000175	-0,000172	-0,000171	1,714285714	2,285714286
2	-0,00037	-0,00035	-0,000347	5,405405405	6,216216216
3	-0,0006	-0,0006	-0,0005	0	16,66666667
5	-0,001055	-0,001055	-0,001	0	5,213270142
8	-0,002445	-0,002445	-0,0024	0	1,840490798
12	-0,00818	-0,00818	-0,0081	0	0,97799511
15	-0,0253	-0,024	-0,023	5,138339921	9,090909091
18	-0,124	-0,121	-0,119	2,419354839	4,032258065
20	-0,429	-0,426	-0,39	0,699300699	9,090909091
21	-0,824	-0,819	-0,7	0,606796117	15,04854369
21,5	-1,16	-1,1	-0,97	5,172413793	16,37931034
22	-1,525	-1,5	-1,41	1,639344262	7,540983607
22,5	-1,955	-1,92	-1,8	1,79028133	7,928388747
23	-2,515	-2,49	-2,39	0,994035785	4,970178926
23,5	-3,3	-3,2	-3	3,03030303	9,090909091
24	-3,985	-3,97	-3,72	0,376411543	6,649937265

Tableau III.6. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=291.95 °K

U mod	Im (T3)	Ic (T3) DD	Ic(T3)UD	DRDD %	DRD %
-3	0,000553	0,000547	0,000537	1,08499096	2,89330922
-2	0,000365	0,000364	0,000354	0,2739726	3,01369863
-1	0,000195	0,00019	0,00017	2,56410256	12,8205128
0	0	0	0	0	0
1	-0,00017	-0,00016	-0,00015	5,88235294	11,7647059
2	-0,000385	-0,000379	-0,000377	1,55844156	2,07792208
3	-0,00061	-0,00057	-0,00052	6,55737705	14,7540984
5	-0,001105	-0,001105	-0,001077	0	2,53393665
8	-0,00264	-0,00264	-0,00266	0	1,13636364
12	-0,00911	-0,00911	-0,00933	0	1,20746432
15	-0,0299	-0,0295	0,02	1,33779264	6,35451505
18	-0,152	-0,148	-0,144	2,63157895	5,26315789
20	-0,553	-0,549	-0,5	0,72332731	9,5840868
21	-1,05	-1,01	-0,9	3,80952381	14,2857143
21,5	-1,395	-1,39	-1,25	0,35842294	10,3942652
22	-1,84	-1,79	-1,6	2,7173913	13,0434783
22,5	-2,335	-2,3	-2,09	1,49892934	10,4925054
23	-2,99	-2,9	-2,79	3,01003344	6,68896321
23,5	-3,74	-3,69	-3,45	1,3368984	7,7540107
24	-4,575	-4,545	-4,39	0,6557377	4,04371585

Tableau III.7. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux model (une et deux diode) a température T=295.95 °K

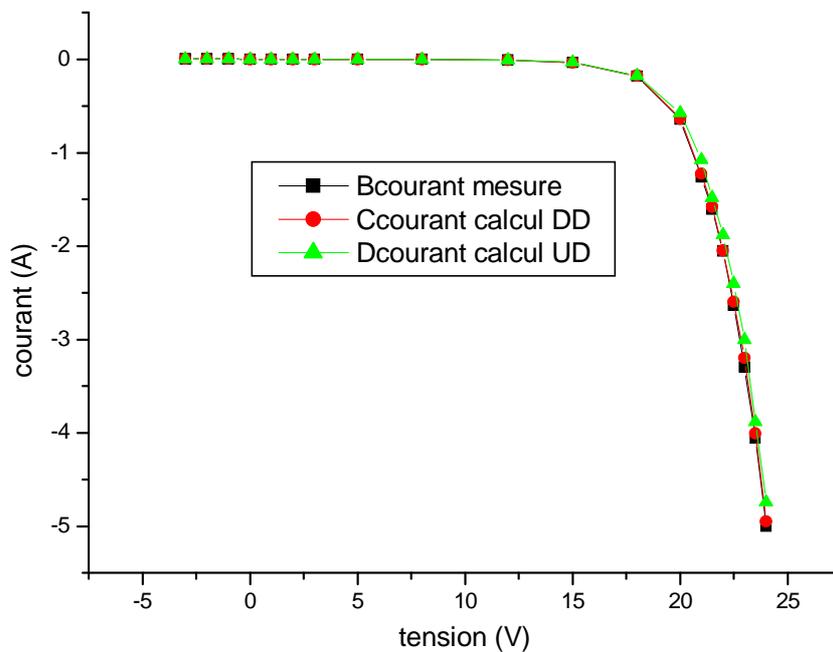


Figure III.3. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèle a une température 296.15 °k

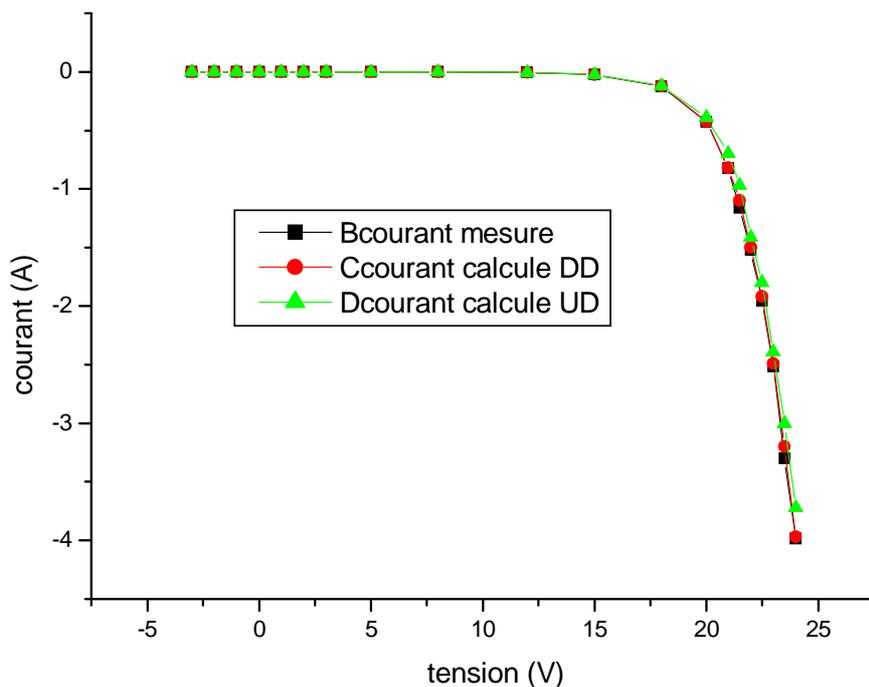


Figure III.4. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèle a une température 291.95 °k

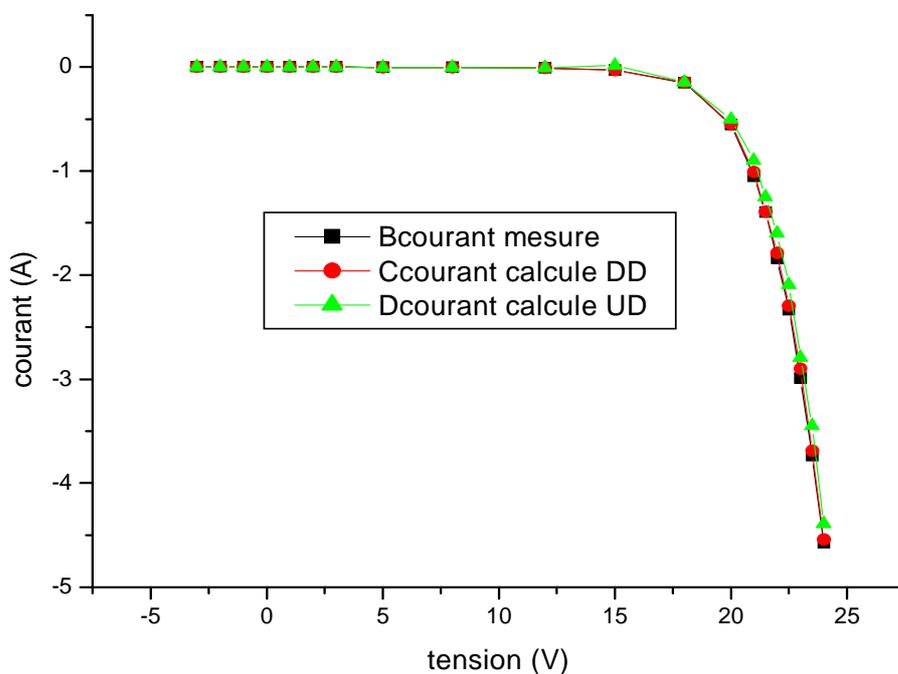


Figure III.5. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèles a une température 295.95 °k

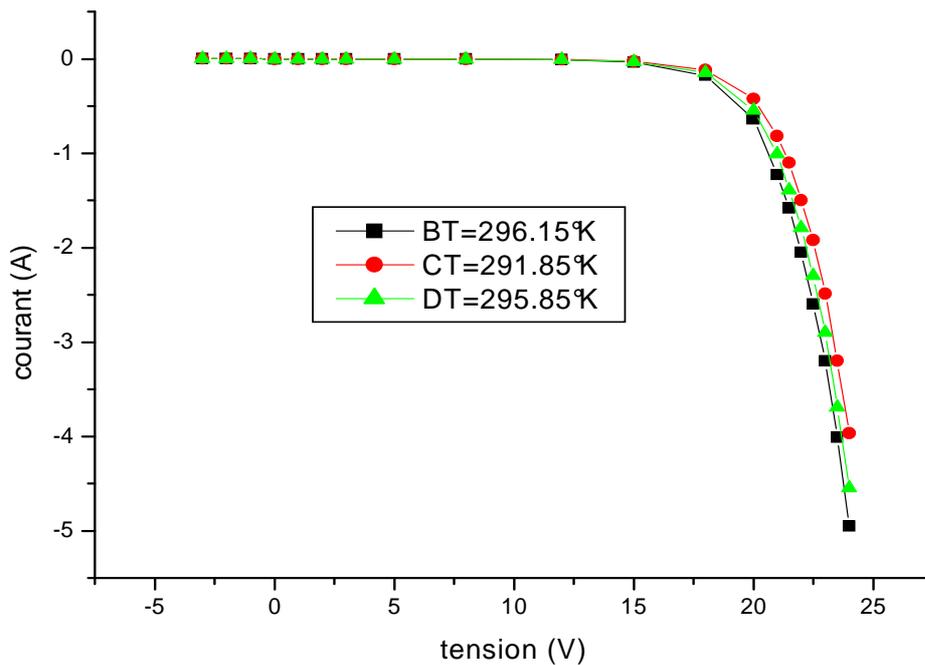


Figure III.6. Comparaison entre les trois températures mesurées pour le silicium poly cristallin pour le modèle à deux diodes

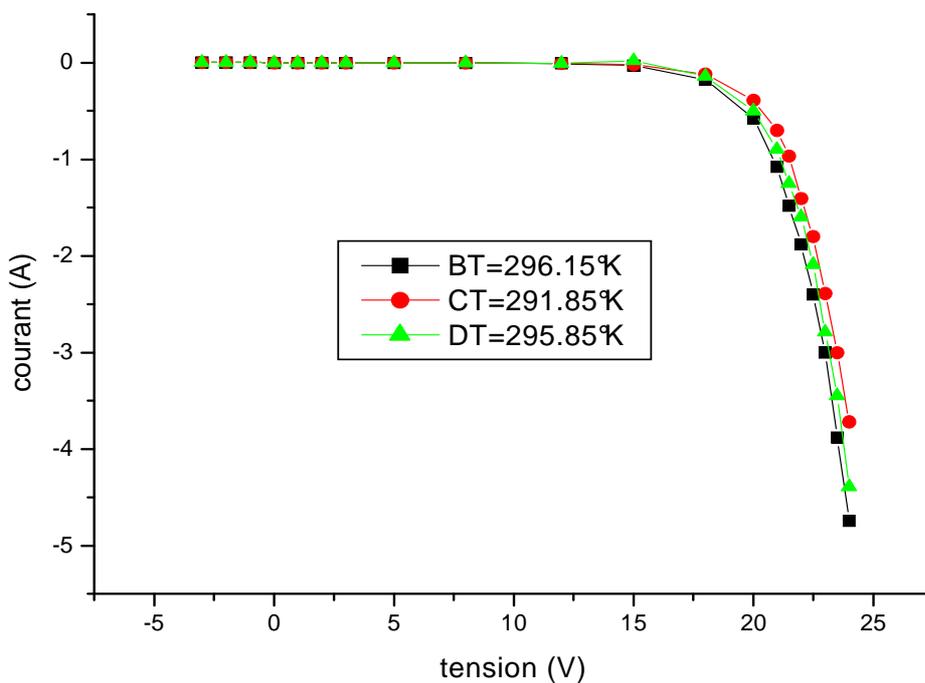


Figure III.7. Comparaison entre les trois températures mesurées pour le silicium poly cristallin pour le model à une diode

U mod	I(T1)	I(T1)cal	I(T1)UD	DRDD	DRD
-2	0,00044	0,00043	0,0004	2,272727273	9,090909091
-1	0,000215	0,000214	0,0002	0,465116279	6,976744186
1	-0,00021	-0,0002	-0,00019	4,761904762	9,523809524
2	-0,00044	-0,00042	-0,00039	4,545454545	11,36363636
3	-0,00069	-0,00067	-0,00065	2,898550725	5,797101449
5	-0,00119	-0,00117	-0,00115	1,680672269	3,361344538
12	-0,00663	-0,00661	-0,00646	0,301659125	2,564102564
15	-0,0181	-0,018	-0,017	0,552486188	6,077348066
18	-0,0907	-0,0906	-0,0897	0,110253583	1,102535832
20	-0,34	-0,32	-0,309	5,882352941	9,117647059
21	-0,649	-0,63	-0,59	2,927580894	9,090909091
22,5	-1,49	-1,48	-1,37	0,67114094	8,053691275
24	-2,88	-2,87	-2,67	0,347222222	7,291666667
25	-4,05	-4,03	-3,9	0,49382716	3,703703704
25,5	-4,68	-4,67	-4,58	0,213675214	2,136752137

Tableau III.8. Résultat du calcul du silicium mono cristallin pour les deux models (une et deux diodes) à température T=296.15 °K

u mod	I(T2)	I(T2)cal	I(T2)UD	DRDD	DRD
-2	0,000445	0,00044	0,0004	1,123595506	10,11235955
-1	0,00023	0,00023	0,00022	0	4,347826087
1	-0,0002	-0,0002	-0,00019	0	5
2	-0,00041	-0,0004	-0,00039	2,43902439	4,87804878
3	-0,00066	-0,00064	-0,00063	3,03030303	4,545454545
5	-0,00235	-0,00229	-0,0023	2,553191489	2,127659574
12	-0,00595	-0,0058	-0,0058	2,521008403	2,521008403
15	-0,0147	-0,0145	-0,0144	1,360544218	2,040816327
18	-0,0682	-0,068	-0,059	0,293255132	13,48973607
20	-0,255	-0,253	-0,226	0,784313725	11,37254902
21	-0,512	-0,51	-0,47	0,390625	8,203125
22,5	-1,25	-1,23	-1,09	1,6	12,8
24	-2,55	-2,53	-2,41	0,784313725	5,490196078
25	-3,69	-3,67	-3,49	0,54200542	5,420054201
25,5	-4,375	-4,374	-4,28	0,022857143	2,171428571

Tableau III.9. Résultat du calcul du silicium poly cristallin pour les deux models (une et deux diodes) à température T=291.95 °K

U mod	I(T3)	I(T3)cal	I(T3)UD	DRDD	DRD
-2	0,00044	0,00044	0,0004	0	9,090909091
-1	0,000215	0,000214	0,000213	0,465116279	0,930232558
1	-0,0002	-0,0002	-0,00019	0	5
2	-0,00042	-0,0004	-0,0004	4,761904762	4,761904762
3	-0,00067	-0,00065	-0,00064	2,985074627	4,47761194
5	-0,00117	-0,00115	-0,00114	1,709401709	2,564102564
12	-0,00643	-0,00642	-0,0064	0,155520995	0,466562986
15	-0,0174	-0,0172	-0,017	1,149425287	2,298850575
18	-0,0888	-0,0886	-0,0869	0,225225225	2,13963964
20	-0,323	-0,321	-0,297	0,619195046	8,049535604
21	-0,63	-0,61	-0,53	3,174603175	15,87301587
22,5	-1,49	-1,48	-1,35	0,67114094	9,395973154
24	-2,875	-2,873	-2,65	0,069565217	7,826086957
25	-3,99	-3,97	-3,79	0,501253133	5,012531328
25,5	-4,61	-4,6	-4,49	0,21691974	2,603036876

Tableau III.10. Résultat du calcul du silicium mono cristallin pour les deux modèles (une et deux diodes) a température T=295.95 °K

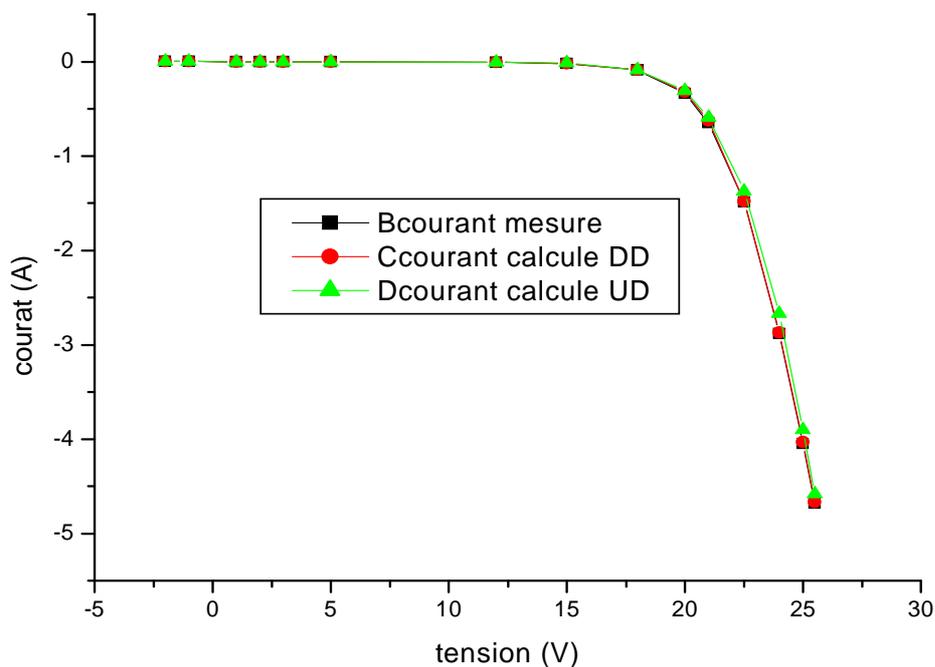


Figure III.8. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium mono cristallin pour les deux modèles à une température 296.15 °k

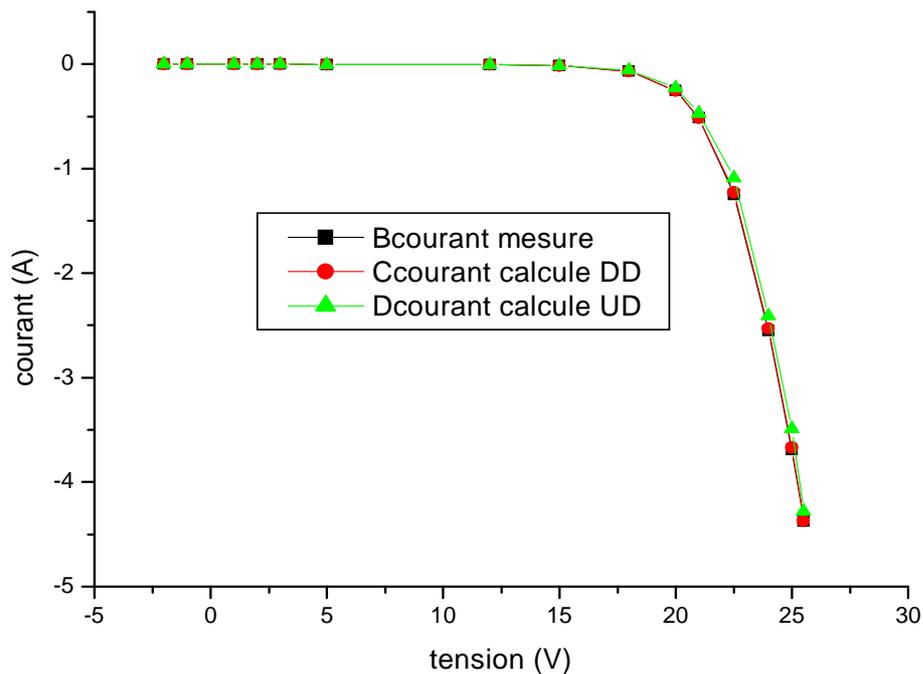
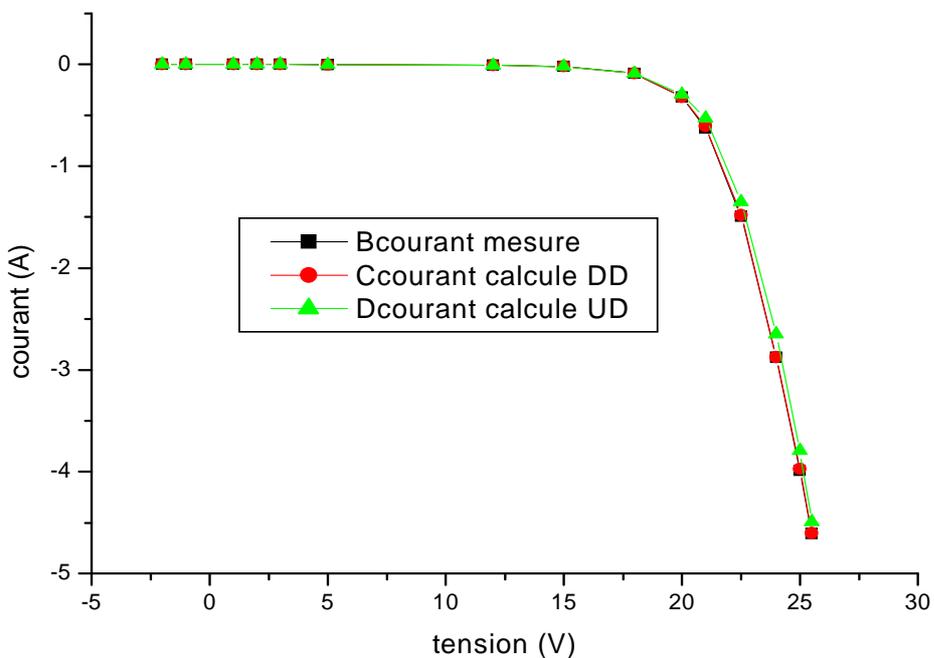


Figure III.9. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium mono cristallin pour les deux modèles à une température 291.95°k



III.10. Comparaison entre mesures et calculs en obscurité pour le silicium poly cristallin pour les deux modèles à une température 295.95 °k

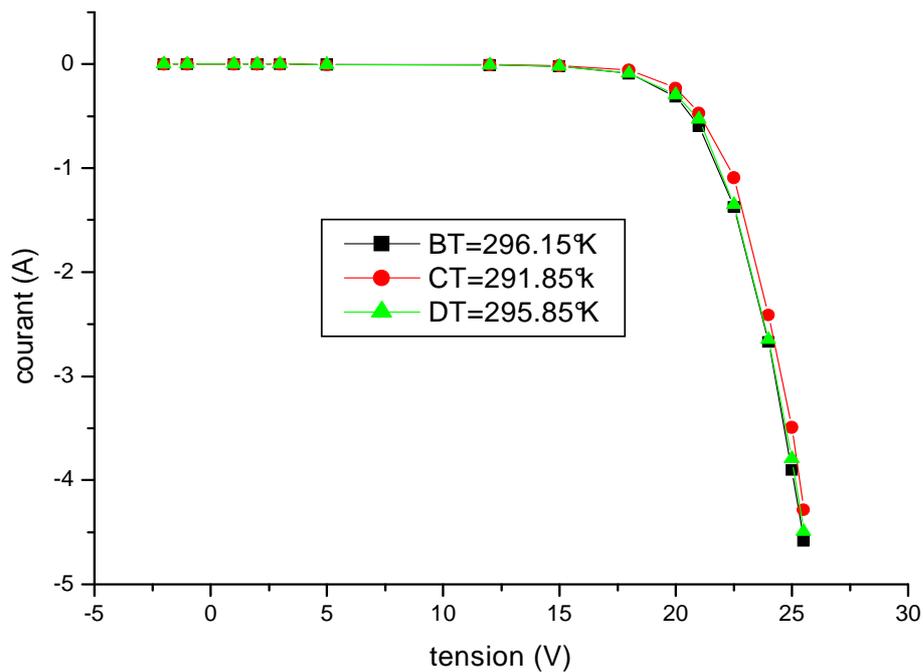


Figure III.11. Comparaison entre les trois températures mesurées pour le silicium polycristallin pour le modèle à une diode

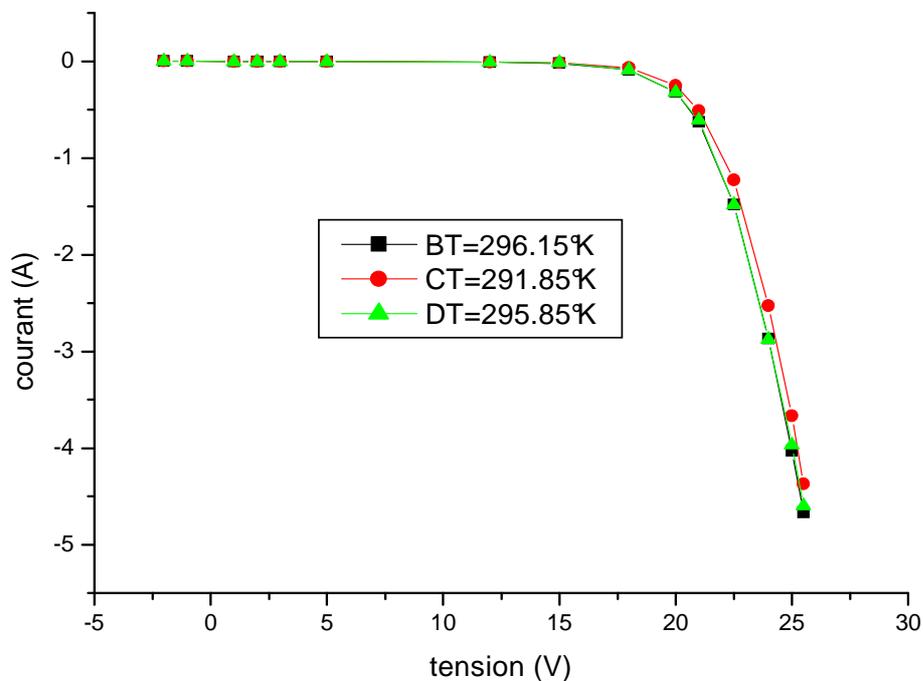


Figure III.12. Comparaison entre les trois t températures mesurées pour le silicium mono cristallin de modèle à deux diodes

U _{mod}	I _{mod}	IL	IC DD	IC UD	DRDD	DRD
0	0,00793	0,00793	0.008	0.00801	0.95	1.06
0,98	0,00772	0,00793	0.0077	0.00778	1.03	2.3
2,09	0,00739	0,00793	0.0075	0.00757	1.5	3
3,1	0,0071	0,00793	0.00724	0.00733	2	3.25
4,3	0,00671	0,00793	0.00691	0.00693	3	3.36
5,34	0,00632	0,00793	0.00657	0.0066	4.026	4.52
6,28	0,00598	0,00793	0.00622	0.00639	4.05	7
7,67	0,00523	0,00793	0.00554	0.00574	6	8.02
8,92	0,00426	0,00793	0.00456	0.00448	7.08	8.52
9,9	0,00318	0,00793	0.00342	0.00348	7.8	9.63
10,63	0,00204	0,00793	0.00220	0.00208	8	10.23
10,93	0,00151	0,00793	0.00163	0.00169	8.32	12.25
11,2	0,00099	0,00793	0.001	0.00113	8.63	15
11,62	0	0,00793	0	0	0	0

Tableau III.11. Résultat du modèle a double diode et avec une diode pour le silicium poly cristallin éclairé

U _{mod}	I _{mod}	IL	IC DD	IC UD	DRDD	DRD
1,09	0,00862	0,00888	0.0087	0.00869	1.02	1.23
2,81	0,00801	0,00888	0.00809	0.0083	1.03	1.5
3,42	0,00788	0,00888	0.00796	0.00798	1.05	1.3
4,71	0,00738	0,00888	0.00755	0.00762	2.36	3.26
6,32	0,00668	0,00888	0.00692	0.00694	3.6	4
7,59	0,00606	0,00888	0.0063	0.00634	4.025	4.78
8,83	0,00529	0,00888	0.00555	0.00562	5.021	6.25
9,71	0,00349	0,00888	0.00373	0.00416	7.05	8.36
11,8	0,00228	0,00888	0.00248	0.00255	9	12.23
12,4	0,00131	0,00888	0.00144	0.00183	10.01	14
13	0	0,00888	0	0	0	0

Tableau III.12. Résultat du modèle à double diode et avec une diode pour le silicium mono cristallin éclairé

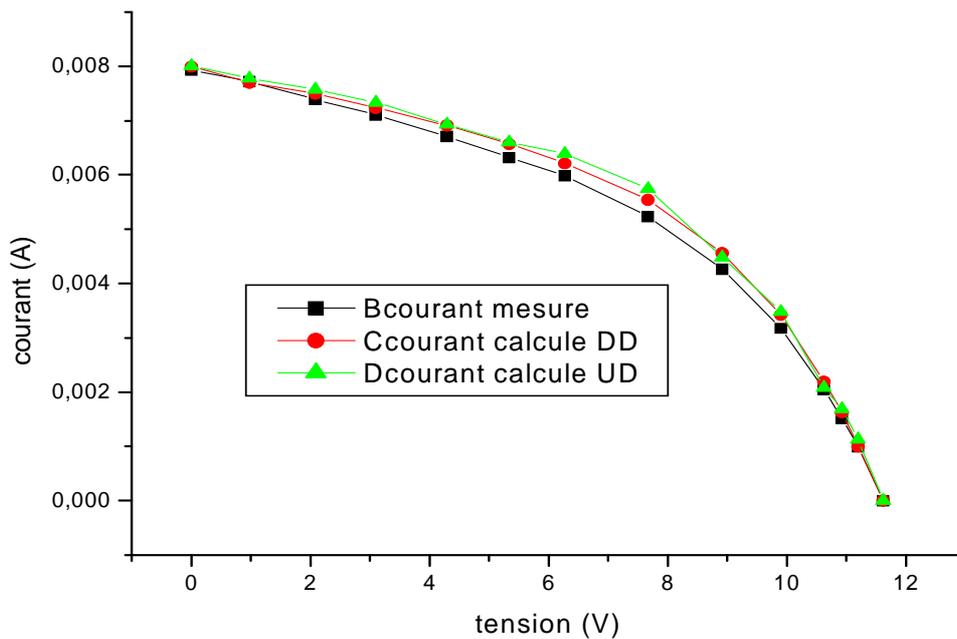


Figure III.13. Comparaison entre mesures et calculs pour le silicium poly cristallin éclairé pour les deux modèles à une température 296.15 °k

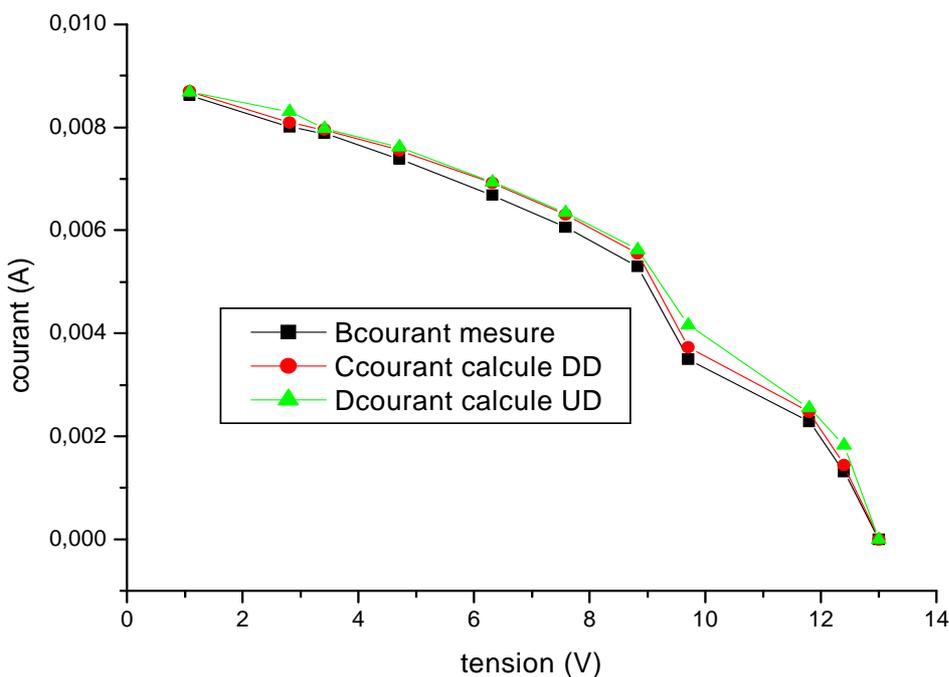


Figure III.14. Comparaison entre mesures et calculs pour le silicium mono cristallin éclairé pour les deux modèles à une température 296.15 °k

Nous pouvons tirer plusieurs renseignements de ces tableaux.

- ✚ Le modèle d'une seule diode donne de bons résultats dans les deux zones linéaires avec des erreurs relatives ne dépassant pas 10%, et étant même le plus souvent très inférieures à cette valeur. On peut d'ailleurs le voir sur toutes les figures, les courbes résultants des mesures sont très proches de celles résultants du calcul.
- ✚ Malgré que ce modèle semble valable dans ces deux zones il a un comportement très mauvais dans les zones intermédiaires où l'erreur dépasse 25%, Le problème est que cette zone est la partie la plus importante dans le cas où le panneau fonctionne dans des conditions réelles, cette dernière est aussi observable dans les courbes éclairées.
- ✚ Le modèle à deux diodes donne de bons résultats même dans les zones non linéaires.
- ✚ D'après les graphes (III.6.7.11.12) on remarque que la température est inversement proportionnelle à la puissance du panneau.
- ✚ On remarque aussi que le modèle à deux diodes donne de meilleurs résultats que le modèle à une seule diode.
- ✚ On peut dire que les deux modèles que nous avons définis donnent de bons résultats, obtenus dans des conditions particulières (obscurité et éclairages rapides), mais pour valider nos modèles on doit le soumettre à des conditions réelles.

6. Facteur de conversion :

Ce qui nous manque dans le modèle électrique équivalent c'est la valeur du courant I_1 débité par la source du courant, sa valeur dépend naturellement du rayonnement incident.

Puisque il est impossible de le définir, dans ce cas la valeur numérique du courant I_1 sera déterminée expérimentalement.

Pour établir une méthode de mesure du courant débité par la source, reprenons l'équation du courant de module lorsque la tension est faible :

$$I = I_{Rp} - I_1$$

Pour supprimer I_{Rp} , il suffit de mettre le module en court-circuit. En effet, R_p et R_s sont alors placées en parallèle avec la source. Comme on l'a vu, R_p est plus de 10000 fois plus grande que R_s . par conséquent, lorsqu'elles sont mises en parallèle [9], le courant traversant R_p est négligeable par rapport à celui qui passe dans R_s et tout le courant de la source passe, via R_s , dans le court-circuit. On aura donc :

$$I_{oc} = -I_1$$

Reste à déterminer la façon dont ce courant de court circuit varie avec le rayonnement.

Le courant de court circuit augmente de manière linéaire en fonction du rayonnement solaire incident. La puissance maximale décrit le même comportement, mais en augmentant dans un intervalle serré entre deux courants, et cela, en cas de niveau de rayonnement élevé [13]. Si les modules photovoltaïques ont une résistance interne élevée, la tension à vide sera une fonction logarithmique du rayonnement incident.

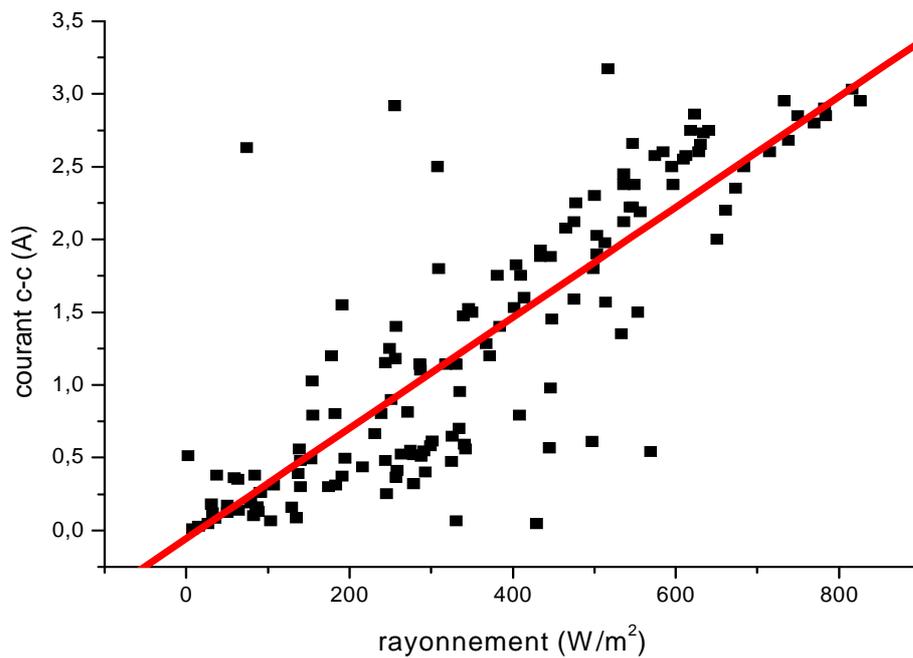
Il n'est pas aisé de déterminer précisément la valeur du rayonnement incident, comme nous le verrons plus loin. En effet, de nombreux phénomènes perturbent le simple rayonnement solaire direct, atténuant ainsi le rayonnement global reçu par le module (la présence de nuages, l'absorption ou la diffusion de la lumière par les particules de l'atmosphère, la réflexion de la lumière par le sol, etc.). des méthodes semi empiriques permettent tout de même d'en quantifier les effets sur le rayonnement solaire global.

Mais comme, pour l'instant, nous ne disposons pas de données précises concernant les différents rayonnements et les phénomènes qui les affectent, nous nous contenterons de considérer le rayonnement solaire global incident sur un plan horizontal. Il s'agit là de la seule donnée météorologique utilisable dont on dispose pour l'instant. On s'efforcera plus tard d'améliorer ce modèle de rayonnement.

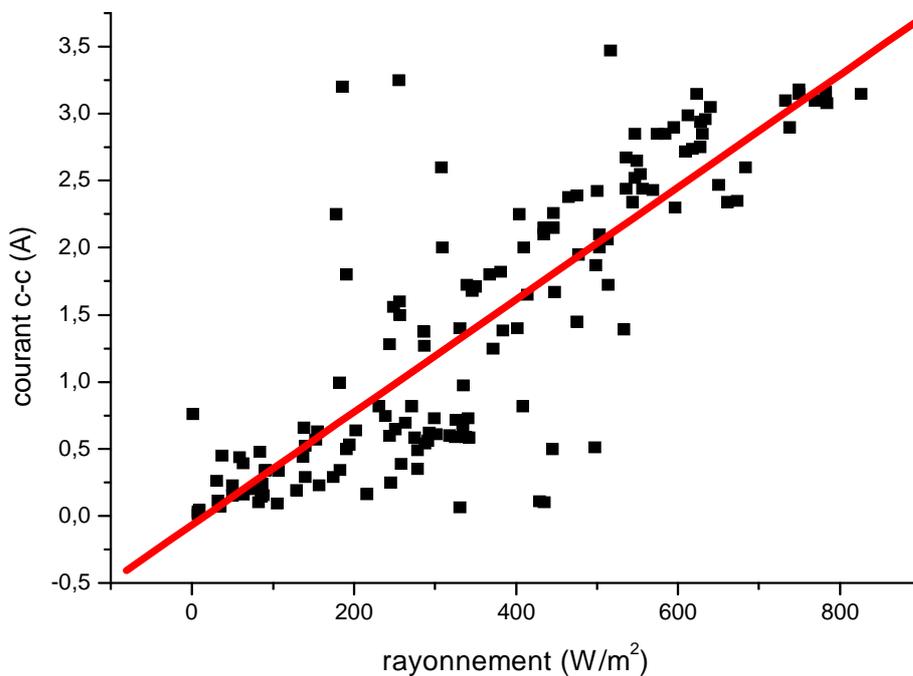
Il y'a un moyen facile et efficace de calculer la pente de la diode, c'est de rentrer tous les points dans un tableau Excel et d'utiliser les fonctions graphiques qui sont proposées. On peut ainsi obtenir une droite passant par l'origine et approcher au mieux la relation entre le rayonnement et le courant de court-circuit, la pente de cette droite donne le facteur de conversion que l'on cherche.

6.1 Application numérique

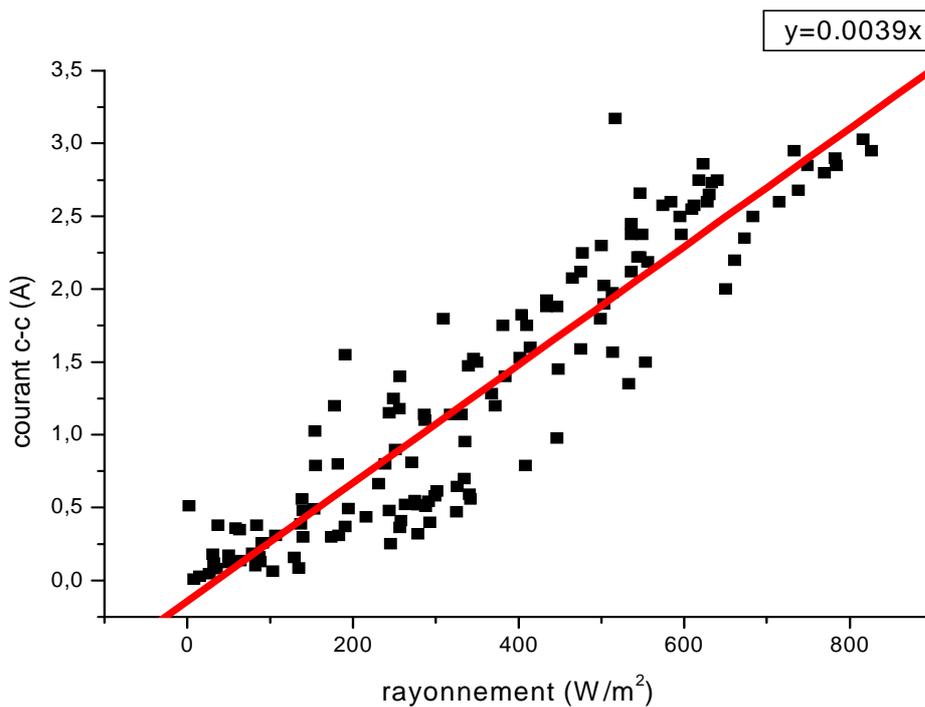
Nous disposons de deux séries de mesures prises par temps divers au cours de deux mois. Deux de ces séries ont été prises à l'aide de modules en silicium poly et mono cristallin. En rentrant, comme suggéré plus haut, les mesures dans un tableau Excel, nous obtenons les graphiques donnés aux figures III. (15, 16, 17,18).



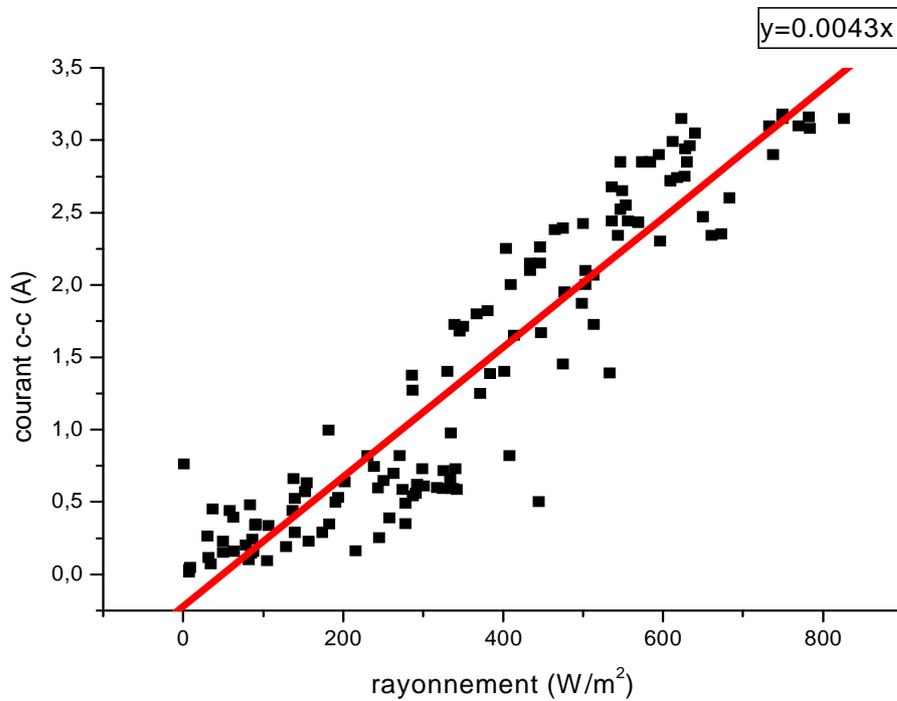
Figures III.15 .Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium poly cristallin



Figures III.16. Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium mono cristallin



Figures III.17 Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium poly cristallin des jours de beau temps



Figures III.18 .Détermination graphique du facteur de conversion pour le silicium mono cristallin des jours de beau temps

Nous avons donc des droites de pente 0.003845 pour le silicium poly cristallin et 0.004257 pour le silicium mono cristallin

Il est intéressant de comparer ces résultats aux caractéristiques nominales des modules.

Il suffit que nous prenions le courant de court circuit nominal indiqué qui vaut 3.5 A et qu'on le divise par le rayonnement nominal de 1000 w/m². Cela nous donne un facteur de conversion de 0.0035 A.m²/w. Pour le silicium poly cristallin, on ne dispose que d'une valeur de puissance nominale, de 45w. Nous pouvons calculer le courant de court circuit pour laquelle la puissance des points optimums est de 45w lorsque les cellules se trouvent à une température de 25⁰c. On obtient 2.917 A, soit un facteur de conversion de 0.00297-17 A.m²/w.

Par contre, nous constatons une nette différence entre les valeurs des facteurs de conversion nominaux et calculés. Mais cela n'est pas étonnant. En effet, nos facteurs de conversion sont calculés sur base du rayonnement incident sur les plans horizontaux mais avec des mesures faites lorsque les modules sont inclinés. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que le rayonnement reçu par les modules soit supérieur à celui utilisé dans les calculs , donc notre facteur de conversion corrige la différence entre les deux rayonnement et cela explique sa valeur élevée.

7. *Première simulation :*

Nous possédons maintenant deux modèles qui décrivent le fonctionnement des modules photovoltaïques. Le premier avec une diode et le deuxième avec deux diodes indépendantes. Rien ne nous empêche donc de réaliser une première simulation qui devrait nous permettre de voir s'il y a lieu d'affiner le modèle par la prise en compte d'autres paramètres.

La simulation peut s'effectuer de plusieurs manières différentes. On peut simuler sur une courte période ou sur une longue période, en utilisant des valeurs moyennes portant sur une courte durée ou sur une journée, voire un mois ou un an.

Comme il ne s'agit ici que de se donner une première idée sur la validité du modèle, nous nous contentons de réaliser une simulation sur base de moyennes mensuelles. Nous pourrions ainsi voir, en répétant cette simulation étape par étape, si les éventuelles améliorations apportées au modèle modifient de manière significative le calcul à long terme de l'énergie produite par les modules photovoltaïques [21]. Si la différence s'avère négligeable, nous pourrions en déduire que l'amélioration apportée complique le modèle plus qu'elle ne l'améliore et donc que nous ferions mieux de la supprimer.

Pour cette simulation à long terme, on peut se procurer de la météo les valeurs moyennes de températures et des valeurs totales de rayonnements en j/cm². Ce rayonnement total peut facilement être converti en rayonnement moyen en le divisant par la durée du mois concerné. Il ne faut pas

oublier d'harmoniser toutes les unités car on utilise en général des W/m^2 . Le tableau reprenant les valeurs de rayonnements et de températures moyennes pour les années 1998 et 1999 se trouve en annexes.

Il reste à préciser que cette simulation à long terme est effectuée avec une recherche du point optimal de fonctionnement. De cette manière, on a une idée de la production maximale annuelle d'énergie d'un module.

En outre, pour pouvoir mettre tout de suite en évidence les erreurs du modèle, nous simulons également à partir de quelques points soigneusement choisis parmi les nombreuses mesures dont nous disposons. Il y a lieu de bien les choisir car sinon, on prendrait des points pour lesquels la mesure ne correspondrait pas du tout au rayonnement donné. De plus, il est intéressant de prendre en compte des jours différents de manière à disposer de conditions climatiques différentes.

Nous choisissons donc des points situés sur la droite d'interpolation et nous réaliserons la simulation en recherchant cette fois le point correspondant à la charge utilisée lors de la mesure. Les résultats obtenus pour certains de ces points se trouvent dans les tableaux III.13 et III.14.

Une première chose observée, c'est la dispersion des points au niveau des mesures du courant de court-circuit. Nous avons, ici, sélectionné quelques mesures parmi celles dont le courant de court-circuit correspond le mieux aux modèles. Mais on constate encore des évolutions normales, comme un courant qui diminue alors que le rayonnement augmente, mais tout cela est dû, comme expliqué précédemment, à l'incertitude des mesures et de leur comparaison avec des valeurs moyennes.

G w/ m ²	I (A) CC		DR %	I (A) SORTIE			DR%		P(W) du model			DR%	
	M	C		M	C UD	C DD	UD	DD	M	C UD	C DD	UD	DD
8	0.03	0.031	4	0.0095	0,00967	0,00961	1.81	1.2	0.06	0.059	0.0607	1.81	1.2
138	0.56	0.535	3.89	0.46	0,46166	0,46460	0.36	1	8.121	8.092	8.2022	0.36	1
286	1.12	1.115	0.41	0.42	0,46179	0,45167	9.95	7.54	8.681	9.545	9.3355	9.95	7.54
318	1.14	1.24	8.77	0.97	1,07282	1,04876	10.6	8.12	17.69	19.57	19.1264	10.6	8.12
367	1.47	1.431	2.63	1.1	1,16787	1,16600	6.17	6	22.68	24.08	24.04	6.17	6
414	1.6	1.615	0.94	0.622	0,69166	0,67873	11.2	9.12	12.47	13.87	13.607	11.2	9.12
446	1.84	1.739	5.47	0.338	0,38195	0,36730	14.7	10.3	6.244	7.164	6.8871	14.7	10.3
536	2.1	2.09	0.48	1.75	1,98275	1,93375	13.3	10.5	31.28	34.1	34.5644	13.3	10.5
596	2.35	2.324	1.11	0.86	0,39924	0,38743	10.9	7.62	17.47	19.37	18.8012	10.9	7.62
683	2.5	2.664	6.55	2.05	2,42925	2,30625	18.5	12.5	36.99	43.85	41.6285	18.5	12.54
749	2.87	2.921	1.78	2.5	3,15500	2,95500	26.2	18.2	38.84	49.03	45.9088	26.2	18.2
782	2.9	3.05	5.17	2.15	2,53700	2,43380	18	13.2	40.31	47.57	45.651	18	13.25
816	3	3.182	6.07	1.18	1,50686	1,41954	27.7	20.3	25.13	32.09	30.2389	27.7	20.33

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a seul diode 1998-1999 :116.8 KWh

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a double diode 1998-1999 :112.69 KWh

Tableau III.13. Simulation de résultats pour le silicium poly cristallin

G w/ m ²	I (A) CC		DR %	I (A) mesurée			DR%		P(W) du model			DR%	
	M	C		M	C UD	C DD	UD	DD	M	C UD	C DD	UD	DD
8	0.0338	0.0344	1.78	0.031	0,03416	0,03263	10.2	5.26	0.07422	0.08177	0.07812	10.2	5.26
155	0.63	0.6665	5.8	0.317	0,33570	0,32651	5.9	3	6.428	6.807	6.6208	5.9	3
287	1.27	1.234	2.83	1.1	1,21220	1,17931	10.2	7.21	7.954	8.768	8.5274	10.2	7.21
331	1.4	1.423	1.66	1.35	1,44315	1,40684	6.9	4.21	16.52	17.66	17.2154	6.9	4.21
414	1.65	1.78	7.9	0.554	0,65095	0,62242	17.5	12.35	11.58	13.61	13.0101	17.5	12.35
477	1.95	2.05	5.18	0.295	0,35164	0,33993	19.2	15.23	6.185	7.374	7.1269	19.2	15.23
544	2.34	2.339	0.034	0.545	0,68616	0,65476	25.9	20.14	10.96	13.8	13.1678	25.9	20.14
569	2.43	2.447	0.69	0.338	0,38971	0,37248	15.3	10.2	7.314	8.435	8.06222	15.3	10.23
627	2.725	2.696	1.06	0.295	0,38970	0,36344	32.1	23.2	5.917	7.816	7.2927	32.1	23.25
733	3.17	3.151	0.57	2.62	3,23832	3,13352	23.6	19.6	43.64	53.94	52.215	23.6	19.65
749	3.2	3.221	0.65	0.29	0,38077	0,36354	31.3	25.36	41.97	55.11	52.613	31.3	25.36
782	3.17	3.363	6.08	2.45	3,04290	2,87140	24.2	17.2	45.75	56.81	53.644	24.2	17.25
816	3.4	3.509	3.2	1.27	1,71450	1,64211	35	29.3	29.02	39.19	37.522	35	29.3

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a seule diode 1998-1999 :136.9 KWh

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a double diode 1998-1999 :130.66KWh

Tableau III.14. Simulation de résultats pour le silicium mono cristallin

- ✚ On peut dire que l'erreur sur le courant du court-circuit est faible, si les deux modèles que nous avons déterminés étaient tous à fait valables. Les erreurs sur les puissances devraient également être négligeables, c'est effectivement le cas, à une ou autre exception près, pour les faibles rayonnements. Malheureusement, l'erreur devient grande lorsque le courant court-circuit augmente, et ce, quelque soit la valeur de puissance (élevée ou faible).
- ✚ On pourrait encore souligner que les erreurs sont plutôt plus importantes pour le silicium monocristallin que pour le poly cristallin et ce, pour le modèle à une seule diode que celui du modèle à double diode.
- ✚ Nous pouvons aussi remarquer que le calcul nous donne chaque fois une puissance plus élevée que celle qui a été mesurée, surtout pour le modèle à une seule diode.
- ✚ Nous observons donc une différence manifestée des résultats obtenus lors du comportement réel des cellules par rapport à leur comportement en laboratoire, à froid.

8. conclusion :

Nous pouvons donc dire que les deux modèles que nous avons déterminés sont valables lorsqu'il s'agit de calculer le résultat de mesures prises en laboratoire, et que le modèle avec double diodes donne une bonne précision que le modèle à une diode sans laisser les cellules atteindre une situation de régime, qui provoquerait probablement un échauffement. Par contre, dès que nous exposons les cellules au soleil et que nous les laissons dans un état de régime permanent, les résultats se dégradent lorsque l'ensoleillement devient trop important. Or, le phénomène qui a eu lieu à ce moment-là et qui peut altérer (à ce point) le comportement des cellules, ne peut être qu'un échauffement. Pour rendre la simulation efficace, pour les deux modèles, nous sommes par conséquent obligés de nous pencher avec plus d'attention sur les phénomènes thermiques qui ont eu lieu au sein des cellules.

Chapitre IV

Modélisation thermique d'un module Photovoltaïque

1. Introduction :

Il est important que nous sachions comment évoluent les courants et les tensions des cellules avec la température, pour pouvoir déterminer les améliorations à apporter au modèle établi.

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent ne reflètent pas vraiment le fonctionnement réel de notre panneau solaire, car il ont été obtenus dans des conditions définies en laboratoire donc insuffisantes, à l'exception des paramètres R_p , R_s , γ , I_{rf} , qui vont être utilisés pour calculer le modèle thermique.

Dans ce chapitre on va étudier le comportement du modèle dans des conditions plus réelles, en introduisant l'effet du vent (échange par convection), la variation de la température (l'échange par conduction) afin de déterminer la température réelle des cellules. Les résultats obtenus vont être associés avec ceux obtenus dans le chapitre précédent pour calculer les paramètres de sortie du modèle.

2. comportement thermique des cellules photovoltaïques :

La tension à vide d'une cellule solaire de 2.3 mV/c° correspond à un coefficient de température relatif d'environ -0.5 par degré Celsius. Le courant de court-circuit augmente légèrement si la température de la cellule augmente, soit un coefficient de température relatif de 0.05 par degré Celsius [11]. L'influence de la température de la cellule sur la caractéristique du module est illustrée à la figure IV.1.

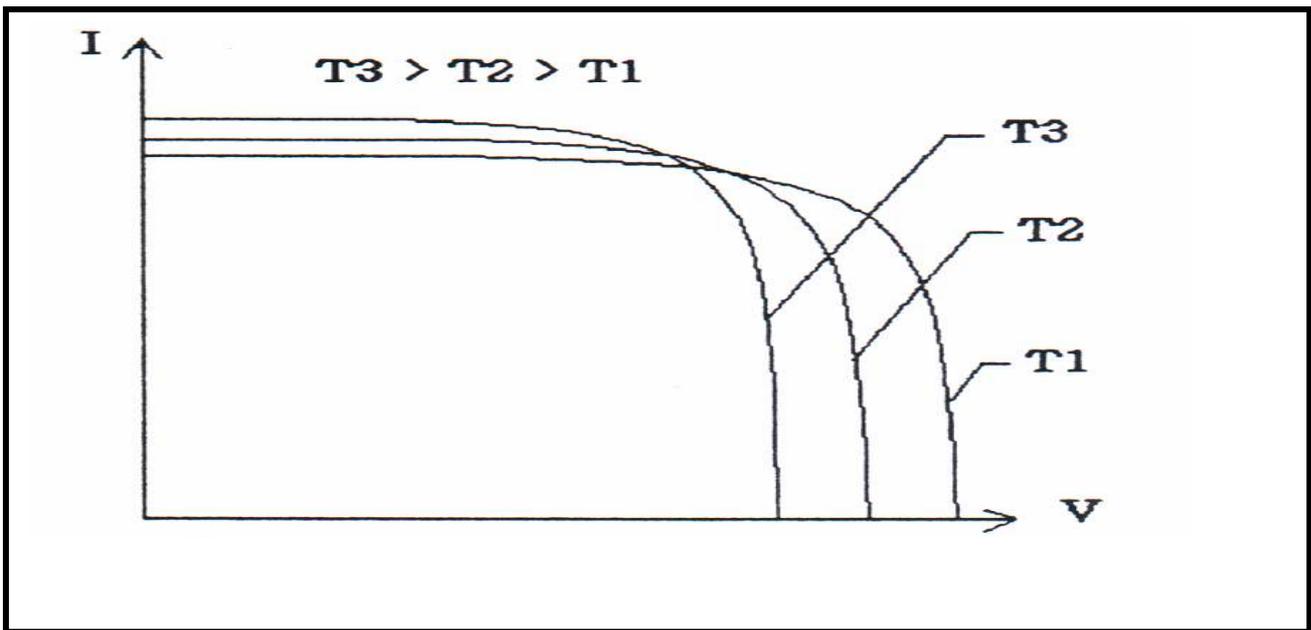


Figure IV.1. Influence de la température sur le comportement électrique des modules photovoltaïques.

Une remarque que l'on peut déjà faire, et qui s'avère fort intéressant, c'est le fait que le courant de court-circuit varie très peu avec la température. En effet, une variation de température de l'ordre de 100°C ne conduirait qu'à une modification de 5% du courant de court circuit. On peut donc considérer comme négligeable la variation de celui-ci en fonction de la température [1].

C'est une constatation très intéressante dans la mesure où elle valide le modèle adopté précédemment pour la détermination du courant de court-circuit. Il faut dire que, vu l'incertitude totale qui règne sur la correspondance entre le rayonnement moyen donné et celui dont bénéficiaient les modules au moment des mesures, nous aurions du mal à déterminer un comportement thermique précis du courant de court-circuit. En effet, si deux moments pour lesquelles le rayonnement moyen est le même ont un courant de court-circuit qui change, c'est probablement dû à une simple différence de rayonnement instantané. Mais pour cela, nous n'avons aucun moyen de le savoir.

3. Détermination d'un modèle thermique équivalent :

De la même manière qu'au chapitre III, nous allons essayer de monter un modèle thermique équivalent qui permettra de déduire les pertes thermiques des modules photovoltaïques.

3.1 Le modèle thermique :

Le comportement des cellules en fonction des variations de la température est donné par les équations III-1 à III-3 (chapitre III) du modèle.

La température de la cellule peut être déterminée expérimentalement et dépend du rayonnement solaire incident, de la température ambiante, de la vitesse du vent et du mode de construction du module [24]. On peut ainsi concevoir un module thermique simple ou :

$$\Delta T = \frac{G_i}{K} \dots\dots\dots(IV.1)$$

$$K = h_c + h_v \cdot W \dots\dots\dots (IV.2)$$

Ou :

- K $[(W / M^2 \cdot ^\circ K)]$: représente le facteur de perte thermique
- h_c $[(W / M^2 \cdot ^\circ K)]$: terme constant
- h_v $W / (m^2 \cdot ^\circ K \cdot m/s)$: un terme dépendant de la vitesse du vent $W [m / s]$
- G_i $[W / m^2]$: le rayonnement solaire incident.
- ΔT $[^\circ K]$: L'échauffement des cellules par rapport a la température ambiante sous l'effet du rayonnement solaire incident.

Pour un champ de panneaux photovoltaïque libres, on constate généralement des valeurs k de 29 (W/m².°K). pour un montage intégré dans un bâtiment, cette valeur dépend toutefois fortement du mode de ventilation, de l'isolation, etc., une valeur K caractéristique d'un système intégré en façade est :

13 W/(m².K) [22], nous pouvons cependant apporter une légère correction à ce modèle.

L'échauffement est dû à une absorption de puissance par les cellules. Or, le rayonnement ne représente que la puissance entrante et non la puissance absorbée, il faut donc tenir compte de la puissance sortant du module pour pouvoir calculer cette puissance absorbée.

Nous devons donc commencer par calculer la puissance que reçoit le module en multipliant le rayonnement incident par la surface S_m du module. Le modèle devient alors :

$$\Delta T = \frac{S_m \cdot G_i - U \cdot I}{h_c + h_v \cdot W} \dots\dots\dots (IV.3)$$

3.2 Détermination de paramètres du modèle thermiques :

Le premier paramètre que nous pouvons tenter de déterminer expérimentalement, est le facteur F_c . En effet en créant l'obscurité autour du module dans les conditions laboratoire, alors en aura $G_i = 0$ (rayonnement solaire), $W = 0$ (vitesse du vent).

Si on injecte, pendant suffisamment longtemps, un courant constant dans le module, celui-ci se chauffe progressivement jusqu'à atteindre une température de régime, l'élévation de température sera alors donnée par :

$$\Delta T = \frac{-U.I}{h_c} \dots\dots\dots (IV.3.1)$$

Il faut noter que, quant on injecte de la puissance dans le module grâce à une alimentation extérieure, (donc le courant est négatif), ce qui implique que la variation de température est bien positive.

Connaissant alors le courant et la tension, on utilise l'équation décrivant le modèle pour déterminer la température des cellules. Il suffit alors d'en soustraire la température ambiante pour obtenir la valeur de ΔT . on calcule ensuite :

$$h_c = - \frac{U.I}{\Delta T} \dots\dots\dots (IV.3.2)$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.1 IV. 2

type	U	I	Ta	Tc	ΔT	Im	DR%	Fv
Poly	20.6	-1	295.65	298.75	3.1	-1.05	5.25	6.65
	21.25	-2	295.15	306.65	11.5	-2.144	7.23	3.7
	21.4	-2.5	295.15	310.75	15.6	-2.703	8.12	3.45
	21.85	-3	295.15	310	17	-3.2865	9.55	3.85
mon o	21.6	-1	293.15	297.55	4.4	-1.0421	4.21	5.56
	22.3	-2	293.15	307.15	14	-2.1247	6.235	3.23
	22.85	-2.75	293.15	310.55	17.4	-2.9419	6.98	3.7
	23.4	-3.5	293.15	312.25	19.2	-3.7653	7.58	4.35

Tableau IV.1. Calculs du facteur h_c pour le model a seule diode

type	U	I	Ta	Tc	ΔT	Im	DR%	Fv
Poly	20.6	-1	295.15	297.22	5.07	-1.0225	2.25	4.063
	21.25	-2	295.15	300.2	12.05	-2.065	3.25	3.526
	21.4	-2.5	295.15	305.12	16.97	-2.567	2.68	3.152
	21.85	-3	295.15	304	18.85	-3.1569	5.23	3.477
mon o	21.6	-1	293.15	295.5	6.35	-1.0056	0.56	3.411
	22.3	-2	293.15	300.56	17.41	-2.0472	2.36	2.561
	22.85	-2.75	293.15	304.56	19.41	-2.7929	1.56	3.237
	23.4	-3.5	293.15	307	23.15	-3.648	4.23	3.17

Tableau IV.2. Calculs du facteur hc pour le model a double diode

- ✚ Nous observons une augmentation de température qui peut être relativement importante si la puissance est élevée.
- ✚ le modèle a doubles diodes donne des températures de cellules plus grandes que celle obtenues du modèle a une diode.

Si l'on calcule des valeurs moyennes pour F_c , on obtient pour le silicium poly cristallin :

$h_c = 4.41 \text{ W/K}$ pour le modèle a seule diode

$h_c = 3.554 \text{ W/K}$ pour le modèle a double diode

Et pour le silicium mono cristallin :

$h_c = 4.21 \text{ W/K}$ pour a seul diode

$h_c = 3.094 \text{ W/K}$ pour a double diode

3.3 Influence du vent :

L'étape suivante est alors de déterminer la valeur de F_v . Pour cela, nous pouvons, par exemple, continuer dans l'obscurité mais cette fois en soumettant le module à l'influence du vent en prenant des mesures la nuit.

On calcule alors :

$$h_v = \frac{-U.I}{\Delta T.W} - \frac{h_c}{W} \dots\dots\dots (IV.3.3)$$

Les mesures prises dans ces conditions se trouvent dans le tableau IV.3, IV.4.

Dans ces tableaux, la tension à froid que nous aurions obtenue est , si les cellules étaient restées à la température ambiante. La tension à chaud que nous aurions obtenue est, si les Cellules avaient chauffé autant que lors des essais précédents en laboratoire. Le ΔT mesuré représente

l'augmentation de température subie par les cellules alors que le ΔT à chaud représente ce même écart de température dans le cas où les cellules s'échauffent autant qu'en laboratoire.

Type	TENSION			T (0C)	ΔT	ΔT	W
	Mesurée	A froid	A chaud				
Poly cristallin	23.82	23.98	22.82	8.4	2.2	15.6	0.3
	23.82	24.02	22.85	8	2.6	15.6	2.2
	23.72	23.85	22.68	10.4	1.5	15.4	1.3
	23.22	23.43	22.29	15.8	2.8	15.3	0
Mono cristallin	24.99	25.23	24.01	7.8	3.3	16.8	0.9
	24.94	25.21	23.99	8.1	3.7	16.8	1.9
	24.84	24.99	23.78	11.1	2.1	16.7	0.4
	24.39	24.66	23.46	15.6	3.8	16.6	0.5

Tableau IV.3. Résultats de mesures effectuées de nuit pour le model a une seule diode

Type	TENSION			T (°C)	ΔT	ΔT	W
	Mesurée	A froid	A chaud				
Poly cristallin	23.82	23.98	22.03	8.4	3.2	17.9	0.3
	23.82	24.02	21.36	8	3	18.3	2.2
	23.72	23.85	21.35	10.4	1.8	16.32	1.3
	23.22	23.43	21.09	15.8	3.2	17	0
Mono cristallin	24.99	25.23	23.12	7.8	3.5	18.02	0.9
	24.94	25.21	21.65	8.1	3.9	18.2	1.9
	24.84	24.99	20.36	11.1	3	17.98	0.4
	24.39	24.66	21.58	15.6	3.9	17.59	0.5

Tableau IV.4. Résultats de mesures effectuées de nuit pour le model a double diode

- ✚ La première chose que l'on remarque, c'est la grande différence qu'il y'a entre les deux valeurs de ΔT données dans ces tableaux. Si l'on s'en réfère aux vitesses du vent, rien ne justifie à ce niveau là cette différence. Il semble évident que, même en l'absence du vent, Les cellules ne chauffent pas autant que lorsqu'elles étaient couvertes en laboratoire. Le fait de couvrir les modules grâce a la chaleur ne permet donc aucun échange avec l'air Ambient. Le coefficient F_v doit donc être augmenté pour qu'il reflète ces échanges de chaleur.
- ✚ Malheureusement, on constate également que ces mesures présentent une forte divergence des résultats, la deuxième mesure présente un plus grand échauffement malgré une puissance égale et une vitesse de vent élevée pour les deux modèles.
- ✚ On concluant que le comportement thermique dépend probablement d'autres facteurs tels que la pression, l'humidité ou la direction du vent par rapport à l'orientation des modules la

conséquence est que nous ne pouvons pas nous baser sur ces mesures-là pour déterminer les paramètres du modèle thermique.

3.4 Détermination des paramètres du modèle thermique :

La seule possibilité qui nous reste est d'utiliser les mesures prises en journée qui, elles, sont suffisamment nombreuses pour pouvoir se prêter à un calcul statistique [11]. Pour cela, nous partons de l'équation (IV-3) donnant la variation de température :

$$\Delta T = \frac{S_m \cdot G_i - U \cdot I}{h_c + h_v \cdot W} \dots\dots\dots (IV.3.4)$$

Qui donne la relation :

$$\frac{S_m \cdot G_i - U \cdot I}{\Delta T} = h_c + h_v \cdot W \dots\dots\dots (IV.3.5)$$

Le membre de gauche, ne contenant aucune inconnue, est une fonction linéaire de la vitesse du vent. Il suffit donc le représenter graphiquement et d'effectuer une régression linéaire. Les coefficients de l'équation de la droite obtenue donnent alors les coefficients h_c et h_v .

Les mesures utilisées doivent être préalablement triées. Nous avons vu que certaines mesures présentaient une erreur importante dans la détermination de leurs courant de court-circuit nous sélectionnons donc les mesures pour lesquelles l'erreur sur le courant de court-circuit n'excède pas 10%. Si le courant de court-circuit est correctement calculé cela signifie que le rayonnement moyen correspond aux valeurs prises au moment précis de la mesure. Or, l'échauffement dépend forcément du rayonnement moyen. Un courant de court-circuit correct implique donc théoriquement un échauffement correspondant correctement au rayonnement. Sachant que les cellules sont carrées de 10.2 cm de coté, nous aurons donc une surface totale de 0.3745 m².

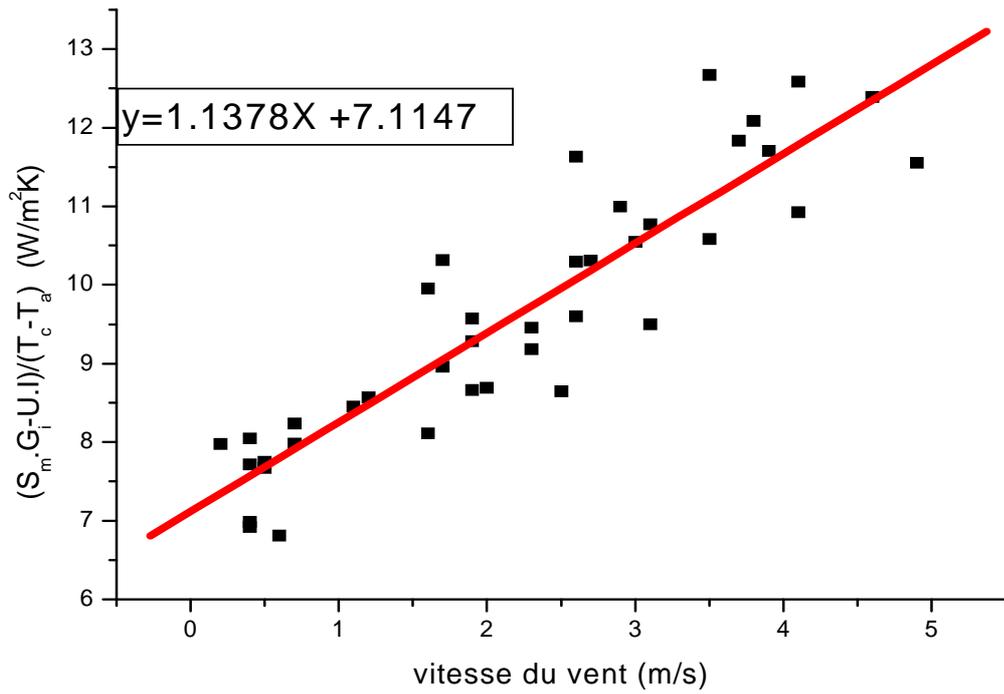


Figure IV.2. Calcule hv et hc pour le silicium poly cristallin modèle UD

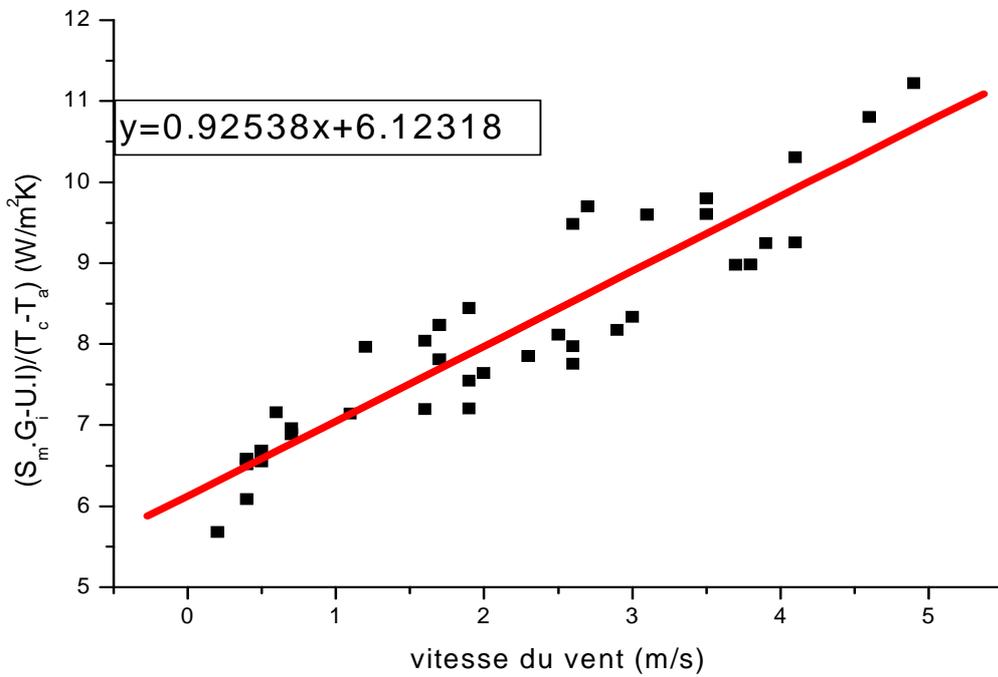


Figure IV.3. Calcule hv et hc pour le silicium poly cristallin modèle DD

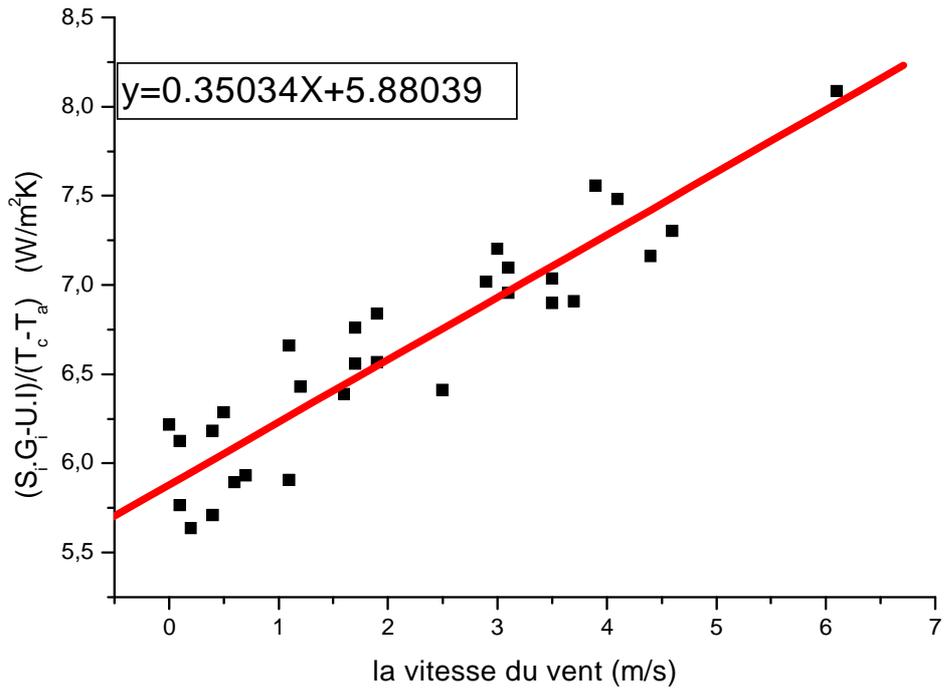


Figure IV.4. Calcule hv et hc pour le silicium mono cristallin modèle UD

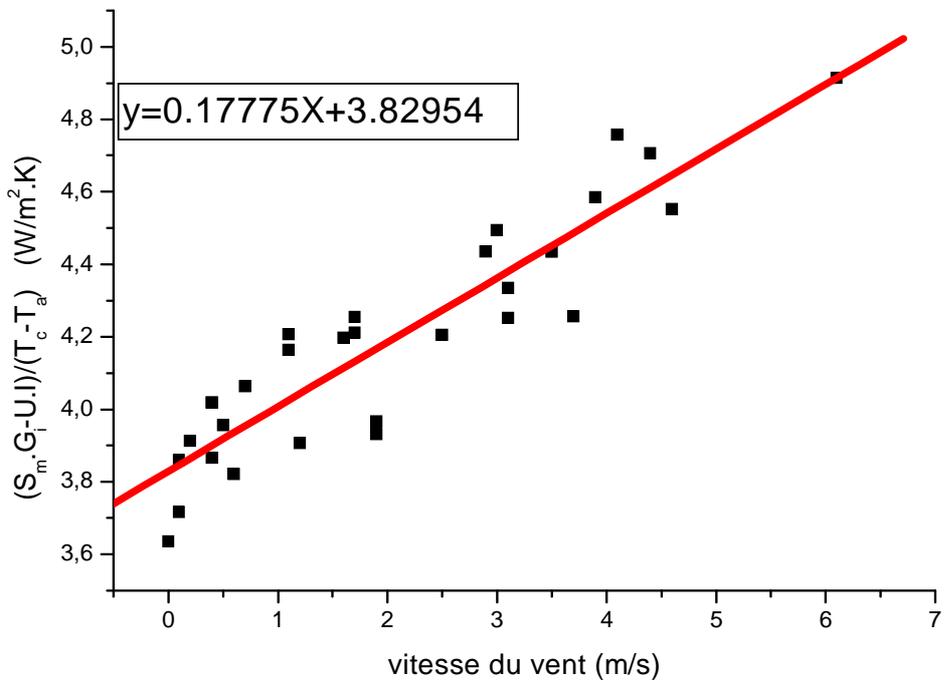


Figure IV.5. Calcule hv et hc pour le silicium mono cristallin modèle DD

Nous avons donc obtenu, pour le silicium poly cristallin, les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} h_c &= 7.1147 \text{ w/k} & \text{et } h_v &= 1.1378 \text{ W.s / } ^\circ\text{K.m} & \text{pour le modèle a une diode} \\ h_c &= 6.12318 \text{ w/k} & \text{et } h_v &= 0.92538 \text{ W.s / } ^\circ\text{K.m} & \text{pour le modèle a double} \\ & & & & \text{diode} \end{aligned}$$

Et pour le silicium mono cristallin, les valeur suivantes :

$$\begin{aligned} h_c &= 5.88039 \text{ w/k} & \text{et } h_v &= 0.35034 \text{ W.s / } ^\circ\text{K.m} & \text{pour le modèle a une} \\ & & & & \text{diode} \\ h_c &= 3.82954 \text{ w/k} & \text{et } h_v &= 0.17775 \text{ W.s / } ^\circ\text{K.m} & \text{pour le modèle a double} \\ & & & & \text{diode} \end{aligned}$$

- ✚ On peut remarquer que les valeurs de ces paramètres sont plus petites pour le silicium monocristallin que celles pour le silicium poly cristallin.
- ✚ le modèle à double diode donne des valeurs plus faibles que celles du modèle a une diode.
- ✚ Cela traduit le plus grand échauffement des premiers (silicium poly cristallin). Par ailleurs, nous constatons bien l'augmentation annoncée de h_c .

4. Deuxième simulation :

La meilleure manière d'apprécier la qualité de ce modèle thermique est de le confronter à la simulation. Nous reprenons donc les points traités de la simulation précédente et nous les simulons en modifiant cette fois la température des cellules en fonctions du rayonnement, de la puissance débitée par le module, et de la vitesse du vent.

Les résultats obtenus pour quelques points sont donnés dans les tableaux IV.5, IV.6. Où les valeurs entre parenthèses sont les erreurs obtenues lors de la première simulation.

G (w/m ²)	I (A) CC		DR%	I (A) SORTIE			DR%		P (W) du model			DR%	
	M	C		M	C UD	C DD	UD	DD	M	C UD	C DD	UD	DD
8	0.03	0.031	4	0.0095	0.0097	0.0096	3	2.1	0.06	0.066	0.064	9.13	7.52
138	0.56	0.535	3.89	0.46	0.4809	0.474	4.55	3.05	8.121	7.88	8.336	2.97	2.65
286	1.12	1.115	0.41	0.42	0.4415	0.437	5.12	4.05	8.681	8.84	8.851	1.83	1.96
318	1.14	1.24	8.77	0.97	1.0306	1.0099	6.25	4.12	17.69	18.19	18.335	2.83	3.65
367	1.47	1.431	2.63	1.1	1.177	1.0616	7	5.6	22.68	22.63	23.133	0.22	2
414	1.6	1.615	0.94	0.622	0.6626	0.6544	6.54	5.22	12.47	12.2	12.664	2.17	1.56
446	1.84	1.739	5.47	0.338	1.89	0.3593	8	6.32	6.244	6.374	6.3701	2.08	2.02
536	2.1	2.09	0.48	1.75	1.874	1.8726	7.09	7.01	31.28	32.42	32.0807	3.64	2.56
596	2.35	2.324	1.11	0.86	0.9391	0.9223	9.2	7.25	17.47	16.47	18.091	5.72	3.56
683	2.5	2.664	6.55	2.05	2.255	2.2191	10	8.25	36.99	38.41	37.925	3.84	2.53
749	2.87	2.921	1.78	2.5	2.8375	2.75	13.5	10	38.84	43.12	41.259	11	6.23
782	2.9	3.05	5.17	2.15	2.4725	2.3994	15.0	11.6	40.31	40.05	40.805	0.65	1.23
816	3	3.182	6.07	1.18	1.3640	1.32514	15.6	12.3	25.13	26.47	25.723	5.33	2.36

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a seul diode 1998-1999 : 114.4 KWh (116.8 KWh).

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a double diode 1998-1999. 10.6 KWh (112.69 KWh)

Tableau IV. 5. Simulation de résultats pour le silicium poly cristallin

G (w/m ²)	I (A) CC		DR%	I (A) SORTIE			DR%		P (W) du model			DR%	
	M	C		M	C UD	C DD	UD	DD	M	C UD	C DD	UD	DD
8	0.0338	0.0344	1.78	0.031	0.0317	0.0313	2.33	1.2	0.07422	0.0817	0.080	10.2	8.56
155	0.63	0.6665	5.8	0.317	0.3273	0.3214	3.25	1.39	6.428	6.5	6.579	1.12	2.35
287	1.27	1.234	2.83	1.1	1.1489	1.1245	4.45	2.32	7.954	7.82	8.078	1.68	1.56
331	1.4	1.423	1.66	1.35	1.4175	1.3933	5	3.21	16.52	17.6	17.056	6.54	3.25
414	1.65	1.78	7.9	0.554	0.5775	0.5733	4.25	3.25	11.58	11.61	11.621	0.26	0.36
477	1.95	2.05	5.18	0.295	0.3136	0.3133	6.32	6.23	6.185	6.117	6.219	1.1	0.56
544	2.34	2.339	0.034	0.545	0.588	0.5844	7.89	7.23	10.96	11.11	11.071	1.37	1.02
569	2.43	2.447	0.6 9	0.338	0.3635	0.367	7.56	8.6	7.314	7.046	7.462	3.66	2.03
627	2.725	2.696	1.06	0.295	0.3192	0.3219	8.23	9.12	5.917	6.072	5.989	2.62	1.23
733	3.17	3.151	0.57	2.62	2.8618	2.818	9.23	7.56	43.64	45.12	44.089	3.39	1.03
749	3.2	3.221	0.65	0.29	0.3195	0.3138	10.2	8.23	41.97	45.64	43.317	8.74	3.21
782	3.17	3.363	6.08	2.45	2.7734	2.6521	13.2	8.25	45.75	45.5	46.0016	0.55	0.55
816	3.4	3.509	3.2	1.27	1.4503	1.3914	14.2	9.56	29.02	30.08	29.376	3.65	1.23

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a seule diode 1998-1999 : 132.5 KWh (136.9 KWh).

Production totale d'énergie pour les années pour le modèle a double diode 1998-1999 :127.25KWh (130.66 KWh)

Tableau IV.6. Simulation de résultats pour le silicium mono cristallin

Dans ces tableaux on remarque peut ressortir les informations suivantes :

- ✚ L'amélioration des résultats dû à l'introduction de cet échauffement est tout à fait évidente.

- ✚ Les erreurs sont devenues minimales dans presque tous les cas. Cette simulation valide également le modèle thermique que nous avons établi.
- ✚ Ce qui concerne les simulations à long terme effectuées sur deux ans à l'aide de moyennes météorologiques mensuelles, le changement n'est pas très important. Cela ne signifie pas pour autant que le rapport de la prise en compte de l'échauffement lors de la simulation soit négligeable à long terme. Cela traduit juste le fait qu'on utilise des moyennes établies sur l'éclairage total, y compris pendant la nuit. Autrement dit, l'utilisation de telles moyennes mène à de faibles mesures de rayonnements moyens et donc à un échauffement très réduit. Loin de mettre en cause le modèle établi, cela plaide plutôt l'utilisation de valeurs moyennes calculées sur une très petite période.
- ✚ Nous avons déjà un modèle électrique performant, nous avons maintenant également un modèle thermique qui donne de très bons résultats.

5. Conclusion :

La première simulation (chapitre III) montre que les pertes électriques du PV sont importantes (sous forme de chaleur, etc.....) notamment dans l'intervalle des hautes puissances.

Dans la simulation actuelle le problème ne se pose pas car on a pris en considération les pertes thermiques dans les calculs.

Les résultats obtenus ont donné une marge d'erreur qui n'excède pas 10% pour les deux modèles.

Conclusion

L'étude du modèle proposé a été développée à partir de deux axes de travail : calcul des paramètres internes à partir des données en obscurité (modélisation électrique), calcul de la température réelle des cellules et le comportement thermique.

Le modèle de capteur PV se base sur le modèle avec diodes de la cellule PV, il s'applique à la plupart des cellules fabriquées à base de silicium cristallin ou amorphe, ce qui représente la très grande majorité des cellules disponibles sur le marché. L'université de Madison a développée une méthode qui permet de rendre utilisable le modèle à une diode à partir des données fournies par les constructeurs. Lors de travaux de comparaison avec l'entreprise EDF sur le modèle PV, il a été remarqué que l'algorithme qui permet de calculer les paramètres intermédiaires du modèle à une diode en fonction des données 'constructeur' ne converge pas toujours, et que cela dépend du type de module. Une solution a été proposée pour fixer un des paramètres afin de résoudre le problème de convergence tout en ajoutant une deuxième diode pour minimiser les erreurs issues du courant. Cette diode représente les phénomènes se rapportant aux diffusions des porteurs, les porteurs de la zone de déplétion, etc.....

Notre mémoire est basée sur la comparaison entre le modèle de madison classique (avec diode), et le modèle modifié. On prend comme exemple un modèle avec double diodes indépendantes.

Les deux modèles ont été validés expérimentalement, et les résultats ont montrés que le rendement réel du capteur peut être inférieur de 10 % à celui annoncé par les constructeurs.

Les résultats obtenus par l'ajout d'une deuxième diode. Sont plus précis que celle obtenue par un modèle à une seule diode.

Par conséquent on conclut que le modèle à plusieurs diodes se rapproche de plus en plus vers un comportement plus réel des panneaux photovoltaïques.

Bibliographies

- [1] **Ademe** : les applications de l'électricité solaire photovoltaïque, connaître pour agir, guide et cahiers technique, 2001
- [2] **Anne labouret et al** : cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque, collection ETSF, Dunod, 4^e édition, 2005
- [3] **Berger A.1996** : Trou d'ozone et prix Nobel de chimie. La Meteorology 8e série, 13, p 63-73. 1995.
- [4] **C.vauge et M.bellanger** : l'aube des énergies solaires, hachette, 1984
- [5] **Davis M. W., Fanney A. H., Dougherty B. P.** : 'Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures'; ASME journal of Solar Energy Engineering, vol. 123, 2001
- [6] **Duffie J. A. and Beckmann W. A.** : 'Solar engineering of thermal processes', Wiley Ed., 2nd edition, 1991.
- [7] **Dumbs C.** : 'Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïques diesel' : Thèse Ecole des Mines de Paris, 1999
- [8] **Feustel H. E.** : 'COMIS - An international multizone air-flow and contaminant transport model'; Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998.
- [9] **Fröhlich C.** : World radiometric references. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112, 1978
- [10] Guide PERSEUS (actualisé en avril 2004)-guide des installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique destiné aux usagers téléchargeable sur le site [http.raee.org](http://raee.org)
- [11] **Holman J. P.** : 'Heat transfer', Mc Graw- Hill Ed., 1986.
- [12] **James ET James ltd** : revue renewable energy world, 8-12 Camden high street, London NW1-27 -revue systèmes solaires (146 rue de l'université 75007 paris), en particulier les n°136, 142, 149.
- [13] **Jean-Paul louineau** : guide pratique du solaire photovoltaïque, dimensionnement, installation, et maintenance, éditions systèmes solaires, 2eédition, 2005.
- [14] **Jones A. D. and Underwood C. P.** : 'A thermal model for photovoltaic systems'; solar energy, Vol. 70, n°4, 2001.
- [15] **Kamal Skeiker**: Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province, Syria. Energy Conversion and Management 47 p 331-345, 2006
- [16] **King D. L., Kratochvil J. A. and Boyson W. E.** : 'Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results'; 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, 1997.
- [17] **King D. L., Kratochvil J. A., Boyson W. E., and Bower W. I.** : 'Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays'; 2nd World conference on photovoltaic solar energy conversion, Vienna, Austria, 1998.

- [18] **Krauter S. and Hanitsch R:** 'Actual optical and thermal performance of photovoltaic modules', Proceedings of the Solar World Congress, Harare, Zimbabwe, 1995.
- [19] **Mehmet Yorukoglu, Ali Naci Celik .A:** critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management* 47 p 2441–2450, 2006
- [20] **Michel Dagueuet:** Les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ,1985.
- [21] **Michel villoz :** Energie solaire photovoltaïque 3^e édition anne labouret juin, 2007
- [22] **Nolay P:** 'Développement d'une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques' ; Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1987.
- [23] **Ricaud A:** « Les Photopiles Solaires » ; Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection 'Chier de Chimie', 1994.
- [24] **S. Kaplanis, E. Kaplani:** A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation I (h; nj) values. *Renewable Energy* 32. P1414–1425, 2007.
- [25] **Townsend T. U:** 'A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems; ' M. S. Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.
- [26] **Yves Jannot :** Thermique solaire. Paris (2007).
- [27] **Whitaker C. M., Townsend T. U., Newmiller J. D., King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A., Collier D. E. and Osborn D. E :** "Application and Validation of a new PV Performance Characterization Method", 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim (USA) 1997.

Annexes

Mesures en obscurité pour le silicium poly cristallin

U_m	I_m (296.15 °k)	I_m (291.15 °k)	I_m (295.85 °k)
-3	0,000545	0,000535	0,000555
-2	0,00036	0,00036	0,000365
-1	0,00019	0,000175	0,000195
0	0	0	0
1	-0,00019	-0,000175	-0,00017
2	-0,0004	-0,00037	-0,000385
3	-0,00064	-0,0006	-0,00061
5	-0,00116	-0,001055	-0,001105
8	-0,02865	-0,002445	-0,00264
12	-0,0102	-0,00818	-0,00911
15	-0,0352	-0,0253	-0,0299
18	-0,183	-0,124	-0,152
20	-0,642	-0,429	-0,553
21	-1,265	-0,823	-1,05
21.5	-1,61	-1,16	-1,395
22	-2,055	-1,525	-1,84
22.5	-2,64	-1,955	-2,335
23	-3,3	-2,515	-2,99
23.5	-4,06	-3,3	-3,74
24	-5	-3,985	-4,575
24.5	//	-4,945	//

Mesures en obscurité pour le silicium mono cristallin

U_m	I_m (296.15 °k)	I_m (291.15 °k)	I_m (295.85 °k)
-3	0,000645	0,000655	0,00065
-2	0,00044	0,000445	0,00044
-1	0,000215	0,00023	0,000215
0	0	0	0
1	-0,00021	-0,0002	-0,0002
2	-0,00044	-0,00041	-0,00042
3	-0,00069	-0,00066	-0,00067
5	-0,00119	-0,00235	-0,00117
8	-0,00249	/	-0,00245
12	-0,00663	-0,00595	-0,00643
15	-0,0181	-0,0147	-0,0174
18	-0,0907	-0,0682	-0,0888
20	-0,34	-0,255	-0,323
21	-0,649	-0,512	-0,63
21.5	-0,878	-0,698	-0,856
22	-1,185	-0,963	-1,15
22.5	-1,49	-1,25	-1,49
23	-1,895	-1,625	-1,865
23.5	-2,31	-2,05	-2,3
24	-2,845	-2,55	-2,875
24.5	-3,43	-3,08	-3,4
25	-4,025	-3,69	-3,99
25.5	-4,68	-4,375	-4,61

Mesures éclair en laboratoire pour le silicium mono cristallin

U_m	I_m	I_l	T°k
1,09	0,00862	0,00888	295
2,81	0,00801	0,00888	295
3,42	0,00788	0,00888	295
4,71	0,00738	0,00888	295
6,32	0,00668	0,00888	295
7,59	0,00606	0,00888	295
8,83	0,00529	0,00888	295
9,71	0,00349	0,00666	295
11,8	0,00228	0,00888	295
12,4	0,00131	0,00975	295
13	0	0,00888	295

Mesures éclair en laboratoire pour le silicium poly cristallin

U_m	I_m	I_l	T°k
0	0,00793	0,00793	295,15
0,98	0,00772	0,00793	295,15
2,09	0,00739	0,00793	295,15
3,1	0,0071	0,00793	295,15
4,3	0,00671	0,00793	295,15
5,34	0,00632	0,00793	295,15
6,28	0,00598	0,00793	295,15
7,67	0,00523	0,00793	295,15
8,92	0,00426	0,006	295,15
9,9	0,00318	0,0056	295,15
10,63	0,00204	0,004	295,15
10,93	0,00151	0,0036	295,15
11,2	0,00099	0,00309	295,15
11,62	0	0,00309	295,15

Mesures avec échauffement

Type	Courant	Tension mesurée	T_{am}
poly cristallin	-1	22	23
	-2	21.5	18.5
	-2.5	21	22.8
	-3	23	23
Mono cristallin	-1	21.6	18.5
	-2	22.5	22.8
	-2.75	22.98	22.8
	-3.5	23.6	22.8

Résultats de mesures effectuées de nuit

Type	tension	T_m	La vitesse du vent
poly cristallin	23.82	8.4	0.3
	23.82	8	2.2
	23.72	10.4	1.3
	23.22	15.8	0
Mono cristallin	24.99	7.8	0.9
	24.94	8.1	1.9
	24.84	11.1	0.4
	24.39	15.6	0.5

Mesures réelles pour le silicium poly cristallin pour année 1998/1999

u	I	I _i	puissance lumière	T _{am}	Vitesse du vent
20,9655	0,1270	0,5500	275	7,2000	3,9
20,5725	0,1524	0,5600	342	7,9000	4,8
21,4253	0,1350	1,0250	154	7,5000	4,4
20,0321	0,7750	1,4000	257	3,1000	0,3
20,8643	0,2050	0,9800	446	5,2000	0,0
20,5461	0,2620	1,5000	553	6,6000	0,1
20,2461	0,2620	2,5000	595	6,8000	0,2
20,2461	0,2620	2,6300	74	8,1000	0,2
20,5450	0,2600	2,3500	673	9,3000	1,1
20,9477	0,2650	2,6000	715	8,7000	0,4
20,3505	0,2700	2,3000	500	9,8000	1,1
20,7477	0,2650	2,2500	477	9,8000	1,1
20,8950	0,3490	1,1000	287	4,9000	0,7
21,0960	0,3520	1,5250	346	5,4000	1,0
20,9960	0,3510	1,8250	404	6,9000	2,3
20,7900	0,3400	2,0750	465	7,7000	1,6
20,5680	0,3380	2,3750	536	8,5000	0,9
20,4840	0,3300	2,5750	574	8,8000	0,7
20,2840	0,3300	2,5750	612	9,8000	0,4
20,1410	0,3250	2,8600	623	10,0000	0,5
19,8960	0,6200	2,6500	630	11,8000	0,6
19,8410	0,6120	2,5500	609	12,1000	0,4
20,0500	0,6270	2,2200	544	12,4000	0,5
20,1510	0,6300	2,0250	503	12,5000	0,4
20,0470	0,6220	1,6000	414	12,4000	1,1
19,6430	0,6150	1,2000	372	12,5000	0,7
18,9290	0,5900	0,8120	271	12,2000	1,1
13,6400	0,4300	0,4380	216	12,1000	1,0
20,1290	0,4100	0,8000	182	5,2000	2,3
20,5840	0,4200	1,1400	286	7,0000	2,3
20,7480	0,4440	1,4750	339	7,6000	2,3
20,5360	0,4230	1,8800	434	9,3000	2,6
20,5850	0,4210	2,1200	475	10,3000	1,5
20,6370	0,4250	2,3750	549	12,4000	1,2
20,5350	0,4220	2,6000	584	13,0000	2,2
20,2340	0,4190	2,7300	634	13,8000	1,6
20,0760	0,8540	2,7500	618	15,3000	1,9
20,3190	0,8600	2,3750	596	15,2000	2,0
20,1790	0,8600	1,9750	513	14,7000	4,6
19,6690	0,8420	1,5900	475	14,7000	3,7
18,1270	1,1250	1,4000	384	14,6000	2,3
7,6280	0,4620	0,4720	325	14,6000	1,9
6,8790	0,4100	0,4120	258	14,4000	1,8
6,4010	0,3600	0,3650	257	14,0000	2,7
20,0650	0,6550	1,2500	249	7,6000	0,1
20,2450	0,6540	1,5000	350	9,3000	0,5
20,2280	0,6600	1,9250	434	10,4000	0,9
19,9940	0,6350	1,5660	514	12,0000	1,7
20,5830	0,6870	2,1900	556	12,4000	1,9
18,3390	0,6080	0,7900	408	14,0000	2,5
17,1150	0,5650	0,6450	326	14,3000	2,3
7,5190	0,2500	0,2520	245	14,1000	1,5
4,4220	0,3090	0,3100	107	4,2000	2,9

3,5030	0,1850	0,1880	79	4,2000	3,0
2,6360	0,1720	0,1740	50	4,1000	3,1
2,3790	0,1600	0,1620	87	3,5000	3,3
2,0470	0,0850	0,0860	135	3,7000	2,3
1,1560	0,0640	0,0650	103	3,8000	2,5
1,3850	0,0800	0,0810	35	3,4000	3,1
1,7580	0,1220	0,1230	50	3,1000	2,8
11,4850	0,1520	0,1600	129	5,2000	4,3
9,4910	0,1280	0,1310	88	5,4000	4,1
7,1030	0,0950	0,1000	82	5,4000	4,3
9,8720	0,1300	0,1370	85	5,3000	3,8
9,9740	0,1320	0,1380	64	5,3000	3,3
0,7553	0,0095	0,0100	8	5,2000	1,7
2,0401	0,0270	0,0280	15	5,2000	1,6
3,5251	0,0450	0,0455	26	5,2000	1,6
17,7340	0,2400	0,3200	278	13,7000	5,0
19,4450	0,2600	0,5450	291	13,8000	5,1
17,5310	0,2350	0,3100	183	13,3000	5,8
19,9480	0,2650	0,6650	231	13,1000	6,2
20,9560	0,2800	1,5500	191	9,3000	2,7
20,9560	0,2800	1,8800	446	10,4000	2,6
21,0060	0,2800	2,2200	547	11,4000	2,9
20,8530	0,2750	2,6000	628	12,4000	3,1
16,9940	2,5000	2,8500	749	14,4000	3,5
18,0770	2,6500	2,9500	733	15,1000	3,7
17,1940	2,5000	2,7500	640	15,3000	4,1
6,5610	0,1100	0,1170	32	2,6000	4,1
17,7690	0,3040	0,3500	63	2,3000	4,5
14,1350	0,2430	0,2600	91	2,2000	3,9
18,3760	0,3150	0,3880	137	2,3000	4,4
19,4870	0,3350	0,4900	153	2,5000	3,3
19,4870	0,3350	0,4950	194	3,2000	4,3
20,4970	0,3530	0,8000	239	4,6000	3,9
21,0010	0,3600	1,1500	244	4,8000	3,1
20,5990	0,3570	0,9540	335	5,3000	4,5
21,5060	0,3700	1,5300	402	5,7000	3,8
18,7490	2,1500	2,9000	782	11,2000	2,5
18,7990	2,1500	2,8500	784	11,4000	3,5
18,3600	2,0800	2,6800	738	11,6000	3,0
18,0430	2,0500	2,5000	683	11,8000	3,1
17,2980	1,9700	2,2000	661	11,9000	2,6
15,1640	1,7300	1,8000	499	11,8000	2,6
14,1410	1,3300	1,3500	533	11,6000	2,6
3,8290	0,3570	0,3600	59	0,9000	0,0
5,5840	0,5100	0,5140	2	2,0000	0,0
11,8130	1,1000	1,1400	331	4,3000	0,1
14,7810	1,4000	1,4500	448	5,4000	0,6
17,1140	1,6400	1,7500	410	6,8000	1,6
18,3760	1,7500	2,1200	536	7,4000	1,7
17,5700	1,7400	2,0000	650	9,0000	1,1
19,6670	0,3000	0,4800	140	4,2000	3,7
18,3610	0,2890	0,3700	191	4,5000	4,3
19,6220	0,3080	0,5200	278	4,6000	5,3
19,9720	0,3080	0,5650	445	5,6000	4,9
19,9690	0,3030	0,5900	341	6,4000	5,3
19,0630	0,2920	0,4800	244	6,0000	4,6
18,3570	0,2820	0,4000	293	6,7000	4,7
20,4740	0,3120	0,9000	251	7,0000	4,9

18,7630	0,2930	0,5100	288	7,6000	5,4
19,9740	0,3120	0,7000	334	7,8000	5,2
21,5840	0,3300	2,5000	308	7,9000	5,1
18,8620	0,2900	0,5400	569	8,2000	4,4
21,2840	0,3300	1,9000	503	9,2000	3,9
19,8710	0,3070	0,6100	497	9,5000	5,1
11,0950	0,1700	0,1800	31	4,9000	6,1
18,6610	0,2880	0,3800	37	5,1000	6,5
15,4340	0,2400	0,2600	90	5,6000	5,9
16,9450	0,2600	0,3000	174	6,0000	6,2
16,9450	0,2600	0,3000	140	6,3000	5,9
21,5840	0,3300	1,2000	178	6,5000	6,2
21,3840	0,3300	1,1800	256	8,1000	5,9
20,3240	0,3130	0,7900	155	7,4000	6,1
2,9240	0,0430	0,0450	429	6,8000	4,6
4,2350	0,0620	0,0630	331	7,2000	4,9
9,7180	0,5700	0,5800	299	6,3000	1,2
18,2130	1,1000	1,2800	367	6,9000	1,9
19,9690	1,2000	1,8000	309	7,4000	2,1
20,8080	1,2700	2,4500	536	7,8000	2,2
19,8410	1,1500	3,1700	517	9,9000	3,5
20,0580	1,1800	3,0300	816	10,8000	2,7
19,8860	1,2300	2,9500	826	11,2000	1,9
19,8910	1,2400	2,8000	769	11,6000	1,7
20,7910	1,1500	2,9200	255	11,2000	4,5
20,5240	1,1200	2,6600	547	12,6000	6,1
9,6140	0,5100	0,5220	263	8,7000	2,2
18,2410	0,9700	1,1400	318	9,4000	1,9
17,5120	0,4700	0,5600	138	12,4000	0,7
18,0180	0,4800	0,6150	301	12,7000	1,6

Mesures réelles pour le silicium poly cristallin pour année 1998/1999

u mod	imod	il	t'k	v	puissance
20,3939	0,132	0,585	280,2	3,9	275
21,075	0,134	0,583	280,9	4,8	342
21,1176	0,21	1,82	277,4	0	381
21,0652	0,295	2,55	279,6	0,1	553
20,5624	0,29	2,9	279,8	0,2	595
20,6624	0,29	3,15	281,1	0,2	749
20,8652	0,295	2,35	282,3	1,1	673
20,7652	0,295	2,75	282,8	0,4	627
21,1669	0,298	2,425	282,8	1,1	500
20,9652	0,295	1,95	282,8	1,1	477
21,21	0,375	1,27	277,9	0,7	287
21,312	0,378	1,68	278,4	1	346
21,159	0,373	2,25	279,9	2,3	404
20,908	0,372	2,38	280,7	1,6	465
20,604	0,365	2,675	281,5	0,9	536
20,501	0,359	2,85	281,8	0,7	574
20,239	0,355	2,99	282,8	0,4	612
20,3	0,358	3,15	283	0,5	623
20,102	0,54	2,85	284,8	0,6	630
19,652	0,54	2,72	285,1	0,4	609
20,105	0,545	2,34	285,4	0,5	544
19,308	0,55	2,1	285,5	0,4	503

20,46	0,554	1,65	285,4	1,1	414
20,308	0,55	1,25	285,5	0,7	372
19,597	0,53	0,82	285,2	1,1	271
5,888	0,158	0,162	285,1	1	216
20,693	0,452	1,375	280	2,3	286
20,652	0,45	2,1	282,3	2,6	434
20,613	0,452	2,65	285,4	1,2	549
20,512	0,45	2,85	286	2,2	584
20,451	0,448	2,96	286,8	1,6	634
19,874	1,025	2,74	288,3	1,9	618
19,874	1,025	2,3	288,2	2	596
19,728	1,015	2,065	287,7	4,6	513
19,149	0,98	1,45	287,7	3,7	475
17,786	1,225	1,385	287,6	2,3	384
8,239	0,57	0,59	287,6	1,9	325
5,666	0,385	0,39	287,4	1,8	258
3,326	0,225	0,228	287	2,7	157
20,236	0,788	1,71	282,3	0,5	350
20,132	0,771	2,15	283,4	0,9	434
19,927	0,762	1,725	285	1,7	514
20,482	0,789	2,44	285,4	1,9	556
18,189	0,695	0,818	287	2,5	408
17,12	0,66	0,715	287,3	2,3	326
6,489	0,249	0,251	287,1	1,5	245
4,938	0,335	0,337	277,2	2,9	107
2,832	0,2	0,202	277,2	3	79
3,145	0,223	0,227	277,1	3,1	50
3,333	0,238	0,24	276,5	3,3	87
1,416	0,1	0,102	276,7	2,3	435
1,602	0,093	0,093	276,8	2,5	105
1,24	0,072	0,072	276,4	3,1	35
2,104	0,15	0,151	276,1	2,8	50
12,651	0,18	0,19	278,2	4,3	129
10,284	0,15	0,157	278,4	4,1	88
6,553	0,095	0,1	278,4	4,3	82
9,578	0,14	0,145	278,3	3,8	85
10,384	0,15	0,16	278,3	3,3	64
0,7862	0,011	0,012	278,2	1,7	8
2,1774	0,031	0,032	278,2	1,2	8
3,2252	0,045	0,046	278,3	1,9	9
18,451	0,27	0,35	286,7	5	278
19,762	0,29	0,56	286,8	5,1	291
18,451	0,27	0,345	286,3	5,8	183
20,368	0,3	0,82	286,1	6,2	231
20,981	0,305	2,15	283,4	2,6	446
20,922	0,307	2,52	284,4	2,9	547
20,768	0,3	2,94	285,4	3,1	628
16,945	2,58	3,18	287,4	3,5	749
17,267	2,62	3,1	288,1	3,7	733
17,056	2,6	3,05	288,3	4,1	640
6,162	0,11	0,114	275,6	4,1	32
17,579	0,32	0,345	275,2	3,9	91
19,498	0,353	0,44	275,3	4,4	137
20,407	0,37	0,57	275,5	3,3	153
20,204	0,365	0,532	276,2	4,3	194
20,71	0,375	0,745	277,6	3,9	239
20,913	0,38	0,975	278,3	4,5	335
21,318	0,39	1,4	278,7	3,8	402

17,622	2,45	3,16	284,2	2,5	782
17,525	2,46	3,08	284,4	3,5	784
17,244	2,4	2,9	284,6	3	738
16,605	2,33	2,6	284,8	3,1	683
15,632	2,2	2,34	284,9	2,6	661
12,864	1,81	1,87	284,8	2,6	499
9,767	1,37	1,39	284,6	2,6	533
4,442	0,433	0,439	273,9	0	59
6,076	0,635	0,64	275	0	202
12,606	1,35	1,4	277,3	0,1	331
14,646	1,6	1,67	278,4	0,6	448
16,83	1,84	2	279,8	1,6	410
17,842	1,95	2,44	280,4	1,7	536
17,909	1,98	2,47	282	1,1	650
20,074	0,31	0,478	277,1	3	84
20,378	0,318	0,522	277,2	3,7	140
20,175	0,312	0,498	277,5	4,3	191
20,075	0,312	0,49	277,6	5,3	278
20,175	0,312	0,5	278,6	4,9	445
20,68	0,322	0,73	279,4	5,3	341
20,278	0,317	0,596	279	4,6	244
20,278	0,318	0,62	279,7	4,7	293
20,175	0,312	0,645	280	4,9	251
19,571	0,305	0,54	280,6	5,4	288
20,175	0,313	0,66	280,8	5,2	334
21,639	0,338	2,43	281,2	4,4	569
21,386	0,332	2	282,2	3,9	503
19,779	0,32	0,51	282,5	5,1	497
15,536	0,243	0,263	277,9	6,1	31
19,774	0,31	0,45	278,1	6,5	37
18,16	0,285	0,338	278,6	5,9	90
16,646	0,26	0,29	279	6,9	174
16,947	0,263	0,29	279,3	5,9	140
20,278	0,317	0,63	280,4	6,1	155
6,758	0,104	0,11	279,8	4,6	429
4,236	0,064	0,065	280,2	4,9	331
11,099	0,712	0,729	279,3	1,2	299
19,5	1,25	1,8	279,9	1,9	367
9,125	0,58	0,59	280,9	2,6	338
19,611	1,27	3,15	284,2	1,9	826
19,717	1,28	3,1	284,6	1,7	769
9,316	0,69	0,695	281,7	2,2	263
8,132	0,593	0,6	282,4	1,9	318
18,214	0,56	0,66	315,4	0,7	138
17,602	0,54	0,61	285,7	1,6	301

Programme

- 📊 Tableau 1 unit 10, file = ilyes 1 mesure en obscurité pour différentes température.
- 📊 Tableau 2 unit 20, file =ilyes 2 mesure en laboratoire avec éclairage.
- 📊 Tableau 3 unit 30, file =ilyes 3 mesure dans les condition réel.
- 📊 Tableau 4 unit 40, file =ilyes 4 mesure en obscurité avec échauffement.
- 📊 Tableau 6 unit 60, file =ilyes 6 tableau en excel de stockage.
- dimension ii(22,3), u(22,3),i_r(8), i_r(8), u_r(8), i_{lr}(50), t_a(50), V_v(50), P(50), & u_e(4), i_e(4), t_{ae}(4), i_{le}(4), rpmaxx(3),rpminn(3),rsmaxx(3),rsminn(3),t(3)
- real*8 ic,irf1,irf2,ii,i01,i02,nn,u,rpmaxx,rpmax,rpminn,rpmin,rsmaxx, & rsmax, rsminn,rsmmin,moyrpxmax,moyrpxmin,moyrsmmax,moyrsmmin,k,pour1

bb=0.

s=0.

Z=0.

z=0.

rpma=-2000000.

rpmi=20000000.

rsma=-200000.

rsmi=200000000.

pour=-20000000.

pourc1=200000000.

e=1.602*10**-19.

k=1.381*10**-23.

nn=36.

trf=298.

eg=1.12

t(1)=291.

t(2)=295.

t(3)=296.

te=296.15.

som=0

som1=0.

som2=0.

som3=0.

som4=0.

som5=0.

som6=0.

m=1.

H=1.

h=1.

Programme pour la modélisation électrique d'un module photovoltaïque

Programme de calcul de R_{pmin} , R_{pmax} , R_{smin} , R_{smax}

```
open(unit=10,file='ilyes1.dat')
do j=1,3
do i=1,22
read(10,*)u(i,j)
enddo
do i=1,22
read(10,*)ii(i,j)
write(*,*)u(i,j),ii(i,j)
enddo
do n=1,3
rp=(u(n+1,j)-u(n,j))/(ii(n+1,j)-ii(n,j))
rp=abs(rp)
rpmax=max(rp,rpma)
rpmin=min(rp,rpmi)
rpma=rpmax
rpmi=rpmin
write(*,*)rp
enddo
do n=19,21
rs=(u(n+1,j)-u(n,j))/(ii(n+1,j)-ii(n,j))
rs=abs(rs)
rsmax=max(rs,rsma)
rsmin=min(rs,rsmi)
rsma=rsmax
rsmi=rsmin
enddo
rpmaxx(j)=rpmax
rpminn(j)=rpmin
rsmaxx(j)=rsmax
rsminn(j)=rsmin
moyrpmax=(rpmaxx(1)+rpmaxx(2)+rpmaxx(3))/3.
moyrpmin=(rpminn(1)+rpminn(2)+rpminn(3))/3.
moyrsmax=(rsmaxx(1)+rsmaxx(2)+rsmaxx(3))/3.
moyrsmin=(rsminn(1)+rsminn(2)+rsminn(3))/3.
write(*,*)moyrsmin
rpmax=moyrpmax
rpmin=moyrpmin
rsmax=moyrsmax
rsmin=moyrsmin
enddo
```

Programme de calcul de $r_p, r_s, \gamma_1, \gamma_2, irf_1, irf_2$

```

do j=1,3
do rp=rpmin,rpmax,1.
do rs=rsmin,rsmax,1/100.
do gamma1=1,5,1/100.
do gamma2=1,5,1/100.
do irf1=0.00000001,0.00001,1/1000000.
do irf2=0.00000001,0.00001,1/1000000.
do n=1,22
i01=irf1*(t(j)/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma1*k))*((1./trf)-(1./t(j))))))
i02=irf2*(t(j)/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma2*k))*((1./trf)-(1./t(j))))))
z1=-i01*(exp((e*(u(n,j)+rs*ii(n,j)))/(gamma1*k*nn*t(j)))-1.)
z2=-i02*(exp((e*(u(n,j)+rs*ii(n,j)))/(gamma2*k*nn*t(j)))-1.)
z3=(u(n,j)+rs*ii(n,j))/rp
ic=z1+z2-z3+il
pour1=abs(((ii(n,j)-ic)/ii(n,j)))*100.
write(*,*)n,irf1,irf2,rp,rs,gamma1,gamma2
pourc=max (pour, pour1)
pour=pourc
enddo
write(*,*)pourc,irf1,irf2,rp,rs,gamma1,gamma2
if (pourc.lt.20) then
write(60,*)pourc,irf1,irf2,rp,rs,gamma1,gamma2
pourc2=pourc
pourcm=min(pourc2,pourc1)
pourc1=pourcm
write(60,*)pourcm,irf1,irf2,rp,rs,gamma1,gamma2
endif
open(unit=60,file='ilyes6.dat')
read(60,*)pourcm
bb=min(pourcm)
write(*,*)bb, irf1,irf2,rp,rs,gamma1,gamma2
som=som+bb
som1=som1+irf1
som2=som2+irf2
som3=som3+rp
som4=som4+rs
som5=som5+gamma1
som6=som6+gamma2
m=m+1
endif
enddo
enddo
enddo
enddo
enddo
enddo
enddo
enddo
moy=moy/m
moy1=som1/m
moy2=som2/m
moy3=som3/m

```

```

moy4=som4/m
moy5=som5/m
moy6=som6/m
write(*,*)moy,moy1,moy2,moy3,moy4,moy5,moy6
dr=moy
irf1=moy1
irf2=moy2
rp=moy3
rs=moy4
gamma1=moy5
gamma2=moy6
write(60,*)irf1, irf2, rp, rs, gamma1, gamma2
stop
end

```

Programme de calcule la différence relative maximale en cas éclairé

```

open(unit=20,file='ilyes2.dat')
do j=1,8
read(20,*) ii(8), ie(8), ue(8)
i01=irf1*(te/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma1*k))*((1./trf)-(1./te))))
i02=irf2*(te/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma2*k))*((1./trf)-(1./te))))
z1=-i01*(exp((e*(ue(j)+rs*ie(j)))/(gamma1*k*nn*te))-1.)
z2=-i02*(exp((e*(ue(j)+rs*ie(j)))/(gamma2*k*nn*te))-1.)
z3=(ue(j)+rs*ie(j))/rp
ic=z1+z2-z3+il(j)
m=abs(ie(j)-ic)*100/ie(j)
kk=max(m,s)
kk=s
enddo
write(*,*)s

```

Programme de calcule le facteur de conversion

```

open(unit=40,file='ilyes4.dat')
do j=1,50
read(30,*) ilr(50), ta(50), Vv(50), P(50)
f= ilr(j)/ P(j)
bb=bb+f
r=r+1
enddo
fv=bb/r
write(*,*)fv
write(60,*)fv

```

Programme pour la modélisation thermique d'un module photovoltaïque

Programme de calcul le facteur de conduction

```

open(unit=40,file='ilyes4.dat')
do j=1,4
read(40,*) ue(4), ie(4), tae(4), ile(4)
te= tae(j)
i01=irf1*(te/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma1*k))*((1./trf)-(1./te))))
i02=irf2*(te/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma2*k))*((1./trf)-(1./te))))
z1=-i01*(exp((e*(ue(j)+rs*ie(j)))/(gamma1*k*nn*te))-1.)
z2=-i02*(exp((e*(ue(j)+rs*ie(j)))/(gamma2*k*nn*te))-1.)
z3=(ue(j)+rs*ie(j))/rp
ic=z1+z2-z3
w=abs(ie(j)-ic)*100/ie(j)
if (w.lt.10)
write (*,*) te
F= -(ue(j).ie(j))/(te- tae(j))
Fcc=F+Z
Z=Fcc
Fc=Z / H
H = H+1
write(*,*)Fc
write(60,*) Fc
endif
te=te+0.1
enddo

```

Programme de calcul le facteur de convection

```

open(unit=30,file='ilyes3.dat')
do j=1,50
read(30,*) ur(50), ir(50), tar(50), ilr(50)
tr= tar(j)
i01=irf1*(tr/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma1*k))*((1./trf)-(1./te))))
i02=irf2*(tr/trf)**3.*(exp(((eg*e)/(gamma2*k))*((1./trf)-(1./te))))
z1=-i01*(exp((e*(ur(j)+rs*ir(j)))/(gamma1*k*nn*tr))-1.)
z2=-i02*(exp((e*(ur(j)+rs*ir(j)))/(gamma2*k*nn*tr))-1.)
z3=(ur(j)+rs*ir(j))/rp
ic=z1+z2-z3
w=abs(ir(j)-ic)*100/ir(j)
if (w.lt.10)
write (*,*) tr
F= -(ur(j).ie(j)+s.p(j))/(tr- tre(j)) +Fc)/Vv
Fcc=F+z
z=Fcc
Fv=z / h
h = h+1

```

```
write(*,*)Fv
endif
tr=tr+0.1
write(60,*)Fv,Fc
enddo
open(unit=60,file='ilyes6.dat')
read(60,*) irf1, irf2, rp, rs, fc,Fc, Fv
stop
end
```

حساب الوسائط الداخلية للوح الشمسي من خلال الوسائط الخارجية المقاسة

ملخص

إن الاستهلاك المفرط للطاقت الأولية من فحم و بترول , قد جعل كثرة الطلب عليها و استغلالها إلى زيادة في انبعاثات غازات CO₂ التي نتج عنها تلوث بيئي و انحباس حراري مما أدى إلى رفع منسوب غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو و رفع درجة حرارة الأرض .

و عليه فمن الضروري البحث عن بدائل جديدة للطاقة تكون قابلة للتجديد و غير مضرّة بالبيئة و هذا مما جعلها محور دراستنا في هذا البحث و التركيز على ابسطها و أنظفها وهي الطاقة الشمسية.

إن الهدف من عملنا هو حساب الخصائص الداخلية للوح الشمسي من خلال الوسائط الخارجية المقاسة و تركيب برنامج تمثيلي يسمح لنا بحساب الطاقة المنتجة و المردود الأمثل.

Calculation of the parameters of one photovoltaic module has the parameters external measures.

Abstract

The huge demand and consumption of fossil energy like coal and petroleum had led to the increasing of CO₂ gas emission in the air causing, solution, greenhouse effect and increasing of earth temperature.

So, we (as humans) are urged to look for new kinds of renewable energy which preserve the environment. That's why we focused in this study of search on the most simple and clean one: the solar energy.

The aim of work is to calculate the interior characteristics of a solar panel from measured exterior parameters and to achieve a simulating program which allows us to calculate predicted energy and efficiency.

Calcul des paramètres internes d'un module photovoltaïque à partir des paramètres externes mesurés

Résumé

La forte demande et la consommation d'énergies fossiles comme le charbon et le pétrole a conduit à l'augmentation des émissions de gaz CO₂ dans l'air, l'effet de serre et l'augmentation de la température de la terre.

Donc, nous sommes invités à rechercher des nouvelles formes d'énergie renouvelable afin de préserver l'environnement. C'est pourquoi nous nous sommes concentrés dans cette étude de recherche, sur la plus simple et propre: l'énergie solaire.

Le but de notre travail est de calculer les caractéristiques intérieures d'un panneau solaire à partir paramètres extérieurs mesurés et de réaliser un programme de simulation qui va nous permettre de calculer l'énergie et de prédire l'efficacité.