



**MODELISATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE DE MODULES
PHOTOVOLTAÏQUES DE DIFFERENTES TECHNOLOGIES**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE EN SCIENCES DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT.
OPTION : Génie Electrique et Energétique

Présenté et soutenu publiquement le 23 juin 2014 par
Amidou Singho BOLY

Travaux dirigés par :

- **Dr Moussa SORO (Enseignant Chercheur, Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie)**
- **Ing Alain TOSSA (Doctorant, Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie)**
- **Ing Patrice DANGANG (Ingénieur de recherche, Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Pr Yao AZOUMAH**

Membres et correcteurs : **Ing Ahmed BAGRE**
Ing Alain TOSSA

Promotion [2013/2014]



REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette année universitaire.

Mes remerciements vont à mon père Boly Abdoul, à ma tante Boly Mariam à mes frères et sœurs ainsi qu'à l'ensemble de ma famille pour leur soutien inconditionnel et leur amour.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe pédagogique du 2iE et les intervenants professionnels responsables de la formation en ingénierie, pour avoir assuré la partie théorique de ma formation.

Je remercie également le Pr Yao AZOUMAH responsable du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer ce stage dans son laboratoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elles m'ont fait partager durant ce stage au sein du laboratoire, il s'agit de mes encadreurs :

Dr. Y. Moussa SORO

Ing Alain Tossa

Ing Patrice Dangang

Ainsi que l'ensemble du personnel du laboratoire, pour le bon accueil.



RESUME

Dans le contexte de crise énergétique que connaît l'Afrique ; les énergies renouvelables et le solaire photovoltaïque en particulier apparaissent comme des pistes de solution. La présente étude initiée par le Laboratoire Energie Solaire et Economie d' Energie (LESEE) a eu pour principal but de modéliser la production énergétique des modules photovoltaïques. Pour ce faire, une revue des différentes technologies de modules photovoltaïques et des méthodes d'estimations de la production énergétique a été effectuée. Cette revue a permis de retenir la méthode MotherPV pour la modélisation de la production énergétique. En s'appuyant sur de précédents travaux menés au LESEE un code numérique, basé sur MotherPV a été implémenté dans MATLAB. Ce code a été utilisé pour une étude comparative entre les technologies HIT, silicium monocristallin, polycristallin et amorphe. Les résultats obtenus montrent que la technologie HIT est la plus performante des trois technologies étudiées.

Mots Clés : Energie, Module photovoltaïque, Modélisation, MotherPV, Matlab.

ABSTRACT

In energy crisis context that happen in Africa; renewable energies and solar photovoltaic in particular seem to be a good way to solve that crisis. This study initiated by the Laboratory Solar Energy and Energy Saving had the main purpose of modeling the energy production of photovoltaic modules. To do so, a review of the photovoltaic modules technologies and its energy production modeling methods was made. Then, the MotherPV method has been considered for our work. A numerical code of this method has been developed with the MATLAB software. This code was used to compare the energy production of four PV technologies: HIT, monocrystalline, polycrystalline and amorphous silicon. The simulation results show that the HIT technology has the best energy production.

Key words: Energy, Photovoltaic module, Modeling, MotherPV, Matlab

LISTE DES ABREVIATIONS

LEEE-TISO	The Laboratory of Energy, Ecology and Economy
CEA	Commissariat à l'énergie Atomique et aux Energies Alternatives
ECN	Netherlands Energy Research Foundation (Energieonderzoek Centrum Nederland)
CREST	Center for Renewable Energy and Sustainable Technology
G_i	Ensoleillement globale horizontal sur le plan des modules
G_0	Ensoleillement STC (1000W/m ² ; 25°C ; 1.5AM)
$I_{m,STC}$	Intensité maximale dans la condition standard de test
$V_{m,STC}$	Tension maximale dans les conditions standards de test
C_1	Coefficient du module déterminé empiriquement
C_2	Coefficient du module déterminé empiriquement
a_{vm}	Coefficient de tension lié à la température
a_{im}	Coefficient d'intensité lié à la température
T_0	Température dans la condition standard de test
$\alpha(G)$	Coefficient de température du module pour l'ensoleillement G, il est obtenu après l'analyse entre le rendement de référence et le rendement réel du module.
$T_{bom}(G)$	Température à l'arrière du module
$T_{bomref}(G)$	Température à l'arrière du module durant la période de référence
$\eta(G, \theta(G))$	Rendement du module, fonction de l'ensoleillement sur un plan horizontal et une température $\theta(G)$
$h(G)$	Fonction dérivée de la fonction de répartition de l'irradiation exprimée en fonction de l'ensoleillement
$\theta(G)$	Température arrière du module en fonction de l'ensoleillement
H_T	Irradiation reçu durant la période de temps T
α	Coefficient de déperdition de la puissance en fonction de la température, il est fourni par le constructeur
r_T	Facteur qui décrit l'influence de la température du module sur le rendement
r_G	Décrit l'influence de l'ensoleillement
r_x	Pour tout autre facteur de déperdition que l'on voudrait prendre en compte

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
ABSTRACT.....	II
liste des abréviations	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VI
<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I: technologies de modules photovoltaïques.....</i>	<i>3</i>
Introduction.....	3
<i>I. Technologies à base de silicium cristallin</i>	<i>3</i>
<i>II. Couches minces.....</i>	<i>5</i>
<i>III. nouvelles technologies</i>	<i>5</i>
Conclusion	6
<i>Chapitre II: Méthodes de calcul de la production énergétique.....</i>	<i>7</i>
Introduction.....	7
<i>I. méthodes directes d'estimation de la production énergétique</i>	<i>7</i>
1) Méthode « Module back temperature ».....	7
2) Méthode SSC « Site Specific Conditions »	8
3) Méthode « On-line Yearly Yield Simulator»	9
4) Méthode « Matrix ».....	10
5) Méthode « MotherPV ».....	11
<i>II. méthodes indirectes d'estimation de la production énergétique : les modèles électriques.....</i>	<i>15</i>
<i>III. choix des méthodes pour l'étude.....</i>	<i>15</i>
conclusion	15
<i>Chapitre III: PROGRAMME MOTHERPV.....</i>	<i>16</i>
Introduction.....	16
<i>I. Architecture du programme Motherpv</i>	<i>16</i>
<i>II. Fonction de distribution de la ressource Solaire</i>	<i>17</i>
<i>III. Présentation du bloc Simulink et organisation des données de sortie.....</i>	<i>19</i>
1) Présentation du Bloc Simulink.....	19

2) Organisation des données de sortie du bloc	21
IV. Caractérisation du module photovoltaïque	21
Conclusion	22
Chapitre IV: Etude comparative des performances de différentes technologies PV.....	23
Introduction.....	23
I. Spécification technique des modules étudiés	23
II. Détermination des facteurs d'idéalités	24
1) Monocristallin.....	24
2) Polycristallin.....	25
3) AMORPHE	25
4) HIT.....	26
III. Calcul de l'erreur absolue liée à l'utilisation du bloc Simulink	26
IV. Estimation de la production énergétique	27
V. Analyse et commentaire	29
1) Facteurs d'idéalités.....	29
2) Ratios de performances.....	29
3) Productivité calculé comparé à celle relevée.....	30
Conclusion	31
Conclusion générales et perspectives	32
VI. Annexes	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I:Présentation d'un exemple de matrice P (G_i ; T_a) ([10].....	10
Tableau II: Comparaison des méthodes de calcul de l'énergie	14
Tableau III : Caractéristiques des modules photovoltaïque retenus	23
Tableau IV: Valeurs du facteur d'idéalité par technologie.....	26
Tableau V: Erreur absolue des valeurs du bloc Simulink.....	27
Tableau VI: Production des différentes technologies	29
Tableau VII: Productivité relevée	30
Tableau VIII: Ecart des estimations de motherpv.....	31

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de l'irradiation journalière mondiale	2
Figure 2: Description de l'effet photovoltaïque[3].....	3
Figure 3: Aspect des cellules monocristalline et polycristalline (de la gauche vers la droite)	4
Figure 4: Structure d'une cellule de module HIT	4
Figure 5: Ratio de performance du module en fonction de la température [7].....	8
Figure 6: Algorithme de calcul de la méthode 'Site Specific Conditions'	9
Figure 7: Modèles électriques à une et deux diodes[6].....	15
Figure 8: Organigramme Simplifié du programme Motherpv	17
Figure 9: Organigramme simplifié du sous-programme "distrib1"	18
Figure 10: Bloc Simulink.....	20
Figure 11: Modèle électrique à quatre paramètres.....	20
Figure 12: Format de sortie des données du bloc Simulink.....	20
Figure 13: Organigramme "traitexcel"	21
Figure 14: Organigramme du programme extractcourb	22
Figure 15: Influence du facteur d'idéalité sur le module monocristallin	24
Figure 16 : Influence du facteur d'idéalité sur le module polycristallin.....	25
Figure 17: Influence du facteur d'idéalité sur le module silicium Amorphe.....	25
Figure 18: Influence du facteur d'idéalité sur le module HIT	26
Figure 19: Fonction de distribution de l'ensoleillement.....	28
Figure 20: Ratio de performance des différentes technologies étudiées.....	28



INTRODUCTION GENERALE

Le continent Africain en général et l'Afrique subsaharienne en particulier connaît un faible taux d'électrification. D'après les travaux de Favennec et al [1], près de 77% de la population subsaharienne n'a pas accès à l'électricité. Cette situation est une résultante de la combinaison de plusieurs facteurs. On peut entre-autres citer le coût élevé de l'électricité et la difficulté des États à satisfaire les besoins énergétiques présents. L'Afrique dispose pourtant d'une forte irradiation solaire comme le montre la *figure 1*, mais cette ressource reste jusque-là très faiblement exploitée. L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable ; elle est valorisée à travers deux moyens que sont le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Dans la recherche de solutions au déficit énergétique que connaît le continent, l'énergie solaire apparaît comme une des solutions pouvant contribuer à l'amélioration de la situation énergétique. La présente étude s'intéresse uniquement au domaine du solaire photovoltaïque.

Bien que le solaire photovoltaïque connaisse un essor important, l'estimation de la production réelle des modules photovoltaïques reste toujours très approximative. En effet, les méthodes de dimensionnement utilisées par les opérateurs du photovoltaïque se basent sur les caractéristiques des modules dans les conditions standards de test (STC). Les conditions standards définissent un certain nombre de critères dont notamment :

- ❖ Un niveau d'éclairement de 1000 W/m^2 ;
- ❖ Une température homogène de cellules photovoltaïque de $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ❖ Une masse d'Air de 1.5.

Les conditions standards ne sauraient être à elles seules représentative du fonctionnement des modules, et pour cause la production de ceux-ci dépend essentiellement de deux critères à savoir :

- ❖ Les conditions climatiques dans lesquelles sont installés les modules ;
- ❖ Les caractéristiques propres aux modules. Elles sont liées à la technologie et aux processus qui ont mené à la fabrication des modules.

Dans le but de promouvoir le solaire photovoltaïque comme une des solutions crédible à la crise énergétique que connaît le continent, il apparaît nécessaire de mieux maîtriser l'estimation de la production réelles des modules.

C'est dans ce contexte que le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de 2iE a initié le présent thème de stage intitulé : « *Modélisation de la production énergétique de modules*

photovoltaïques de différentes technologies. ». A terme, l'étude doit permettre, pour chaque régions climatiques de déterminer la technologie présentant le meilleur rendement énergétique.

Ce travail est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présentera les différentes technologies de modules photovoltaïques existantes et les méthodes de modélisation de la production énergétique.

Le second sera consacré à la programmation des méthodes de modélisation de la production énergétique. Le dernier chapitre présentera les résultats des simulations, et leur analyse.

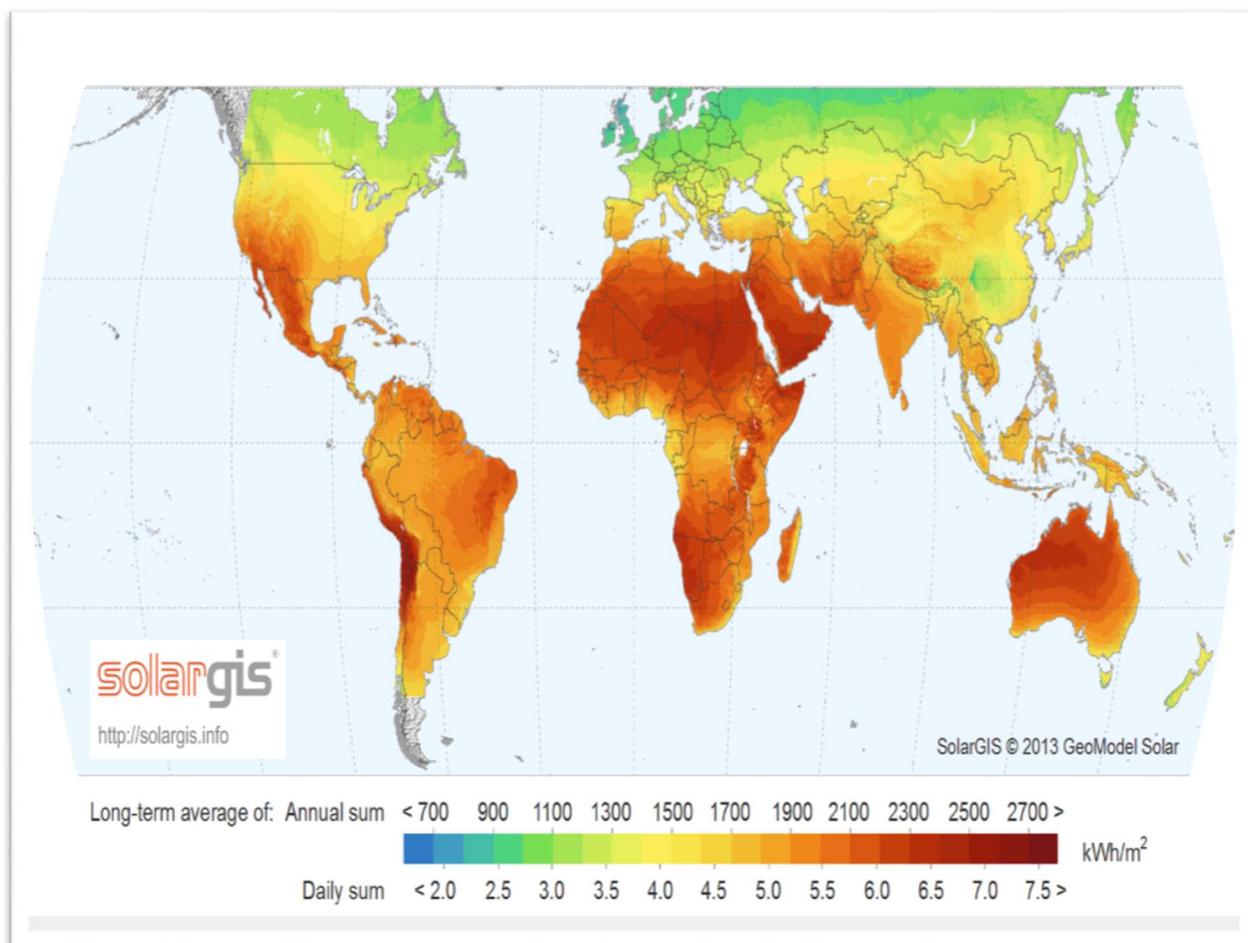


Figure 1: Carte de l'irradiation journalière mondiale

*CHAPITRE I: TECHNOLOGIES DE MODULES
PHOTOVOLTAÏQUES*

INTRODUCTION

L'effet photovoltaïque est obtenu par l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur, qui génère alors des électrons. Ce phénomène est mis en œuvre dans la fabrication des cellules photovoltaïques ; il a été découvert par le physicien français Antoine BECQUEREL en 1839. Depuis lors de nombreux progrès ont été accomplis dans le domaine. En effet, plusieurs technologies de modules photovoltaïques ont été développées et sont aujourd'hui commercialisées dans le monde entier. Elles peuvent être regroupées selon J. BOCHIROL [2] en trois grandes familles que sont : les technologies de silicium cristallin, les couches minces et les technologies de dernière génération encore appelées technologie de troisième génération.

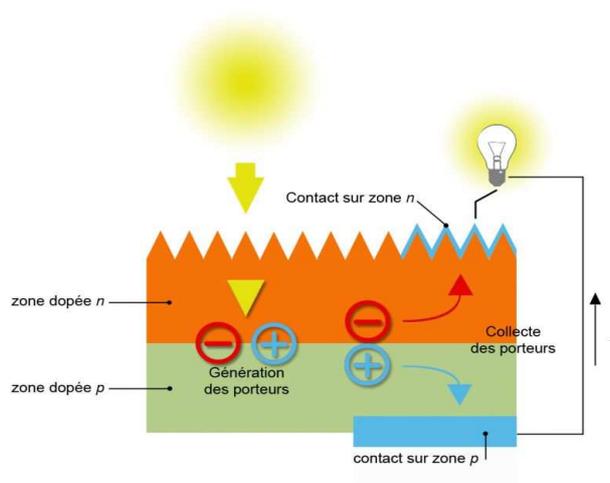


Figure 2: Description de l'effet photovoltaïque[3]

I. TECHNOLOGIES A BASE DE SILICIUM CRISTALLIN

Le silicium cristallin est obtenu par réaction chimique de la silice avec du Carbone. Cette réaction se déroule dans des fours à des températures avoisinant 3000 degrés Celsius. L'équation de la réaction se produisant dans les fours est la suivante :

Le type de module obtenu à partir du silicium cristallin est déterminé d'une part par l'état de cristallisation du silicium et d'autre part par la structure des cellules composant le module. On distingue :

- ❖ Le silicium monocristallin : C'est une technologie de module utilisant du silicium parfaitement cristallisé en un seul bloc. Pour que la cristallisation soit parfaite elle se déroule de manière lente.
- ❖ Le silicium polycristallin : La technologie du polycristallin contrairement à celle du monocristallin est obtenue par une cristallisation moins parfaite du silicium. C'est ce qui donne son aspect hétérogène aux modules polycristallins. La fabrication des modules pour cette technologie est moins énergivore que la précédente.
- ❖ Le HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) : C'est une technologie inspirée par le silicium monocristallin et le silicium amorphe. En effet, le HIT se compose d'une fine couche de silicium monocristalline recouverte de part et d'autre d'une couche ultra fine de silicium amorphe.

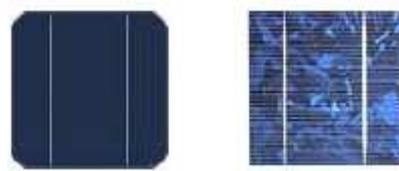


Figure 3: Aspect des cellules monocristalline et polycristalline (de la gauche vers la droite)

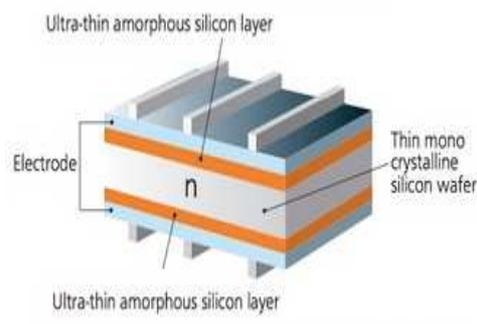


Figure 4: Structure d'une cellule de module HIT

II. COUCHES MINCES

Les couches minces sont des technologies qui se caractérisent par leurs faibles épaisseurs qui sont de l'ordre d'une dizaine de micromètre. Les procédés de fabrication des couches minces utilisent des quantités réduites de matériaux, ce qui contribue fortement à la réduction des prix des modules. Ils en existent plusieurs types, les principales sont :

- ❖ Le silicium amorphe : est une forme non cristallisé du silicium, il est obtenu à la suite de trois étapes que sont : la purification du sable ; la fonte à une température de 250°C ; le dopage des cellules. Dans cette technologie, le silicium intégré dans les modules n'a pas fait l'objet de cristallisation. Cet état confère au silicium une bonne absorption mais tout de même, un mauvais rendement dû à la mauvaise organisation de ses atomes.

- ❖ Le tellure de cadmium (CdTe) : est un métal blanc ayant des propriétés physiques similaire au zinc. Il est utilisé comme matériau semi-conducteur dans la fabrication des modules photovoltaïques. Le cadmium a permis de réduire considérablement les coûts de fabrication des modules, tout en atteignant des rendements de l'ordre de 12%. Malgré ses avantages, la rareté et la toxicité du cadmium constituent des freins au développement de la technologie

- ❖ Le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) : Est une technologie de module ayant une épaisseur d'environ 2 μm . Durant le processus de fabrication, le gallium peut être associé au diséléniure afin d'améliorer le rendement du module photovoltaïque ; on parle alors de CIGS. Les rendements pour cette technologie sont compris entre (10-20%).

III. NOUVELLES TECHNOLOGIES

De nouvelles technologies sont en développement dans les laboratoires. Elles sont pour le moment utilisées dans des secteurs de pointes telle l'alimentation électrique des satellites. Ce sont entre autre :

- ❖ Les cellules multijonctions : elles sont constituées de plusieurs semi-conducteurs et permettent de capter un plus large spectre lumineux. En laboratoire ,les cellules multijonctions atteignent des rendements de 41% [4].

- ❖ Les cellules organiques. Selon [5], les cellules organiques peuvent être vue comme des jonction p-n à dopage nul. Dans ces cellules les semi-conducteurs sont remplacés par des polymères. Cette technologie est pour le moment au stade de recherche et les cellules sont encore très instables.

CONCLUSION

Plusieurs technologies de modules ont été évoquées ci-dessus, mais ce sont principalement les technologies cristallines et couches minces qui sont les plus répandus dans le commerce. D'après [4] près de 80% du marché est acquis au technologies qui utilisent le silicium comme semi-conducteur. Cet état de chose fait que dans les chapitres suivants, il sera mené des études comparatives entre les technologies suivantes : (HIT, silicium monocristallin, silicium polycristallin et amorphes).

CHAPITRE II: METHODES DE CALCUL DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE

INTRODUCTION

L'estimation de la production énergétique est un critère déterminant dans le choix technologique des modules photovoltaïques pour une installation donnée. Cette question a fait l'objet de plusieurs travaux et des méthodes d'estimation ont été élaborées. Ces méthodes sont regroupées en deux grands ensembles [6] :

- ❖ Les méthodes directes : Elles sont généralement basées sur la détermination d'un ratio de performance ou d'un rendement, pour estimer l'énergie produite par un système photovoltaïque. Par ailleurs plusieurs autres méthodes directes utilisent les paramètres que sont, l'ensoleillement dans le plan du module et la température (la température ambiante aussi bien que celle de la jonction des cellules)

- ❖ Les méthodes indirectes : Elles sont subdivisées en deux sous-groupes. La première utilise les caractéristiques I-V des modules pour déterminer la puissance maximale du générateur photovoltaïque. La seconde repose sur la puissance fournie par le constructeur dans les conditions standards. L'énergie est obtenue en faisant une intégration de la puissance du générateur sur la période de fonctionnement du système comme le montre la formule suivante.

$$E = \int P(t)dt = \sum P\Delta t \qquad \text{II-1}$$

I. METHODES DIRECTES D'ESTIMATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE

1) Méthode « Module back temperature »

Développé par le CEA le « **Module Back Temperature** » est une méthode simplifiée qui considère le rendement du module comme étant une fonction linéaire dépendant uniquement de la température à l'arrière du module. L'utilisation de cette méthode requiert une bonne connaissance des données météo et de la relation liant la température du site d'étude à la température du module photovoltaïque.

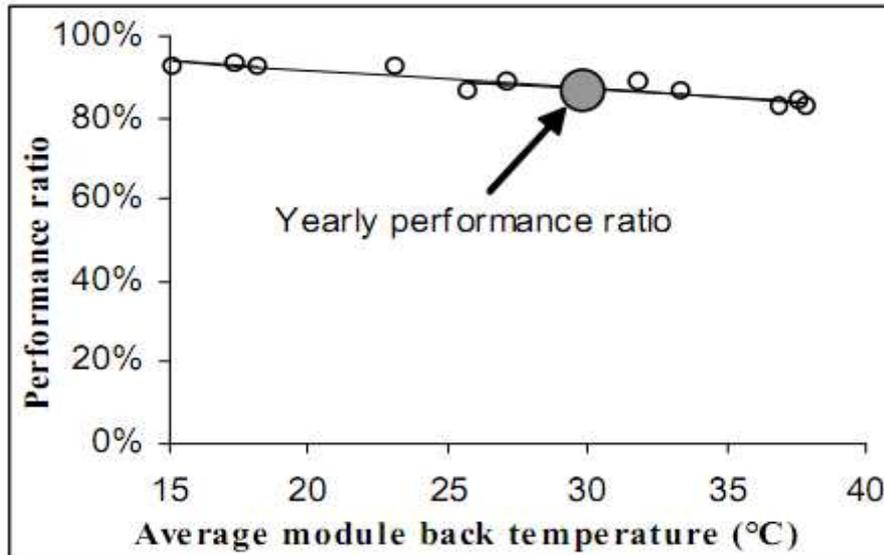


Figure 5: Ratio de performance du module en fonction de la température [7]

2) Méthode SSC « Site Specific Conditions »

La méthode « Site Specific Conditions » est une méthode du CREST (Center for Renewable Energy and Sustainable Technology). Elle prend en compte de manière séparée les causes de pertes d'efficacité du module. Elle est exprimée par la formule mathématique extraite des travaux de [8]:

$$\eta_{SSC} = r_T \times r_G \times r_X \times \eta_{STC} \quad \text{II-2}$$

r_T : est le facteur qui décrit l'influence de la température du module sur le rendement

r_G : décrit l'influence de l'ensoleillement

r_X : permet l'insertion de tout autres facteur additionnels

η_{STC} : rendement du module dans les conditions STC

La méthode SSC a pour avantage de mettre en évidence l'influence des différents facteurs de pertes sur la production. Une fois que le rendement η_{SSC} calculé la production énergétique du générateur photovoltaïque est déterminée comme suit :

$$E = H \times \eta_{STC} \quad \text{II-3}$$

H étant l'irradiation reçue par le module en (kWh)

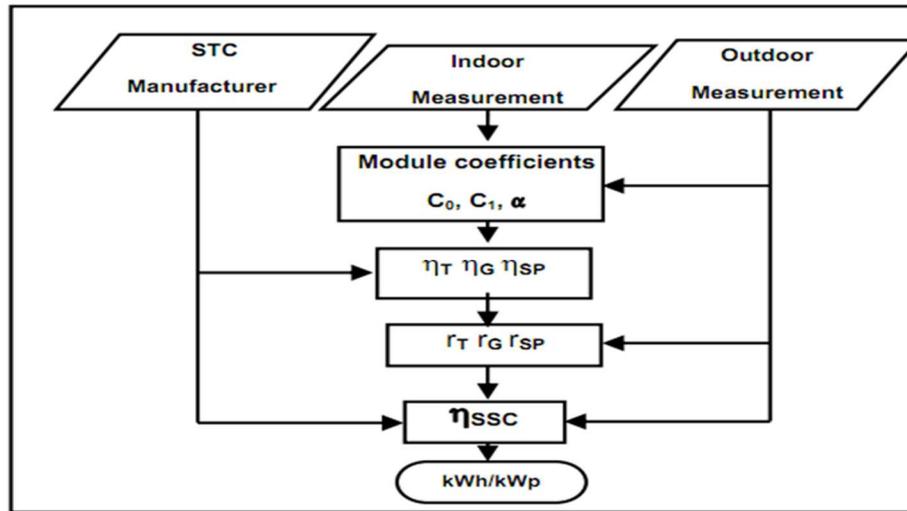


Figure 6: Algorithme de calcul de la méthode 'Site Specific Conditions'

3) Méthode « On-line Yearly Yield Simulator »

La méthode « On-line Yearly Yield Simulator » est une méthode de l'ECN (Energy Research Centre of the Netherlands). Elle utilise une série de transformations afin de passer du rendement du module en condition standard de test, vers un rendement qui prend en compte les conditions réelles d'opération. Pour ce faire plusieurs étapes sont nécessaires

- ❖ Etape 1 : Détermination de la composante directe et diffuse de l'ensoleillement grâce aux formules de Horgill et Hollands [9] .
- ❖ Etape 2 : Evaluation des pertes dues aux rayonnements diffus.
- ❖ Etape 3 : Estimation de la température de jonction des cellules photovoltaïques et de l'ensoleillement dans le plan du module [8].

$$T_{module} = T_{ambient} + G_{module} \times K$$

II-4

K étant un coefficient empirique en W/m^2 , caractérisant le lieu où le module est monté

- ❖ Etape 4 : Calcul du rendement moyen du module grâce à l'ensoleillement dans le plan incliné et la température de jonction des cellules.

4) Méthode « Matrix »

La méthode Matrix a été développée par LEEE-TISO (Laboratory of Energy, Ecology and Economy). Cette méthode est spécifique à la technologie silicium cristalline et prend en compte les paramètres climatiques de la zone d'étude. Le flux d'informations nécessaire aux calculs se présente comme suit :

- ❖ Les données climatiques : Ce sont la température ambiante (T_a) et l'ensoleillement dans le plan du module (G_i).
- ❖ Les caractéristiques du module : Elles sont spécifiques à chaque module ; ce sont les coefficients de fluctuation de l'intensité et de la tension respectivement ($a_{im}; a_{vm}$).

La méthode Matrix nécessite la détermination d'une matrice $P(G_i; T_a)$, qui répertorie pour une période d'expérimentation et une puissance du module données chaque couple d'ensoleillement et de température. Cette matrice qui peut être déterminée en conditions réelles ou en laboratoire doit comporter un grand champ de valeurs pour pouvoir être représentative du fonctionnement du module concerné par l'étude. La matrice une fois déterminée, permet de prédire le comportement du générateur photovoltaïque.

Tableau I:Présentation d'un exemple de matrice P ($G_i ; T_a$) ([10])

G_i/T	25	30	35	40	45	50	55	60
100	7.59	7.41	7.28	7.14	6.97	6.89	6.62	6.47
200	17.04	16.63	16.38	16.03	15.62	15.33	14.87	14.50
300	26.71	26.20	25.82	25.33	24.77	24.07	23.46	22.99
400	36.81	36.00	35.35	34.66	33.82	33.04	32.21	31.40
500	46.93	45.93	45.24	44.31	43.21	42.18	41.14	40.22
600	56.68	56.19	55.00	54.05	52.75	51.56	49.92	49.11
700	66.45	65.59	64.52	63.27	61.79	59.97	58.22	57.38
800	76.95	75.77	74.28	72.66	71.11	69.07	67.30	65.98
900	86.40	85.03	83.32	81.65	80.01	77.56	75.49	73.76
1000	96.15	94.39	92.55	90.41	88.45	86.39	84.12	81.99

Dans le cas où la matrice ne couvrirait pas une condition de fonctionnement, la puissance du module est extrapolée par les formules empiriques suivantes[10]

$$I_m = \left(\frac{G_i}{G_0} \right) \left(I_{m,STC} + a_{im}(T - T_0) \right) \quad \text{II-5}$$

$$V_m = V_{m,STC} + C_1 \ln \left(\frac{G_i}{G_0} \right) + C_2 \left(\ln \left(\frac{G_i}{G_0} \right) \right)^2 + a_{vm}(T - T_0) \quad \text{II-6}$$

G_i : Ensoleillement dans le plan des modules.

G_0 : Ensoleillement dans les conditions standards (STC) ;

$I_{m,STC}$: Intensité maximale dans les conditions standards de test ;

$V_{m,STC}$: Tension maximale dans les conditions standards de test ;

C_1, C_2 : Coefficients propres au module, ils sont déterminés par régression ;

a_{im} : Coefficient de fluctuation de l'intensité lié à la température ;

T_0 : Température de jonction des cellules dans les conditions standards de test ;

a_{vm} : Coefficient de fluctuation de la tension lié à la température.

5) Méthode « MotherPV »

La méthode MotherPV (Meteorological, Optical and Thermal Histories for Energy Rating in Photovoltaic) a été développée à INES (Institut National de l'Énergie Solaire) qui est une composante du CEA (Commissariat à l'énergie Atomique et aux Energies Alternatives). Elle permet de déterminer le ratio global de performance d'un module et/ou d'estimer sa production énergétique selon les conditions d'opérations auxquelles il est soumis. Le ratio de performance global ; par analogie avec le rendement, décrit le comportement du module en condition de fonctionnement.

L'hypothèse principale de MotherPV est basée sur le fait que la caractéristique I-V d'un module dépend de l'ensoleillement incident sur le module et de la température de jonction des cellules photovoltaïques. Aussi, il existe une seule courbe I-V pour un couple intensité de court-circuit et tension en circuit ouvert ($I_{cc}; V_{oc}$).

Deux paramètres sont nécessaires à la détermination du ratio de performance global entrant dans l'application de la méthode. Il s'agit de :

❖ La fonction de distribution de l'ensoleillement

La fonction de distribution est obtenue après une étude statistique sur une année de mesures de la ressource solaire, elle permet d'attribuer à une plage d'ensoleillement, sa contribution dans l'irradiation totale reçue durant la période d'étude (une année). Il est recommandé par les travaux [11] d'utiliser une fonction de distribution pour des intervalles d'ensoleillement d'amplitude 25 W.

Exemple : Pour un intervalle donné]0, a] (d'amplitude a) la distribution est calculée en utilisant les travaux de [11]

$$h_{sun} = \frac{\int s(t)dt}{S_{STC}} \quad \text{II-7}$$

h_{sun} : Nombre d'heures soleil

$s(t)$: Ensoleillement a un instant (t)

S_{STC} : Ensoleillement dans les conditions STC

On n'en déduit que la distribution dans cet intervalle est

$$DF = \frac{h_{sun}}{h_{sun\ total} \times a} \quad \text{II-8}$$

DF : Etant la distribution des ensoleillements contenus dans l'intervalle] 0, a]

❖ Les ratios de performances spécifiques du module

Le ratio de performance spécifique est un coefficient non linéaire qui traduit le comportement du module pour une condition d'opération donnée. Pour sa détermination, deux méthodes sont possibles. La première s'inspire de mesures en laboratoire, dans ce cas de figure l'efficacité du module est déterminé pour différents niveaux d'ensoleillements et corriger par la suite, par un coefficient de température. La deuxième méthode est issue de mesure en conditions réelles d'opération et permet de calculer directement le ratio de performance du module par la formule suivantes [11].

$$R_{sp} = \frac{P(S, T_{module})}{P_{STC} \times S} \quad \text{II-9}$$

S est appelé nombre de soleil et est donnée par

$$S = \frac{I_{cc}}{I_{cc,STC}} \quad \text{II-10}$$

Où I_{cc} est l'intensité de court-circuit et $I_{cc,STC}$ est l'intensité de court-circuit dans les conditions standards.

R_{sp} est le ratio de performance spécifique ;

$P(S, T_{module})$ est la puissance du module pour un nombre de soleil et une température donnée

Le ratio de performance global ici noté R_{glob} est calculé comme suit [11] :



$$R_{glob} = \sum_{S_i} R_{sp}(S_i, T_{module}(S_i)) \times DF(S_i) \times \delta(S_i)$$

II-11

$DF(S_i)$ est la fonction de distribution pour un ensoleillement (S_i).

$\delta(S_i)$ est l'amplitude de l'ensoleillement utilisé pour la représentation de la fonction de distribution.

Tableau II: Comparaison des méthodes de calcul de l'énergie

Méthode/ Développée par	Utilisé par	Paramètres climatiques	Paramètres nécessaires du module	Technologie concernée	Erreur sur l'estimation d'énergie
Matrix/ LEEE-TISO	LEEE-TISO (2009) GTE(2010)	T_a G_i	$I_{m,STC}$ $V_{m,STC}$ a_{im} a_{vm}	Silicium cristallin	$\pm 3 \%$ [10]
MotherPV/ CEA	INES/CEA	T_{module} G_i	I_{cc} V_{oc} I_m V_m	Silicium cristallin et couches minces	$\pm 2,3\%$ [7]
Module Back Temperature/ CEA	CEA	T_{module} G_i	$\eta (G, \theta(G))$	Silicium cristallin et couches minces	$\pm 3,3\%$ [7]
On-Line Yearly Yield Simulator/ ECN	ECN	T_a $G_{horizontale}$	η_{STC}	Silicium cristallin	$\pm 5\%$ [8]
Site specific conditions/ CREST	CREST	T_{module} $G_{horizontale}$ G_i Nature du spectre	r_T r_G r_X η_{STC}	Couche mince	$\pm 8\%$ [12]

II. METHODES INDIRECTES D'ESTIMATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE : LES MODELES ELECTRIQUES

Plusieurs modèles électriques reproduisant le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque existent dans la littérature. Ils sont pour la plus part basés sur les modèles électriques à une et deux diodes.

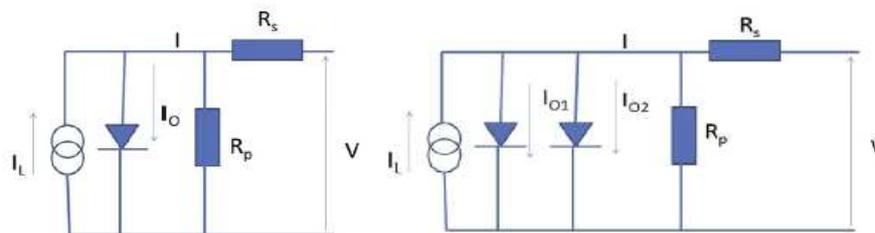


Figure 7: Modèles électriques à une et deux diodes[6]

Les modèles sont constitués de générateur à courant continu ; ils reproduisent la conversion du flux lumineux en énergie électrique. R_p et R_s représentent le courant de fuite et le courant de contact respectivement. La différence entre les deux modèles réside dans le fait que le phénomène de recombinaison des porteurs est pris en compte dans le modèle à deux diodes.

La recombinaison correspond au passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou dans un état intermédiaire dans la bande interdite du semi-conducteur.

III. CHOIX DES METHODES POUR L'ETUDE

Notre étude bibliographique nous a permis de répertorier plusieurs méthodes de modélisation de la production énergétique d'un générateur PV. Après la comparaison de ces méthodes, il apparaît que la méthode MotherPV présente la précision la plus satisfaisante. De plus, la méthode permet d'estimer la production énergétique des technologies aussi bien cristallines que couches minces.

Dans le prochain chapitre nous présentons un code numérique de la méthode MotherPV que nous avons développé à l'aide du logiciel Matlab. La caractérisation des modules photovoltaïques nécessaire à la méthode se fera grâce à un bloc SIMULINK utilisant un modèle électrique à une diode et quatre paramètres, pour reproduire le comportement des modules en milieu naturel [13].

CONCLUSION

A la fin de ce chapitre, il est à retenir que pour l'estimation de la production des modules photovoltaïques deux outils seront utilisés :

- ❖ Un programme écrit dans Matlab qui sera détaillé plus bas
- ❖ Un modèle Simulink précédemment réalisé au sein du LESEE

INTRODUCTION

Dans le but de modéliser la production énergétique de modules photovoltaïques, une méthode a été retenue, il s'agit de la méthode MotherPV développée par INES.

La programmation de la méthode a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB, qui comporte une extension (SIMULINK) servant à la simulation de modèle et système dynamique.

I. ARCHITECTURE DU PROGRAMME MOTHERPV

Le programme « Motherpv » est composé de trois sous-programmes principaux, chacun d'eux concourt à la détermination des paramètres entrant dans l'estimation de la production énergétique

Programme	Apport
distrib1	Détermine la fonction de distribution de l'ensoleillement
traitexcel	Organise les données en sortie du bloc Simulink
extractcourb	Détermine les points caractéristiques d'une courbe I-V, ($V_{oc}; I_{cc}; P_m$)

Le flux d'informations nécessaires à l'entrée du programme « motherpv » est le suivant :

- ✚ Les relevés météo

Les relevés météo nécessaires à l'étude sont :

- L'ensoleillement global sur le plan horizontal
- L'ensoleillement direct et diffus
- La température ambiante
- La date et l'heure

L'ensemble des paramètres météo sont relevés durant une année avec des intervalles de mesures d'une minute.

- ✚ La latitude du lieu d'étude
- ✚ L'angle d'inclinaison du module
- ✚ Les caractéristiques électriques du module ($P_{STC}; I_{cc}$)
- ✚ L'albédo qui est un coefficient caractérisant la réflectivité du lieu où se trouve le module
- ✚ Feuille du banc I-V (sortie du modèle SIMULINK)
- ✚ Fréquence de tracé des courbes I-V (en minutes)

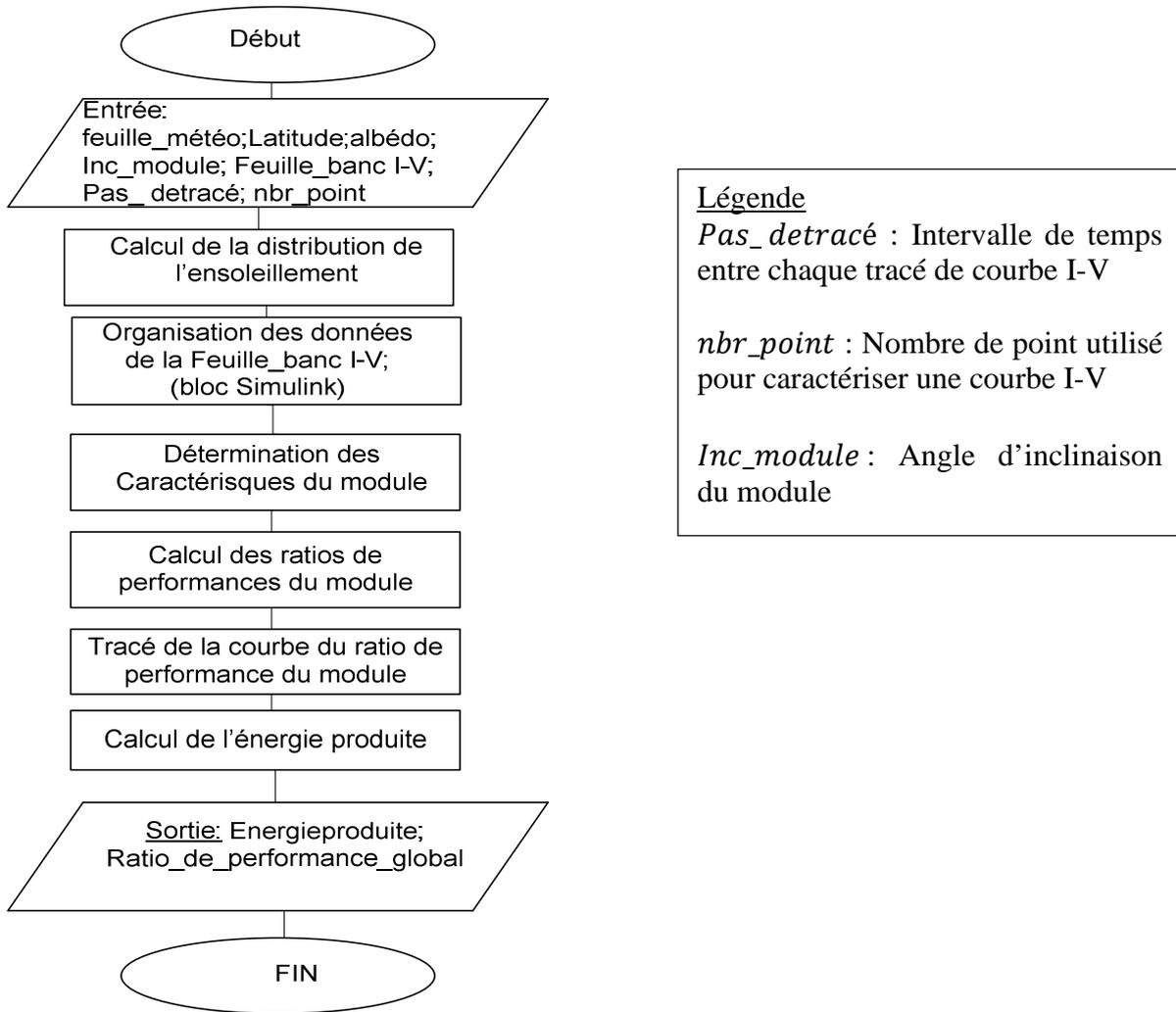


Figure 8: Organigramme Simplifié du programme Motherpv

II. FONCTION DE DISTRIBUTION DE LA RESSOURCE SOLAIRE

La fonction de distribution de l'ensoleillement est déterminée par un sous-programme de « motherpv », nommé «distrib1 ». Il utilise en entrée :

- ✚ Les relevés météo
- ✚ La latitude du lieu
- ✚ L'albédo

L'organigramme simplifié de son fonctionnement est le suivant.

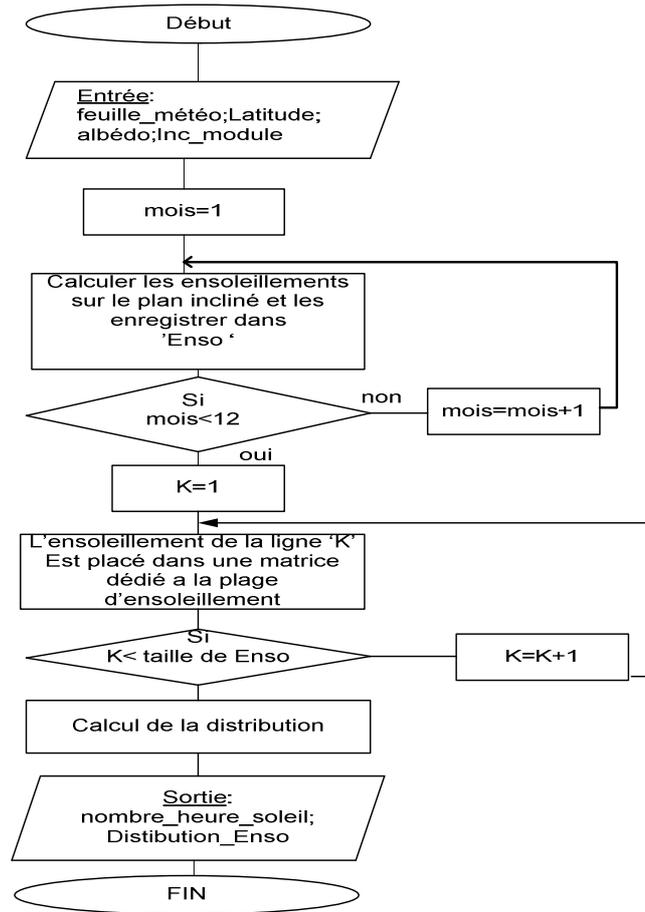


Figure 9: Organigramme simplifié du sous-programme "distrib1"

Le calcul de l'ensoleillement sur le plan incliné se fait en utilisant les formules suivantes tirées de [14] et [15].

$$G_{\text{inc}} = R \times G_{\text{horizontal}} \quad \text{III-1}$$

$$R = \left(1 - \frac{D_H}{G_{\text{horizontal}}}\right) \times R_b + \frac{D_H}{G_{\text{horizontal}}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \xi \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad \text{III-2}$$

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \times \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \times \sin \delta}{\cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta)} \quad \text{III-3}$$

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad \text{III-4}$$

$$\omega = 15 \times (H_{\text{sol}} - 12) \quad \text{III-5}$$

$$H_{sol} = H_{st} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad \text{III-6}$$

$$E = 229,2 \times (0,000075 + 0,001868 \cos(B) - 0,032077 \times \sin(B) - 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \times \sin(2B)) \quad \text{III-7}$$

$$B=(n-1) \frac{360}{365} \quad \text{III-8}$$

Détails des paramètres

G_{inc} : Ensoleillement incident sur le module

R : Rapport du flux global

R_b : Rapport du flux direct

D_H Composante diffuse de l'ensoleillement

β : Angle d'inclinaison des modules

ξ : Coefficient caractérisant la réflectivité du lieu où se trouve le module

φ : Latitude du lieu

δ : Déclinaison du soleil

ω : Angle solaire

n : n^{ième} jour de l'année

H_{Sol} : Heure solaire

H_{St} : Heure standard

L_{lst} : Longitude standard

L_{loc} : Longitude du lieu

E : Equation de l'heure en minute

III. PRESENTATION DU BLOC SIMULINK ET ORGANISATION DES DONNEES DE SORTIE

1) Présentation du Bloc Simulink

Le modèle Simulink présenté à la figure 10 a été développé au LESEE, Il se base sur le modèle électrique à quatre paramètres présenté à la figure 11. Il modélise deux fonctions principales :

- ✚ La reproduction du comportement du module photovoltaïque, soumis à différentes conditions d'opération (température et ensoleillement).

- La reproduction de la caractéristique I-V : pour chaque couple (ensoleillement, température) la courbe I-V du module est reproduite.

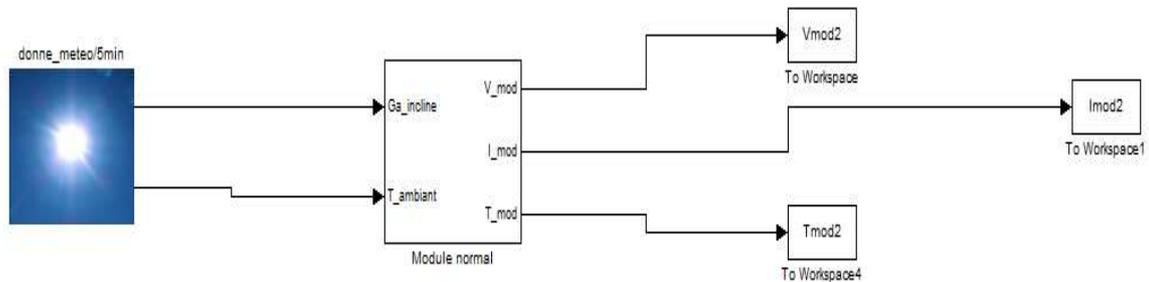


Figure 10: Bloc Simulink

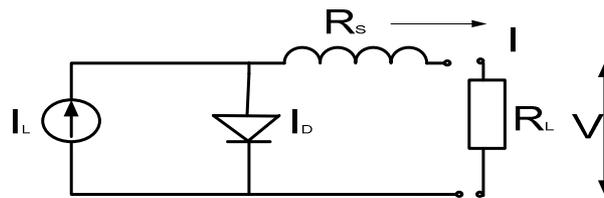


Figure 11: Modèle électrique à quatre paramètres

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tension	Intensité	Ensoleilleme	Température de jonction			
2	-1,06425776	0,00603766	-3,31419418	18,79475			
3	-0,4945036	0,00603763	-3,21257231	18,73275			
4	0,07525055	0,00603761	-3,28452808	18,66475			
5	0,6450047	0,00603758	-3,60101127	18,48775			
6	1,21475885	0,00603755	-3,64994137	18,29975			
7	1,784513	0,00603752	-2,77034279	18,29575			
8	2,35426716	0,00603749	-2,55323615	18,31475			
9	2,92402131	0,00603747	-2,64149399	18,40675			
10	3,49377546	0,00603744	-2,74998002	18,44375			
11	4,06352961	0,00603741	-2,79926842	18,43775			
12	4,63328376	0,00603738	-3,19810949	18,32875			
13	5,20303791	0,00603735	-3,38576777	18,22375			
14	5,77279207	0,00603733	-3,45755889	18,08375			
15	6,34254622	0,0060373	-3,16360873	17,95975			

Figure 12: Format de sortie des données du bloc Simulink

2) Organisation des données de sortie du bloc

L'organisation des données de sortie du bloc Simulink est assurée par le sous-programme « traitexcel » dont l'organigramme est donné ci-dessous.

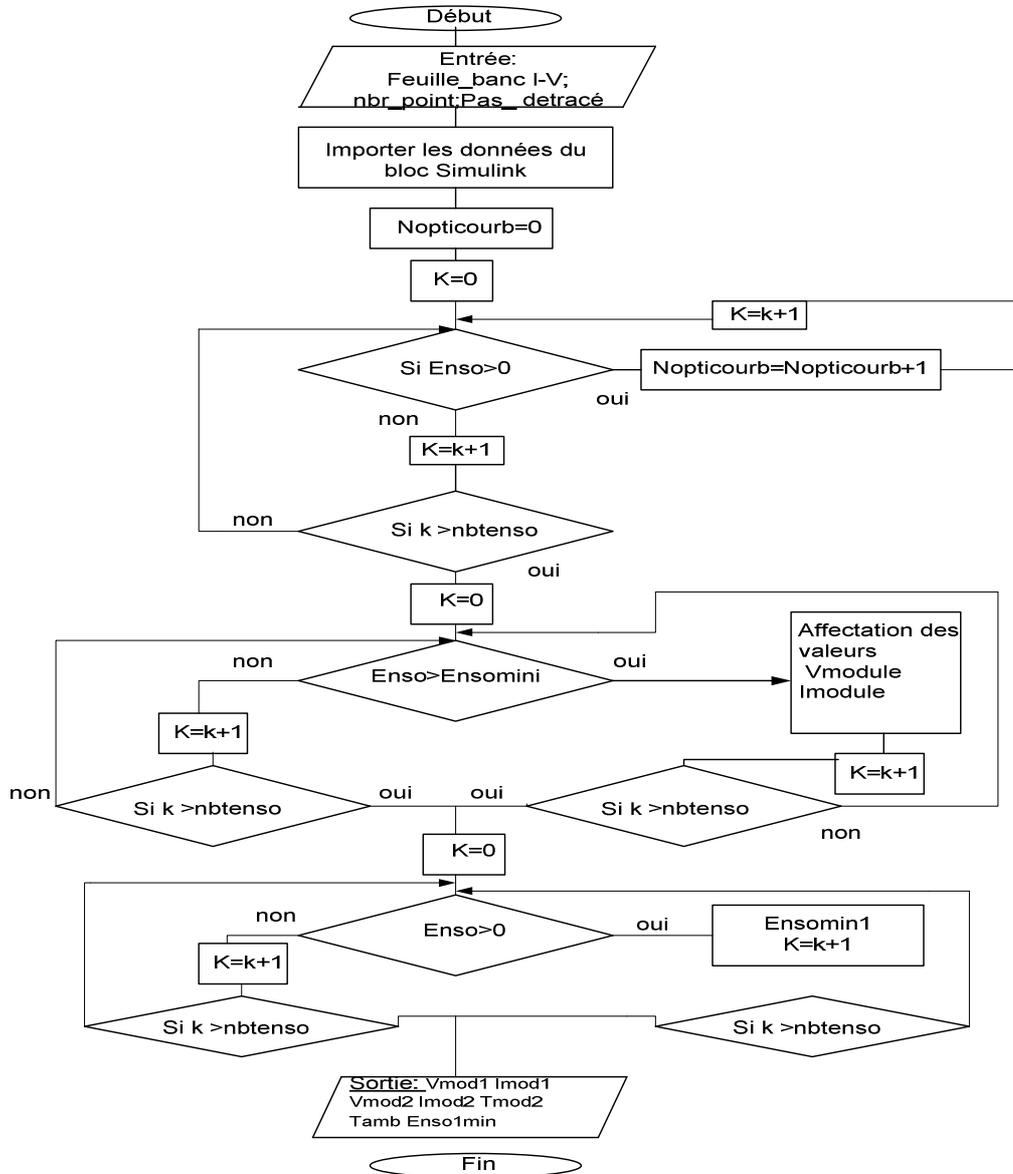


Figure 13: Organigramme "traitexcel"

IV. CARACTERISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

La caractérisation du module fait appel au programme « extractcourb » afin d'extraire les points caractéristiques des courbes I-V. A la sortie du programme « extractcourb » les formules (III-1) à (III-8) sont mises en œuvre pour déterminer les différents ratios du module. L'organigramme du programme « extracourb » est le suivant

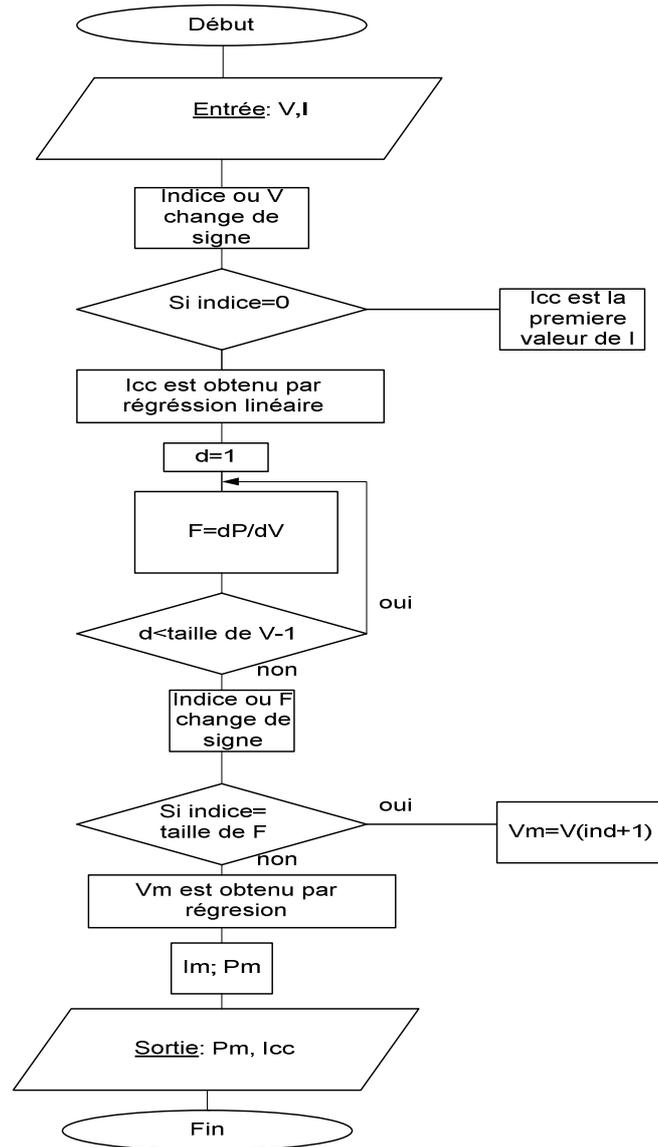


Figure 14: Organigramme du programme extractcourb

CONCLUSION

Le programme « motherpv » utilise trois principaux sous-programmes, tous sont conditionnés par l'exécution du programme principal (motherpv). Les données d'entrée exigées pour le programme « motherpv » sont tout au long du programme utilisées pour lancer l'exécution des sous programmes. Le résultat final est la production énergétique estimée du générateur photovoltaïque sur une période d'une année. Dans le prochain chapitre, une étude comparative de plusieurs technologies est effectuée.

**CHAPITRE IV: *ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DE
DIFFERENTES TECHNOLOGIES PV***

INTRODUCTION

Le silicium cristallin demeure le matériau privilégié dans le photovoltaïque, la filière se compose de quatre principales technologies : le monocristallin (m-Si), le polycristallin (p-Si), l’amorphe (a-Si) et tout récemment le HIT. Les performances de ces différentes technologies sont intimement liées aux conditions ambiantes. Dans cette étude nous utiliserons la méthode MotherPV pour comparer les performances des quatre technologies suscitées, l’étude est réalisée pour le climat correspondant à celui de la périphérie de Ouagadougou. L’objectif principal ici, est de pouvoir déterminer la technologie la mieux adaptée à ce type de climat.

I. SPECIFICATION TECHNIQUE DES MODULES ETUDIES

Les caractéristiques des modules étudiés sont tirées des fiches constructeurs et sont présentées dans le tableau ci-dessous

Tableau III : Caractéristiques des modules photovoltaïque retenus

Désignation	Monocristallin	Polycristallin SW 50 poly RMA	Amorphe NA-F128GK	HIT HIT-N240SE10
Puissance (W)	205	50	128	240
Tension de court-circuit (V)	46.6	22.1	59.8	52.4
Intensité de court-circuit (A)	5.75	2.95	3.45	5.85
Nombre de cellule parallèle	1	1	1	1
Nombre de cellules en série	72	36	180	60

Tableau II : Disponibilité des paramètres d'entrées pour le module photovoltaïque

Désignation	Disponibilité
Puissance (W)	Fiche constructeur
Tension de court-circuit (V)	Fiche constructeur
Intensité de court-circuit (A)	Fiche constructeur
Nombre de cellule parallèle	Fiche constructeur
Nombre de cellules en série	Fiche constructeur
Facteur d'idéalité de la diode	A déterminer

II. DETERMINATION DES FACTEURS D'IDEALITES

Le facteur d'idéalité est un paramètre qui caractérise les recombinaisons des porteurs de charges dans la diode ; lorsque la diode est parfaite il prend la valeur de 1.

Pour chacune des technologies choisies, les courbes caractéristiques fournies par les constructeurs sont numérisées, puis le facteur d'idéalité est déterminé par itération. Pour cela on fait varier le facteur d'idéalité dans nos représentations et retenons la valeur qui offre le plus de précision dans l'estimation de la puissance maximale.

1) Monocristallin

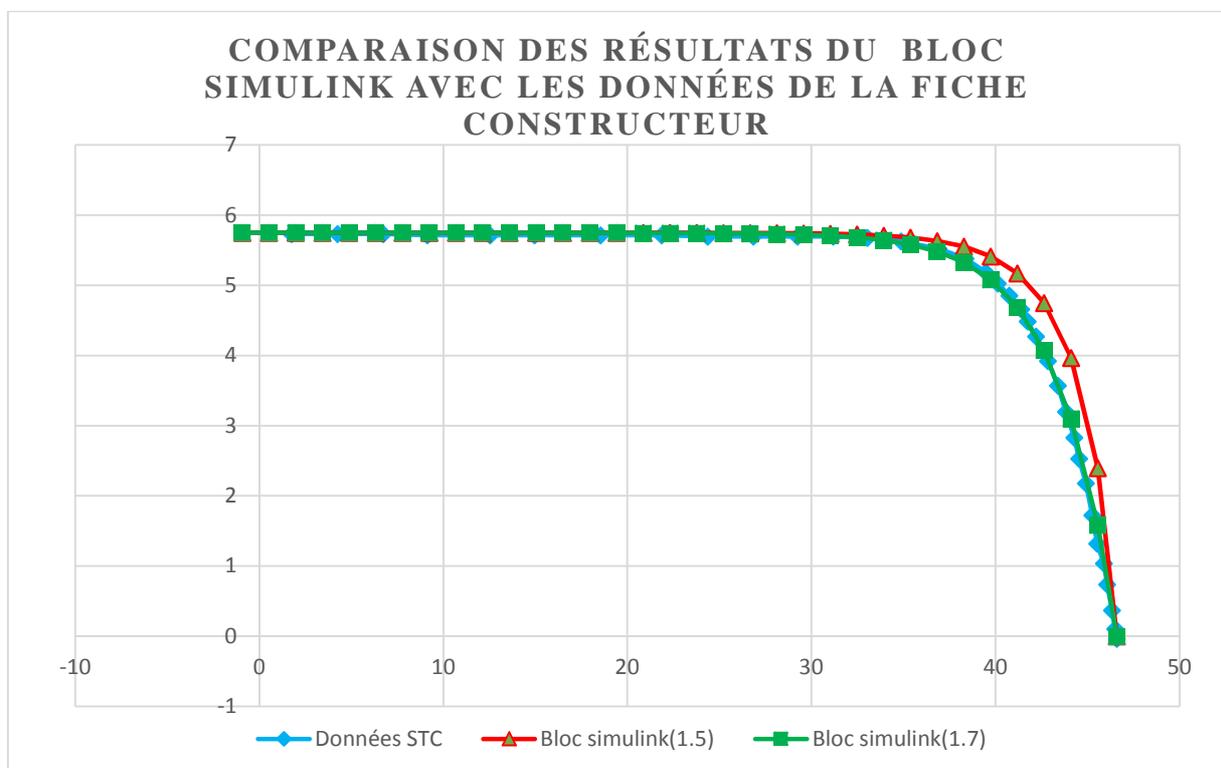


Figure 15: Influence du facteur d'idéalité sur le module monocristallin

2) Polycristallin

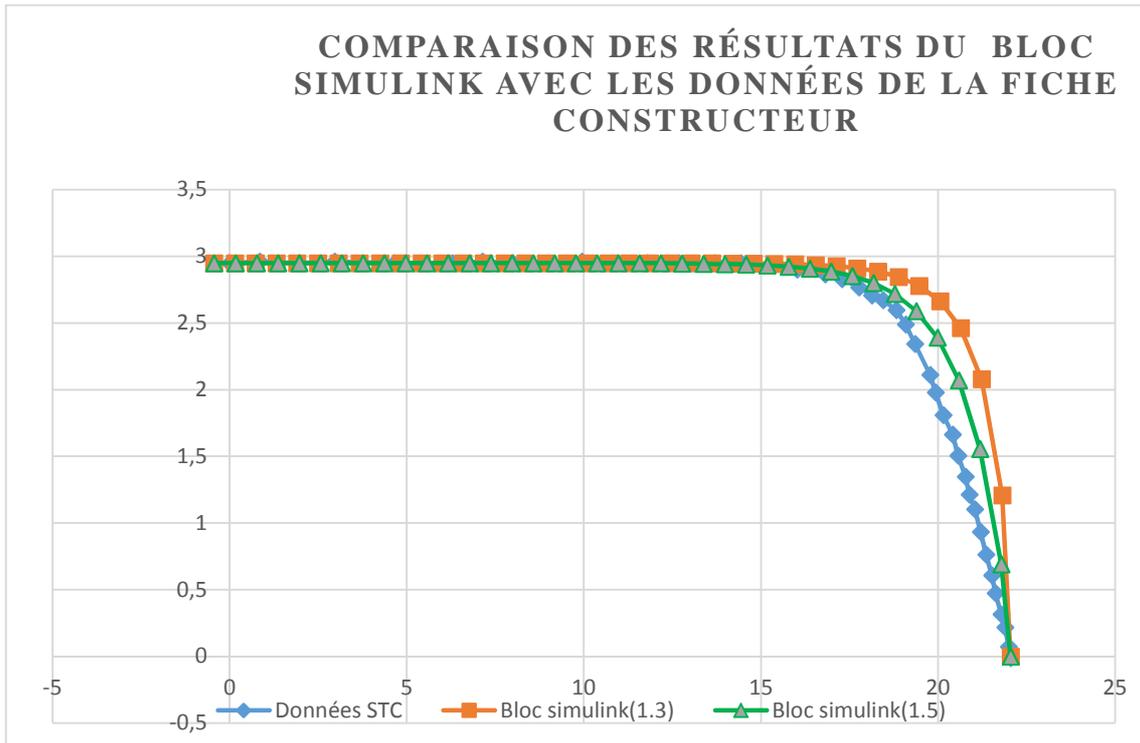


Figure 16 : Influence du facteur d'idéalité sur le module polycristallin

3) AMORPHE

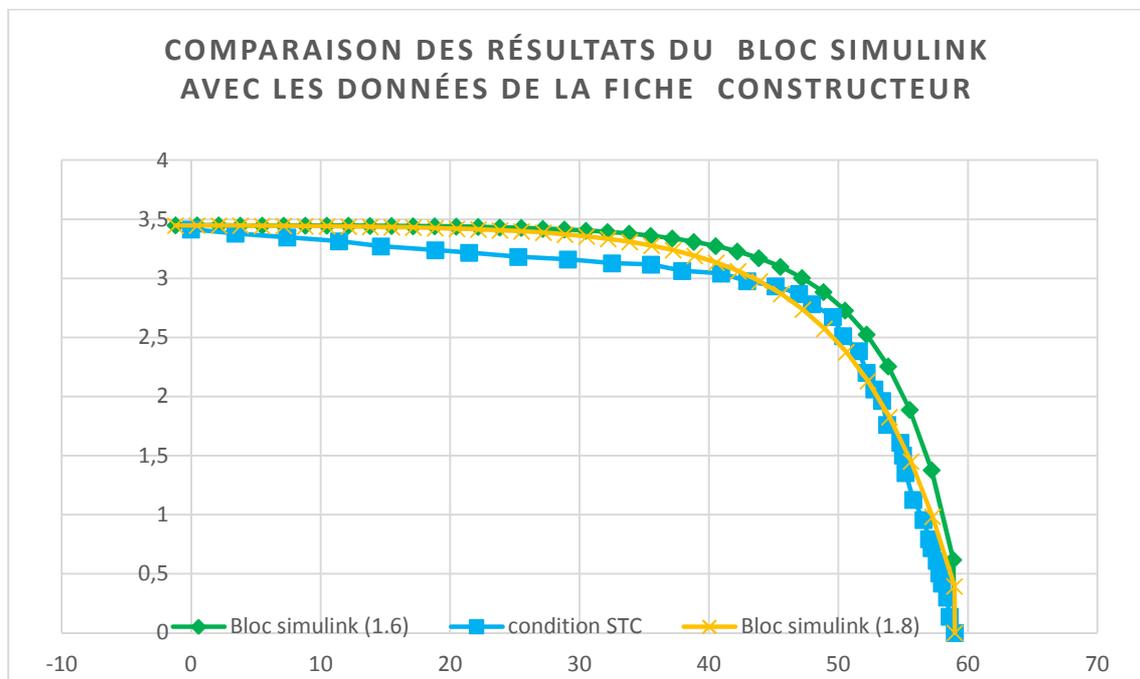


Figure 17: Influence du facteur d'idéalité sur le module silicium Amorphe

4) HIT

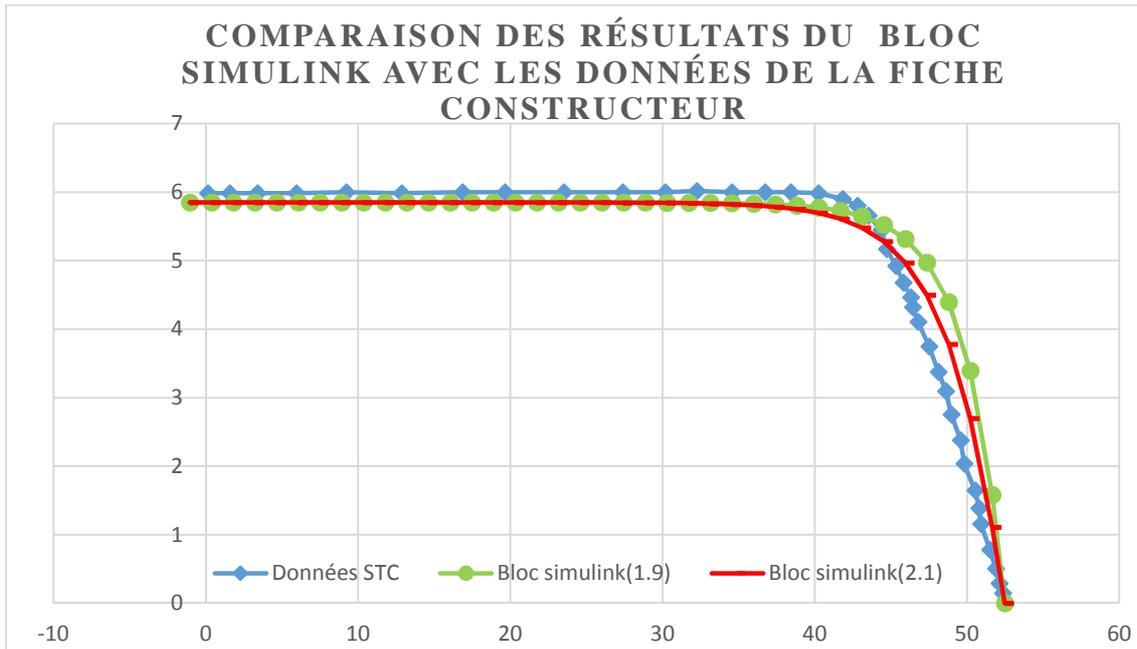


Figure 18: Influence du facteur d'idéalité sur le module HIT

Au terme des itérations les valeurs suivantes ont été retenues

Tableau IV: Valeurs du facteur d'idéalité par technologie

<i>Technologie</i>	<i>Valeur du coefficient d'idéalité</i>
<i>Monocristallin</i>	1,6
<i>Polycristallin</i>	1,5
<i>Amorphe</i>	1,8
<i>HIT</i>	1,9

III. CALCUL DE L'ERREUR ABSOLUE LIEE A L'UTILISATION DU BLOC SIMULINK

Pour cette étape, la puissance maximale du module dans le bloc Simulink est déterminée grâce à un programme écrit dans matlab « extractcourb » et comparé à la valeur fournie par le constructeur.

Notons que la puissance fournie par le bloc est obtenue en simulant le comportement du module dans les conditions STC.

La formule générale utilisée est la suivante :

$$e_r = \frac{|P_{bloc\ simulink} - P_{stc}|}{|P_{stc}|}$$

IV-1

e_r : Erreur relative

$P_{bloc\ simulink}$: Puissance du module estimé par le bloc simulink

P_{stc} : Puissance du module dans les conditions STC

Tableau V: Erreur absolue des valeurs du bloc Simulink

<i>Technologie</i>	<i>Puissance dans le bloc simulink (W)</i>	<i>Puissance fournie par le constructeur (W)</i>	<i>Erreur relative en %</i>
<i>Monocristallin</i>	208.85	205	1,88
<i>Polycristallin</i>	50.94	50	1,88
<i>Amorphe</i>	130.6	128	2,10
<i>HIT</i>	235.54	240	1,85

IV. ESTIMATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE

L'ensemble des paramètres nécessaires à la caractérisation du module dans Simulink ayant été déterminés, le module photovoltaïque est soumis aux conditions météo relevées durant le mois de janvier 2012. Ces données sont celles de la station BF1 (du LESEE) située sur le site de 2ie à Kamboinsé. A l'issue de cette caractérisation l'estimation de production annuelle est faite en utilisant le programme « Motherpv ». Sa syntaxe et son guide d'utilisation sont joints en annexe.

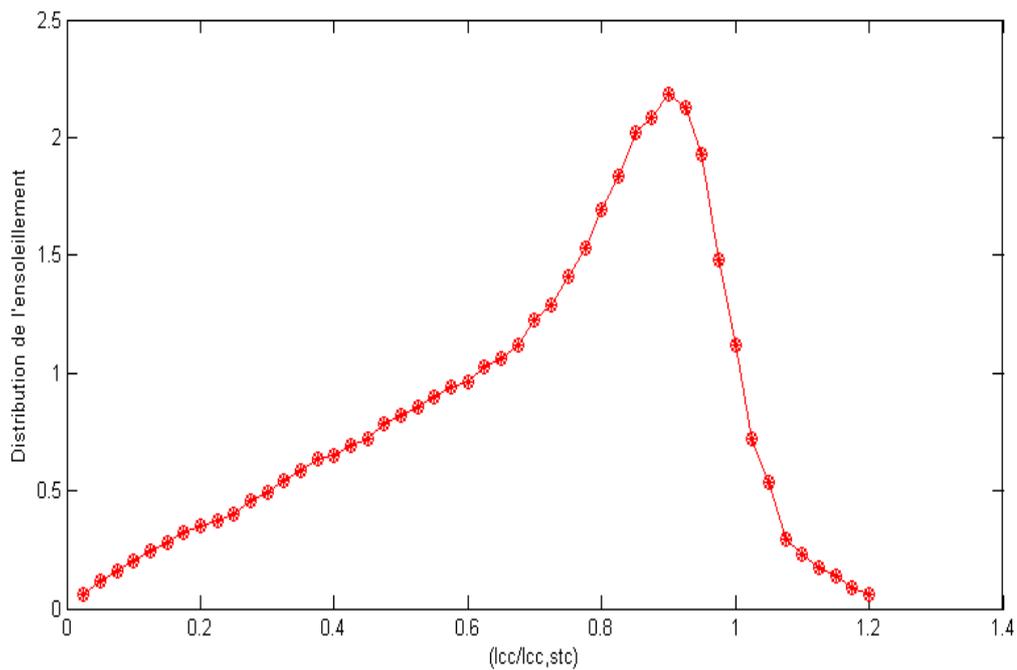


Figure 19: Fonction de distribution de l'ensoleillement

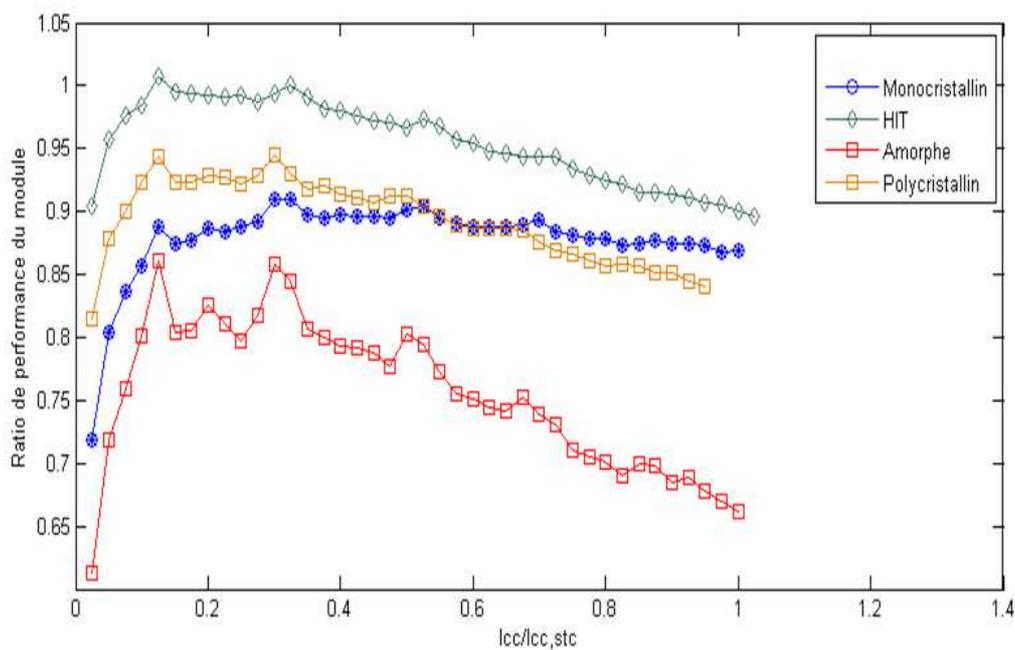


Figure 20: Ratio de performance des différentes technologies étudiées

Tableau VI: Production des différentes technologies

<i>Technologie</i>	<i>Puissance crête installée (Wc)</i>	<i>Estimation de la production annuelle (kWh)</i>	<i>Energie produite par Watt crête installé (kWh/Wc)</i>
<i>Monocristallin</i>	205	366.53	1,78
<i>Polycristallin</i>	50	82.85	1,66
<i>Amorphe</i>	128	189.91	1.48
<i>HIT</i>	240	465.68	1.94

V. ANALYSE ET COMMENTAIRE

1) Facteurs d'idéalités

La procédure itérative utilisée pour la détermination des facteurs d'idéalités, a permis de préciser les facteurs qui représentaient le mieux les différents modules étudiés. Comme le montre le tableau 5 le bloc Simulink reproduit avec une bonne précision le comportement des modules. En effet l'erreur commise n'excède pas 3%, la plus faible précision étant obtenue avec la technologie silicium amorphe.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que le modèle électrique utilisé par le bloc Simulink est plus adapté à la technologie cristalline qu'à celle des couches minces.

2) Ratios de performances

Les simulations sur matlab ont permis de représenter les ratios de performances des différents modules étudiés. De manière générale, nous constatons que les ratios de performance des modules décroissent lorsque le rayonnement solaire excède 0,15 soleil. Cette baisse de performance peut s'expliquer par les pertes liées à la température, qui sont considérées dans la méthode motherpv que nous avons implémenté dans matlab. Nos résultats montrent que la technologie HIT offre les performances les plus élevées pour tous les niveaux d'ensoleillement. Il est aussi à constater que la technologie polycristalline présente un ratio de performance supérieur au monocristallin jusqu'à 0.5 soleil.

La figure 19 montre aussi que la technologie HIT présente de très bons résultats en condition de fort ensoleillement. On peut donc conclure que c'est la technologie qui réagirait le mieux aux hautes températures de jonction des cellules.

3) Productivité calculé comparé à celle relevée

Dans le cadre du projet (SolarCup), le LESEE a installé depuis juin 2012 un champ PV de 20 kWc de différentes technologies. Ce champ est composé de module :

- ❖ HIT
- ❖ Silicium Monocristallins
- ❖ Silicium Polycristallins

De précédents travaux [16] menés au LESEE donnent la productivité réelle des différentes technologies comme suit :

Tableau VII: Productivité relevée

	Energie annuelle	Puissance crête Wc	kWh/Wc
HIT	9883,05	5640	1,75
Monocristallin	9488,32	5760	1,65
Polycristallin	9124,62	5520	1,65

Une comparaison entre la productivité estimée par la méthode motherpv et celle relevée par les onduleurs montre que la meilleur précision est obtenue avec la technologie du silicium polycrsitallin. Le tableau ci-dessous indique l'écart entre les valeurs relevées et celles estimées (en pourcentage de la valeur relevée).

Tableau VIII: Ecart des estimations de motherpy

Technologie	Productivité relevée	Productivité estimée	Ecart
HIT	1,75	1,94	10,86%
Monocristallin	1,65	1,78	7,88%
Polycristallin	1,65	1,66	0,61%

CONCLUSION

A la fin de ce chapitre, il se dégage que la meilleur estimation de la production énergétique est réalisée sur la technologie du silicium polycristallin (écart inférieur à 1%)

De plus les simulations réalisées sur Matlab ont permis d'évaluer la production énergétique des modules photovoltaïques. Comme on peut le voir sur le tableau 6, le HIT est la technologie présentant la plus grande production énergétique tant la simulation que pour la production réelle.



CONCLUSION GENERALES ET PERSPECTIVES

Notre stage de fin d'étude s'est déroulé au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie et a porté sur le thème : « *Modélisation de la production énergétique de modules photovoltaïques de différentes technologies.* ».

Après avoir fait l'étude bibliographique, nous avons développé un code sur MATLAB portant sur la méthode MotherPV dans le but d'estimer la production énergétique des modules de différentes technologies (HIT, silicium monocristallin, silicium polycristallin, silicium amorphe).

Nos simulations ont montrées que la technologie HIT était la plus performante dans des conditions climatiques similaires à celles de la périphérie de Ouagadougou. Ce résultat est conforme aux résultats que nous avons relevés sur les onduleurs du champ PV installés sur le toit du laboratoire. Par ailleurs il faut relever que nos calculs surestiment la production. Ceci peut s'expliquer par la non prise en compte des pertes liées à certains paramètres climatiques d'une part et d'autre part par celles liées aux connexions et câblages. En effet nos simulations ont été réalisées que pour un seul module (pour chaque technologie).

Pour affiner les travaux que nous avons entrepris, il faudra prendre en compte ces différentes pertes. Le vieillissement des modules pourrait aussi être implémenté dans le code à l'aide d'un facteur de vieillissement.

Bibliographie

Ouvrages et articles

- [1] J.-P. Favennec, C. Adedjoumon, B. Duhamel, J. Giri, H. Gilles, and A. Tronche, “L’ENERGIE EN AFRIQUE A L’HORIZON,” p. 84, 2009.
- [2] J. BOCHIROU, “Le photovoltaïque intégré au bâtiment ENSAG,” p. 104, 2012.
- [3] “Energie solaire photovoltaïque:,” *connaissance des énergies*. [Online]. Available: www.connaissancedesenergies.org.
- [4] Syndicat des énergies renouvelables, “Annuaire de la recherche et de l’industrie photovoltaïques françaises,” p. 303, 2013.
- [5] R. De Bettignies, “Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués,” p. 128, 2003.
- [6] C. Rus-Casas, J. . Aguilar, P. Rodrigo, F. Almonacid, and P. . Pérez-Higueras, “Energy conversion and management,” no. Energy Conversion and Management 78 (2014) 527–536, p. 10, 2013.
- [7] A. Guérin de Montgareuil, “Statistical approach for the guarantee of photovoltaic energy output,” *INES*, p. 72, 2008.
- [8] S.R Williams, T.R Betts, R Gottschalg, D.G Infield, N.J.C.M Van der Borg, AR Burgers, H de Moor, G Warta, G Friesen, D. Chianese, A. Guerein de Montgareuil, T. Zdanowicz, D. Stellbogen, W. Hermann, S. Pietruzko, J. Krustok, and E. Dunlop, “Evaluating the state of the art of photovoltaic performance modelling in europe,” p. 5, 2005.
- [9] L. . Wong and W. . Chow, “Solar radiation model,” vol. Applied Energy 69 (2001) 191–224, p. 34, 2001.
- [10] R. . Kenny, G. Friesen, D. Chianese, A. Bernasconi, and E. Dunlop, “Energy rating of PV modules: comparison of methods and approach,” in *proceeding of: Photovoltaic Energy Conversion, 2003*, Ispra, Italy, 2003, vol. 2, p. 4.
- [11] A. Guérin de Montgareuil, “Description of motherpv, the new method developed at ines / cea for the assessment of the energy production of photovoltaic modules,” p. 5, 2007.
- [12] S. . Williams, T. . Betts, R. Gottschalg, and D. . Infield, “Site-Specific Condition (SSC): A Model for Real PV Modules Performance,” p. 8, 2013.
- [13] A. TOSSA, “Developpement sous SIMULINK/MATLAB d’un outil de simulation des systèmes photovoltaïques autonomes: Application a l’optimisation d’une centrale de charge de batterie,” p. 172, 2010.
- [14] Belhadj Mohammed, “Modélisation d’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome,” p. 95, 2007.
- [15] Dr. Yao AZOUMAH, “Le solaire thermique,” p. 69, 2009.
- [16] A. S. BOLY, “Analyse de la production d’un champ PV de petite taille en région sahélienne,” p. 23, 2013.



VI. ANNEXES

Sommaire des annexes

<i>Annexe I : « Programme Motherpv »</i>	35
<i>Annexe II : « Programme distrib1 »</i>	37
<i>Annexe III: Programme « Traitexcel »</i>	40
<i>Annexe IV : Programme « Extractcourb »</i>	42
<i>Annexe V : Programme « supnegval »</i>	44
<i>Annexe VI: Programme « classjour»</i>	46
<i>Annexe VII : Programme « poseneg»</i>	47
<i>Annexe VIII : « Guide d'utilisation de Motherpv»</i>	48

Annexe I : « Programme Motherpv »

```

function [Energie,Rp,voc] =
motherpvVop(feuilmeto,latdeg,latmin,incmod,albdo,Feuil_ban_IV,nptsfixer,Istc,Pstc,pasenso)
[Vmod,Imod,Enso_inc]=traitexclf(Feuil_ban_IV,nptsfixer,pasenso);%Introduction des valeurs
pour caractérisation du module
ntotalpts= size(Vmod,1) ;%nombre de points introduit dans le programme pour la caractérisation du
module
nseri= ntotalpts/nptsfixer;% nombre de courbes I-V correspondant au nombre de points introduit
Intencou=ones(nseri,1);%Matrice colonne utilisée pour pour stocké Icc du module
Puismax=ones(nseri,1);%Matrice colonne utilisée pour pour stocké Pm du module
nbre_soleil=ones(nseri,1);%Ressource solaire mesuré par le module
rend_reel=ones(nseri,1);%Rendement réel d'opération du module
rend_reelmoy=ones(48,1);%Rendement réel moyen
%% %% Fonction de Distribution %% %%
[DF,hsun,~]= distrib1(feuilmeto ,latdeg,latmin,incmod,albdo);
%% %% DEBUT DE LA CARACTERISATION %% %%
For k=1:nseri
nbptextrait=(k-1)*nptsfixer+1:k*nptsfixer;
[Intencou(k,1),Puismax(k,1),voc(k,1)]=extractcourb((Vmod(nbptextrait)),Imod(nbptextrait));%calc
ul des paramètres Icc,Pm pour le module
nbre_soleil(k,1)=Intencou(k,1)/Istc;% nombre de soleil
rend_reel(k,1)=(Puismax(k,1)/Enso_inc(k,1))/(Pstc/1000);% rendement réel du module
end
for k =1:48
(eval(['Val_parenso' num2str(k) '(1,1)=0']));%les première valeurs des matrices que nous utilisons
pour stocker les rendements calculé pour un niveau d'ensoleillement
end
%On enregistre tous les rendements pour un niveau d'ensoleillement dans une même matrice,pour
ce faire on implémente une variable
for k=1:nseri
nummat=floor(nbre_soleil(k,1)/0.025)+1;% permet de connaitre dans quelle matrice enregistrer le
rendement réel

```



```
tail=size(((eval(['Val_parenso' num2str(nummat)]))),1);% on détermine la taille de la matrice pour
enregistre la valeur du rendement dans la ligne 'taille+1'
((eval(['Val_parenso' num2str(nummat) '(tail+1,1)=rend_reel(k,1)']));%enregistrement de la valeur
du rendement dans la ligne 'taille+1'
end
%on calcul un rendement moyen pour chaque niveau d'ensoleillement
for k=1:48;
tail=size(((eval(['Val_parenso' num2str(k)]))),1);% taille de la matrice contenant tous les redements
calculé pour une plage d'ensoleillement
rend_reelmoy(k,1)=mean(((eval(['Val_parenso' num2str(k) '(2:tail,1)']))));% calcule du rendement
moyen par plage d'ensoleillement en éliminant la première valeur de la matrice qui est zéro
end
%rend_reelmoy(isnan(rend_reelmoy))=0;%Elimination des non valeurs
figure;
Xi=0.025:0.025:1.2;
yi=(rend_reelmoy(1:48,1));
xx=0.025:0.025:max(nbre_soleil)+0.025;
yy=spline(Xi,yi,xx);
plot(Xi,yi,'r*',xx,yy);
ratio=ones(48,1);
for k=1:48
ratio(k,1)=DF(1,k)*rend_reelmoy(k,1)*0.025;% calcule des ratios partielle de performance pour
tous les niveaux d'ensoleillement
end
ratio(isnan(ratio))=0;%Elimination des non valeurs
Rp=sum(ratio,1);% Ratio de performance total
Energie=Pstc*hsun*Rp/1000;% Estimation de l'énergie produite en une année en Kwh
end
```

Annexe II : « Programme distrib1 »

```

function [DF,hsun,n]= distrib1(Feuil_meteo ,latdeg,latmin,incmod,albdo)% DF est la fonction de
distribution
%latdeg représente la litude en degré du lieu, latmin représente le reste
%en minute.incli_mod est l'angle d'inclinaison du module et albdo est
%l'albédo(représente la réflectivité du lieu)
a=0;debu=1;% sert a compter le nombre de jour
indice1=1;% sert a parcourir la matrice d'ensoleillement
h= waitbar (0, 'calcul de la distribution étape 1/4');
for num_moi=1:12 %num_moi est le numéro du moi, 1 pour janvier et ainsi de
    %suite
    debu=debu+a;
[A,B]=supnegval1(Feuil_meteo,num_moi);% supprime les valeurs négatives de notre
Feuil_meteole météo
[A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A11,A12,A13,A14,A15,A16,A17,A18,A19,A20,A21,A22,A
23,A24,A25,A26,A27,A28,A29,A30,A31,a]=clasjour1(A,B);% La fonction permet de classer les
valeurs du moi par jour(matrices journalières)
%%%%%%CONVERSION DE L'ENSOLEILLEMENT SUR LE PLAN INCLINE%%%%%%%%
lat=latdeg*pi/180+latmin*pi/(180*60);% conversion en radians de la latitude
incmod=incmod*pi/180;% conversion en radians de inclinaison du module
n1=0;
for n=debu:debu+a-1 % plage des numéros attribués aux jours du moi
    n1=n1+1;% compt les jours du moi
B=(n-1)*360/365;
x=(pi*B)/180;% conversion en radians
E=(229.2*(0.000075+0.001868*cos(x)-0.032077*sin(x)-0.014615*cos(2*x)-
0.04089*sin(2*x)))/60;% Equation de l'heure (en heure)
daymat=(eval(['A' num2str(n1)]));% implementation de variable (on parcour les matrices
journalières)

D1=datevec(daymat(:,1));% convertir la colonne des heure en matrice horaire
for k=1:size(daymat(:,1),1)
Hst=D1(k,4)+D1(k,5)/60;% Hst est l'heure standard

```



```
Hsol=Hst+(1+7/60)/60+E;% Hsol est l'heure solaire
w=15*(Hsol-12);% Angle horaire
w=w*pi/180;% conversion en radians
delta=23.45*sin((360*(284+n)/365)*pi/180);% Déclinaison du soleil, ici on utilise n au lieu de n1
car c'est le numero du jour qu'on veut
delta=delta*pi/180;% conversion en radians
Rb=(cos(lat-incmod)*cos(delta)*cos(w)+sin(lat-
incmod)*sin(delta))/(cos(lat)*cos(delta)*cos(w)+sin(lat)*sin(delta));% Rapport du flux direct
R=(1-(daymat(k,3)/daymat(k,2)))*Rb+(daymat(k,3)/daymat(k,2))*((1+cos(incmod))/2)+albdo*((1-
cos(incmod))/2);% Rapport du flux global
Enso(indice1,1)=R*daymat(k,2)/1000;% Matrice de l'ensoleillement par jour
if Enso(indice1,1)<0
    Enso(indice1,1)=0;
end
indice1=size(Enso,1)+1;
end
end
waitbar (num_moi/12,h);
%XLSWRITE(Feuil_meteo,Enso,'feuille1','G2');
end
close(h);
Enso(isnan(Enso))=0;
som_soleilan=sum(Enso,1);
troi_at= waitbar (0, 'calcul de la distribution étape 2/4');
for k =1:48;
(eval(['MAT' num2str(k) '(1,1)=0']));% les premières valeurs des matrices que nous utilisons pour
stocker les ensoleillement par plage d'amplitude 0.025
waitbar( k/48,troi_at);
end
close(troi_at);
catr_at= waitbar (0, 'calcul de la distribution étape 3/4');
for k=1:size(Enso,1);
```



```
nummat=floor(Enso(k,1)/0.025)+1;% Détermination de la matrice a laquelle appartient la valeur  
d'ensoleillement  
tail=size(((eval(['MAT' num2str(nummat)]))),1);% Taille de la matrice d'ensoleillement pour  
pouvoir spécifié la ligne suivantes  
((eval(['MAT' num2str(nummat) '(tail+1,1)=Enso(k,1)'])));% Enregistrement de la valeur a la ligne  
précédamment déterminée  
waitbar( k/size(Enso,1),catr_at);  
end  
close(catr_at);  
cinq_at= waitbar (0, 'calcul de la distribution étape 4/4');  
for k=1:48;  
DF(k)=sum(((eval(['MAT' num2str(k)]))),1)/( som_soleilan*0.025);% Fonction de distribution  
waitbar ( k/48,cinq_at);  
end  
close(cinq_at);  
hsun=som_soleilan*1/60;  
figure;  
Xi=0.025:0.025:1.2;  
yi=DF(1:48);  
xx=0.025:0.025:1.2;  
yy=spline(Xi,yi,xx);  
plot(Xi,yi,'r*',xx,yy)  
end
```

Annexe III: Programme « Traitexcel »

```

function [Vmod,Imod,Enso_inc]=traitexcelf(Feuilldonne,nptsfixer,pasenso)
Ensomini=0; % Ensoleillement mini raisonnable
A=xlsread(Feuilldonne);

nbserie= size(A,1)/nptsfixer; % nombre de courbe mesuré
nbtotenso=nbserie*pasenso; % nbre total de valeur d'ensoleillement mesuré
% Détermination du nombre optimal de courbe à traiter à partir des
% valeurs plausibles de l'ensoleillement
nopticourb=0;
for k=1:pasenso:nbtotenso
    if(A(k,3)>Ensomini)
        nopticourb=nopticourb+1;
    end
end

% Préallocation de mémoire

C=ones(nopticourb,1);
B=ones(nopticourb*nptsfixer,2);

compt=0;
for k=1:pasenso:nbtotenso
    numserie=((k-1)/pasenso)+1; % numero de la courbe à extraire
    if A(k,3)>Ensomini
        compt=compt+1;
        C(compt,1)=A(k,3);

        range_init= (numserie-1)*nptsfixer+1:numserie*nptsfixer; %
        range_final=(compt-1)*nptsfixer+1:compt*nptsfixer;
        for indcol=1:2
            B(range_final,indcol)=A(range_init,indcol);
        end
    end

```



end

end

```
Vmod=B(:,1);Imod=B(:,2); Enso_inc=C(:,1);%indexation de la valeur de l'intensité du module2
```

```
dans le fichier excel
```

end

Annexe IV : Programme « Extractcourb »

```

function [Icc,Pm,voc] = extractcourb( v,I )
%a pour but de donner les points caractéristiques de la courbe I-V
% calcul de voc
i1= posneg(I);
if i1== size(I,1)
    voc=v(i1);
else
    voc=-(I(i1)-((I(i1)-I(i1+1))/(v(i1)-v(i1+1))))*v(i1)/((I(i1)-I(i1+1))/(v(i1)-v(i1+1)));
end

%Détermination de Icc
j1= posneg(-v);%n du fait que v débute par des valeurs négative
if j1==0
    Icc=I(1);
else
    Icc=I(j1)-((I(j1)-I(j1+1))/(v(j1)-v(j1+1))))*v(j1);
end

%Détermination de Pm
P=ones(size(v,1),1);
for d=1:size(v,1)
    P(d,1)= v(d)*I(d);
end
F=ones(size(v,1)-1,1);
for i=1:size(v,1)-1
    for j=1
        F(i,j)=(P(i+1)-P(i))/(v(i+1)-v(i));
    end
end
i2= posneg(F);
if i2==size(F,1)
    vm=(v(i2+1));
else

```



```
vm=-(F(i2)-v(i2)*((F(i2)-F(i2+1))/(v(i2)-v(i2+1))))/((F(i2)-F(i2+1))/(v(i2)-v(i2+1)));  
end  
Z= v-vm;  
i3=posneg(-Z);% étant donnée que v est a l'origine négativ il fo utiliser -z  
if i3==size(Z,1)  
    Im=I(i3+1);  
else  
Im=-(Z(i3)-I(i3)*((Z(i3)-Z(i3+1))/(I(i3)-I(i3+1))))/((Z(i3)-Z(i3+1))/(I(i3)-I(i3+1)));  
end  
Pm= Im*vm;  
end
```

Annexe V : Programme « supnegval »

```
function [A,B] = supnegval1(feuil,n)%Programme pour supprimer les lignes ou l'ensoleillement
globale est négatif
if n==1
    sheetName='feuille1';
else if n==2
    sheetName='feuille2';
end
end
if n==3
    sheetName='feuille3';
else if n==4
    sheetName='feuille4';
end
end
if n==5
    sheetName='feuille5';
else if n==6
    sheetName='feuille6';
end
end
if n==7
    sheetName='feuille7';
else if n==8
    sheetName='feuille8';
end
end
if n==9
    sheetName='feuille9';
else if n==10
    sheetName='feuille10';
end
end
```



```
if n==11
    sheetName='feuille11';
else if n==12
    sheetName='feuille12';
end
end
[A,B]=xlsread(feuil,sheetName);
B=B(2:size(B(:,1)),1);
%on parcourt toutes les lignes de A depuis le "bas"
n=size(A,1);
for i=n:-1:1
    if any(A(i,2)<0) %il y a au moins une valeur négative dans la ligne i
        %=> on la supprime
        A(i,:)=[];
        B(i,:)=[];
    end
end
end
end
```

Annexe VI: Programme « classjour »

```

function
[A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A11,A12,A13,A14,A15,A16,A17,A18,A19,A20,A21,A22,A
23,A24,A25,A26,A27,A28,A29,A30,A31,a]=clasjour1(A,B)% fonction qui compte le nombre de
jours du mois
a=1;% initialisation
p=1;
d=1;
    b=datevec(B(1:size(B,1),1));%mise sous forme de vecteur de la date
for k=1:size(b,1)-1% parcour de toute la matrice
    if b(k,2)==b(k+1,2)% Comparaison
        else
            eval(['A' num2str(p) ' = [A(d:k,1:4)]');
            d=k+1;
            a=a+1;% implémentation
            p=p+1;
        end
    end
eval(['A' num2str(p) ' = [A(d:size(b,1),1:4)]');
if 31-p==0
else
for t=p+1:31
    eval(['A' num2str(t) ' = [0]');
end
end
end
end

```



Annexe VII : Programme « posneg »

```
function [ ndx] = posneg(v)
%pour trouver les points remarquable de la courbe I-V
% Detailed explanation goes here
ndx=1 ;
for k=1:size(v)
    if v(k)>0
        ndx=ndx+1;
    end
end
    ndx=ndx-1;
end
```

Annexe VIII : « Guide d'utilisation de Motherpv »

Guide d'utilisation Motherpv

1. Copier le dossier 'motherpv_progr' dans C:\Documents\MATLAB
2. Accéder au dossier par le logiciel MATLAB
3. Regrouper toutes les données météo mensuelles dans un classeur Excel
4. Renommer les feuilles météo du nom 'feuille ' suivit du numéro du mois
Exemple : pour janvier 'feuille1'
5. Disposer des données de simulation du bloc Simulink dans une feuille Excel
6. Lancer le programme motherpv

Syntaxe

[Energie]=motherpvVf(feuilmeto,latdeg,latmin,incmod,albdo,Feuil_ban_IV,nptsfixer,Istc,Pstc,pasenso)

- Les données d'entrées :

Feuilmeto : Nom de la feuille météo suivi de l'extension .xlsx, le tout entre guillemets

Latdeg & latmin : permettent d'entrer la latitude du lieu.

Exemple : pour ouagadougou 12°36' d'où Latdeg =12 et latmin=36

Incmod : Inclinaison en degré des modules

Albdo : Coefficient caractérisant la réflectivité du lieu où est placé le module

Feuil_ban_IV : Illustrer par la figure ci-dessus

nptsfixer: c'est le nombre de point fixer par courbe I-V dans le bloc simulink

Istc : Intensité de court-circuit du module

Pstc : Puissance dans les conditions STC du module

Pasenso : Intervalle de temps en minutes avant le tracé de chaque courbes I-V

exemple de simulation

[Energie]=motherpvVf('feuilmeto.xlsx',12,36,15,0.3,'Feuil_ban_ HIT.xlsx',100,5.85,240,5)

A	B	C	D	
Vmodule	Imodule	Ensoleillement	Température	
-0,44447987	-0,010274	-3,314194183	18,771	
-0,206526	-0,010274	-3,153980572	18,755	
0,03142787	-0,010274	-3,329755775	18,746	
0,26938174	-0,010274	-3,198109493	18,728	
0,50733561	-0,010274	-3,388705807	18,718	
0,74528948	-0,010274	-3,212572306	18,709	
0,98324336	-0,010274	-3,240399155	18,7	
1,22119723	-0,010274	-3,459180614	18,693	
1,4591511	-0,010274	-3,180326459	18,676	

Feuil1

Format des données du bloc Simulink à l'entrée du programme motherpv