



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

**ETUDE COMPARATIVE DES MODELES DE
GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES**

Présenté par

Moustapha DIEDHIOU

Soutenu publiquement le 20 Février 2016 devant le jury composé de :

Noms et Prénoms	Grade	Qualité	Etablissement
CAMARA Moctar	Maître de conférences	Président de jury	UASZ
THIAME Moustapha	Maître assistant Associé	Rapporteur	UASZ
KOBOR Diouma	Maître de conférences	Examineur	UASZ
NDIAYE Lat Grand	Maître assistant	Examineur	UASZ
TINE Modou	Maître assistant Associé	Examineur	UASZ
NDIAYE Ababacar	Maître assistant Associé	Co-encadreur recherches	UASZ
SAKHO Ibrahima	Maître assistant	Encadreur recherches	UASZ

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de Master à :

Mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs

Mon tonton Yancouba Diédhiou qui n'a jamais cessé de m'encourager.

Tous mes amis.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier le tout puissant de nous avoir donné la santé jusqu'à la finalisation de ce présent travail de mémoire.

Je remercie sincèrement Dr Ababacar NDIAYE Maître Assistant à l'Université Assane Seck de Ziguinchor et directeur de mon stage.

Je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Je remercie aussi Dr Ibrahima SAKHO Maître Assistant à l'Université Assane Seck de Ziguinchor et directeur de ma recherche de m'avoir mis en rapport avec Dr Ababacar NDIAYE mais aussi de sa contribution à l'amélioration de la qualité du rapport.

Mes sincères remerciements vont au Dr Moctar CAMARA, Maître de conférences à l'Université Assane Seck de Ziguinchor et chef de département de physique d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie également Dr Moustapha THIAME, Maître Assistant Associé à l'Université Assane Seck de Ziguinchor d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit.

Je remercie :

- Dr Lat Grand NDIAYE Maître Assistant à l'Université Assane Seck de Ziguinchor,
- Dr Diouma KOBOR Maître de conférences à l'Université Assane Seck de Ziguinchor,
- Dr Modou TINE, Maître Assistant Associé à l'Université Assane Seck de Ziguinchor,

d'avoir accepté d'examiner mon rapport.

Je remercie également tous les étudiants, les doctorants des laboratoires de physique et tous mes amis de la même promotion de leurs soutiens dans la réalisation de ce travail.

Mon plus grand remerciement revient naturellement à ma famille, plus particulièrement à mes parents, mes frères et sœurs, qui m'ont toujours soutenu.

Enfin, je ne pourrais terminer, ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Revue bibliographique de la filière photovoltaïque.....	3
Introduction.....	4
I.1 Energie solaire.....	4
I.1.1 Le soleil.....	4
I.1.2 Le spectre solaire.....	4
I.2 La conversion photovoltaïque.....	6
I.3 Le module photovoltaïque.....	7
I.4 Les paramètres caractéristiques des cellules photovoltaïques.....	8
I.4.1 Le courant de court-circuit I_{cc}	8
I.4.2 Tension de circuit ouvert V_{co}	8
I.4.3 La puissance optimale P_{max}	8
I.4.4 Facteur de forme.....	9
I.4.5 Le rendement η	9
I.5 Les facteurs influents le rendement d'un générateur photovoltaïque.....	10
I.5.1 Influence de l'ensoleillement.....	10
I.5.2 Influence de la température.....	10
I.6 Les différentes technologies photovoltaïques.....	11
I.6.1 La technologie à base de silicium cristallin.....	11
I.6.1.1 Le silicium monocristallin.....	11
I.6.1.2 Le silicium poly-cristallin.....	11
I.6.2 La technologie à base de la couche mince.....	12
I.6.2.1 Le silicium amorphe.....	12
I.6.2.2 Les cellules multi-jonctions en couche mince appelées les cellules tandem..	12
I.6.2.3 La filière à base du tellurure de cadmium (CdTe).....	13
I.6.2.4 La filière à base de l'alliage de cuivre-indium/gallium-sélénium (CIGS)	13
I.6.3 Les cellules à colorant.....	14
I.6.4 Les cellules multi-jonction.....	14
I.6.5 Les cellules organiques.....	15
I.6.6 Récapitulation des différentes technologies photovoltaïques.....	15
Conclusion.....	17
Chapitre II : Etude et classification des différents modèles de générateurs photovoltaïques ..	18

Introduction	19
II.1 Les modèles de générateurs utilisant des paramètres électriques.....	19
II.1.1 Modèle à une diode	19
II.1.1.1 Présentation du modèle.....	19
II.1.1.2 Détermination des paramètres	20
II.1.2 Modèle à deux diodes.....	22
II.1.2.1 Présentation du modèle.....	22
II.1.2.2 Détermination des paramètres	24
II.2 Modèles de générateurs utilisant les paramètres météorologiques.....	25
II.2.1 Modèle de Borowy et Salameh	25
II.2.2 Le modèle de Benchmark.....	26
II.2.3 Le modèle d'Osterwald	26
II.2.4 Modèle de Kroposki	27
II.2.5 Modèle de Hatziargyriou.....	27
II.2.6 Le modèle Energetic Standard Reporting Conditions (ESRC)	27
II.3 Synthèse des modèles	27
Conclusion.....	28
Chapitre III : Validation des différents modèles retenus.....	29
Introduction	30
III.1 Présentation de la plateforme de mesures.....	30
III.1.1 Les modules photovoltaïques	31
III.1.2 Le capteur d'ensoleillement	31
III.1.3 Les capteurs de température des modules	31
III.1.4 Le capteur de température ambiante et d'humidité	32
III.1.5 Le système d'acquisition.....	32
III.2 Présentation des mesures	33
III.2.1 Présentation des données météorologiques	33
III.2.1.1 Le rayonnement solaire.....	33
III.2.1.2 Température ambiante.....	34
III.2.1.3 La température du module	34
III.2.1.4 Humidité relative	36
III.2.2 Présentation des données électriques	36
III.2.2.1 Courant de court-circuit et la puissance mesurée.....	36

III.2.2.2	Tension du circuit ouvert	38
III.3	Résultats et discussion	38
III.3.1	Détermination des coefficients des modèles	38
III.3.2	Comparaison entre la puissance mesurée et les puissances simulées	40
III.3.3	Qualification des modèles	46
III.3.3.1	Présentation des coefficients statistiques	46
III.3.3.1.1	L'erreur quadratique moyenne RMSE.....	46
III.3.3.1.1	Le coefficient de détermination	47
III.3.3.2	Résultats des coefficients statistiques	47
	Conclusion.....	49
	Conclusion générale	51
	Référence bibliographique	52

Listes des tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques principales du soleil	4
Tableau 2: Avantages et les limites des cellules solaires à base du silicium cristallin.	12
Tableau 3: Avantages et limites des cellules à couche mince.....	13
Tableau 4: Les caractéristiques des différentes filières	16
Tableau 5: Synthèse des modèles.....	28
Tableau 6: Spécifications techniques des modules photovoltaïques.....	31
Tableau 7: Spécifications techniques de la centrale d'acquisition.....	32
Tableau 8: Coefficients des différents modèles.....	39
Tableau 9: Les résultats de RMSE et de R2.....	48
Tableau 10: Calcul des pourcentages.....	49

Liste des figures

Figure 1: Spectre d'une cellule photovoltaïque	5
Figure 2: Les différentes constantes d'illumination	6
Figure 3: Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairement.....	7
Figure 4: Encapsulation d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure 5: Variation de la puissance de sortie de quelque modèle pendant la journée.....	9
Figure 6: Variation du courant en fonction de la tension sous différents ensoleillements.....	10
Figure 7: Variation du courant en fonction de la tension sous différentes températures	11
Figure 8: Schéma du modèle à une diode.....	19
Figure 9: Schéma équivalent du modèle à deux diodes.....	23
Figure 10: La méthode de détermination des résistances série et parallèle.....	25
Figure 11: Plateforme expérimentale.....	30
Figure 12: Thermocouples sur la face arrière du module.....	32
Figure 13: Variation du rayonnement solaire pendant la journée.....	34
Figure 14: Variation de de la température ambiante pendant la journée.....	35
Figure 15: Variation de la température du module pendant la journée.....	35
Figure 16: Variation de l'humidité relative pendant la journée.....	36
Figure 17: Variation du courant de court-circuit pendant la journée.....	37
Figure 18: Variation de la puissance mesurée pendant la journée.....	37
Figure 19: Variation de la tension de circuit ouvert pendant la journée.....	38
Figure 20: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 1).....	40
Figure 21: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 2).....	41
Figure 22: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 3).....	41

Figure 23: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 4).....	42
Figure 24: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 5).....	42
Figure 25: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 6).....	43
Figure 26: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 7).....	43
Figure 27: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 8).....	44
Figure 28: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 9).....	44
Figure 29: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 10).....	45
Figure 30: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 11).....	45
Figure 31: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 12).....	46

Nomenclature des paramètres

Symboles	Définition	Formules et unités
I_{ph}	Le photo-courant	Ampère (A)
I_{pv}	Courant fournie par le module	Ampère (A)
V_{pv}	Tension au bord du module	Volt (V)
I_{max}	Courant maximal du module	Ampère (A)
I_{cc}	Courant de court-circuit	Ampère (A)
I_{cc,ref}	Courant de court-circuit de référence	Ampère (A)
V_{max}	Tension maximale du module	Volt (V)
V_{co}	Tension de circuit ouvert	Volt (V)
V_{co,ref}	Tension de circuit ouvert de référence	Volt (V)
R_s	Résistance série	Ohm (Ω)
I_s	Courant de saturation de la diode	Ampère (A)
V_T	Potentielle thermodynamique	$V_T = (K.T)/e$ (volt)
K	Constante de Boltzman	$1,381.10^{-23} J/K$
E	Charge de l'électron	Coulomb (C)
N_s	Nombre de cellule	
N	Facteur de qualité de la diode	
E_g	Energie du gap de la cellule	Joule (J)
P₁, P₂, P₃, P₄, P₅	paramètres à déterminer expérimentalement	
n₁	facteur de qualité de la diode 1	
n₂	facteur de qualité de la diode 2	
R_s	la résistance série	Ohm (Ω)
R_{sh}	la résistance shunt	Ohm (Ω)
P_{max}	La puissance maximale du module	Watt (W)
I_{max}	Courant maximal du module	Ampère (A)
V_{max}	La tension maximale du module	Volt (V)
I_{max,ref}	Courant maximal de référence	Ampère (A)
V_{max,ref}	Tension maximale de référence	Volt (V)
I_{cc}	le courant de court-circuit du module	Ampère (V)
V_{co}	la tension du circuit ouvert du module	Volt (V)

T	Température du module	Degré Celsius ($^{\circ}C$)
T_{ref}	Température de référence	$25^{\circ}C$
T_a	Température ambiante	Degré Celsius ($^{\circ}C$)
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature	$NOCT = [800(T - T_a)/G] + 20$ ($^{\circ}C$)
G	Eclairement solaire	W/m^2
G_{ref}	Eclairement solaire de référence	$1000W/m^2$
α_0	coefficient de température du courant de court-circuit du module	$\alpha_0 = dI/dT$ ($A/^{\circ}C$)
β_0	Coefficient de température de la tension de circuit ouvert du module	$\beta_0 = dV/dT$ ($V/^{\circ}C$)
μ_{pmax}	Coefficient de la température de la puissance maximale	$\mu_{pmax} = dP_{max}/dT$ ($W/^{\circ}C$)
δ	Coefficient correcteur par rapport à l'éclairement	$\delta = 1/\Delta G$

Introduction générale

La production d'énergie est un atout de grande importance à l'échelle mondiale. En effet les besoins énergétiques des pays ne cessent d'augmenter en raison de l'essor de l'industrie, du transport et des moyens de communications. Ce pendant les pays en voie de développement ont besoin de plus en plus d'énergies pour mener à bien leur développement.

De nos jours, la production de l'énergie est principalement assurée par les énergies fossiles. Ces énergies sont extraites des sources comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole, l'uranium etc [1].

Il s'y ajoute que la consommation de ces énergies entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus, une consommation excessive de ces énergies réduit les réserves de façon dangereuse pour les générations futures. Cela est dû au fait que la vitesse de régénération de ces énergies est très lente à l'échelle humaine.

Nous notons un déséquilibre sur la répartition de ces énergies au niveau du globe terrestre. En effet, La plupart des populations des zones rurales n'ont pas accès à l'énergie.

Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes compensant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des énergies non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics [1].

Aujourd'hui, nous distinguons plusieurs sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique, l'énergie solaire photovoltaïque etc.

L'énergie solaire photovoltaïque est produite par l'intermédiaire des cellules photovoltaïques fabriquées à partir des matériaux semi-conducteurs. Cette énergie est globalement bien répartie au niveau du globe. Son exploitation permet de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques.

La production de l'énergie photovoltaïque est influencée par les paramètres météorologiques qui sont des paramètres d'entrée. Par conséquent leur connaissance contribue à bien maîtriser la production de l'énergie photovoltaïque et son comportement relativement à la température, à l'ensoleillement etc. La mesure de ces paramètres nous permettra de prédire les performances des systèmes photovoltaïques à partir des modèles de générateurs

photovoltaïques. En effet, les outils de dimensionnement des systèmes photovoltaïques et les caractéristiques des composants de ces systèmes ne tiennent pas toujours compte des contraintes climatiques et météorologiques des sites d'implantation. Ainsi, il nous faut des modèles de générateurs adaptés à nos sites locaux (Sénégal) pour une bonne réussite des projets photovoltaïques.

L'objectif principal de ce travail est d'identifier les modèles les plus adaptés à nos sites pour prédire les performances des modules photovoltaïques en connaissant les paramètres météorologiques.

Dans cette problématique que porte notre recherche qui consiste à l'étude comparative des modèles de générateurs photovoltaïques.

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres

Le chapitre I est consacré à une revue bibliographique de la filière photovoltaïque à savoir l'étude de l'énergie solaire, de la conversion photovoltaïque et de la présentation des différentes technologies photovoltaïques.

Le chapitre II est réservé à l'étude classificatrice des différents modèles de générateurs photovoltaïques. Nous avons les modèles utilisant les paramètres électriques et ceux météorologiques.

Le chapitre III est consacré à la validation des différents modèles retenus. Nous représentons les données météorologiques et électriques mesurés par la plateforme durant les 12 mois. Ensuite, nous validons ces modèles et comparons ces derniers en utilisant les résultats statistiques.

Chapitre I: Revue bibliographique de la filière photovoltaïque

Introduction

Les cellules photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique grâce à des matériaux semi-conducteurs. En effet le mot « photovoltaïque » vient du grec « photo » qui signifie lumière et de « voltaïque » qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro VOLTA (1754-1827). Ce dernier a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité. En somme, le mot photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électrique » [2].

Dans cette partie, nous allons faire un résumé sur les cellules photovoltaïques. D'abord, nous nous intéresserons à l'énergie solaire qui est la source de l'effet photovoltaïque. Ensuite, nous détaillerons la conversion de cette énergie en énergie photovoltaïque. Cette partie sera suivie par une présentation des constituants du module, les facteurs influents le rendement et les paramètres caractéristiques du module photovoltaïque. Enfin, nous ferons une synthèse des différentes technologies photovoltaïques.

I.1 Energie solaire

I.1.1 Le soleil

Le soleil est une étoile quelconque dont, ni les propriétés physiques, ni la position, ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la galaxie. Le *tableau 1* montre les caractéristiques principales du soleil:

Tableau 1: Caractéristiques principales du soleil [3].

Caractéristiques	Valeurs
Masse (kg)	$1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre (m)	$1,392 \cdot 10^9 \text{ m}$
Masse volumique moyenne (kg.m^{-3})	1410 kg.m^{-3}
Puissance rayonnée (W)	$3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$
Température superficielle (K)	5770 K

I.1.2 Le spectre solaire

La distance séparant le soleil de la terre est environ $150 \cdot 10^6 \text{ Km}$. Malgré cette distance, la couche terrestre reçoit une quantité importante d'énergie de l'ordre de $180 \cdot 10^6 \text{ W}$. Grâce à

cette puissance énorme, le soleil est considéré comme une alternative aux autres sources d'énergie comme le pétrole.

Cette énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 0,22 à 10 μm. Cette énergie liée à la longueur d'onde est donnée par la relation suivante :

$$E = h\nu = \frac{h.c}{\lambda} \quad 1.1$$

Avec h : constante de Planck (J.s⁻¹), c : vitesse de la lumière dans le vide (m.s⁻¹), ν : fréquence (s⁻¹), λ : la longueur d'onde (m).

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau, il faut que les photons soient absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose comme suit :

- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à 0,4 μm)
- 47 % dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm)
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à 0,8 μm)

La *figure 1* montre le spectre d'une cellule photovoltaïque

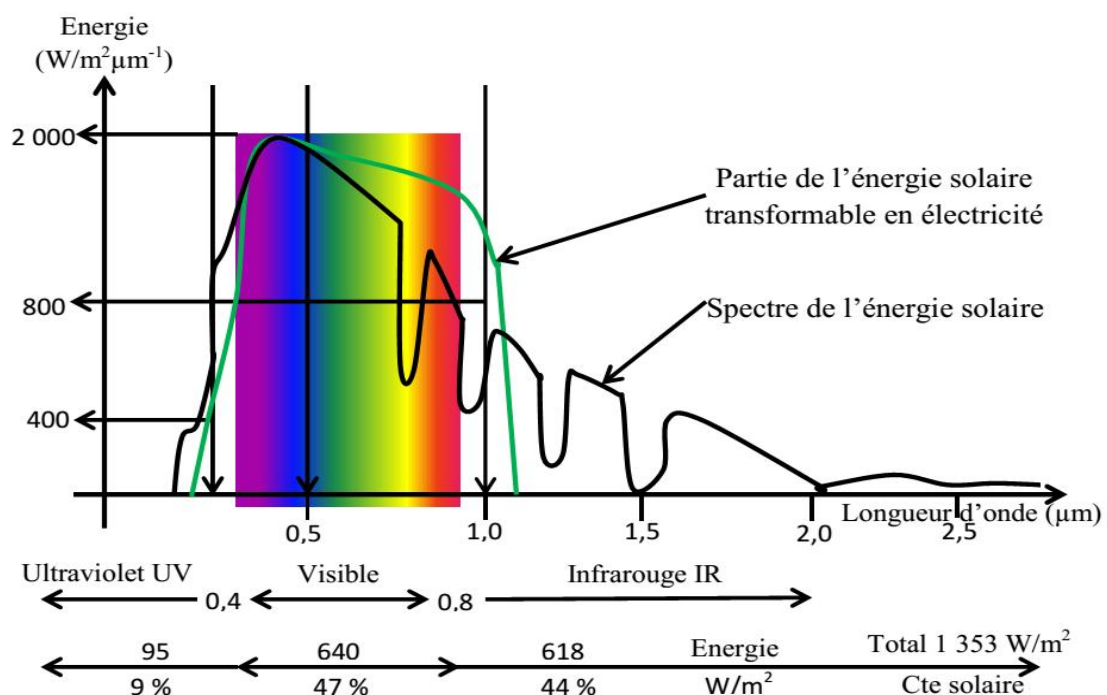


Figure 1: Spectre d'une cellule photovoltaïque [2].

L'intensité lumineuse issue du soleil en incidence normale sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est de $1,4 \text{ kW/m}^2$ au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à 1 kW/m^2 par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » (AM). La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 correspond lui à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée par la lumière arrivant à $48,2^\circ$ sur la surface de la Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande (*figure2*).

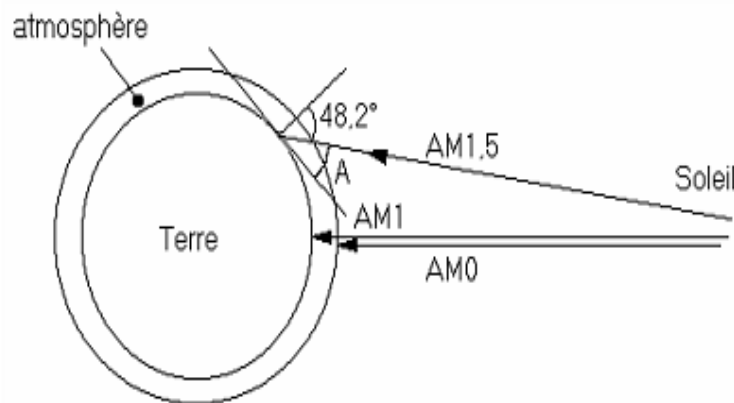


Figure 2: Les différentes constantes d'illumination [4].

I.2 La conversion photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Ce processus a été découvert par Edmond Becquerel en 1839 [5]. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs. Si le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de celle de valence, le gap est direct, les transitions sont donc directes et radiatives.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées (types N ou P) du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. La *figure 3* illustre l'interaction rayonnement-matière.

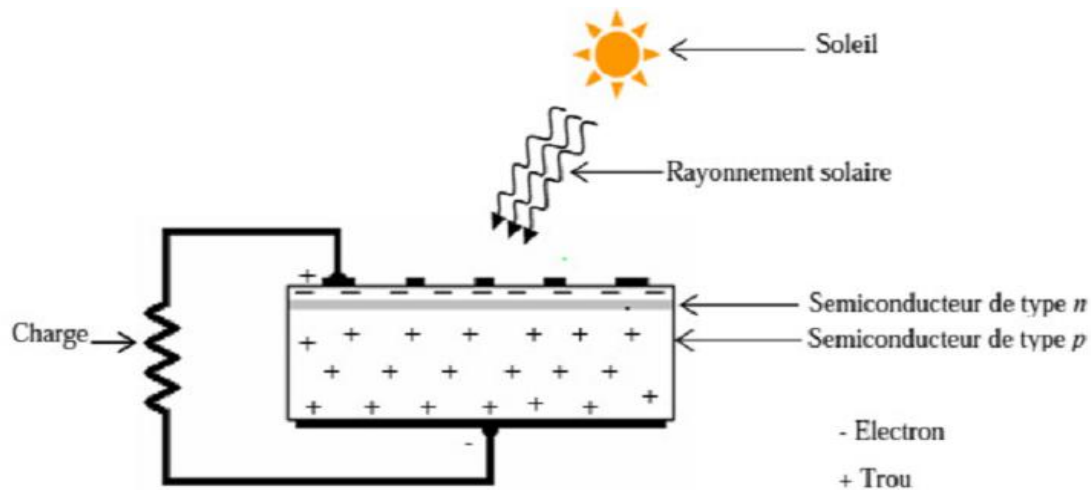


Figure 3: Schéma simplifié d'une cellule solaire sous éclairement [6].

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule. Si l'énergie du photon incident est inférieure à l'énergie du gap, les photons ne seront pas absorbés, d'où absence de l'effet photovoltaïque.

I.3 Le module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques sont constitués de cellules connectées entre elles par un fin ruban métallique plus souvent en cuivre du contact en face avant au contact en face arrière. Ensuite les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle). Puis un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière. La boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement et les diodes by-pass. On met du verre ou de la feuille TEDLAR en face arrière et en fin, on relie un cadre en aluminium en périphérique. La *figure 4* montre les constituants d'un module photovoltaïque.

En associant les cellules photovoltaïques en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur photovoltaïque selon les besoins des applications visées. Ainsi pour des cellules constituées de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque est donnée par:

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{ph} \cdot N_p \cdot I_{ph} \quad 1.2$$

Avec P_{pv} : la puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque

V_{pv} : la tension à la sortie du générateur

I_{ph} : le courant de sortie du générateur

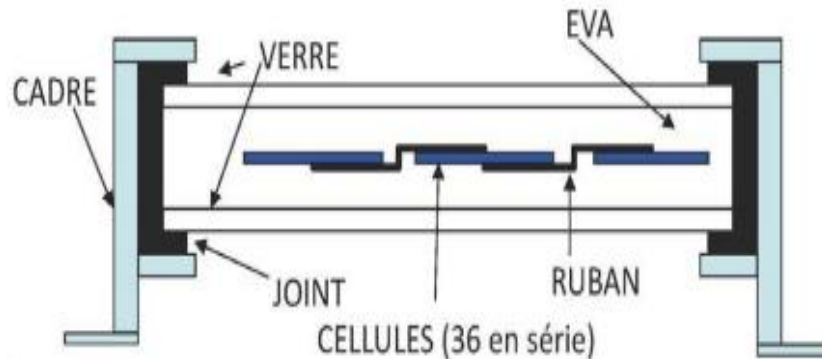


Figure 4: Encapsulation d'une cellule photovoltaïque [7].

I.4 Les paramètres caractéristiques des cellules photovoltaïques

Le courant de court-circuit I_{cc} , la tension de circuit ouvert V_{co} , la puissance maximale P_{max} , le facteur de forme FF et le rendement sont les paramètres essentiels permettant de connaître la qualité de la cellule en terme de production d'énergie.

I.4.1 Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit exprimé en A, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

I.4.2 Tension de circuit ouvert V_{co}

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée aux bornes des électrodes quand le circuit est ouvert autrement dit quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend du type de cellule solaire (jonction PN), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode.

I.4.3 La puissance optimale P_{max}

La puissance optimale à la sortie de la cellule est la puissance crête fournie par une cellule dans les conditions standards c'est-à-dire sous éclairage de 1000 W/m^2 , à la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, aux conditions spectrales AM1.5. Elle représente le coude de la caractéristique

courant-tension d'une cellule photovoltaïque à partir duquel le courant et l'intensité sont maximaux noté respectivement le courant maximal I_{max} et la tension maximale V_{max} . La *figure5* illustre la variation de la puissance de sortie de quelque modèle pendant la journée.

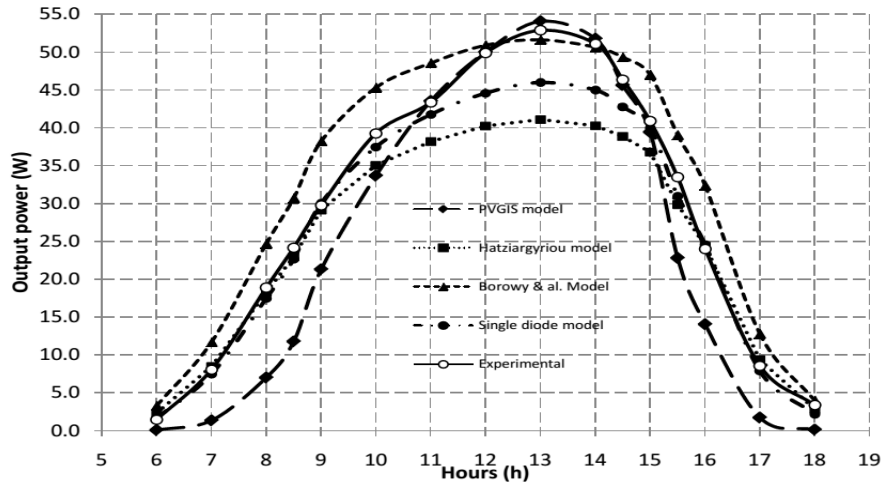


Figure 5: Variation de la puissance de sortie de quelque modèle pendant la journée [8].

I.4.4 Facteur de forme

Le facteur de forme est un paramètre important, utilisé à partir de la caractéristique courant-tension pour qualifier la qualité d'une cellule. Il est aussi nommé facteur de remplissage ou fill factor (FF). Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule (P_{max}) et la puissance formée par le rectangle $I_{cc}V_{co}$. L'augmentation de sa valeur implique sur celle de la puissance de sortie de la cellule. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad 1.3$$

I.4.5 Le rendement η

Le rendement des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente notée P_{in}

$$\eta = \frac{p_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad 1.4$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

I.5 Les facteurs influents le rendement d'un générateur photovoltaïque

La quantité d'énergie produite par un système photovoltaïque dépend des paramètres météorologiques.

I.5.1 Influence de l'ensoleillement

La création d'excitons dans un semi-conducteur est assurée par l'énergie lumineuse, donc l'augmentation de cette énergie engendre aussi l'augmentation du nombre d'excitons dans la cellule. Le courant débité est proportionnel à l'ensoleillement (*figure 6*).

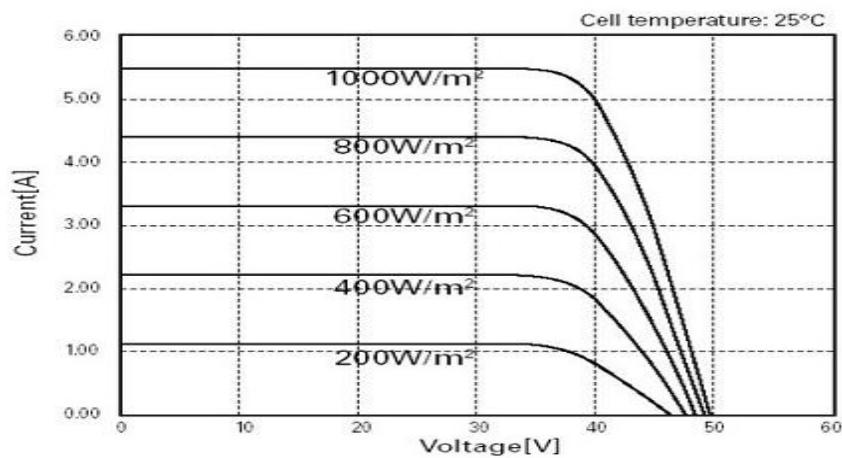


Figure 6: Variation du courant en fonction de la tension sous différents ensoleillements [9].

I.5.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important mais elle est souvent négligée dans le comportement des cellules photovoltaïques. Sur les 100 % d'énergie incidente, seul 13 % est extrait sous forme d'énergie électrique, le reste est dissipé en chaleur. Ceci augmente la température de la cellule si cette chaleur n'est pas évacuée. En général, elle est évacuée par convection naturelle de l'air ambiant. Pour le même éclairement, les courbes courant-tension change avec la température des cellules surtout la tension de circuit ouvert (*figure 7*).

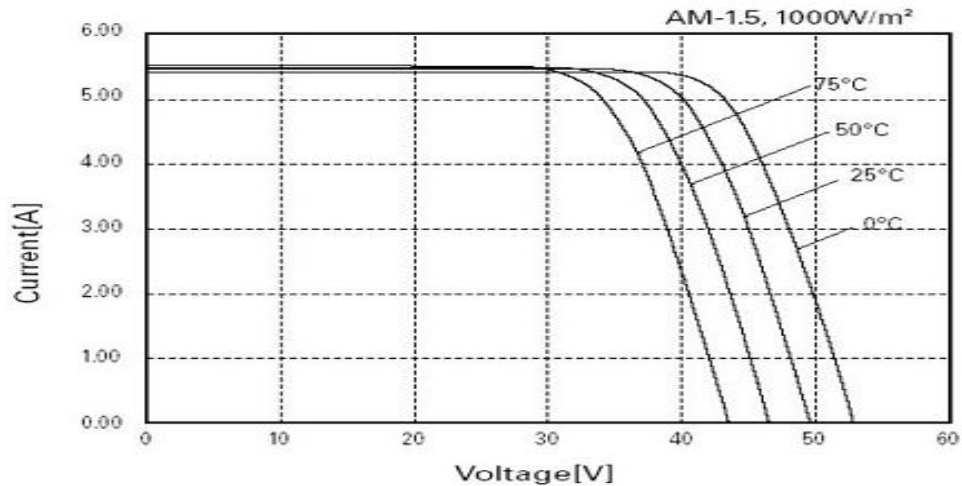


Figure 7: Variation du courant en fonction de la tension sous différentes températures [9].

I.6 Les différentes technologies photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique. Ces cellules sont des composants optoélectroniques fabriquées à base des matériaux semi-conducteurs. Parmi ces matériaux utilisés, nous pouvons citer :

I.6.1 La technologie à base de silicium cristallin

La filière photovoltaïque à base de silicium cristallin domine toujours le marché avec plus de 90% de vente. Cette filière comporte deux technologies selon la nature du silicium employé et sa méthode de fabrication : le silicium monocristallin et le silicium poly-cristallin.

I.6.1.1 Le silicium monocristallin

La méthode la plus utilisée pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski [7]. Le silicium monocristallin obtenu est sous forme de lingots circulaires avec un seul type de cristal de couleur uniforme grise. Son rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) est environ 15 %. [10].

I.6.1.2 Le silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes. Il est obtenu par coulage en lingotière par refroidissement lent, de lors de quelques dizaines heures. Il est moins énergivore et son rendement final des cellules est d'environ 12 %.

Les avantages et les limites des cellules solaires à base du silicium cristallin sont résumés dans le *tableau 2*.

Tableau 2: Avantages et les limites des cellules solaires à base du silicium cristallin.

Cellule	Avantages	Limites
Monocristallin	bon rendement 14-16 %	coût élevé des cellules
	excellente stabilité (durée de la vie de la cellule importante)	Baisse du rendement quand la température augmente
	Nombre de fabricants élevés	
Polycristallin	Moins chère	Le rendement est limité environ 15 %
	Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V	Plus sensible à la température
	Les lingots moins chers à produire que le monocristallin	L'absorption du rayonnement solaire par le silicium est faible

I.6.2 La technologie à base de la couche mince

Les cellules photovoltaïques à base de la couche mince constituent les cellules de seconde génération après celles du silicium cristallin. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, les cellules couches minces sont des matériaux photosensibles efficaces pour absorber l'ensemble du rayonnement solaire. Les matériaux les plus utilisés dans cette filière sont : le silicium amorphe, le CdTe (tellure de cadmium), le Sélénium de Cuivre Indium Galium (CIGS), et on trouve de plus en plus de cellules multi-jonctions en couches minces améliorant d'autant les performances de cette filière.

I.6.2.1 Le silicium amorphe

Les cellules au silicium amorphe noté a-Si sont apparues dans les années 1976. Elles ne sont pas cristallisées. Cette filière présente des rendements de conversion faible de l'ordre 6 % à 7 %.

I.6.2.2 Les cellules multi-jonctions en couche mince appelées les cellules tandem

Pour améliorer les performances des cellules couche-mince, les cellules double et triple jonction ont été développées. Ces cellules tandem sont fabriquées à base du silicium amorphe

et poly-cristallin (a-Si/ μ c-Si) [11]. Les meilleurs rendements stabilisés en laboratoire sont de l'ordre de 12 %.

I.6.2.3 La filière à base du tellure de cadmium (CdTe)

Le tellure de cadmium (CdTe) est un semi-conducteur de la famille des II-VI. La filière CdTe présente des rendements de cellules record de 16,5 % en laboratoire [11] et des modules commerciaux aux alentours de 10 %.

L'inconvénient majeur actuel des cellules au tellure de cadmium repose sur la toxicité reconnue du cadmium bien que les risques environnementaux liés aux cellules ont été maîtrisés [11].

I.6.2.4 La filière à base de l'alliage de cuivre-indium/gallium-sélénium (CIGS)

L'alliage CIGS est un semi-conducteur utilisé principalement dans la fabrication des cellules photovoltaïques sous forme d'une couche mince polycristalline. Cette filière atteint un rendement de 16,5 % en laboratoire et 10 à 12 % dans les modules commerciaux.

Le tableau 3 indique les avantages et les limites des cellules à couche mince.

Tableau 3: Avantages et limites des cellules à couche mince.

Technologies	Avantages	Limites
Le silicium amorphe	Fonctionne avec un éclairage faible	Rendement faible en plein soleil, de 6 à 8 %
	Le coût est un peu faible	Performances qui diminuent avec le temps (environ 7 %)
	Intégration sur supports souples ou rigides	
Les cellules Tandem	Sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde	Coût élevé dû à la superposition
	Bon rendement	
Les cellules CdTe	Importance du coefficient d'absorption	Matériaux rares
	Rendement élevé	La toxicité du cadmium
Les cellules CIGS	Production de module flexible	Utilisation des matériaux rares et chers (Indium et Gallium)
	Bons rendements	
	Bonne stabilité	Sensibilité à l'humidité

A côté de ces cellules photovoltaïques de première génération et deuxième génération, il existe maintenant des cellules de la troisième génération qui sont des cellules à colorant, des cellules organiques et des cellules multi-jonctions à base d'association des matériaux III-V.

I.6.3 Les cellules à colorant

Les cellules à colorant sont inspirées par la photosynthèse, développé au début des années 1990 par l'équipe de Mivhael Craltzel. Elles sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique (dioxyde de titane : TiO_2) [12].

Les cellules à colorant présentent des rendements maximaux de 12 % en laboratoire et de 3 à 5 % dans des modules commerciaux.

Les cellules à colorant présentent des avantages et des limites :

Avantage :

- Le coût de production est faible

Limite :

- Utilisation de nanoparticules (TiO_2) dangereuses pour la santé
- L'électrolyte de la cellule à colorant est instable
- Rendement faible

I.6.4 Les cellules multi-jonction

Des cellules hétérojonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40 %. Elles ne sont pas connues dans des modules commerciaux à cause de leur coût de fabrication. Elles sont été motivées en priorité par les applications spatiales.

Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonction actuellement avoisine les 30 %.

Les cellules multi-jonctions présentent des avantages et des limites.

Avantage :

- Grande résistance à des températures élevées
- Rendement élevé

Limite :

- Toxicité des matériaux
- Disponibilité des matériaux

I.6.5 Les cellules organiques

En 1978, A. K. Ghosh et *al.* ont présenté une cellule photovoltaïque organique ayant un rendement de 0,7 % sous le spectre AM1 [13]. La cellule formée par la superposition d'un film de phthalocyanine de cuivre (CuPc) et de pérylène-3,4,9,10-tétracarboxylic bisbenzimidazole (PTCBI), publiée par C. W. Tang en 1986, a permis d'obtenir un rendement de 1 % et un facteur de forme de 0,65. Ces deux matériaux possèdent des électronégativités différentes, l'un de type donneur (CuPc) et l'autre de type accepteur (PTCBI). Actuellement, on peut envisager d'atteindre des rendements de 6,7 % [13] en modifiant la configuration des cellules.

Ainsi, nous notons les avantages et les limites des cellules organiques :

Avantage :

- Légèreté et flexibilité
- Coefficient d'absorption importante
- Moins cher

Limite :

- Durée de vie courte
- Rendement faible

I.6.6 Récapitulation des différentes technologies photovoltaïques

Les différentes technologies sont résumées dans le *tableau 4*.

Tableau 4: Les caractéristiques des différentes filières [14].

Technologies	Cellule (labo)	Module (commercial)	Prix	Niveau développement	Utilisation
1 ère génération					
Silicium monocristallin	24,7 %	12 à 20 %	Elevé	Production industrielle	Aérospatiale, modules pour toits, façades,
Silicium polycristallin	20,3 %	11 à 15 %	Moyen	Production industrielle	Modules pour toits, façades, générateurs
2^e génération					
Silicium amorphe	13,4 %	5 à 9 %	Faible	Production industrielle	Appareils électroniques (montres, calculatrice), intégration dans le bâtiment
Cellule Tandem	13 à 16 %	7 %	Moyen	Production industrielle	
CIGS	19,30 %	9 à 11 %	Moyen	Production industrielle	Appareils électroniques (montres, calculatrices) intégration dans le bâtiment
CdTE	16,7 %	6 à 9 %	Moyen	Prêt pour la production	
3^e génération					
Cellule à colorant	11 %		Non connu	Au stade de la recherche	
Cellule organique	5,7 %		Non connu	Au stade de la recherche	
Cellule multi-jonction	39 %		Non connu	Au stade de la recherche	

Conclusion

Les cellules photovoltaïques tirent un immense intérêt dans la production de l'énergie par le biais de l'énergie solaire. La filière cristalline reste la plus utilisée dans les cellules commerciales. A côté de celle-ci, on note la présence de la filière de la deuxième génération telles que le CdTe, le CIGS etc qui présentent un rendement important dans les laboratoires mais moins utilisées à cause de leur coût et de la toxicité de certains matériaux. La technologie de la troisième génération est encore en pleine phase de recherche dans les laboratoires à savoir les cellules à colorant, les cellules organiques...

On note aussi l'apparition de la quatrième génération : les cellules à pérovskite qui montrent des perspectives intéressantes pour le futur.

Pour prévoir les performances des modules photovoltaïques et leur comportement, nous allons étudier et classer les modèles de générateurs photovoltaïques.

Chapitre II : Etude et classification des différents modèles de générateurs photovoltaïques

Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude classificatrice des différents modèles de générateurs photovoltaïques.

Un générateur photovoltaïque est un dispositif non linéaire qui est décrit par ses caractéristiques courant-tension et par le circuit équivalent. La performance d'un système photovoltaïque dépend fortement des conditions météorologiques (le rayonnement solaire, la température, etc).

Dans la littérature, plusieurs modèles de générateurs sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

En premier lieu, nous allons présenter les modèles de générateurs dont les paramètres caractéristiques de la cellule (courant, la tension et la puissance) sont en fonction des paramètres uniquement électriques. Ensuite, nous présentons ceux intégrant les paramètres météorologiques.

II.1 Les modèles de générateurs utilisant des paramètres électriques

II.1.1 Modèle à une diode

II.1.1.1 Présentation du modèle

Les propriétés de la jonction photovoltaïque et de la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque. Dans le cas d'un modèle à une diode, le modèle le plus utilisé est celui simplifié à quatre paramètres, constitué d'une source de courant, d'une diode et d'une résistance série. Le circuit équivalent est donné sur la *figure 8* [15].

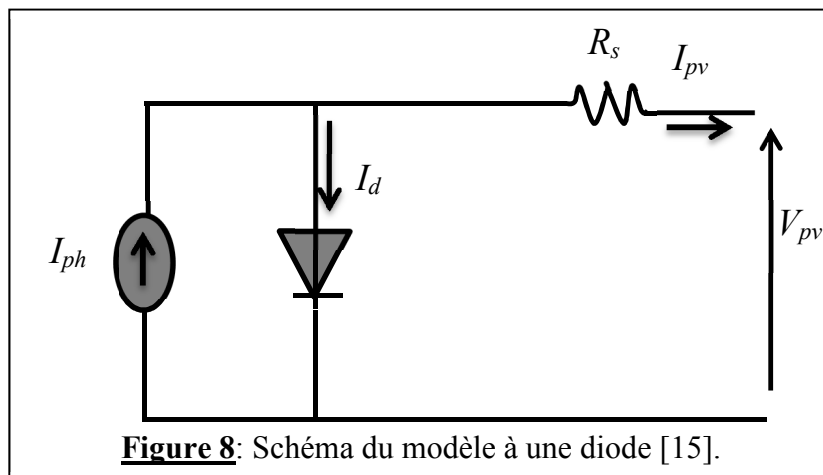


Figure 8: Schéma du modèle à une diode [15].

L'équation caractéristique est donnée par la relation 2.1 :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad 2.1$$

Le courant de la diode est donné par la relation suivante

$$I_d = I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right) \quad 2.2$$

Avec $V_T = \frac{e}{KT}$: la potentielle thermodynamique, e : la charge élémentaire de l'électron,

T : la température de la cellule, K : constante de Boltzman

Le courant produit par la cellule est donné par

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right) \quad 2.3$$

Les quatre paramètres sont :

I_{ph} : le photo-courant

I_s : le courant de saturation de la diode

n : le facteur de qualité de la diode

R_s : la résistance série

II.1.1.2 Détermination des paramètres

Ces paramètres sont déterminés à partir de la mesure de la caractéristique courant-tension. Ils dépendent de l'éclairement et de la température de référence c'est-à-dire à la condition standard (éclairement solaire: 1000 W/m², température: 25°C, spectre AM1.5).

- **Le photo-courant I_{ph}**

Le photo-courant varie avec le flux lumineux incident, il est déterminé par rapport aux conditions de référence. Sa formule est donnée par [16] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left[I_{ph_{ref}} + \alpha_0 \cdot (T - T_{ref}) \right] \quad 2.4$$

Avec : α_0 : coefficient de température du courant de court-circuit, il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif et très faible.

- **Le courant de saturation de la diode**

Le courant de saturation de la diode est en fonction de la température et de la bande interdite E_g . Son expression est donnée par la relation suivante [16] :

$$I_s = I_{cc,ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{e \cdot E_g}{n \cdot K} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad 2.5$$

- **Le facteur de qualité n**

Le facteur de qualité est donné par l'expression 2.6 [17]

$$n = \left(\frac{1}{N_s \cdot V_T} \right) \left(\frac{T}{T_{ref}} \cdot I_{cc,ref} \right) \left[\frac{\beta_0 \cdot T_{ref} - V_{co,ref} + E_g \cdot N_s}{\alpha_0 \cdot T_{ref} - 3 \cdot I_{cc,ref}} \right] \quad 2.6$$

- **La résistance série**

Ce paramètre est déterminé en utilisant la pente de la caractéristique courant-tension. On peut le déterminer aussi en utilisant les caractéristiques $(0, I_{cc})$, $(V_{co}, 0)$ et (I_{max}, V_{max}) et les méthodes itératives.

Pour la tension de circuit ouvert : $I=0, V=V_{co}$

$$0 = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V_{co}}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad 27$$

Pour le courant de court-circuit : $I=I_{cc}, V=0$

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{R_s I_{cc}}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad 2.8$$

Au point maximal de puissance : $I=I_p, V=V_p$

$$I_{max} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V_{max} + R_s * I_{max}}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad 2.9$$

Le courant de saturation de la diode est une quantité très petite de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} ampères [18]. Donc une première simplification peut être faite concernant le courant de court-circuit (équation 2.8). Alors le système d'équation devient :

$$I_{cc} \cong I_{ph} \quad 2.10$$

$$\text{D'où } 0 \approx I_{cc} - I_s \exp\left(\frac{V_{co}}{nV_T}\right) \Leftrightarrow I_s = -I_{cc} \exp\left(-\frac{V_{co}}{nV_T}\right) \quad 2.11$$

L'équation au point de la puissance maximale devient

$$\begin{aligned} I_{\max} &= I_{cc} + I_{cc} \left[\exp\left(-\frac{V_{co}}{nV_T}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{V_{\max} + R_s * I_{\max}}{nV_T}\right) \right] \Leftrightarrow \\ I_{\max} &= I_{cc} \left[1 + \exp\left(\frac{(V_{\max} - V_{co}) + I_{\max} * R_s}{nV_T}\right) \right] \end{aligned} \quad 2.12$$

A partir de cette formule on peut déterminer la formule de la résistance série R_s

$$R_s = \frac{nV_T \ln\left(\frac{I_{\max}}{I_{cc}} - 1\right) + V_{co} - V_{\max}}{I_{\max}} \quad 2.13$$

II.1.2 Modèle à deux diodes

II.1.2.1 Présentation du modèle

Ce modèle électrique prend en compte les différents facteurs limitatifs. Il est composé d'un générateur de courant I_{ph} , correspondant au courant photo-généré. Ainsi, on y trouve les résistances série et parallèle et deux diodes $d1$ et $d2$. La résistance série est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques. Elle doit être en général très faible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. La résistance shunt R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite au niveau des bords de la cellule et de la jonction.

Le circuit électrique est donné sur la *figure 9*.

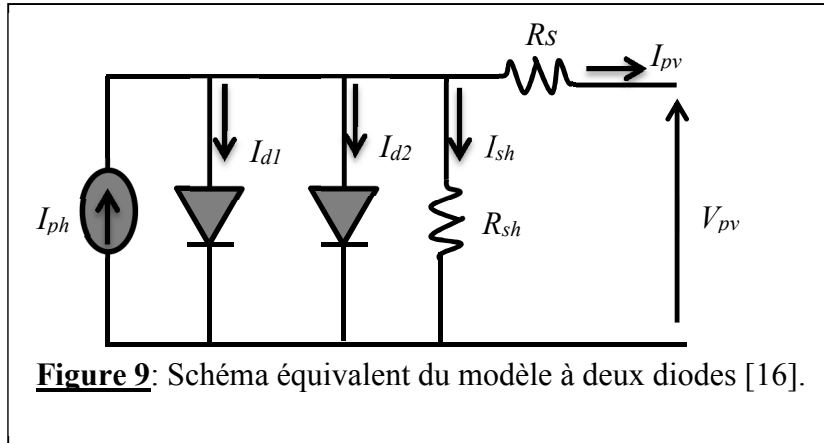


Figure 9: Schéma équivalent du modèle à deux diodes [16].

L'équation caractéristique est déduite de la loi de Kirchhoff

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad 2.14$$

Avec I_{ph} : le photo-courant

I_{d1} : le courant de la première diode

I_{d2} : le courant de la deuxième diode

I_{sh} : le courant de la résistance shunt

Les courants des diodes sont donnés par :

$$I_{d1} = I_{s1} \left[\exp\left(\frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n_1 N_s V_T}\right) - 1 \right] \quad 2.15$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left[\exp\left(\frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n_2 N_s V_T}\right) - 1 \right] \quad 2.16$$

Avec N_s : nombre de cellules en série.

Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad 2.17$$

Le courant à la sortie du module est le suivant :

$$I_{pv} = I_{ph} - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n_1 \cdot N_s \cdot V_T}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp\left(\frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n_2 \cdot N_s \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad 2.18$$

II.1.2.2 Détermination des paramètres

- **Le photo-courant**

Le photo-courant est un paramètre qui varie en fonction de l'ensoleillement incident mais aussi de la température. L'équation de ce paramètre est donnée par la relation suivante :

$$I_{ph} = P_1 \cdot G \cdot [1 + P_2 (G - G_{ref}) + P_3 (T - T_{ref})] \quad 2.19$$

La température de la cellule est donnée par :

$$T = T_{ref} + G \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad 2.20$$

- **Les courants de saturation des diodes I_{s1} et I_{s2}**

Les courants de saturation des diodes varient en fonction de la température et de l'énergie du gap de la cellule. Les formules de ces courants sont les suivantes :

$$I_{s1} = P_4 \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T}\right) \quad 2.21$$

$$I_{s2} = P_5 \cdot T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{K \cdot T}\right) \quad 2.22$$

P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 : paramètres à déterminer expérimentalement

- **Les résistances série et parallèle**

Les paramètres R_s et R_{sh} sont déterminés en utilisant la tangente à la courbe de la caractéristique courant-tension au niveau du courant de court-circuit pour la résistance shunt et au niveau de la tension de circuit ouvert pour la résistance série. La *figure10* montre la méthode de détermination de ces paramètres.

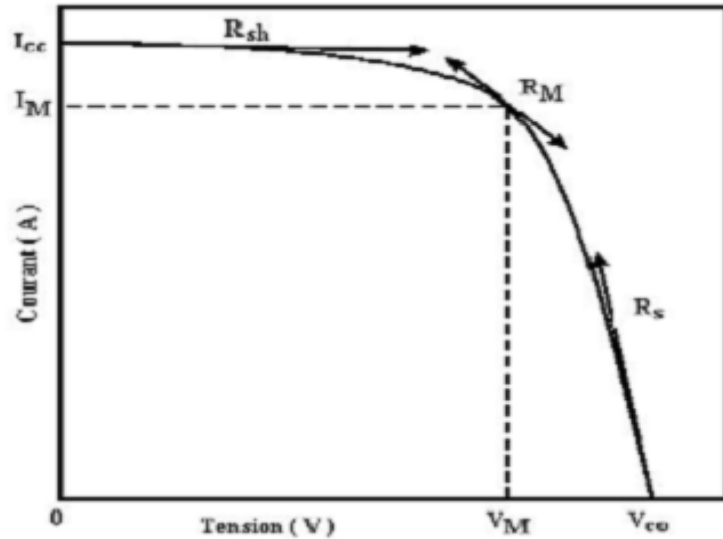


Figure 10: La méthode de détermination des résistances série et parallèle.

II.2 Modèles de générateurs utilisant les paramètres météorologiques

II.2.1 Modèle de Borowy et Salameh

Le modèle de Borowy et Salameh est développé en 1996. Il permet de calculer la puissance électrique maximale aux bornes d'un module photovoltaïque.

Ce modèle se sert des valeurs des modules photovoltaïques données par les fabricants. Les formules pour calculer le point optimum de tension et le courant sous des conditions arbitraires sont les suivantes [19]:

$$I_{\max} = I_{cc} \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{V_{\max}}{C_2 V_{co,ref}} \right) - 1 \right) \right] + \Delta I \quad 2.23$$

$$V_{\max} = V_{\max,ref} \left[1 + 0,0539 \cdot \log \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \right] + \beta_0 \cdot \Delta T \quad 2.24$$

Avec :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{\max,ref}}{I_{cc,ref}} \right) * \exp \left(- \frac{V_{\max,ref}}{C_2 \cdot V_{co,ref}} \right) \quad 2.25$$

$$C_2 = \left(\frac{V_{\max,ref}}{V_{co,ref}} - 1 \right) / \ln \left(1 - \frac{I_{\max,ref}}{I_{cc,ref}} \right) \quad 2.26$$

ΔI est un paramètre qui dépend de la différence de température et de l'éclairement solaire. Il est défini par l'expression suivante

$$\Delta I = \alpha_0 \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot \Delta T + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) \cdot I_{cc} \quad 2.27$$

Avec $\Delta T = T - T_{ref}$ 2.28

La température T du module est donnée par

$$T = T_a + ((NOCT - 20) / 800) \cdot G \quad 2.29$$

La puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad 2.30$$

II.2.2 Le modèle de Benchmark

Ce modèle permet de déterminer la puissance maximale fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement et une température du module donnés. L'équation de la puissance maximale est donnée par [19] :

$$P_{max} = (a \cdot G + b) \cdot T + c \cdot G + d \quad 2.31$$

Où P_{max} : est la puissance maximale produite

a, b, c et d sont des constantes positives qui peuvent être obtenues expérimentalement.

II.2.3 Le modèle d'Osterwald

Ce modèle est l'un des plus utilisés parmi les modèles classiques dans le calcul de la puissance maximale produite par un capteur photovoltaïque. Il tient compte les variations de la température à l'aide du coefficient de température de la puissance maximale $\mu_{P_{max}}$ ($\mu_{P_{max}} = 0,0035 \text{ W}/^\circ\text{C}$ pour les technologies en silicium). La puissance maximale est donnée par [20]:

$$P_{max} = P_{max,ref} \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot \left(1 - \mu_{P_{max}} (T - T_{ref}) \right) \quad 2.32$$

II.2.4 Modèle de Kroposki

D'après Kroposki, le calcul de la puissance maximale est basé sur les valeurs des paramètres données par le fabricant du module mais aussi sur les données météorologiques. La puissance maximale est donnée par l'expression suivante [21]:

$$P_{\max} = P_{\max,ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot (1 + \alpha_0 (T - T_{ref})) (1 + \beta_0 (T - T_{ref})) \left(1 + \delta \log \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \right) \quad 2.33$$

II.2.5 Modèle de Hatzargyriou

Ce modèle se sert des conditions météorologiques locales et des caractéristiques techniques du module photovoltaïque. La puissance maximale est donnée par l'équation empirique suivante [22] :

$$P_{\max} = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (P_{\max,ref} + \mu_{P_{\max}} (T - T_{ref})) \quad 2.34$$

II.2.6 Le modèle Energetic Standard Reporting Conditions (ESRC)

Ce modèle prend en compte que la variation de l'éclairement solaire. Il est pratique dans le cas où les variations de la température du module photovoltaïque ne sont pas prises en compte. La puissance maximale dans toutes les conditions de fonctionnement est en fonction des conditions standards. Sa formule est donnée par la relation suivante [23] :

$$P_{\max} = P_{\max,ref} \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \quad 2.35$$

Le *tableau 6* illustre la nomenclature des paramètres des modèles cités précédemment.

II.3 Synthèse des modèles

La synthèse de ces modèles est regroupée dans le *tableau 5*:

Tableau 5: Synthèse des modèles.

Modèles	Nombre de constantes à calculer	Avantages	Limites
Borowy et Salameh	4	Utilisation des spécifications techniques	Formule très complexe Beaucoup de sous-formules
Modèle de Benchmark	4	Modèle simple	Les constantes sont très difficiles à déterminer
Modèle d'Osterwald	1	Modèle simple ; moins de constante à déterminer
Modèle de Kroposki	3	Intégration des spécifications techniques et des paramètres météorologiques les plus influents	Formule longue Résultats non fiables pendant la nuit (log est défini de]0, +∞ [)
Modèle de Hatziargyriou	1	Modèle simple ; moins de constante à déterminer
ESRC	0	Modèle simple ; pas de constante à déterminer	non fiable : il dépend d'une seule variable

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles de générateurs photovoltaïques. Ces modèles sont classés en deux catégories : les modèles utilisant les paramètres électriques et en plus ceux utilisant les paramètres météorologiques. Ensuite, nous avons déterminé les paramètres inconnus (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , $n...$) au niveau de la première partie du chapitre. Enfin, la synthèse des modèles récapitule les avantages et les limites des modèles retenus. D'après la synthèse, les modèles d'Osterwald et de Hatziargyriou sont plus représentatifs en termes de simplicités et de limites.

Pour la suite, nous allons décrire une plateforme de mesures expérimentales afin de valider les modèles de générateurs photovoltaïques.

Chapitre III : Validation des différents modèles retenus

Introduction

Cette partie est dédiée à la validation des modèles retenus. La validation de ces modèles nécessite une plateforme de mesures expérimentales. Cette dernière a été installée à l'école supérieure polytechnique de Dakar.

Après la présentation de la plateforme, nous présenterons les données de mesures et la simulation des modèles retenus.

Nous terminerons par une comparaison des modèles en utilisant les résultats statistiques (RMSE : Root Mean Square Error en anglais et le coefficient de détermination : R^2).

III.1 Présentation de la plateforme de mesures

Cette plateforme de mesures a été installée depuis Avril 2012 au centre international de formation et de recherche en énergie solaire (CIFRES) de Dakar. Elle est constituée de deux modules photovoltaïques, de quatre capteurs de température, d'un thermo-hygromètre, d'un pyranomètre, de résistance shunt, d'une centrale d'acquisition et d'un ordinateur (*figure 11*). Ce dispositif permet de mesurer les paramètres suivants :

- Ensoleillement incident à la surface du module (G),
- La température ambiante (T_{amb}),
- L'humidité relative (HR),
- La température des modules (T),
- Le courant de court-circuit (I_{cc}),
- La tension de circuit-ouvert (V_{co})

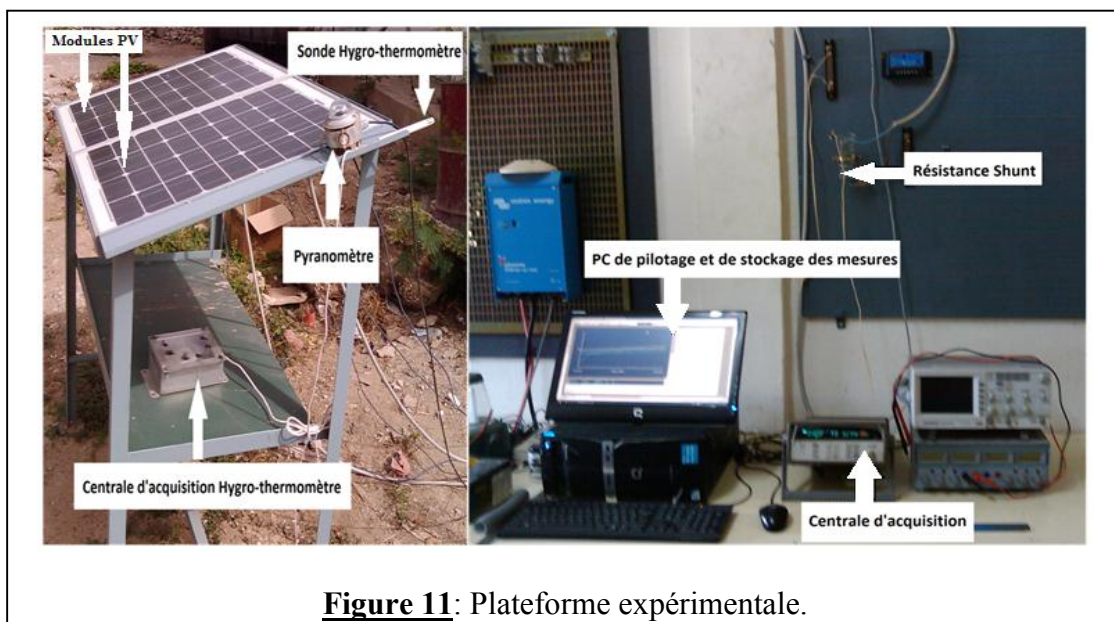


Figure 11: Plateforme expérimentale.

III.1.1 Les modules photovoltaïques

La plateforme regroupe deux modules photovoltaïques identiques monocristallins avec chacun une puissance crête de 30 Watts. Les modules sont inclinés d'un angle de 14° (latitude du lieu) par rapport à l'horizontal. Ils sont exposés à 1,5 mètre du sol. Ces modules sont fabriqués par la société Victron Energy. Les spécifications techniques des modules données par le constructeur sont consignées dans le tableau 6.

Tableau 6: Spécifications techniques des modules photovoltaïques.

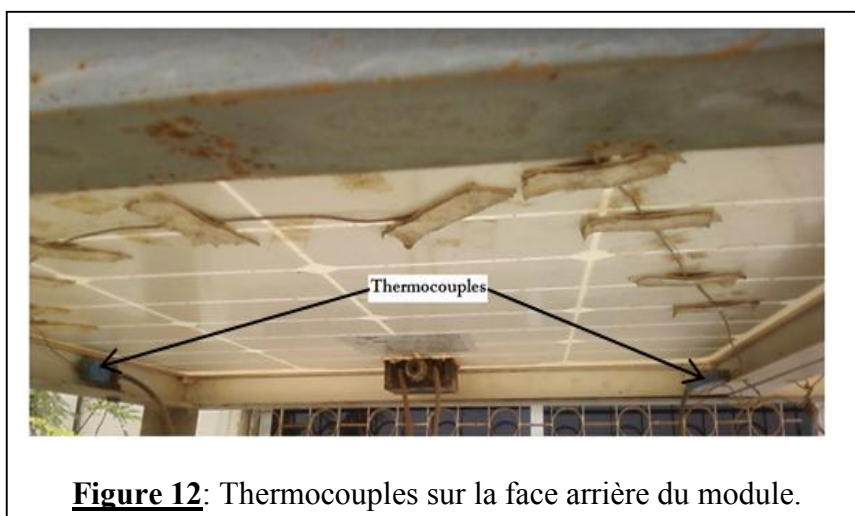
Paramètres	Valeurs	Unités
Puissance nominale ($P_{max,ref}$)	30	Watt
Courant nominal ($I_{max,ref}$)	1,85	Amp
Tension nominale ($V_{max,ref}$)	16,02	Volt
Courant de court-circuit (I_{cc})	2,24	Amp
Tension de circuit ouvert (V_{co})	22,5	Volt
Résistance série (R_s)	1,74	Ohm
Surface des cellules (S)	49	Cm ²
Nombre de cellules (N)	36	-
Facteur de forme (FF)	0,72	-

III.1.2 Le capteur d'ensoleillement

Le capteur d'ensoleillement utilisé pour mesurer le rayonnement global dans cette plateforme est le pyromètre. Il est mis au même niveau que les modules suivant la même inclinaison. Il donne une précision <2% et une résolution de 0,001 W.m⁻².

III.1.3 Les capteurs de température des modules

Les capteurs utilisés pour mesurer la température dans cette plateforme sont des thermocouples. Ils sont au nombre de deux. Ces thermocouples sont placés sur la face arrière de chaque module (*figure 12*). Ils donnent une précision de 1,5 °C et une résolution de 0,1 °C si la température est comprise entre (-40 °C et 200 °C) et de 1 °C si la température est > 200 °C.



III.1.4 Le capteur de température ambiante et d'humidité

Le capteur hygro-thermomètre est installé au niveau de la plateforme et permet de mesurer la température ambiante et l'humidité relative de l'air aux alentours des modules photovoltaïques. Ce capteur dispose d'une centrale d'acquisition qui lui permet d'enregistrer la température et l'humidité pendant une année complète en raison d'un pas de mesure d'une minute. Il a une précision de $\pm 0,1$ % pour l'humidité et $\pm 0,1$ °C pour la température ambiante et une résolution de 0,1 % pour l'humidité et 0,1 °C pour la température.

III.1.5 Le système d'acquisition

La centrale d'acquisition de type Agilent 34970A utilisée par la plateforme permet de mesurer le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert des modules. Les spécifications de ces paramètres sont données sur le *tableau 7*.

Tableau 7: Spécifications techniques de la centrale d'acquisition.

Paramètres	Plage de la tension	Plage du courant	Bande de fréquence
Tension	0-300V	-	3Hz-300kHz
Courant	-	0-1	3Hz-5kHz

La centrale d'acquisition est pilotée par le logiciel Agilent Benchlink Data Logger. Il permet de spécifier les voies, le pas de mesure et le pas d'acquisition. Un ordinateur, sur lequel est

installé le logiciel Benchlink Agilent Data Logger, est relié à la centrale d'acquisition pour permettre la collecte, le stockage et le traitement des données mesurées par la plateforme.

Les mesures des paramètres (ensoleillement, température ambiante, température des modules, humidité relative, courant de court-circuit et tension en circuit ouvert) sont effectuées toutes les minutes de manière continue.

III.2 Présentation des mesures

Nous avons obtenu les données de 2012 mesurées par la plateforme de mesures des différents paramètres cités précédemment pendant 365 jours avec un pas de 1 minute.

Pour les 365 jours, nous avons classé les données en fonction des mois. Pour chaque mois, nous avons considéré la journée type pour une meilleure représentativité des données météorologiques et électriques.

Pour chaque instant t donné d'un paramètre, nous avons sommé les valeurs mesurées des différents jours du mois et nous les avons divisé sur le nombre de jour de ce mois. Nous avons fait pareillement pour les autres mois.

Cette méthode nous permet de réduire les erreurs de mesures ; d'avoir des résultats plus satisfaisants. La méthode utilisée est donnée par la formule 3.3.

$$m_{p,t} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad 3.3$$

Avec m : la moyenne d'un paramètre P à un instant t donné.

x_i : la valeur obtenue pendant la journée à un instant t ;

i : représente le jour,

N : le nombre de jours concernant le Mois

Pour une meilleure visualisation des mesures, les figures suivantes illustrent le comportement des paramètres mesurés pendant les 12 mois.

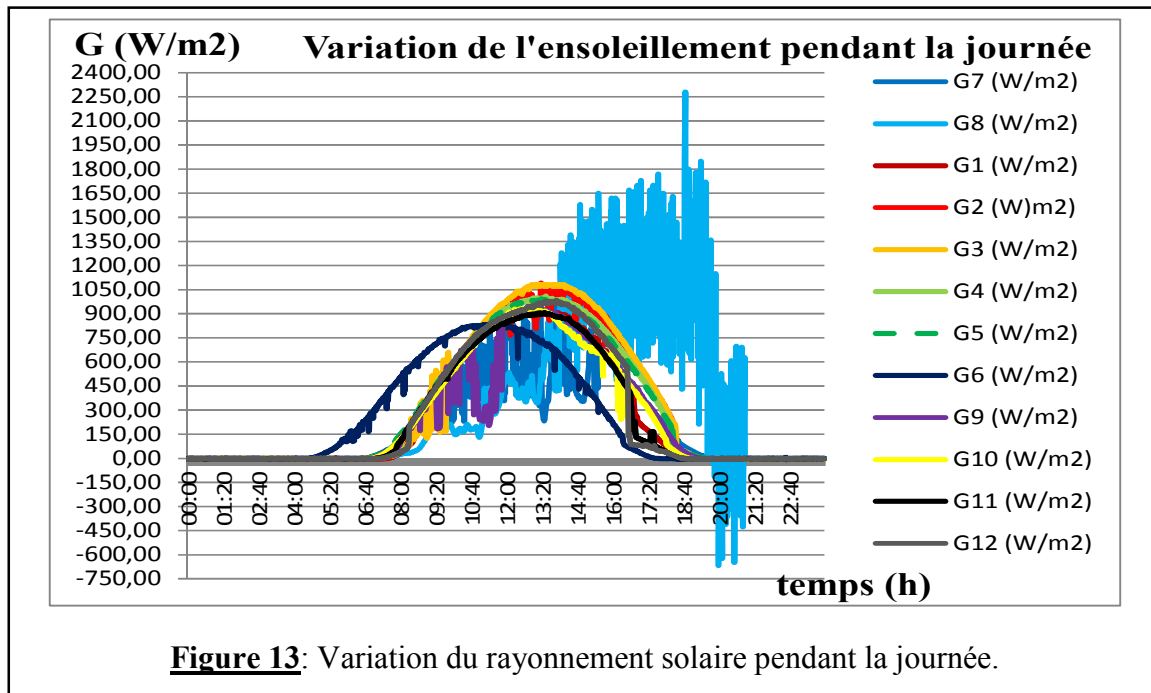
III.2.1 Présentation des données météorologiques

III.2.1.1 Le rayonnement solaire

Les rayonnements solaires sont réguliers pour certains mois. Cependant, les rayonnements solaires G3, G4, G5 correspondant aux mois 3, 4, 5 respectivement, présentent des maximums

plus élevés environ 1050 W/m^2 . Ces mois correspondraient à des périodes où les rayonnements solaires restent plus intenses au Sénégal (*figure 13*).

Les allures des rayonnements solaires G7 et G8 correspondant aux mois 7 et 8 respectivement, présentent des fluctuations importantes. Ces fluctuations sont dues à la présence de passages nuageux au niveau de l'atmosphère.



III.2.1.2 Température ambiante

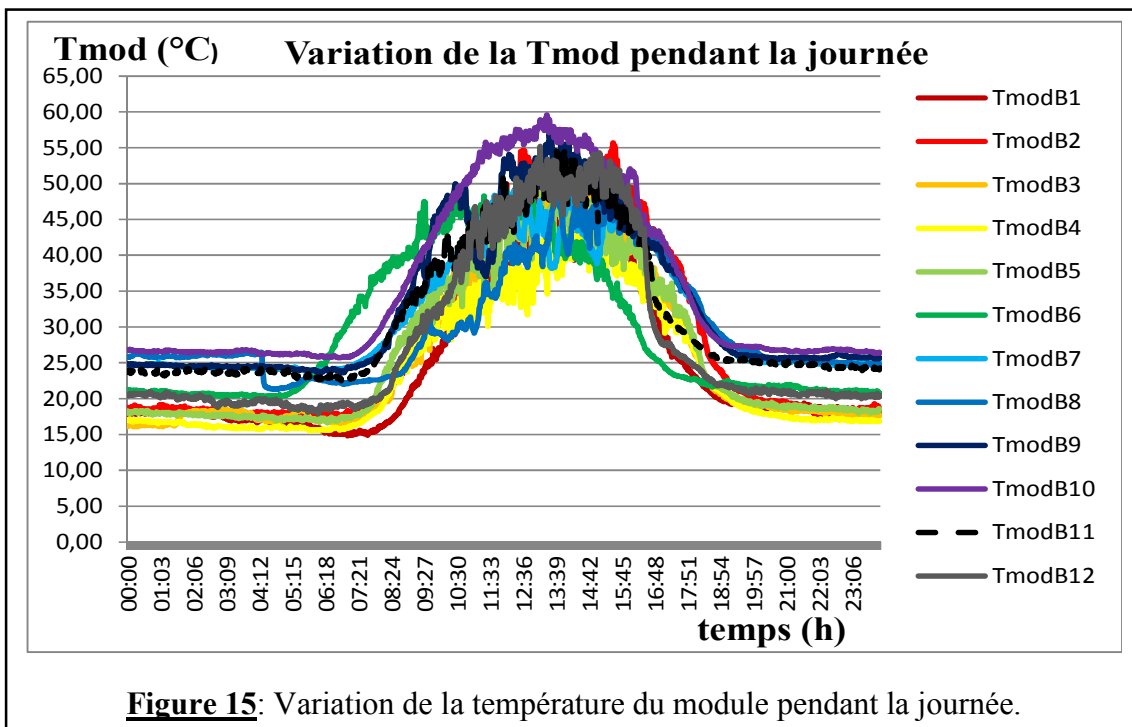
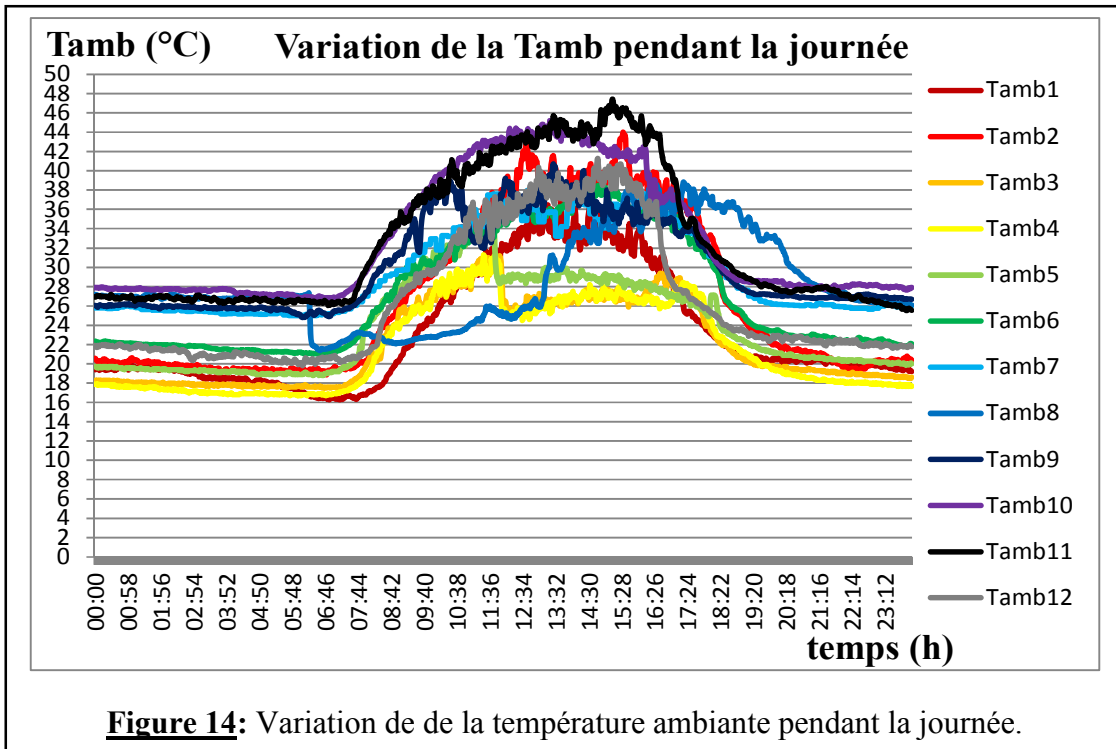
Les allures des températures ambiantes Tamb10 et Tamb11 correspondant aux mois 10 et 11 respectivement, présentent des maximales plus élevées environ 48°C . Ensuite, les allures des températures ambiantes Tamb3, Tamb4 et Tamb5 présentent des maximales plus faibles $\sim 22 - 28^\circ\text{C}$.

Les allures des températures ambiantes Tamb7 et Tamb8 correspondant aux mois 7, et 8, présentent des variations. Ces variations sont dues à la présence des perturbations remarquées au niveau de l'ensoleillement durant ces mois (*figure 14*).

III.2.1.3 La température du module

Les allures des températures du module des différents mois ont une même évolution avec les allures des températures ambiantes. Cependant, le maximum de la température du module (*figure 15*) est plus élevé que celui de la température ambiante (*figure 14*). L'augmentation de la température du module est due principalement au phénomène de l'effet de serre. Par

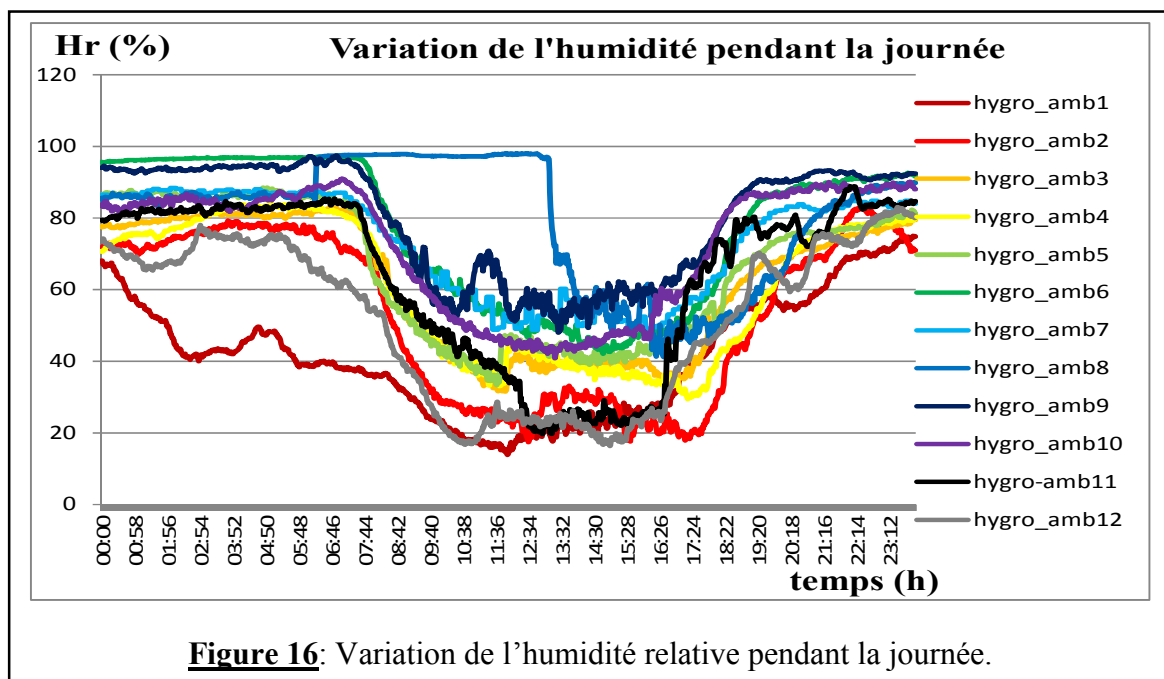
exemple la température ambiante maximale Tamb10 est environ 45 °C alors que celle du module est environ 60 °C pour Tmod10.



III.2.1.4 Humidité relative

L'humidité relative est définie comme étant le rapport entre la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la vapeur d'eau que peut contenir l'air. Elle est inversement proportionnelle à la température ambiante.

L'humidité relative est plus maximale pendant la nuit (environ 92 %) que pendant la journée (environ 60 %). Pendant la journée, l'air est sec à cause de la présence des rayonnements solaires. Ces rayonnements solaires permettent l'évaporation des molécules d'eau existant dans l'air.



III.2.2 Présentation des données électriques

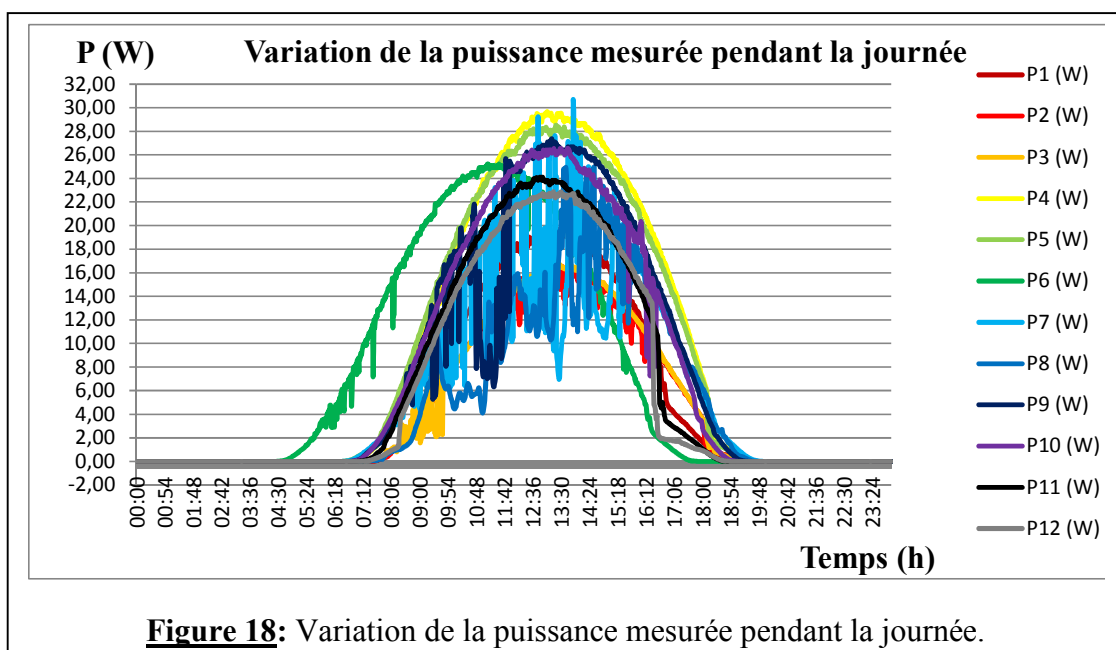
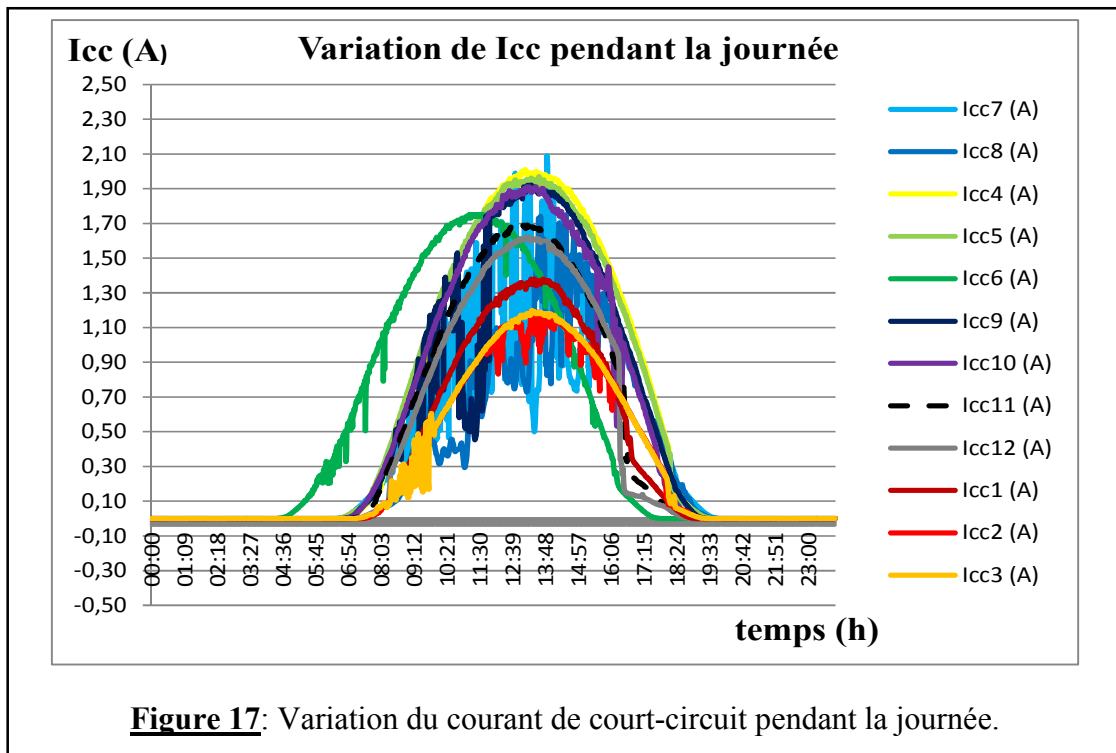
III.2.2.1 Courant de court-circuit et la puissance mesurée

Les figures 17 et 18 illustrent les variations du courant de court-circuit et de la puissance mesurée pendant la journée.

Les mesures du courant de court-circuit et de la puissance mesurée suivent les mêmes variations que celles de l'ensoleillement. Plus les rayonnements solaires sont intenses, plus les valeurs du courant de court-circuit et de la puissance mesurée sont élevées.

Les perturbations remarquées au niveau de l'ensoleillement (mois 7 et 8) se répercutent au niveau du courant de court-circuit et de la puissance mesurée (figure 17 et figure 18).

En conclusion le courant de court-circuit et la puissance mesurée dépendent de l'ensoleillement.



III.2.2.2 Tension du circuit ouvert

La tension de circuit ouvert dépend du gap du matériau, de l'éclairement de la cellule. Pendant la nuit, la tension de circuit ouvert reste faible (2 volts). En effet, la nuit est obscure or la cellule a besoin de la lumière pour augmenter la tension. Pendant la journée où règne la lumière, la tension de circuit ouvert reste constant environ 19 à 20 volts (*figure 19*).

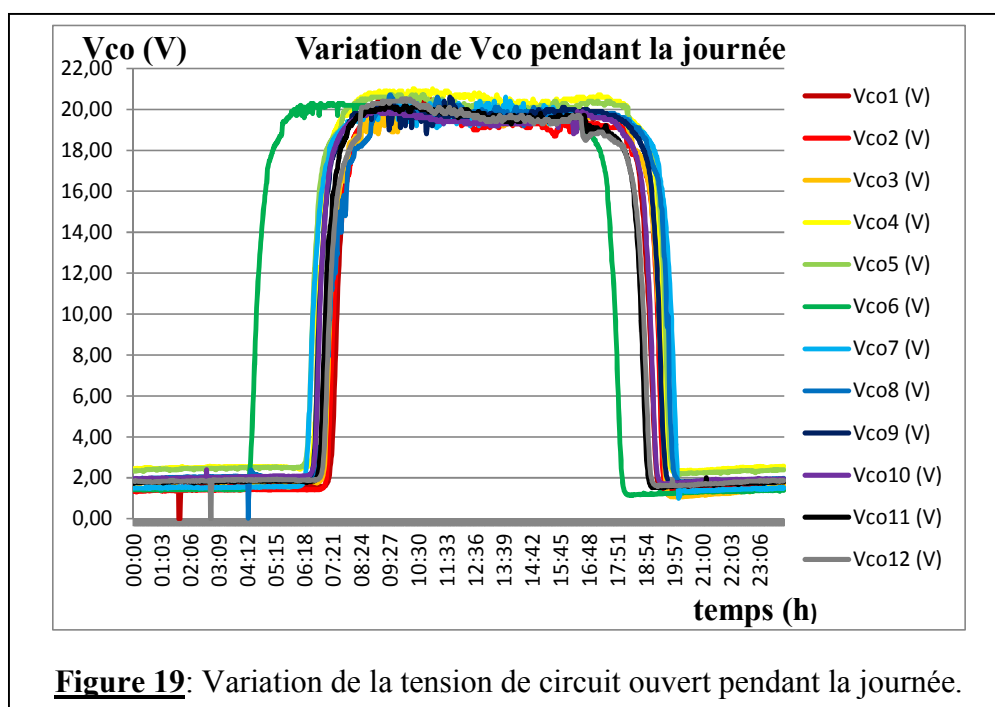


Figure 19: Variation de la tension de circuit ouvert pendant la journée.

III.3 Résultats et discussion

III.3.1 Détermination des coefficients des modèles

- **Les coefficients a, b, c et d**

Les coefficients a, b, c et d sont déterminés en utilisant la méthode suivante en se basant sur l'équation 2.31 et les données mesurées par la plateforme.

- ✓ **Détermination de a et c**

On choisit deux points dans les données qui ont les mêmes valeurs de température mais qui n'ont pas les mêmes valeurs de l'ensoleillement et de la puissance.

On remplace ces valeurs dans l'équation 2.31. Nous aurions deux équations avec 4 inconnus. On utilise la méthode d'addition pour simplifier les coefficients b et d. Enfin, on obtient, une équation avec deux inconnus a et c.

On reprend la même chose mais en changeant les valeurs de la température, de l'ensoleillement et de la puissance.

En tout, nous aurions deux équations avec deux inconnus a et c. Ensuite, on résout ces équations.

Les valeurs de ces coefficients doivent être positives. Si vous trouvez des valeurs négatives, il faut encore choisir d'autres points mais en respectant la même procédure.

✓ Détermination de b et d

Cette fois ci, on choisit deux points dans les données qui ont les mêmes valeurs de l'ensoleillement mais les valeurs de la température et de la puissance doivent être différentes.

On remplace ces valeurs dans la même équation 2.31. Nous aurions deux équations avec deux inconnus b et d. On utilise la méthode d'addition pour déterminer ces coefficients. Mais ces coefficients doivent être positifs.

- Les coefficients α_0 , β_0 , μ_{Pmax} , δ sont déterminés en utilisant leurs formules au niveau du tableau 6 avec l'appui des données.
- Les constantes C1 et C2 sont déterminées en utilisant les équations 2.25 et 2.26. Ces équations sont en fonction que des paramètres de référence donnés par le fabricant.

Les valeurs de ces coefficients sont résumées dans le *tableau 10* dans notre cas.

Tableau 8: Coefficients des différents modèles.

Coefficients	Modèles	Valeurs
Coefficient de température de la puissance μ_{Pmax}	Osterwald et Hatzargyriou	0,0054 W/°C
Coefficient de température de la tension β_0	Kroposki et Borowy et Salameh	-0.0045 V/°C
Coefficient de température du courant α_0	Kroposki et Borowy et Salameh	0,0052 A/°C
Coefficient de correction δ	Kroposki	0,001 °C ⁻¹
Les coefficients a, b, c et d	Benchmark	0,00042 ; 0,003 ; 0,003 et 0,44
Les constantes C1 et C2	Borowy et Salameh	0,0023 ; 0,1648

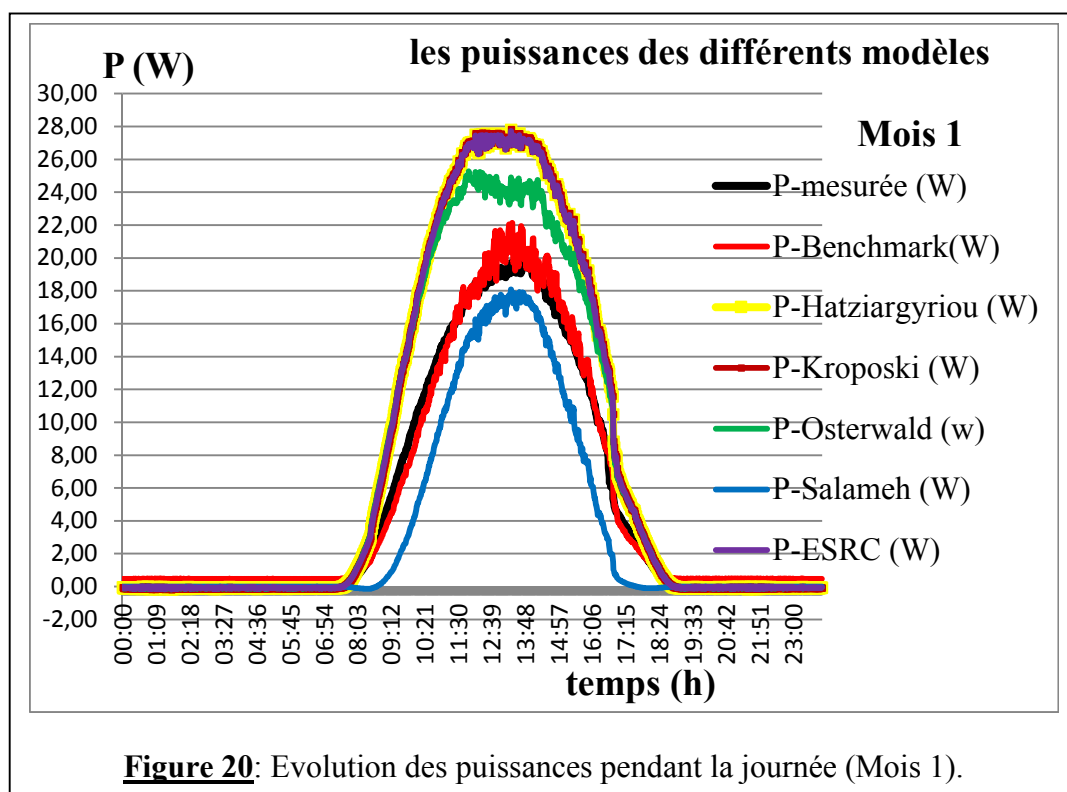
III.3.2 Comparaison entre la puissance mesurée et les puissances simulées

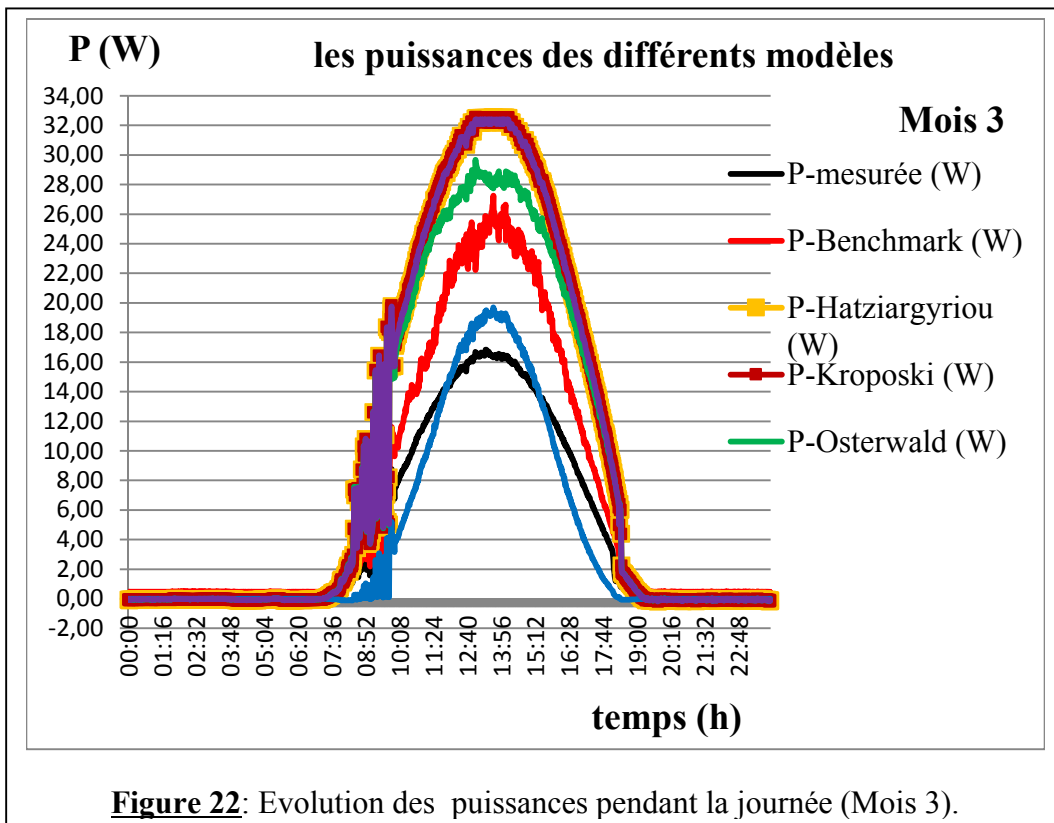
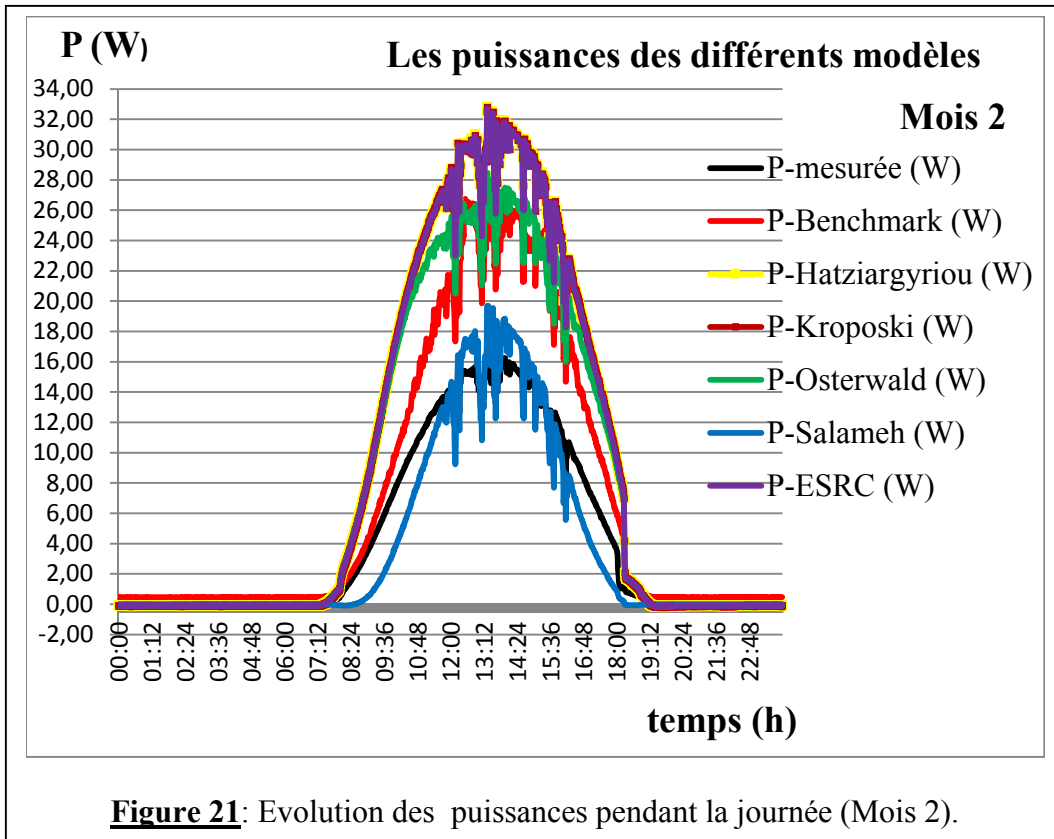
Les puissances obtenues à partir des modèles ainsi que la puissance mesurée ont été représentées en fonction du temps. En première observation, nous constatons que la puissance mesurée (couleur noire) correspond à celle de la littérature (*figure 5*). D'abord, nous avons un comportement non linéaire, ensuite la puissance maximale est obtenue lorsque le soleil est au zénith.

En second observation, nous constatons que les allures des puissances obtenues à partir des modèles, en fonction du temps suivent les mêmes évolutions que celle de la puissance mesurée. Cependant, nous remarquons un décalage au niveau de la puissance maximale entre les puissances obtenues de certains modèles et la puissance mesurée. Ce décalage pourrait s'expliquer du fait que dans ces modèles, nous notons l'absence de certains paramètres déterminant dans la production de l'énergie photovoltaïque au niveau des sites d'implantations à savoir la vitesse du vent, l'humidité relative, la poussière etc.

Au niveau du mois 7 et du mois 8, on note un écart important entre la courbe des modèles et celle mesurée. Ce constat a été remarqué au niveau des données de mesure des paramètres (le rayonnement solaire, le courant de court-circuit, la puissance mesurée...).

Les allures des modèles ainsi que celle de la puissance mesurée suivant les différents mois, sont représentées sur les figures suivantes.





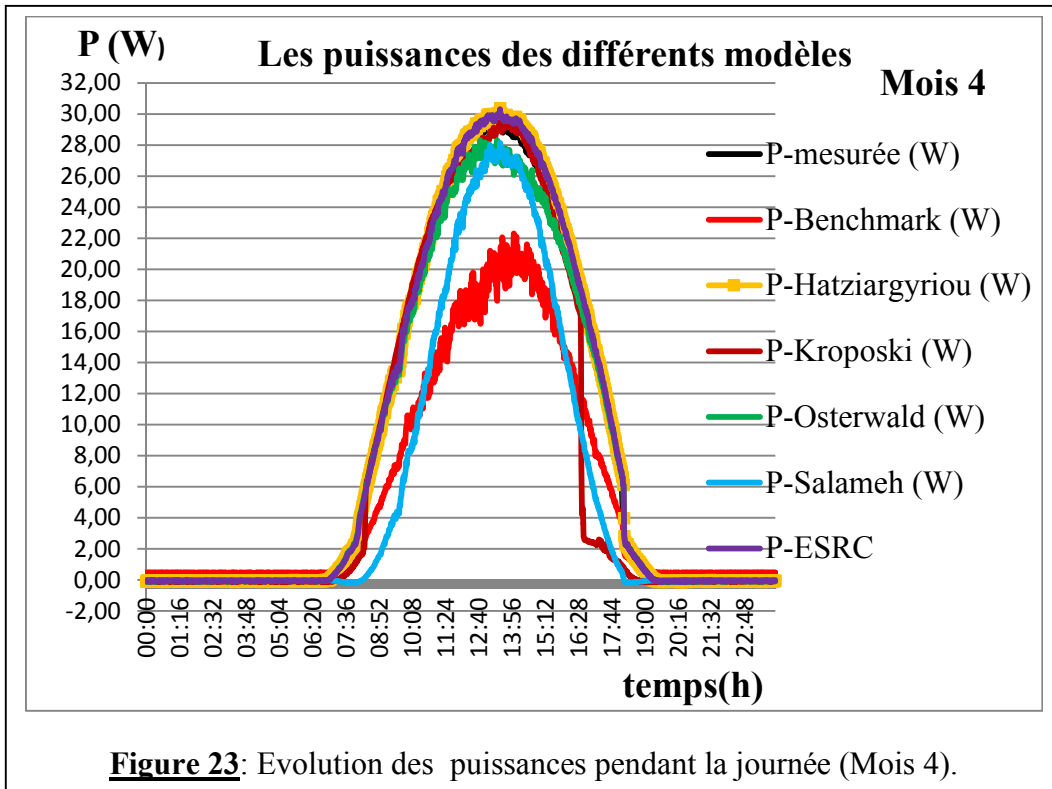


Figure 23: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 4).

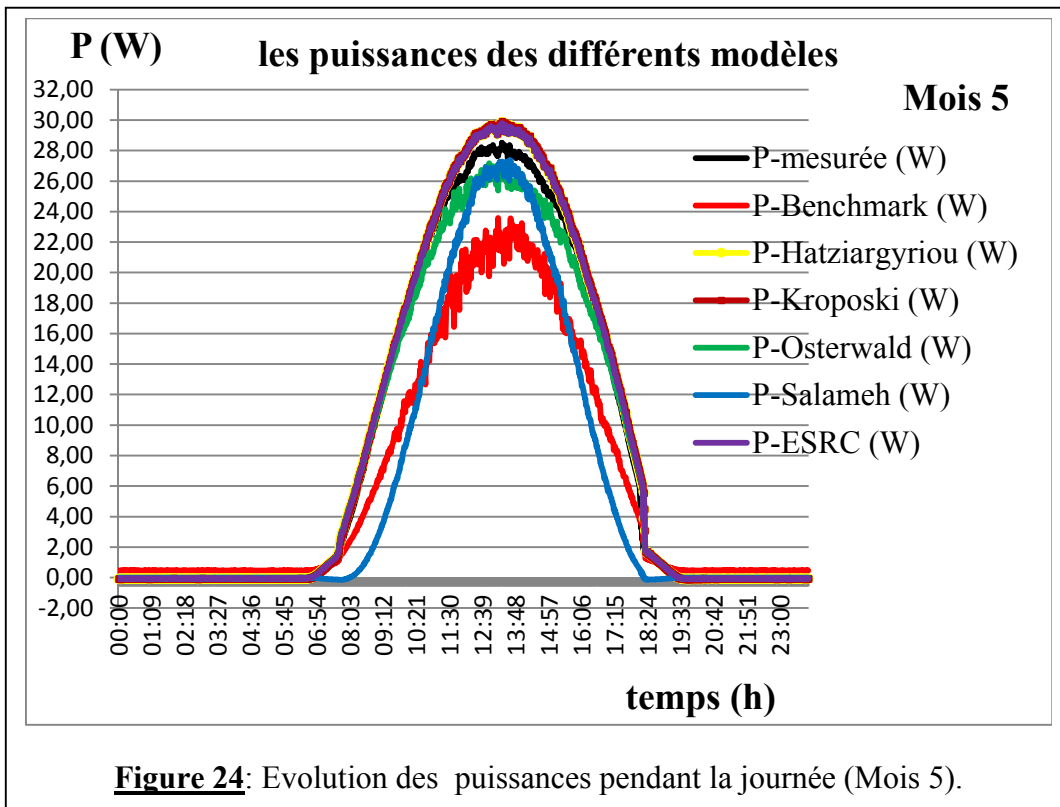
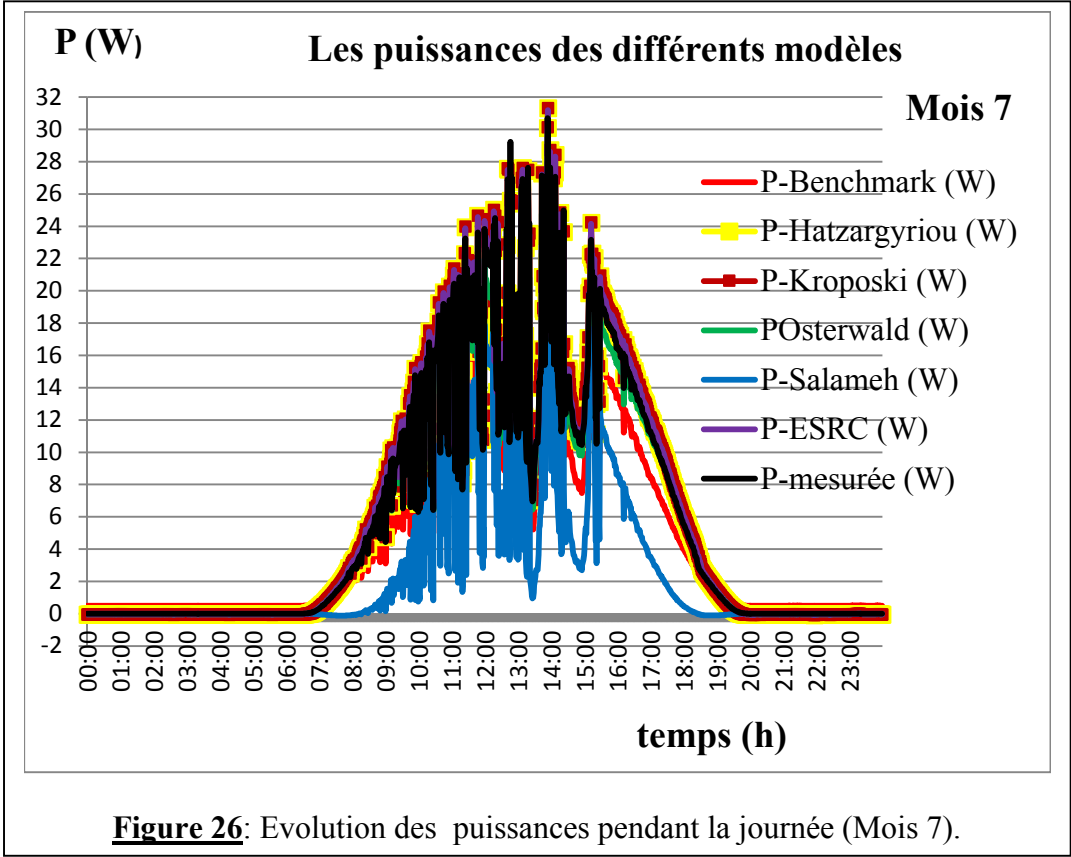
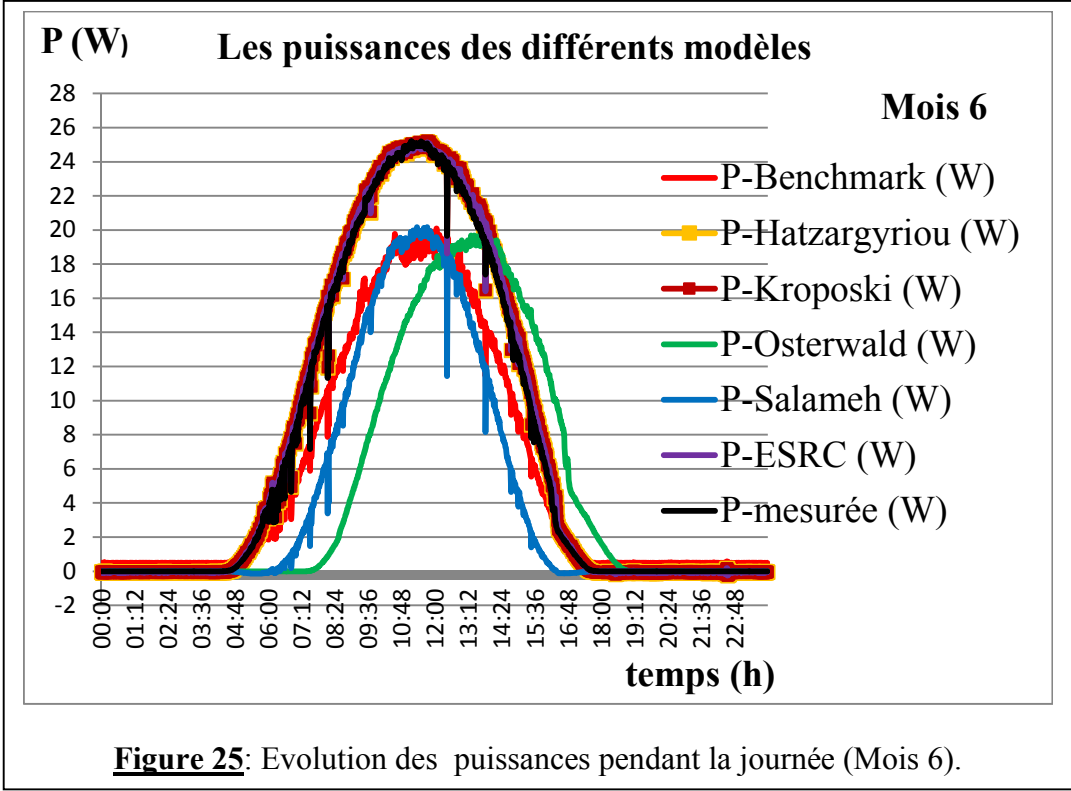
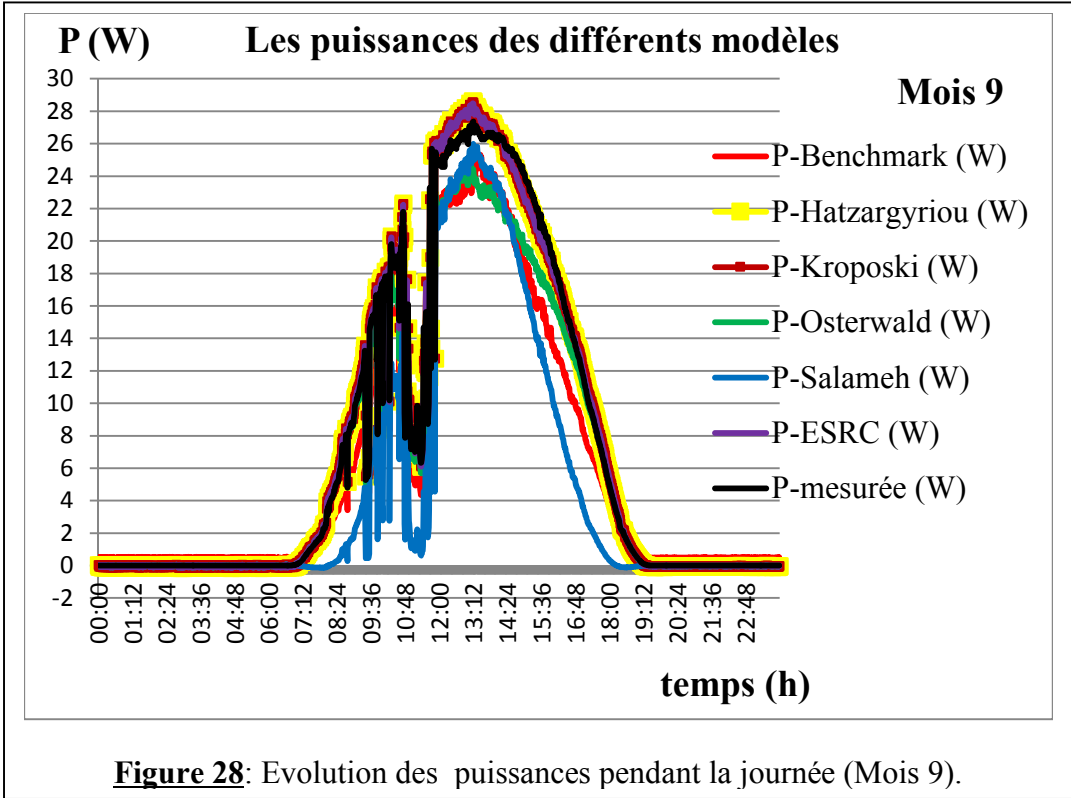
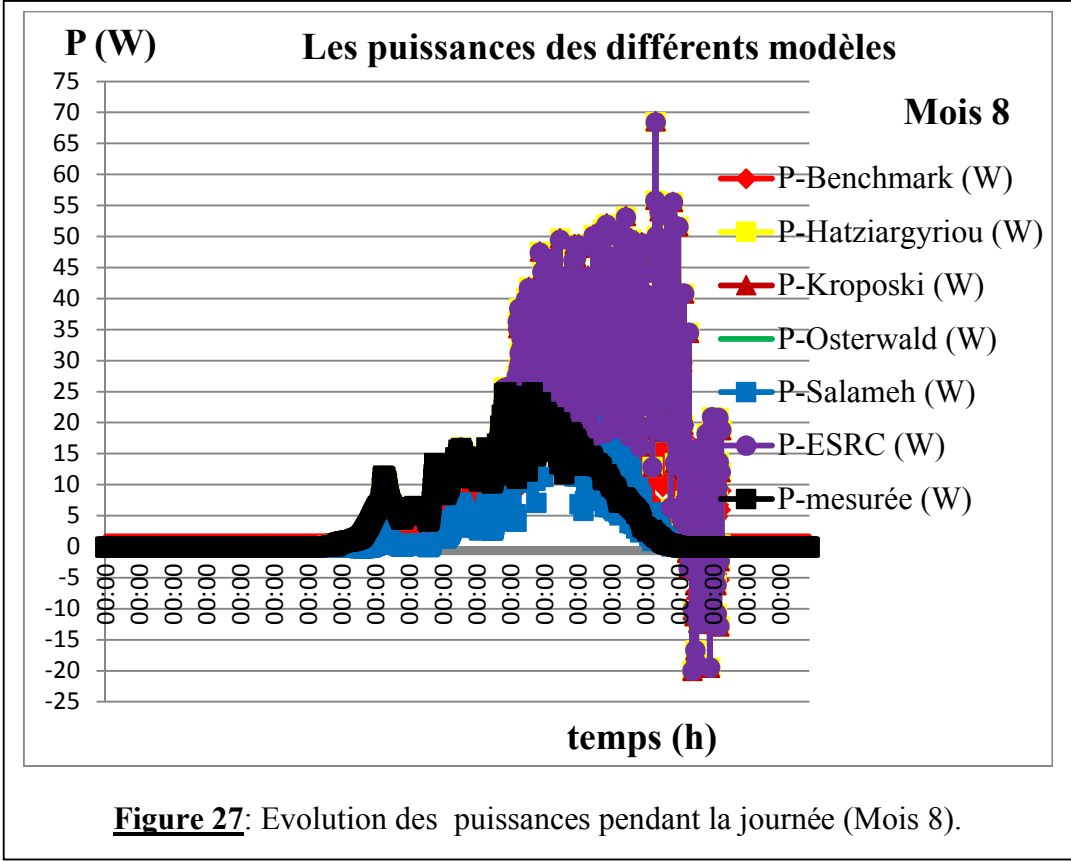
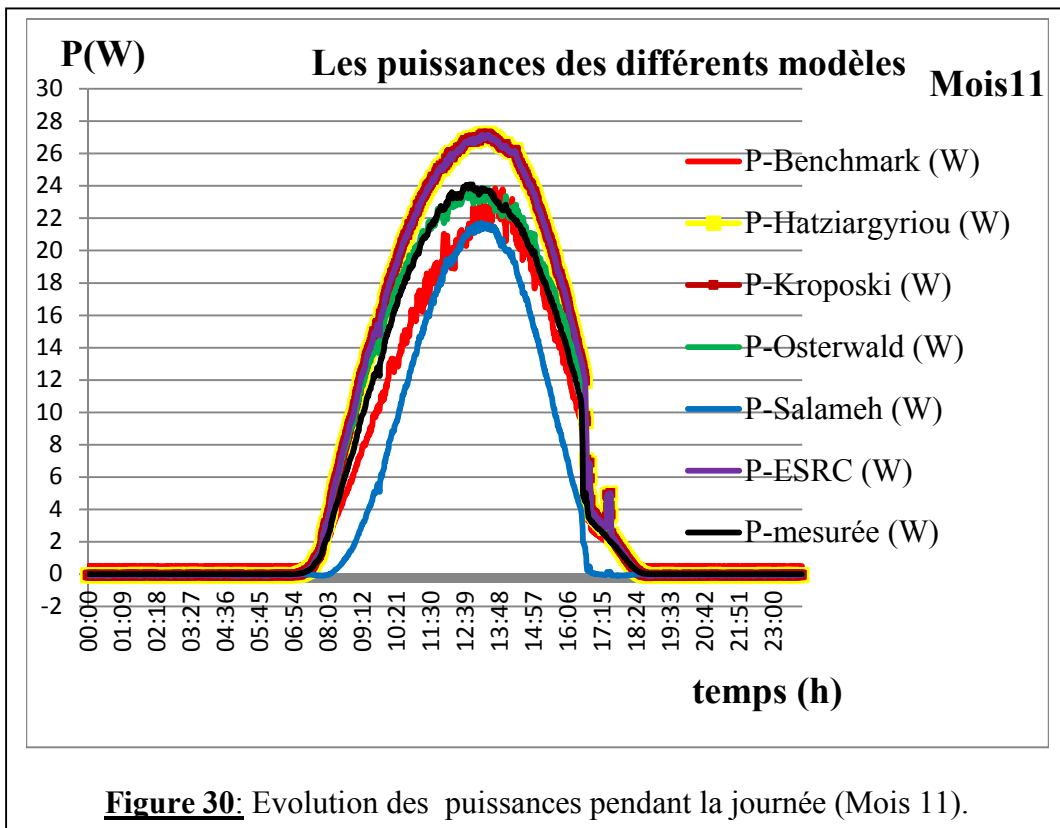
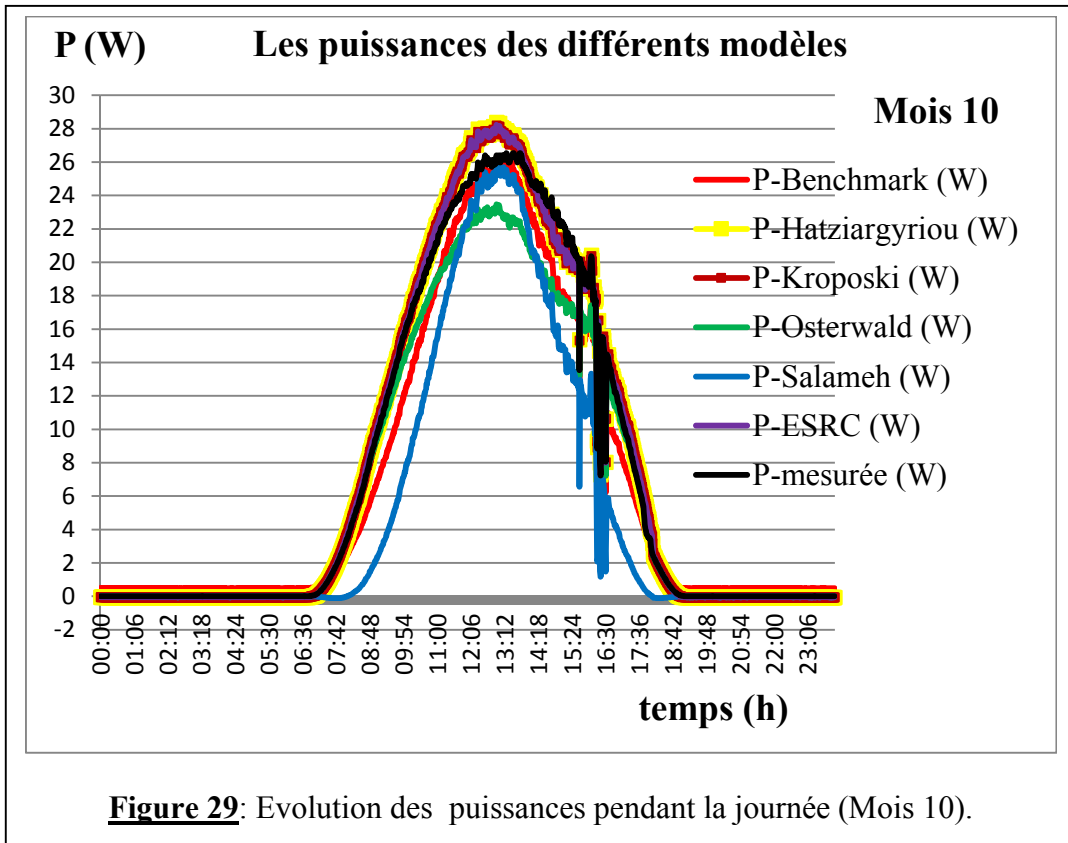
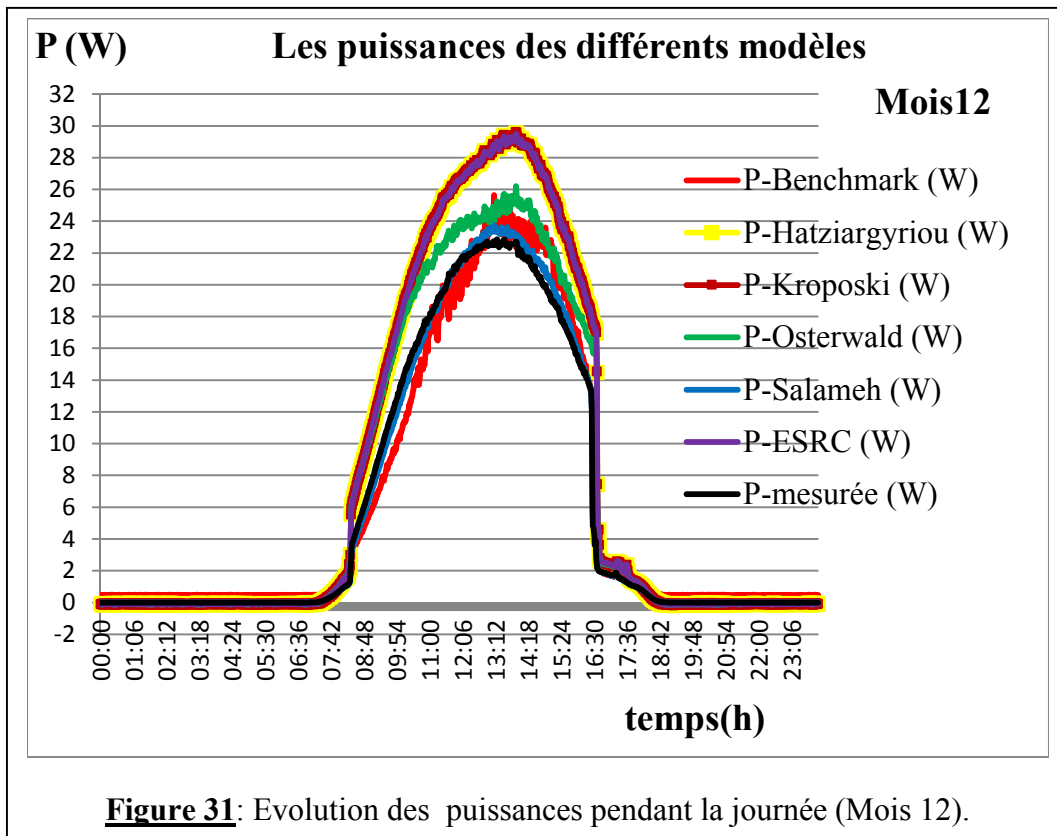


Figure 24: Evolution des puissances pendant la journée (Mois 5).









Dans la suite, nous allons comparer les modèles en utilisant les résultats statistiques.

III.3.3 Qualification des modèles

III.3.3.1 Présentation des coefficients statistiques

Pour qualifier la fiabilité de ces modèles, nous utilisons les résultats statistiques : l'erreur quadratique moyenne et le coefficient de détermination.

III.3.3.1.1 L'erreur quadratique moyenne RMSE

L'erreur quadratique moyenne est très utile pour comparer plusieurs estimations. Elle permet une analyse comparative des performances des modèles théoriques. Sa valeur la plus faible indique le modèle le plus performant. Son équation est donnée par la relation suivante.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{mi})^2}{n}} \quad 3.1$$

Avec x_i : la valeur théorique, x_{mi} : la valeur réellement mesurée, n : le nombre de valeurs mesurées.

III.3.3.1.1 Le coefficient de détermination

Le coefficient de détermination est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. Il mesure l'adéquation entre le modèle et les données mesurées. Ces valeurs sont comprises entre 0 et 1. La valeur la plus proche de 1 indique le modèle le plus performant. Son équation est donnée par la relation suivante.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - \bar{x}_{mi})^2} \right) \quad 3.2$$

Avec \bar{x}_{mi} : la valeur moyenne mesurée

III.3.3.2 Résultats des coefficients statistiques

Les résultats des coefficients statistiques permettant de qualifier la fiabilité des modèles de générateurs photovoltaïques sont résumés dans le *tableau 9*. Ces résultats permettent d'avoir une comparaison nettement claire entre les modèles et les valeurs mesurées afin de choisir les modèles les plus adaptés pour prédire la productivité des modules photovoltaïques dans un site quelconque tout en connaissant les paramètres météorologiques.

Le modèle d'ESRC présente de bons résultats (*tableau 9*) mais il sera écarté pour le choix du modèle le plus adéquat. Ce modèle reste valable dans le cas où la variation de la température du module est négligée. Il tient en compte de la variation de l'ensoleillement seulement. Dans notre cas, on cherche le modèle qui présente le maximum de paramètres météorologiques même si la recherche est actuellement muette pour intégrer l'humidité dans les modèles, la vitesse du vent, la poussière etc.

Les valeurs en couleur rouge indiquent le modèle le plus performant concernant chaque mois.

Tableau 9: Les résultats de RMSE et de R².

Mois1						
	Benchmark	Hatziargyriou	Kroposki	Osterwald	Salameh	ESRC
RMSE	0,71206	4,2900	4,3146	3,3031	2,4498	4,2609
R²	0,9902	0,8349	0,8342	0,8827	0,8327	0,8365
Mois2						
RMSE	4,3439	7,6595	7,6524	5,9498	1,5524	7,6034
R²	0,7724	0,5803	0,5820	0,6710	0,9324	0,5831
Mois3						
RMSE	3,7691	8,0261	8,0437	6,5131	1,6091	7,9766
R²	0,8231	0,5830	0,5831	0,6576	0,9381	0,5853
Mois4						
RMSE	4,9465	0,4100	0,4315	0,7779	4,2396	0,3821
R²	0,5405	0,9987	0,9985	0,9946	0,8008	0,9989
Mois5						
RMSE	3,7559	0,7013	0,7176	0,8517	4,0649	0,6625
R²	0,7769	0,9962	0,9960	0,9930	0,8108	0,9965
Mois6						
RMSE	3,0575	0,4162	0,4379	1,0701	4,4622	0,4015
R²	0,8050	0,9981	0,9979	0,9844	0,6267	0,9982
Mois7						
RMSE	2,2423	0,6623	0,6691	0,8024	4,7142	0,6421
R²	0,8394	0,9927	0,9925	0,9865	0,0088	0,9930
Mois8						
RMSE	6,5871	12,4209	12,4504	11,4333	4,0645	12,3874
R²	0,5185	0,2687	0,2689	0,2752	0,6920	0,2691
Mois9						
RMSE	2,3632	0,5176	0,5039	1,5703	4,1495	0,4999
R²	0,9100	0,9972	0,9974	0,9659	0,6920	0,9974
Mois10						
RMSE	1,6691	0,6669	0,6293	1,7319	3,8745	0,6307
R²	0,9641	0,9957	0,9962	0,9589	0,7941	0,9961
Mois11						
RMSE	1,3828	1,8850	1,8824	0,7852	3,1756	1,8393
R²	0,9693	0,9666	0,9668	0,9925	0,8184	0,9680
Mois12						
RMSE	1,3046	3,3786	3,3896	1,9577	0,3848	3,3461
R²	0,9783	0,9090	0,9088	0,9605	0,9980	0,9103

D'après les résultats statistiques, nous constatons que le modèle de Benchmark est plus performant au niveau du mois 1 (*tableau 9*).

Le modèle de Salameh présente des bons résultats par rapport aux autres modèles au niveau du mois 2, mois 3, mois 8 et mois 12 (*tableau 9*).

Tandis qu'au niveau du mois 4, mois 5, mois 6 et mois 7, le modèle de Hatziargyriou est plus performant que les autres modèles, même si on note que les modèles de Kroposki, d'Osterwald présentent des bons résultats (*tableau 9*).

Au niveau du mois 9 et du mois 10, le modèle de Kroposki est plus performant et en fin au niveau du mois 11, c'est celui d'Osterwald qui est plus performant.

Pour évaluer le modèle le plus adéquat, nous procédons au calcul du pourcentage du modèle le plus représentatif pour savoir le nombre de fois que le modèle est performant parmi les 12 mois.

Le calcul du pourcentage du modèle le plus représentatif est résumé dans le *tableau 10*.

Tableau 10: Calcul des pourcentages.

Modèles	Pourcentage (%)
Benchmark	8,33
Hatziargyriou	33,33
Kroposki	16,66
Osterwald	8,33
Borowy et Salameh	33,33

D'après le calcul du pourcentage du modèle le plus représentatif, les modèles de Hatziargyriou et de Borowy et Salameh sont plus adéquats.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la plateforme de mesures et les résultats de simulation.

Après le traitement des données, nous avons représenté les données des paramètres météorologiques et électriques pour les 12 mois. De plus, la variation de la puissance en fonction du temps a été représentée pour chaque mois.

Nous notons une même évolution entre la puissance mesurée et celles stimulées en fonction du temps. Cependant, au niveau du point maximal, nous notons un écart entre la puissance mesurée et certains modèles.

Les résultats statiques ont permis de déterminer les modèles les plus adaptés en se basant sur le calcul du pourcentage représentatif. Les modèles de Hatziargyriou et de Borowy et Salameh sont plus adaptés avec chacun 33.33 %.

La conclusion générale et la référence bibliographique termineront ce travail.

Conclusion générale

Ce travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude comparative des modèles de générateurs photovoltaïques. Dans le premier chapitre, nous avons étudié la revue bibliographique de la filière photovoltaïque. En effet, la technologie à base du silicium cristallin est plus utilisée dans le marché photovoltaïque.

Ensuite, nous avons fait la revue sur les différents modèles de générateurs photovoltaïques. Notre travail s'est focalisé sur les modèles mathématiques permettant de calculer la puissance à la sortie du module photovoltaïque en fonction des paramètres météorologiques (Eclairement solaire, température du module etc).

Pour la validation des modèles retenus, nous avons utilisé les données recensées par la plateforme de mesures expérimentales.

Nous avons représenté aussi les données météorologiques et électriques pendant les 12 mois considérés en journée type.

D'après les résultats de simulation, les puissances obtenues à partir des modèles retenus suivent la même allure avec la puissance mesurée. En effet, nous avons noté des perturbations sur certains mois.

Les études statistiques ont permis de qualifier et de choisir les modèles les plus adaptés. Parmi les modèles retenus, nous avons : le modèle de Benchmark et le modèle de Borowy et Salameh. Cependant, il nous est très difficile de conclure sur le modèle le plus adapté.

En perspective :

Ce travail nous permettrait de maîtriser la production de l'énergie photovoltaïque en connaissant les paramètres météorologiques et de contribuer à la réussite des projets photovoltaïques. C'est pour cette raison qu'il nous faut une plateforme de mesures expérimentales à l'Université Assane Seck de Ziguinchor pour faire des mesures sur une longue durée et des études supplémentaires afin de conclure sur ces modèles.

Cependant, il serait intéressant d'appliquer ces modèles sur les mois moins perturbés.

Référence bibliographique

- [1] Nouar, A. **2010**. « Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales ». Page 1-3
- [2] Djamil, B. **2007**. « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque : application au pompage ». Page 3-6
- [3] Bensalem, S. **2011**. « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ». Page 11-13
- [4] Radbeh, R. **2008**. « Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Page 8-9
- [5] Aissa, M. **2011**. « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque ». Page 6-7
- [6] Mounira, D. **2013**. « Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) ». Page 11-12
- [7] <http://www.hallou-solaire.com/usermedia/document-634234564258437500-2.pdf>
- [8] Simon, K.N. **2012**. « Comparison of predictive models for photovoltaic module performance under tropical climate », volume 10, page 245-256.
- [9] Tranain, C. **2006**. « Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques ». Page 26-28.
- [10] Miquel, C. **2009**. « Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental ». Page 12-14.
- [11] Stéphane, P. **2009**. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Page 17-30.
- [12] Belhocine, F. N. « Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques à base des matériaux organiques ». Page 10-11.
- [13] Navarro, J. M. **2008**. « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Page 15-17.

- [14] Kamelia, H. 2012. « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ». Page 15-17.
- [15] Nouar, A. 2010. « Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales ». Page 24-27.
- [16] Zakaria, B. 2009. « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire ». Page 34-35.
- [17] Garcia-Valverde, R. 2011. « Optimized method for photovoltaic-water electrolyser direct coupling », volume 36, page 10574-10586.
- [18] Kamelia, H. 2012. « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ». page 27-28
- [19] Mohammed, B. 2007. » Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome ». Page 42-45.
- [20] Osterwald, C. R. 1986. "Translation of Device Performance Measurements to Reference Conditions", Device Performance, Pages 269-279.
- [21] Skoplaki, E et Palyvos, J.A. « On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations », volume 83, page 614-624
- [22] Simon, K.N. et *al.* 2012. « Comparison of predictive models for photovoltaic module performance under tropical climate », volume 10, page 245-256.
- [23] Kroposki, B. et *al.* 1994. "A comparison of photovoltaic module performance evaluation methodologies for energy ratings," In: Proceedings of the 1st World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion", Hawaii, USA. pp. 858-862.

Résumé

Ce travail a porté sur la validation et la comparaison de différents modèles de générateurs photovoltaïques dans le but d'identifier ceux qui sont plus adéquats pour notre environnement d'étude. Ainsi, ils nous permettront de prédire la production des générateurs photovoltaïques pour un site donné à partir de ses paramètres météorologiques (ensoleillement, température, humidité, ...) et des caractéristiques des modules photovoltaïques utilisés. La revue bibliographique a permis de recenser et de classifier les différents modèles. D'une part, nous avons les modèles qui intègrent les paramètres électriques uniquement et ceux qui tiennent compte des paramètres météorologiques d'autre part.

Pour la validation des modèles retenus, des données mesurées sur une plateforme installée à l'école supérieure polytechnique de Dakar ont été utilisées.

Ensuite les différents modèles retenus sont qualifiés et comparés entre eux à partir des paramètres statistiques tels que l'erreur quadratique (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2).

Ce travail a montré que le modèle de Hatziargyriou et celui de Borowy et Salameh sont les plus adéquats pour prédire la production d'un générateur photovoltaïque installé sur le site d'étude.

Mots clés : Photovoltaïque, générateurs, modèles, puissance, paramètres météorologiques.

Abstract

This work focused on the validation and comparison of different models of photovoltaic generators in order to identify those that are most appropriate for our study environment. Thus, they enable us to predict the production of photovoltaic generators for a given site from its meteorological parameters (sunshine, temperature, humidity ...) and the characteristics of the used photovoltaic modules. The literature review helped to identify and classify the different models. On the one hand, we have the models that integrate the electrical parameters and only those that reflect the meteorological parameters on the other.

For the validation of the selected models, measured data on a platform installed at the Polytechnic High School of Dakar were used.

Then the different models chosen are qualified and compared them based on statistical parameters such as mean square error (RMSE) and the coefficient of determination (R^2).

This work has shown that the model Hatziargyriou and of Borowy and Salameh are the most appropriate to predict the production of a photovoltaic generator installed on the study site.

Keywords: Photovoltaic, generators, models, power, meteorological parameters.