

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



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Sciences appliquées

Département de Génie des Procédés

Mémoire fin d'études

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et technologies

Filière: Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Présenté Par :

BEN ABD ELLAH ABD EL HADI

NOUI ABDENNOUR

Thème :

**Etude technique des cellules solaires de troisième
génération appliquée à la région saharienne**

Soutenu publiquement le : 14/06/2023

Devant le jury composé de:

Sellami Med Hassen

Professeur (UKM Ouargla)

Président

CHENNOUF Nassreddine

Professeur (UKM Ouargla)

Examineur

Bouziane Khadidja

MCB (UKM Ouargla)

Encadreur

Année Universitaire : 2022/2023

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

Ma mère : pour tous les sacrifices qu'elle fait pour moi, l'amour et le soutien

Qu'elle m'apporte chaque jour.

Mon père : parce qu'il a été là depuis le début. Il m'a toujours soutenue et tiré

Vers le haut. Je ne pourrais jamais dire à quel point cet homme est grand.

Mon frère et ma sœur : pour la joie de vivre que vous m'apportez et votre

Amour, je vous dis merci.

A mes chères copines : Bouchenne Abdelaziz

A tous mes professeurs et collègues

Abdelhadi.

Dédicaces

*Louanges à Allah qui facilite les débuts, achève les fins et atteint les objectifs.
Louanges à Allah, aucun effort n'a été accompli sans Son aide, et aucune quête
n'a été conclue sans Sa grâce.*

*À cette femme qui m'a élevé et m'a enseigné, à la personne qui a tenu ma main
fermement depuis mon enfance et n'a jamais permis que je tombe, à celle qui a
travaillé, veillé, lutté et sacrifié pour mon bonheur, et qui a toujours été mon
soutien constant, à ma chère mère Hadjira, mes mots sont impuissants pour te
remercier, ma bien-aimée, à toi je dédie cette humble œuvre.*

*À cet être admirable qui souhaitait toujours que ses yeux se posent sur ma
réalisation en un jour comme celui-ci, à celui qui était enveloppé de poussière
avant que son désir ne se réalise, à la rivière d'amour qui coule dans mon âme,
à mon cher père.*

*À ceux que j'aime et dont l'amour coule dans mes veines, à ceux qui m'ont
encouragé vers la connaissance et qui ont été le pilier de ma vie, à mes frères
'Abdelalim, Sendes, Abdelbasset, Alaa' et Et mes chères grands-mères, Fatima
et Aisha et à mes oncles 'Abdelhamid, Youssef', et à mes chères tantes 'Halima,
Saida, Al-Attrra, Somia et Kalthoum', que votre amour pour moi ne cesse jamais.
Aux petits poussins de la famille, à ma chérie hiba 'à ma famille et à tous mes
amis, merci pour votre soutien et vos prières.*

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu pour m'avoir accordé la force et le courage nécessaires pour accomplir cette tâche humble, ainsi que pour m'avoir entouré de nombreuses personnes qui m'ont soutenu tout au long de ma carrière universitaire.

Je souhaite tout particulièrement exprimer ma reconnaissance envers Mme Bouziane Khadija pour sa supervision compétente et enthousiaste de ce travail, ainsi que pour sa disponibilité constante lorsque j'en avais besoin

Je voudrais également remercier les membres du jury, M. CHENNOUF Nassreddine et M. Selami Mohamed Hassan, pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour les précieuses suggestions qu'ils ont apportées, contribuant ainsi à son amélioration

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes, qu'elles soient proches ou éloignées, pour leur aide et leurs encouragements

Je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous et je vous remercie sincèrement pour votre soutien et votre contribution tout au long de ce parcours. Que Dieu vous récompense abondamment.

ملخص

الخلايا الكهروضوئية من الجيل الثالث هي خلايا شمسية قادرة على تجاوز حد Shockley-Queisser البالغ 31-41% من كفاءة الطاقة للخلايا الشمسية أحادية النطاق. يتضمن ذلك مجموعة من البدائل للخلايا المصنوعة من وصلات PN شبه الموصلة ("الجيل الأول") وخلايا الأغشية الرقيقة ("الجيل الثاني"). تتضمن أنظمة الجيل الثالث الشائعة خلايا السيليكون غير المتبلور أو زرنيخيد الغاليوم متعدد الطبقات ("ترادفي") وخلايا البيروفسكايت والخلايا العضوية. سنقوم في هذا العمل بإجراء دراسة تقنية للجيل الثالث من الخلايا الشمسية لنظام كهروضوئية مطبقة في منطقة ورقلة.

الكلمات المفتاحية : الكهروضوئية ، الجيل الثالث، الاستطاعة، الكفاءة، الطاقة الشمسية

RÉSUMÉ

Les cellules photovoltaïques de troisième génération sont des cellules solaires potentiellement capables de dépasser la limite de Shockley – Queisser de 31 à 41% d'efficacité énergétique pour les cellules solaires à simple bande interdite. Cela comprend une gamme d'alternatives aux cellules constituées de jonctions PN semi-conductrices (« première génération ») et de cellules à couches minces (« deuxième génération »). Les systèmes courants de troisième génération comprennent les cellules multicouches (« tandem ») en silicium amorphe ou en arséniure de gallium, les cellules de Pérovskite et les cellules organiques. Dans ce travail on va réaliser une étude technique de la cellule solaire de troisième génération pour un système PV appliqué dans la région d'Ouargla.

Mots-clés : photovoltaïques, troisième génération, puissance, efficacité, énergie solaire

ABSTRACT

Third-generation photovoltaic cells are solar cells that have the potential to surpass the Shockley-Queisser limit of 31 to 41% energy efficiency for single-bandgap solar cells. This includes a range of alternatives to cells made of semiconductor p-n junctions ("first generation") and thin-film cells ("second generation"). Common third-generation systems include multilayer (tandem) cells made of amorphous silicon or gallium arsenide, Perovskite cells and organics cells. In this study, we will conduct a technical analysis of third-generation solar cells for a PV system applied in the Ouargla region.

Keywords: photovoltaic, third generation, power, efficiency, solar energy.

Liste des tableaux

Tableau (II-1) : les jours types de mois	44
Tableau (II-2) : rayonnement sur un plan horizontal	48
Tableau (II-3) : Les données climatique Journalière d'Ouargla	56
Tableau (II-4) : Les données climatique Mensuel d'Ouargla	57
Tableau (II-5) : Les données climatiques annuelles d'Ouargla	57
Tableau (II-6) : Caractéristiques des cellules solaires organique PTB7	58
Tableau (II-7) : Caractéristiques des cellules solaires pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)	58
Tableau (II-8) : Caractéristiques des cellules solaires multi jonction (GaAs)	59

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le photovoltaïque

Figure I-1 : Spectre de rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au Niveau de la mer	6
Figure I-2 : Mouvement de la terre autour du soleil	8
Figure I-3 : Schéma représenté l'effet PV	10
Figure I-4 : structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule Photovoltaïque	11
Figure I-5 : les composants d'un système photovoltaïque.....	12
Figure I-6 : Schéma d'un onduleur.....	13
Figure I-7 : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.	14
Figure I-8 : représentation schématique d'une cellule à colorant	18
Figure I-9 : la cellule solaire organique	19
Figure I-10 : La cellule solaire à point quantique	19

Chapitre II : Modélisation : Rayonnement et puissance

Figure II-1 : Coordonnées angulaires du soleil	25
Figure II-2 : Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné	26
Figure II-3 : Organigramme de calcul du rayonnement solaire sur différents plans	33
Figure II.4 : Organigramme des caractéristique I-V du module PV	35
Figure II-5 : Situation de la wilaya d'Ouargla	36
Figure II-6 : cellule multi jonction (GaAs)	40

Chapitre III : Résultats et Discussion

Figure III-1 : Evolution d'éclairement solaire en fonction de temps pour différents jours d'année 2022	42
Figure III-2 : Evolution de rayonnement solaire en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022	43
Figure III-3 : Evolution annuel de rayonnement solaire en fonction de Numéro de jours pour l'année 2022	44
Figure III-4 : Evolution de Puissance de cellule solaire Organiques en fonction de temps pour différents jours d'année 2022	45
Figure III-5 : Evolution de Puissance de cellule solaire Pérovskite en fonction de	46

Liste des figures

temps pour différents jours d'année 2022.....	
Figure III-6 : Evolution de Puissance de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de temps pour différents jours d'année 2022	47
Figure III-7 : Evolution de Puissance de cellule solaire Organiques en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022	48
Figure III-8 : Evolution de Puissance de cellule solaire Pérovskite en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022.....	49
Figure III-9 : Evolution de Puissance de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022	50
Figure III-10 : Evolution annuel de Puissance solaire de différentes cellules en fonction de Numéro de jours pour l'année 2022	51
Figure III-11 : Evolution de rendement de cellule solaire Organiques en fonction de temps pour différents jours d'année 2022	52
Figure III-12 : Evolution de rendement de cellule solaire Pérovskites en fonction de temps pour différents jours d'année 2022	53
Figure III-13 : Evolution de rendement de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de temps pour différents jours d'année 2022	54
Figure III-14 : Evolution de rendement de cellule solaire Organiques en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022.....	56
Figure III-15 : Evolution de rendement de cellule solaire Pérovskites en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022	57
Figure III-16 : Evolution de rendement de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022	58
Figure III-17 : Evolution annuel de rendement solaire de différentes cellules en fonction de Numéro de jours pour l'année 2022	59
Figure III-18 : Evolution des caractéristiques I-V avec l'éclairement de différentes Cellules	60
Figure III-19 : Evolution des caractéristiques I-V avec la température de différentes Cellules	61

Liste des symboles

I_{cc}	Le courant de court-circuit (A).
V_{oc}	La tension de circuit ouvert (V).
ff	Le facteur de forme
η	Le rendement de conversion d'énergie
P_m	Puissance maximale
MPPT	Maximum Power Point
I_{ph}	courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement [A].
I_s	courant de saturation [A].
R_s	résistance série du générateur solaire [Ω].
R_{sh}	résistance shunt du générateur solaire [Ω].
A	le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$)
q	Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [Coulomb].
k	Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K].
P_{in}	puissance lumineuse incidente
I_m	point du courant à la puissance maximale.
φ	La latitude
λ	La longitude
ω	La déclinaison
N	le nombre de jours de l'année
δ	L'angle horaire du soleil
ψ	L'azimut.
h	La hauteur angulaire
α	L'orientation
β	L'inclinaison
θ	L'angle d'incidence
TSV	Temps solaire vrai
TSM	Temps solaire moyen
Tu	Temps universel
ET	Equation du temps
TL	Temps légal
C	Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich

Liste des symboles

S^*_H	Le rayonnement direct sur un plan horizontal
D^*_H	Le rayonnement diffus sur un plan horizontal
G^*_H	Le rayonnement global sur un plan horizontal
I^*	le flux reçu (éclairage) en $W.m^{-2}$
TRL	le facteur de trouble de Linke
β	est le coefficient de trouble atmosphérique
PV	est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg
S^*	Le rayonnement direct sur un plan incliné
D^*	Le rayonnement diffus sur un plan incliné
R^*	Le rayonnement réfléchi sur un plan incliné
G^*	Le rayonnement global sur un plan incliné
ρ	L'albédo
I	le courant fourni par la cellule
V	la tension à la borne de cellule
I_0	le courant de saturation inverse d'une diode
VT	la tension thermique
e	charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}C$)
n	facteur de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique
T	température effective de la cellule en kelvin
V_{COO}	Tension à circuit ouvert de référence (V)
α	coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température ($A/^{\circ}C$).
β	coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température ($V/^{\circ}C$).
ΔT	variation de la température ($^{\circ}C$).
NOCT	la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal Operating celle température).
Tmax	la température maximale
Tmin	la température minimale
NJ	Number de jour

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le photovoltaïque	
I-1 Introduction	5
I-2 Energie solaire	5
I-2-1 Rayonnement solaire	6
I-3 Energie photovoltaïque	8
I-3-1 Historique	8
I-3-2 Effet photovoltaïque	9
I-3-3 Principe de fonctionnement	10
I-4 Les composants d'un système photovoltaïque	11
I-4-1 Régulateur de charge	12
I-4-2 Les batteries	12
I-4-3 Les Onduleurs	13
I-5 Paramètre des cellules photovoltaïques	13
I-5-1 Caractéristique courant tension et schéma équivalent	14
I-5-2 Courant de court-circuit I_{cc}	15
I-5-3 Tension à circuit ouvert V_{OC}	15
I-5-4 Facteur de forme FF	15
I-5-5 Puissance maximale P_m	16
I-5-6 Le rendement de conversion d'énergie η	16
I-6 Avantages et inconvénients d'une installation PV	16
I-6-1 Avantage	16
I-7 Les cellules solaires de troisième génération	18
I-7-1 Définition	18
I-7-2 Les différents types	18
I-7-3 Les applications potentielles	20
I-7-4 Les avantages	20
Chapitre II : Modélisation : Rayonnement et puissance	
II-1 Introduction	23

Sommaire

II-2 Modélisation de système photovoltaïque	23
II-2-1 Modélisation de Rayonnement solaire	23
II-2-1-1 Hypothèse de modélisation	23
II-2-2 Durée d'insolation	23
II-2-2-1 Jour type de mois	23
II-2-3 Modèles de coordonnées soleil	24
II-2-3-1 Angle solaire	24
II-2-3-2 Type des temps	26
II-3 Modèle du rayonnement solaire	28
II-3-1 Rayonnement solaire sur un plan horizontal	28
II-3-2 Rayonnement solaire sur un plan incliné	29
II-3-3 Organigramme de modèle rayonnement	30
II-4 Modèle de la puissance photovoltaïque	33
II-4-1 Variation de la tension à circuit ouvert	33
II-4-2 Point de fonctionnement optimum (V_m, I_m)	34
II-4-3 Rendement photovoltaïque	34
II-4-4 Organigramme de calcul de puissance photovoltaïque du système	34
II-5 Matérielles	35
II-5-1 Données géographique et climatique	35
II-5-1-1 Présentation des sites d'études	35
II-5-1-2 Les Données climatique d'Ouargla	36
II-6 Matériels	37
II-6-1 Technologie organique PTB7	37
II-6-2 Technologie pérovskite ($CH_3NH_3PbI_3$)	38
II-6-3 Technologie multi jonction (GaAs)	39
II-7 Outils Informatique	40
II-7-1 MATLAB	40
 Chapitre III : Résultats et Discussion	
III-1 Introduction	42

Sommaire

III-2 Etude de système photovoltaïque pour deux plans : inclinés et horizontale	42
III-2-1 Etude de rayonnement solaire	42
III-2-1-1 Evolution journalière	42
III-2-1-2 Evolution mensuel	43
III-2-1-3 Evolution annuelle	44
III-2-2 Etude de Puissance	44
III-2-2-1 Evolution journalière	44
III-2-2-2 Evolution mensuel	48
III-2-2-3 Evolution annuel	51
III-2-3 Etude de rendement	51
III-2-3-1 Evolution journalière	51
III-2-3-2 Evolution mensuel	55
III-2-3-3 Evolution annuel	58
III-2-4 Etude des caractéristiques I-V	60
III-2-4-1 Effet de Rayonnement	60
III-2-4-2 Effet de température	61
Conclusion générale	64



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est devenue une alternative prometteuse aux sources d'énergie traditionnelles basées sur les combustibles fossiles, offrant une solution propre et renouvelable pour répondre à la demande croissante en énergie à l'échelle mondiale. Les progrès réalisés dans la technologie des cellules solaires ont donné lieu à différentes générations de cellules solaires, parmi lesquelles la troisième génération a suscité un intérêt considérable en raison de son potentiel d'amélioration de l'efficacité, de la rentabilité et de la polyvalence.

Cependant, malgré la viabilité démontrée de sources telles que l'énergie photovoltaïque (PV) et l'énergie éolienne, il subsiste encore des réticences à grande échelle en raison de problèmes d'optimisation. Les systèmes de conversion de l'énergie solaire en électricité souffrent souvent de coûts élevés, de rendements et de fiabilité insuffisants. Le déploiement à grande échelle de ces systèmes reste limité, aussi bien en termes de production de masse que chez les particuliers. [1]

La technologie photovoltaïque, bien qu'elle soit connue depuis longtemps, n'a pas encore atteint son plein potentiel en raison de coûts élevés liés aux capteurs solaires. De plus, des défis techniques subsistent pour développer des produits industriels matures, tels que la synthèse coûteuse des matériaux de conversion photovoltaïque et les pertes importantes dans la chaîne de conversion électrique en cas d'utilisation inadaptée. Les lois de commande spécifiques visant à optimiser la production d'énergie photovoltaïque présentent également certaines limites à surmonter.

Ainsi, bien que l'énergie solaire représente une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et résoudre les problèmes techniques afin de permettre une adoption plus large des systèmes photovoltaïques et de favoriser une transition réussie vers les énergies renouvelables. [2]

Les cellules solaires ont évolué à travers différentes générations, chacune représentant une avancée significative en matière de technologie et de performances. La première génération de cellules solaires a émergé avec l'utilisation de tranches de silicium monocristallin. Ces cellules rigides, encore largement utilisées aujourd'hui, ont des rendements allant de 15 à 20 %. Cependant, leurs coûts de production restent relativement élevés.

Pour remédier à ces limitations, la deuxième génération de cellules solaires a introduit les technologies à couches minces. Ces cellules utilisaient des matériaux comme le silicium

Introduction générale

amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) et le séléniure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS). Les cellules solaires à couches minces étaient plus flexibles, légères et économiques à fabriquer. Cependant, ils présentaient généralement des rendements inférieurs allant de 10 à 15 %.[3]

Au fur et à mesure que la recherche se poursuivait, la troisième génération de cellules solaires a émergé en mettant l'accent sur les matériaux et les structures avancés. Cette génération comprenait des cellules solaires à multi jonction, des cellules solaires organiques et des cellules solaires pérovskite. Ces technologies ont exploré de nouveaux matériaux et concepts pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et élargir la gamme d'applications des cellules solaires. Bien qu'encore au stade de la recherche et du développement, les cellules solaires de troisième génération promettent d'atteindre des rendements plus élevés et de surmonter les limites des générations précédentes. [4]

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'étude technique des cellules solaires de troisième génération appliquée à la région saharienne. Ce manuscrit a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en trois chapitres:

- Dans le premier chapitre, des notions fondamentales sur le rayonnement solaire et le système photovoltaïque : construction des cellules, l'effet Photovoltaïque, principe de fonctionnement, et les avantages et les inconvénients.
- Dans le second chapitre, nous décrivons les notions essentielles de modélisation et de dimensionnement du système PV
- Le dernier chapitre sera consacré pour la résultats et discussion.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I :

Généralités sur le photovoltaïque

I-1 Introduction:

La Terre bénéficie d'une abondante source d'énergie provenant du soleil, considérée comme la plus importante. Selon les estimations, une heure d'ensoleillement fournit suffisamment d'énergie pour répondre aux besoins annuels de consommation de la planète. Cette énergie est utilisable pour produire de la chaleur, soit directement pour le chauffage, soit indirectement pour la production de vapeur dans les centrales solaires thermodynamiques. Elle peut également être exploitée sous forme d'électricité grâce aux cellules solaires photovoltaïques. [5]

Plusieurs formes d'énergies renouvelables sont identifiables, telles que l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Mis à part l'énergie géothermique qui provient de la chaleur du sous-sol terrestre, ces sources d'énergie sont directement ou indirectement alimentées par le soleil, qui est une source d'énergie inépuisable. L'énergie photovoltaïque est la plus récente des sources d'énergie renouvelables, offrant des avantages tels que l'absence de pollution, la flexibilité et la fiabilité. [6]

I-2 Energie solaire:

Le soleil représente une source d'énergie quasi-inépuisable qui envoie chaque année à la surface de la Terre un rayonnement équivalent à environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Ce rayonnement, d'une puissance instantanée de 1 kilowatt crête par mètre carré (kW/m^2), se répartit sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. En l'espace de 6 heures, les déserts de notre planète reçoivent plus d'énergie solaire que ce que l'humanité consomme en une année. Il existe plusieurs façons de produire et d'utiliser l'énergie solaire, notamment [7]:

L'énergie solaire thermique : qui consiste simplement à générer de la chaleur à l'aide de panneaux sombres. Il est également possible de produire de la vapeur grâce à la chaleur du soleil, puis de la convertir en électricité [7].

L'énergie solaire photovoltaïque: qui permet de produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette source d'énergie est déjà largement exploitée dans de nombreux pays, en particulier dans les régions où les ressources énergétiques conventionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon font défaut [7].

I-2-1 Rayonnement solaire:

- **Définition :**

Le rayonnement solaire est l'énergie électromagnétique émise par le Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique, qui se propage dans l'espace et qui atteint la surface de la Terre. Ce rayonnement solaire est composé de différentes longueurs d'onde, allant des rayons gamma et des rayons X à l'infrarouge et aux ondes radio, mais c'est principalement la lumière visible et les rayons ultraviolets qui sont responsables de l'énergie solaire captée par les cellules photovoltaïques. La quantité et la qualité du rayonnement solaire qui atteignent la Terre varient selon plusieurs facteurs, notamment la latitude, la saison, l'heure de la journée, la présence de nuages, la pollution atmosphérique, l'altitude, etc. [8]

- **Spectre du rayonnement :**

Le rayonnement électromagnétique solaire s'étend sur une large gamme de fréquences, allant des ondes radio aux rayons X. On peut généralement distinguer deux types de spectres : le spectre continu, qui ressemble à celui d'un corps noir d'environ 6000°K, et le spectre réel d'émission du soleil [9].

Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en:

- ✓ Ultraviolet UV : $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4 % ;
- ✓ Visible : $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0 % ;
- ✓ Infrarouge IR : $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6 %.

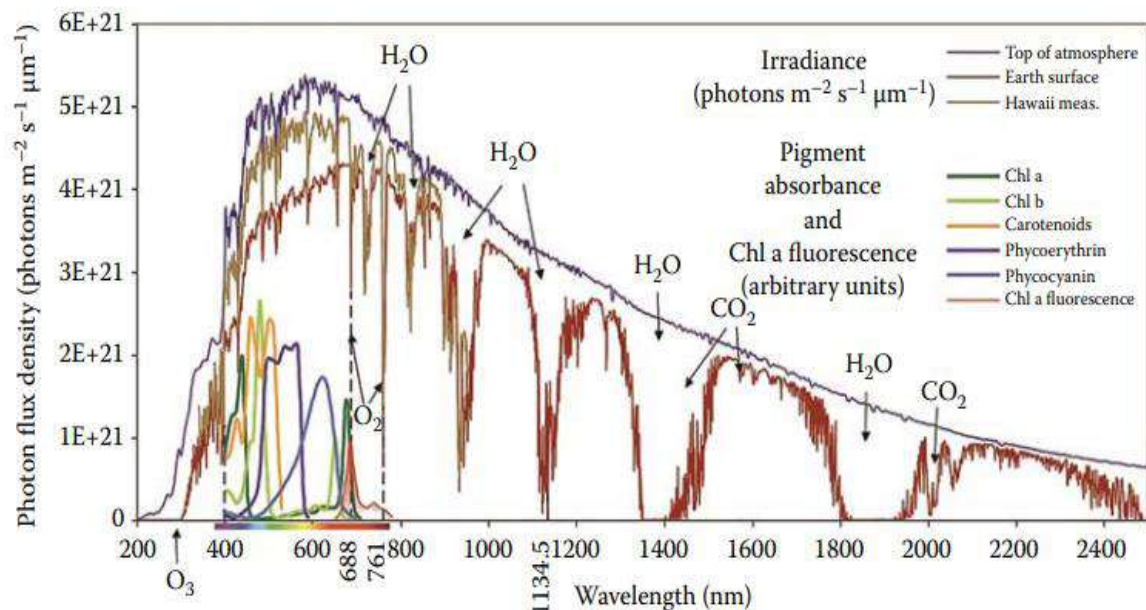


Figure I-1 : Spectre de rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au Niveau de la mer [10].

- **Limite de Shockley Queisser :**

La limite de conversion photovoltaïque de Shockley-Queisser, établie en 1961 par W. Shockley et H. J. Queisser, représente la valeur théorique maximale de l'efficacité pour une cellule solaire à jonction p-n unique. Cette étude démontre qu'une cellule ayant une bande interdite de 1,34 eV peut atteindre une efficacité maximale d'environ 33,7%. Actuellement, parmi les matériaux utilisés pour les cellules solaires, le silicium (Si) et le gallium-arséniure (GaAs) se rapprochent le plus de cette limite théorique, avec des rendements respectifs de 26,7% et 29,1% pour le Si et le GaAs. [11]

- **Types de rayonnement solaire [12]:**

Traditionnellement on distingue quatre types de rayonnement solaires à savoir:

- **Rayonnement direct :** rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.
- **Rayonnement diffus :** rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- **Rayonnement réfléchi :** ou l'albédo du sol : le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global :** la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point.

- **Mouvements de la terre autour du soleil [13]:**

La Terre effectue une révolution autour du soleil en une année. Pendant cette période, l'axe de rotation de la Terre reste toujours orienté dans la même direction (vers l'étoile polaire dans l'hémisphère nord). Par conséquent, l'axe pointe vers le soleil pendant une partie de l'année, puis dans la direction opposée six mois plus tard. Ces deux éléments, à savoir l'axe de

rotation inclinée qui pointe toujours dans la même direction et la révolution terrestre, sont responsables de l'alternance des saisons ainsi que de la variation de la durée des jours et des nuits tout au long de l'année.

Ce mouvement de révolution s'effectue dans un plan appelé le plan de l'écliptique. L'axe des pôles, autour duquel se produit la rotation de la Terre, n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique.

La déclinaison varie au cours de l'année, de $-23^{\circ}27'$ à $+23^{\circ}27'$. Le centre de gravité de la terre décrit une ellipse dont le soleil occupe l'un des foyers. Le sens des variations de la déclinaison peut être appréhendé à travers des 4 positions clés suivantes :

Au solstice d'hiver (21 décembre): les rayons solaires frappent la terre avec un angle de déclinaison de $-23^{\circ}27'$; c'est la valeur minimum de la déclinaison.

A l'équinoxe de printemps (21 mars): le rayon solaire est dans le plan de l'équateur et la déclinaison vaut alors 0° ; cette position traduit l'égalité des jours et des nuits.

Au solstice d'été (23 juin) : la position de la terre est opposée à celle du 21 décembre et le soleil frappe l'hémisphère Nord avec l'angle maximum de déclinaison de $23^{\circ}27'$.

A l'équinoxe d'automne (22 septembre): la situation est identique à celle du 21 mars et la déclinaison repasse à 0° .

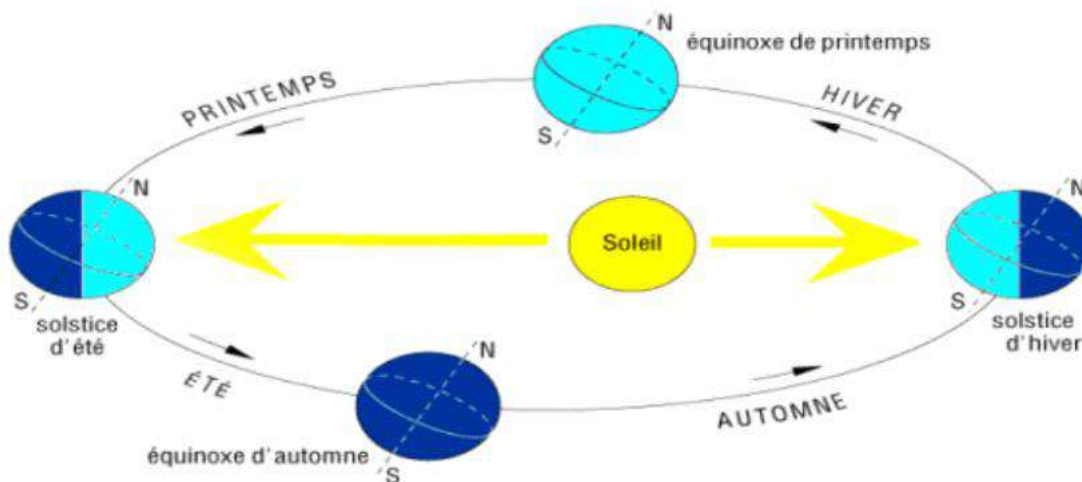


Figure I-2 : Mouvement de la terre autour du soleil[13].

I-3 Energie photovoltaïque: [14]

L'énergie solaire photovoltaïque est une technologie qui exploite la lumière du soleil pour produire de l'électricité en convertissant l'énergie des photons en énergie électrique. Les photons de la lumière solaire transfèrent leur énergie aux électrons présents dans un matériau semi-conducteur, constituant ainsi une cellule photovoltaïque. Cette transformation, appelée effet photovoltaïque, ne nécessite pas d'action mécanique, n'émet pas de bruit, ne pollue pas et

ne nécessite aucun combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français A. Becquerel. Le terme "photovoltaïque" provient de la fusion du mot "photo" (issu du grec "phos", signifiant "lumière") et du mot "Volt" (nom du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière significative aux recherches en électricité).

I-3-1 Historique: [15].

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque, qui permet de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire dans un matériau solide.

En 1875, Werner Von Siemens présente un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs devant l'Académie des Sciences de Berlin. Cependant, ce phénomène ne sort pas des laboratoires et ne suscite pas beaucoup d'intérêt jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.

En 1954, alors que l'industrie spatiale cherchait de nouvelles solutions pour alimenter ses satellites, trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, ont créé une cellule photovoltaïque à haut rendement.

En 1958, les scientifiques ont développé une cellule solaire avec un rendement de 9 %. Ce succès a permis l'utilisation des cellules solaires pour fournir de l'énergie aux satellites en orbite terrestre.

En 1973, l'Université de Delaware a construit la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

En 1983, une voiture équipée d'un système d'alimentation photovoltaïque a parcouru une distance de 4 000 km en Australie.

Les chercheurs des laboratoires Bell aux États-Unis ont développé la première cellule photovoltaïque en 1954. Ils ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des impuretés, une technique appelée dopage qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Bien que les scientifiques s'intéressent depuis longtemps aux photopiles, ce n'est qu'au cours de la course à l'espace que ces cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles sont la solution idéale pour répondre aux besoins en électricité des satellites et des sites isolés.

I-3-2 Effet photovoltaïque : [16]

L'énergie photovoltaïque provient directement de l'énergie solaire. Les cellules photovoltaïques à base de silicium des modules photovoltaïques ont la capacité de convertir les photons en électrons en utilisant des matériaux semi-conducteurs. Cette conversion photovoltaïque se produit dans les matériaux semi-conducteurs et permet de produire de l'énergie électrique sous forme de courant continu, qui peut être utilisée directement.

- Dans un **isolants électriques** : les électrons liés aux atomes et incapables de se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique**: comme les fils de cuivre ont des électrons libres de circuler, permettant le passage du courant.
- Dans un **semi-conducteurs** : une conductivité électrique intermédiaire, où les électrons ne peuvent circuler que s'ils sont libérés de leurs atomes par l'apport d'énergie. Lorsque la lumière pénètre dans un semi-conducteur, les photons fournissent cette énergie, permettant ainsi aux électrons de se déplacer et de produire un courant électrique.

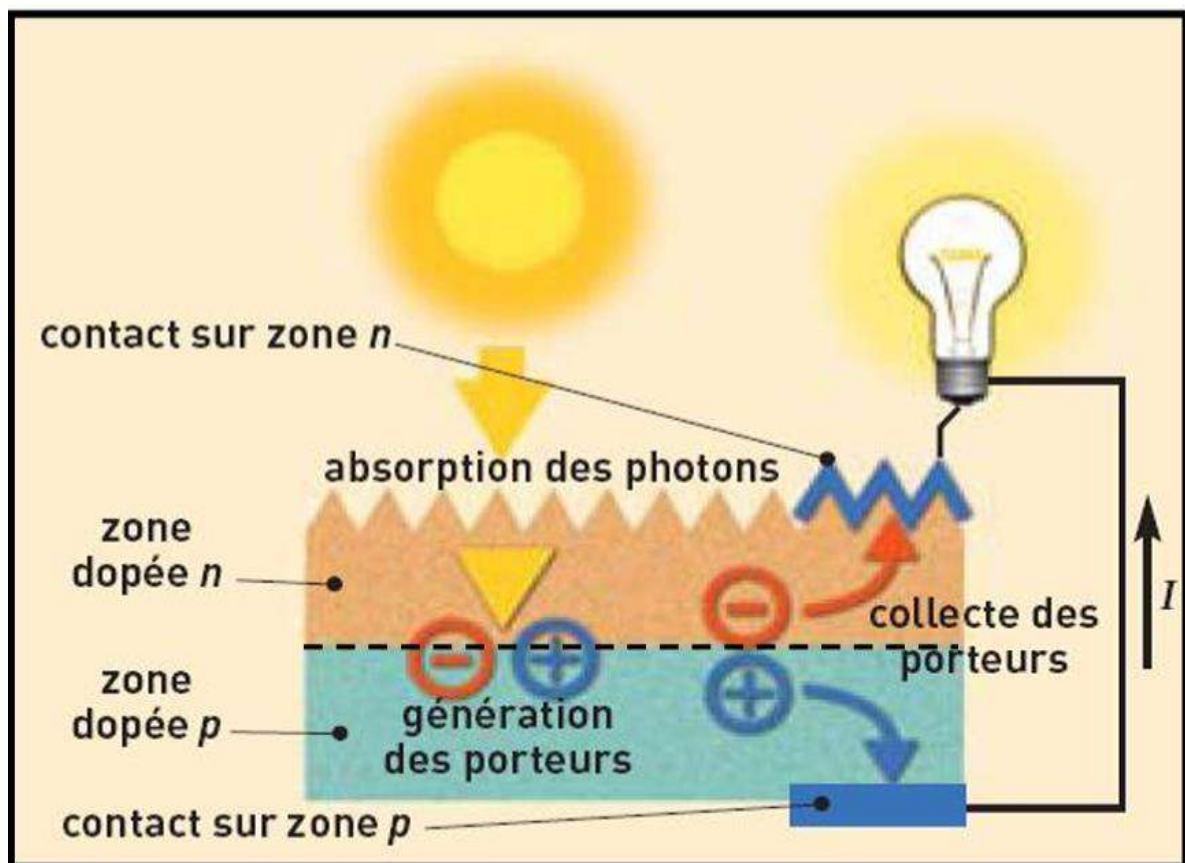


Figure I-3: Schéma représenté l'effet PV [16]

I-3-3 Principe de fonctionnement: [17]

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant trois mécanismes fondamentaux.

-Le premier est l'absorption des photons, qui ont une énergie supérieure au gap énergétique, par le matériau de la cellule.

-La conversion de l'énergie du photon en énergie électrique se fait par la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.

-La collecte des particules générées dans le dispositif est un autre mécanisme clé de la cellule photovoltaïque. Pour ce faire, le matériau utilisé doit avoir deux niveaux d'énergie et être suffisamment conducteur pour permettre le flux de courant, ce qui explique l'utilisation de semi-conducteurs dans l'industrie photovoltaïque. Pour collecter les particules, un champ électrique est nécessaire pour dissocier les paires électron-trou créées. Habituellement, une jonction P-N est utilisée, mais d'autres structures comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

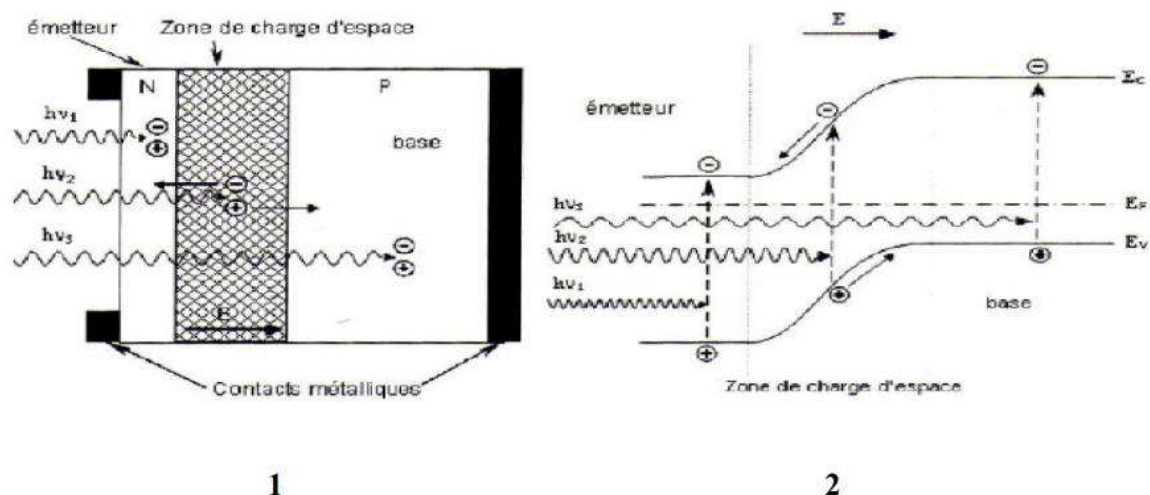


Figure I-4: structure (gauche) et diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [14]

Lorsqu'un photon atteint une cellule photovoltaïque, il génère des porteurs de charges électriques dans les zones N et P, ainsi que dans la zone de charge d'espace. Les comportements de ces porteurs varient selon la région dans laquelle ils se trouvent. Dans les zones N et P, les porteurs minoritaires sont repoussés par le champ électrique vers la zone majoritaire, c'est-à-dire la zone P pour les trous et la zone N pour les électrons. Cette migration des porteurs crée un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons sont séparées par le champ électrique : les électrons se dirigent vers la zone N et les trous vers la zone P, créant ainsi un photo-courant de génération.

I-4 Les composants d'un système photovoltaïque : [18]

Le système photovoltaïque est un moyen de produire de l'électricité renouvelable à partir de l'énergie solaire. Les éléments qui composent le système sont essentiels pour en assurer le bon fonctionnement.

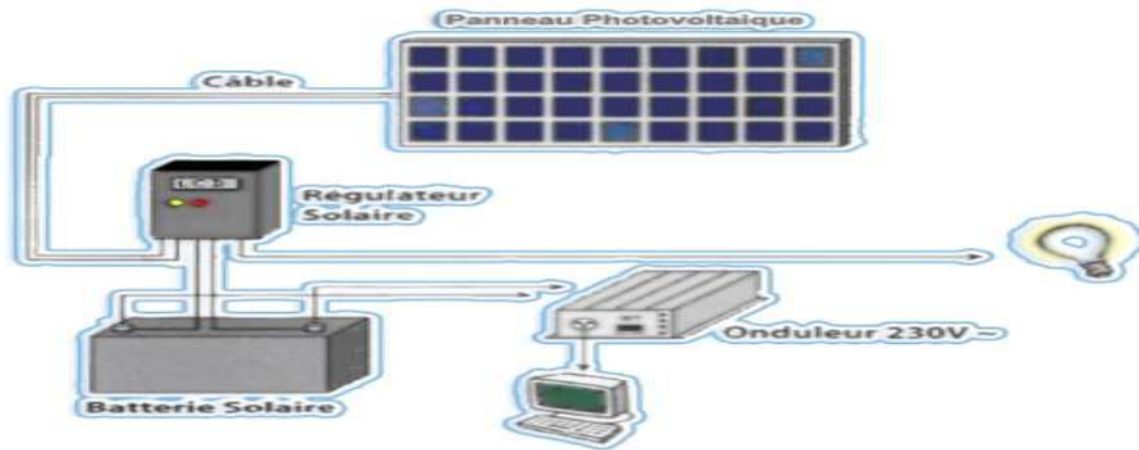


Figure I-5 : les composants d'un système photovoltaïque [18]

I-4-1 Régulateur de charge :[19]

Le régulateur de charge est un composant crucial dans un système de batterie solaire car il protège les batteries contre les surcharges et les décharges excessives, ce qui prolonge leur durée de vie. Le régulateur de charge s'assure que la batterie n'est pas surchargée et ne dépasse pas un seuil limite (généralement 80% de la capacité de la batterie), ce qui peut l'endommager. Les régulateurs sont réglés à des tensions de coupure qui correspondent aux limites à ne pas dépasser. En général, il se compose de deux parties distinctes:

Une partie régulation de charge: Lorsque la batterie est complètement chargée, le régulateur la déconnecte du panneau solaire pour éviter la consommation d'électrolyte et le dégagement d'hydrogène, ainsi que l'oxydation des plaques.

Une partie régulation de la décharge : Si la batterie est complètement déchargée en raison d'une absence d'énergie solaire, le régulateur coupe l'utilisation car il y a risque que les plaques négatives se recouvrent de sulfate de plomb.

I-4-2 Les batteries : [20]

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est stockée dans des batteries solaires, permettant ainsi d'assurer une alimentation électrique en toutes circonstances, que ce soit de jour comme de nuit, même par temps couvert. Les batteries utilisées avec des panneaux solaires ou une éolienne, appelées batteries à décharge lente, ont des

caractéristiques différentes des batteries de voiture. Elles se déchargent progressivement et peuvent supporter des décharges fréquentes peu profondes.

Il est cependant risqué de connecter une batterie solaire directement à un panneau solaire, car cela peut endommager la batterie si son niveau de charge dépasse les 90%. Pour protéger la batterie contre la surcharge, il est recommandé d'installer un régulateur entre le panneau et la batterie.

Le niveau de charge des batteries solaires ne doit pas être trop bas (pas en dessous de 40%) ni trop élevé (ne pas dépasser 95%). Dans les deux cas, la batterie peut se détériorer et sa durée de vie peut considérablement diminuer. La durée de vie de la batterie solaire est déterminée par son cyclée, c'est-à-dire le nombre de cycles complets de charge et de décharge indiqué par le fabricant. Les batteries solaires de qualité ont une durée de vie d'environ 7 à 15 ans, avec plus de 500 cycles.

Les batteries solaires sont couramment utilisées dans les installations solaires en site isolé, les camping-cars, le caravanning et le nautisme.

I-4-3 Les Onduleurs : [21]

L'onduleur est un composant électronique essentiel dans les systèmes photovoltaïques car il permet de convertir l'électricité continue produite par les modules solaires en électricité alternative qui peut être transmise au réseau électrique. Pour ce faire, l'onduleur est équipé d'un chercheur de Point de Puissance Maximum (MPPT) qui recherche le point de fonctionnement optimal des modules solaires, d'un pont qui transforme l'électricité continue en électricité alternative et d'un transformateur qui impose une fréquence prédéfinie (50 Hz ou 60 Hz). Toutefois, il est important de noter que l'onduleur ne fonctionne que si la puissance d'entrée se situe dans l'intervalle spécifié par le fabricant. Si la puissance d'entrée est trop élevée, l'onduleur ne convertit qu'une partie de l'énergie produite. À l'inverse, si la puissance d'entrée est trop faible, l'onduleur se met en veille et ne produit pas d'électricité.

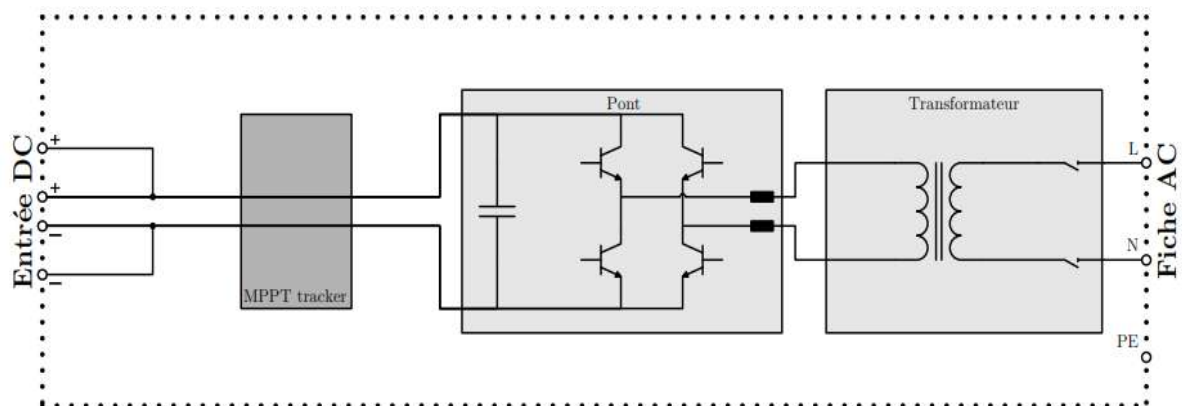


Figure I-6: Schéma d'un onduleur [21]

I-5 Paramètre des cellules photovoltaïques : [6]

Il y a cinq grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires:

- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension en circuit ouvert V_{oc}
- Le facteur de forme ff
- Le rendement de conversion d'énergie η
- Puissance maximale P_m

Les paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque ne sont pas directement mesurables. Ainsi, pour obtenir ces paramètres, il est nécessaire de résoudre les équations du courant-tension $I(V)$ pour différents points de fonctionnement, qui sont fournis par les fabricants.

I-5-1 Caractéristique courant tension et schéma équivalent : [6]

Le panneau photovoltaïque ne peut pas être caractérisé simplement comme une source de courant ou de tension sur toute la plage de sa caractéristique courant-tension. En fait, il agit plutôt comme une source de puissance. Cela signifie que le panneau photovoltaïque possède un point P_m où la puissance produite est maximale, et il est donc avantageux d'exploiter ce point pour obtenir le maximum d'énergie de la puissance crête installée. Pour atteindre ce point de puissance maximale, certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance, appelée Maximum Power Point (MPPT). La figure I-7 représente la caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule, dont les performances dépendent des valeurs des différents éléments du schéma équivalent

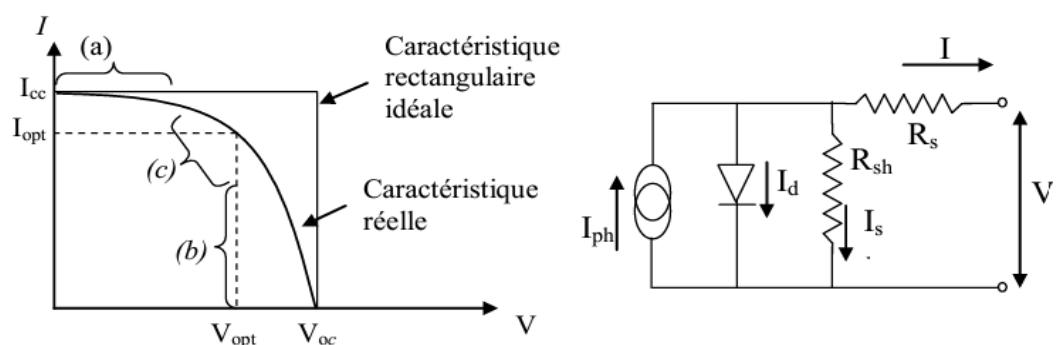


Figure I-7: Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [6].

La caractéristique de la cellule peut être divisée en trois parties distinctes :

La zone (a) correspond à une plage de comportement où la cellule fonctionne comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.

La zone (b) correspond à une plage de comportement où la cellule fonctionne comme un générateur de tension V_{oc} .

La zone (c) correspond à une plage de comportement où l'impédance interne du générateur varie rapidement

I-5-2 Courant de court-circuit I_{cc} : [6]

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I_{cc})}{AKT} \right\} - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{I.1})$$

- I_{cc} : courant de court-circuit [A].
- I_{ph} : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement [A].
- I_s : courant de saturation [A].
- R_s : résistance série du générateur solaire [Ω].
- R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire [Ω].
- A : le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$)
- q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [Coulomb].
- k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K].

I-5-3 Tension à circuit ouvert V_{oc} : [6]

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

I-5-4 Facteur de forme FF :

Il détermine la qualité électrique de la cellule, il est déterminé par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co}I_{cc}} \quad (I.3)$$

I-5-5 Puissance maximale P_m : [6]

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale

$$P_m = I_m V_m \quad (I.4)$$

I-5-6 Le rendement de conversion d'énergie η

Le rendement, η (efficiency) des cellules PV 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 P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (I.5)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm²

I-6 Avantages et inconvénients d'une installation PV : [22]**I-6-1 Avantage :**❖ **Son carburant est gratuit :**

Un panneau solaire n'a besoin que du soleil comme source d'énergie, et celui-ci est inépuisable. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de silicium, un matériau non toxique et abondant, étant le deuxième matériau le plus présent sur Terre.

❖ **L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants :**

L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

❖ Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité :

Les modules solaires ont une durée de vie d'environ 30 ans, tandis que la performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pendant 20 à 25 ans. Par conséquent, le photovoltaïque est une technologie fiable à long terme, avec une garantie de fiabilité pour les consommateurs.

❖ Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés :

Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

❖ L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

❖ L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées:

Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible)

❖ L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments :

Les panneaux solaires peuvent être installés sur les toits et les façades des bâtiments, contribuant ainsi à leur autonomie énergétique. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.

❖ L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la Consommation mondiale pendant une année :

Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la Consommation énergétique annuelle mondiale.

I-6-2 Inconvénients:

Bien que le développement du photovoltaïque soit rapide, il représente actuellement une petite partie du bilan énergétique mondial. Tous les modules solaires existants produisent autant d'énergie que 20% d'une tranche nucléaire, ce qui ne constitue pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux énergétiques nationaux actuels.

❖ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- ❖ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%)
- ❖ Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- ❖ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis
- ❖ Tributaire des conditions météorologiques.
- ❖ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

I-7 Les cellules solaires de troisième génération:

I-7-1 Définition : [23]

Les cellules solaires de troisième génération, également connues sous le nom de cellules solaires à colorant, sont des dispositifs photovoltaïques qui utilisent des matériaux photosensibles pour convertir la lumière solaire en électricité. Contrairement aux cellules solaires traditionnelles à base de silicium, ces cellules solaires utilisent des mécanismes de conversion plus avancés et des matériaux novateurs pour améliorer leur efficacité et leurs performances.

I-7-2 Les différents types :

Voici les différents types de cellules solaires de troisième génération :

- **Les cellules solaires sensibles aux colorants (DSSC) :** les DSSC utilisent une couche de colorant pour absorber la lumière, qui génère ensuite des électrons qui circulent dans la cellule pour créer de l'électricité. Les DSSC sont relativement peu coûteuses et peuvent fonctionner dans des conditions de faible luminosité, ce qui les rend adaptées à une utilisation en intérieur. [23]

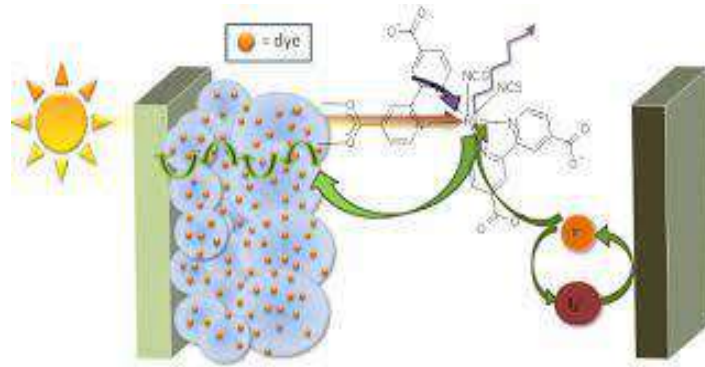


Figure I-8 : représentation schématique d'une cellule à colorant [24].

–**les cellules solaires organiques** : utilisent des matériaux Organiques, tels que des polymères, pour absorber la lumière et générer de l'électricité. Elles sont flexibles et légères, ce qui les rend adaptées à une gamme d'applications, y compris les photovoltaïques intégrés aux bâtiments et les électroniques portables. [25]



Figure I-9 : le cellule solaire organique [26].

- **Les cellules solaires à pérovskite**: les cellules solaires à pérovskite utilisent un matériau appelé pérovskite, qui est un type de cristal, pour absorber la lumière et générer de l'électricité. Les cellules solaires à pérovskite ont un taux d'efficacité élevé, ce qui signifie qu'elles peuvent générer plus d'électricité que d'autres types de cellules solaires. [27]
- **Les cellules solaires à points quantiques** : les cellules solaires à points quantiques utilisent de minuscules particules appelées points quantiques pour absorber la lumière et générer de l'électricité. Les cellules solaires à points quantiques sont très efficaces et peuvent être fabriquées à partir de matériaux peu coûteux, ce qui les rend attractives pour des applications à grande échelle. [28]



Figure I-10 : Le cellule solaire à point quantique [29]

- **La cellule solaire à multiple jonction GaAs:** est un type de cellule solaire utilisant plusieurs jonctions pour augmenter l'efficacité de conversion de la lumière en électricité. Elle est composée de plusieurs couches de semi-conducteurs optimisées pour absorber différentes parties du spectre solaire. Chaque jonction est conçue pour absorber une plage spécifique de longueurs d'onde, ce qui permet à la cellule de capturer plus efficacement la lumière solaire. Les cellules solaires à jonction multiple GaAs sont réputées pour leur rendement élevé et sont utilisées dans l'espace ainsi que dans des applications terrestres exigeant des performances élevées comme système (CPV). [30]

I-7-3 Les applications potentielles: [25]

Voici quelques-unes des applications potentielles de ces cellules :

- Énergie solaire pour les bâtiments:** peuvent être intégrées dans les façades des bâtiments pour produire de l'électricité et réduire les coûts d'énergie. Ces cellules peuvent être produites en différentes couleurs et formes pour s'adapter à l'esthétique des bâtiments.
- Énergie solaire portable:** peuvent être utilisées pour produire de l'énergie portable pour les téléphones portables, les ordinateurs portables et les autres appareils électroniques. Ces cellules sont légères et flexibles, ce qui les rend idéales pour une utilisation en déplacement.
- Énergie solaire pour les véhicules:** peuvent être utilisées pour alimenter les voitures électriques et les autres véhicules à énergie propre. Ces cellules peuvent être intégrées dans les carrosseries des voitures pour produire de l'électricité tout en réduisant la consommation de carburant.
- Énergie solaire pour les satellites:** peuvent être utilisées pour alimenter les satellites en orbite autour de la Terre.

-Énergie solaire pour les régions éloignées: peuvent être utilisées pour fournir de l'électricité aux régions éloignées qui ne sont pas reliées au réseau électrique. Ces cellules sont faciles à installer et à entretenir, ce qui les rend idéales pour une utilisation dans des zones reculées

I-7-4 Les avantages: [27]

Voici quelques avantages des cellules solaires de troisième génération :

- ❖ **Efficacité supérieure:** Elles peuvent convertir un pourcentage plus élevé de la lumière du soleil qu'elles absorbent en électricité. Cela est dû à l'utilisation de nouveaux matériaux.
- ❖ **Coût inférieur :** Cela est dû à l'utilisation de matériaux moins coûteux, tels que des molécules organiques et des polymères, qui peuvent être déposés sur un substrat à l'aide de techniques d'impression peu coûteuses.
- ❖ **Flexibles et légères :** peuvent être fabriquées sur des substrats flexibles, ce qui les rend légères et portables. Cela les rend idéales pour une utilisation dans des dispositifs électroniques portables
- ❖ **Avantages environnementaux :** ont le potentiel d'être plus respectueuses de l'environnement que les générations précédentes de cellules solaires. Cela est dû à l'utilisation de matériaux contenus dans ces cellules.
- ❖ **Potentiel de production d'énergie à grande échelle :** Leur coût inférieur et leur efficacité accrue les rendent particulièrement attrayantes pour les projets d'énergie solaire à grande échelle.

Chapitre II :

Modélisation : Rayonnement et puissance

II-1 Introduction :

La modélisation joue un rôle crucial en introduisant plusieurs modèles et en évaluant les caractéristiques de chaque composant de l'installation, ainsi que des paramètres constitutifs. Dans le cadre d'un système énergétique photovoltaïque, l'objectif est de travailler idéalement près du point de puissance maximale (MPP).

Toutes les opérations de modélisation sont réalisées à l'aide de l'outil informatique MATLAB.

II-2 Modélisation de système photovoltaïque:

II-2-1 Modélisation de Rayonnement solaire :

II-2-1-1 Hypothèse de modélisation :

Pour simplifier la modélisation de notre problème nous supposons que le jour étudié pour estimer les résultats est attribué aux conditions météorologiques du site de Ouargla, il est caractérisé par :

- Un jour clair
- un site isolé

II-2-2 Durée d'insolation [31] :

La durée d'exposition solaire correspond à la période pendant laquelle le soleil est clairement visible entre le lever et le coucher, et elle est mesurée à l'aide de l'héliographe de Campbell-Stokes. Cet appareil utilise une sphère en cristal pour concentrer les rayons du soleil sur un papier, qui brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés, ce qu'on appelle la durée d'exposition solaire réelle ou effective. Cette durée dépend de la visibilité du soleil par rapport au point d'observation, qu'il soit visible ou caché par les nuages. En l'absence de l'héliographe, il est possible d'estimer la durée théorique du jour en calculant le mouvement astronomique relatif du soleil et de la Terre. Cela représente la durée qu'il y aurait si les nuages ne masquaient pas le soleil.

II-2-2-1 Jour type de mois [32]:

Le jour type du mois est le jour du mois qui se rapprochant de la moyenne mensuelle de cette grandeur. La liste des jours types proposés par Klein est représentée sur le tableau suivant :

Tableau (II-1) : les jours types de mois [32]

Moi	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dés
Jour type	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
N° de jour	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

II-2-3 Modèles de coordonnées soleil :

II-2-3-1 Angle solaire :

Les angles solaires sont des facteurs intéressants pour le calcul de rayonnement solaire.

- **La latitude (ϕ)** : est Angle formé par le plan équatorial terrestre et la direction reliant le lieu considère. Ainsi cet angle vaut 0° à niveau de l'équateur, $+90^\circ$ et -90° , respectivement au pôle Nord et au pôle Sud, Il ne correspond pas au paramètre angulaire. [33]
- **La longitude (λ)** : Angle formé par deux plans sécants le long de l'axe polaire, Afin d'avoir une référence, l'un de ces plans passe par la ville de Greenwich (Angleterre), Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'ouest négatives. [33]
- **La déclinaison (ω)** : La déclinaison du soleil est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $+23^\circ 27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes, la déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante : [31]

$$\omega = +23.45^\circ \cdot \sin \left(\frac{360}{365} \cdot N - 80 \right) \quad (\text{II.1})$$

N : est le nombre de jours de l'année compté à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366. Selon l'année: Année civile: 365 jours, Année bissextile : 366 jours.

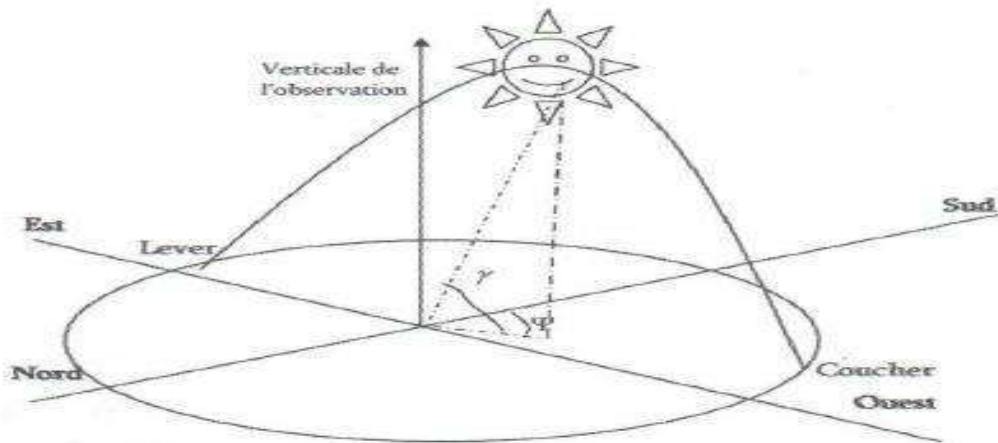


Figure II-1: Coordonnées angulaires du soleil. [32]

- **L'angle horaire du soleil (δ) :** L'angle horaire δ étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV, est donné par l'équation suivante : [31]

$$\delta = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.2})$$

- **L'azimut (ψ) :** L'azimut du soleil ψ est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, L'azimut est compris entre $-180 \leq \psi \leq 180^\circ$. L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire ω , latitude du lieu et de l'angle horaire δ de la manière suivante : [31]

$$\tan(\Psi) = \frac{\sin \delta}{\sin(\varphi) \cos(\delta) - \cos(\varphi) \sin(\omega)} \quad (\text{II.3})$$

- **La hauteur angulaire (h) :** La hauteur du soleil h est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $h = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou : [31]

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\omega) + \cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) \quad (\text{II.4})$$

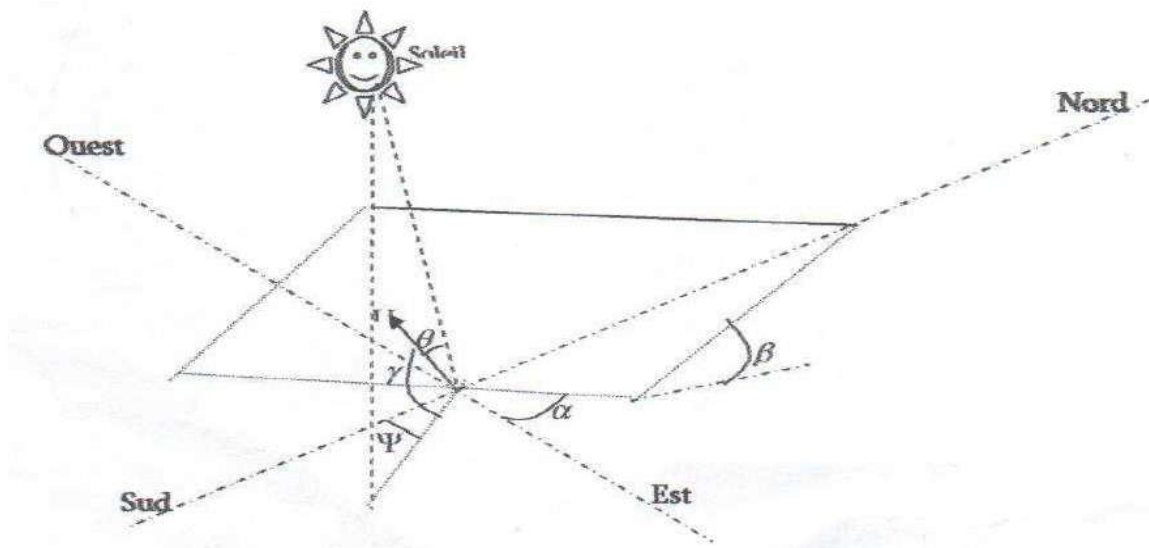


Figure II-2 : Représentation de l'éclairement d'un capteur plan incliné [32]

Les autres angles sont liés directement au positionnement du capteur, et permettent de corriger les pertes liées au trajet optique des rayons lors de la traversée de l'atmosphère, ils correspondent à :

- **L'orientation** (α) du capteur par rapport au sud, (0° au sud, 180° au nord, $+90^\circ$ à l'ouest et -90° à l'est). Dans notre cas, cette variation est mise à zéro. [32]
- **L'inclinaison** (β) du capteur par rapport au sol ($0^\circ < \beta < 90^\circ$). Elle est nulle pour ce qui est du plan horizontal dans le calcul du premier angle d'incidence puis de 45° pour le second. [32]
- **L'angle d'incidence** (θ) des rayons solaires par rapport à la normale au capteur. Une relation trigonométrique permet de déterminer sa valeur en fonction des autres angles: [32]

$$\cos(\theta) = \cos(h) \sin(\beta) \cos(\Psi - \alpha) + \sin(h) \cos(\beta) \quad (\text{II.5})$$

II-2-3-2 Type des temps : [34]

a) Temps solaire vrai TSV :

Le temps solaire vrai (TSV) est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression :

$$\text{TSV} = 12 + \delta/15 \quad (\text{II.6})$$

δ : c'est l'angle horaire. En physique on prend δ est nulle donc $\text{TSV} = 12$ heures

b) Temps solaire moyen :

Le temps solaire moyen (TSM) c'est le temps qui correspondrait à une rotation uniforme de la terre autour du soleil.

c) Temps universelle :

Le temps universel (TU) est le temps moyen de Greenwich.

$$\mathbf{TSM = TU + \lambda/15} \quad \mathbf{(II.7)}$$

λ : longitude En degrés, elle est positive (+) en Est, et négative (-) en West.

d) Équation du temps (ET) :

Le mouvement apparent du Soleil n'est pas parfaitement régulier pour deux raisons :

- La rotation de la terre se fait selon l'axe nord-sud, alors que le mouvement de la terre par rapport au soleil s'effectue dans le plan de l'écliptique.
- La vitesse angulaire de la Terre dans son mouvement héliocentrique n'est pas constante (loi des aires).

La durée des journées va donc varier légèrement (entre 23 h 59 m 39 s et 24h 00 m 30s). Cette variation entraîne l'existence d'un écart entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen. Cet écart porte le nom d'équation du temps.

$$\mathbf{ET=TSV-TSM} \quad \mathbf{(II.8)}$$

L'équation du Temps est donnée avec une bonne précision par la formule suivant :

$$\mathbf{ET= 9.87.\sin (2N)-7.53.\cos (N) -1.5.\sin(N)} \quad \mathbf{(II.9)}$$

ET : en heures

$$\mathbf{N= \left(\frac{360}{365}\right)*(n-81)} \quad \mathbf{(II.10)}$$

n : numéro de jour

e) Temps légal (TL):

Le temps légal (TL) est le temps officiel d'un état, il est donné par.

$$\mathbf{TL = TU + C} \quad \mathbf{(II.11)}$$

C : Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

$$C = TL \text{ (pour midi TU)} - 12$$

f) Lever et coucher du soleil :

On s'intéresse ici à deux instants particuliers de la journée, le lever et le coucher du soleil donné par les relations.

$$\mathbf{TSV=12+\delta/15} \quad \mathbf{(II.12)}$$

$$\mathbf{TSM=TSM-60.ET} \quad \mathbf{(II.13)}$$

$$\mathbf{TSM = TU + \lambda/15} \quad \mathbf{(II.14)}$$

$$\mathbf{TL = TU + C} \quad \mathbf{(II.15)}$$

A partir ces équations on peut trouver la relation suivant :

$$\mathbf{\delta= \lambda + 15(ET + TL -12 -C)} \quad \mathbf{(II.16)}$$

II-3 Modèle du rayonnement solaire :

II-3-1 Rayonnement solaire sur un plan horizontal [35] :

Dans cette section, nous avons étudié l'utilisation du rayonnement solaire sur une surface plane horizontale à différentes échelles de temps (quotidienne, mensuelle et annuelle). Plusieurs formules simplifiées sont disponibles pour estimer cette quantité.

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le Tableau (II-2) :

Tableau (II-2) : rayonnement sur un plan horizontal [35]

Eclairement solaire Wm^{-2}	Direct	S^*_H	$G^*_H = D^*_H + S^*_H$
	Diffus	D^*_H	
	Global	G^*_H	

- **Le rayonnement direct S^*_H :** Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir des modifications, Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil sous incidence normale est désigné par Nous avons la relation :

$$\mathbf{S^*_H = I^* \sin(h)} \quad \mathbf{(II.17)}$$

- I^* : le flux reçu (éclairage) en $W.m^{-2}$

L'éclairement solaire direct S^* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

$$I^* = 1370 \exp \left[-\frac{\text{TRL}}{0.9+9.4 \sin(h)} \right] \quad (\text{II.18})$$

Où **TRL** est le facteur de trouble de Linke calculable par :

$$\text{TRL} = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln(\text{PV}) \quad (\text{II.19})$$

β : est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à 0,05 en zone rurale

PV : est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg

- **Le rayonnement diffus D^*_H** : Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

L'éclairement solaire diffus sur un plan horizontal peut être déterminé par fonction des données disponibles :

$$D^*_H = 54.8 \sqrt{\sin(h)} \left[\text{TRL} - 0.5 - \sqrt{\sin(h)} \right] \quad (\text{II.20})$$

- **Le rayonnement global G^*_H** : est la somme du rayonnement direct et diffus.

$$G^*_H = D^*_H + S^*_H \quad (\text{II.21})$$

II-3-2 Rayonnement solaire sur un plan incliné : [35]

Le rayonnement direct :

$$S^*_H = \frac{S^*_H}{\sin(h)} [\cos(h) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\Psi - \alpha) + \sin(h) \cdot \cos(\beta)] \quad (\text{II.22})$$

Avec :

β : L'inclinaison

α : l'angle d'orientation

S^*_H : Le rayonnement direct sur un plan horizontal

- **Le rayonnement diffus :**

$$D^* = \left(\frac{D^*_H}{2}\right) (1 + \cos(\beta)) \quad (\text{II. 23})$$

D^*_H : Le rayonnement diffus sur un plan horizontal

- Le rayonnement réfléchi R^* :

$$R^* = \left(\frac{G^*_H}{2}\right) \rho(1 - \cos(\beta)) \quad (\text{II. 24})$$

ρ : L'albédo

G^*_H : Le rayonnement global sur un plan horizontal

- Le rayonnement global :

$$G^* = S^* + D^* + R^* \quad (\text{II. 25})$$

II-3-3 Organigramme de modèle rayonnement :

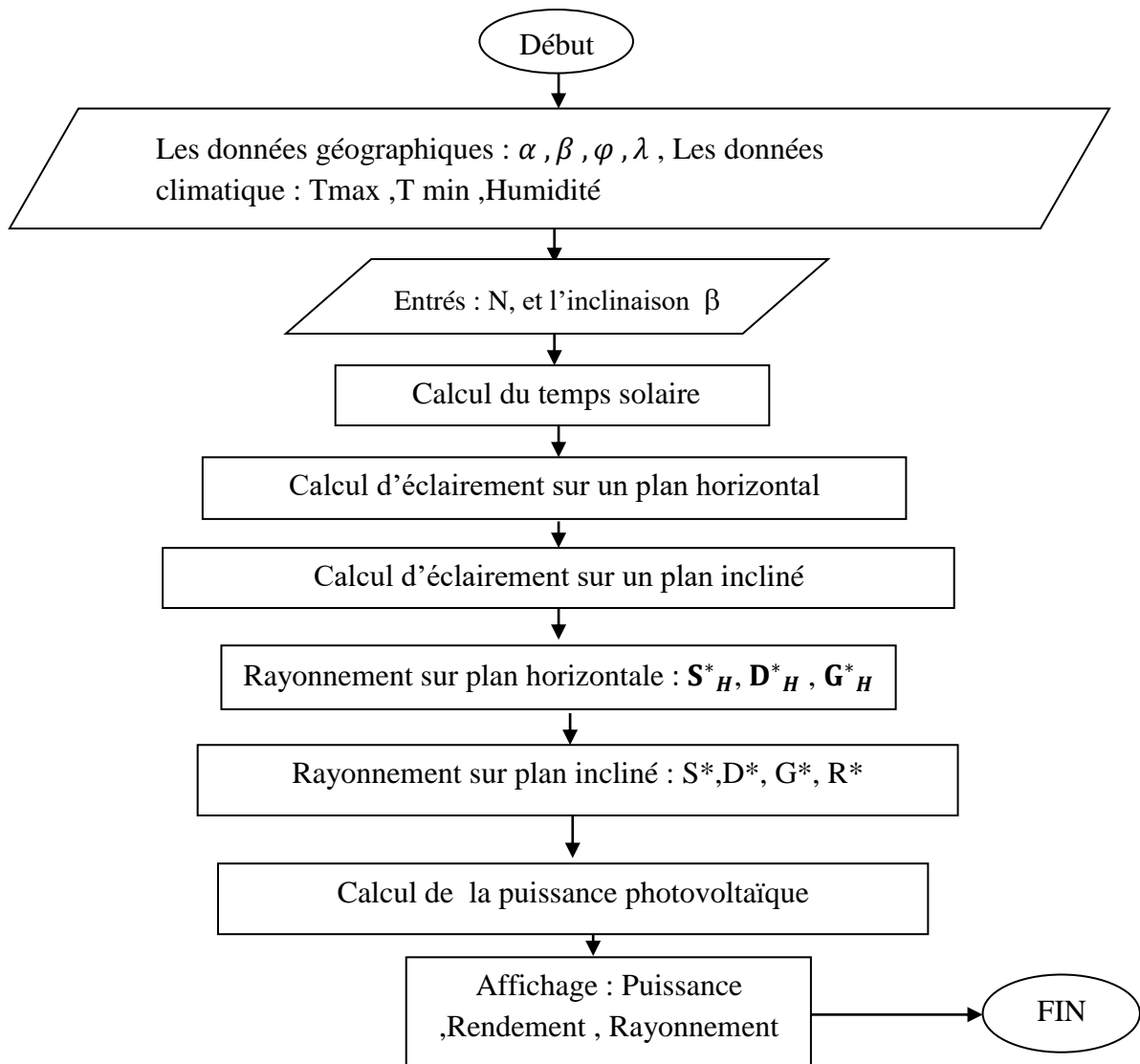


Figure II.3: Organigramme de calcul du rayonnement solaire sur différents plans.

II-4 Modèle de la puissance photovoltaïque : [32]

Différents modèles mathématiques sont employés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles varient selon la méthode de calcul utilisée et le nombre de paramètres impliqués dans la caractéristique courant-tension. Dans notre situation, nous avons opté pour un modèle simplifié qui requiert uniquement les paramètres fournis par le fabricant.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V+IR_S}{nVT} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (\text{II. 26})$$

Ou

- **I**: le courant fourni par la cellule
- $I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right)$: le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).
- **V**: la tension à la borne de cellule.
- **I₀**: le courant de saturation inverse d'une diode.
- $VT = \frac{KT}{e}$: la tension thermique.
- **e**: charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}C$).
- **K**: constante de Boltzmann ($1381 \cdot 10^{-23} J/K$).
- **n**: facteur de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique.
- **T**: température effective de la cellule en kelvin.

II-4-1 Variation de la tension à circuit ouvert : [32]

La variation de la tension de circuit ouvert dépend de la température du module et de l'éclairement, elle est donnée par l'équation suivant :

$$V_{CO} = V_{CO0} + \beta \cdot \Delta T + \alpha(G - G_0) \quad (\text{II. 27})$$

- **V_{CO0}**: Tension à circuit ouvert de référence (V).
- **α** : coefficient de variation de courant à circuit ouvert en fonction de la température (A/°C).
- **β**: coefficient de variation de la tension de court-circuit en fonction de la température (V/°C).
- **ΔT** : variation de la température (°C).

II-4-2 Point de fonctionnement optimum (V_m, I_m) : [32]

Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil.

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (\text{II.28})$$

- I_m : Point du courant à la puissance maximale.
- V_m : point de tension à la puissance maximale.

II-4-3 Rendement photovoltaïque : [32]

C'est le rapport de la puissance photovoltaïque sur la puissance du rayonnement solaire.

$$R_{PV} = \frac{V \cdot I}{E \cdot S_p} \quad (\text{II.29})$$

II-4-4 Organigramme de calcul de puissance photovoltaïque du système :

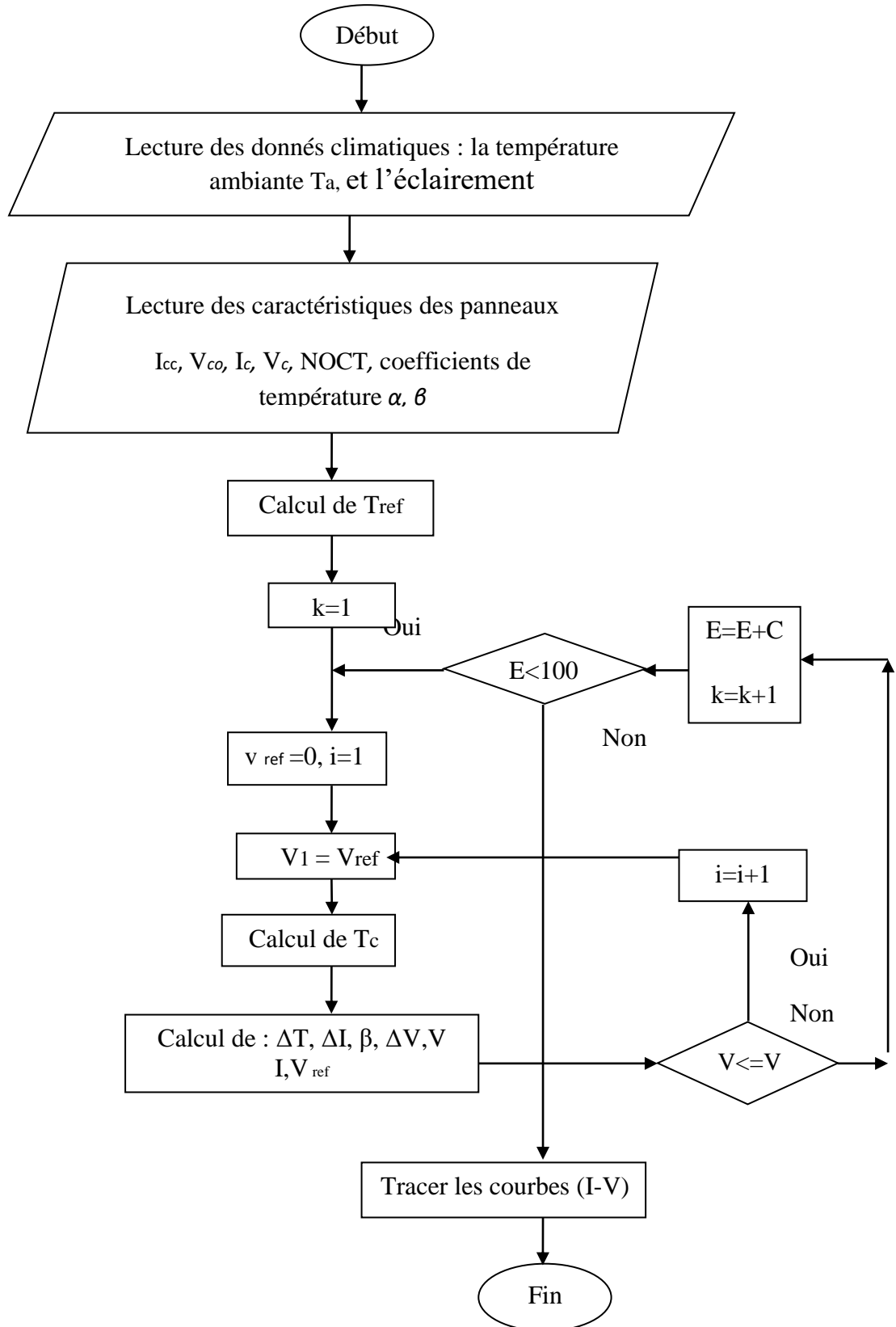


Figure (II.4): Organigramme des caractéristique I-V du module PV. [32]

II-5 Matériels :

II-5-1 Données géographique et climatique :

II-5-1-1 Présentation des sites d'études :

Site d'Ouargla : [36]

La wilaya d'Ouargla occupe une position géographique dans le sud-est de l'Algérie. Elle couvre une étendue de **163 230 km²**. La ville d'Ouargla, qui est la capitale de la wilaya, se trouve aux coordonnées Latitude **31°94'**, Longitude **5°33'**, à une altitude de **157** mètres,

La wilaya de Ouargla est limitée par :

- ✓ Djelfa, Biskra et El Oued, au Nord.
- ✓ Illizi et Tamanrasset, au Sud.
- ✓ La Tunisie, à l'Est.
- ✓ Ghardaïa, à l'Ouest.

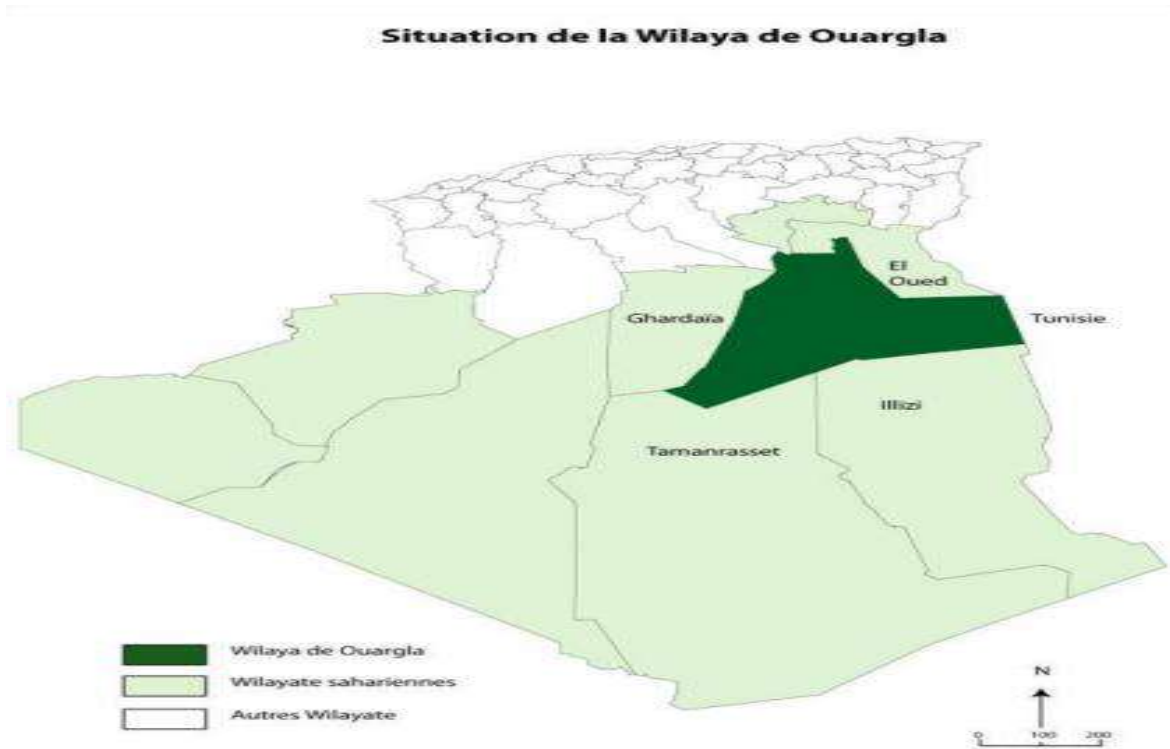


Figure II-5 : Situation de la wilaya d'Ouargla [37].

II-5-1-2 Les Données climatique d'Ouargla : [38].

Les résultats sont obtenus pour quater mois de l'année 2022 : janvier et avril et juillet et octobre :

Journalière :

Tableau (II-3) : Les données climatique Journalière d'Ouargla

Jouer	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	Humidité
17 janvier 2022 N=17	14	1	57.75%
15 avril 2022 N=105	23	15	54.05%
17 juillet 2022 N=198	39	29	18.4%
15 octobre 2022 N=288	33	20	40.4%

Mensuel :**Tableau (II-4) : Les données climatique Mensuel d'Ouargla**

Mensuel	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	Humidité
Janvier N= 1-31	22.4	-0.2	46.9%
Avril N= 90-120	36	11.2	27.8%
Juillet N= 180-212	48.5	25.2	15.9%
Octobre N= 273-304	35.9	12.2	30%

Annuelle :**Tableau (II-5) : Les données climatiques annuelles d'Ouargla**

Annuelle	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	Humidité
	48.6	-0.2	28.9

II-6 Matériels utilisés :

II-6-1 Technologie organique PTB7 : [25].

les cellule organique PTB7, ou poly[[4,8-bis[(2-éthylhexyl)oxy]benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophène-2,6-diyl][3-fluoro-2-[(2-éthylhexyl)carbonyl]thiéno[3,4b]thiophénediyle]] (c'est le nom chimique complet), est un matériau semi-conducteur polymère organique utilisé dans les cellules solaires organiques. Ces cellules solaires convertissent la lumière du soleil en électricité à l'aide de matériaux organiques. La couche active d'une cellule solaire à base de PTB7 consiste généralement en un mélange de PTB7 et d'un dérivé de fullerène. Lorsque la lumière du soleil frappe la couche active, les photons sont absorbés, excitant les électrons dans le polymère. Ces électrons excités sont transférés aux molécules de fullerène, créant des charges séparées. Les charges sont collectées aux électrodes de la cellule solaire, générant un courant électrique. Les cellules solaires organiques à base de PTB7 offrent des avantages tels que le faible coût, la légèreté et la flexibilité potentielle pour diverses applications.

Les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (II-6) : Caractéristiques des cellules solaires organique PTB7

Paramètres électriques	Valeurs
Courant de court circuit I_{cc} [A]	15
Tension de circuit ouvert V_{oc} [V]	0.6
courant de puissance maximal I_{max}	10
tension de puissance maximale V_{max}	0.5
NOCT [C°]	47
Coefficient de température a I_{cc}	0.1
Coefficient de température a V_{oc}	-0.15
La surface [cm ²]	1

II-6-2 Technologie pérovskite ($CH_3NH_3PbI_3$) : [39]

Les cellules pérovskite ($CH_3NH_3PbI_3$), également connu sous le nom d'iodure de plomb de méthylammonium ou $MAPbI_3$, est un matériau pérovskite largement utilisé dans le

domaine de la recherche sur les cellules solaires. Les cellules solaires à pérovskite sont un type de technologie photovoltaïque de nouvelle génération qui a montré un grand potentiel de conversion de l'énergie solaire à haut rendement et à faible coût.

Dans le contexte de $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, il fait référence à la composition spécifique du matériau pérovskite. Il se compose d'un cation méthylammonium (CH_3NH_3^+) et d'iodure de plomb (PbI_3^-) disposés dans une structure cristalline pérovskite.

Les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (II-7) : Caractéristiques des cellules solaires pérovskite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

Paramètres électriques	Valeurs
Courant de court circuit I_{cc} [A]	20
Tension de circuit ouvert V_{oc} [V]	0.9
courant de puissance maximal I_{max}	15
tension de puissance maximale V_{max}	0.8
NOCT [C°]	47
Coefficient de température a I_{cc}	-0.3
Coefficient de température a V_{oc}	-0.1
La surface [cm ²]	1

II-6-3 Technologie multi jonction (GaAs) : [30]

Une cellule solaire GaAs à jonctions multiples est un type de cellule solaire composée de plusieurs couches de matériau semi-conducteur à l'arséniure de gallium avec des bandes interdites variables. Ces cellules sont conçues pour convertir efficacement la lumière du soleil en électricité en capturant différentes parties du spectre solaire. Ils sont connus pour leur rendement élevé et sont couramment utilisés dans des applications spécialisées telles que les satellites spatiaux et les systèmes photovoltaïques concentrés.

Les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (II-8) : Caractéristiques des cellules solaires multi jonction (GaAs)

Paramètres électriques	Valeurs
Courant de court circuit I_{cc} [A]	32
Tension de circuit ouvert V_{oc} [V]	0.9
courant de puissance maximal I_{max}	27
tension de puissance maximale V_{max}	0.75
NOCT [C°]	42
Coefficient de température a I_{cc}	-0.03
Coefficient de température a V_{oc}	-0.29
La surface [cm ²]	1

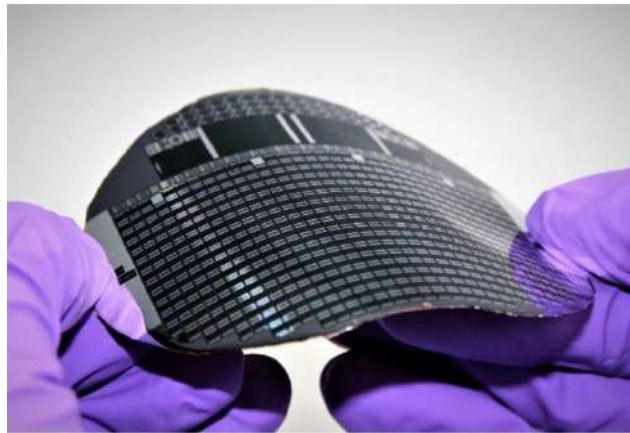


Figure II-6 : cellule multi jonction (GaAs) [40].

II-7 Outils Informatique : [41]

II-7-1 MATLAB :

MATLAB, qui est l'abréviation de Matrix Laboratory, a été initialement développé en Fortran par C. Moler dans le but de faciliter l'accès aux logiciels matriciels développés dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle de MATLAB, écrite en C par The MathWorks Inc., est disponible en versions professionnelle et étudiante. Il est compatible avec plusieurs plates-formes telles que Sun, Bull, HP, IBM, Dell (compatibles avec les PC utilisant DOS, Unix ou Windows), Macintosh, iMac et plusieurs machines parallèles.

MATLAB est un environnement puissant, complet et convivial spécialement conçu pour le calcul scientifique. Il offre aux ingénieurs, chercheurs et scientifiques un système interactif qui intègre harmonieusement le calcul numérique et la visualisation. Cet environnement performant, ouvert et programmable permet d'obtenir des gains remarquables en termes de productivité et de créativité.

MATLAB dispose de son propre langage intuitif et naturel, ce qui permet de réaliser des économies de temps de calcul significatives par rapport à des langages tels que C, Turbo Pascal et Fortran. Avec MATLAB, il est possible d'établir des liaisons dynamiques avec des programmes en C, Fortran ou même en Java, ce qui permet l'échange de données avec d'autres applications (via le serveur ou le client MATLAB utilisant DDE). MATLAB peut également être utilisé comme moteur d'analyse et de visualisation. Les domaines couverts sont variés et incluent le traitement d'images, le traitement de signaux, les systèmes de contrôle, l'identification de systèmes, les réseaux neuronaux, la logique floue, les calculs structuraux, les statistiques, et bien plus encore.



CHAPITRE III :
RESULTATS ET
DISCUSSION

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous effectuons une présentation et une discussion des résultats obtenus dans le cadre de notre étude sur les cellules solaires de troisième génération. Nous mettons la relation entre les corrélations établies dans le chapitre précédent et les caractéristiques calculés de rendement, de rayonnement et de puissance. Notre objectif est d'explorer les paramètres ayant un impact significatif sur cellules solaires, en analysant différentes journées e, mois et les années.

III-2 Etude de système photovoltaïque pour deux plans : inclinés et horizontale

III-2-1 Etude de rayonnement solaire

III-2-1-1 Evolution journalière :

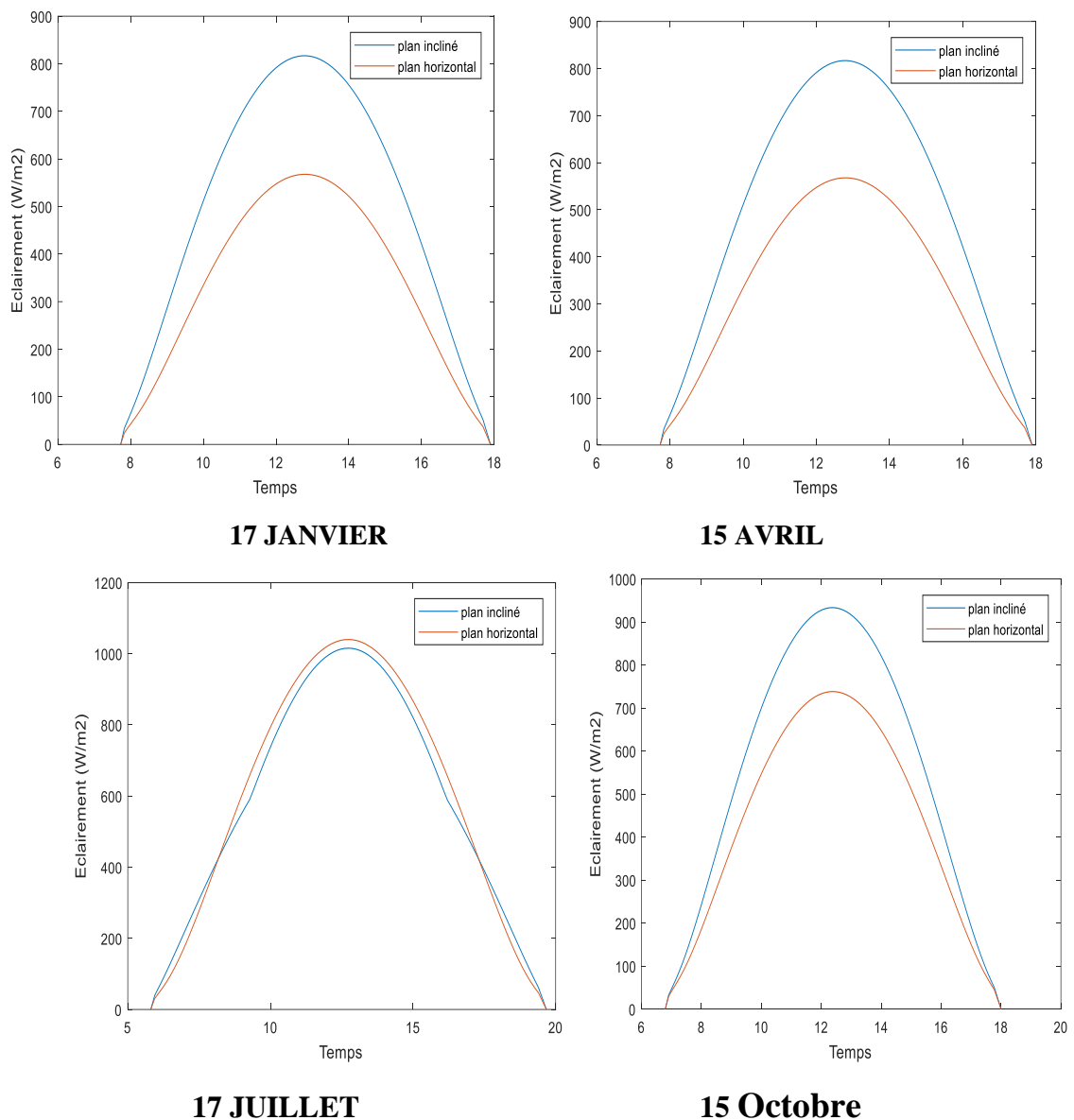


Figure III-1- Evolution d'éclairement solaire en fonction de temps pour différents jours d'année 2022

La figure (III-1) représente l'évolution de l'éclairement solaire en fonction de temps légal pour quatre jour: 17 janvier, 15 avril, 17 juillet et 15 octobre pour les deux plans: incliné à 31° et plan horizontal. Nous remarquons une évolution gaussienne pour les deux plans dans les quatre jours

La valeur maximal d'éclairement atteint à la journée de 17 juillet qu'elle dépasse 1000 W/m², ainsi la durée de jour était aussi maximale (14 heures). Le plan incliné captait plus de rayonnement par rapport le plan horizontal sauf la journée de 17 juillet (l'angle optimal à l'été =0).

III-2-1-2 Evolution mensuel de rayonnement solaire :

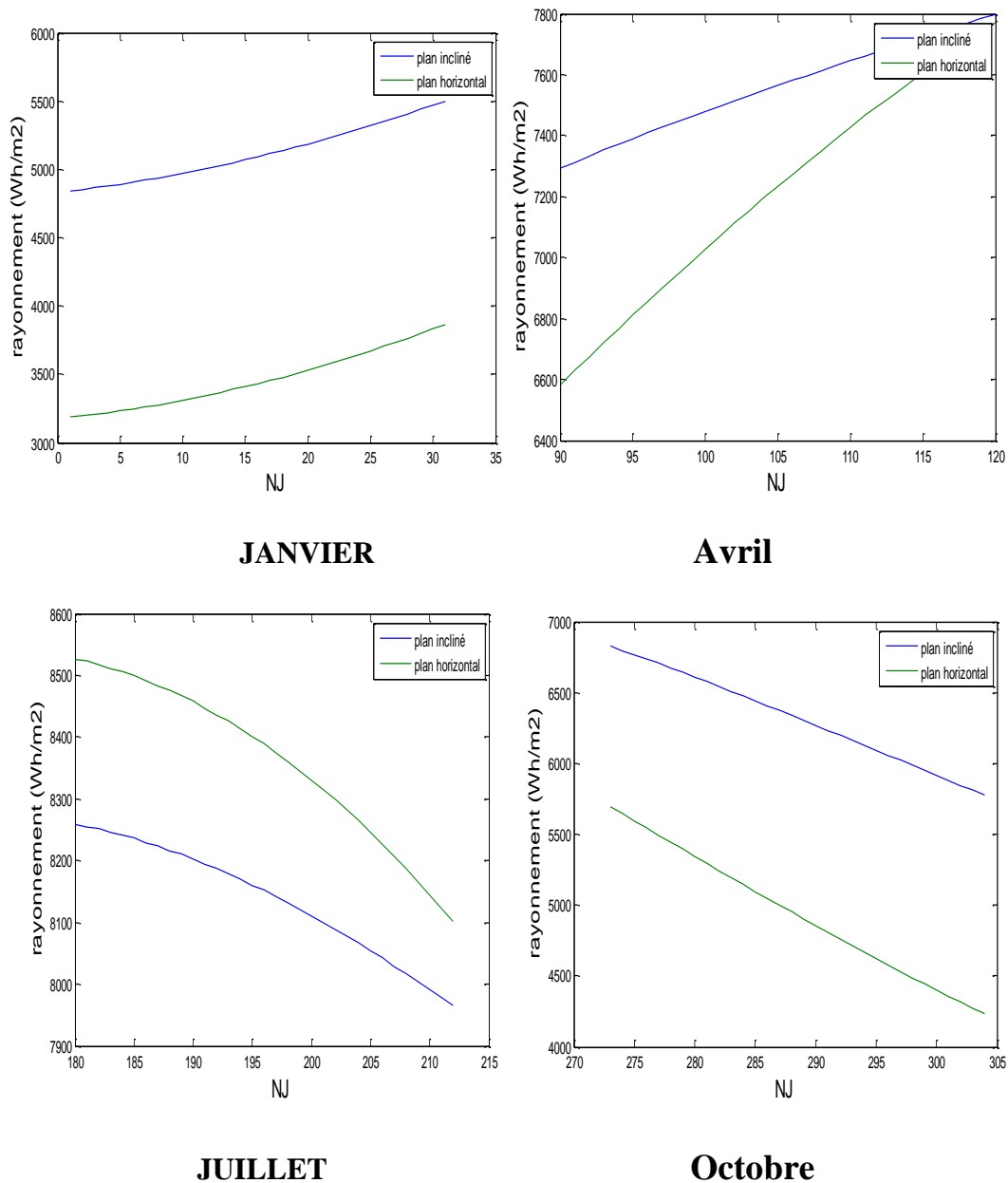


Figure III-2- Evolution de rayonnement solaire en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022

La figure (III-2) représente l'évolution de rayonnement solaire en fonction de numéro de jours pour quatre mois : janvier, avril, juillet, et octobre

Nous remarquons une augmentation de rayonnement dans les mois: janvier, avril, et une diminution dans mois: juillet, octobre, cette différence justifier par déférence de durée du jour (plus grands à l'été)

Le plan incliné reste captait plus de rayonnement par apport le plan horizontal sauf le mois de juillet ou l'angle optimal est égal à 0.

III-2-1-3 Evolution annuelle de rayonnement solaire :

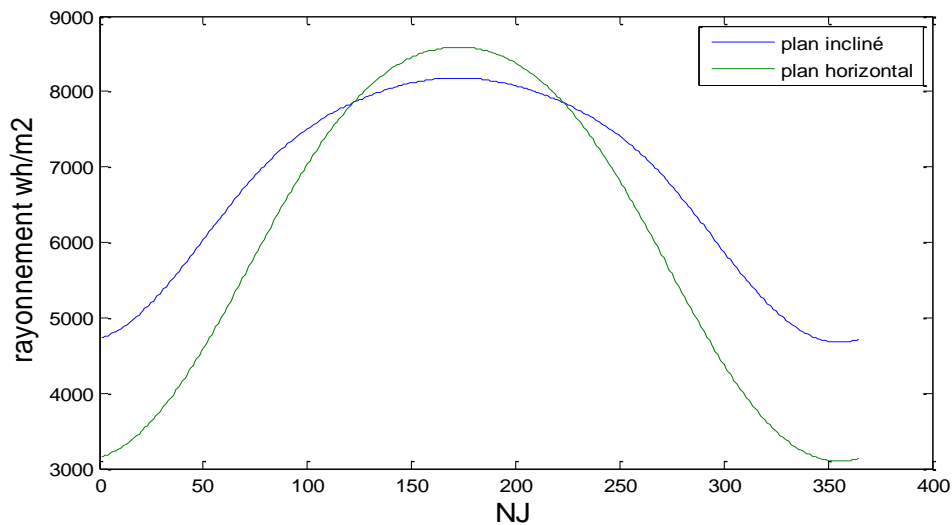


Figure III-3- Evolution annuel de rayonnement solaire en fonction de Numéro de jours pour l'année 2022

La figure (III-3) représente l'évolution annuel de rayonnement solaire en fonction de numéro de jours, nous remarquons que : le rayonnement augmente dans les jours 1-175, puis commence à diminuer entre les jours 175-365. Comme justifier précédemment, le plan incliné est meilleur entre les jours (1-130) et (230-365), les restes des jours le plan horizontal seront le meilleur.

III-2-2 Etude de Puissance

III-2-2-1 Evolution journalière

A) Cellule Organiques PTB7 PCBM:

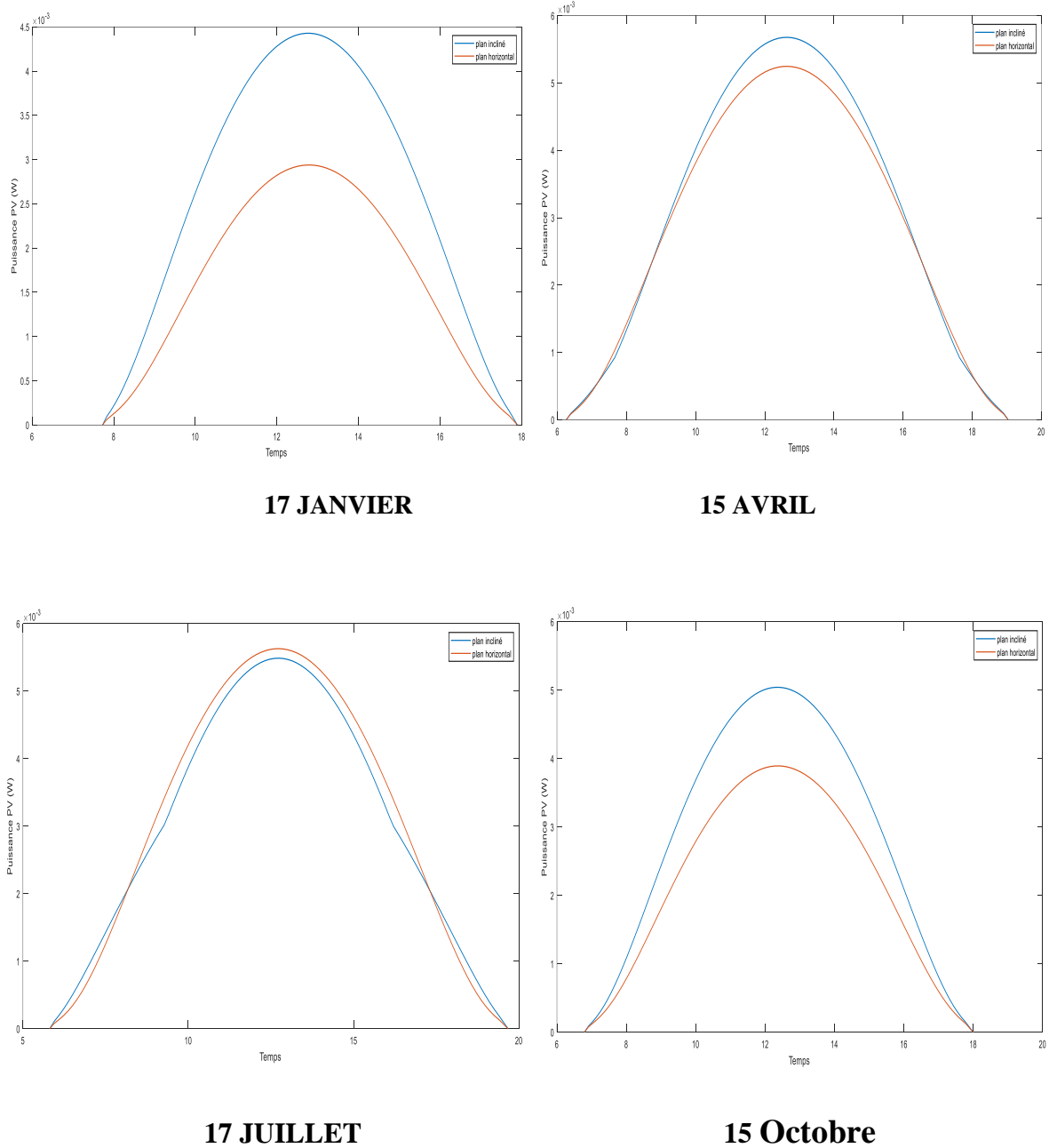


Figure III-4- Evolution de Puissance de cellule solaire Organiques en fonction de temps pour différents jours d’année 2022

La figure (III-4) représente l'évolution de puissance photovoltaïque en fonction de temps pour les quatre jours : 17 janvier, 15 avril, 17 juillet et 15 Octobre jours, pour les cellules organiques **PTB7 PCBM**.

D’après cette figure, nous remarquons que l’évolution de puissance est proportionnelle à l’évolution de l’éclairement solaire. Et comme justifier dans l’évolution d’éclairement le plan incliné est meilleur pour les jours de janvier, avril et octobre, mais le plan horizontal est le meilleur pour la journée de juillet.

B) Cellule Pérovskite: methylammonium lead iodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

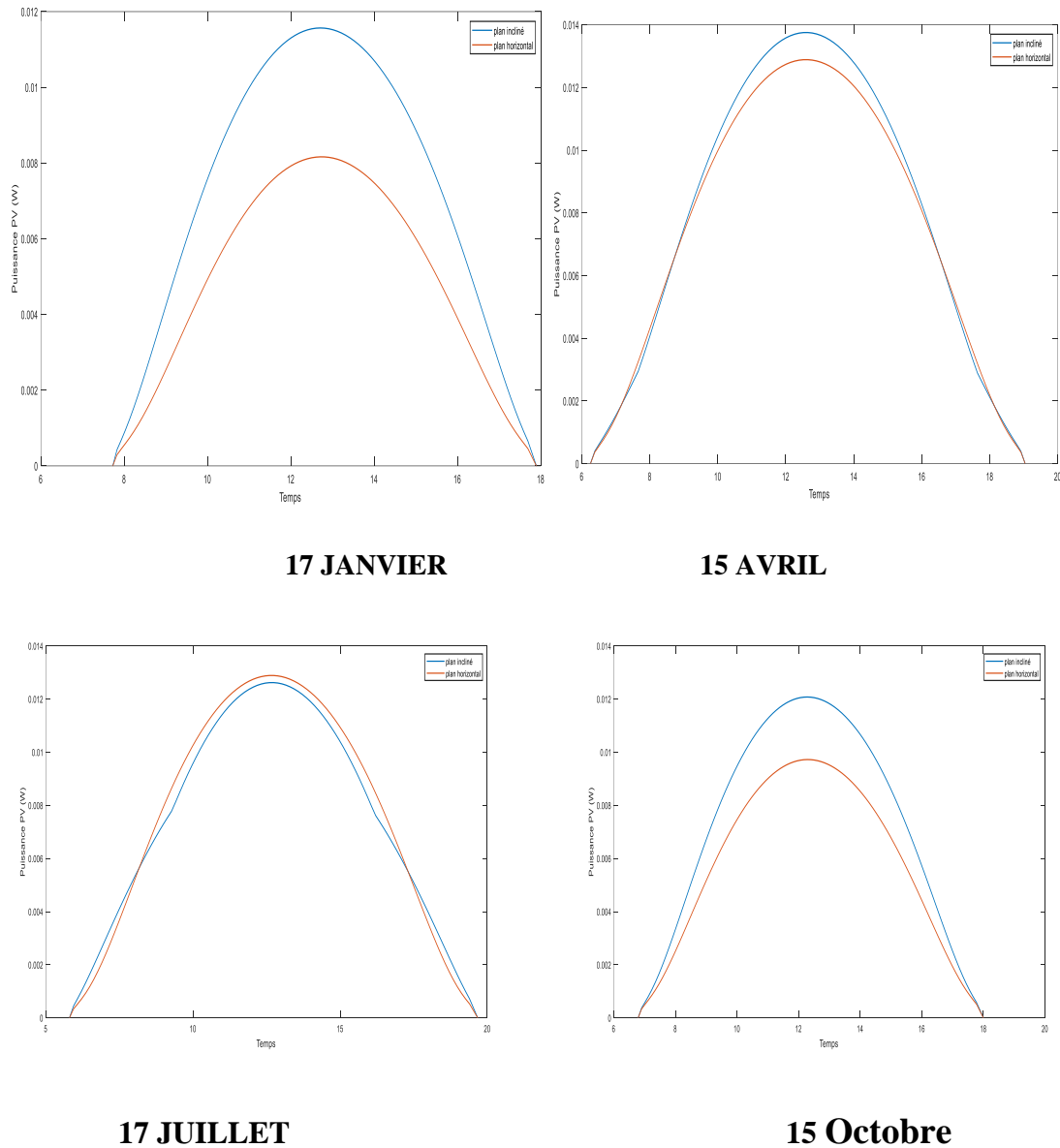
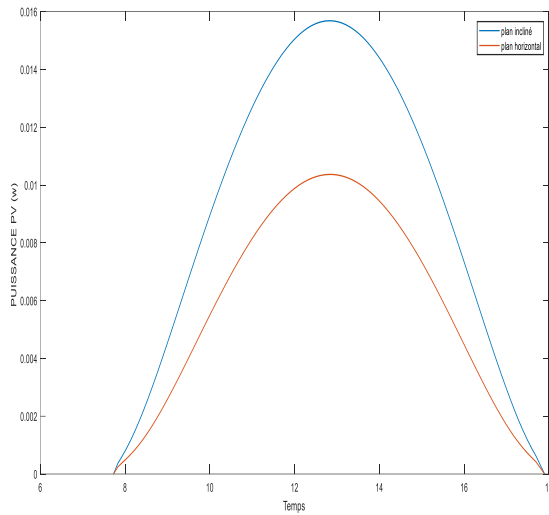


Figure III-5- Evolution de Puissance de cellule solaire Pérovskite en fonction de temps pour différents jours d'année 2022

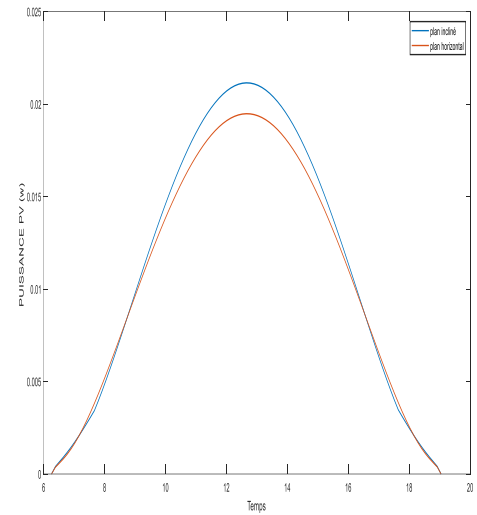
La figure (III-5) représente l'évolution de puissance photovoltaïque en fonction de temps pour les quatre jours : 17 janvier, 15 avril, 17 juillet et 15 Octobre jours, pour les cellules **Pérovskite** : methylammonium lead iodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$).

Nous citons là les mêmes remarques que l'évolution de puissance dans les cellules organiques. Notons là que la puissance produite par cellule de Pérovskite est plus important comparant avec la puissance produite par les cellules organiques.

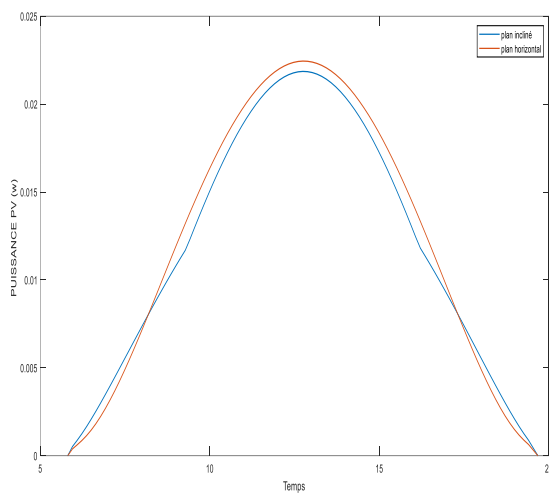
C) Cellule multi jonction Ga As :



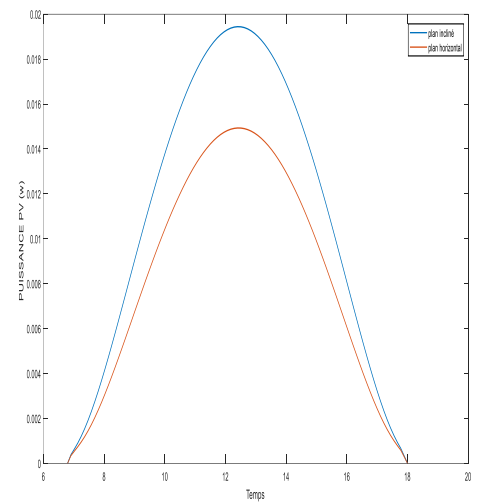
17 JANVIER



15 AVRIL



17 JUILLET



15 Octobre

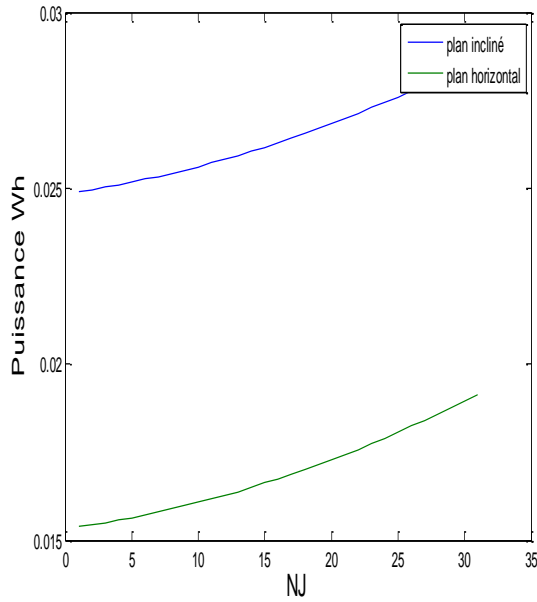
Figure III-6- Evolution de Puissance de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de temps pour différents jours d'année 2022

La figure (III-6) représente l'évolution de puissance photovoltaïque en fonction de temps pour les quatre jours : 17 janvier, 15 avril, 17 juillet et 15 Octobre jours, pour les cellules multi jonction Ga As.

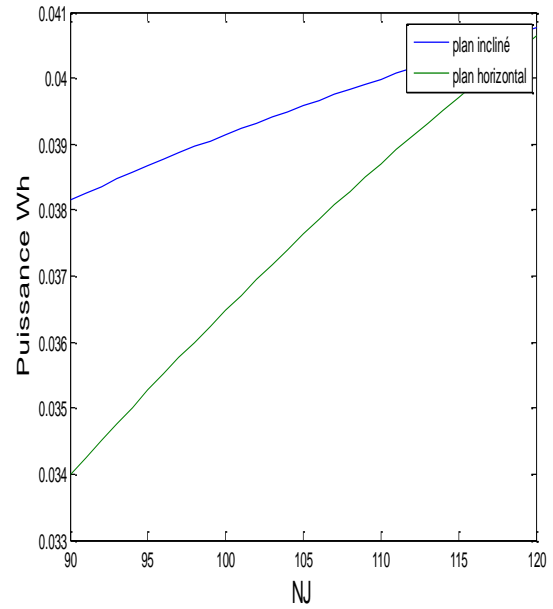
Nous citons là les mêmes remarques que l'évolution de puissance dans les cellules organiques. Notons là que la puissance produite **de cellule multi jonction Ga As** est plus important par rapport d'autre cellule.

III-2-2-2 Evolution mensuel de Puissance PV:

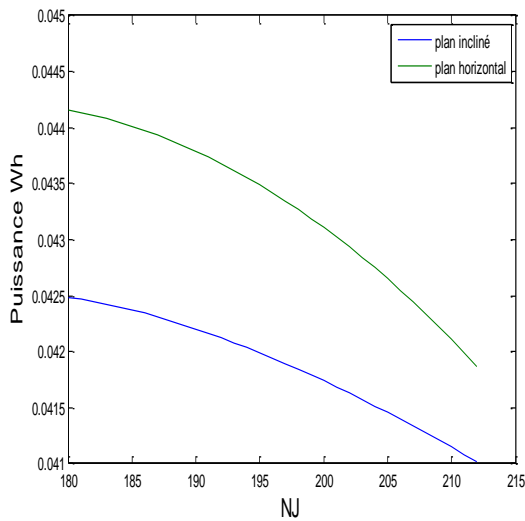
A) Cellule Organiques :



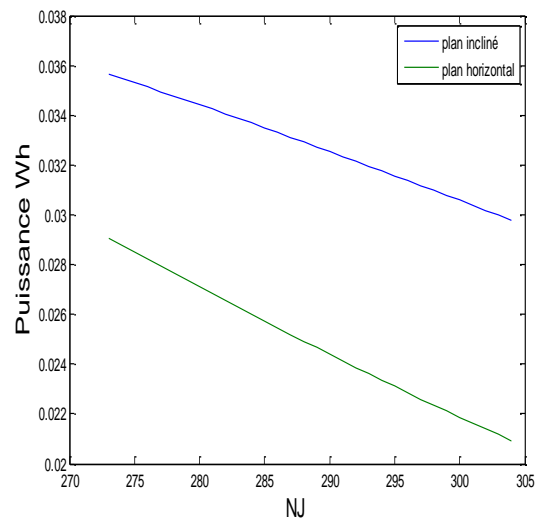
JANVIE



AVRIL



JUILLET



Octobre

Figure III-7- Evolution de Puissance de cellule solaire Organiques en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022

B) Cellule Pérovskite:

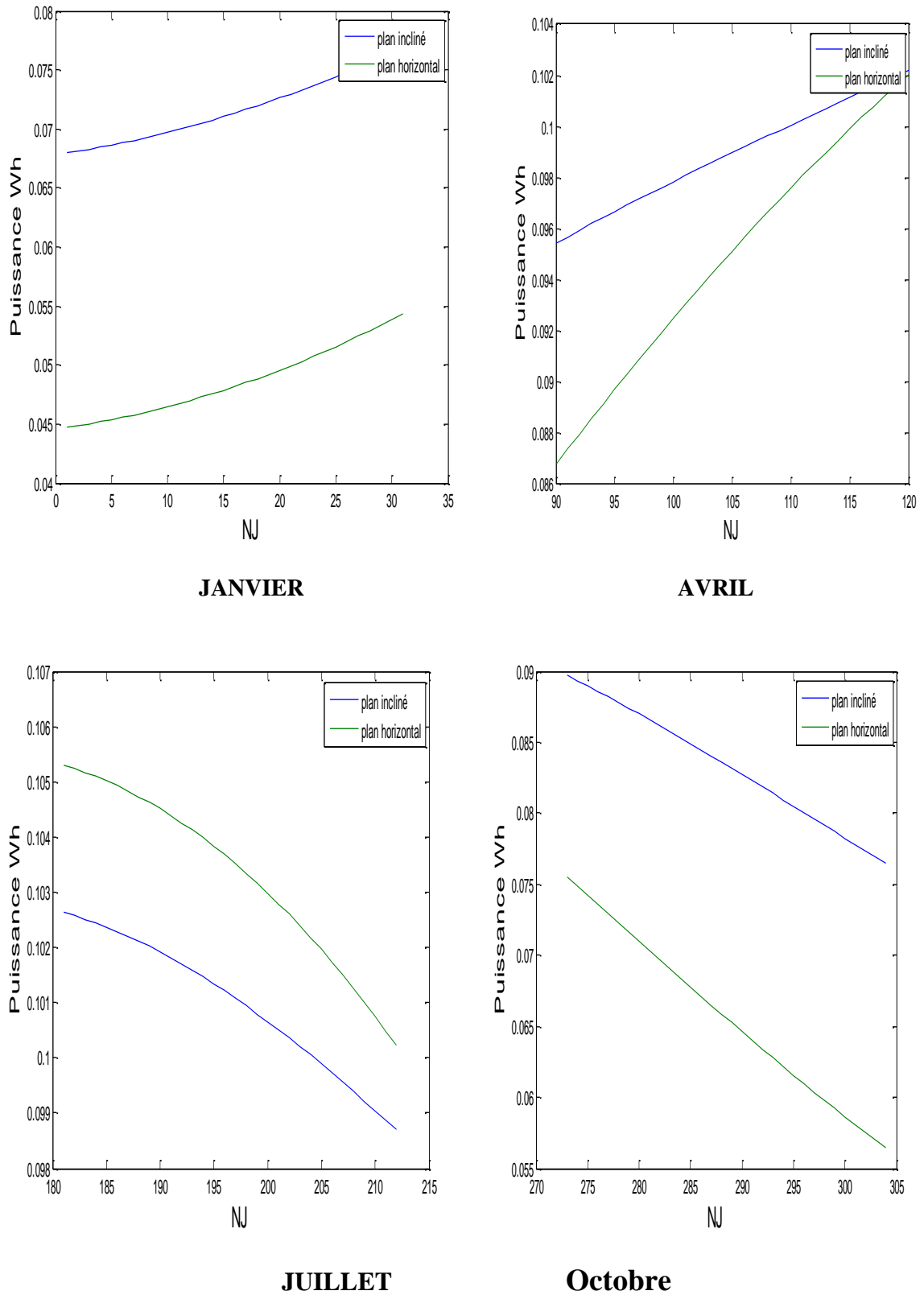
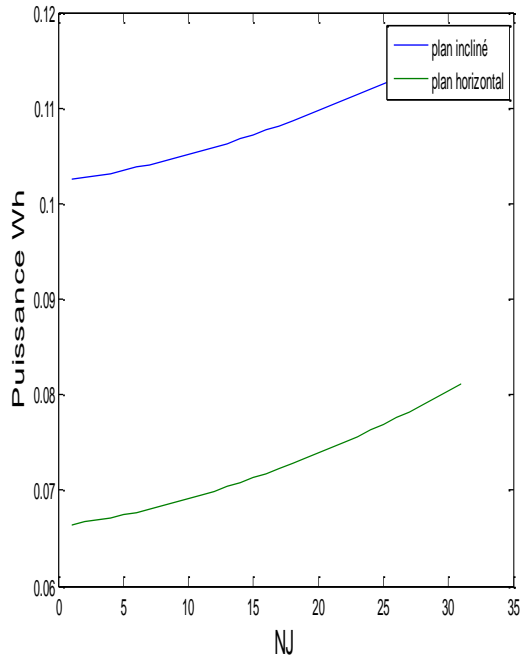
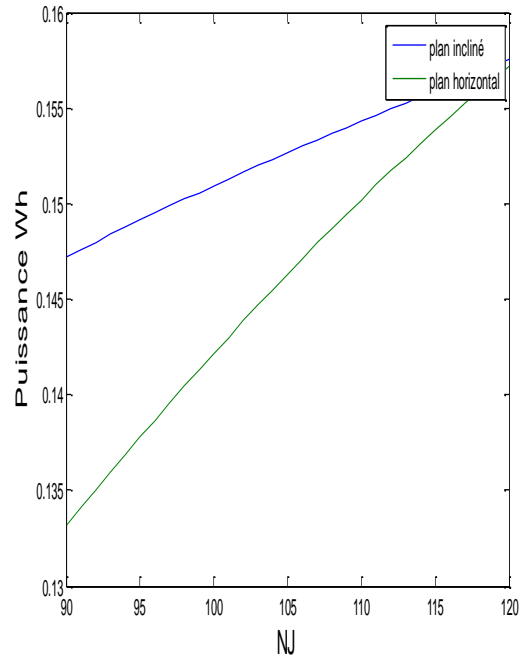


Figure III-8- Evolution de Puissance de cellule solaire Pérovskite en fonction de Numéro de jours pour différents mois d’année 2022

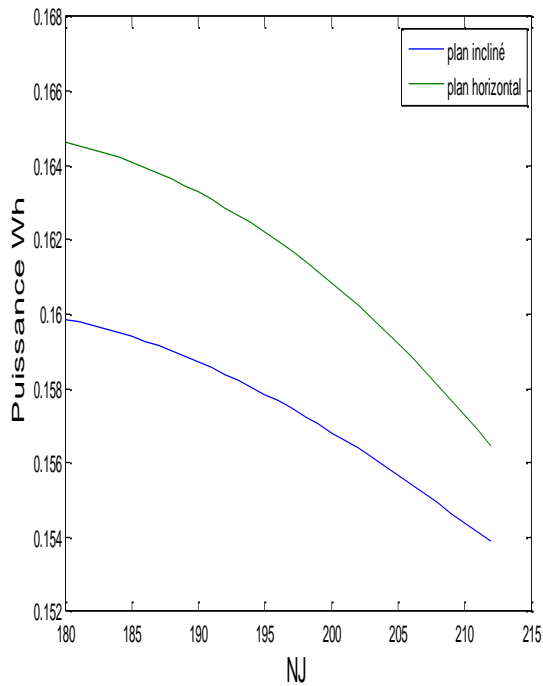
C) Cellule multi jonction Ga As :



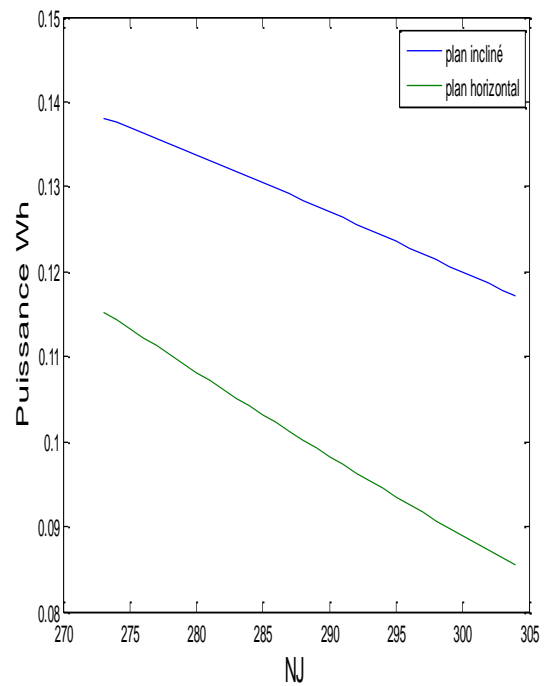
JANVIER



AVRIL



JUILLET



Octobre

Figure III-9- Evolution de Puissance de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022

Les figures : (III-7), (III-8) et (III-9) représentent l'évolution mensuelle de puissance dans les trois cellules pour les quatre mois : Janvier, Avril, Juillet et Octobre.

D'après ces résultats. On confirme les commentaires déduire précédemment.

III-2-2-3 Evolution annuel de Puissance PV:

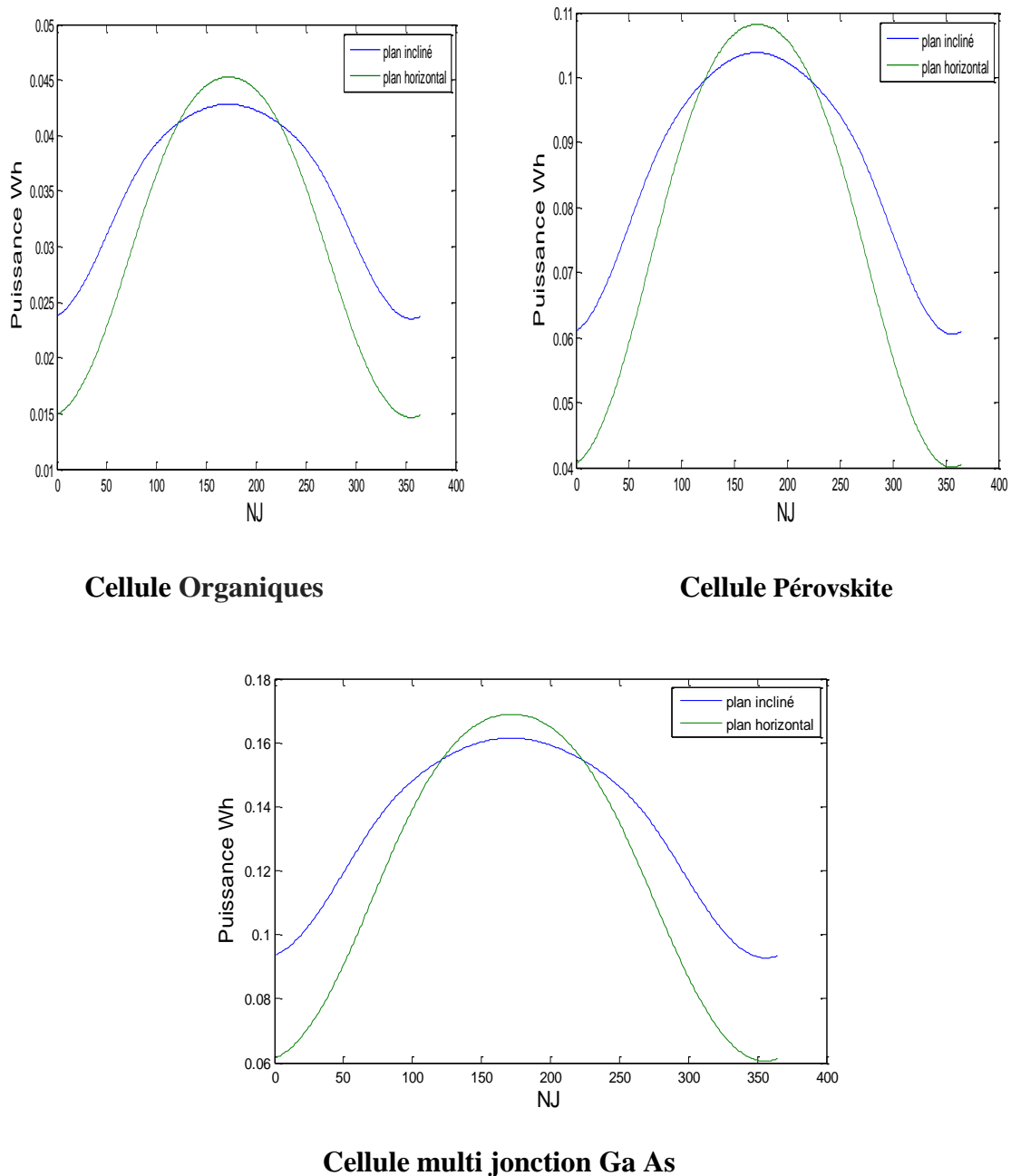


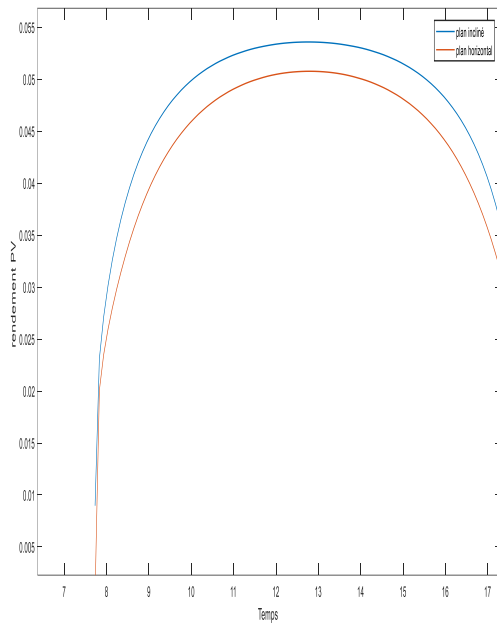
Figure III-10- Evolution annuel de Puissance solaire de différentes cellules en fonction de Numéro de jours pour l'année 2022

La figure (III-10) représente l'évolution annuelle de puissance dans les trois cellules. D'après ces résultats. On confirme les commentaires précédemment. Ainsi de déduire que les cellules multi jonction Ga As est la meilleure dans la puissance produite.

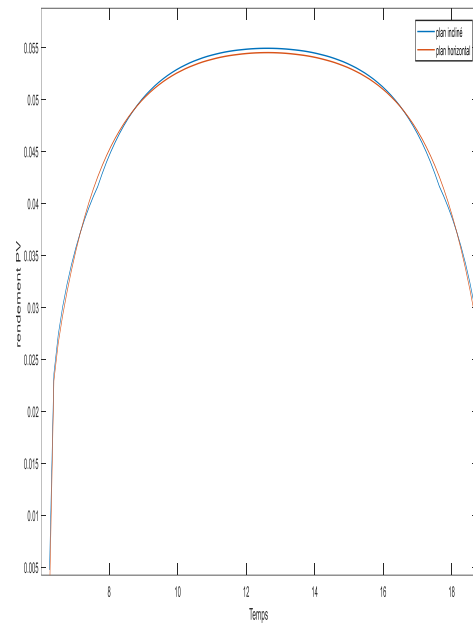
III-2-3 Etude de rendement photovoltaïque

III-2-3-1 Evolution journalière de rendement :

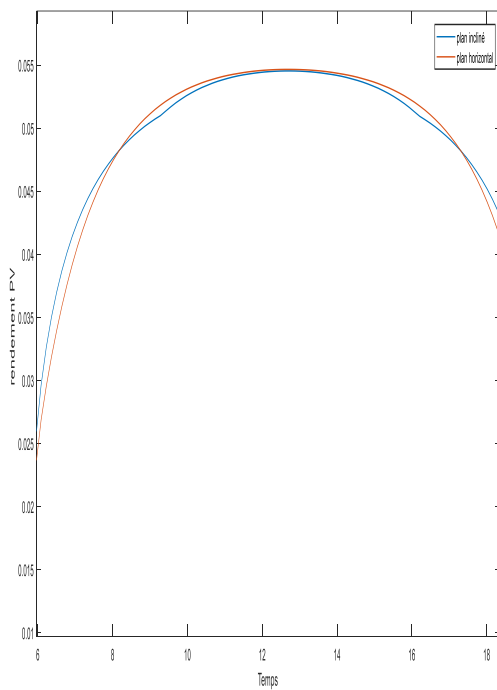
A) Cellule Organiques :



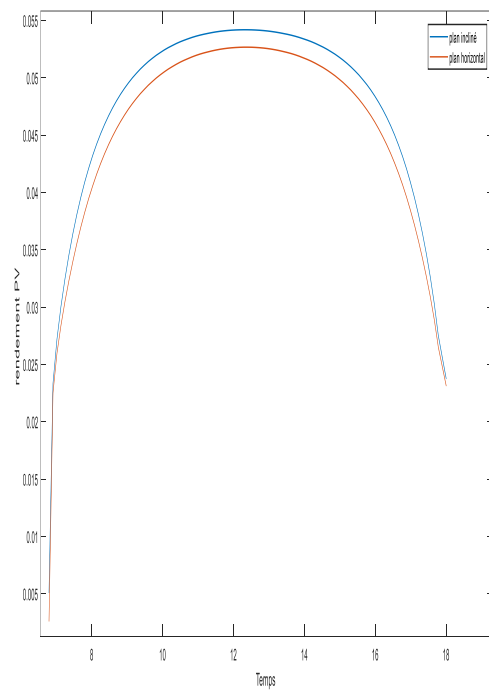
17 JANVIER



15 AVRIL



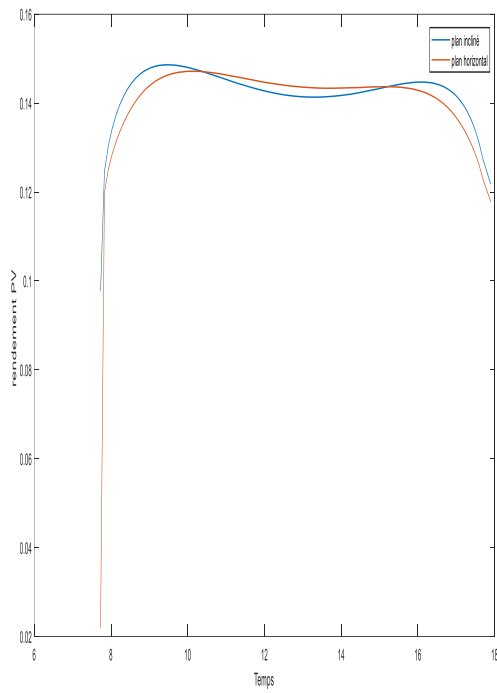
17 JUILLET



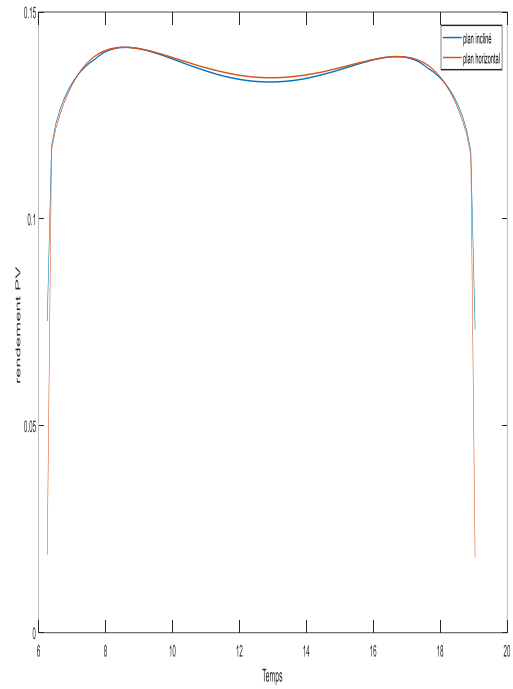
15 Octobre

Figure III-11- Evolution de rendement de cellule solaire Organiques en fonction de temps pour différents jours d'année 2022

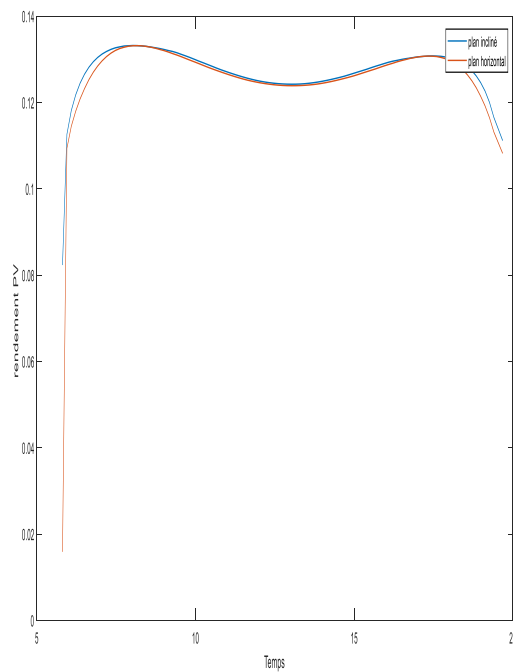
B) Cellule Pérovskites:



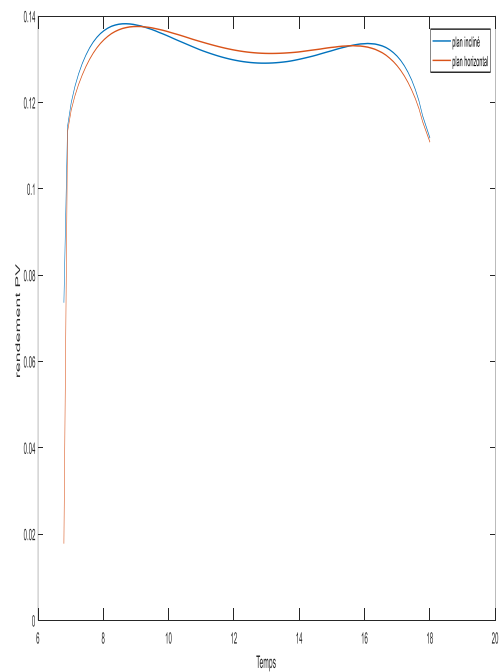
17 JANVIER



15 AVRIL



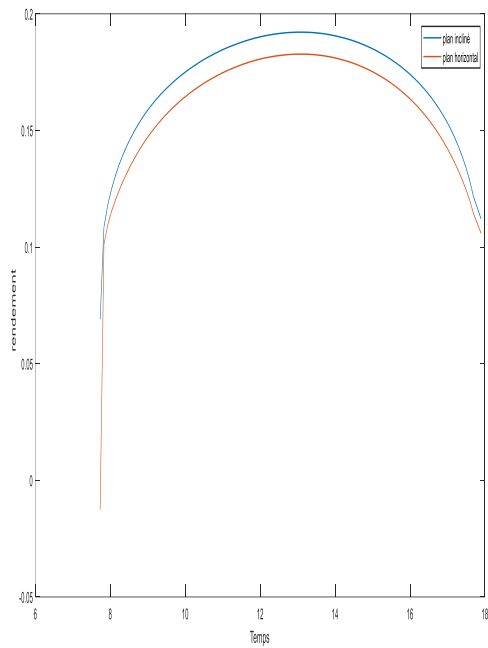
17 JUILLET



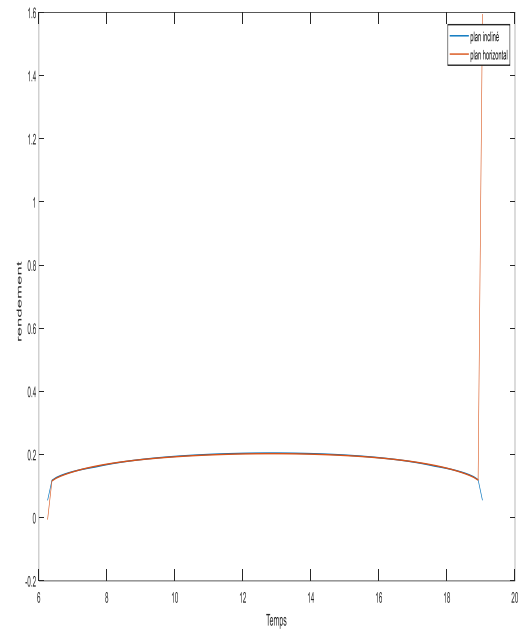
15 Octobre

Figure III-12- Evolution de rendement de cellule solaire Pérovskites en fonction de temps pour différents jours d'année 2022

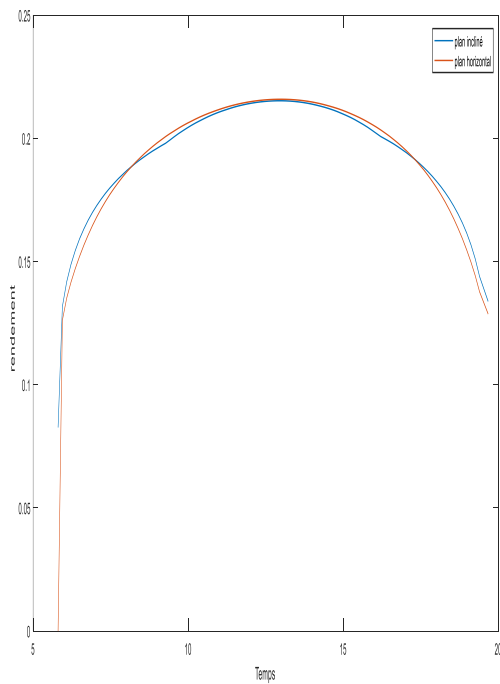
C) Cellule multi jonction Ga As :



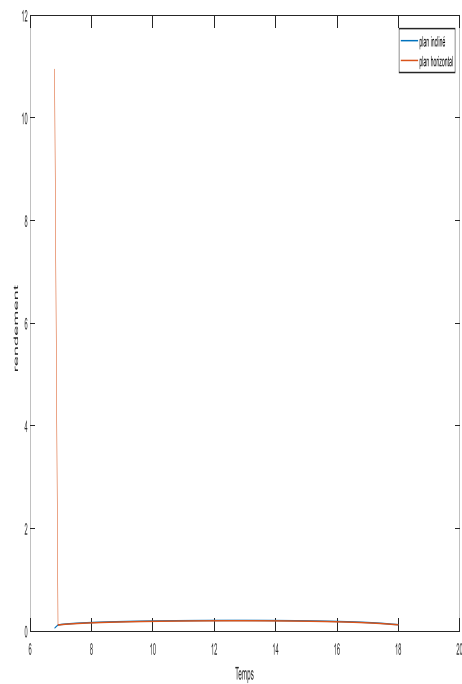
17 JANVIER



15 AVRIL



17 JUILLET



15 Octobre

Figure III-13- Evolution de rendement de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de temps pour différents jours d'année 2022

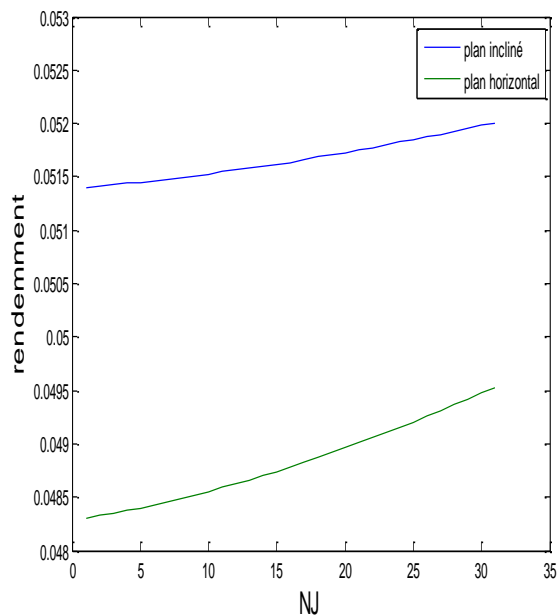
Les figures : (III-11), (III-12) et (III-13) représentent l'évolution journalière de rendement dans les trois cellules pour les quatre jours : 17 Janvier, 15 Avril, 17 Juillet et 15 Octobre.

Nous remarquons que le rendement dans les jours : 17 Janvier et 15 Avril est plus important par rapport le rendement des jours : 7 juillet et 15 octobre, cette variation justifier par l'augmentation de température dans les jours d'été, ainsi on noter la que le rendement dans les deux plan est proximité

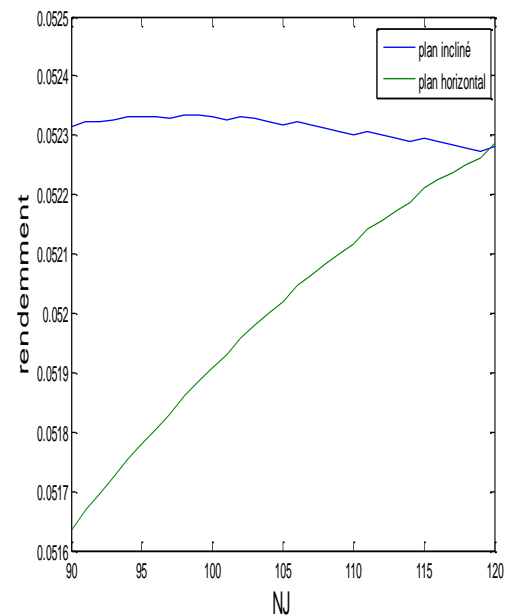
D'après ces résultats. On confirmer les commentaires déduire précédemment que les cellules Ga AS est les meilleurs.

III-2-3-2 Evolution mensuel de rendement :

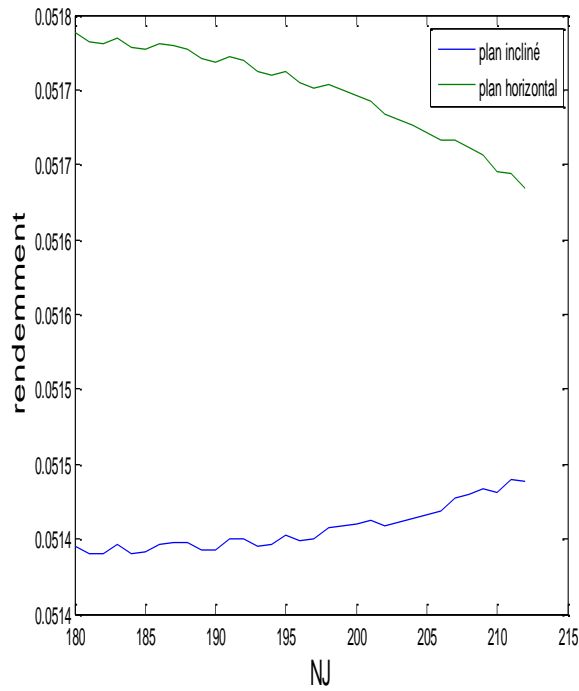
A) Cellule Organiques :



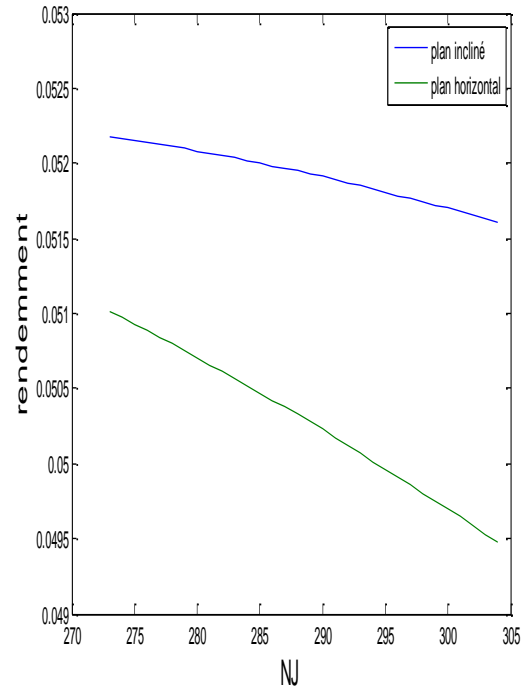
JANVIER



AVRIL



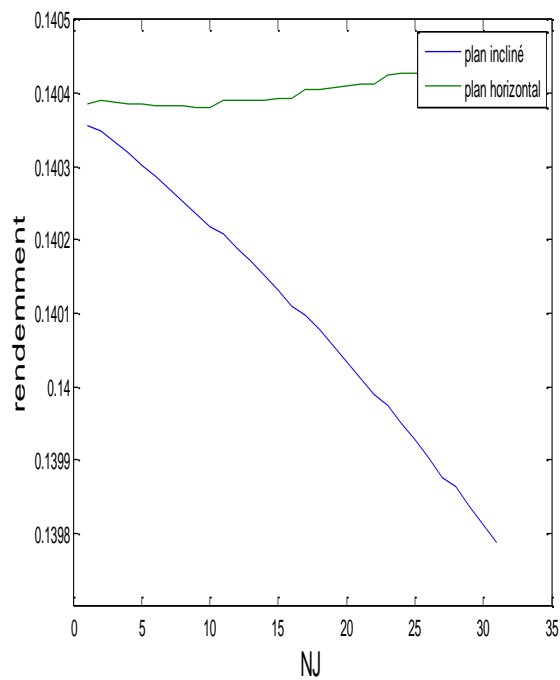
JUILLET



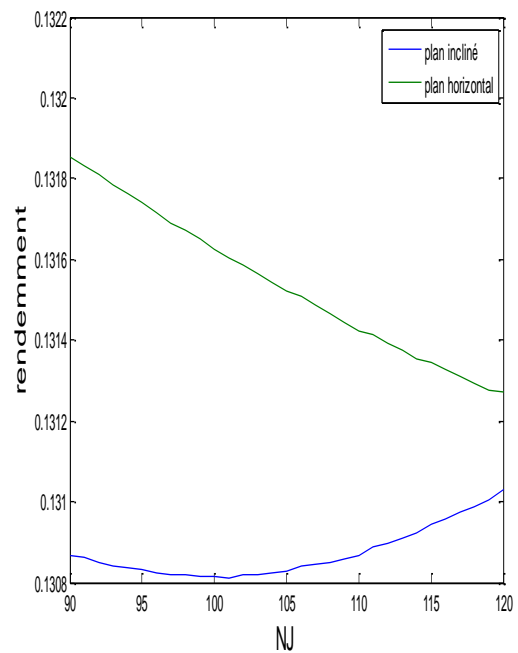
Octobre

Figure III-14- Evolution de rendement de cellule solaire Organiques en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022

B) Cellule Pérovskites:



JANVIER



AVRIL

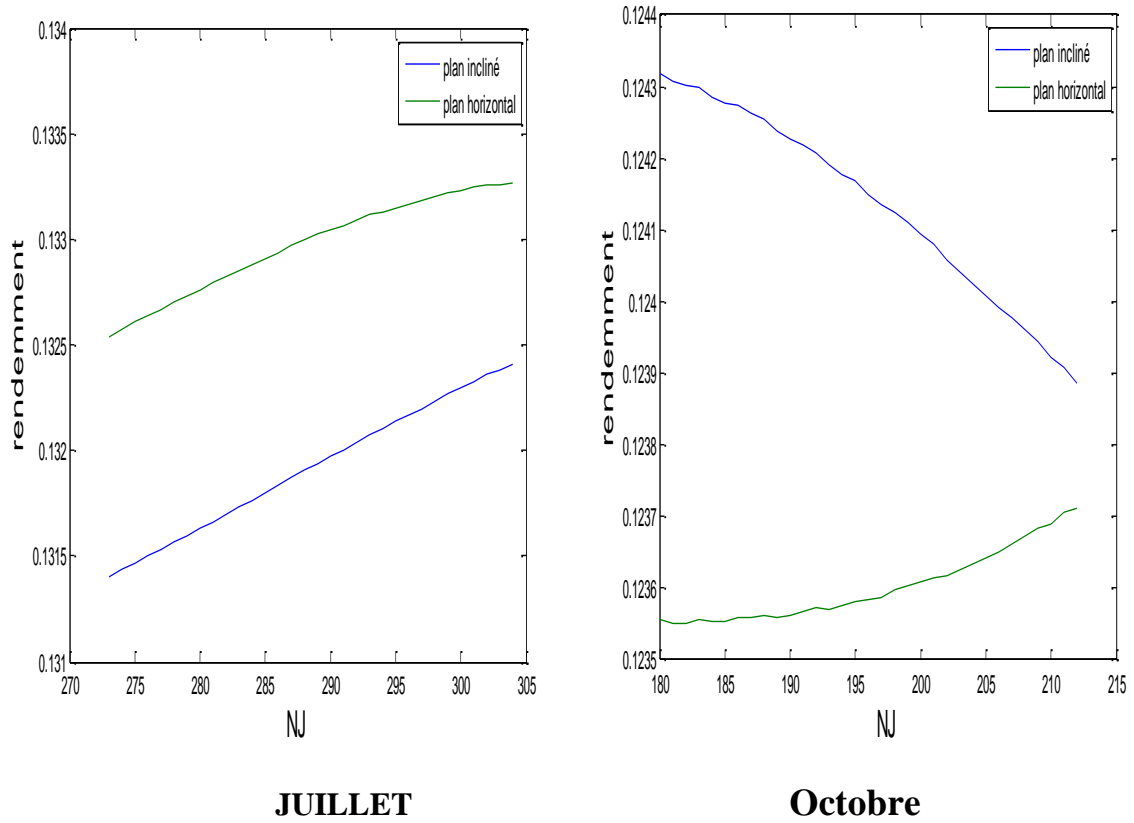
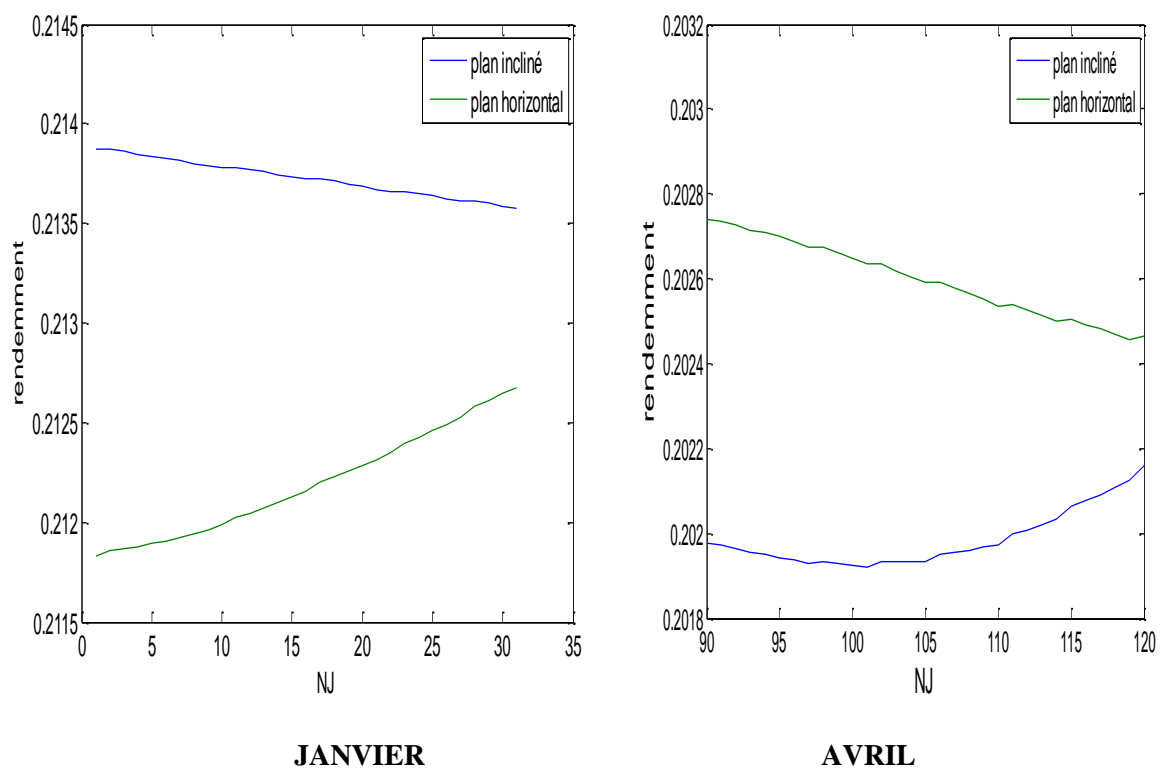


Figure III-15- Evolution de rendement de cellule solaire Pérovskites en fonction de Numéro de jours pour différents mois d’année 2022

C) Cellule multi jonction Ga As :



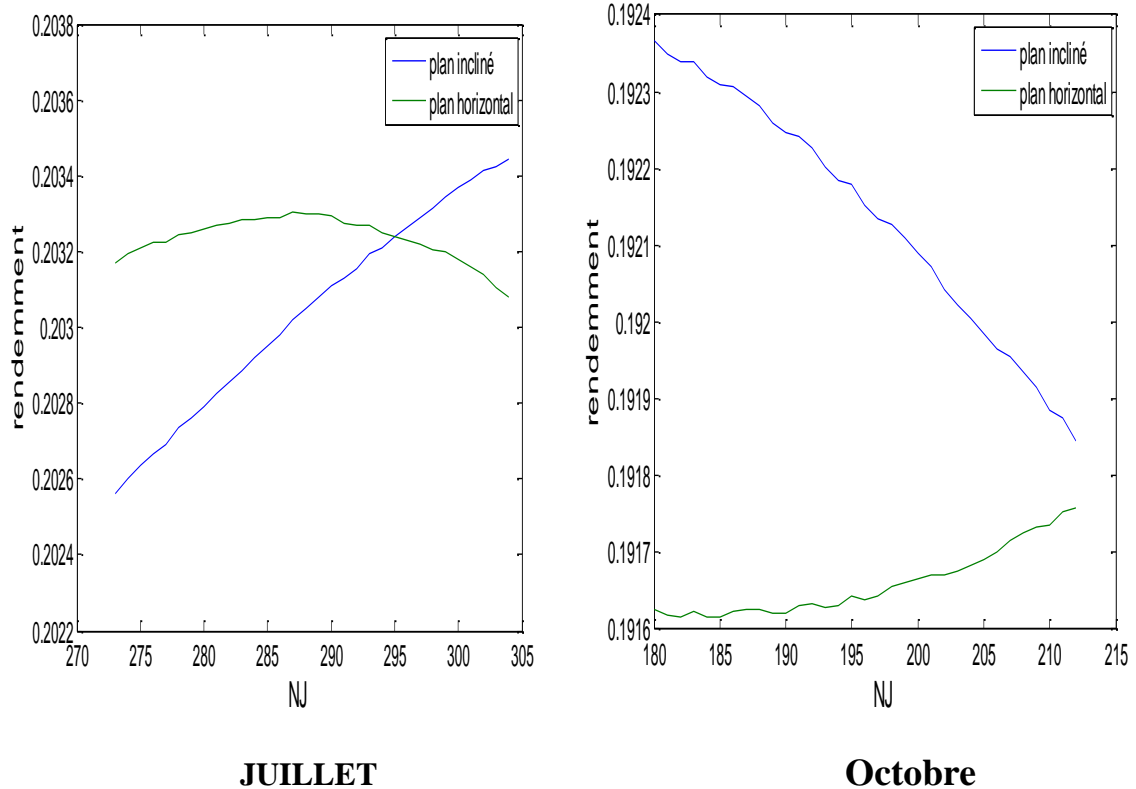


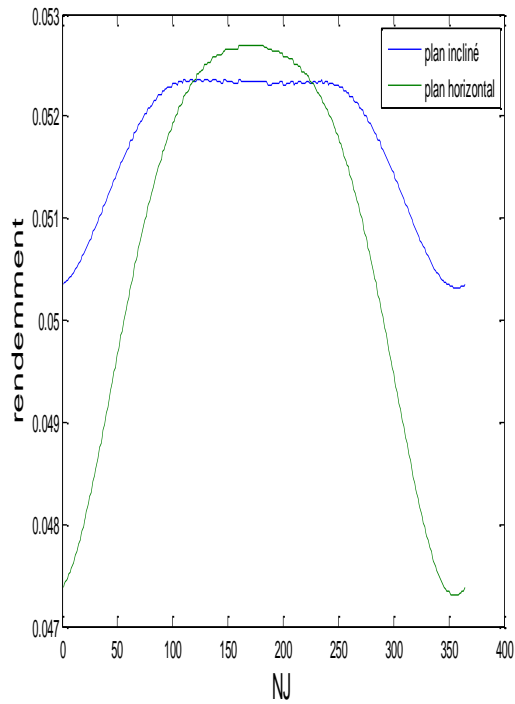
Figure III-16- Evolution de rendement de cellule solaire multi jonction Ga As en fonction de Numéro de jours pour différents mois d'année 2022

Les figures (III-14), (III-15) et (III-16) représentent l'évolution mensuelle de rendement dans les trois cellules pour les quatre mois : Janvier, Avril, Juillet et Octobre.

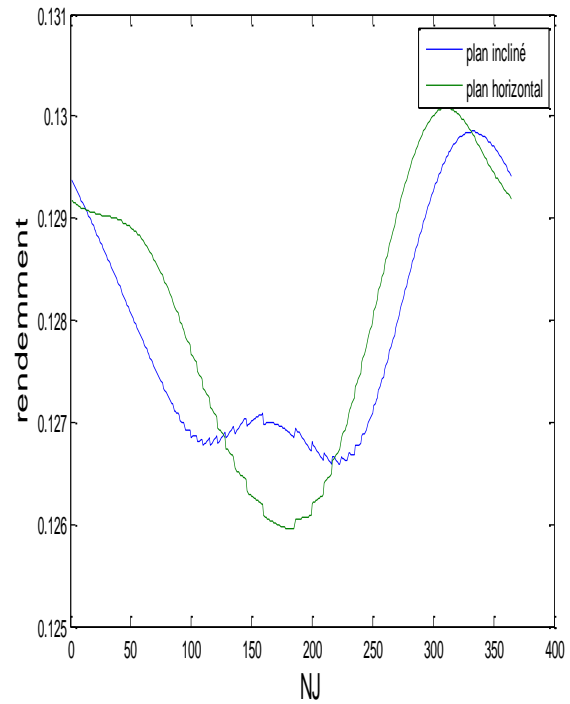
Chaque type de cellule ayant une évolution différent de rendement, cette différence peut justifier par sa construction et sa fabrication et les caractéristiques de conduction.

ces résultats confirme les commentaires déduire précédemment que les cellules Ga AS est les meilleurs.

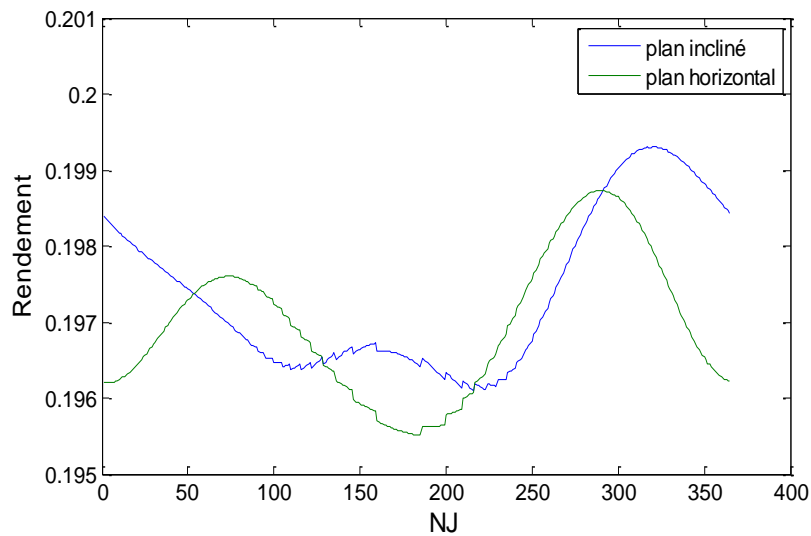
III-2-3-3 Evolution annuel de rendement :



Cellule Organiques



Cellule Pérovskites



Cellule multi jonction Ga As

Figure III-17- Evolution annuel de rendement solaire de différentes cellules en fonction de Numéro de jours pour l'année 2022

La figure (III-17) représente l'évolution annuelle de rendement dans les trois cellules. D'après ces résultats.

Ces résultats confirment les commentaires déduire précédemment que les cellules Ga As est les meilleurs.

III-2-4 Etude des caractéristiques I-V :

III-2-4-1 Effet de Rayonnement :

:

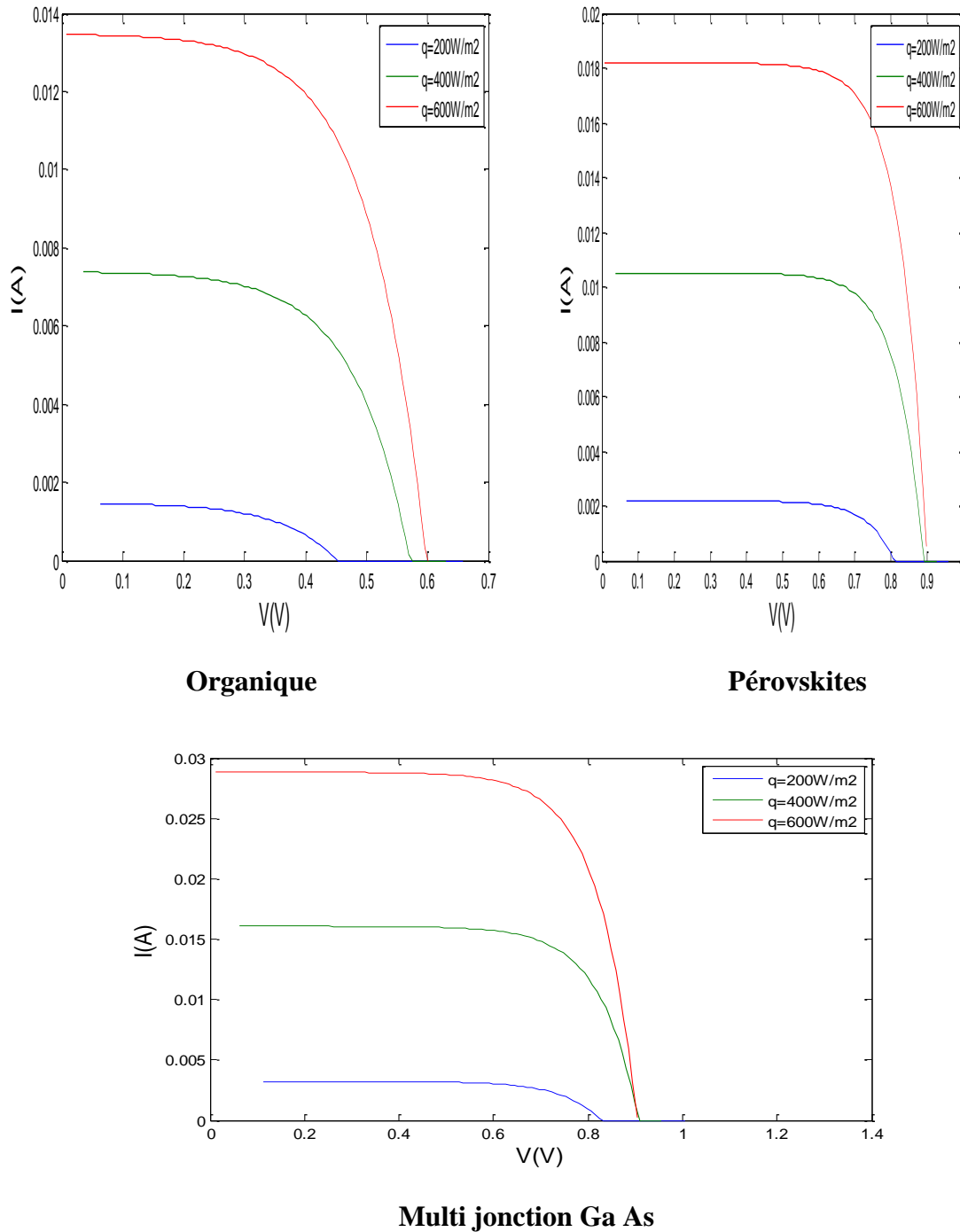


Figure III-18- Evolution des caractéristiques I-V avec l'éclairage de différentes cellules

Nous remarquons sur la figure (III-18) l'augmentation du courant I et de la tension V , cette évolution engendre une élévation de courant de court circuit et la tension de circuit ouvert.

III-2-4-2 Effet de température :

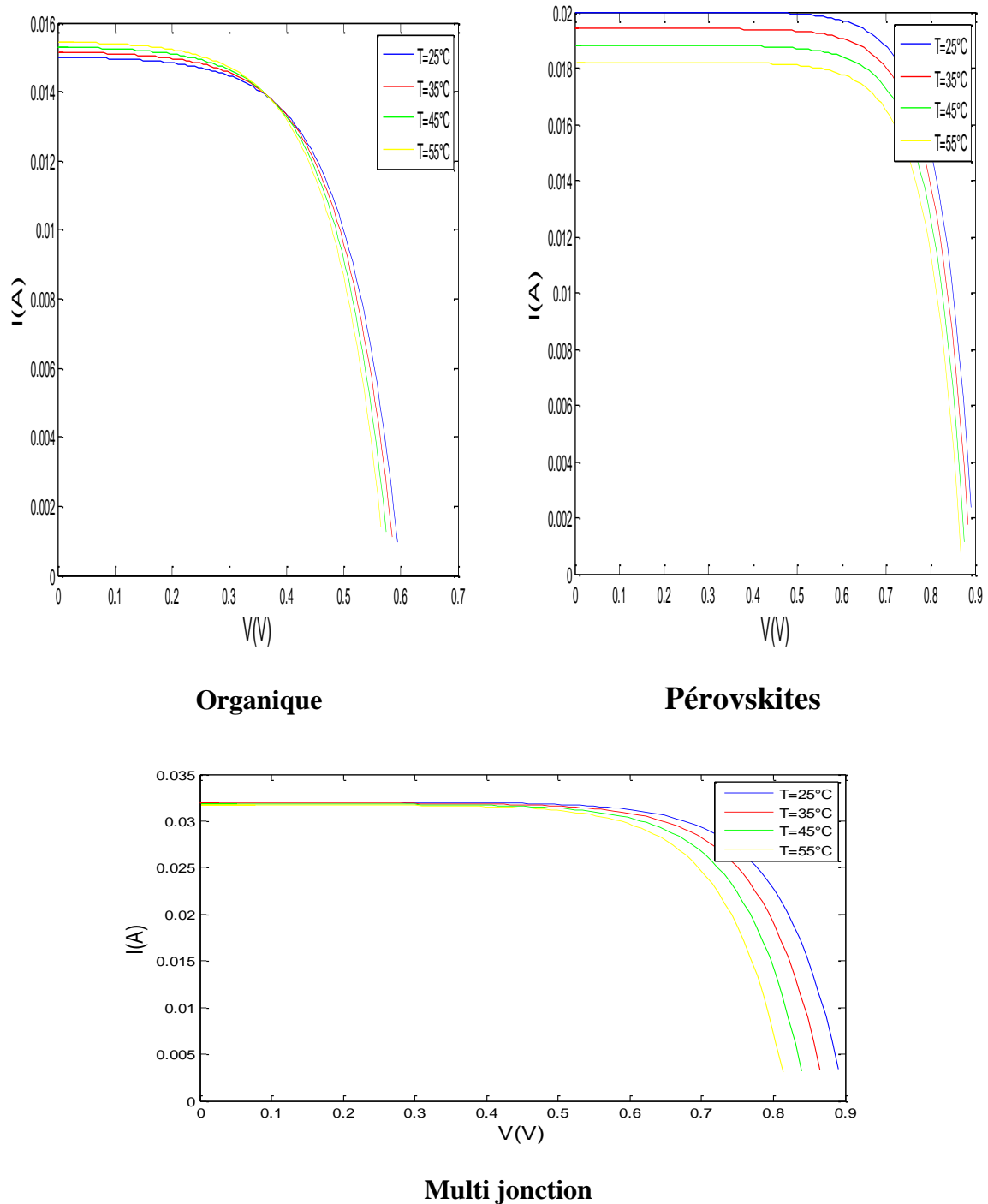


Figure III-19- Evolution des caractéristiques I - V avec la température de différentes cellules

Nous remarquons sur cette figure l'augmentation du courant I et la réduction de la tension, cette évolution apparaît clairement dans le cas des modules PV où le courant de court circuit augmente, et la tension de circuit ouvert diminue, cette diminution de tension et augmentation de courant sont représentés industriellement par des coefficients appelées : Coefficient de température à ICC, et Coefficient de température à VOC

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion Général

Ce travail est une contribution à la recherche paramétrique. Avant de résoudre l'évolution des systèmes photovoltaïques appliqués à la région d'Ouargla, nous avons d'abord étudié le contexte et les problèmes des cellules solaires photovoltaïques. Ceci est nécessaire pour une compréhension approfondie du comportement des générateurs photovoltaïques.

L'objectif de cette recherche est la modélisation du système solaire photovoltaïque, ainsi que la modélisation des cellules photovoltaïques de troisième génération, afin d'étudier les paramètres qui évoluent sur ce type de cellules PV.

Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi les étapes suivantes :

- 1- Estimer les modèles mathématiques nécessaires : modèle de rayonnement et modèle de puissance PV.
- 2- Étudier l'évolution des différents paramètres : puissance, rayonnement, et rendement, d'une façon journalière, mensuelle, et annuelle pour trois types de cellules : Organiques, Pérovskite et multiconjonction
- 3- Étude des paramètres qui évoluent sur les cellules solaires : Température et rayonnement

La modélisation et la simulation sont implémentées à l'aide du logiciel Matlab. La conception du programme informatique le rend facile à utiliser par le développeur de systèmes photovoltaïques.

Cette méthode d'estimation dépend de la disponibilité des données quotidiennes de rayonnement solaire. Nous compensons le manque de données d'exposition en utilisant des modèles qui génèrent des valeurs quotidiennes à partir de données liées au site (telles que l'altitude, la longitude et l'albédo).

Afin d'obtenir un outil de développement de générateur photovoltaïque complet, nous avons trouvé utile d'introduire la direction du générateur. Dans ce travail, nous sommes limités à l'inclinaison optimale. Nous avons choisi quatre journées (17 janvier, 15 avril, 17 juillet et 15 octobre) et quatre mois (janvier, avril, juillet et avril) et l'année 2022.

Il est important de considérer le fonctionnement dans des conditions réelles, car la plupart des modèles de générateurs photovoltaïques existants sont vérifiés dans des conditions d'éclairage et de température standard (1000 W/m^2 ; 25°C).

Sur la base des résultats obtenus pour le modèle comme mentionné précédemment, nous avons conclu que les paramètres importants sont : la température, la saison et la disposition des panneaux.

Conclusion générale

Afin de compléter notre étude de modélisation, la méthode de conversion des caractéristiques I-V a également été vérifiée et évaluée pour différentes conditions d'éclairage et de température.

Considérant que la température du générateur photovoltaïque est une donnée importante dans la modélisation, nous proposons une méthode d'estimation de cette dernière, basée sur la température ambiante, l'ensoleillement et la température nominale de fonctionnement NOCT.

Les résultats obtenus après la simulation permettent de conclure que pour les cellules multi jonction **Ga As** présentent un potentiel d'énergie solaire plus important, ainsi un meilleur rendement.

Enfin, il est à noter que les résultats de modélisation sont influencés par les paramètres de base (rayonnement solaire, température ambiante) afin d'optimiser au mieux l'installation PV, ce qui reste l'objectif principal de tout installateur du système PV.

Références bibliographiques

- [1] K.SAMIRA, Effect of Impurities and Defects on Performance and Degradation of Solar Cells, Thèse de doctorat, university of abou bekr-belkaid –tlemcen, 2010.
- [2] A. Corinne, Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie . Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [3] G. Masson, M. Latour, M. Reking, I.T. Theologitis and M. Papoutsis. Global Market Outlook for photovoltaics. Technical report, EPIA, 2013.
- [4] L.Brahim , Etude et modélisation des photopiles de troisième génération, thèse doctorat, département d'électronique, université de batna 2, 2018.
- [5] E.Saintaimé, Étude et modélisation des substrats ultra-minces de silicium et de leur application au photovoltaïque, Thèse de doctorat, école doctorale, université d'orléans, 2020
- [6] B. Zakaria, contribution a la modélisation d'une cellule solaire, Faculté des Sciences et Technologie, université de Béchar, 2009
- [7] B. Soltane, Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables, thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010
- [8] Ineichen.P, Perez.R, A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient, Solar Energy, vol 73 ,No(3), 2june2002 , PP 151-157.
- [9] H.KAMELIA, Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative, Mémoire de magister, département d'électrotechnique, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 25 / 06 / 2012.
- [10] J.Bisquert, The Physics of Solar Cells Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals, Boca Raton, FL 33487-2742, 2018, PP 03.
- [11] O. SAKET , Caractérisation électrique des nanofils de semi-conducteurs III-V pour des applications photovoltaïques, Thèse de doctorat, École doctorale n575 , l'Université Paris-Saclay, 2020
- [12] B.Abdelhalim, Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire, Mémoire magistère Constantine, 2009.
- [13] B.IMEN SOUHILA, Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires, thèse Doctorat, Département d'Électrotechnique, université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2018.
- [14] H. Kamelia, Modélisation d'une cellule photovoltaïque, étude comparative, Mémoire de Magister, UMMTO, 2012
- [15] <https://www.edfenr.com/lexique/photovoltaique-pv/>.

- [16] B. Sofia, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Faculté de Technologie, Université A.MIRA de BEJAIA, 2015.
- [17] A. Karima, contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (IMW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, Mémoire de Magister UMMTO 2014/2015.
- [18] <http://panneausolaire.free.fr/installations.php>.
- [19] H. DJEWED, L'Etude de l'impact de l'insertion des panneaux photovoltaïques sur le réseau national interconnecté, Mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique d'Alger, département d'électrotechnique, 2013.
- [20] <https://www.ecologie-shop.com/conseils/installation-photovoltaique-pour-site-isole-batterie-solaire-pour-stocker-l-energie-16/>.
- [21] R. LARONDE, fiabilité et durabilité d'un système complexe dédiée aux énergies renouvelables application à un système photovoltaïque, thèse de doctorat, l'institut des sciences et techniques de l'ingénieur d'Angers , 30September 2011.
- [22] D.Mida, Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque », Thèse Doctorat, Département de Génie Electrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 10/04/2019.
- [23] M. Grätzel, Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C, Photochemistry Reviews, (2003).4(2), 145-153.
- [24] https://chimie.unistra.fr/uploads/media/the_se_VISION_FR.pdf
- [25] C. J. Brabec, S. Gowrisanker, J. J Halls, D. Laird, Polymer–fullerene bulk-heterojunction solar cells, Advanced Materials, (2010), 22(34), 3839-3856.
- [26] <https://mrmondialisation.org/le-photovoltaique-organique-fait-un-bon-de-geant-grace-a-une-decouverte/>
- [27] N. G.Park, (2015). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology, Materials Today, (2015), 18(2), 65-72.
- [28] O. E.emonin, J. M. Luther, S. Choi, Chen, Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell, Science, (2011), 334(6062), 1530-1533.
- [29] <https://actu.epfl.ch/news/les-points-quantiques-ameliorent-les-cellules-sola/>
- [30] S. Kurtz et al., "Recent advances in high-efficiency III-V multijunction solar cells," IEEE J. Photovoltaics, vol. 3, no. 1, pp. 303-311, 2003.
- [31] B. Anouar, Contribution a la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie, Thèse Doctorat, département de physique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2021.

- [32] B.Khadidja, contribution a l'optimisation des processus de production énergétique photovoltaïque (application aux procédés d'épuration des eaux dans les zones rurales), Thèse Doctorat, Département de Génie des Procédés, Université KASDI-MERBAH Ouargla, 2021.
- [33] E.TAPACHÈS, Estimation du Potentiel de la Technologie Solaire Thermodynamique à Concentration en Climat Non Désertique - Application à La Réunion, Thèse Doctorat, université de la Réunion, 2015.
- [34] F.AISSAOUI, Intitulé Contribution à l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire placé dans un climat aride : cas de la région de Biskra, Thèse Doctorat, Département : Génie Mécanique, Université Mohamed Khider – Biskra ,2017 .
- [35] Y.Jannot, Thermique solaire, Université de Lubumbashi, Mars 2011
- [36] H. Messaouda, Impact des facteurs agro-écologiques sur les caractéristiques des dattes Deglet Nour dans les régions d'Ouargla et de Biskra, Thèse Doctorat, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2022
- [37] S .Abdelkader, Transformations spatiales et dynamiques socio-environnementales de l'oasis d'Ouargla (Sahara algérien). Une analyse des perspectives de développement, Thèse Doctorat, Laboratoire Population Environnement Développement, Aix-Marseille Université, 2017.
- [38] <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2022/ouargla/valeurs/60580.html>
- [39] M. A Green, A.Ho-Baillie, H. J. Snaith, The emergence of perovskite solar cells. Nature photonics, (2014), 8(7), 506-514
- [40] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/record-efficiency-68-9-percent-for-gaas-thin-film-photovoltaic-cell.html>
- [41] https://www.memoireonline.com/11/19/11181/m_Conception-et-realisation-d-un-outil-de-dimensionnement-de-planification-et-de-parametrage-d24.html