

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE EPOPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie des procédés

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté Par :

- CHACHA DOUNIA IMANE

- BOUHNİK SOUHILA

Thème :

## Etude comparative des cellules solaire de 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération

Soutenu publiquement le : 14/06/2023

Devant le jury composé de :

Mr. Lati Moukhtar	MCA	(UKM Ouargla)	Président
Mr. Cherray Ridha	MC A	(UKM Ouargla)	Examinateur
M <sup>me</sup> . Bouziane Khadidja	MCA	(UKM Ouargla)	Encadreur

Année Universitaire : 2022/2023



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE EPOPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie des procédés

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté Par :

- CHACHA DOUNIA IMANE

- BOUHNİK SOUHILA

Thème :

## Etude comparative des cellules solaire de 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération

Soutenu publiquement le : 14/06/2023

Devant le jury composé de :

Mr. Lati Moukhtar	MCA	(UKM Ouargla)	Président
Mr. Cherray Ridha	MC A	(UKM Ouargla)	Examinateur
M <sup>me</sup> . Bouziane Khadidja	MCA	(UKM Ouargla)	Encadreur

Année Universitaire : 2022/202



# الاهداء:

( وَلَقَدْ مَنَّا عَلَيْكَ مَرَّةً أُخْرَى )

ولله الحمد والمنة

إلى قدوتي الأولى، ونبراسي الذي ينير دربي ، إلى من رفعت رأسي عاليا افتخارا به ، إلى من كلله الله بالهبة والوقار ، إلى من علّمني العطاء بدون انتظار ، إلى من أحمل اسمه بكل افتخار ، **والدي العزيز "عمر"** أطال الله عمره وبورك فيه.

إلى ملاكي وقرّة عيني غاليتي، إلى التي رأني قلبها قبل عينيها ، إلى الظلّ الذي أوي إليه في كل حين ، لطالما عاهدتك بالنجاح ها أنا اليوم أتممت وعدي وأهديته إليك **أمي الغالية " نصيرة مناصرية "**.

إلى من شددت عضدي بهم فكانوا لي ينابيع سندي ومتكئي وملاذي .... إخوتي الأعزاء **"محمد نجيب"**،

**" محمد رضا "**.

إلى هبة السماء : أزاهير بيتنا وسرّ سعادتنا ... أخواتي العزيزات **" ريحانة الضحى "** ، **"مسك الوفاء"**.

إلى رفاق الخطوة الأولى والخطوة الأخيرة إلى من كانوا في السنوات العجاف سحابا ممطرا إلى كل من له الفضل وكل من أسهم معي في إنجاز هذا العمل عائلتي وأهلي **" شاشة "** ، **" مناصرية "**.

إلى من لم تربطني بها علاقة النسب ... بل عطر الصداقة ..وورد المحبة صديقتي **"ريان"**

إلى رفيقة رحلة النجاح **" بوحنيك سهيلة "**

إلى من علموني حروفا من ذهب من بداية هذا المشوار **"أساتذتي الكرام"**

إلى كل من نساه قلبي ولم ينسأه قلبي أهديكم هذا العمل راجيا من المولى عز وجل القبول والنجاح

في الختام

كما قيل كان حلما ثم أصبح حقيقة لا خيالا والحمد لله على تمام النعمة

دنيا إيمان شاشة



# الاهداء

الحمد لله على منه وامتنانه، والشكر له على نعمه وإتمامه حمدا كثيرا طيبا . الذي أنعم عليّ بنعمة العلم وسهّل لي طريقا أبغي فيه علما ووقفني في إنهاء عملي المتواضع هذا.

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة و نصح الأمة إلى نبي الرحمة سيدنا محمد عليه الصلاة وأزكى التسليم .

إلى من جرع الكأس فارغا ليسقيني قطرة حب ،إلى من كلت أنامله ليقدّم لنا لحظة سعادة ،إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم،إلى القلب الكبير الذي أحمل اسمه بكل فخر وأعتز به في كل مكان إلى روح أبي "علي" -رحمه الله-

إلى التي بالأمني حملتني و بالتهاني استقبلتني وبالحنان رعتني إلى التي لم يعرف دعاؤها حدودا و لا عطاؤها قيودا،إلى بسمّة الحياة وسر الوجود إلى ينبوع الصبر والتفاؤل والأمل إلى أمي " مسعودة " -حفظها الله-

إلى نفسي ونفسيّتي روعي وراحتي ملكي ومملكتي جدتي "فاطمة (هانة)" -حفظها الله-

إلى سندي و قوتي وملاذي إلى من أثرنني على أنفسهن إلى من علمني علم الحياة إلى القلوب الطاهرة أخواتي " زينب " , " هاجر " , " سارة " , " فردوس " , " صبرين " .

إلى الذين يأنس بهم قلبي وتقر بهم عيني براعم العائلة "عمار بهاء الدين" , " عبد الشكور" , " بيلسان " " سيف الدين "

إلى من كان ظلّي حين يلفحني التعب " عبد القادر غشوة "

إلى من جمعني بهم دم واحد وقلب واحد وبيت واحد أهلي "بوحنك , وانيس "

إلى عائلتي المستقبلية "آل غشوه"

إلى صديقتنا المواقف لا السنين شريكنا درب الطويل ... من كانتنا دوما موضع اتكاء عثرات حياتي

"كوثر قانة" ، "سمية بوحنك"

إلى كل الأصدقاء الأوفياء والزملاء الأعزاء التي جمعتني بهم الحياة

إلى كل من نستهم ذاكرتي ولم تنسهم مذكرتي

إلى كل من تصفح هذه المذكرة وانتفع بها وتذكرنا بدعائه

إلى رقيقة هذا العمل " دنيا إيمان شاشة " .

إلى كل هؤلاء أهدي ثمرة جهدي ...

سهيلة بوحنك

# REMERCIEMENT

*Nous exprimons notre gratitude à Dieu Tout-Puissant qui nous a permis de mener cette recherche scientifique et nous a inspiré une bonne santé et une forte détermination, et nous disons que Dieu soit loué.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à la professeure encadrant, « Khadija Bouziane », pour ses conseils et ses précieuses informations qui ont contribué à la réalisation de notre étude dans tous ses aspects.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements et notre reconnaissance au Comité de discussion ..... pour son écoute attentive et ses conseils avisés.*

*Et n'oublions pas de remercier toutes les personnes qui nous ont soutenu tout au long de ce parcours du début à la fin.*

*Nous vous sommes reconnaissants. Merci.. Merci*

## ملخص:

يتزايد الإنتاج العالمي للخلايا الكهروضوئية عامًا بعد عام ، وتميل مصادر الطاقة المتجددة إلى استبدال الطاقة التقليدية في المستقبل. الهدف الرئيسي في مجال الخلايا الكهروضوئية هو تحقيق حل وسط بين الحصول على كفاءة عالية وخفض تكاليف التصنيع. في هذا السياق ، سنجري دراسة مقارنة للخلايا الكهروضوئية من الجيل الأول والثاني والثالث من أجل تحسين تشغيل النظام الكهروضوئي. النتائج التي تم الحصول عليها تقيم معايير الإنتاج الكهروضوئية المختلفة.

الطاقة المتجددة ، الخلايا الكهروضوئية ، خلايا الجيل الأول والثاني والثالث ، الكفاءة ، تكاليف التصنيع ، مقارنة .

## Résumé :

La production mondiale du photovoltaïque augmente d'une année à autre ,et les sources des énergies renouvelables tendent à remplacer les énergies traditionnelles dans l'avenir. L'objectif majeur dans le domaine du photovoltaïque est la réalisation d'un compromis entre l'obtention d'un haut rendement et la réduction des coûts de fabrication. Dans ce contexte, nous aurons faire une étude comparative des cellules photovoltaïques de 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations afin d'optimiser le fonctionnement du système PV. Les résultats obtenus évaluer les différents paramètres de production PV.

Les énergies renouvelables , photovoltaïque, les cellules photovoltaïques de 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations , rendement, coûts de fabrication, étude comparative

## Abstract :

Global photovoltaic production is increasing year by year, and renewable energy sources tend to replace traditional energy in the future. The major objective in the field of Photovoltaics is to achieve a compromise between obtaining high efficiency and reducing manufacturing costs. In this context, we will have made a comparative study of 1st, 2nd and 3rd generation photovoltaic cells in order to optimize the operation of the PV system. The results obtained evaluate the different PV production parameters.

renewable energy, photovoltaic, 1st, 2nd and 3rd generation photovoltaic cells, efficiency, manufacturing costs, comparative study

### Liste des tableaux :

Tableau-I- 2: les jours types de mois .....	10
Tableau-II- 1-Les données climatique de site dans les quatre jouer type-2022- .....	21
Tableau-II- 2-Les données climatique de site mantille 2022 .....	21
Tableau-II- 3- Les donnés climatiques Annuelle-2022- .....	22
Tableau-II- 4- les caractéristiques de la cellules IBS60M-300P .....	30
Tableau-II- 5- Les caractéristiques de la cellule CS6P-255P .....	32
Tableau-II- 6- les caractéristiques de la cellule FLEX-03M-1.7M -240P .....	33
Tableau-II- 7-les caractéristiques de la cellule solaire HVL-335/HJT-355P .....	35



## Liste des figures

---

### Liste des figures :

Figure-I- 1-La puissance lumineuse par unité de surface .....	5
Figure-I- 2: La masse d'air .....	6
Figure-I- 3: Coordonnées terrestres .....	7
Figure-I- 4- schématisation de mouvement de la terre autour du soleil .....	7
Figure-I- 5- : Coordonnées angulaires de soleil .....	8
Figure-I- 6- : Coordonnées solaires selon le repère horizontal .....	8
Figure-I- 7- Principe de la cellule photovoltaïque .....	11
Figure-I- 8- Les différent technologies des cellule Photovoltaïques .....	12
Figure-I- 9- Schéma de structure générale de cristalline silicium .....	13
Figure-I- 10Schéma de structure générale de Amorphe .....	15
Figure-I- 11-Schéma de structure générale de CIGS .....	16
Figure-I- 12-Schéma de structure générale de CdTe.....	16
Figure-I- 13-Schéma de structure générale de Ga As .....	17
Figure-I- 14-Schéma de structure générale de Organique.....	18
Figure-I- 15-Schéma de structure générale de Pérovskite.....	19
Figure-I- 16-Schéma de structure générale de DSSC.....	19
Figure I- 9- : Caractéristique d'un groupement de modules PV en série .....	20
Figure -I- 10 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle .....	21
Figure-I- 11-: Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV .....	21
Figure-II- 1-le situation de Ouargla .....	21
Figure-II- 2- le rayonnement globale sur un plan incliné.....	25
Figure-II- 3:Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	28
Figure-II- 4- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle .....	29
Figure-II- 5- la cellule IBS60M-300P .....	31
Figure-II- 6- la cellule solaire CS6P-255P.....	32
Figure-II- 7- La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P .....	34
Figure-II- 8-la cellule solaire HVL-335/HJT-355P .....	35
Figure-III- 1-Evolution Journalière d'éclairement sur les deux plans HOR et INC.....	37
Figure-III- 2 -Evolution montiel d' éclairement sur les deux plans HOR et INC.....	38
Figure-III- 3-Evolution annuel d'éclairement sur les deux plans HOR et INC.....	39
Figure-III- 4-L'effet de température sur les 4 cellules.....	50
Figure-III- 5-L'effet de rayonnement dans les 4 cellules .....	51
Figure-III- 6Evolution Journalière de la puissance(MONO) sur les deux plans HOR et INC.....	52
Figure-III- 7-Evolution Journalière de la puissance(POLY) sur les deux plans HOR et INC .....	53

---

## Liste des figures

---

Figure-III- 8 Evolution Journalière de la puissance(CIGS) sur les deux plans HOR et INC .....	54
Figure-III- 9-Evolution Journalière de la puissance(HIT) sur les deux plans HOR et INC .....	55
Figure-III- 10-Comparaison journalière de la puissance entre les cellules sur les deux plans HOR et INC .....	56
Figure-III- 11-Evaluation Mensuel de la puissance(MONO,POLY) sur les deux plans HOR et INC .....	57
Figure-III- 12-Evaluation Mensuel de la puissance (CIGS,HIT) sur les deux plans HOR et INC .....	58
Figure-III- 13-Comparative Mensuel de la puissance entre les cellule sur les deux plans HOR et INC .....	59
Figure-III- 14-Evaluation annuel de la puissance sur les deux plans HOR et INC.....	60
Figure-III- 15-Comparative annuelle de la puissance entre les cellules sur les deux plans HOR et INC .....	61
Figure-III- 16 Evolution journalière de rendement(MONO ) sur les deux plans HOR et INC .....	62
Figure-III- 17-Evolution journalière de rendement(POLY) sur les deux plans HOR et INC .....	63
Figure-III- 18 Evolution journalière de rendement (CIGS) sur les deux plans HOR et INC .....	64
Figure-III- 19-Evolution journalière de rendement (HIT) sur les deux plans HOR et INC .....	65
Figure-III- 20- Comparaison journalière de rendement entre les cellule sur les deux plans HOR et INC .....	66
Figure-III- 21-Evolution Mensuel de rendement (MONO, POLY) sur les deux plans HOR et INC .....	67
Figure-III- 22-Evolution Mensuel de rendement sur les deux plans HOR et INC.....	68
Figure-III- 23-Comparative Monteil de rendement sur les deux plans HOR et INC .....	69
Figure-III- 24- Evolution annuelle de rendement sur les deux plans HOR et INC .....	70
Figure-III- 25- Comparaison de rendement Annuelle pour les deux plans HOR et INC .....	71

---

**Liste des Symbole et abréviation :**

$\alpha$ :Orientation.

$\beta$  : L'inclination.

$\gamma$  : L'hauteur solaire .

$\delta$  : La déclinaison.

$\eta$  : Le rendement.

$\theta$  : L'angle d'incidence.

$\lambda$  : *Longitude*.

$\rho$  : L'albédo.

$\varphi$ :*Latitude*.

$\psi$  : L'azimuth.

$\omega$  : l'angle horaire .

Z :La distance zénithale.

$I_{CC}$  : Courant de court circuit.

$V_{OC}$  : Tension de ouvert circuit.

d :Duré de jour

C : Correction de distance terre-soleil.

N : L'angle de jour.

n : Le numéro de jour.

$G_H$  : Le rayonnement globale sur un plan horizontal

$S_H$  :le rayonnement direct sur un plan horizontal.

$d_H$  : le rayonnement diffusé sur un plan horizontal.

$T_L$  : Le facteur de trouble

$H_R$  : L'humidité relative

$S_f$  : le rayonnement direct sur un plan incliné.

$D_f$  : le rayonnement diffusé sur un plan incliné.

$R_f$  : le rayonnement réfléchi sur un plan incliné.

$G_f$  : le rayonnement globale sur un plan incliné.

$I_{PH}$  : Densité de courant .

TU : Temps universel.

TSM : Temps solaire moyen.

TSV :Temps solaire vrai.

$E_t$  : Equation de temps.

FF : Facteur de forme .

PV : Cellule Photovoltaïque .

HOR : Plan horizontal.

INC : Plan incliné

c : le décalage entre (TL) et (TU).

MONO : cellule mono cristalline .

POLY : Cellule poly cristalline.

CIGS : Cuivre indium Gallium sélénium

HIT : hétérojonction avec couche mince intrinsèque

---

# Sommaire

---

## Sommaire :

Liste des tableaux .....	i
Liste des figures .....	ii
Liste des Symbole et abréviation .....	iv
Introduction général .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur le rayonnement solaire et les cellules photovoltaïques</b>	
I.2/Le soleil.....	3
I.3/L'énergie solaire .....	3
I.3.1- Les types d'exploitations d'énergie solaire .....	4
I.4-2-Le rayonnement solaire .....	4
I.5.La masse d'air .....	5
I.6- Coordonnées géographiques .....	6
I.7- Coordonnées horaires .....	7
I.8-Les coordonnées horizontales .....	8
I.9-Temps solaires .....	9
I.10-L'angle d'incidence .....	10
I.11-Les cellules photovoltaïques .....	10
I.11.1-Définition .....	10
I.11.2-Principe de fonctionnement .....	10
I.11.3/Les Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque .....	11
I.11.3/Les différent technologies des cellules Photovoltaïques .....	12
I.11.3.1/ Les cellules de premières générations ( à base de silicium cristallines) .....	12
I.11.3.2/ Les cellules de deuxièmes générations (à base de couche mince) .....	14
I.11.3.3/ Les cellule de troisième générations: .....	17
I.12/- Association des modules photovoltaïques .....	20
I.13/Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	22
I.14.Conclusion .....	22
<b>Chapitre II Méthodes et Matérielles</b>	
II-1- Introduction .....	20
II-2- Présentation de site d'étude .....	20
II-1-2- Les données climatiques .....	21
II-3- Les Modèles Mathématiques .....	22
II-3- 1- Les modèles géométrique .....	22
II/3-2- les modèle de rayonnements solaire .....	24

---

# Sommaire

---

II/3-3-Les modèles de différents paramètres de la cellule photovoltaïque .....	26
II/4- le Matériel .....	29
II/4-1-Les cellule photovoltaïques .....	29
II/5-Outils informatique .....	35
<b>Chapitre III : Résultats et discussion</b>	
III-1- Introduction .....	37
III-2-Etude de rayonnement .....	37
III-3-Etude des cellules photovoltaïques .....	50
III-3-1- Evaluation de caractéristique I-V .....	50
III-4-2- Evolution de puissance .....	52
III-3-3- Evaluation de rendement .....	62
Conclusion générale.....	74
References .....	i

---

# Introduction général

## Introduction général

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui peuvent se reconstituer naturellement ou qui ne s'épuisent pas. Le monde s'est tourné vers ce type d'énergie pour plusieurs raisons, car elle offre une solution durable pour lutter contre le changement climatique, préserver l'environnement, diversifier les sources d'énergie et promouvoir l'innovation technologique. C'est pourquoi le monde se tourne de plus en plus vers ces formes d'énergie pour répondre à ses besoins énergétiques.

L'énergie alternative est disponible sous plusieurs formes, notamment :

- Énergie solaire : utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité à l'aide de panneaux solaires et d'espaces utilisant des systèmes solaires thermiques.
- Énergie éolienne : est produite en utilisant l'énergie éolienne pour faire tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité. L'utilisation de parcs éoliens terrestres et offshore est en augmentation dans le monde.
- Hydroélectricité : est générée à partir de la puissance de l'eau en mouvement, comme les barrages ou les centrales hydroélectriques. L'eau est utilisée pour faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité.
- Énergie de la biomasse : provient de la combustion de matières organiques telles que les déchets agricoles, les déchets forestiers ou les cultures énergétiques.
- Énergie géothermique : est extraite de la chaleur naturelle de la Terre. Les centrales géothermiques utilisent cette chaleur pour produire de l'électricité ou pour chauffer directement les bâtiments.
- Énergie des vagues et des marées : est générée par le mouvement de l'eau dans les océans. Les convertisseurs de vagues et de marées captent cette énergie pour produire de l'électricité.

Ces formes d'énergie renouvelable ont le potentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de créer des emplois et d'améliorer la durabilité environnementale. Son développement et son utilisation croissants contribuent à construire un avenir énergétique plus propre et plus durable.[2]

Dans cette étude, nous mettons en évidence l'énergie solaire. L'énergie solaire a reçu beaucoup d'attention au cours des dernières décennies en raison de son rôle crucial dans la

croissance sociale et économique. Il est donc important de s'intéresser de plus près à cette source d'énergie responsable de la majeure partie de l'énergie sur Terre, y compris l'énergie alimentaire que nous consommons.

Cette énergie provient de la chaleur rayonnante et de la lumière du soleil, que les cellules solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité pour répondre à divers besoins. Les cellules photovoltaïques sont divisées en plusieurs générations en fonction de leur composition, nous spécialisons l'étude sur les cellules de première, deuxième et troisième générations.

Notre objective de cette étude est :

- Trouver une cellule solaire à haute capacité
- Trouver une cellule photovoltaïque économique
- Rechercher la saison (climat) qui convient à la cellule pour donner les meilleurs résultats.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons réalisé une étude comparative entre les cellules de première, deuxième et troisième génération.. Utilisation de la modélisation et de la simulation par le logiciel MATALEB

En fonction des objectifs précédents, on peut se poser les questions suivantes : Quelle est la génération qui comprend cette cellule ? Quelle est sa composition ? Dans quelles conditions climatiques nous donne-t-elle un rendement plus élevé ?

Afin de résoudre ce problème, nous avons abordé dans notre étude trois chapitres :

- Le premier chapitre : comprend des définitions sur le rayonnement solaire et les cellules photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre : Nous avons présenté la zone d'étude, le matériel et les méthodes utilisées.
- Le troisième chapitre : présentation et analyse des résultats les plus marquants obtenus.

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



# **Chapitre I : Généralité sur le rayonnement solaire et les cellules photovoltaïques**

### I.1/ Introduction :

La pollution de l'environnement est l'un des problèmes les plus importants de l'ère moderne, résultant principalement de l'utilisation de l'énergie, il est donc devenu nécessaire de rechercher des énergies renouvelables respectueuses de l'environnement, dont la plus importante est peut-être l'énergie photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque est la plus moderne et la plus répandue parmi toutes les énergies renouvelables et se caractérise par une exploitation facile en convertissant le rayonnement solaire en énergie électrique par des cellules photovoltaïques.

Dans Ce premier chapitre nous représentent généralités sur le rayonnement solaire et les cellules Photovoltaïque.

### I.2/Le soleil

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments.[3]

**Tableau-I- 1- Les caractéristique de soleil [4]**

<b>Diamètre (Km)</b>	<b><math>14 \times 10^5</math></b>
<b>Masse(kg)</b>	<b><math>2 \times 10^{30}</math></b>
<b>Surface (km<sup>2</sup>)</b>	<b><math>6.09 \times 10^{12}</math></b>
<b>Volume (Km<sup>3</sup>)</b>	<b><math>1.41 \times 10^{18}</math></b>
<b>Masse volumique moyenne (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1408</b>
<b>Distance (km)</b>	<b>217</b>
<b>Distance du centre de la voie lactée (km)</b>	<b><math>2.5 \times 10^{17}</math></b>

### I.3/L'énergie solaire :

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui a lieu au centre du soleil, selon la formule d'Einstein  $E = mc^2$ , la masse est convertie en énergie .L'énergie du soleil est uniformément convertie en rayonnement dans toutes les directions de l'espace. Lorsqu'il a parcouru 150 millions de kilomètres du soleil à la terre, sa densité totale extraterrestre est tombée à  $1367 / m^2$ . Cette valeur est appelée la constante solaire. En une heure, l'énergie que la terre tire du soleil est suffisante de  $1,2 \times 10^{17}$ , ce qui suffit à subvenir à ses besoins

pendant près d'un an. Les panneaux photovoltaïques peuvent utiliser cette énergie gratuite en la convertissant en électricité [5].

### I.3.1- Les types d'exploitations d'énergie solaire [6]

- *Solaire photovoltaïque :*

Alors que les cellules photovoltaïques sont exposées à la lumière, elles absorbent des photons, pour générer un courant électrique alternatif, à exploiter au quotidien[6].

- *Solaire thermique :*

Dans ce cas, il ne produit pas d'électricité pour nous, mais plutôt de chaleur, et c'est à ce moment que les panneaux solaires sont exposés à la chaleur, et dès qu'ils sont chauffés, ils nous fournissent de la chaleur[6].

- *Solaire thermodynamique :*

C'est un groupe de miroirs contenant des fluides qui transmettent de la chaleur reliés à un générateur électrique ,où cette chaleur est convertie en électricité pour être exploitée[6].

### I.4-2-Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est le rayonnement électromagnétique émis par le soleil, ou la transmission d'énergie par des particules énergétiques ou des photons dans un milieu ou un espace vide.[9]

- *Le spectre solaire :[7]*

L'énergie solaire se présente sous forme de rayonnement visible La partie restante est principalement dans le proche infrarouge, avec une contribution plus faible de la partie ultraviolette du spectre

Le spectre se compose de trois types principaux :

\*9% de rayons ultraviolet et appartiennent au champ  $<0.4\mu m$ .

\*47% de rayons visibles appartenant au champ  $[0.4\mu m - 0.8\mu m]$ .

\*44% de l'infrarouge et appartiennent au champ  $> 0.8\mu m$ .

Le soleil émet de l'énergie sous forme de rayonnement mesuré par  $W/m^2 \cdot \mu m$ ..

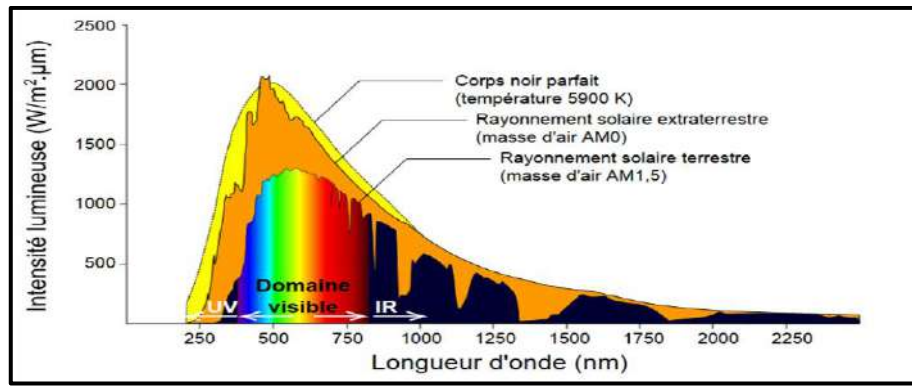


Figure-I- 1-La puissance lumineuse par unité de surface [4]

### - Types de rayonnement solaire :

Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère terrestre, il subit des altérations à travers son interaction avec les différents éléments présents dans celle-ci. Certains de ces éléments, tels que les nuages, réfléchissent le rayonnement, tandis que d'autres, tels que l'ozone, l'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, absorbent le rayonnement à des niveaux précis dans les bandes spectrales. Les gouttelettes d'eau et les particules en suspension entraînent également une dispersion. Tous ces facteurs combinés aboutissent à la décomposition du rayonnement solaire incident en composantes clairement distinctes lorsqu'il atteint un récepteur à la surface de la Terre peut être divisé en trois types différents : [8]

- Le rayonnement solaire direct : est le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans être diffusé dans l'atmosphère.
- Le rayonnement solaire diffus : quant à lui, est causé par la réflexion du rayonnement solaire direct en raison de la présence de nuages ou de panneaux solaires.
- le rayonnement réfléchi (L'albédo) : résulte de la réflexion d'un rayonnement direct ou diffusé depuis la surface terrestre autre ment dire l'albédo .Dans la région de Ouargla , l'albédo est de 0,35 [9]
- Le rayonnement global : est la somme des 3 rayonnements : directs, diffus et réfléchi.

### I.5.La masse d'air :

De l'optique atmosphérique, la distance parcourue par le rayonnement solaire à travers l'atmosphère est mesurée par la masse d'air, également appelée indice de masse d'air. Cet indice représente la masse relative de l'air atmosphérique et correspond au rapport entre la distance effective parcourue par le rayonnement jusqu'au zénith et la distance parcourue au niveau de la mer[7].

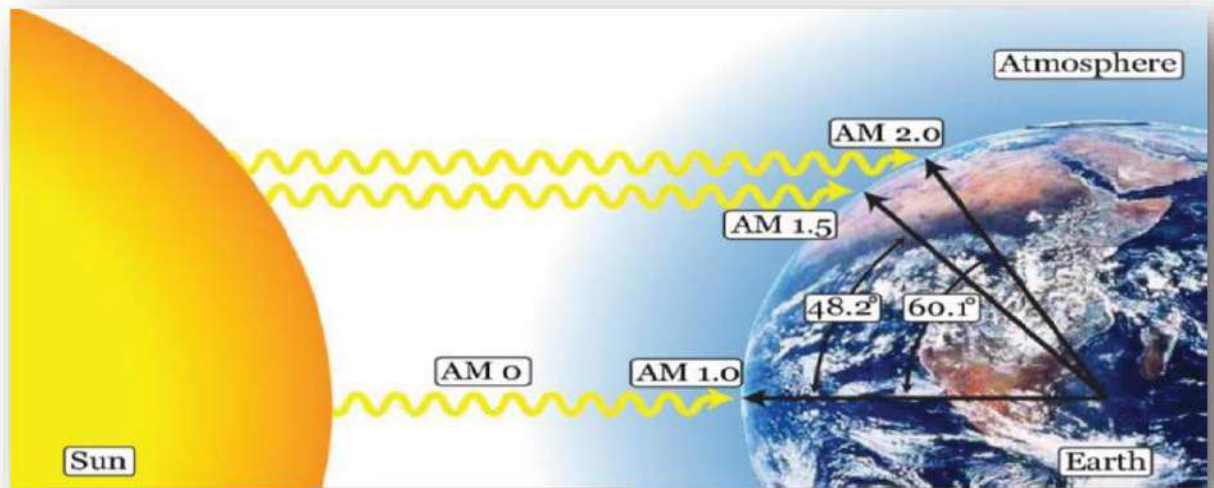


Figure-I- 2: La masse d'air [4]

### I.6- Coordonnées géographiques :

Les grandeurs suivantes sont définies pour localiser un site sur la surface terrestre [10]:

#### I.6.1- La latitude ( $\varphi$ ) :

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont positives et celles de l'hémisphère Sud sont négatives [3].

#### I.6.2- La longitude ( $\lambda$ ) :

Représente l'angle formé par le plan méridien du lieu considéré et le plan méridien d'origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a une longitude de  $0^\circ$ . Les longitudes à l'est de ce méridien sont positives et celles à l'ouest sont négatives [3]

les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives[3].

#### I.6.3-L'altitude :

Représente la différence de hauteur, exprimée en mètres, entre un point sur la surface terrestre et le niveau de la mer qui est considéré comme la surface de référence. [10]

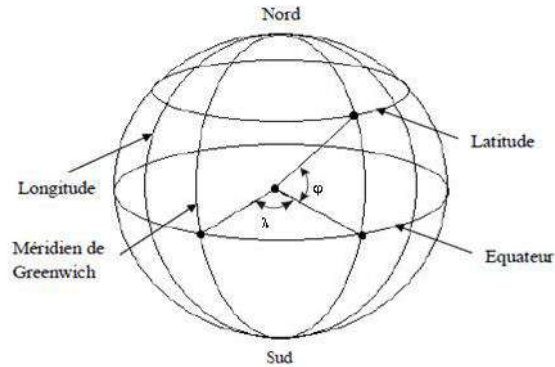


Figure-I- 3: Coordonnées terrestres [10].

### I.7- Coordonnées horaires

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont [10]

#### I.7.1- La déclinaison ( $\delta$ ):

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Que mesure l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre  $(-23^{\circ},27')$  (Au solstice d'hiver),  $(+23^{\circ},27')$ (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne.[10]

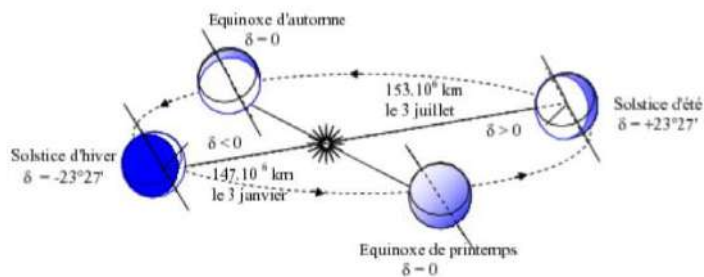


Figure-I- 4- schématisation de mouvement de la terre autour du soleil [21]

#### I.7.2- L'Angle horaire ( $\omega$ ):

la quantité de mouvement quotidienne du soleil dans le ciel et est nul à midi [10].

## I.8-Les coordonnées horizontales :

### I.8.1- L'azimuth ( $\psi$ ) :

Qui est l'angle formé par projection de la direction du soleil et la direction du Sud. Il est positif à l'Ouest (le matin) et négatif à l'Est (le soir).[3]

### I.8.2- L'angle de la hauteur solaire $\gamma$ (hs) :

Qui détermine la longueur de la traversée de l'atmosphère. C'est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre  $0^\circ$  au lever et au coucher du soleil a un maximum  $g$  au zénith (midi en temps solaire vrai)[10].

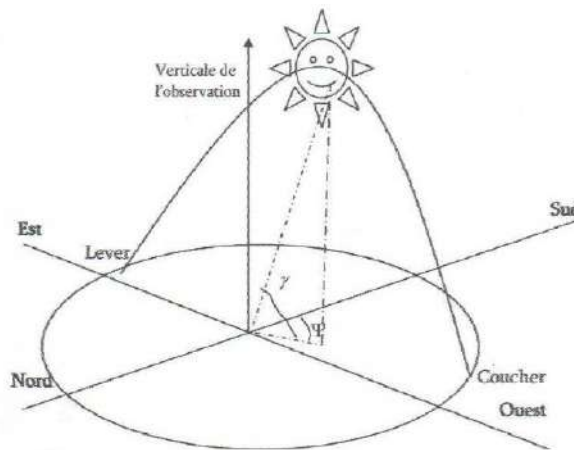


Figure-I- 5- : Coordonnées angulaires de soleil [10]

### I.8.3- La distance zénithale $z$ :

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). [11].

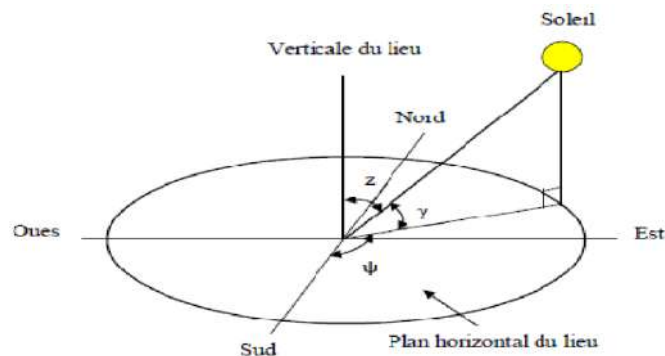


Figure-I- 6- : Coordonnées solaires selon le repère horizontal[10]

**I.9-Temps solaires :**

Sont déterminés par les deux mouvements de la Terre, la rotation autour de l'axe des pôles et la révolution autour du Soleil. La journée solaire, définie par la rotation de la Terre sur elle-même, s'effectue en 24 heures et permet de définir le temps. Chaque heure correspond à un écart angulaire de 15°. Les saisons sont définies par la révolution de la Terre autour du Soleil, qui permet de distinguer le temps solaire vrai[12]

**I.9.1- Le temps universel (TU) :**

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour obtenir le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire [10].

$$TL = TU + c$$

c : représente le décalage entre (TL) et (TU), qui tient compte à la fois du décalage horaire entre les fuseaux et du décalage administratif éventuel,

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

**I.9.2-Le temps solaire moyen (TSM) [10]:**

C'est le temps mis par le mouvement circulaire de la terre autour du soleil à vitesse constante  $TSM = TU + \lambda/15$ .

**I.9.3- Le temps solaire vrai (TSV) :**

C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil.[10]

$$TSV = TSM + Et$$

**I.9.4-Equation du temps :**

Est utilisée pour corriger la différence entre l'heure solaire et l'heure moyenne, car les jours solaires ne sont pas uniformes. Cette correction a été introduite en 1964, lorsque la mesure du temps n'a plus été basée sur la rotation de la Terre.[11].

**I.9.5- les types jours :**

Le jour type de mois est le jour considéré comme représentatif de la moyenne mensuelle d'une certaine grandeur. Klein a dressé une liste de jours types qui sont présentés dans le tableau suivant :[9]



Tableau-I- 2: les jours types de mois [9]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
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

**I.10-L'angle d'incidence :****I.10.1- L'orientation ( $\alpha$ ) :**

Du capteur par rapport au sud, ( $0^\circ$ ),  $180^\circ$  au nord,  $+90^\circ$  à l'ouest et  $-90^\circ$  à l'est. dans notre cas, cette variation est mise à zéro.[10]

**I.10.2- L'inclinaison ( $\beta$ )** : 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  $45^\circ$  pour le second.[13]

**I.10.3-L'angle d'incidence ( $\theta$ )** : l'angle formé entre les rayons solaires et la normale au capteur. Il dépend de la hauteur du soleil dans le ciel, de l'orientation du capteur et de l'inclinaison de celui-ci. [10]

**I.11-Les cellules photovoltaïques :****I.11.1-Définition :**

Le photovoltaïque (PV) est une technologie qui produit de l'électricité en courant continu (CC) à partir de semi-conducteurs exposés à des photons. Tant que ces derniers illuminent les cellules solaires (les éléments PV individuels), de l'énergie électrique est générée. L'électricité s'arrête dès que la lumière disparaît, mais les cellules solaires ne nécessitent jamais de recharge, à la différence d'une batterie. Certaines cellules solaires sont opérationnelles en continu sur Terre ou dans l'espace depuis plus de 30 ans[13] .

**I.11.2-Principe de fonctionnement :**

La cellule photovoltaïque est composée de deux zones : l'une dopée de type n avec un excès d'électrons (phosphore) et l'autre dopée de type p avec un déficit d'électrons (bore). Lorsque ces deux zones entrent en contact, les électrons en excès de la zone n se déplacent vers la zone p, créant une charge positive dans la première zone et une charge négative dans la

seconde. Cette jonction p-n crée un champ électrique qui repousse les électrons vers la zone n et les trous vers la zone p, formant ainsi une diode lorsque des contacts métalliques sont ajoutés. Lorsque la cellule est exposée à la lumière, les photons transfèrent leur énergie aux atomes, créant une paire électron-trou. En connectant une charge aux bornes de la cellule, les électrons se déplacent vers les trous, créant une différence de potentiel qui permet au courant électrique de circuler. Ce processus repose sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage pour améliorer la conductivité. [14]

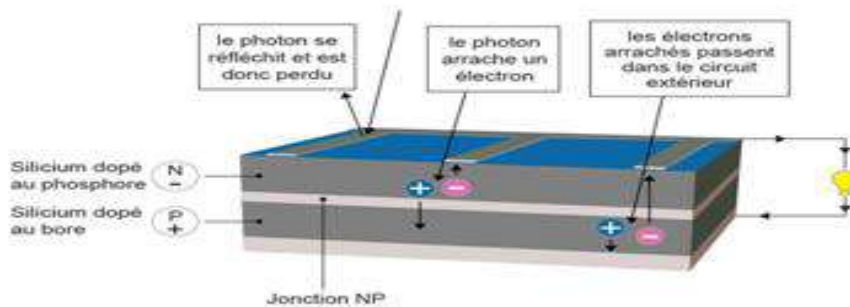


Figure-I- 7- Principe de la cellule photovoltaïque [15]

### I.11.3/Les Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque :

#### *a- Le courant de court-circuit, $I_{CC}$ :*

Est la valeur maximale du courant électrique qui peut être produit par une cellule photovoltaïque lorsque sa tension est égale à zéro ( $V=0$ ). Ce courant dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement incident, de la mobilité des porteurs et de la température, et augmente généralement avec l'intensité d'illumination. [16]

#### *b- La tension à circuit-ouvert, $V_{CO}$ :*

Est la tension qui peut être mesurée aux bornes d'une cellule photovoltaïque lorsque le courant qui la traverse est nul. Cette tension dépend du type de cellule solaire, des matériaux de la couche active et de l'éclairement de la cellule. [16]

*c- La puissance maximale,  $P_m$ ,* est obtenue lorsque la résistance de charge est optimisée pour le point de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Il est important de choisir judicieusement la résistance de charge pour maximiser la puissance électrique produite. [16]

### d- Le facteur de forme, $FF$ :

Détermine la qualité électrique de la cellule photovoltaïque. Il est calculé en divisant la puissance électrique maximale produite par la cellule ( $P_m$ ) par le produit de la tension à circuit-ouvert ( $V_{CO}$ ) et du courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ). [16]

### e- Le rendement, $\eta$ :

Est le rapport entre la puissance électrique maximale délivrée par la cellule photovoltaïque ( $P_m$ ) et la puissance lumineuse incidente ( $P_{in}$ ). Il est donc une mesure de l'efficacité de la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique [16].

### I.11.3/ Les différentes technologies des cellules Photovoltaïques :

Chaque génération de cellules photovoltaïques a ses avantages et ses inconvénients. Les cellules de la première génération sont efficaces mais coûteuses, tandis que les cellules de la deuxième génération sont plus abordables mais ont souvent un rendement légèrement inférieur. Les cellules de la troisième génération offrent un potentiel d'efficacité supérieure mais sont encore en phase de développement et nécessitent des recherches et des investissements supplémentaires pour être commercialisées.

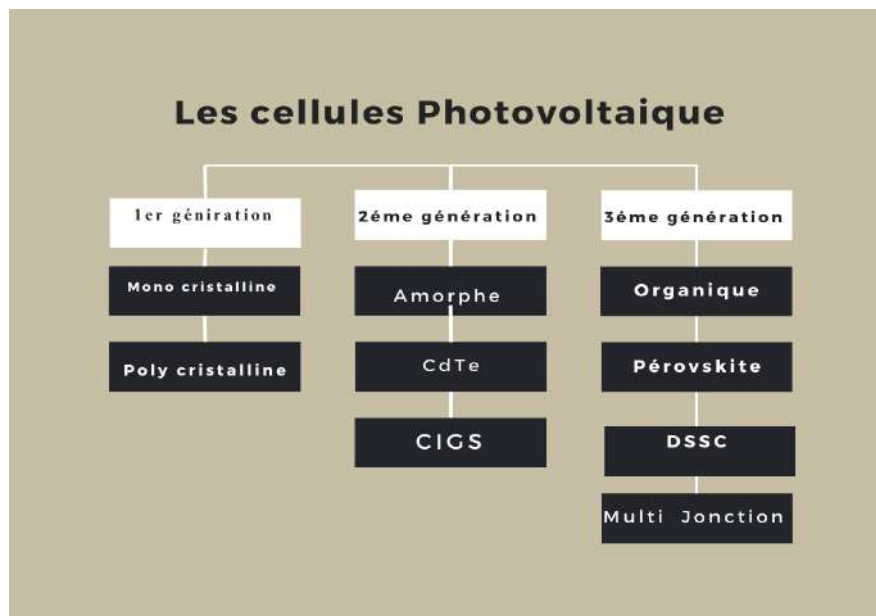


Figure-I- 8- Les différentes technologies des cellules Photovoltaïques

#### I.11.3.1/ Les cellules de première génération (à base de silicium cristallines) :

---

Les cellules photovoltaïques de première génération sont constituées de silicium cristallin. Les premières cellules solaires commerciales basées sur le silicium sont les plus efficaces actuellement pour répondre aux besoins quotidiens en énergie solaire, et représentent environ 80% de tous les panneaux solaires installés dans le monde. La cellule solaire au silicium a été découverte en 1954 par Bell Laboratoires et a présenté une efficacité de conversion de puissance de 6%. Les cellules solaires en silicium sont très efficaces pour les modules PV monocellulaires en raison de leur abondance et de leur disponibilité à la surface de la terre. Elles sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs avec une bande énergétique faible d'environ 1,1 eV, ce qui les rend idéales pour les applications PV . Les deux types de cellules solaires cristallines peuvent être classées en fonction du type de silicium utilisé et de la méthode de fabrication des tranches de Si[8] :

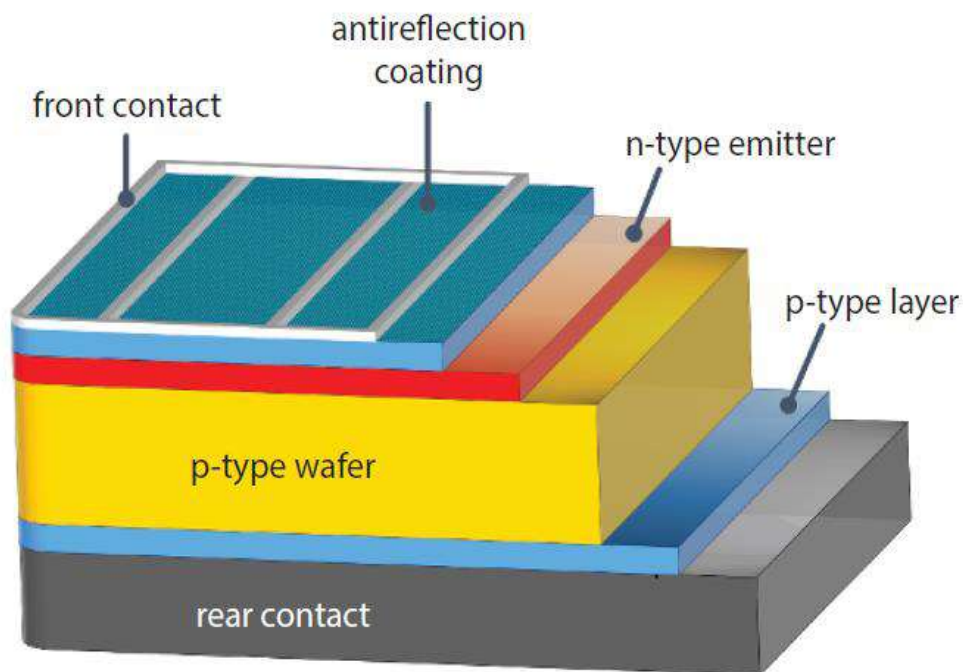


Figure-I- 9- Schéma de structure générale de cristalline silicium[8]

### *a/Cellules en silicium monocristallin :*

La cellule monocristalline est considérée comme la plus proche du modèle théorique. Lors de la solidification du silicium fondu, celui-ci ne forme qu'un seul cristal de grande dimension .Par la suite, le cristal est découpé en fines tranches pour produire les cellules solaires. Cependant, la fabrication de ces cellules est complexe et énergivore, ce qui en fait une option coûteuse. [5]

### *b/ Cellules en silicium poly cristallin:*

La production de silicium poly cristallin est beaucoup plus simple et moins coûteuse que celle du silicium monocristallin. Cependant, la qualité de ce matériau est inférieure en raison de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux élevé d'impuretés métalliques et autres. Ces joints se forment entre les surfaces adjacentes des grains ayant des orientations cristallographiques différentes et contiennent de nombreuses liaisons pendantes. Ils réduisent la durée de vie globale des porteurs et bloquent le flux de porteurs, constituant une voie potentielle pour un courant de fuite à travers la jonction. Les cellules poly cristallines sont également de couleur bleue, mais leur apparence n'est pas uniforme en raison de la présence de motifs créés par les différents cristaux [17]

### **I.11.3.2/ Les cellules de deuxième générations (à base de couche mince) :**

Les cellules photovoltaïques de deuxième génération, également appelées cellules solaires à couche mince, sont caractérisées par leur faible épaisseur qui ne dépasse que quelques micromètres. Contrairement aux cellules solaires de première génération basées sur le silicium cristallin, ces cellules ont fait l'objet de plus de deux décennies de recherche et développement pour commencer à être produites en grandes quantités. Le coût potentiellement inférieur de l'électricité fournie par les cellules solaires à couche mince les rend compétitives par rapport aux cellules de première génération à base de tranches de silicium cristallin. Ces cellules sont composées de couches minces successives de cellules solaires déposées sur des substrats peu coûteux tels que des polymères, des métaux ou du verre . Il existe quatre types de cellules solaires à couche mince qui ont été développées commercialement :[18]

### *a/Cellules amorphe :*

Les cellules amorphes sont constituées d'un matériau à base de silicium hydrogéné, qui est dans un état non cristallin, et qui est déposé sur un substrat de verre. Bien qu'elles présentent un rendement moindre que les cellules monocristallines et poly cristallines, leur fort coefficient d'absorption leur permet de fonctionner même en cas d'éclairage faible, à l'intérieur d'un bâtiment ou par temps couvert. Elles sont souvent utilisées dans des petits appareils tels que des calculatrices solaires ou des montres, ces cellules nécessitent des épaisseurs très faibles de silicium et sont relativement peu coûteuses à produire [5]

Le silicium en couche mince présente l'avantage de répondre à tous les niveaux

d'éclairage, aussi bien en extérieur qu'en intérieur. De plus, sa technologie de production est théoriquement moins coûteuse que celle des autres types de cellules solaires, bien que la production en masse ne soit pas encore atteinte. Cette technologie permet également la réalisation de petites tailles de cellules grâce à une intégration simplifiée et une découpe aisée.[17]

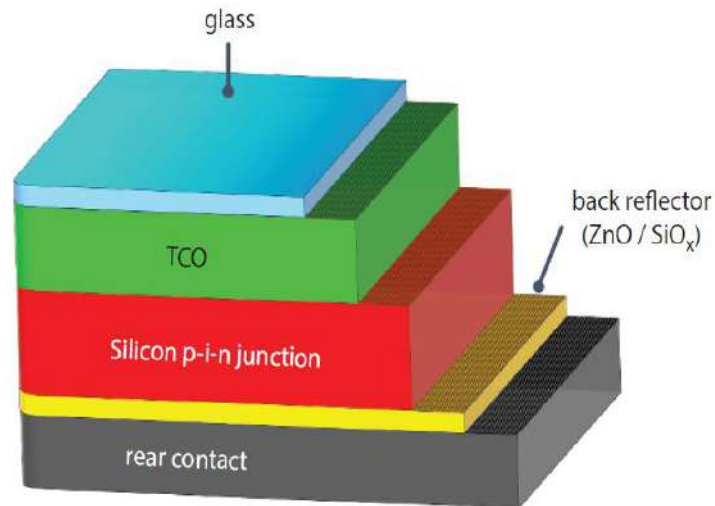


Figure-I- 10 Schéma de structure générale de Amorphe[8]

### ***b/Cuivre indium sélénium(CIS)/Cuivre indium Gallium sélénium(CIGS):***

Utilisant ces matériaux sont produites en couche mince à l'aide de méthodes chimiques ou de dépôt sous vide, sur une sous-couche de sulfure de cadmium (Cds). Bien qu'elles aient des propriétés électroniques assez bonnes et bénéficient des mêmes avantages de fabrication que le silicium amorphe (facilité de mise en série et de découpe), cette technologie est peu utilisée dans le monde en raison de difficultés d'industrialisation et de tenue climatique, mais surtout à cause de la présence de cadmium dans le matériau. Elle risque également de ne pas respecter les directives européennes sur l'exclusion des matériaux dangereux[17].

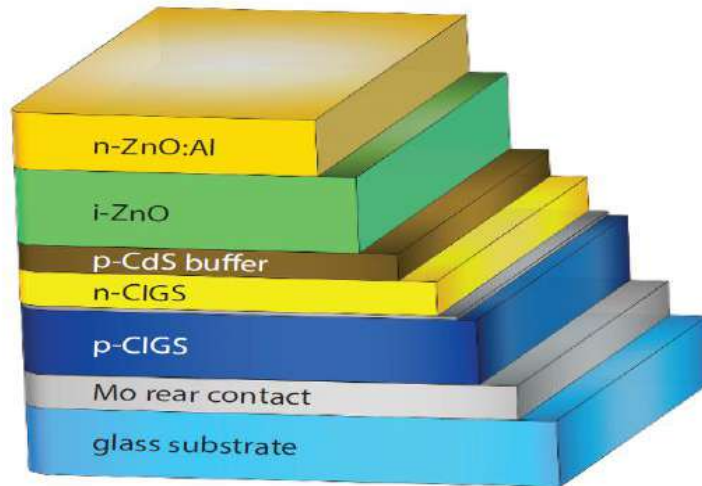


Figure-I- 11-Schéma de structure générale de CIGS[8]

***c/ Le tellure de Cadmium(CdTe) :***

Le faible rendement des cellules à base de silicium amorphe ont motivé les scientifiques à chercher des alternatives. Le tellure de cadmium (CdTe) est un matériau de couche mince de plus en plus utilisé dans les cellules solaires en raison de son faible coût de fabrication. Bien qu'il ait autrefois souffert de problèmes de stabilité et de contrôle des procédés industriels, il est aujourd'hui considéré comme le leader incontesté des couches minces. En termes de performances, il est comparable aux meilleures cellules multi jonctions en silicium amorphe. Toutefois, le CdTe risque de rencontrer des difficultés en raison de la rareté de l'élément tellure et de la présence du cadmium, un élément potentiellement dangereux et déjà interdit dans de nombreux pays.[17]



Figure-I- 12-Schéma de structure générale de CdTe[8]



### I.11.3.3/ Les cellule de troisième générations:

Une troisième génération de cellules solaires, a émergé en raison de la faible disponibilité des matériaux pour la production des SC de deuxième génération, leur toxicité, et l'expansion des SC de première génération. Contrairement aux deux premières générations de cellules solaires, les SC de troisième génération ne dépendent pas de la conception de la jonction p-n. Ces cellules solaires sont développées à partir de nouveaux matériaux tels que les nanomatériaux, les fils de silicium, les encres solaires à l'aide d'une presse à imprimer conventionnelle, les plastiques conducteurs et les colorants organiques. L'objectif de ce développement est d'améliorer l'efficacité de conversion de puissance de la nouvelle classe de cellules solaires sur une bande plus large de rayonnement solaire énergétique, tout en étant non toxique et moins coûteux.[18]

#### *a/Cellules multi-jonctions :*

Sont constituées à partir de différentes couches minces, ce qui optimise le travail d'absorption des calories solaires, puisées plus largement, et ce qui permet un meilleur rendement et une plus grande production. Ce type de cellules n'est pas vendu à des fins commerciales et reste utilisée dans le domaine spatial. Et pour cause, les techniques d'exploitation sont très complexes. On parle de jet moléculaire ou d'épitaxie. Le fonctionnement de ces cellules réside sur le même principe que celui des cellules Tandem. Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs(GaAs,Ge,GaInP2...) possédant chacun un spectre limité. En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre, le plus complet possible donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50%. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place[5]

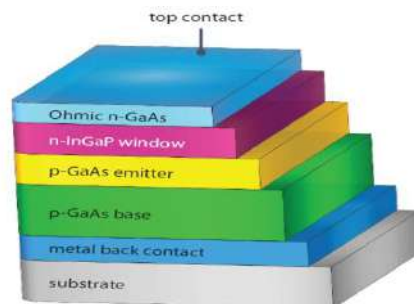


Figure-I- 13-Schéma de structure générale de Ga As[8]



### *b- Cellules organiques :*

Face à la technologie utilisant les matériaux inorganiques, les cellules solaires à base de composés organiques connaissent un développement considérable. L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages : la possibilité d'être déposée en grande surface, la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Elles possèdent en revanche à l'heure actuelle des durées de vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles inorganiques, et des rendements de conversion plus faibles [14]



Figure-I- 14-Schéma de structure générale de Organique[8]

### *C- cellules Pérovskite :*

Les cellules solaires à pérovskite sont une technologie émergente de troisième génération pour la production d'énergie photovoltaïque. En revanche, les matériaux pérovskites sont utilisés depuis le 19<sup>ème</sup> siècle dans le développement des cellules solaires en raison de leur absorption active de la lumière, mais la tendance dans la production d'énergie photovoltaïque est plus récente [8].

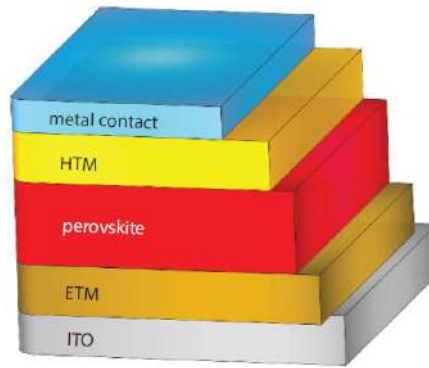


Figure-I- 15-Schéma de structure générale de Pérovskite[8]

**d- Cellules sensibilisée au colorant Dye-sensitized( DSSC) :**

Les cellules solaires sensibilisées par un colorant, également appelées cellules de Gratzel, sont l'un des développements les plus importants de cette génération de cellules solaires. Les cellules solaires sensibilisées par un colorant présentent des avantages tels que des procédures de fabrication simples, respect de l'environnement, faible coût, haute efficacité, bonne conductivité, bonne plasticité et transparence, ce qui les rend supérieures aux autres dispositifs de cellules solaires photovoltaïques. Des études ont été menées pour améliorer les composants individuels des cellules solaires sensibilisées par un colorant afin d'atteindre une efficacité de conversion de puissance élevée et de réduire les coûts de production [8].

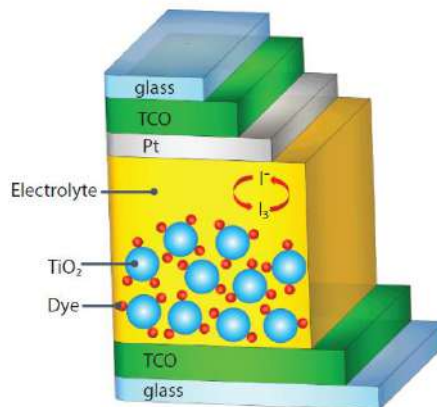


Figure-I- 16-Schéma de structure générale de DSSC[8]

**I.12/- Association des modules photovoltaïques :**

En pratique, les cellules solaires ne sont pas utilisées individuellement. Elles sont regroupées et reliées électriquement pour former un module photovoltaïque. Ces modules sont ensuite combinés et reliés électriquement avec d'autres modules pour former un générateur photovoltaïque. Ces modules peuvent être associés de différentes manières [16]

**I.12.1/- Montage en série :**

Dans un montage en série, les tensions des modules s'additionnent, tandis que le courant traversant les modules reste constant. Cependant, lorsque les panneaux sont montés en série, l'intensité traversant les panneaux sera celle du panneau ayant la performance la plus faible. Par conséquent, si une ombre apparaît sur l'un des panneaux, l'ensemble de la série aura un rendement égal à celui du panneau ayant la performance la plus faible. [16]

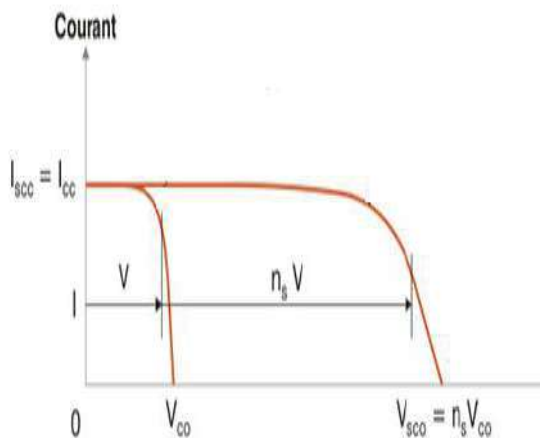


Figure I- 9- : Caractéristique d'un groupement de modules PV en série [19]

**I.12.2/- Montage en parallèle :**

Le montage en parallèle consiste à connecter plusieurs modules identiques en parallèle pour augmenter le courant de sortie du générateur. Dans ce cas, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique électrique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. Figure 9 résume les caractéristiques électriques d'une telle association parallèle de n modules. En revanche, contrairement au montage en série, si un module est ombragé ou endommagé, cela n'affectera pas le rendement des autres modules en parallèle. [16]

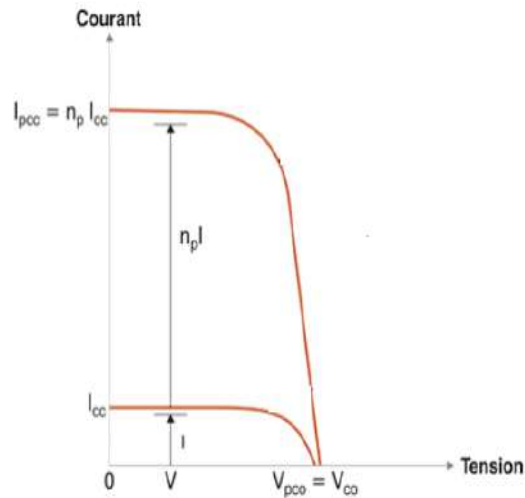


Figure -I- 10 : Caractéristique d'un groupement de modules PV en parallèle[16]

### I.12.3/Montage mixte : (série + parallèle) :

Pour obtenir une puissance de quelques kilowatts avec une tension adéquate, il est indispensable de combiner les modules en panneaux, puis de connecter ces derniers en séries et en parallèles pour constituer un générateur photovoltaïque. Cette technique est couramment utilisée pour augmenter la puissance de sortie des modules solaires [1]

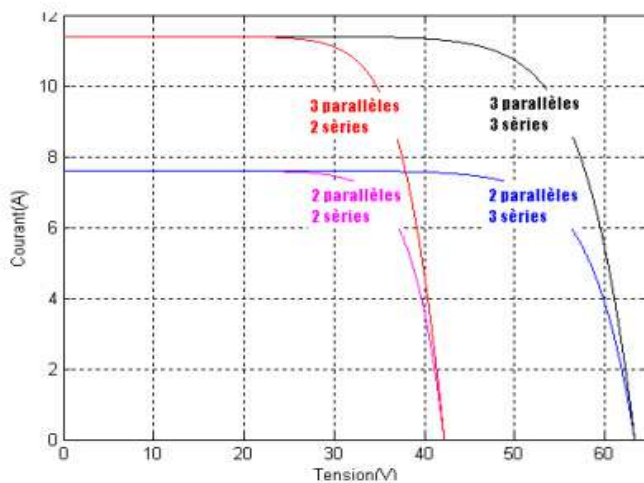


Figure-I- 11-: Caractéristique d'un groupement mixte de modules PV [20].

### **I.13/Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [13]:**

#### **I.13.1/Avantages :**

Cette énergie présente de nombreux avantages, à savoir :

-Les installations photovoltaïques offrent de nombreux avantages, tels que leur haute fiabilité et leur faible besoin en maintenance.

- Le montage est simple et adaptable à chaque projet. Contrairement aux installations éoliennes.

- l'énergie photovoltaïque est produite sans aucun bruit.

Cette source d'énergie est également inépuisable et propre ,ne générant ni gaz à effet de serre ni déchets.

- Les systèmes photovoltaïques sont fiables, car les composants ne sont pas en mouvement et les matériaux utilisés sont résistants aux conditions météorologiques extrêmes.

- Dans les zones isolées, l'énergie photovoltaïque peut être une solution pratique et économique pour obtenir de l'électricité.

- les contrats d'achat pour cette énergie sont généralement conclus pour une durée suffisamment longue.

#### **I.13.2/Inconvénients :[13]**

- Bien que les installations photovoltaïques offrent plusieurs avantages, il est important de noter que leur durée de vie est limitée à environ 20 à 30 ans.

- les cellules photovoltaïques ont tendance à perdre leur efficacité avec le temps, avec une perte de rendement estimée à environ 1 % par an pour les panneaux solaires.

- les panneaux solaires contiennent des matériaux toxiques tels que le cuivre, le chrome, le silicium, le cadmium et le tellure.

- le rendement des panneaux photovoltaïques est encore relativement faible, avoisinant les 20 % pour les meilleurs d'entre eux. Par conséquent, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque est plus adaptée pour les projets à faible consommation, tels que les maisons individuelles.

#### **I.14.Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté et étudié le rayonnement solaire d'une manière générale et les différents générations des cellules photovoltaïques d'une manière détaillée. Nous avons présenté les Coordonnées géographiques, Coordonnées horaires, Coordonnées horizontales.

# **Chapitre II Méthodes et Matérielles**

### **II-1- Introduction :**

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique idéale, car elle bénéficie d'heures d'ensoleillement abondantes tout au long de l'année, ce qui la qualifie pour exploiter l'énergie solaire.

### **II-2- Présentation de site d'étude :**

#### **II-2- 1- La wilaya de Ouargla :**

Qui couvre un vaste territoire de 163 230 km<sup>2</sup>, est idéalement située au centre de la région Sud/Est de l'Algérie. Ses coordonnées géographiques sont 31° 57.46° Nord, 5° 20. 31° Est, avec une altitude de 150 mètres. Elle occupe une position centrale importante dans la frange la plus centrale du Sahara.

La wilaya est située dans la partie sud du pays et partage des frontières avec plusieurs autres wilayas et pays : au nord, elle est limitée par les wilayas de Djelfa, Biskra et El Oued. Au sud, elle est bordée par Illizi et Tamanrasset .À l'est, elle partage une frontière avec la Tunisie .À l'ouest, elle est voisine de Ghardaïa.

La wilaya de Ouargla se caractérise par un climat saharien, avec une pluviométrie très faible, des températures élevées, une évaporation élevée et une faible activité biologique dans son écosystème. Les températures moyennes mensuelles atteignent des valeurs extrêmes pendant le mois le plus chaud (juillet), avec des variations de 50 °C à Hassi Messaoud. En revanche, pendant le mois le plus froid (janvier), les températures fluctuent entre 10,8 °C et 9,7 °C à Ouargla .[9]

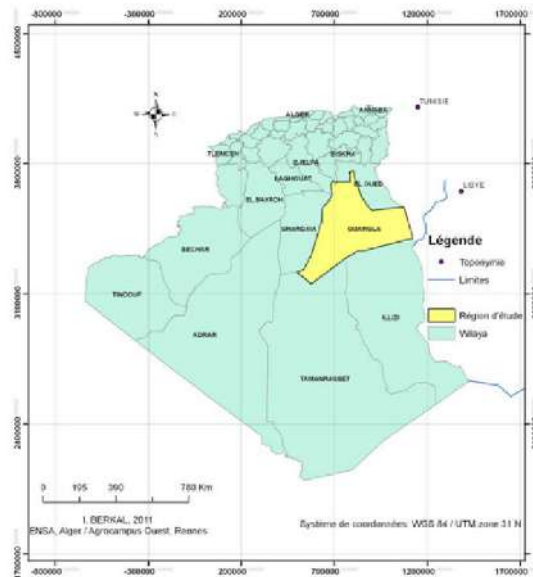


Figure-II- 1-le situation de Ouargla [22]

### II-1-2- Les données climatiques :

Dans notre étude nous avons choisi 4 jours types dans les quatre saisons de 2022 :

Tableau-II- 1-Les données climatique de site dans les quatre jours type-2022- [23]

Les données climatiques	Température maximale °C	Température minimale °C	Humidité Moyenne %
<b>Les jours types</b>			
<b>17 Janvier</b>	14	1	57.75
<b>15 Avril</b>	23	15	54.05
<b>17 Juillet</b>	39	29	18.4
<b>15 Octobre</b>	33	20	40.4

Tableau-II- 2-Les données climatique de site mantille 2022[23]

Les données climatiques	Température maximale °C	Température minimale °C	Humidité Moyenne %
<b>Janvier</b>	16.7	3.2	46.9
<b>Avril</b>	28.5	15.1	27.8
<b>Juillet</b>	42.6	28.4	15.9
<b>Octobre</b>	32.3	18.4	30



Tableau-II- 3- Les donnés climatiques Annuelle-2022-[23]

Les donnés climatiques Annuelle	Température maximale moyenne	Température minimale moyenne °C	Humidité Moyenne %
	31.2	17.1	28.9

### II-3- Les Modèles Mathématiques :

#### II-3- 1- Les modèles géométrique :

- *La durée du jour :*

La durée du jour varie en fonction de la position géographique, de la saison et de l'inclinaison de la Terre par rapport au soleil. Voici quelques informations générales sur les durées du jour

Équateur : Aux latitudes proches de l'équateur, la durée du jour est relativement constante tout au long de l'année, avec environ 12 heures de lumière du jour et 12 heures de nuit.

- Latitudes tempérées : Aux latitudes moyennes, telles que celles que l'on retrouve dans de nombreux pays, la durée du jour varie considérablement selon les saisons. En été, les journées sont plus longues, avec plus de 12 heures de lumière du jour, tandis qu'en hiver, les journées sont plus courtes, avec moins de 12 heures de lumière du jour.
- Hautes latitudes : Aux latitudes élevées, près des pôles, les variations saisonnières de la durée du jour sont encore plus prononcées. Pendant les mois d'été, on peut observer des journées de 24 heures de lumière continue, également appelées "soleil de minuit". En revanche, pendant les mois d'hiver, il peut y avoir des journées entières sans lumière du jour, également appelées "nuit polaire".

Donnés par la relation suivant [24]:

$$d = \frac{\omega}{15} \quad \text{II-1}$$

- *La déclinaison  $\delta$  [24]:*

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin(0.980^\circ \times (n + 284)) \quad \text{II-2}$$

$n$  : représente le nombre de jours de l'année, comptés à partir du 1er janvier. Il varie de 1 à 365 ou 366, en fonction de l'année. Une année civile compte 365 jours, tandis qu'une année bissextile compte 366 jours.

- **L'angle horaire  $\omega$  [24] :**

On peut trouver là par la relation suivant

$$\omega = 15(TS - 12) \quad \text{II-3}$$

TS : Temps solaire .

- **L'azimute  $\psi$  [24]:**

$$\sin(\psi) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\gamma)} \quad \text{II-4}$$

- **La hauteur solaire  $\gamma$  ( $h$ ) [24]:**

$$\sin(\gamma) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad \text{II - 5}$$

- **L'angle d'incidence  $\theta$  [24] :**

$$\cos(\theta) = \sin(\gamma) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\psi - \alpha) + \sin(\gamma) \cos(\beta) \quad \text{II-6}$$

- **Correction de distance terre-soleil (C) [25] :**

La correction de la distance Terre-Soleil (C) est utilisée pour prendre en compte le fait que le rayonnement émis par le Soleil est isotrope (se propage dans toutes les directions et de puissance constante. Lorsque ce rayonnement est reçu en dehors de l'atmosphère terrestre sur un plan perpendiculaire aux rayons solaires et d'unité de surface, sa puissance décroît proportionnellement au carré de la distance au Soleil.

En d'autres termes, la puissance reçue sur ce plan est inversement proportionnelle au carré de la distance Terre-Soleil. La correction de distance Terre-Soleil (C) est utilisée pour ajuster les calculs et les mesures du rayonnement solaire en tenant compte de cette variation de puissance en fonction de la distance.

Il convient de noter que cette correction est appliquée pour les calculs et les mesures effectués en dehors de l'atmosphère terrestre, afin de prendre en compte l'effet de la distance sur l'intensité du rayonnement solaire reçu.

Donné par la relation :

$$C = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \times n}{365}\right) \quad \text{II-6}$$

- **Equation de temps [7] :**

$$E_t = 9.87 \times \sin(2N) - 7.35 \times \cos(N) - 1.5 \sin(N) \quad \text{II-7}$$

où N : est l'angle du jour en degrés ou radians :  $N = \frac{2\pi(\text{ou } 360^\circ) \times (n-81)}{365}$

n : est le numéro de jour

### II/3-2- les modèle de rayonnements solaire[24] :

- **L'éclairement solaire Sur un plan horizontale [24]:**

Dans notre étude, Selon cette formule, le rayonnement global (GH) est défini comme la somme des deux composantes : le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Cette approche permet de prendre en compte à la fois la contribution du rayonnement direct provenant du soleil et celle du rayonnement diffus provenant du ciel environnant.

$$G_H = S_H + d_H \quad \text{II-8}$$

S<sub>H</sub> : est le rayonnement direct donnée par :

$$S_H = 1370 * \exp\left[\left(\frac{-T_L}{0.9 \times 9.41 \times \sin(h)}\right)\right] \quad \text{II-9}$$

Avec :

S<sub>H</sub>: Flux direct horizontal.

h : Hauteur du soleil.

T L: Facteur de trouble. Est donnée par la relation :

$$T_L = 2.4 + 14.6\beta'' + 0.4(1 + \beta'') \ln(PV')$$

β'' : C<sub>Ft</sub> est coefficient de trouble égal à 0.05

PV' : Pression partielle de vapeur donnée par PV' = PVs × HR

HR : l'humidité relative

PVS : Pression de saturation.  $PVS = \exp(13.7 - (5120/T_{ak}))$

$$T_{ak} = T_a + 273$$

$T_a$ : la température ambiante

$$T_a = (((T_{max} - T_{min})/2) * \cos(((14 - \text{temps})/(14 - \text{heureL})) * 3.14)) + T_{moy}$$

-  $d_H$ : est le rayonnement diffus donnée par :

$$d_H = 54,8 \sin(h) [TL - 0,5 - \sin(h)] \quad \text{II-10}$$

Où TL est le facteur de trouble

- **Le modèle d'éclairage solaire Sur un plan incliné : [24]**

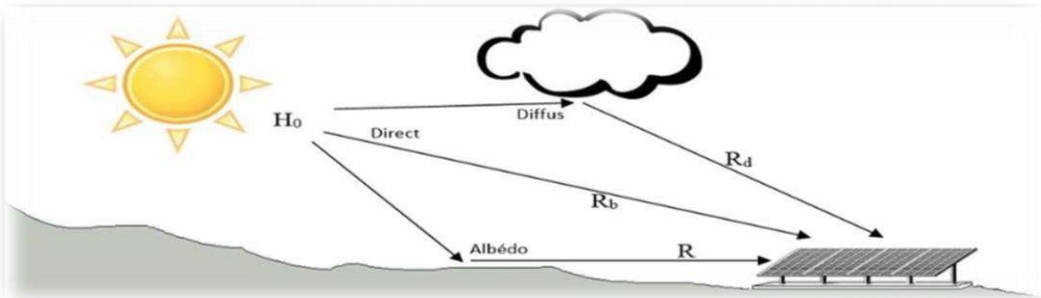


Figure-II- 2- le rayonnement globale sur un plan incliné[25]

Le rayonnement solaire direct  $S_f$ :

$$S_f = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin(\omega)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\omega)} \cdot S_H \quad \text{II-11}$$

Avec

$S_H$ : le rayonnement direct sur un plan horizontal

$\beta$ : l'inclinaison

$\delta$ : Déclinaison du soleil.

$\omega$ : Angle horaire du soleil.

Le rayonnement solaire diffus  $D_f$  :

$$D_f = \left(\frac{d_H}{2}\right)(1 + \cos(\beta)) \quad \text{II-12}$$

Le rayonnement réfléchi  $R_f$

$$R_f = \left(\frac{Gh}{2}\right) \rho \cdot (1 - \cos(\beta)) \text{II-13}$$

Avec  $\rho$  : l'albédo

Le rayonnement global  $G_f$  :

$$G_f = S_f + D_f + R_f \quad \text{II-14}$$

### II/3-3-Les modèles de différents paramètres de la cellule photovoltaïque :

Les performances des cellules solaires sont caractérisées par plusieurs paramètres clés, dont les principaux sont la puissance de crête ( $P_{max}$ ), la densité de courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et le facteur de remplissage (FF). À partir de ces paramètres, on peut déterminer le rendement de conversion ( $\eta$ ) . [27]

- **La puissance maximale  $P_{max}$  :**

c'est le résultat de la multiplication de la quantité d'électrons (courant) par l'énergie disponible pour les électrons (tension). Watt (W) est l'unité de mesure utilisée pour définir la puissance électrique. Dans les équations et les expressions, la puissance est généralement représentée par la lettre P.[27]

Elle peut être exprimée par la relation suivant :

$$P_{max} = I_{mpp} \times V_{mpp} \quad \text{II-15}$$

$I_{mpp}$ :le courant correspondant à la puissance maximale fournie

$V_{mpp}$ :la tension correspondante à la puissance maximale fournie,

- **Le rendement  $\eta$  :**

Le rendement de conversion est déterminé en calculant le rapport entre la puissance maximale générée et la puissance incidente. Cette efficacité représente l'efficacité d'une cellule ou d'un module solaire à convertir la lumière incidente en énergie électrique utilisable.

Il est généralement exprimé en pourcentage et constitue une mesure de performance clé pour évaluer les performances des appareils solaires.[27]

On peut déterminer le rendement par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \times 100 = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{P_i} \times 100 \quad \text{II-16}$$

- **La tension à circuit ouvert  $V_{oc}$  :**

Est la tension obtenue lorsque le courant qui traverse la cellule photovoltaïque est nul. Elle est déterminée par la relation suivante[2] :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} - 1\right) \quad \text{II-17}$$

- **Le facteur de forme  $FF$  : [2]**

Est déterminé par la relation suivante dans la courbe courant-tension :

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad \text{II-18}$$

où :  $I_{mpp}$  : le courant de crête maximum,  $V_{mpp}$  : correspond à la tension maximale

$I_{cc}$  : le courant de court-circuit,  $V_{oc}$  : la tension à circuit ouvert

Le facteur de forme permet d'évaluer l'efficacité de la cellule photovoltaïque en prenant en compte les pertes et les variations de courant et de tension à travers la courbe courant-tension.

### II/3-4-circuit équivalent[10]:

L'expression mathématique du courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque est la suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad \text{II-17}$$

Avec:

$I_{ph}$ : densité de courant photo générés et  $I_{obsc}$ : densité de courant d'obscurité

Pour une cellule solaire idéale, on peut écrire sous la forme suivante:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{KT} \right) - 1 \right) \quad \text{II-18}$$

Avec:

$I_0$ : courant de saturation de la diode,  $q$ : charge élémentaire,  $k$ : constante de Boltzmann,  $T$ : température de la cellule.

### a/Cellule solaire idéale :

En présence de lumière, on observe l'apparition d'une courante photo supplémentaire, appelé courant photoélectrique,  $I_{ph}$ , qui circule dans le sens opposé au courant direct. Lorsque l'on connecte un circuit externe à la cellule photovoltaïque éclairée, on recueille ce courant. Le courant généré sous l'effet de la lumière est donné par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{\varepsilon KT} \right) - 1 \right) \quad \text{II-19}$$

La tension est donnée par :

$$V = \varepsilon U_t \ln \left( \frac{I_{ph} + I_0 - I}{I_0} \right) \quad \text{II-20}$$

$\varepsilon$ : est le facteur de qualité.  $U_t = \frac{kT}{q}$

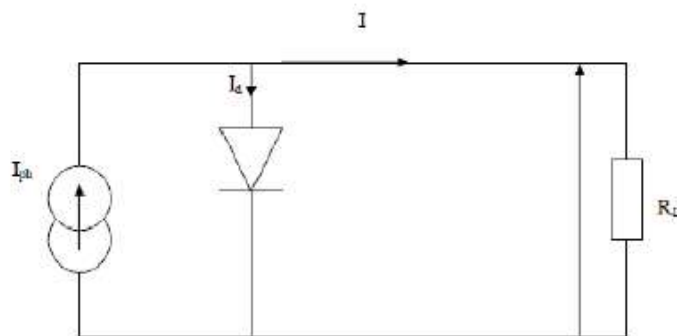


Figure-II- 3:Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale[10]

### *b/Cellule solaire réelle :*

La cellule solaire réelle présente deux résistances parasites qui affectent son fonctionnement. La première est la résistance série,  $R_s$ , qui est liée à l'impédance des électrodes et de la base de la cellule. En conséquence, la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La deuxième résistance est la résistance shunt,  $R_{sh}$ , qui correspond aux pertes de surface et aux pertes causées par les défauts dans le matériau de la cellule. Une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée à travers cette résistance et ne pourra pas être délivrée à la charge[10].

L'équation caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque, en tenant compte des résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ , s'exprime donc par :

$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{II-21}$
$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{\varepsilon kT} - 1 \right) \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II-22}$

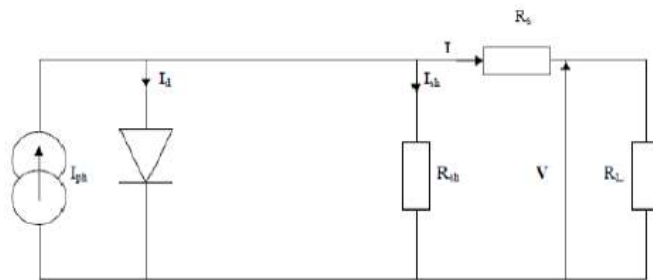


Figure-II- 4- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle[10]

### **II/4- le Matériel :**

**II/4-1-Les cellule photovoltaïques :** Pour comparer les cellules solaires de première, deuxième et troisième génération, nous avons utilisé quatre cellules de différent technologie et de même surface  $S=1.6m^2$ .

- *Cellules de 1<sup>er</sup> génération :*

Le silicium monocristallin est le matériau le plus couramment utilisé dans les panneaux solaires. Il offre un rendement élevé pour des niveaux d'éclairement élevés et modérés, et il



est considéré comme l'un des matériaux les plus performants pour les panneaux solaires terrestres, après l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : de 15 % à 20 % en conditions standard de test (STC).
- Puissance des panneaux : de 5 w à 300 W.
- Plage d'éclairement : de 100 à 1 000 watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>).

Utilisation : adapté à tous les usages en extérieur nécessitant une puissance élevée ou modérée, tels que les télécommunications, l'habitat, les centrales solaires et les toits solaires.[17]

Dans cette étude, nous avons utilisé une cellule en silicium monocristallin produite par IBERIAN SOLAR, disponible sur le marché sous le nom IBS60M, avec une capacité maximale de 300 watts et un poids de 18 kilogrammes.

Tableau-II- 4- les caractéristiques de la cellules IBS60M-300P[28]

Paramètres	Valeurs
Puissance Maximum P max [W]	300
Courant de court circuit I <sub>cc</sub> [A]	9.88
Tension de circuit ouvert Voc[V]	38.8
<b>I<sub>mpp</sub></b> [A]	9.47
<b>V<sub>mpp</sub></b> [V]	31.7
NOCT [°C]	45±2
Coefficient de température de <b>I<sub>cc</sub></b> α[%/°C]	0.05
Coefficient de température de <b>V<sub>oc</sub></b> β[%/°C]	-0.31
Langueur[mm]	1640
Largeur[mm]	992
Efficacité %	18.44



Figure-II- 5- la cellule IBS60M-300P [28]

Le silicium poly (ou multi-) cristallin est un matériau proche du silicium monocristallin, mais composé de multi cristaux. Il présente des performances légèrement inférieures, notamment pour des niveaux d'éclairement modérés, mais il est également moins coûteux.

- Rendement électrique des panneaux : entre 12% et 17% en conditions standard de test (STC).
- Puissance des panneaux : de 5 à 300 watts-crête (W).
- Plage d'éclairement : de 200 à 1 000 watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>).

Utilisation : similaire au silicium cristallin. Il convient à de nombreux usages en extérieur nécessitant une puissance élevée ou modérée, tels que les télécommunications, l'alimentation des habitations, les centrales solaires et les toits solaires.[17]

La cellule utilisée pour l'étude en silicium Poly cristallin produite par Canadian Solar , disponible sur le marché sous le nom CS6P , avec une capacité maximale de 255 watts et un poids de 19 kilogrammes.

Tableau-II- 5- Les caractéristiques de la cellule CS6P-255P[28]

Paramètres	Valeurs
Puissance Maximum P max [W]	255
Courant de court circuit I <sub>cc</sub> [A]	9
Tension de circuit ouvert Voc[V]	37.4
$I_{mpp}$ [A]	8.30
$V_{mpp}$ [V]	30.2
NOCT [°C]	45±2
Coefficient de température de $I_{cc}\alpha$ [%/°C]	0.065
Coefficient de température de $V_{oc}\beta$ [%/°C]	-0.34
Langueur[mm]	1638
Largeur[mm]	982
Efficacité %	15.85

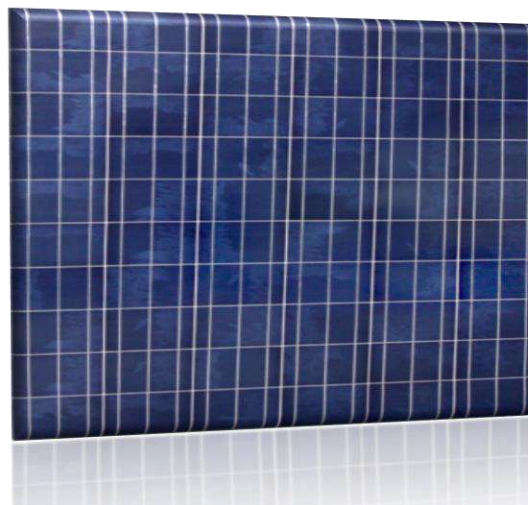


Figure-II- 6- la cellule solaire CS6P-255P[28]

- **Cellules de 2<sup>ème</sup> génération :**

Nous avons choisi une cellule à technologie de CIGS :

Les cellules utilisant le matériau Cu In Ga Se (CIGS) sont fabriquées en couche mince à l'aide de méthodes chimiques ou de dépôt sous vide. Elles sont appliquées sur une sous-couche de Cds (sulfure de cadmium). Ces cellules solaires présentent de bonnes propriétés électroniques. De plus, elles bénéficient des mêmes avantages de fabrication que le

silicium amorphe, tels que la mise en série et la découpe faciles. Cependant, cette technologie est relativement peu commercialisée à l'échelle mondiale, probablement en raison de difficultés d'industrialisation, de résistance climatique et surtout en raison de la présence de cadmium, qui pourrait être en contradiction avec les directives européennes sur l'exclusion des matériaux dangereux.

- Rendement des panneaux : entre 10 % et 12 %.

-Puissance des panneaux : de 5 à 150 watts(W) .

Utilisations : adaptés aux alimentations de faible et moyenne puissance en extérieur, ainsi qu'à l'alimentation des habitations raccordées au réseau électrique[17]

La cellule utilisé pour l'étude en Copper Indium Gallium Diselenide produite par SINOLTECH , disponible sur le marché sous le nom FLEX-03M-1.7M , avec une capacité maximale de 240 watts

Tableau-II- 6- les caractéristiques de la cellule FLEX-03M-1.7M -240P[28]

Paramètres	Valeurs
Puissance Maximum P max [W]	240
Courant de court circuit $I_{cc}$ [A]	13.6
Tension de circuit ouvert $V_{oc}$ [V]	24.7
$I_{mpp}$ [A]	12.0
$V_{mpp}$ [V]	20.0
NOCT [°C]	48
Coefficient de température de $I_{cc}\alpha$ [%/°C]	0.003
Coefficient de température de $V_{oc}\beta$ [%/°C]	-0.36
Langueur[mm]	1710
Largeur[mm]	973
Efficacité %	16.3



Figure-II- 7- La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P [28]

### *Cellules de 3<sup>ème</sup> génération*

La structure à hétérojonction avec couche mince intrinsèque (HIT) utilise la technologie du silicium amorphe (a-Si), où les couches a-Si sont déposées sur du silicium cristallin à l'aide de PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). Cette structure offre une excellente passivation de surface grâce à des processus à basse température (inférieure à 200°C), empêchant la dégradation de la durée de vie du matériau en vrac. Cependant, la passivation dépend fortement de la morphologie et de la propreté de la surface, et elle peut être compromise si la température est augmentée au cours des étapes ultérieures du processus.

De fines couches intrinsèques de a-Si sont insérées entre le a-Si et le substrat cristallin pour améliorer les caractéristiques de l'interface a-Si/c-Si. Ces couches amorphes ont typiquement une épaisseur d'environ 10-20 nm. Des couches d'oxyde conducteur transparent (TCO) sont pulvérisées sur les deux couches dopées et des doigts métalliques sont sérigraphiés. La métallisation arrière est également conçue selon un motif en forme de peigne pour réduire les contraintes thermiques et mécaniques, permettant à la cellule de fonctionner de manière symétrique et comme une cellule bifaciale. Les cellules HIT ont démontré des efficacités supérieures à 21.[17]

La cellule utilisée pour l'étude en silicium Poly cristallin produite par HEVEL ENERGY GROUP, disponible sur le marché sous le nom HVL-335/HJT, avec une capacité maximale de 335 watts et un poids de 19 kilogrammes.

Tableau-II- 7-les caractéristiques de la cellule solaire HVL-335/HJT-355P[28]

Paramètres	Valeurs
Puissance Maximum P max [W]	335
Courant de court circuit I <sub>cc</sub> [A]	9.55
Tension de circuit ouvert Voc[V]	44.34
$I_{mpp}$ [A]	9.04
$V_{mpp}$ [V]	37.06
NOCT [°C]	38.8
Coefficient de température de $I_{cc}\alpha$ [%/°C]	0.037
Coefficient de température de $V_{oc}\beta$ [%/°C]	-0.249
Langueur[mm]	1671
Largeur[mm]	1200
Efficacité %	20.0



Figure-II- 8-la cellule solaire HVL-335/HJT-355P[28]

### II/5-Outils informatique : [7]

#### MATLAB :

Abréviation de Matrix Laboratory est un outil mathématique et un logiciel graphique doté de fonctionnalités numériques, graphiques et de programmation, avec de nombreux outils intégrés. Il permet d'effectuer des calculs scientifiques et d'ingénierie, de résoudre des problèmes sophistiqués et de créer et manipuler des graphiques. MATLAB excelle dans les

calculs impliquant des matrices et offre un environnement pratique pour développer des scripts complexes (programmes).

. MATLAB utilise trois fenêtres principales :

- La fenêtre de commande est utilisée pour saisir des commandes, des instructions et des expressions.
- La fenêtre graphique affiche les tracés et les graphiques.
- La fenêtre d'édition est utilisée pour créer et éditer des fichiers M (scripts et fonctions définis par l'utilisateur).

Il y a aussi le répertoire actuel, qui affiche le dossier où les fichiers (par exemple, les fichiers M ou les fichiers de données) sont enregistrés. Par défaut, il affiche le répertoire par défaut, mais cela peut être modifié en fonction des besoins.

Après avoir lancé MATLAB, la fenêtre de commande s'ouvre avec l'invite de commande affichée, en attente d'une commande. La méthode la plus simple pour utiliser MATLAB consiste à saisir directement des expressions mathématiques, des commandes ou des instructions sur la ligne de commande de la fenêtre. MATLAB répond immédiatement avec un résultat. Nous pouvons l'utiliser pour effectuer des opérations arithmétiques de base comme nous le ferions avec une calculatrice. Nous pouvons additionner, soustraire, multiplier, diviser et effectuer des calculs plus complexes. MATLAB affecte le résultat à une variable appelée "ans" et l'affiche dans la fenêtre de commande. Cependant, cette méthode est limitée pour résoudre des problèmes plus complexes. Pour effectuer des calculs plus avancés, il est nécessaire d'assigner des valeurs aux variables et de créer des expressions avec elles, qui sont exécutées une par une.

### **II-6- Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons défini la zone d'étude, la localisation géographique, les informations météorologiques, et l'application mathématique qui lui correspond (rayonnement solaire, coordonnées solaires, les caractéristiques I-V), nous avons également introduit les cellules solaires à comparer, et la définition des utiles informatiques (MATLAB).

# **Chapitre III : Résultats et discussion**



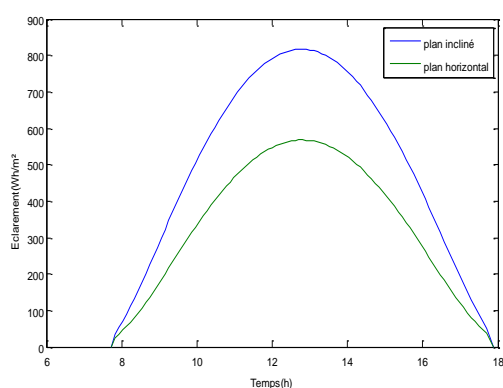
## Chapitre III Résultats et discussion

**III-1- Introduction :** A l'aide d'un programme global et d'un mini programme pour calculer certaines des caractéristiques étudiées des cellules solaires, et extraire les résultats, nous avons pu modéliser et simuler par Matab et Origine des courbes de comparaison.

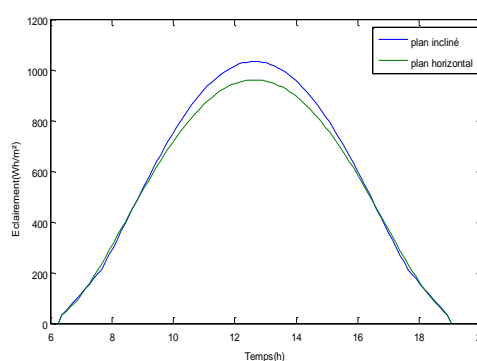
**III-2-Etude de rayonnement :** Le modèle mathématique de rayonnement utilisé à la simulation est donné dans le deuxième chapitre sur le nous constatons que le rayonnement est indépendant des caractéristiques cellulaires, mais il est lié à la position géographique et aux variations météorologiques. Par conséquent, il est possible d'extrapoler les résultats à partir d'une seule cellule.

### III-2-1- Etude journalière :

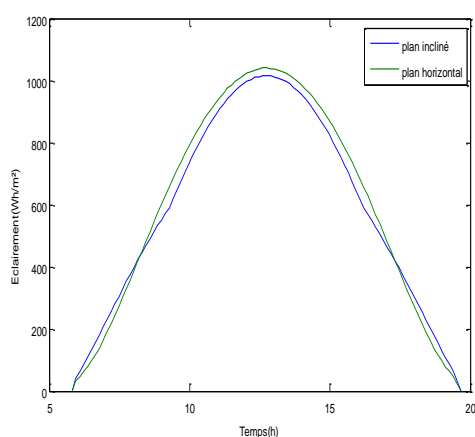
17 Janvier :



15 Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

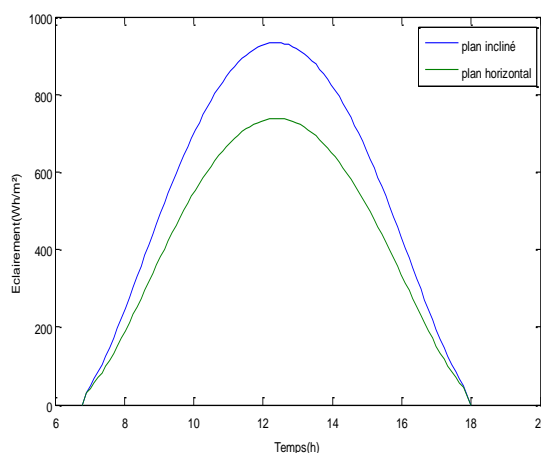


Figure-III- 1-Evolution Journalière d'éclairement sur les deux plans HOR et INC

## Chapitre III Résultats et discussion

La figure(III-1) représente l'évolution de l'éclairement solaire en fonction de temps légal pour quatre jour: 17 janvier,15 avril, 17juillet 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/m<sup>2</sup>, ainsi la durée de jour était aussi maximale (14 heures). Le plan incliné captait plus de rayonnement par apport le plan horizontal sauf la journée de 17 juillet (l'angle optimal à l'été =0).

### III-2-2- Etude Mensuel :

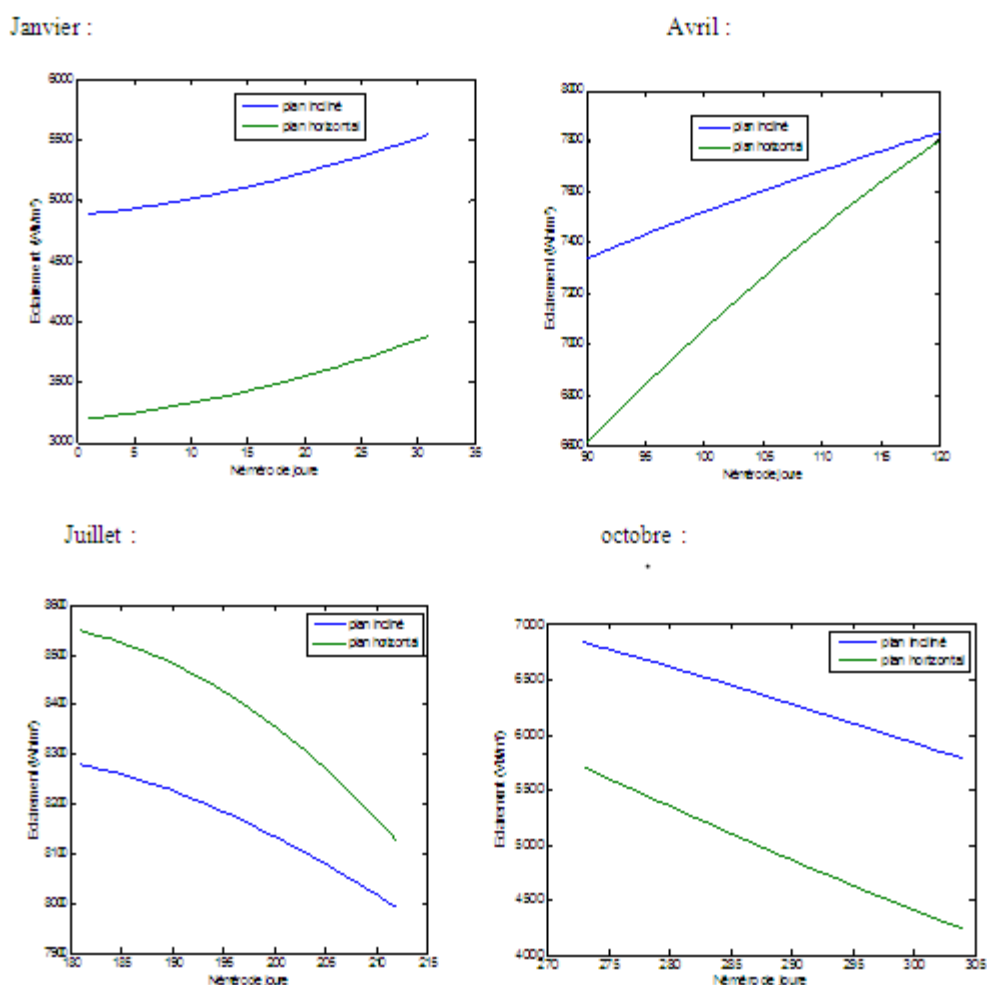


Figure-III- 2 -Evolution montiel d' éclairement sur les deux plans HOR et INC

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)

## Chapitre III Résultats et discussion

---

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

### III-2-3- Etude Annuel :

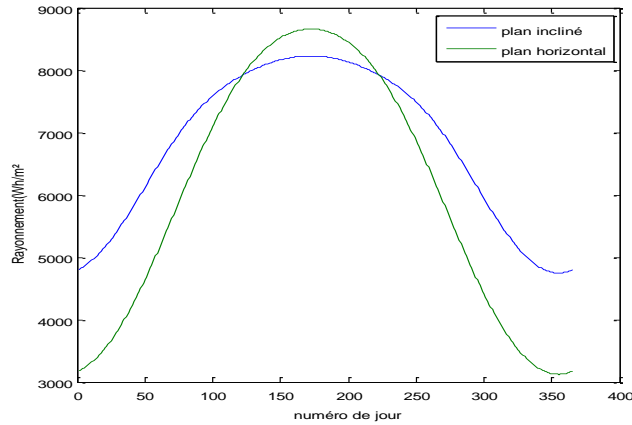


Figure-III- 3-Evolution annuel d'éclairement sur les deux plans HOR et INC

La figure (III-3) représente l'évolution annuelle 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-3-Etude des cellules photovoltaïques :

L'assemblage des cellules solaires, également appelées modules photovoltaïques, sont des dispositifs électroniques qui captent les photons de la lumière du soleil et les convertissent en électricité à courant continu.

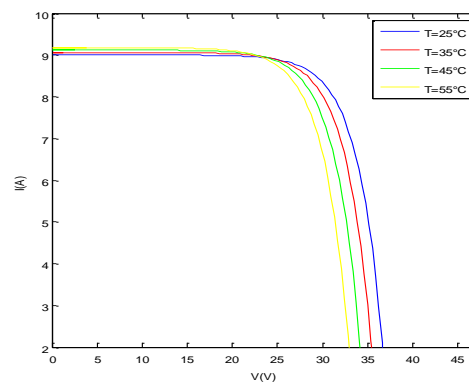
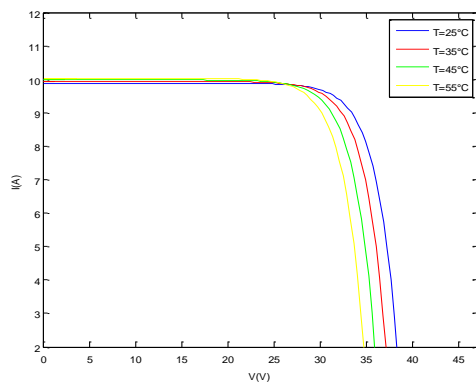
Chaque technologie PV a ses propres avantages, inconvénients, coûts et applications. Le choix de la technologie dépend des besoins spécifiques du projet, de l'emplacement, des contraintes budgétaires et des exigences techniques.

Ci-dessous, nous examinerons certaines des caractéristiques électriques des cellules solaires sélectionnées pour comparaison.

#### III-3-1- Evaluation de caractéristique I-V:

- *Effet de température :*

Cellule IBS60M-300P (Mono) : Cellule CS6P-255P (Poly):



Cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P

Cellule solaire HVL-335/HJT-355P

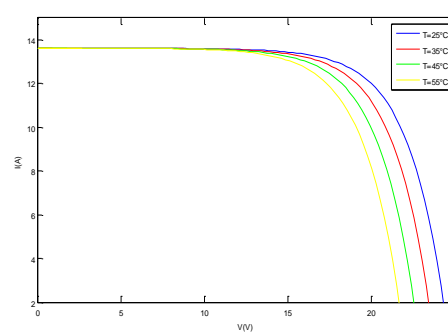
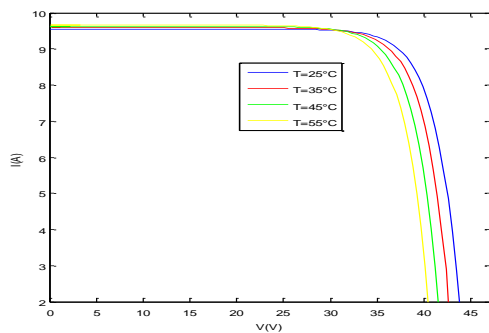


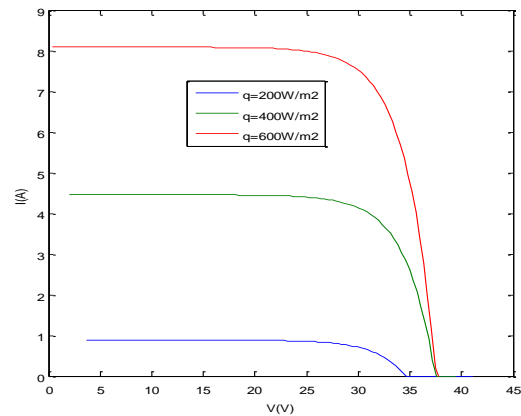
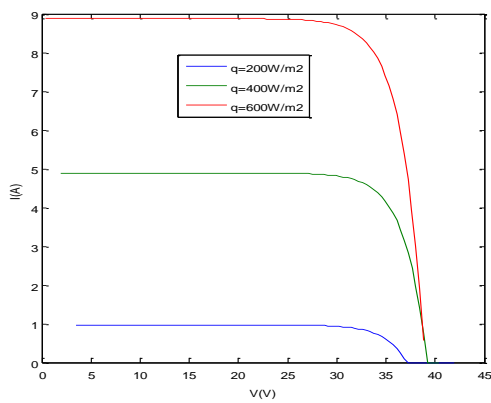
Figure-III- 4-L'effet de température sur les 4 cellules

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 appelés : Coefficient de température à ICC, et Coefficient de température à VOC.

- **Effets de rayonnement :**

la cellule IBS60M-300P (Mono) :

la cellule CS6P-255P(Poly):



La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P:

la cellule solaire HVL-335/HJT-355P

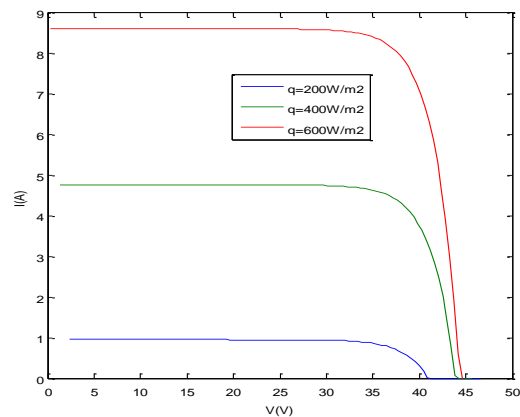
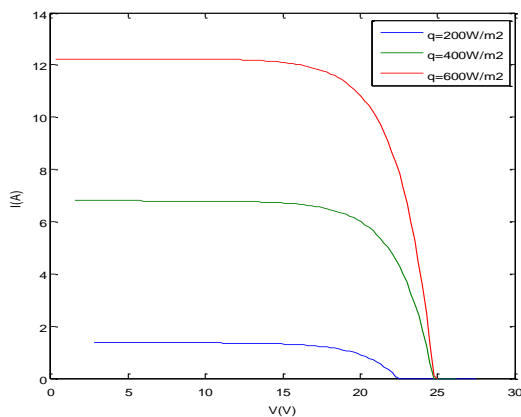


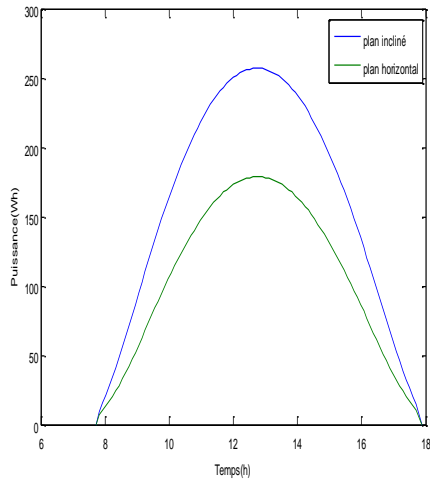
Figure-III- 5-L'effet de rayonnement dans les 4 cellules

Nous remarquons sur la figure (III-5) 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.

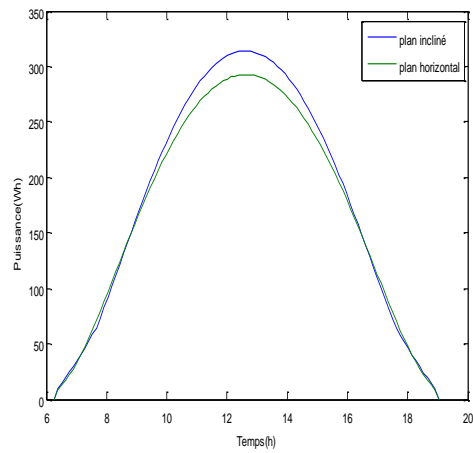
III-4-2- Evaluation de puissance :

- Journalière : La cellule IBS60M-300P (Monocristallin):

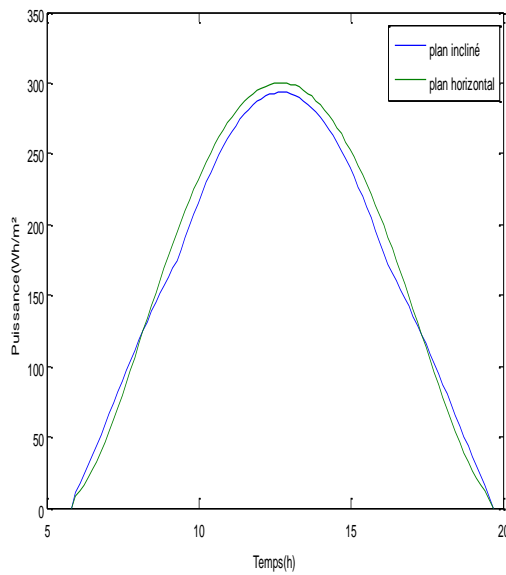
17 Janvier :



15 Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

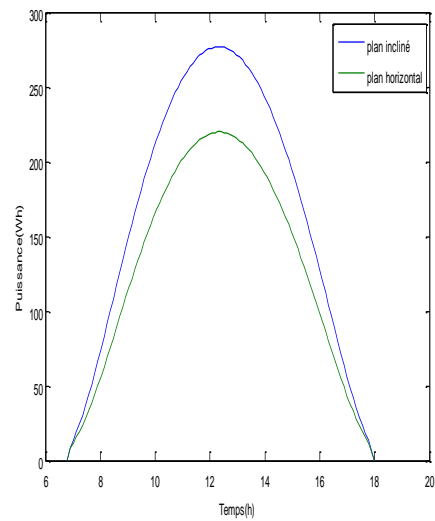
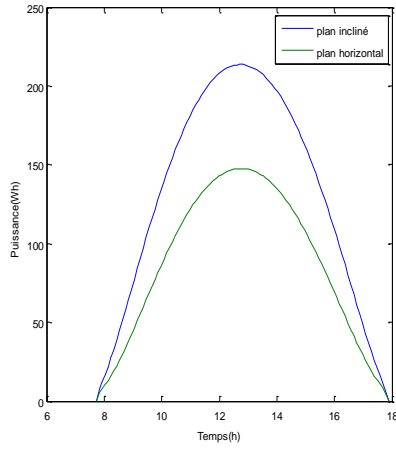


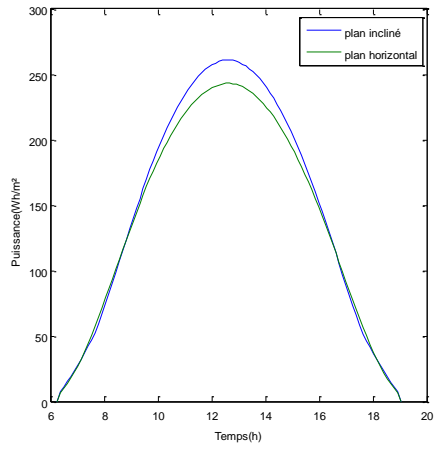
Figure-III- 6 Evolution Journalière de la puissance(MONO) sur les deux plans HOR et INC

**La cellule CS6P-255P (Poly cristallin):**

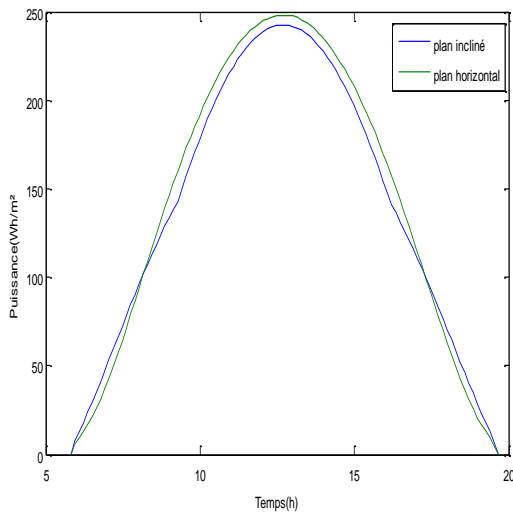
17 Janvier :



15 Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

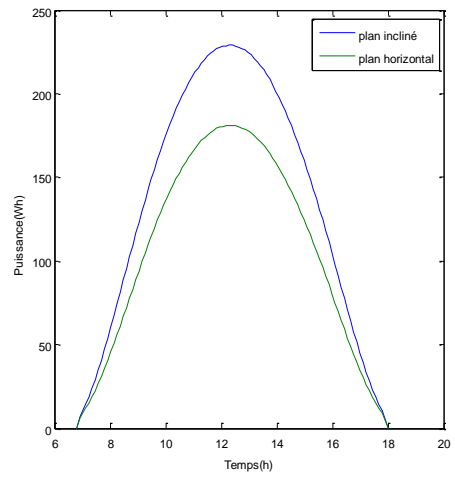
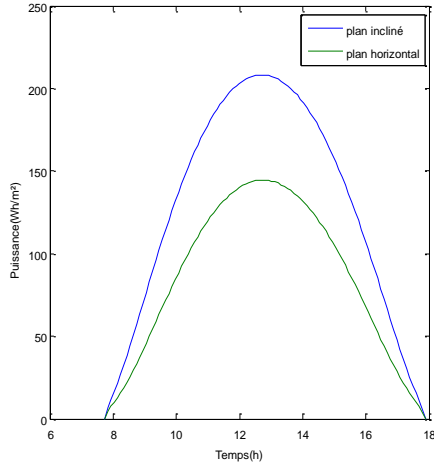


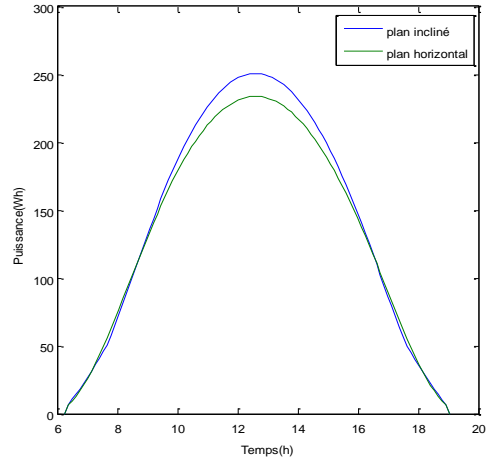
Figure-III- 7-Evolution Journalière de la puissance(POLY) sur les deux plans HOR et INC

**La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P :**

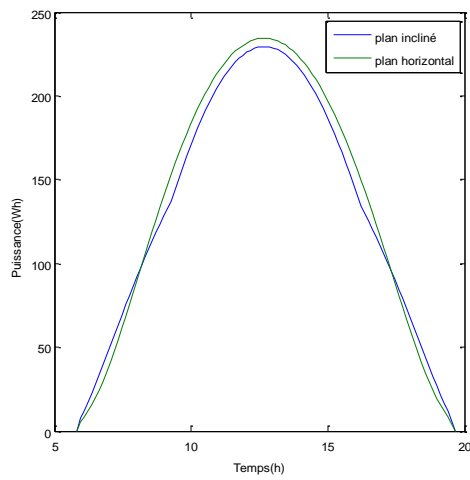
17 Janvier :



15 Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

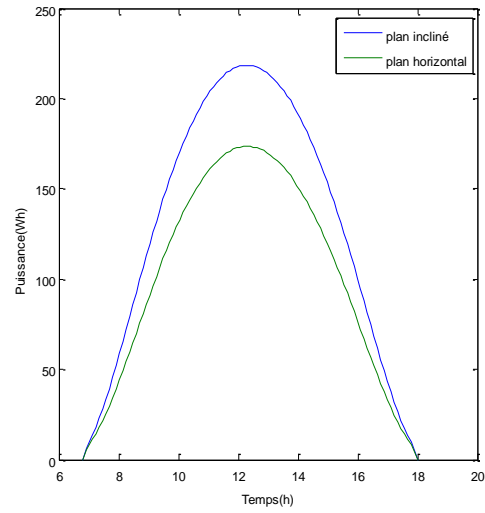


Figure-III- 8 Evolution Journalière de la puissance(CIGS) sur les deux plans HOR et INC



La cellule solaire HVL-335/HJT-355P :

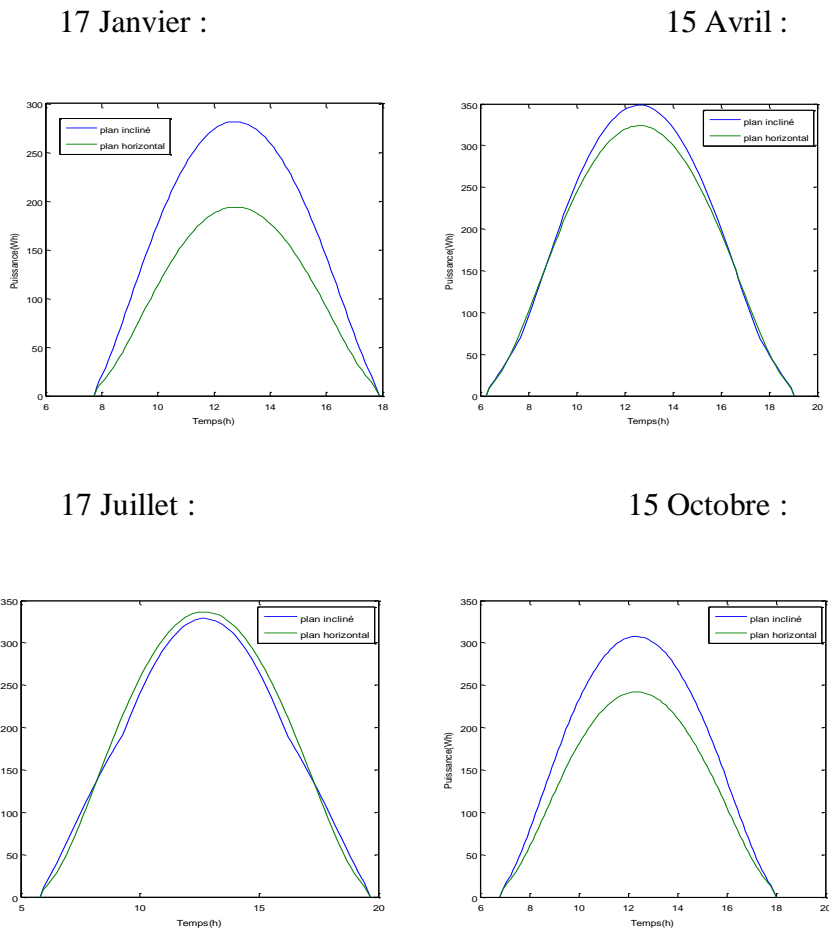


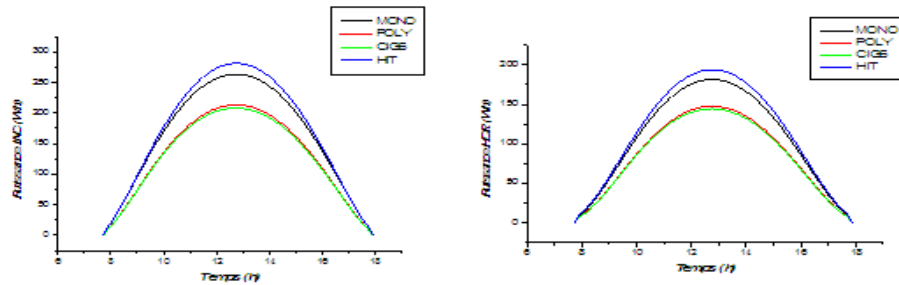
Figure-III- 9-Evolution Journalière de la puissance(HIT) sur les deux plans HOR et INC

Les figures (III-6) et (III-7) représentent 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 solaires étudiées.

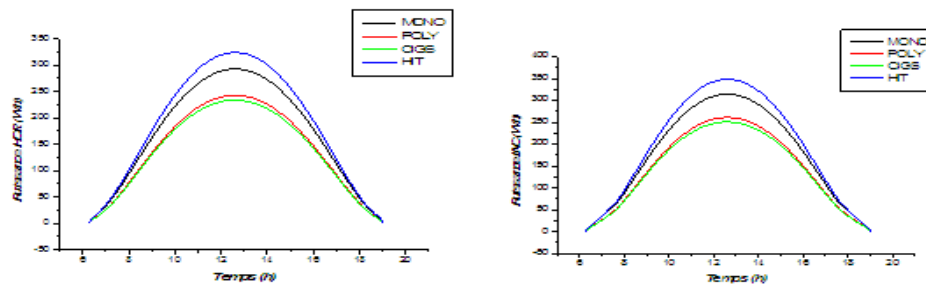
D'après cette figure, nous remarquons que l'évolution de puissance est proportionnelle à l'évolution de l'éclairement solaire. Et comme justifier dans l'évolution d'éclairement le plan incliné est meilleur pour les jours de janvier, avril et octobre, mais le plan horizontal est le meilleur pour la journée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

• *Comparaison journalière de la puissance entre les cellules PV :*

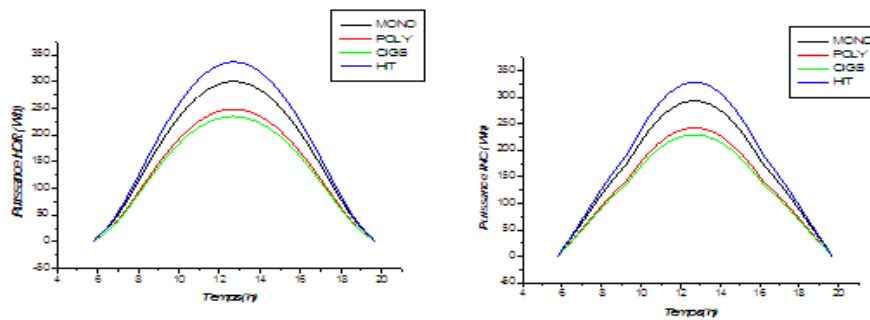
17 janvier :



15 Avril:



17 Juillet:



15 October:

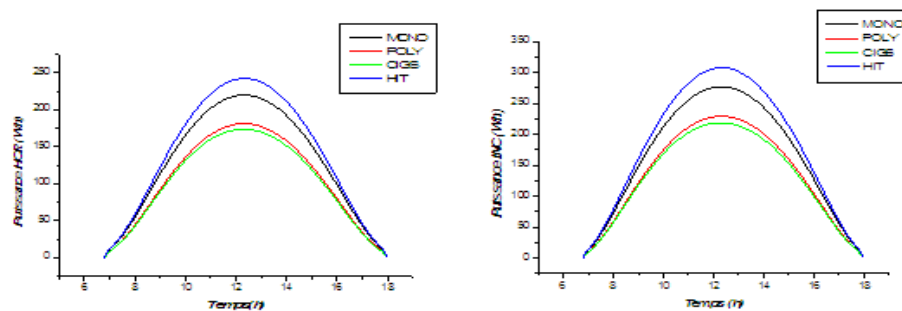
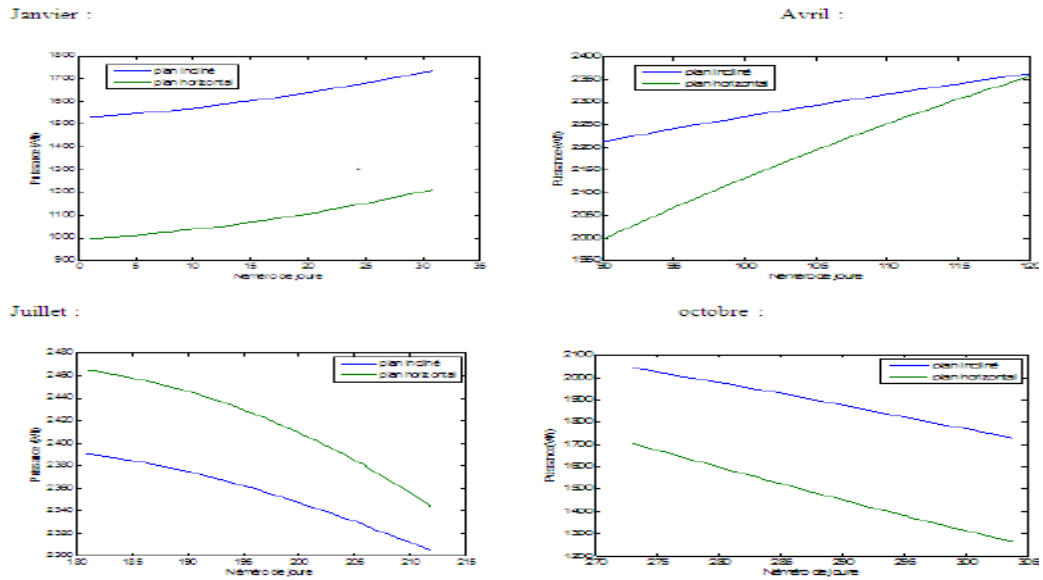


Figure-III- 10-Comparaison journalière de la puissance entre les cellules sur les deux plans HOR et INC

La figure (III-8) présente une comparaison journalière de la puissance entre les cellules sur les deux plans HOR et INC pour les quatre cellules étudiés. Nous remarquons ici que les cellules hétérojonctions sont les meilleurs

- **Mensuel :**

- la cellule IBS60M-300P (Mono):



- La cellule CS6P-255P(Poly):

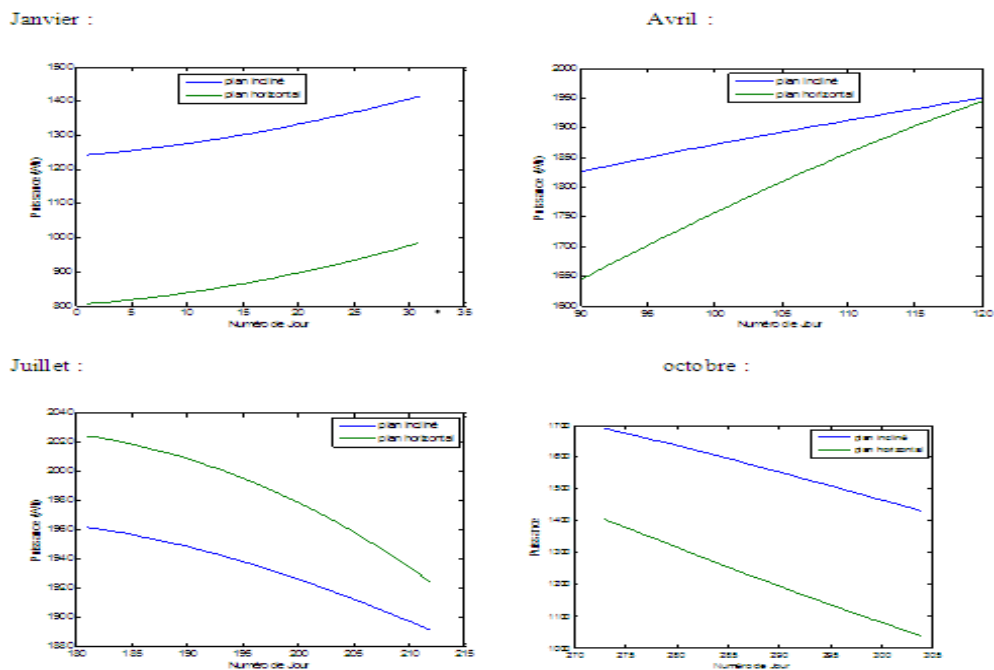
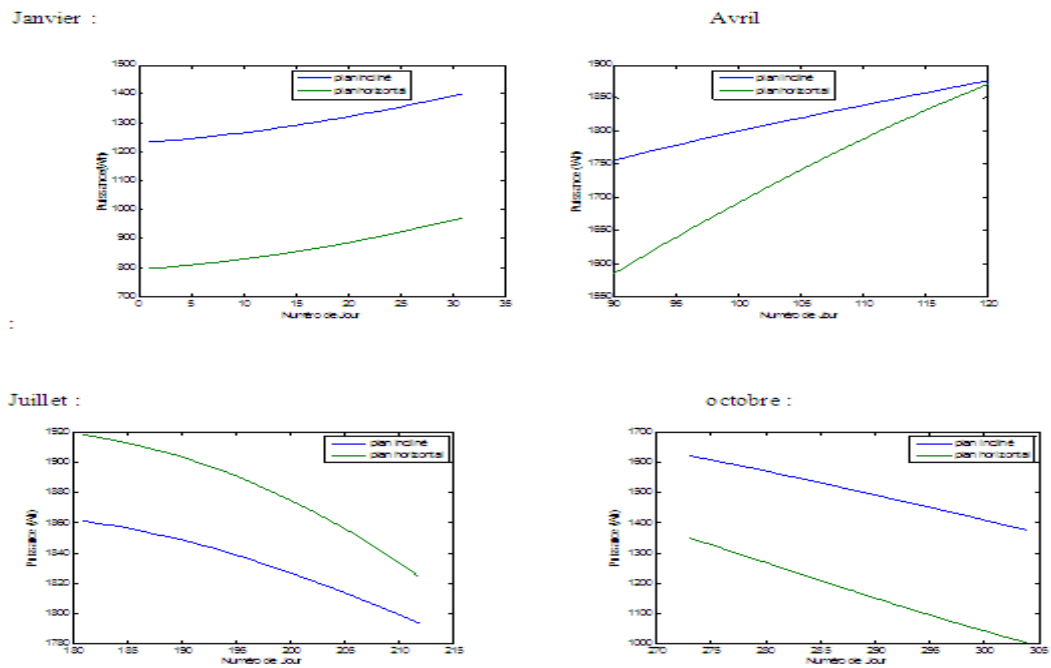


Figure-III- 11-Evaluation Mensuel de la puissance(MONO,POLY) sur les deux plans HOR et INC

- La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P :



- La cellule solaire HVL-335/HJT-355P:

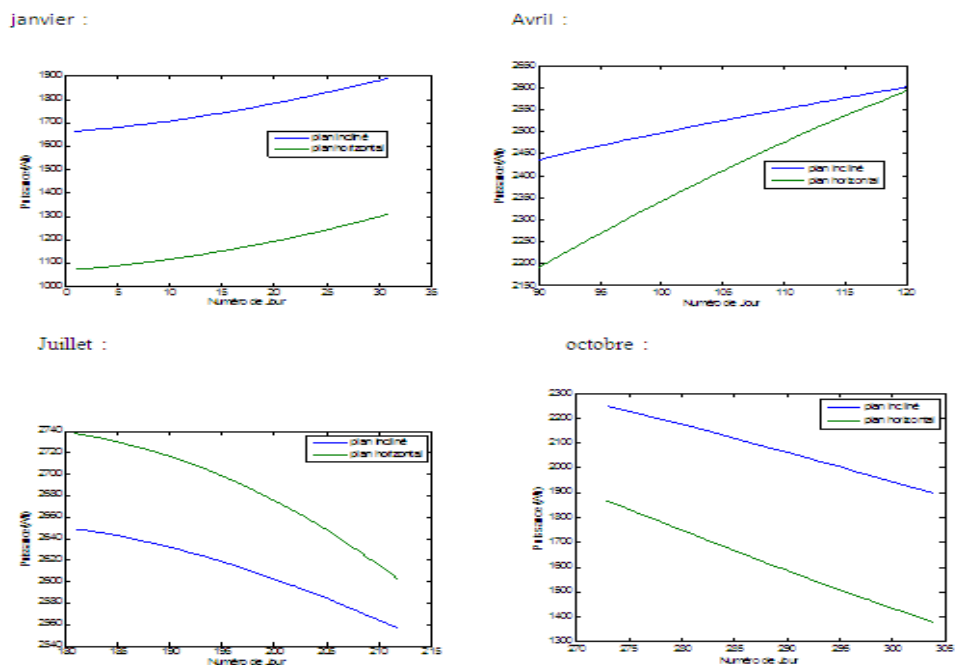


Figure-III- 12-Evaluation Mensuel de la puissance (CIGS,HIT) sur les deux plans HOR et INC

Les figures (III-9) et (III- 10) représentent l'évolution mensuelle de puissance dans les cellules étudiés dans les quatre mois : Janvier, Avril, Juillet et Octobre.

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

**Comparaison Mensuel de la puissance entre les cellules PV :**

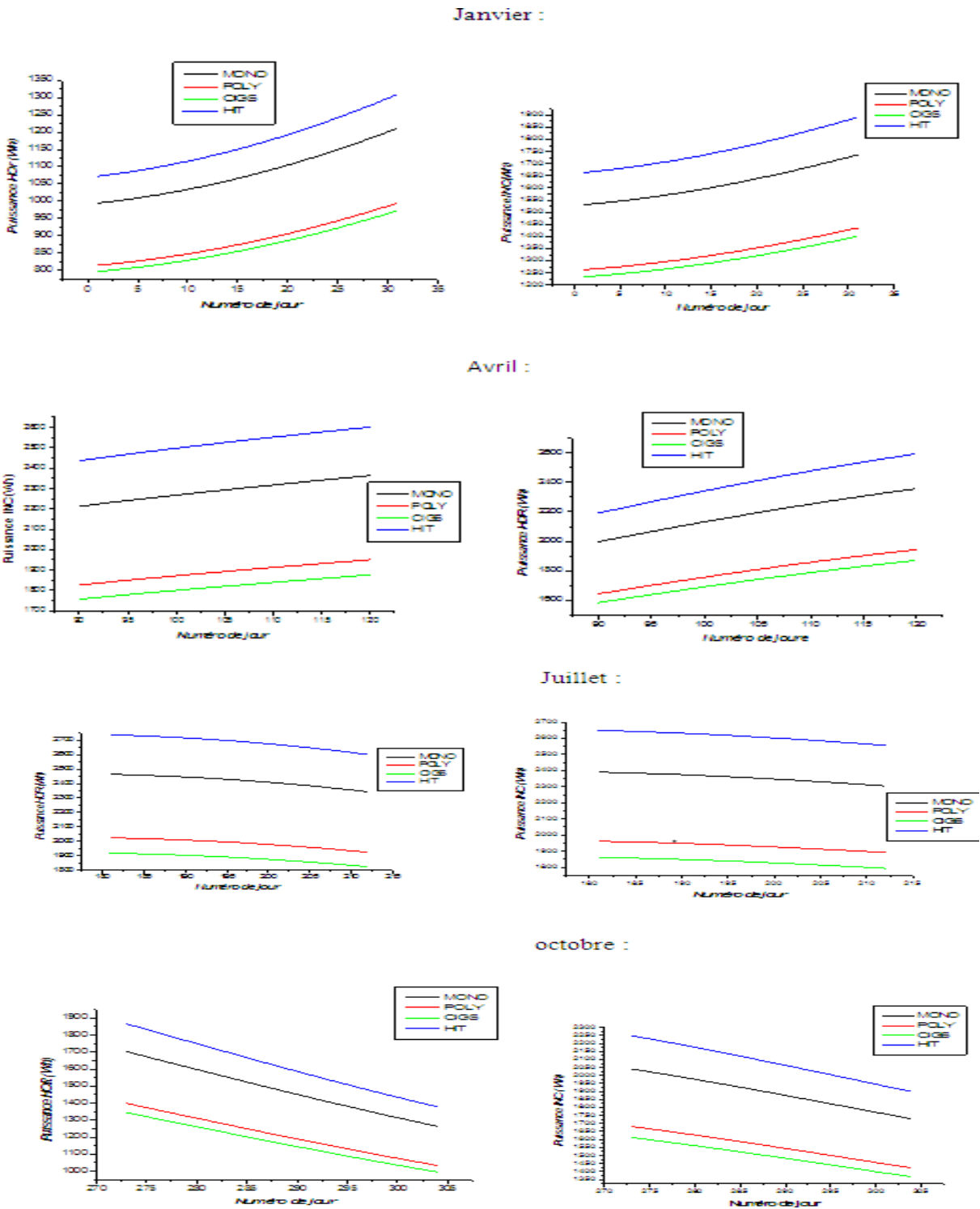


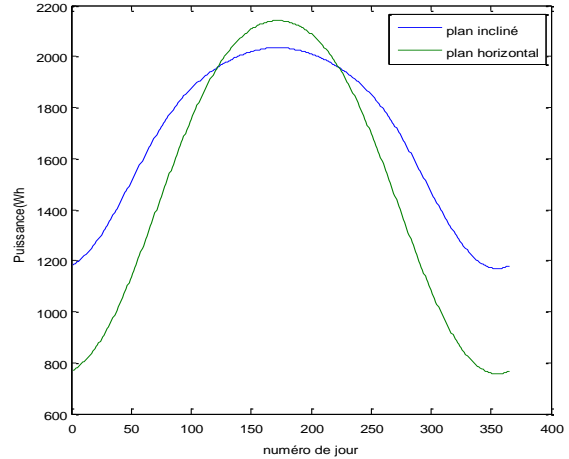
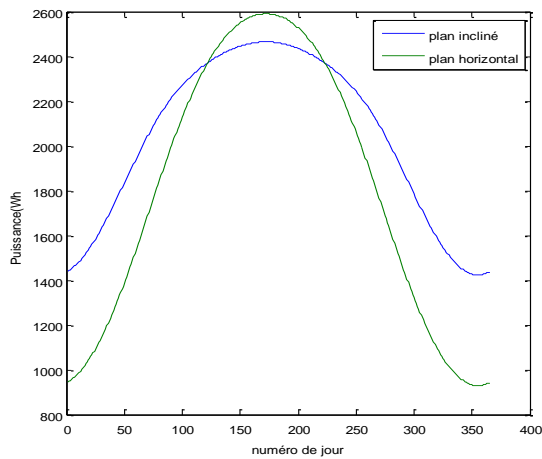
Figure-III- 13-Comparative Mensuel de la puissance entre les cellule sur les deux plans HOR et INC

La figure (III-11) représente l'évolution mensuelle de puissance pour les cellules étudiées dans les quatre mois : Janvier, Avril, Juillet et Octobre.

D'après ces résultats. On confirme que les cellules HIT sont les meilleurs.

- **Annuelle:**

La cellule IBS60M-300P (Mono) La cellule CS6P-255P(Poly)



La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P la cellule solaire HVL-335/HJT-355P

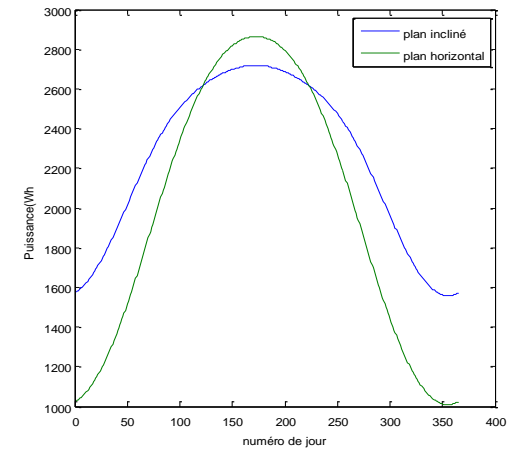
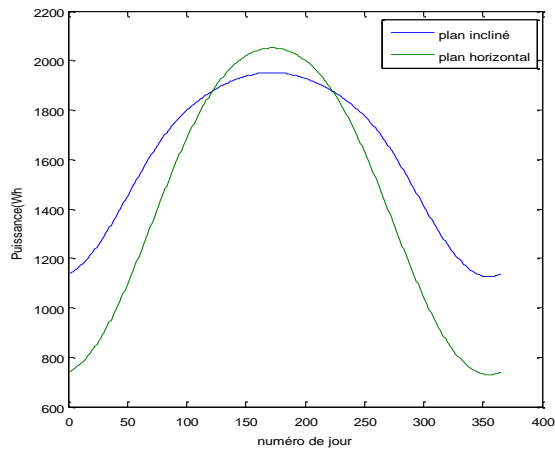


Figure-III- 14-Evaluation annuel de la puissance sur les deux plans HOR et INC

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

- *Comparaison annuelle de la puissance sur les deux plane HOR et INC :*

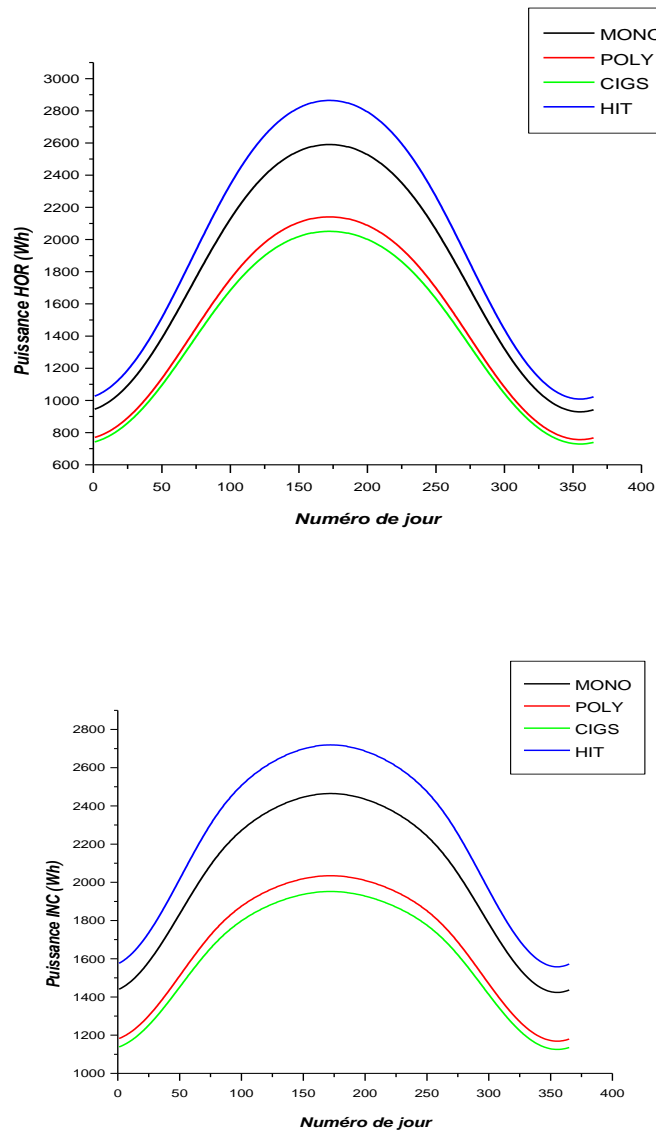


Figure-III- 15-Comparative annuelle de la puissance entre les cellules sur les deux plans HOR et INC

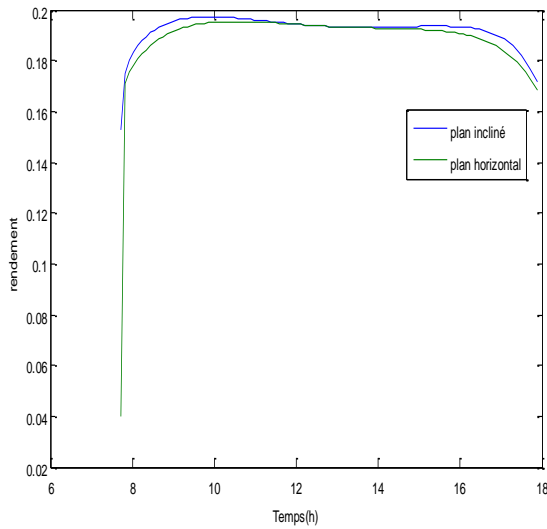
D'après cette figure. On confirme que les cellules HIT sont les meilleures.

**III-3-3- Evaluation de rendement :**

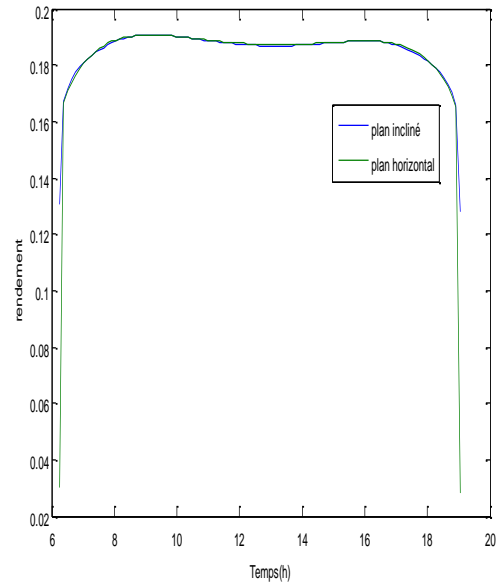
- *Journalière:*

*La cellule IBS60M-300P (Mono):*

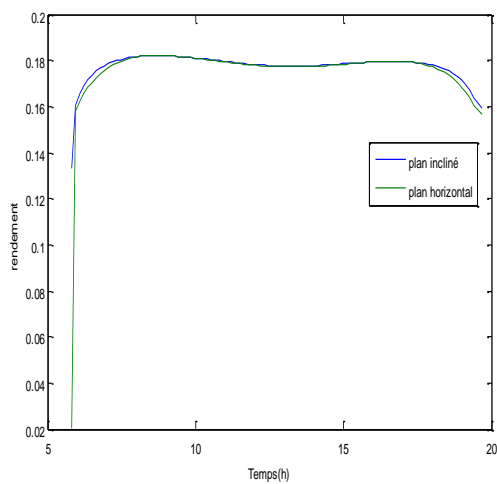
17 Janvier :



15 Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

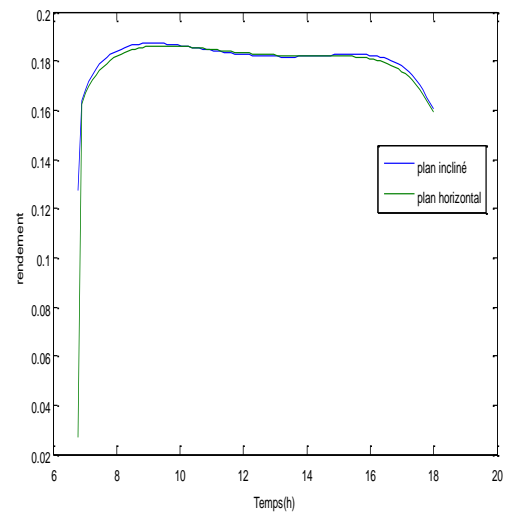


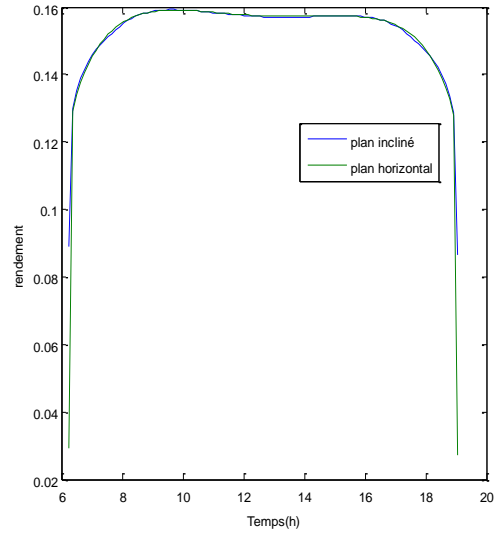
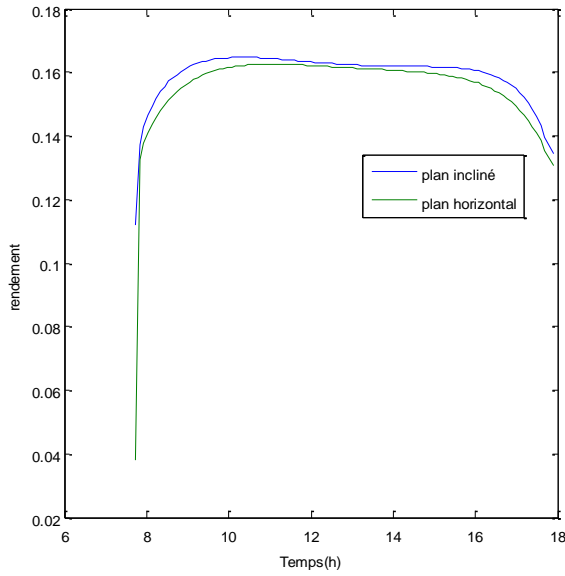
Figure-III- 16 Evolution journalière de rendement(MONO ) sur les deux plans HOR et INC



La cellule CS6P-255P(Poly):

17 Janvier :

15 Avril



:

17 Juillet :

15 Octobre :

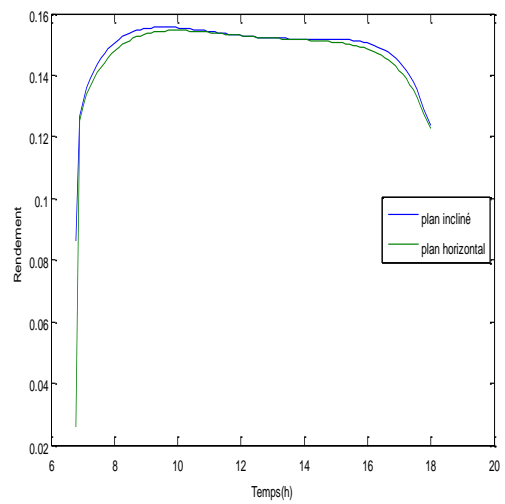
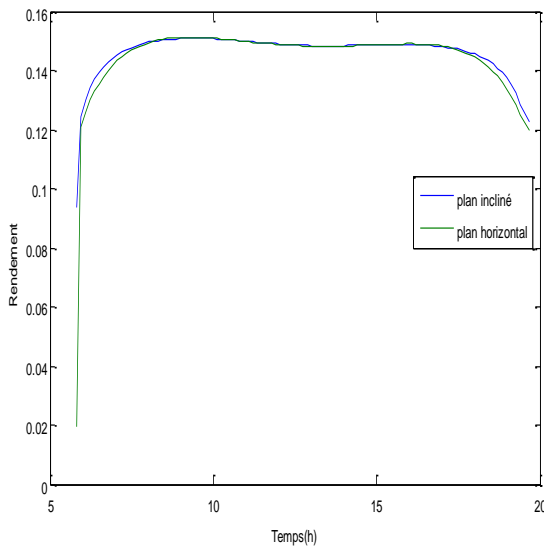
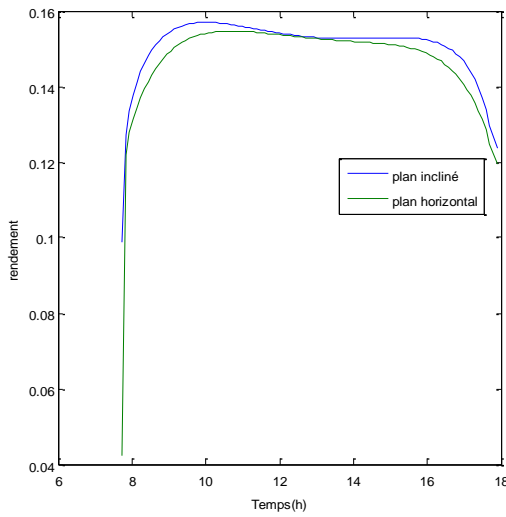


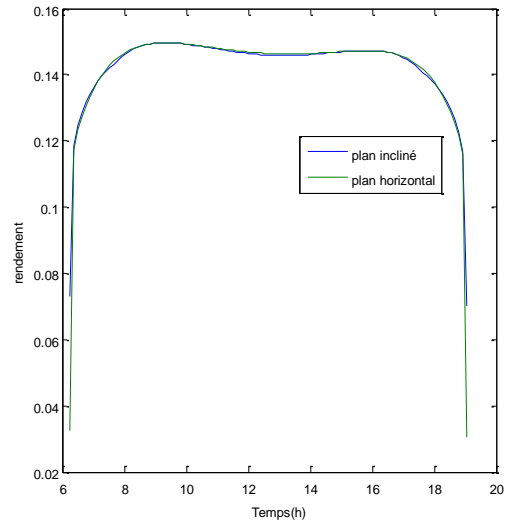
Figure-III- 17-Evolution journalière de rendement(POLY) sur les deux plans HOR et INC

La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P:

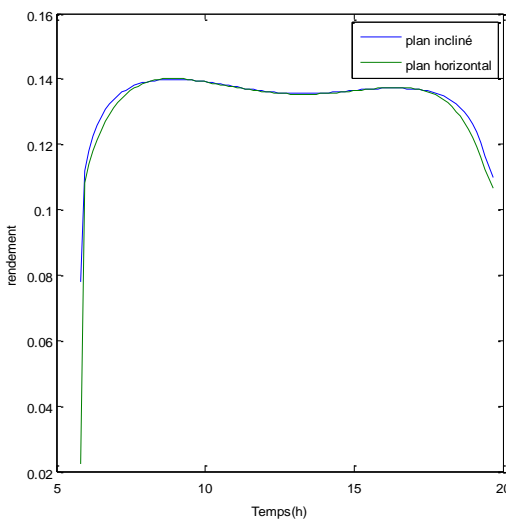
17 Janvier :



15 Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

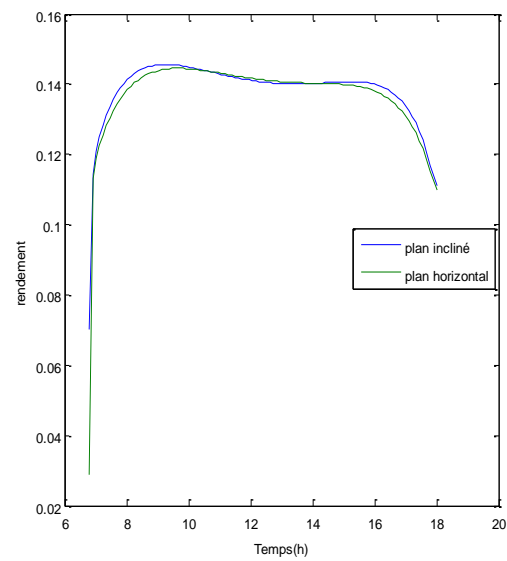
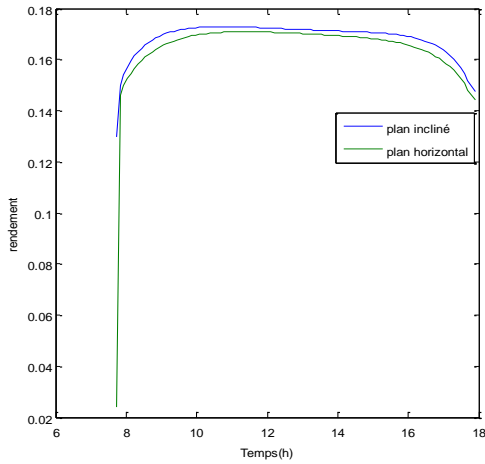


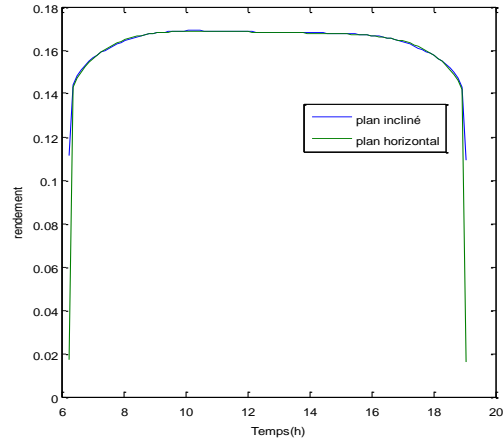
Figure-III- 18 Evolution journalière de rendement (CIGS) sur les deux plans HOR et INC

La cellule solaire HVL-335/HJT-355P:

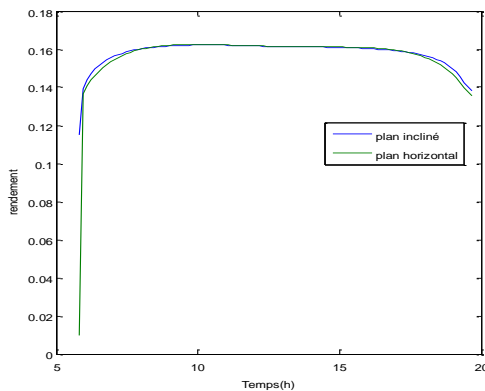
17 Janvier :



15Avril :



17 Juillet :



15 Octobre :

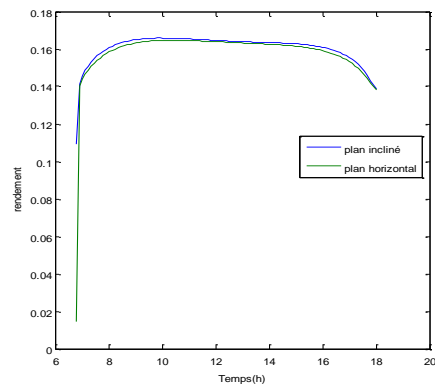


Figure-III- 19-Evolution journalière de rendement (HIT) sur les deux plans HOR et INC

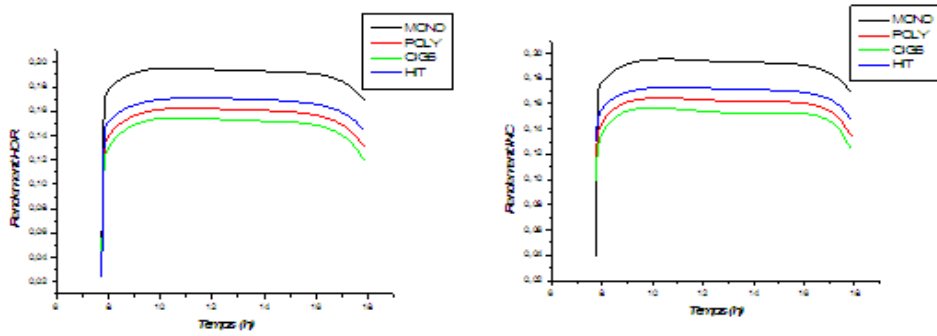
Les figures : (III-14) et (III-15) représentent l'évolution journalière de rendement dans les quatre cellules pour les quatre jours : 17 Janvier, 15 Avril, 17 Juillet et 15 Octobre.

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

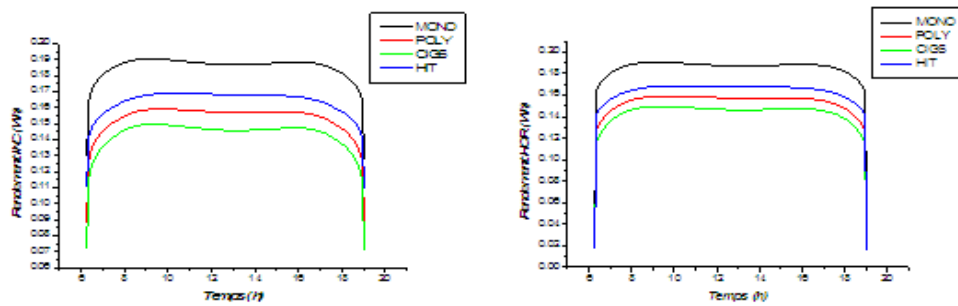
D'après ces résultats. On confirmer les commentaires déduire précédemment que les cellules HIT est les meilleurs.

*Comparaison journalière de rendement sur les deux plans HOR et INC :*

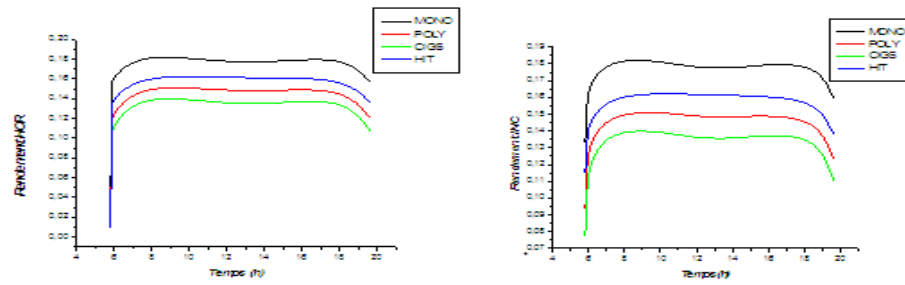
17 janvier :



15 Avril :



17 Juillet:



15 October:

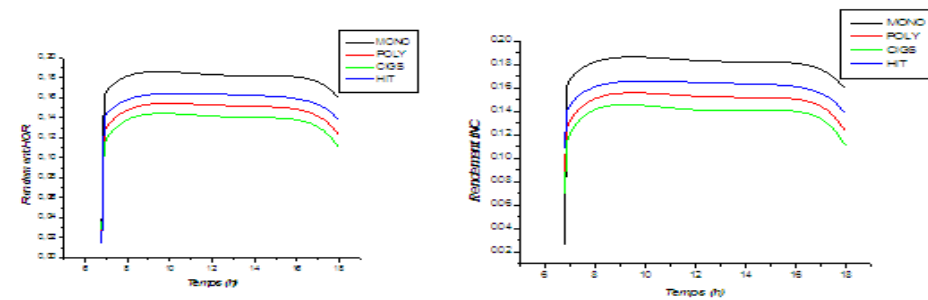
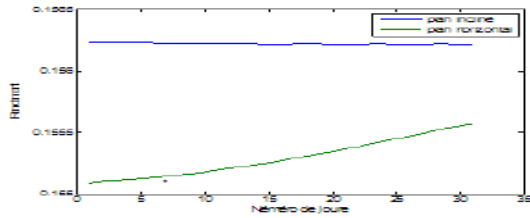


Figure-III- 20- Comparaison journalière de rendement entre les cellule sur les deux plans HOR et INC

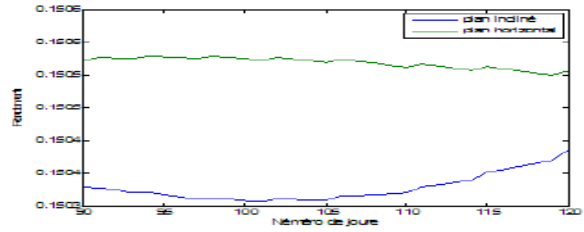
**Mensuel :**

**La cellule IBS60M-300P (Mono):**

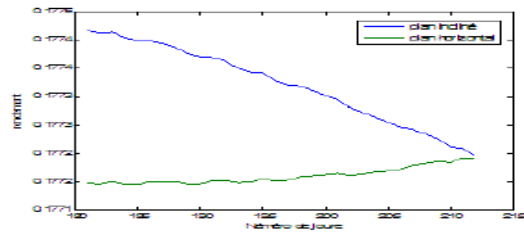
janvier :



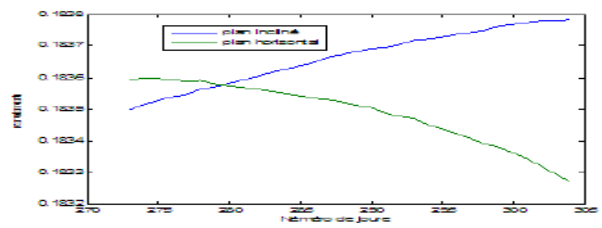
Avril :



Juillet :

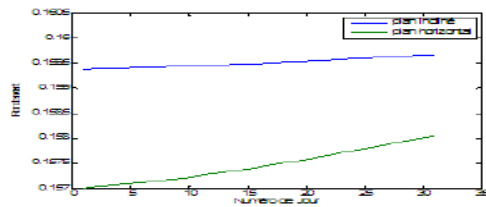


octobre :

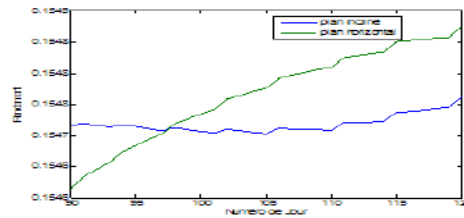


**La cellule CS6P-255P(Poly):**

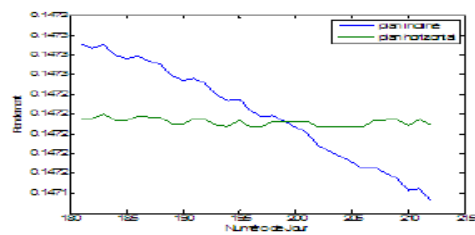
janvier :



Avril :



juillet :



octobre :

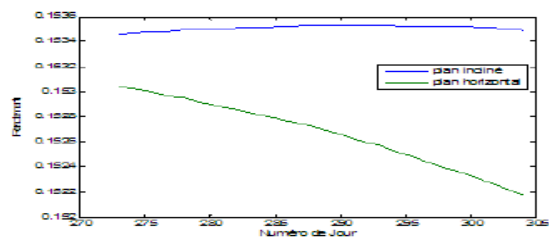
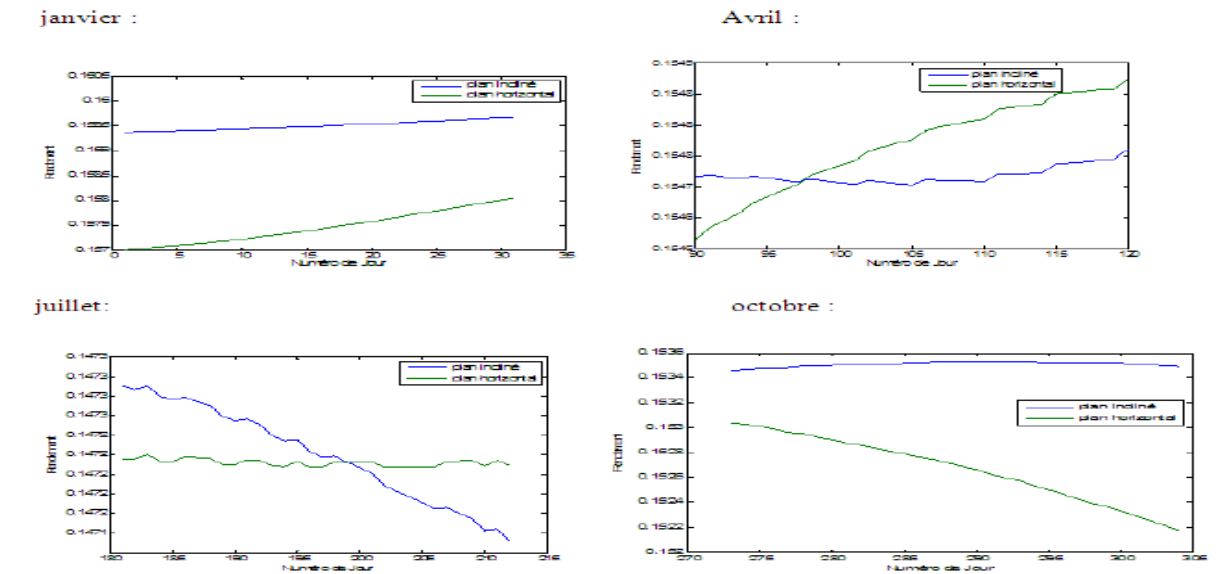


Figure-III- 21-Evolution Mensuel de rendement (MONO, POLY) sur les deux plans HOR et INC

La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P :



La cellule solaire HVL-335/HJT-355P :

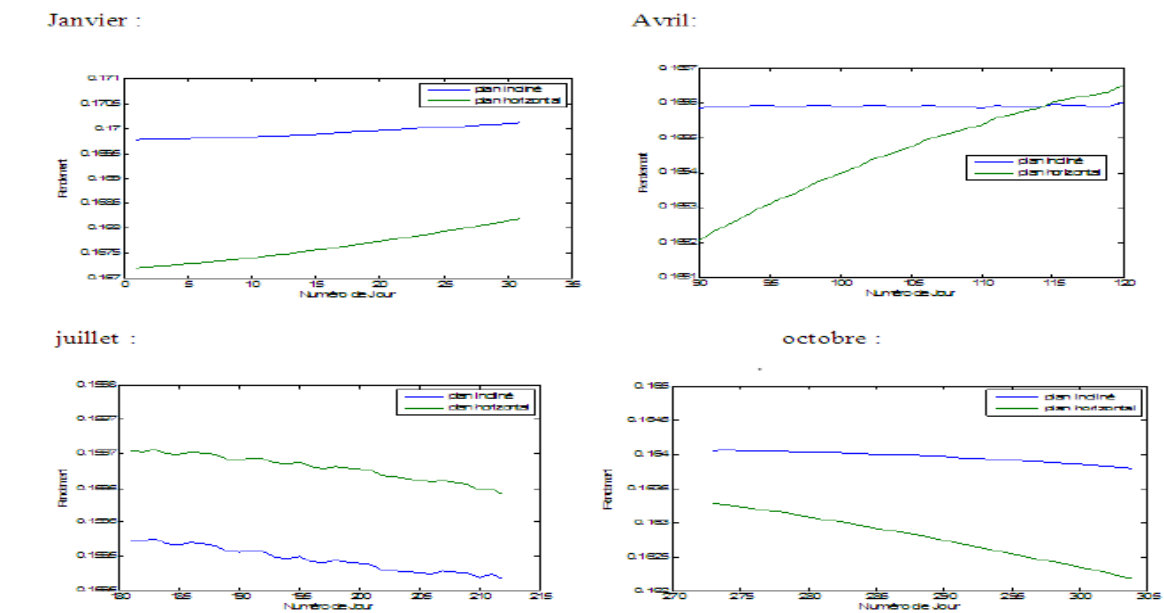


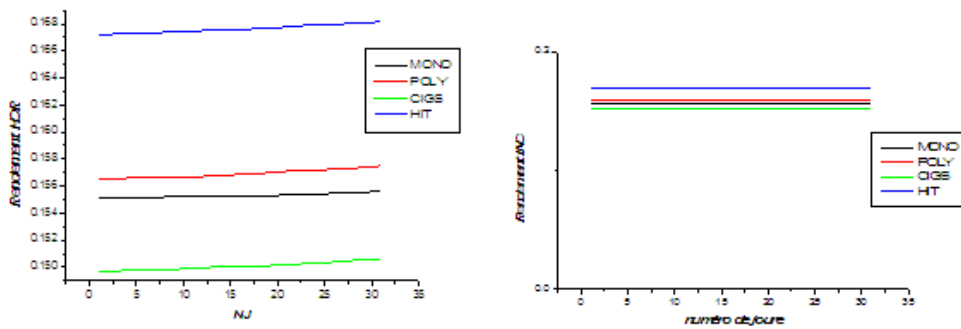
Figure-III- 22-Evolution Mensuel de rendement sur les deux plans HOR et INC

Les figures (III-17) et(III-18) représentent l'évolution mensuelle de rendement dans les quatre cellules pour les quatre mois : Janvier, Avril, Juillet et Octobre.

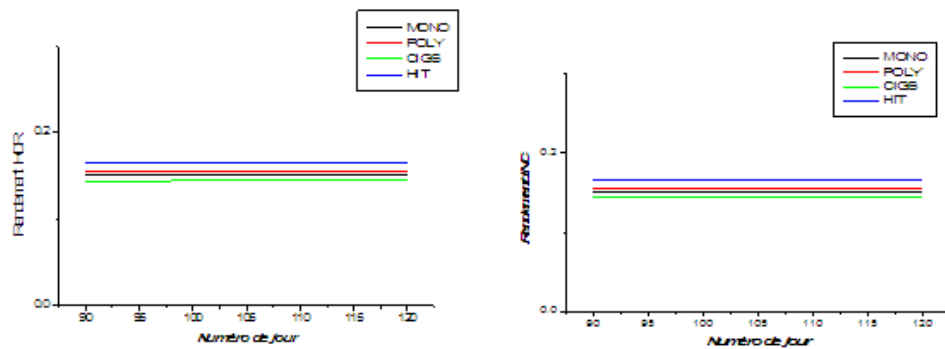
Chaque type de cellule ayant une évolution différent de rendement, cette différence peut justifier par sa construction et sa fabrication et les caractéristiques de conduction.

• *Comparaison Mensuel de rendement :*

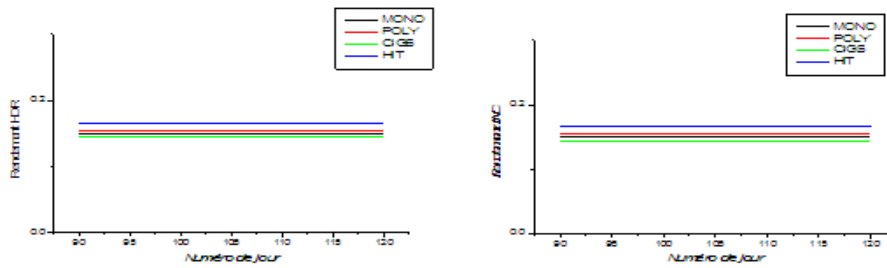
janvier :



Avril :



Avril :



Octobre :

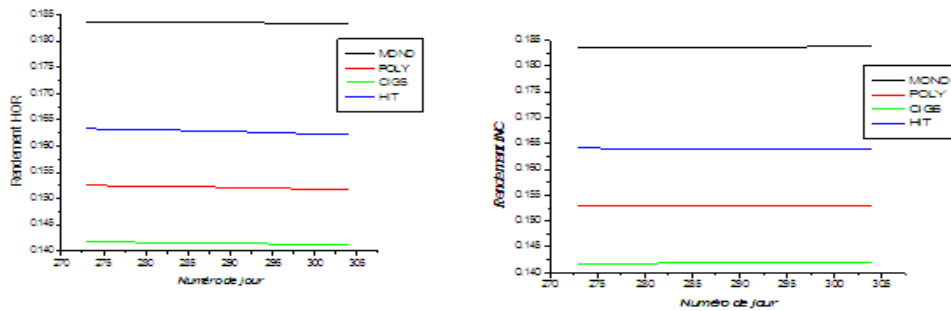


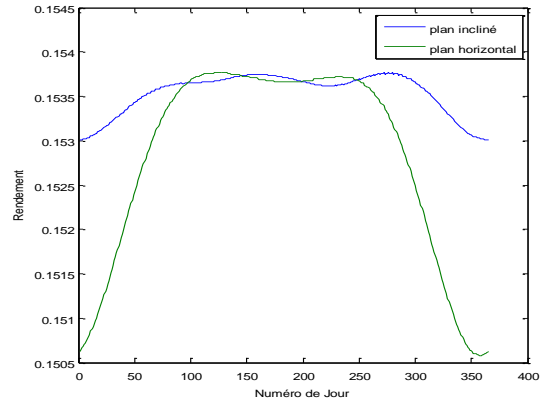
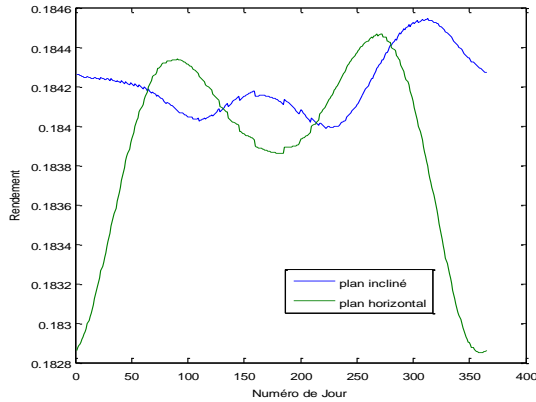
Figure-III- 23-Comparative Monteil de rendement sur les deux plans HOR et INC

D'après ces résultats. On confirme les commentaires déduire précédemment que les cellules HIT est les meilleurs.

- **Annuelle :**

La cellule IBS60M-300P (*Mono*):

La cellule CS6P-255P(Poly):



La cellule solaire FLEX-03M-1.7M -240P la cellule solaire HVL-335/HJT-355P :

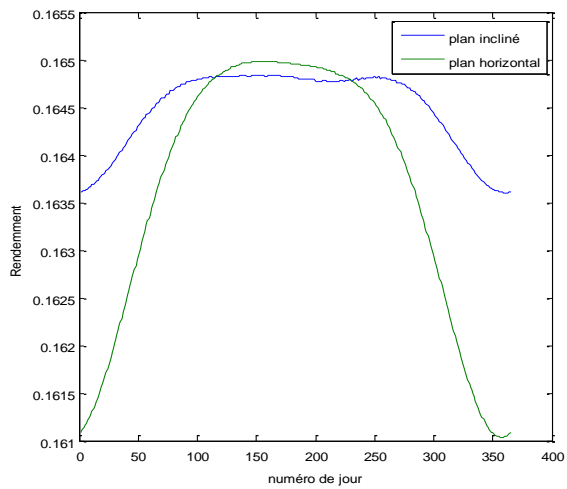
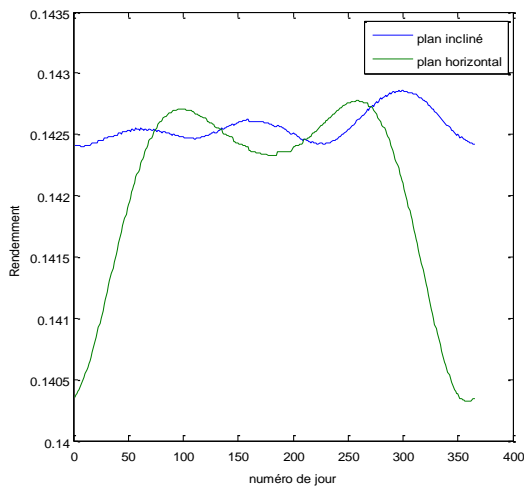


Figure-III- 24- Evolution annuelle de rendement sur les deux plans HOR et INC

La figure (III-20) représente l'évolution annuelle de rendement dans les trois cellules.

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



• *Comparaison annuelle de rendement :*

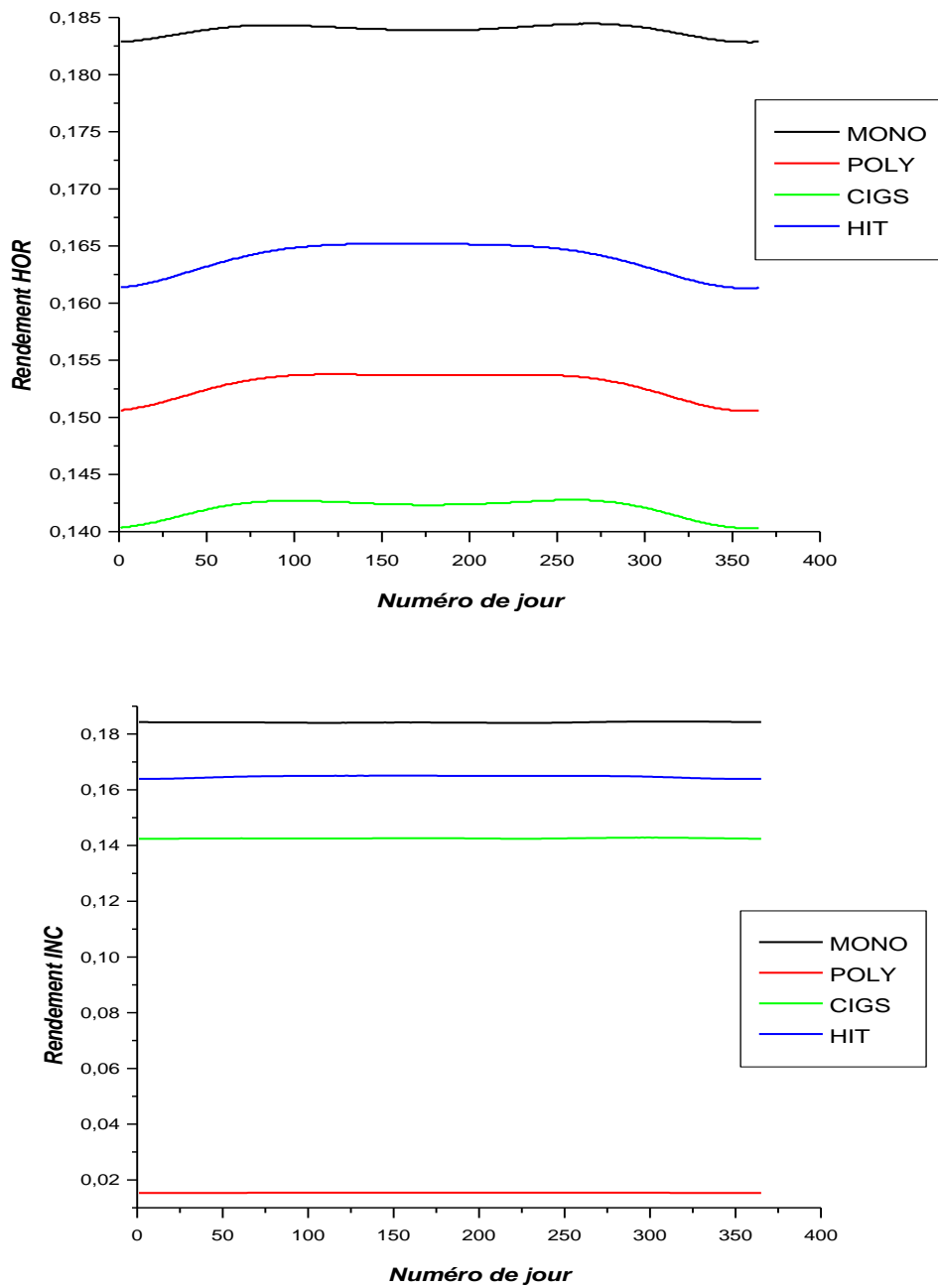


Figure-III- 25- Comparaison de rendement Annuelle pour les deux plans HOR et INC

Ces résultats confirme les commentaires déduire précédemment que les cellules MONO est les meilleurs.

**Conclusion**

**générale**

## **Conclusion générale**

Ces dernières années, en raison de la prolifération et du développement généralisé des industries, la demande mondiale d'énergie a changé rapidement et les ressources énergétiques naturelles telles que l'uranium, le gaz naturel et le pétrole sont en déclin. Pour répondre à la demande énergétique, la recherche a conduit aux énergies renouvelables. L'une des sources d'énergie renouvelables pouvant répondre à la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, qui est propre, silencieuse, disponible et gratuite. Cela explique pourquoi son utilisation a connu une croissance importante dans le monde entier.

L'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie alternative pose les problèmes de coût élevé, de faible efficacité et d'alimentation électrique intermittente des cellules solaires, qui dépendent des fluctuations des conditions atmosphériques. Par conséquent, toute conception de système d'application d'énergie solaire doit tenir compte de ces lacunes.

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 la modélisation des cellules photovoltaïques de 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération, afin d'étudier les paramètres évolutives sur différents types 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 quatre types de cellules : polycristallin, monocristallin, GIGS et Hétérojonction
- 3- Étude des paramètres évolutifs 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 Octobre ) 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<sup>2</sup> ; 25°C).

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

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.

Hétérojonction **HIT** 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.

---

References

- \*[1]Anco S. Blazev" **Photovoltaics For Commercial And Utilities power Generation**"Edition Crc Press 2005
- \*[2]Pankaj Kumar “**Organic Solar Cells device Physics, Processing,Degradation, And Prevention**” Edition Taylor & Francis Group 2017
- \*[3] Belhadj Mohammed, « **Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome** », Thèse De Magister, Université De Bechar,2008.
- \*[4]M.Krimi, « **Le Gisement Solaire (Présentation Sur Power Point), Institue De Formation En Electricité Et Gaz (Iffeg)** » ,13mai Blida, Algérie
- \*[5]Amiri Djamel ,Bou Abd Ellahmossab , « **Modélisation Et Simulation D’un Panneau Solaire Photovoltaïque** »,Projet De Fin D’études De Master Université de Blida 2020.
- \*[6] « **Www.Opera-Energie.Com** » 25 Mars 2023
- \*[7] Stavros Karathanasis “**Linear Fresnel Reflector Systems For Solar Radiation Concentration : Theoretical Analysis , Mathematical Formulation And Parameters Computation Using MATLAB** » ,Springer Nature Switzerland , 1<sup>st</sup>ed 2019.
- \*[8] Edited By Inamuddin , Mohd Imran Ahamed, Rajender Boddula ,And ,Mashallah Rezakazemi “**Fundamentals Of Solar Cell Design**” 2021
- \*[9] « **Contribution A L’optimisation Des Processus De Production Energetique photovoltaïque (Application Aux Procedes D’épuration Des Eaux Dans Les Zone srurales** », Bouziane Khadidja, Thèse Doctorat Es-Science, Département De Génie Des Procèdes, Université kasdi-Merbah Ouargla 2021
- \*[10] Touahri Abdelkader "**Etude Du Rayonnement Solaire En Vue De L'optimisation Des Systèmes Photovoltaïques**" Mémoire De Master Univesité D’Adrar.
- \*[11] Alain Ricaud, “ **Gisement Solaire Et Transferts Energétiques**”, Université De Cergy-Pontoise ,Jan 2011.
- \*[12] Meziani Fariza, “ **Détermination Du Gisement Solaire Par Traitement D’images Msg** ” , Thèse De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou.
- \*[13]Antonio Luque, Steven Hegedu “**Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering**” Edition Wile 2011
- \*[14] M. Belarbi, « **Modélisation Des Paramètres Electriques D’une Cellule Solaire Sensibilisée Par Colorant** », Mémoire De Master, Université De Tlemcen, 2013.
-

- \*[15] « ©Fondation D'entreprise Totale Energies
- \*[16] Melle Medjdoub Sarra " **Etude Structurale Des Cellules Solaire Deuxiem Et Troisième Génération**" Mémoire Pour L'obtention De Diplôme De Master 2 , Université A Tlemcen 2016
- \*[17] Anne Labouret ,Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun ,Benjamin Faraggi « **Cellules Solaires - 5ème Edition - Les Bases De L'énergie Photovoltaïque** » Dunod 2010
- \*[18] Jean Lilensten « **Le Système Solaire Revisité** »Editions Eyrolles 2006.
- \*[19] [Http://Www.Energieplus-Lesite.Be/Index.Php?Id=16696](http://Www.Energieplus-Lesite.Be/Index.Php?Id=16696)
- \*[20] M. Laslad, « **Simulation Numérique Des Cellules Solaires Troisième Génération Pour Des Applications Spatiales** », Thèse De Magister, Université De Sétif, 2014.
- \*[21] Boussaid M, (2017) "**Modèles Mathématiques Du Phénomène De Vieillessement Et De Dégradation Des Cellules Et Modules Photovoltaïques**", Thèse De Doctorat, Université Ahmed Draia, Adrar, Algérie
- \*[22] [Www.Researchgat.Net](http://Www.Researchgat.Net) 20 Mai 2023 , 12 :40
- \*[23] [Www.Fr.Tutiempo.Net](http://Www.Fr.Tutiempo.Net)
- \*[24] Y.Jannot, Thermique Solaire, Université De Lubumbashi, Octobre 2003
- \* [25] Abbas Ghassemi “ **Solar Radiation Practical Modeling For Renewable Energy Applications**” 2013 By Taylor & Francis Group, Llc
- \*[26] [Www.Nouveenergie.Fr](http://Www.Nouveenergie.Fr) 20 Mai 2023
- \*[27] Arno Hm Smets ,Klaus Jäger ,Olindo Isabella ,René Acmm Van Swaaij ,Miro Zeman “**Solar Energy The Physics And Engineering Of Photovoltaic Conversion, Technologies And Systems** “
- \*[28] [Www.Enfsolar.com](http://Www.Enfsolar.com)
-

