

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Electrotechnique

Spécialité : Energie Renouvelable

Par : Lahcene Ounough

Youcef Boubaaya

Sujet

**Effet des Paramètres de localisation et géographique sur le rendement
d'une cellule photovoltaïque**

Mr : Tarek BenSidhoum
Mr : Merwan Saad Saoud
Mr : Saber Hamimid

Docteur
Docteur
Docteur

Univ-BBA
Univ-BBA
Univ-BBA

Président
Examineur
Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُ نُورُ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِ كَمِشْكَاتٍ

فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَّاجَةٍ الزُّجَّاجَةُ كَأَنَّهَا كَوْكَبٌ

دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبَارَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ يَكَادُ

زَيْتُهَا يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ تَمْسَسْهَا نُورٌ عَلَى نُورٍ يَهْدِي اللَّهُ

لِنُورِهِ مَن يَشَاءُ وَيَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ لِلنَّاسِ

وَاللَّهُ بِكُلِّ شَيْءٍ عَلِيمٌ

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah qui nous a aidés achever ce mémoire.

Nous remercions notre encadreur Mr HAMIMID SABER, Docteur

À l'université de el Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj, pour ses

Encouragements, et sa présence totale et ses suggestions avisés qui nous ont

Conduits à terminer ce travail.

Aux membres du jury, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger

Ce modeste travail, nous vous en remercions et vous témoignons notre

Profonde et respectueuse gratitude.

Nous remercions nos amis, nos collègues de l'institut des sciences et

Technologie ainsi que l'ensemble des enseignants et responsables.

Enfin nous remercions nos parents pour nous avoir appris à toujours aller au

Bout de nos rêves, ainsi que nos frères et sœurs

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

Particulièrement à ceux qui m'ont Apprise le sens de la vie

Ma très chère mère et mon cher père

A tous les enseignants

À Mes enfants

Toutes mes amies, tous mes camarades

A tous qui m'ont aidé de loin ou de Près dans la réalisation

De ce travail.

LAHCENE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

Particulièrement à ceux qui m'ont Apprise le sens de la vie

Ma très chère mère et mon cher père

A tous les enseignants

À Mes enfants

Toutes mes amies, tous mes camarades

*A tous qui m'ont aidé de loin ou de Près dans la réalisation
de ce travail*

Youssef

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : généralité et énergie solaire	
I.1 .Introduction	4
I.1.1. l'énergie solaire	4
I. 1.2. Origine	4
I.1.3. Caractères particuliers	4
I. 2. Le rayonnement solaire	5
I.2.1-Rayonnement direct	6
I.2.2-Rayonnement diffus	6
I.2.3-Rayonnement solaire réfléchi	6
I.2.4-Rayonnement global	6
I.3. Durée d'insolation	7
I.4. Nombre d'air-masse	7
I.5. Mesure du rayonnement solaire	8
1.5.1.LePyrhéliomètre	8
1.5.2.Pyranomètre ombré	8
1.5.3.LePyranomètre	9
I.6.Type de l'énergie solaire	10
I-6.1. : Énergie solaire active	10
I.6.2.Avantages des systèmes d'énergie solaire actifs	10
I.6.3. : Inconvénients des systèmes d'énergie solaire actifs	11
I.7. : Énergie solaire passive	11
I.7.1 Avantages du système d'énergie solaire passif	11
I.7.2. : Inconvénients du système d'énergie solaire passif	12
I.8. : Utilisations de l'énergie solaire	12
I.8.1. : Électricité solaire	12
I.8.2. :Chauffe-eau solaire	13
I.8.3. : Cuiseur solaire	13
I.8.4. : Appareils solaires	13
I.8.5. : Éclairage solaire	13
I.8.6. : Chauffage et ventilation solaires	14
I.8.7. : Transport solaire	14
I.9. : Avantages de l'énergie solaire	14
I.9.1. des matières premières illimitées	14
I.9.2. Énergie propre	14
I.9.3. Fourniture d'électricité aux habitants hors réseau	15
I.9.4. Réduction des dépenses de production d'électricité	15
I.9.5. Aucune pollution sonore	15
I.9.6. Plus économique pour la production d'électricité à long terme	15
I.9.7. Plus fiable	15
I.10. Inconvénients de l'énergie solaire	15
I.10.1. Coût d'installation élevé	15
I.10.2. L'énergie solaire dépend des conditions météorologiques	16
I.10.3. Faible taux de conversion énergétique	16
I.10.4.. A besoin de beaucoup d'espace	16
I.10.5. Libère les déchets électroniques	16
I.10.6. Matériaux non facilement disponibles	16
I.11. : les utilisations spéciales de l'énergie solaire à la maison	17
I.12. : les utilisations spéciales de l'énergie solaire dans l'agriculture	17
I.13.Conclusion	17

Chapitre II : Les cellules photovoltaïques

II.1. Introduction	18
II.2. Physique semi –conducteur	18
II.3. Historique	19
II.4. Jonction P-N	19
II.5. Les cellules photovoltaïques	20
II.5.1. Les cellules photovoltaïques sont constituées	20
II.5.2. Définition d'une cellule photovoltaïque	21
II.5.3. Le rôle des composants de la cellule photovoltaïque	21
II.5.4. La structure de cellule est composée par	21
II.5.4.1. Couche émetteurs de type (N	21
II.5.4.2. Couche absorbant (couche de bas de type (P)	21
II.5.4.3. Couche antireflet	21
II.5.4.4. Les doigts métalliques	21
II.6. Les différents types des cellules solaires	22
II.6.1. Cellules monocristallines	22
II.6.2. Cellules poly cristallines	22
II.6.3. Cellules amorphes	23
II.7. Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV	23
II.8. Effet photovoltaïque	24
II.8.1. Caractéristique électrique	25
II.8.1.1. Propriétés	25
II.9. Etapes de fabrication et d'exploitation d'une cellule solaire	26
II.10. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	26
II.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	28
II.11.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque	28
II.11.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque	28
II.12. Modélisation des cellules photovoltaïques	28
II.12.1. Modèle idéal	29
II.12.2. Modèle avec pertes ohmiques (Rs -MODEL)	30
II.12.3. Modèle à une diode " Modèle 1-D	30
II.12.4. Modèle à deux diodes " Modèle 2-D	31
II.13. le courant du panneau	32
II.14. le facteur de forme	33
II.15. le rendement	33
II.16. Conclusion	33

Chapitre III : Gisement solaire

III -1. Introduction	34
III.2. Le soleil	34
III.3. -La constante solaire	34
III.4. Les mouvements de la terre	35
III.4.1. Position du soleil par rapport à la terre	35
III.4.2. Coordonnées géographiques	35
III.4.2.1. La longitude (L)	36
III.4.2.2. La latitude (φ)	36
III.4.2.3. L'altitude A	36
III.5. Reperage du soleil	37
III.5.1. Coordonnées horizontales	37
III.5.1.1. La hauteur du soleil (h)	37
III.5.1.2. le zénith	37

III.5.1.3.L'azimut (α)	37
III.5.2.Les coordonnées célestes horaires	37
III.5.2.1 Sphère céleste	37
III.5.2.2. Angle déclinaison δ	38
III.5.2.3. L'angle horaire ω	38
III6.Les temps solaires	38
III.6.1.Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)	38
III.6.2.Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)	39
III.6.3.Le temps universel (TU):	39
III.6.4.Le temps légal (TL):	39
III.6.5.Équation du temps	39
III.7. lever et coucher du soleil	39
III.8.durée du jour (dj)(durée d'insolation)	40
III.09.Gisement solaire dans le monde	41
III.10.Gisement solaire en Algérie	41
III.11.Conclusion	43

Chapitre IV : Estimation du rayonnement solaire

IV.1.Différents Expression du rayonnement solaire par les chercheurs	44
IV.1.1.Introduction	44
IV.2.Différents modèles expression de rayonnements solaires	44
IV.2.1.Modèle de Lacis & Hansen	44
IV.2.2. Modèle de Hay-Davies	45
IV. 2.2.1.Rayonnement global reçu sur un plan horizontal	45
1. Rayonnement direct	45
2. Rayonnement diffus	47
3. Rayonnement global	47
IV.2.3. Modèle de Bird et Hulstrom	47
IV.2.3.1.Eclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal	47
a).Diffusion de Rayleigh	47
b).Diffusion par les aérosols	48
c).Absorption par l'ozone	48
d).Absorption par la vapeur d'eau	48
IV.2.3.2.Eclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal	48
IV.2.3.3. Eclairement dû au rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh	48
IV.2.3.4.Eclairement dû au rayonnement dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère	49
IV.13.3.5. Eclairement dû au rayonnement global sur un plan horizontal	49
IV.2.4. Modèle de Atwater& Ball	49
IV.2.4.1 Calcul du rayonnement global	49
IV.2.5.Modèles pour l'estimation du rayonnement diffus du ciel	50
IV.2.5.1.modèle première génération	50
1). Modèle isotrope	50
2).Modèle Circumsolaire	50
IV.2.5.2.Modele deuxième génération	50
a. Modèle Temps-Coulson	50
b. Modèle de Klucher	51
c. Modèle de Hay	51
d. Modèle de Reindl	51
IV.6. Modèle de Liu et Jordan	51
IV.2.6.1. Calcul du rayonnement direct	51

IV.2.6.2 Calcul du rayonnement diffus	52
IV.2.6.3. Calcul du rayonnement réfléchi	52
IV.2.6.4. Calcul du rayonnement global	52
IV.2.7. Modèle de DE PERRIN DE BRICHAMBAUT	53
IV.2.7.1. Le facteur de trouble de Linke	53
IV.2.7.2. Rayonnement reçue sur un plan horizontal	53
IV.2.7.3. Rayonnement reçue sur un plan incliné	54
IV.2.8. Modèle de CAPDEROU	56
III.2.8.1. Le facteur de trouble de Linke	56
IV.2.8.2. Rayonnement reçu sur un plan horizontal	57
IV.2.8.3. Rayonnement global reçu sur un plan incliné	57
IV.2.9. Modèle R. Sun	59
IV.2.9.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal	59
IV.2.9.2. Rayonnement global reçu sur un plan incliné	60
IV.2.10..Modèle Ashrae	60
IV.2.11..Méthodes atmosphériques	61
IV.2.12.Modèle synthétique	62
IV.2.13.Méthodes qui utilisent les photos satellitaires	62
IV.3.Conclusion	63

Chapitre V : Application

V -1. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	64
V -2. Algorithme de calcule	64
1. Rayonnement direct	64
2. Rayonnement diffus et réfléchi	65
3. Rayonnement global	65
4. courant délivré par une cellule et la puissance	65
V -3. Méthode du point fixe	66
V -4. Effet du numéro de jour	66
V -5. Effet de la latitude	68
V -6. Effet d'altitude	69
V -7. Conclusion	71
Conclusion générale	
Références Bibliographiques	
Annexe (PROGRAMME NUMERIQUE)	
Résumé	

Liste des figures

Chapitre I:

Figure (I.1): Analyse spectrale du rayonnement solaire

Figure (I.2): Le différent type du rayonnement solaire

Figure(I.3): Nombre d'air-masse

Figure(I.4): Pyrhéliomètre

Figure(I.5) : Pyranomètre avec anneau d'ombrage

Figure(I.6) : Pyranomètre

Figure ((I.7)) : Solari mètre type (KippZonen)

Chapitre I:

Figure (II.1): jonction PN en polarisation directe : jonction PN en polarisation inverse

Figure (II.2): les composants de la cellule photovoltaïque

Figure (II.3): cellule monocristalline

Figure (II.4): cellules poly cristallines

Figure (II.5): cellule amorphe

Figure (II.6): Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Figure (II.7): L'effet photovoltaïque

Figure (II.8): *Caractéristique d'une cellule photovoltaïque*

Figure (II.9): *Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque*

Figure (II.10): *Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque*

Figure (II.11): *Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire*

Figure (II.12):: *Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s*

Figure (II.13): *Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode*

Figure (II.14): *Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes*

Chapitre III:

Figure (III.1): Les mouvements de la terre

Figure (III.2): La longitude et la latitude d'un lieu.

Figure (III.3): Coordonnées horizontales

Figure (III.4): Coordonnées horizontales La déclinaison du soleil (δ)

Figure (III.5): Coordonnées horizontales La déclinaison du soleil

Figure (III.6) : Ensoleillement moyen annuel dans le monde

Figure (III.7): Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Algérie

Chapitre IV:

Figure (IV-0) : profils du rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi et global selon le modèle de Davie & Hay a une échelle horaire

Figure (IV-1) : évolution de (a) : $I(V)$ et (b) : $P(V)$ pour différents jours de l'année

Figure (IV-2) : évolution de (a) : $I(V)$ et (b) : $P(V)$ pour différents latitudes

Figure (IV-3) : évolution de (a) : $I(V)$ et (b) : $P(V)$ pour différents altitudes

Liste des tableaux

Tableau 4-1 : paramètre décrivant la nature du ciel

Tableau 4-2 : A, B et C sont les valeurs recommandées par le modèle Ashrae

Nomenclature

G	Rayonnement global (w/m^2).
D	Rayonnement direct (w/m^2).
S	Rayonnement diffus (w/m^2).
HD	Rayonnement diffus horizontal
ρ	Albédo.
I^*	L'éclairement solaire direct (S) sur un plan horizontal (w/m^2).
G_h	Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale (w/m^2).
D_h	Le rayonnement diffus parvenant au sol sur une surface horizontale (w/m^2).
Ct-s	Facteur de correction de la terre-soleil (m).
ma	Masse d'air à la pression réelle.
L	Longitude ($^\circ$).
Z	Altitude (m).
w	Angle horaire ($^\circ$).
h	Hauteur angulaire ($^\circ$).
a	Azimut ($^\circ$).
θ_z	Distance zénithale ($^\circ$).
ET	Equation du temps.
T_M	Trajet optique du rayonnement solaire
G	Rayonnement global (W/m^2).
D	Rayonnement diffus (W/m^2).
D_m	Rayonnement diffus après la diffusion multi réflexion terre atmosphère (W/m^2)
D_a	Rayonnement diffus après la diffusion des aérosols (W/m^2).
D_r	Rayonnement diffus après la diffusion de Rayleigh (W/m^2).
Isc	Constante solaire extraterrestre (W/m^2).

w_0	Albédo de la dispersion atmosphérique.
F_c	Coefficient de la dispersion atmosphérique
k_a	Coefficient d'affaiblissement du signal lumineux
I	Rayonnement direct (W/m^2).
E	Eclairement énergétique (W/m^2).
I'	Intensité lumineuse (W/sr).
$d\Phi$	Flux énergétique (W).
I_0	Constante solaire moyenne (W/m^2).
U_0	Epaisseur de la couche d'ozone (cm).
U_w	Epaisseur de la vapeur d'eau (cm).
X_w	Epaisseur de la vapeur d'eau sous forme condensée (cm).
HR	Humidité relative (%).
T	Température ambiante (K).
P	Pression atmosphérique (mbar).
P_0	Pression atmosphérique par rapport au niveau de la mer (mbar).
m_a	masse d'air corrigée (g).
m_r	masse d'air relative (g).
m_0	masse d'air contenue dans la couche d'ozone (g).
Φ	Latitude ($^\circ$).
δ	Déclinaison ($^\circ$).
τ_a	Coefficient de la transmittance des aérosols
τ_{as}	Coefficient de transmission après diffusion moléculaire
τ_{aa}	Coefficient de transmission après diffusion par la molécule d'air
τ_r	Coefficient de la transmittance de Rayleigh.
τ_0	Coefficient de la transmittance de la couche d'ozone
τ_g	Coefficient de la transmittance des gaz permanents
β	Coefficient du trouble d'Angstrom
α	Coefficient de la visibilité du ciel
α_0	Coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau.
α_w	Coefficient d'absorption du rayonnement direct par la couche d'ozone

ρ	Albédo terrestre
$\rho's$	Albédo du ciel clair
TSV	Temps Solaire Vrai
TSM	Temps Solaire Moyen
TU	Temps Universel.
TSL	Temps Solaire Local.
φ	Latitude de Soleil
N_s	Nombre de cellules connectées en série dans un module
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.
R_p	résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire
R_c	résistance de la charge connectée à la cellule
d_{ciel}	Le diffus du ciel.
d_{sol}	Le diffus de sol.
$d_{rétrodifusé}$	Le diffus rétrodiffusé
δ_R	L'épaisseur optique de Rayleigh respectivement.
δ_i	la composante isotrope
δ_d	la composante directe
M1,M2	Facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement
I_{ph} ou I_{pv}	Photo courant de la cellule
I_d	Courant de diode.
I_s	Courant inverse de saturation de la diode
m	Facteur d'idéalité de la diode
V_T	Tension aux bornes de la cellule
q	la charge d'un électron
T	la température de la cellule en kelven
V_{br}	Tension de rupture
N_s	Nombre de cellules connectées en série dans un module
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module
FF	Facteur de forme

η	Le rendement
P	La puissance
I_s	Courant de saturation de la diode
k	Constant de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/KELVIN
V	LA TENSION DE LA JONCTION
q	La charge d'électron $1.9 \cdot 10^{-19}$ C
a	e facteur d'idéalité de la jonction.
T	la température de la cellule en Kelvin.

Introduction générale

Introduction général

En Algérie et partout dans le monde la consommation en énergie électrique est en très forte Croissance. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, Sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation D'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. On parle Périodiquement de diverses solutions techniques permettant de garder ce rythme de vie ; ça d'un Part, d'autre part l'épuisement des ressources fossiles plus ou moins à long terme, la flambée des Prix du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des Consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez Rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais Aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie Solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la Plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau De distribution. .

L'Algérie est un pays continent qui dispose de sources potentielles importantes en matière d'énergies renouvelables, même si leur contribution ne représente, pour le moment, pas plus de 2%De l'ensemble de la production électrique nationale. Désormais, le soleil est une nouvelle priorité énergétique. Il ne devrait plus se coucher, puisque notre gouvernement entend s'investir pleinement dans les énergies renouvelables. Ainsi une nouvelle ligne stratégique du secteur, dont la boussole est résolument tournée, cette fois-ci, vers le soleil. Un nouveau programme de développement sur ce secteur, se résumant à une soixantaine de projets (en grande majorité solaire), avec comme objectif, À l'horizon 2020, la production d'électricité de l'ordre de 3.000MW et une couverture de 40% des besoins d'électricité du pays en 2030 : [1].

L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part

Introduction général

entière. Même si cette ressource est maintenant de mieux en mieux reconnue en tant que source potentielle d'énergie, cela n'a pas été facile face aux nombreux préjugés existants sur ce sujet. On a reproché par exemple à l'énergie solaire d'être intermittente (jour, nuit, saison), de ne pas être fiable et de dépenser plus d'énergie pour la conception d'un panneau solaire qu'il ne peut en fournir durant toute sa durée de vie.

Ces affirmations sont en passe d'être aujourd'hui dénigrées par les progrès techniques accomplis sur les cellules photoélectriques mais également sur le traitement de l'énergie. Actuellement, la plupart des panneaux photovoltaïques produisent largement plus d'énergie au cours de leur vie que l'énergie nécessaire à leur production. On a vu apparaître ces dernières années la notion de remboursement énergétique noté EPT (Energy Payback Time). Selon les technologies et les lieux de production, l'EPTS s'étend de 2 à 4 ans pour des panneaux ayant une durée de vie de 15 à 25 ans les progrès de fabrication ont été considérables ces dernières années permettant d'avoir des fonctionnements de générateurs photovoltaïques garantis au-delà de 25 ans.[1]

Si on se penche sur les diverses avancées technologiques effectuées ces dernières années, on voit apparaître dans la littérature de différents matériaux ainsi que plusieurs assemblages possibles pour créer un générateur photovoltaïque fiable. Pour l'utilisateur final, la nature technologique de la cellule utilisée pour produire de l'énergie importera donc peu en premier lieu. Les paramètres plus pertinents sont donc tout d'abord le prix du watt crête du module (DA/Wc), son rendement, sa durée de vie, sa taille, son poids, son apparence esthétique et l'impact de la fabrication et du retraitement sur l'environnement. Ainsi, en fonction des applications visées, chaque critère sera plus ou moins pondéré pour mieux sélectionner les meilleures combinaisons (système autonome hautement sécurisé, système de forte production pour la connexion réseau, production domestique, systèmes embarqués et portables, etc. ...).

Du point de vue des chercheurs, une bonne compréhension des différentes technologies de Cellule et de module est cruciale pour continuer à réduire les coûts, augmenter les performances et améliorer l'impact sur l'environnement en trouvant par exemple des solutions de recyclage dès la conception de nouveaux modules PV. De nombreuses technologies sont aujourd'hui opérationnelles mais beaucoup exigent encore des travaux de recherche et de développement spécifiques pour atteindre le degré de maturité nécessaire à une forte production.

Le premier et le deuxième chapitres : a pour but de présenter l'énergie solaire et ses utilisations avec une démonstration théorique plus détaillée sur l'énergie solaire

Introduction général

photovoltaïque, panneaux et cellules photovoltaïques et leurs principales caractéristiques et fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients et l'importance de l'énergie solaire. la modélisation d'une cellule photovoltaïque Pour cela nous avons établi un état d'art sur les différentes représentations électriques d'une cellule solaire ainsi que les paramètres intervenant dans le rendement de cette dernière. Les modèles de représentation électriques d'une cellule solaire les plus convaincants sont le Modèle **1-D** et le Modèle **2-D**.

Le troisième chapitre : nous avons présenté dans ce chapitre de la généralité sur le gisement solaire puis les paramètres géométriques du lieu et aussi les paramètres de localisation du soleil en termes de coordonnées horizontales et équatoriales et les paramètres du temps, ces paramètres influents sur le rayonnement incident sur terre.

Le quatrième chapitre : dans ce chapitre on présente plusieurs Différents Expression du rayonnement solaire par les chercheurs .et chaque modèle utilise des paramètres différente pour les calculs du rayonnement solaires (global, diffus ; directe ; réfléchi).

Le cinquième chapitre dans ce chapitre on a choisi le modèle de DAVIE-HAY pour le calcul du rayonnement solaire avec le code Matlab avec différente paramètre (numéro du jour ; latitude, et l'altitude).

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS ET ÉNERGIE
SOLAIRE

I.1 Introduction

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre, que ce soit pour les énergies conventionnelles d'origine fossile comme les hydrocarbures ou pour les énergies renouvelables dont les plus importantes sont le solaire, l'éolien et la biomasse [2].

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'usage la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (La cellule solaire).

I.1.1. l'énergie solaire

I. 1.2. Origine

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement estimée. [3].

I.1.3. Caractères particuliers

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les Propriétés suivantes :

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1 kW/m^2 à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 kW/m^2) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.
- Elle est abondante, notre planète reçoit plus de 104fois l'énergie que l'humanité consomme.
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement [3].
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre.

I.2. Le rayonnement solaire

La figure (I.1.) :Montre Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m² cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m² à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [3].

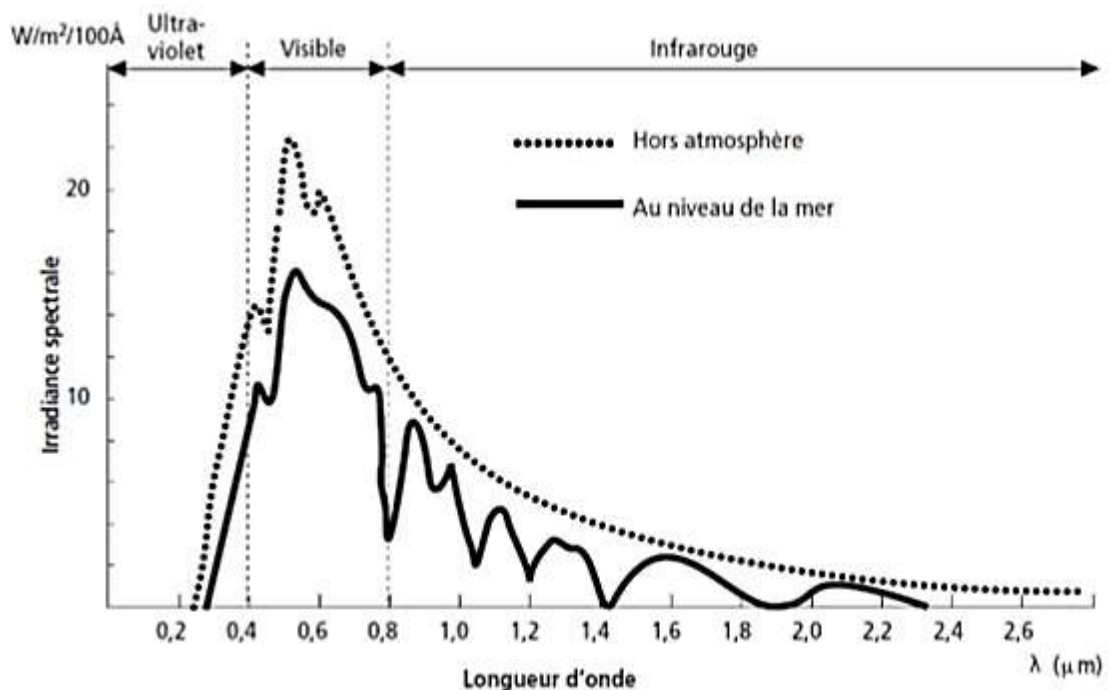


Figure I.1. Analyse spectrale du rayonnement solaire [3].

Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements ils représentent dans la figure (I.2.) ; Il y a quatre types de rayonnement:

I.2.1. Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. [4]

Le pyréliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Il doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil.

I.2.2. Rayonnement diffus :

Rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

I.2.3. Rayonnement solaire réfléchi :

Le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

I.2.4. Rayonnement global :

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un Solari mètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis [4].

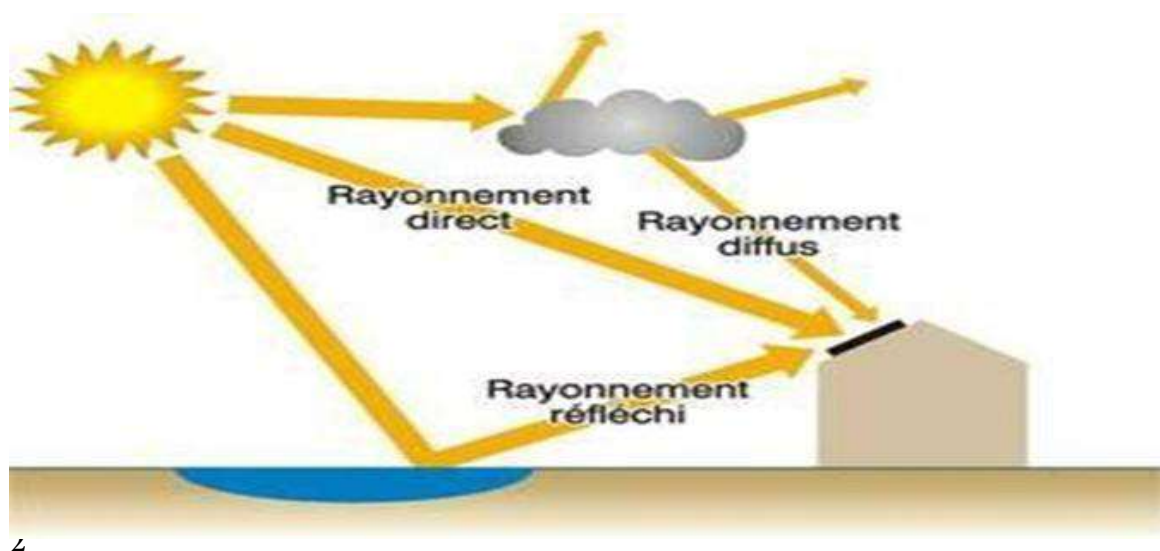


figure .I.2 : Les différents types du rayonnement solaire.[5]

I.3. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell–Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages [4].

I.4. Nombre d'air-masse

Le nombre d'air-masse est la distance parcourue par un rayon lumineux depuis son entrée dans l'atmosphère (on suppose que l'atmosphère soit plan, stratifié, réduit à l'unité et sous une pression moyenne de 1013 mb) jusqu'à son arrivée au sol Figure.(I.3.) : On peut le traduire par la relation suivante : [9].

$$AM = 1 / \cos\theta$$

Avec θ , l'angle entre la direction du rayonnement par rapport au zénith

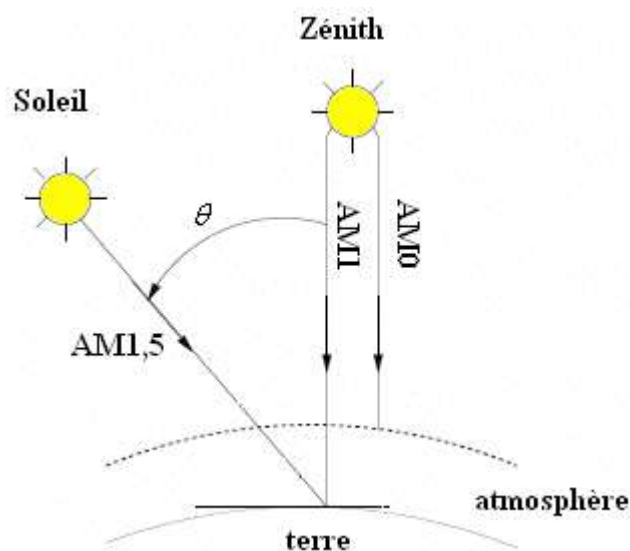


Figure.I.3. Nombre d'air-masse [5]

Hors atmosphère, il est nul et on l'appelle AM0 (Air masse zéro). Lorsque le soleil se trouve au zénith ($\theta=0$), c'est AM1 (Air masse 1). Dans le domaine photovoltaïque, pour comparer les performances de différentes cellules solaires, on utilise l'air masse 1.5 (AM1.5) correspondant à ($\theta=48.20^\circ$) : [7]

I.5. Mesure du rayonnement solaire :[34]

I.5.1. Le Pyrhéliomètre : La mesure de l'éclairement solaire direct est assurée par un Pyrhéliomètre. Cet appareil est généralement constitué par une thermopile peinte en noir. Cette thermopile est installée dans un tube de 30cm de longueur ayant une ouverture de 5°.

Le tube est monté sur un système de poursuite du disque solaire, appelé monture équatorial qui permet au tube d'être pointé constamment vers le soleil. Ainsi à l'exclusion du rayonnement issu de l'atmosphère et de la terre cet appareil ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil. [34]

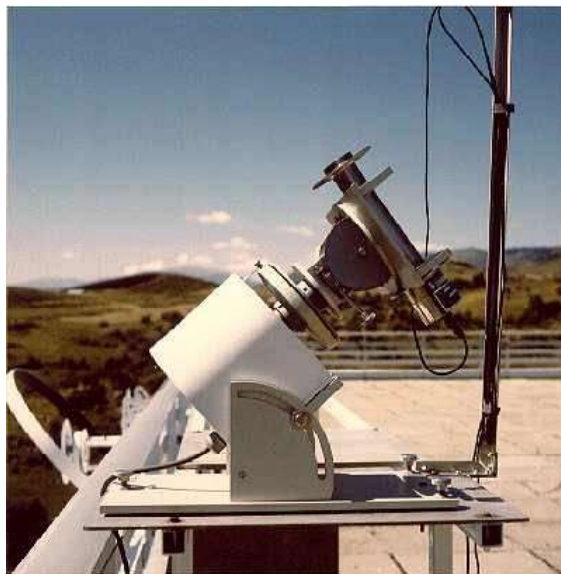


Figure I.4. :Pyrhéliomètre

I.5.2. Pyranomètre ombré

La mesure de l'éclairement diffus est assurée par un Pyranomètre avec un anneau d'ombrage appelé bande pare-soleil. Cette dernière permet d'occulter la partie sensible du pyranomètre de la part du rayonnement solaire provenant directement du disque solaire. Ce qui permet par conséquent de ne mesurer que l'éclairement du au rayonnement diffus



Figure .I.5. : Pyranomètre avec anneau d'ombrage

I.5.3. Le Pyranomètre

Pour la mesure de l'éclairement global, on utilise un Pyranomètre figure .6.



Figure .I.6. : Pyranomètre

Les pyranomètres les plus utilisés sont de type (KippZonen) pour la mesure de l'éclairement solaire global. Il peut être fixé sur une base collée parallèlement sur le capteur, ainsi il aura la même inclinaison du capteur figure .7. :[34]



Figure .I.7. Solari mètre type (KippZonen)

I-6. Type de l'énergie solaire : Il existe deux types d'énergie solaire :

- L'énergie solaire actif (Photovoltaïque)
- L'énergie solaire passive (Thermique).

I.6.1.: Énergie solaire active : L'énergie solaire active est l'énergie transmise par les panneaux solaires. Ils sont utilisés à la fois pour les systèmes de chauffage dans les maisons et pour la production d'électricité. L'énergie solaire active est collectée à l'aide de panneaux photovoltaïques plats qui peuvent être montés pour collecter l'énergie du soleil.

L'air ou le liquide est utilisé pour capter la chaleur du soleil (le liquide est principalement utilisé car il est un meilleur conducteur de chaleur et d'énergie dans l'air et a l'avantage de ne pas geler). Le fluide est ensuite déplacé vers un dispositif externe qui agit comme un conteneur de stockage où il est converti en énergie.

L'énergie solaire active peut être collectée grâce à l'utilisation de capteurs solaires positionnés sur les toits des bâtiments pour chauffer les fluides et les pomper à travers un système de canalisations pour chauffer l'ensemble du bâtiment.[8]

I.6.2.:Avantages des systèmes d'énergie solaire actifs :

1. L'un des avantages de l'énergie solaire active est qu'ils n'ont pas besoin d'une source d'énergie externe. Ils utilisent des dispositifs externes (panneaux solaires) qui nécessitent peu d'entretien et sont très fiables pour collecter l'énergie du soleil.

2. Par rapport aux systèmes d'énergie solaire passifs, une construction de bâtiment spéciale n'est pas nécessaire. Les systèmes d'énergie solaire active peuvent être utilisés à presque n'importe quel endroit et type de bâtiment.
3. Il n'y a pas d'émission de carbone.
4. Le chauffage des panneaux photovoltaïques reste clair en particulier dans de mauvaises conditions météorologiques.
5. Ils ne génèrent aucun bruit.

I.6.3. : Inconvénients des systèmes d'énergie solaire actifs :

1. L'équipement du système d'énergie solaire active coûte cher et son entretien est également coûteux.
2. Les fluides qui stockent la chaleur dans le panneau solaire peuvent libérer des gaz nocifs dans l'air.

I.7. : Énergie solaire passive :

L'énergie solaire passive est l'énergie qui est transmise par la thermodynamique et le transfert de chaleur en collectant la chaleur solaire et en la transformant en énergie (comme dans la serre à effet de serre) où la chaleur est transférée du soleil et lorsqu'elle pénètre dans la serre, le verre emprisonne l'énergie thermique et le stocke pour les périodes plus fraîches.

C'est le même mécanisme dans une voiture chaude et agréable par une journée froide. Le système d'énergie solaire passif est mieux utilisé pour le chauffage et le refroidissement du système, en particulier dans les petites maisons. Des fenêtres spéciales qui peuvent avoir des panneaux photovoltaïques peuvent être utilisées pour capter cette chaleur solaire. Ainsi, les systèmes d'énergie solaire actifs et passifs sont combinés pour la production d'énergie.[8]

I.7.1. Avantages du système d'énergie solaire passif

1. Les systèmes d'énergie solaire passifs ne sont pas seulement bon marché, mais aucun équipement externe n'est nécessaire, ce qui réduit vos dépenses énergétiques à environ 14 %.
2. Ils ne libèrent pas de toxines par rapport aux systèmes d'énergie solaire actifs.

I.7.2. : Inconvénients du système d'énergie solaire passif

1. L'efficacité des systèmes d'énergie solaire passifs dépend principalement des conditions météorologiques. S'il fait trop chaud, votre bâtiment risque de surchauffer.
2. L'efficacité dépend également de l'orientation de votre bâtiment par rapport au soleil.
3. Il existe des types spéciaux de fenêtres qui sont utilisées pour les systèmes d'énergie solaire passifs. Faire une erreur de choix ruinera vos efforts.

I.8. : Utilisations de l'énergie solaire :[8]

Voici les utilisations de l'énergie solaire.

- Électricité solaire
- Chauffage solaire de l'eau
- Cuisinier solaire
- Appareils solaires
- Éclairage solaire
- Chauffage et ventilation solaires
- Transport solaire

I.8.1 : Électricité solaire

C'est l'une des utilisations de l'énergie solaire qui a pris de l'ampleur ces dernières années. Bien que le prix des panneaux solaires soit assez élevé, plus l'électricité solaire ne devient populaire, plus les prix des panneaux solaires baissent.

L'électricité solaire est créée lorsque les rayons du soleil frappent les panneaux solaires, les panneaux solaires aident à transporter les électrons en les convertissant en électricité qui sont transmises par des fils et utilisées pour la production d'électricité.

Des panneaux solaires et des systèmes solaires photovoltaïques peuvent être installés sur les toits des maisons ou d'autres bâtiments. Ces systèmes d'énergie solaire génèrent de l'électricité pour compenser la consommation électrique du bâtiment et envoyer la production excédentaire au réseau électrique.'[8]

Les batteries solaires sont utilisées pour stocker l'énergie solaire afin que l'électricité solaire puisse être utilisée même lorsque le soleil se couche grâce à l'alimentation du VE. Cela permet aux

résidents de se déconnecter complètement du réseau avec un système d'énergie solaire et de batterie ou un système d'énergie solaire et de générateur.

I.8.2 : Chauffe-eau solaire

C'est l'une des utilisations de l'énergie solaire et ici l'énergie solaire est utilisée pour le chauffage des systèmes de chauffage de l'eau. Le rayonnement solaire est utilisé pour chauffer l'eau qui est utilisée dans les maisons. Les chauffe-eau solaires utilisent des cellules sur le toit pour absorber la chaleur du soleil et la transférer dans le réservoir d'eau. Le soleil peut également être utilisé pour chauffer l'eau de la piscine. Ici, l'eau est transportée vers un collecteur où elle est chauffée par le soleil puis renvoyée vers la piscine.[8]

I.8.3 : Cuiseur solaire

Les cuisinières ou fours solaires sont l'une des utilisations de l'énergie solaire de plus en plus populaires comme appareils électroménagers. Bien qu'il s'agisse d'une mijoteuse, un four solaire utilise des réflecteurs inclinés pour diriger l'énergie solaire dans une chambre spéciale. Le four solaire chauffe à basse température pendant quelques heures (8-10) selon les aliments.

I.8.4 : Appareils solaires

Certains autres appareils sont de plus en plus adaptés à l'utilisation de l'énergie solaire pour leur fonctionnement ce qui en fait l'une des utilisations de l'énergie solaire. Certains de ces appareils comprennent des réfrigérateurs, des laveuses/sécheuses et des systèmes CVC.

Ces appareils consomment plus d'énergie que prévu. Nous avons également des chargeurs de téléphones et de tablettes à énergie solaire.

Ces chargeurs solaires sont portables, ce qui permet aux utilisateurs de les emporter partout où ils le souhaitent. Certains pays avancés comme le Japon ont développé des cellules solaires légères et résistantes à l'eau qui pourraient un jour être intégrées pour alimenter nos appareils électroniques.

I.8.5 : Éclairage solaire

L'énergie solaire peut également être utilisée pour l'éclairage extérieur, ce qui en fait l'une des utilisations de l'énergie solaire. Les lampes solaires sont de plus en plus utilisées pratiquement partout, de l'éclairage de sécurité à l'aménagement paysager de la maison, même pour les panneaux de signalisation et les lampadaires. Ce qui le rend bien meilleur, c'est que ces lampes solaires sont peu coûteuses et facilement disponibles.[8-9]

I.8.6. : Chauffage et ventilation solaires

Le chauffage et la ventilation solaires font partie des nombreuses utilisations de l'énergie solaire.

Le chauffage solaire est l'utilisation du rayonnement solaire pour le chauffage des maisons, en particulier pendant les périodes froides ou hivernales, soit en alimentant des planchers radiants, soit en les associant à un système à air chaud forcé (FHA). Pour que cela se produise, une attention particulière doit être accordée à l'emplacement des fenêtres sur les murs et à la sélection des matériaux pour le bâtiment.

La ventilation solaire implique l'utilisation de ventilateurs de grenier à énergie solaire pour refroidir la maison pendant l'été. Ces radiateurs et ventilateurs solaires contribuent à réduire les coûts énergétiques.

I.8.7 : Transport solaire.

Le transport solaire est l'une des utilisations de l'énergie solaire. L'énergie solaire est l'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter les véhicules.

Les véhicules à énergie solaire sont les véhicules du futur et de meilleures innovations et technologies sont nécessaires pour que ces véhicules soient sur la route. Ce que nous avons, ce sont des véhicules majeurs qui sont encore en mode test et non en production à grande échelle. Bien que les voitures électriques puissent être chargées avec des panneaux solaires. [8-9]

I.9. : Avantages de l'énergie solaire

L'énergie solaire est plus avantageuse et préférée que les systèmes énergétiques conventionnels. Voici les avantages de l'énergie solaire. [9]

I.9.1. des matières premières illimitées

C'est la principale raison de la renouvelable de l'énergie solaire. La quantité d'énergie solaire disponible est 10,000 XNUMX fois la quantité dont l'homme a actuellement besoin.

Ce qui est amusant, c'est que l'énergie est remplacée et qu'environ 0.02 % de la lumière solaire entrante suffirait à remplacer d'autres sources de carburant si elles étaient exploitées.

I.9.2. Énergie propre

L'énergie solaire a de faibles émissions et c'est donc l'une des sources d'énergie les plus propres. Les effets néfastes sur l'environnement sont négligeables par rapport aux sources d'énergie conventionnelles qui sont la combustion de combustibles fossiles.

Le coût environnemental de l'énergie solaire L'énergie solaire est un excellent substitut à l'énergie des combustibles fossiles, car la combustion des combustibles fossiles libère environ 21.3 milliards de tonnes métriques de dioxyde de carbone dans l'atmosphère chaque année.

I.9.3. Fourniture d'électricité aux habitants hors réseau

Il y a environ 1.8 milliard de personnes qui sont hors réseau pour diverses raisons. Certains pourraient être le résultat de politiques ou de préoccupations environnementales, mais principalement pas d'accès au réseau électrique et ceux-ci se trouvent dans de nombreux pays en développement.

L'énergie solaire conviendrait à ces habitants hors réseau pour avoir accès à l'électricité car ils peuvent faire installer leurs panneaux solaires pour avoir reçu l'électricité directement du soleil.

I.9.4. Réduction des dépenses de production d'électricité

L'énergie solaire contribue à améliorer la qualité de vie de millions de personnes grâce à la réduction des dépenses. Des millions de personnes vivent dans le noir dans les pays en développement, ce qui entraîne une mauvaise qualité de vie.[8]

L'utilisation de l'énergie solaire peut considérablement améliorer leur qualité de vie car ce n'est pas seulement un meilleur substitut à la production d'énergie conventionnelle car elle réduit les coûts sociaux et environnementaux importants, mais elle apporterait également le développement dans les zones fournissant des emplois verts et stimulant également la production industrielle.

I.9.5. Aucune pollution sonore :

La production d'énergie solaire est silencieuse et ne peut donc pas causer de pollution sonore par rapport à la production d'énergie éolienne.

I.9.6. Plus économique pour la production d'électricité à long terme

Bien que l'installation de l'énergie solaire ait un coût élevé, à long terme, l'énergie solaire est économique par rapport aux factures d'énergie du réseau conventionnel.

I.9.7. Plus fiable

L'énergie solaire est plus fiable que l'énergie conventionnelle des entreprises de services publics. Ceci est majeur car ils peuvent être limités par des troubles politiques ou économiques, le terrorisme, des catastrophes naturelles ou des baisses de tension dues à une sur utilisation provoquant des pannes, mais ce n'est pas le cas avec l'énergie solaire.

I.10. Inconvénients de l'énergie solaire**I.10.1. Coût d'installation élevé**

- L'utilisation et l'installation de l'énergie solaire ont un coût initial élevé, même si cela s'applique à toutes les énergies renouvelables. Le coût initial de l'utilisation de l'énergie solaire peut même couvrir des années de factures d'énergie.

- Le coût de l'énergie solaire a peut-être été réduit au fil du temps, mais les prix sont toujours scandaleux, comme l'énergie solaire est de plus en plus utilisée avec les nouvelles technologies, nous verrons sûrement ces prix baisser encore plus.

I.10.2. L'énergie solaire dépend des conditions météorologiques

L'énergie ne peut être générée que lorsque la lumière du soleil frappe la face du panneau et est convertie, ce qui les rend plus performants les jours ensoleillés. C'est-à-dire que s'il n'y avait pas de soleil, il y aurait de l'électricité.

De plus, les jours nuageux ne produisent pas autant d'énergie et il n'y a pas de soleil la nuit, il est donc nécessaire de disposer de grandes banques de batteries pour économiser celles qui entrent dans la journée. Celles-ci limitent les pays à faible rayonnement solaire ainsi que les performances des panneaux solaires.

I.10.3. Faible taux de conversion énergétique

Les panneaux solaires ont un faible taux de conversion d'énergie par rapport à la puissance des centrales électriques conventionnelles de taille similaire, les panneaux solaires les plus avancés n'ayant à convertir que 20 à 25 %. Cela montre à quel point le développement de l'industrie de la production d'énergie solaire est encore nécessaire.

I.10.4. A besoin de beaucoup d'espace

La production d'énergie solaire consomme beaucoup d'espace. Pour une production à grande échelle, beaucoup d'espace est nécessaire pour l'installation de panneaux solaires et les terres sont donc mises à nu, mettant en danger la faune pour placer des panneaux solaires.

Les systèmes photovoltaïques à plus grande échelle peuvent nécessiter jusqu'à 3.5 à 10 acres par mégawatt et les installations CSP nécessitent entre 4 et 16.5 acres par mégawatt.

Cependant, cela peut être résolu par l'installation massive de panneaux solaires dans des zones désertiques pour répondre à la demande de production à grande échelle. De plus, de grands toits sont nécessaires pour placer des panneaux solaires à usage domestique.[8]

I.10.5. Libère les déchets électroniques

Bien que la production d'énergie solaire n'ait pas d'impact significatif sur l'environnement, le processus de production de panneaux solaires peut nuire à l'environnement en provoquant des émissions provenant de la combustion de combustibles fossiles et de déchets plastiques.

De plus, la production d'énergie solaire libère des déchets électroniques comme d'autres appareils électroniques, ce qui rend l'élimination de ces déchets dangereux problématique.

I.10.6. Matériaux non facilement disponibles

Les matériaux utilisés dans la production des technologies solaires sont rares bien que ce soit un problème pour les technologies PV et non pour les technologies CSP.

I.11.: les utilisations spéciales de l'énergie solaire à la maison

Certaines des utilisations spéciales de l'énergie solaire à la maison incluent ;

- Ventilateurs de ventilation à énergie solaire : l'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter des ventilateurs à usage domestique.
- Chauffage solaire des piscines : l'énergie solaire peut être utilisée pour chauffer les piscines de la maison afin de les rendre chaudes et agréables pour la détente.
- Chauffage solaire de la maison : l'énergie solaire peut également être utilisée pour le chauffage de la maison en période hivernale.
- Pompes à énergie solaire : l'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter les pompes à eau.
- Charger les batteries à l'énergie solaire : l'énergie solaire peut également être utilisée pour charger les téléphones et autres gadgets.[8]
- L'énergie solaire pour cuisiner : l'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter les fours.

I.12.: les utilisations spéciales de l'énergie solaire dans l'agriculture

Certaines des utilisations spéciales de l'énergie solaire dans l'agriculture comprennent;

- L'énergie solaire peut être utilisée pour chauffer l'eau utilisée à des fins agricoles.
- L'énergie solaire peut également être utilisée pour le fonctionnement d'une serre solaire qui aide à la croissance des cultures et améliore le rendement.
- L'énergie solaire peut également être utilisée pour le séchage des récoltes et des céréales.
- L'énergie solaire peut être utilisée pour le pompage de l'eau.[9]

I.13.-Conclusion :

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'origine de l'énergie solaire, nous avons rappelé en premier lieu quelques notions sur le rayonnement solaire et les phénomènes physiques qui y sont liés à savoir la structure de l'atmosphère, absorption et diffusion du rayonnement solaire. Après on de montre les types énergie solaire et leurs utilisation dans la vie quotidiennes.

Chapitre II :

Les cellules photovoltaïques

II.1. Introduction :

Nous nous proposons d'exposer dans une première partie de ce chapitre, la physique des semi-conducteurs et leurs applications dans le domaine de la photovoltaïque, le principe du photo courant et les propriétés électrique d'une cellule photo solaire dans une deuxième et troisième partie.

II.2. Physique des semi –conducteurs :

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants à proprement parler. [10]

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc.

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle ; il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium[10]

II.3. Historique :

- 1833 : Michael Faraday remarqua le pouvoir conducteur de certains métaux lorsque l'on augmente la température, contrairement aux métaux classiques.
- 1833 : Effet photovoltaïque. A. Becquerel constate une différence de potentiel en éclairant le point de contact entre un conducteur et un électrolyte.
- 1878 : Effet Hall. H. Hall découvre une différence de potentiel dans le cuivre dans la direction perpendiculaire au courant et au champ magnétique.
- 1931 : Théorie moderne des semi-conducteurs. K.G. Wilson décrit les semi-conducteurs comme isolant à faible bande interdite.
- 1948 : J. Bardeen, W.H. Brattain et W. Shockley découvrent l'effet transistor.
- 1954 : Fabrication des premiers transistors en silicium [10]

II.4. Jonction P-N

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La jonction entraîne l'égalisation des niveaux de Fermi par décalage des bandes. Si l'on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible (LED), soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule, son intensité varie en exponentielle de la tension. Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.[10]

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions N-P-N ou P-N-P qui forment les transistors bipolaires. Dans ce cas-là, les deux semi-conducteurs de même type sont appelés l'émetteur et le collecteur. Le semi-conducteur situé entre l'émetteur et le collecteur est appelé la base, et a une épaisseur de l'ordre du micromètre. Lorsqu'on polarise la jonction émetteur-base en direct, celle-ci est passante alors que la jonction base-collecteur est bloquée. Cependant la base est assez fine pour permettre aux nombreux porteurs majoritaires injectés

depuis l'émetteur (fortement dopé) de la traverser avant d'avoir le temps de se recombiner. Ils se retrouvent ainsi dans le collecteur, produisant un courant contrôlé par la tension de base.

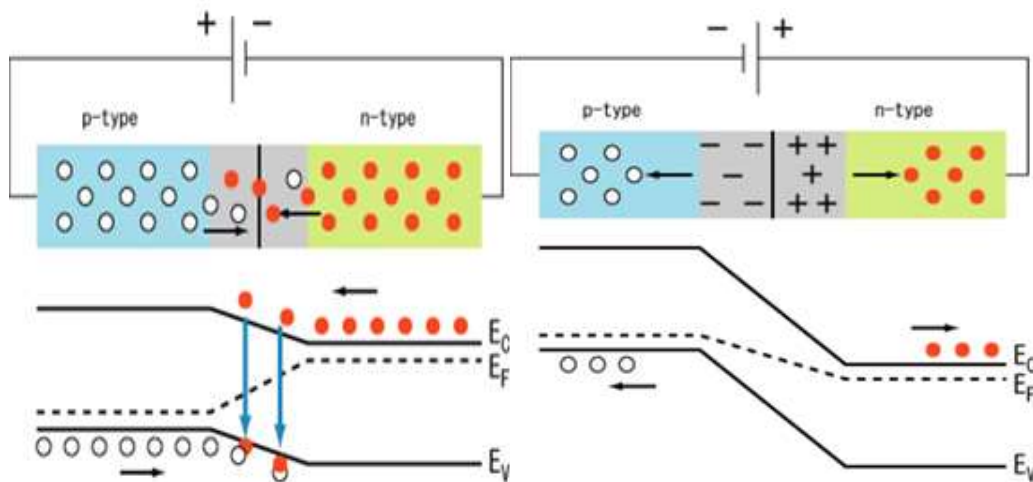


Fig. (II-1) jonction PN en polarisation directe : [10] jonction PN en polarisation inverse

II.5. Les cellules photovoltaïques

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

II.5.1. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le Silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches

Réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement. Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [7].

II.5.2. Définition d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires son but est de capter le rayonnement du soleil, c'est-à-dire sa lumière, afin de le transformer en électricité. Dans ce cas elle vient remplacer le rôle joué jusqu'ici par une pile.

Les usages de la cellule photovoltaïque sont nombreux. En effet, la cellule photovoltaïque peut par exemple fournir l'électricité :

- Une habitation, lorsque l'installation est domestique.
- Le réseau public d'électricité, dans le cas des centrales solaires thermiques.
- Les bateaux solaires, avions solaires et autres véhicules alimentés grâce à des cellules photovoltaïques [11]

II.5.3. Le rôle des composants de la cellule photovoltaïque

Pour produire une quantité intéressante d'électricité par les cellules photovoltaïques. Selon les matériaux de construction utilise pour élaborer une cellule solaire, d'une part son puissance et d'autre parte son rendement, nous utilisons du matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Il en existe de nombreux, mais le silicium, présent en quantité a la surface de la terre, est le plus utilise.[11]

II.5.4. La structure de cellule est composée par :

II.5.4.1. Couche émetteurs de type (N)

Elle transmise la lumière incident vers la couche photoconductrice ou couche absorbant. Et la transmittance de la couche (N) est supérieure à la couche (P), Pour passer un grand nombre des photons à la deuxième couche et crée les paires (électron _ trous).

II.5.4.2. Couche absorbant (couche de bas de type (P)

Qui transforme le rayonnement lumineux en paires (électrons - trous), par la suite sont collectés pour réalisant une jonction à la surface de cette couche .car l'épaisseur de cette couche est supérieure à la couche émetteur il y'a un grand nombre des porteur des charge donc la quantité de courant est augmentée.

II.5.4.3. Couche antireflet :[11]

Cette couche est d'épaisseur de quelques (μm) utilisé pour minimiser les pertes des photons.

II.5.4.4. Les doigts métalliques

Pour faire une fenêtre optique et transmette les photons.

Couche opaque

Pour fait le contacte ohmique.

Et nous en concluons :

- le coefficient d'absorption de la base $\alpha_{\text{base}} > \alpha_{\text{émetteur}}$.
- le coefficient de transmittance de la couche T émetteur $> T_{\text{base}}$.
- Le courant qui domine est le courant créé par la diffusion des porteurs minoritaires des régions (P) vers les régions (N) pour donner un bon rendement.[11]

La photo solaire

contacte ohmiques

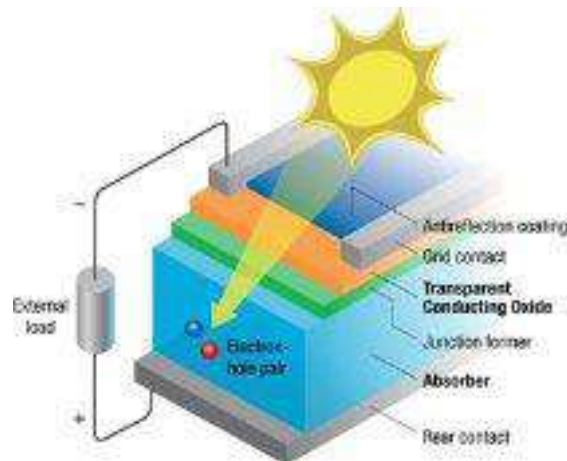


Figure (II.2): les composants de la cellule photovoltaïque

II.6. Les différents types des cellules solaires :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. [13].

Actuellement, il existe trois types de cellules solaires :

II.6.1. Cellules monocristallines :

Elles ont le meilleur rendement (de 14 à 16% jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent très cher en raison de leur fabrication complexe.



Figure(II.3) : cellule monocristalline.

II.6.2. Cellules polycristallines : [13]

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant,

leur rendement est faible :(de 12% à 14 % jusqu'à 19.8 % en laboratoire).

cellules poly cristallines.



Figure (II.4) : cellules poly cristallines.

II.6.3. Cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement est plus faible : (de 6 % à 8 % jusqu'à 13 % en laboratoire).mais ne nécessitent que de très faible coût. [13]

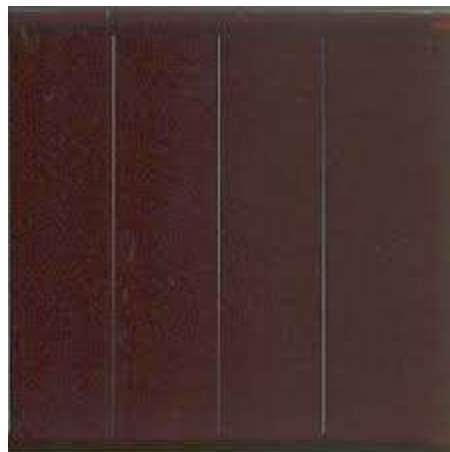


Figure (II.5) : cellule amorphe.

II.7. Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV

L'effet photovoltaïque (PV) utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité et de transporter dans un matériau semi-conducteur, des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et de type p. Lorsque la première partie est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui

tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule. L'effet repose donc, à la base, sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. [12]

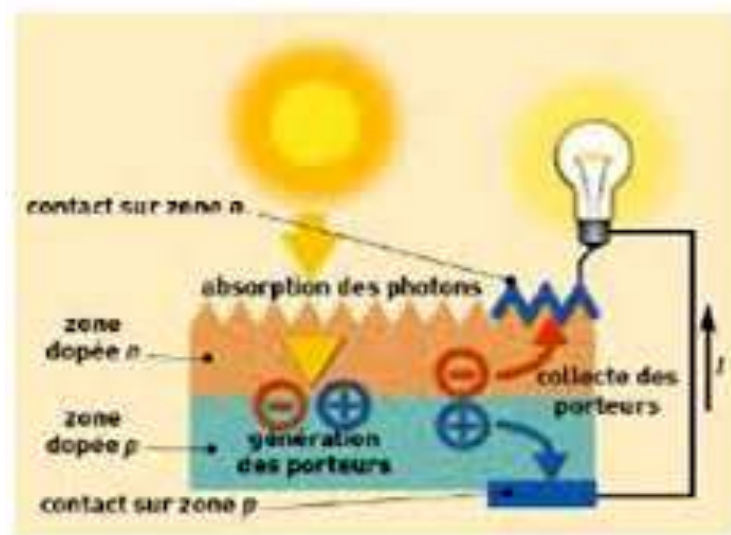


Figure (II.6) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

II.8. Effet photovoltaïque:

Le terme "photovoltaïque" provient du mot grec ancien « photos » signifiant la lumière, la clarté. L'effet photovoltaïque est la transformation de la lumière en électricité. Ce phénomène physique est propre à certains matériaux dont le silicium, matière première des panneaux photovoltaïques. En effet, la lumière produite par le soleil est composée de photons. Ces photons vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de créer un courant électrique continu. Ce courant va ensuite être recueilli par des fils métalliques appelés « strings » qui vont transporter le courant de cellule en cellule. Le courant va ainsi s'additionner lors de son passage entre chaque cellule. Ce courant sera ensuite recueilli vers la centrale photovoltaïque. [12]

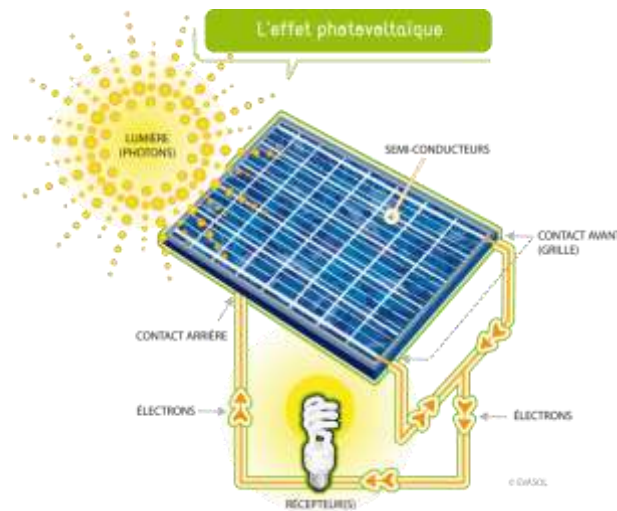


Figure (II.7) : L'effet photovoltaïque

II.8.1. Caractéristique électrique

II.8.1.1. Propriétés

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $I(V)$ non linéaire figure II-8.

La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants sur les 4 existants

Une cellule PV est un récepteur dans le quadrant 2 et dans le quadrant 4.

Le fonctionnement : [14].

Dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène

D'échauffement local (hot spot) est possible. Le fonctionnement dans le quadrant 1 est le Fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule est un générateur, elle produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans ce quadrant.

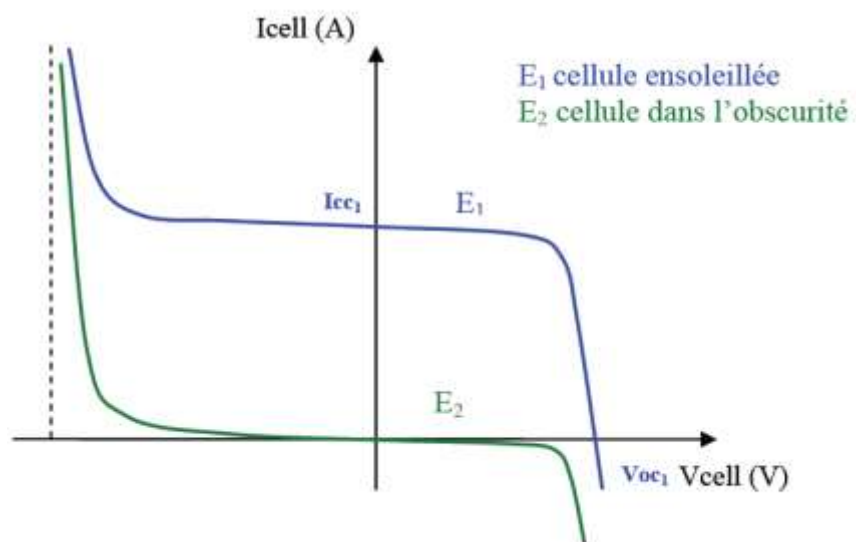


Figure II.8: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [14]

La tension en circuit ouvert (V_{co}) d'une cellule PV est comprise entre 0,3V et 0,7V selon le Matériau utilisé, la température et son état de vieillissement. Son courant de court-circuit (I_{cc}) Varie principalement selon le niveau d'éclairement et selon les technologies et les tailles de Cellules (entre 5 et 8A pour le silicium cristallin).

II.9. Etapes de fabrication et d'exploitation d'une cellule solaire : [15]

Les étapes de fabrication d'une cellule solaire peuvent être classées comme suit :

Etape 01 : élaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique (obtenu partir de quartz).

Etape02 : cristallisation de ce silicium solaire pour former de plaques.

Etape 03 : transformation de se silicium cristallise en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque.

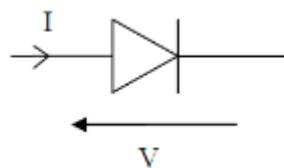
Etape 04 : assemblage de la cellule photovoltaïque en module photovoltaïque.

Etape 05 : groupement de plusieurs modules pour réaliser un systèmes photovoltaïque intégré en toiture comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.[15]

II.10. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité est une diode. Dans le cas idéal, le courant circulant dans une cellule est donc donné par la relation de Shockley [16] :

$$I = I_s \cdot [\exp \left(\frac{q \cdot v}{KT} \right) - 1] \dots \dots \dots (\text{II-1})$$



Lorsque la cellule est éclairée, le courant circulant dans celle-ci devient :

$$I = I_s \cdot [\exp \left(\frac{q \cdot v}{KT} \right) - 1] - I_{ph} \dots \dots \dots (\text{II-2})$$

I_s : courant de saturation

I_{ph} :courant de photon

K : constant de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ joules/kelvin)

q :la charge électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ coulons)

T :la température de la cellule en kelvin

v :la tension aux borne de la cellule

a : le facteur d'idéalité de la jonction.

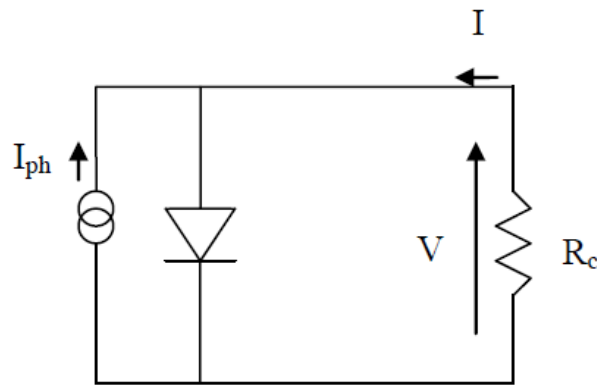


Figure II.9: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

R_c : résistance de la charge connectée à la cellule.

Dans la réalité, on doit ajouter une résistance série R_s pour tenir compte des résistances des électrodes et de celles induites par les interfaces électrode-semi-conducteur. On doit également ajouter une résistance parallèle R_p (résistance shunt en anglais) qui prend en compte les courts circuits dans la cellule (figure II.10). Ces courts-circuit dans la cellule sont dus à l'organisation des matériaux (dans un mélange de matériaux, il existe des chemins favorables à la recombinaison des charges), à la présence d'aluminium dans la couche active (diffusion d'aluminium lors de la réalisation de l'électrode) et aux charges au voisinage des interfaces de séparation des excitons qui ont tendances à recombinaison des charges séparées.

-Le courant est alors donné par la relation :

$$I = \frac{R_p}{R_s \cdot R_p} \cdot I_s \left[\exp \left(\frac{q(v - I \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] + \frac{v}{R_p} - I_{ph} \dots \dots (\text{II} - 3)$$

a : facteur d'idéalité de la diode.

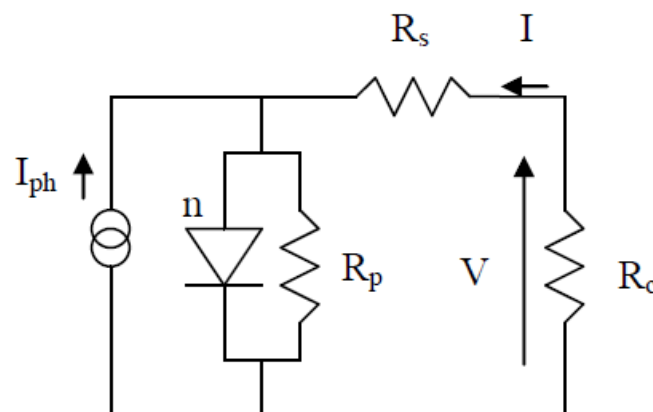


Figure II.10: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

II.11. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque**II.11.1. Les avantages de l'énergie photovoltaïque**

- 1- L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [17] :
- 2- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- 3- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- 4- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur Petite taille, et leur opération silencieuse.
- 5- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable Aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- 6- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de Manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- 7- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (Notamment à la grêle).
- 8- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs Garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans :.[17]

II.11.2. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- 1- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- 2- Le coût très élevée en Algérie
- 3- Faible rendement de conversion.
- 4- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- 5- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et De s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans Laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de Fabrication :[17].

II.12. Modélisation des cellules photovoltaïques :

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des Circuits électriques équivalents. [18]

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un

comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.[18]

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque.

Le Module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les Paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension.

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication.

II.12.1. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion (figure II.11). Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source de courant produit le photo courant I_{ph} , qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire E. l'équation courant tension I-V du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : la somme de tous les courants entrant et sortant d'un point est égale à zéro [19]

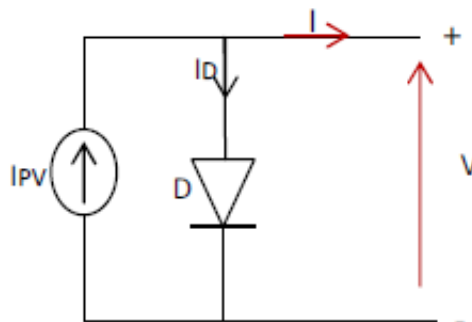


Figure II.11 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire [19]

$$I = I_{pv} - I_d$$

Avec :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{v}{m \cdot v_t}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots \text{(II-4)}$$

Avec $v_t = K \cdot T / q$

$$d'o\grave{u} \quad I = I_{pv} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots (II-5)$$

Avec

- I_{ph} : Photo courant de la cellule .
- I_d : Courant de diode.
- I_s : Courant inverse de saturation de la diode.
- m : Facteur d'idéalité de la diode, $m = 1 \dots 5$.
- V_T : Tension aux bornes de la cellule
- q : la charge d'un électron = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- T : la température de la cellule en kelven

II.12.2. Modèle avec pertes ohmiques (Rs -MODEL) :[20]

Le deuxième modèle, tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent représenté ci-dessous :

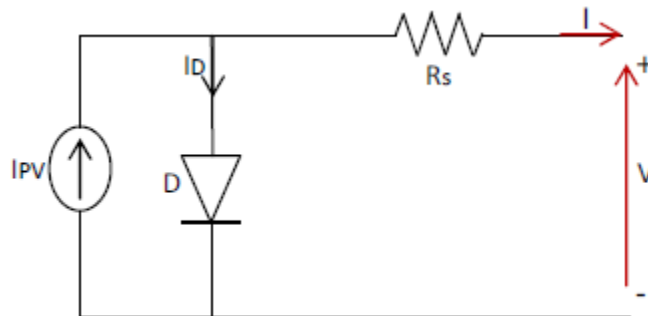


Figure (II.12) : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s . [20]

Après analyse du circuit, l'équation courant tension est donnée comme suit :

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \dots \dots \dots (II-6)$$

Avec :

R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes.

II.12.3. Modèle à une diode " Modèle 1-D ":[21]

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques Techniques de leurs cellules solaires (data sheets). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires .Il tient

compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série R_s , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p (voir figure (II.13)).

Remarque : La résistance parallèle R_p est en générale très élevée, et lorsqu'elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairement

La caractéristique courant tension décrivant le fonctionnement du circuit ci-dessus est donné Par les équations : II-7 ET II-10

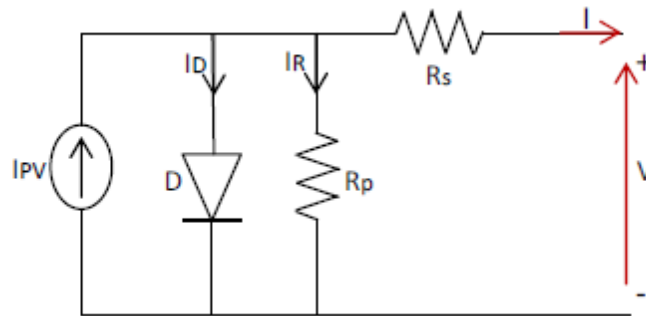


Figure II.13: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode :[21]

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \dots \dots \dots (II-7)$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.vt}} - 1 \right) \dots \dots \dots (II-8)$$

$$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p} \dots \dots \dots (II-9)$$

$$I = I_{pv} - I_s \left[\left(\exp\left(\frac{v+I.R_s}{m.vt}\right) - 1 \right) \right] - \left(\frac{V+I.R_s}{R_p} \right) \dots \dots \dots (II-10)$$

I_d /courant de la diode

I_s : courant de saturation

I_{pv} :courant de photon

R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.

II.12.4. Modèle à deux diodes ” Modèle 2-D ”

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est donné sur la figure (II.14) Ce modèle est dit le Plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes).[21]

Le modèle à deux diodes (équation II.14) est composé de deux exponentiels, le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion, par les niveaux profonds.

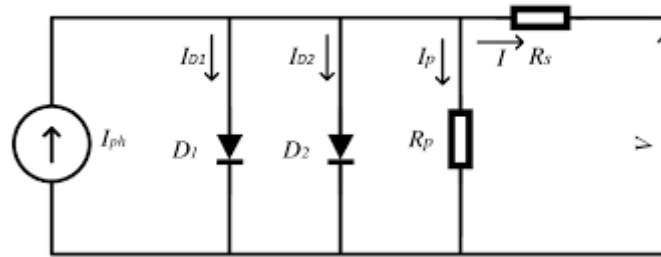


Figure II.14: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes [21]

Les équations caractéristiques du système sont données ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \dots\dots\dots (II-11)$$

$$I_{d1} = I_{s1} \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m_1.vt}} - 1 \right) \dots\dots\dots (II-12)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m_2.vt}} - 1 \right) \dots\dots\dots (II-13)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp\left(\frac{v+I.R_s}{m_1.vt}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\left(\frac{v+I.R_s}{m_2.vt}\right)} - 1 \right] - \left(\frac{V+I.R_s}{R_p} \right) \dots (II-14)$$

Avec :

- I_{s1}, I_{s2} : Courant de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.
- M_1, M_2 : Facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.
- V_{br} : Tension de rupture (-15V...-50V).
- I_{d1} et I_{d2} : sont les courants des diodes.

I_{s1} et I_{s2} et sont les courants de saturation des diodes :[21]

R_s et R_p : sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle.

T :est la température absolue en Kelvin

II.13.Le courant du panneau :

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[e^{\frac{V+R_s I}{N_s A k T}} - 1 \right] - N_p \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (II-15)$$

N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

II.14. Le facteur de forme :

Le facteur de produit $I_{cc} \times V_{co}$, ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins carrée de la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire. si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_m sera égal à $I_{cc} \times V_{co}$. Généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{II-16})$$

II.15. Le rendement :

Le rendement η définit le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule solaire. Si S est la surface de la cellule et G l'éclairement, le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times G} = FF \times V_{co} \times \frac{I_{cc}}{S \times G} \quad (\text{II-17})$$

II.16. Conclusion :

Dans cette partie nous avons présenté le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ainsi que, les notions théoriques de la modélisation d'une cellule photovoltaïque, son fonctionnement et ses caractéristiques principales.

Chapitre III :
GISSEMENT SOLAIRE

III -1. Introduction:

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir:

- Les grandeurs astronomiques.
- Les grandeurs géographiques.
- Le rayonnement solaire hors atmosphère.
- Le rayonnement direct, diffus et global.

III.2. Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre.

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à 4×10^{26} W.

- Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de $1,7 \times 10^{17}$ W. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [22][23].

III.3. La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire " I_C " reçu par une surface perpendiculaire aux rayons

Solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km

D'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne

" I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m^{-2} . En première approximation,

On peut calculer la valeur de " I_C " en fonction du numéro du jour de l'année " j " par la

Relation suivante :[24].

$$I_C = I_0.[1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times nj)] \dots \dots \dots (III-1)$$

III.4.Les mouvements de la terre:

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L’alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d’un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s’effectue avec une période de :

$$T_r = 23h \ 56mn \ 04s \approx 24h.$$

La vitesse linéaire de rotation à l’équateur est :

$$V_r = 0,465km/s,$$

Elle est variable en fonction de latitude φ telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r(\cos\varphi) \dots \dots \dots (III-2)$$

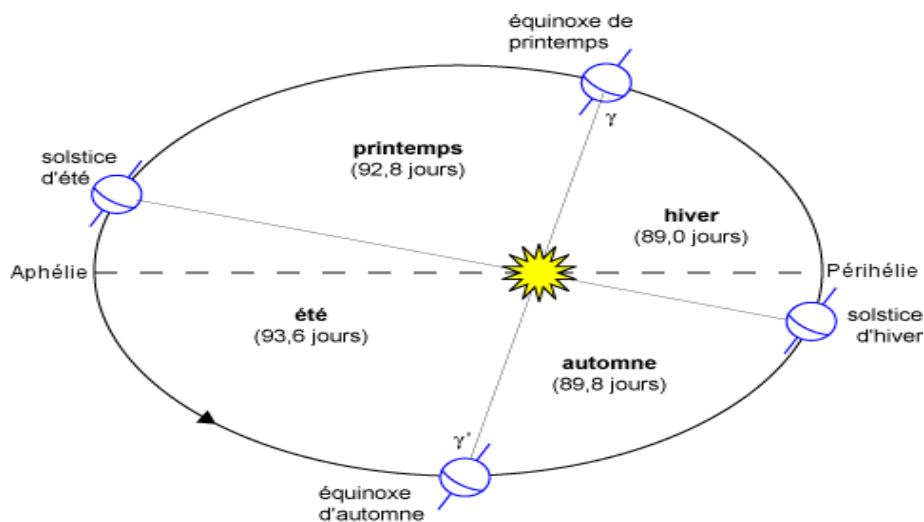


Figure (III.1): Les mouvements de la terre :[25].

III.4.1.Position du soleil par rapport à la terre:

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l’observateur sur la terre.

III.4.2.Coordonnées géographiques:

Les coordonnées géographiques permettent de situer un lieu de manière précise sur la terre .on arrive à identifier ces cordonnées grâce aux lignes imaginaires qui séparent la planète

ces lignes sont appelées parallèles et méridiens, **Sont** des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

III.4.2.1. La longitude (L) : l'est et est comptée positivement de 0 à +180° vers l'est négativement de 0 à -180° vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

III.4.2.2. La latitude (Φ) : permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le Nord et négativement de (0 à -90°) vers le Sud, notons que la latitude est égale à la hauteur du pôle.

III.4.2.3. L'altitude A: C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.

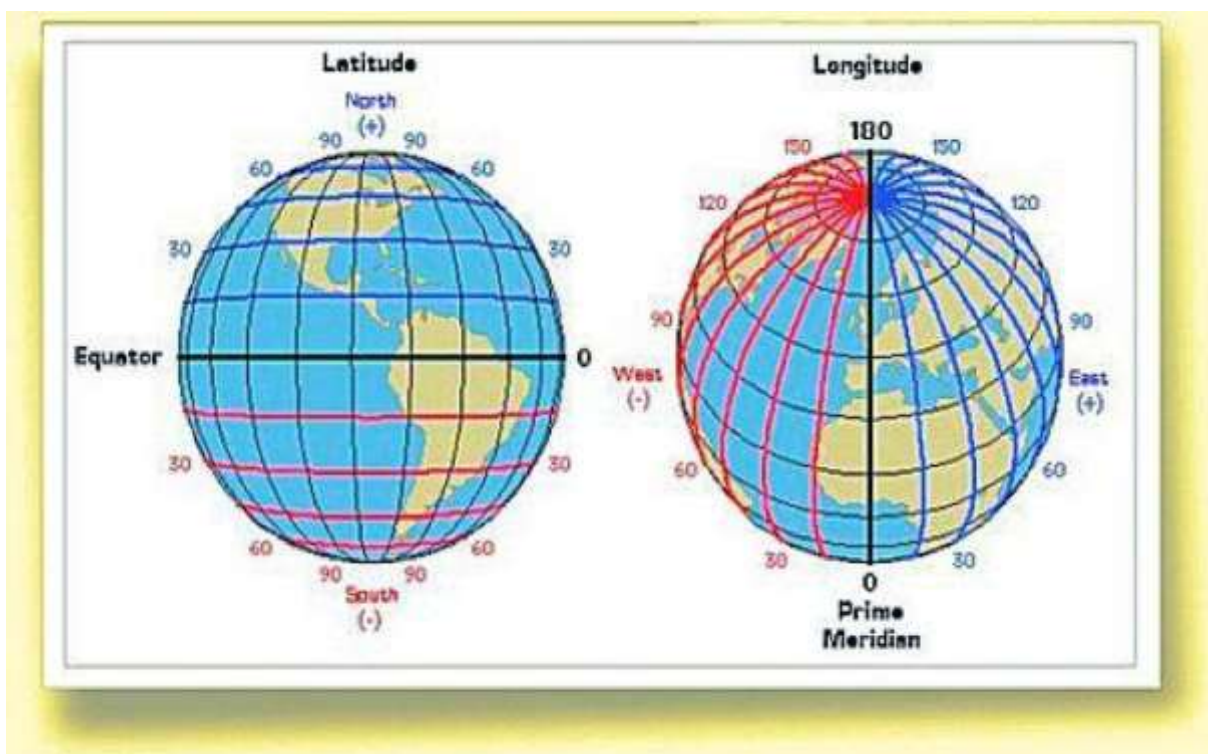


Figure (III.2): La longitude et la latitude d'un lieu.

Les coordonnées géographiques correspondent à la latitude et à la longitude d'un lieu. Elles se lisent toujours avec le degré de latitude (position nord-sud), puis avec le degré de longitude (position est-ouest). C'est grâce aux coordonnées géographiques que les GPS et les systèmes de navigation arrivent à trouver l'emplacement précis de quelqu'un sur la Terre.

Les méridiens sont perpendiculaires aux parallèles. Ainsi, afin de trouver les coordonnées géographiques d'un endroit précis sur la planète, il faut trouver la latitude (parallèle) et la longitude (méridien). Comme chaque parallèle et chaque méridien est associé à un degré, on

peut situer précisément n'importe quel endroit sur la planète. Les coordonnées géographiques peuvent être écrites de la manière suivante : **degrés**, **minutes** et **secondes** (DMS),

III.5.Repérage du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

III.5.1.Coordonnées horizontales : [26].

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu

III.5.1.1. La hauteur du soleil (h):

Est l'angle entre la direction du soleil et sa projection .Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le zénith et négativement de 0 à -90° vers le nadir. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \dots\dots\dots(III-3)$$

III.5.1.2.Le Zénith :

La distance au Zénith est le complément de l'angle de la hauteur solaire et s'appelle *angle de zénith* (θ_z), qui est donnée par :

$$\theta_z = 90^\circ - h$$

III.5.1.3.. L'azimut (a) :

Est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud. On peut le compter positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est. La relation qui donne l'azimut est donné par :

$$\sin a = \frac{\sin \delta \sin \omega}{\sin h} \dots\dots\dots(III-4)$$

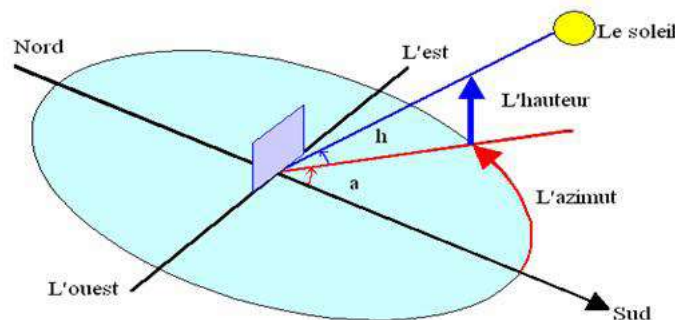


Figure (III.3): Coordonnées horizontales :[27].

III.5.2. Les coordonnées célestes horaires:

III.5.2.1. Sphère céleste: La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps :[28].

III.5.2.2. Angle déclinaison δ : L'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil .cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de (-23,26) à + (23,26)

- δ est donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23.45^\circ \sin (360/365 \times 284 + N) \dots \dots \dots (III-5)$$

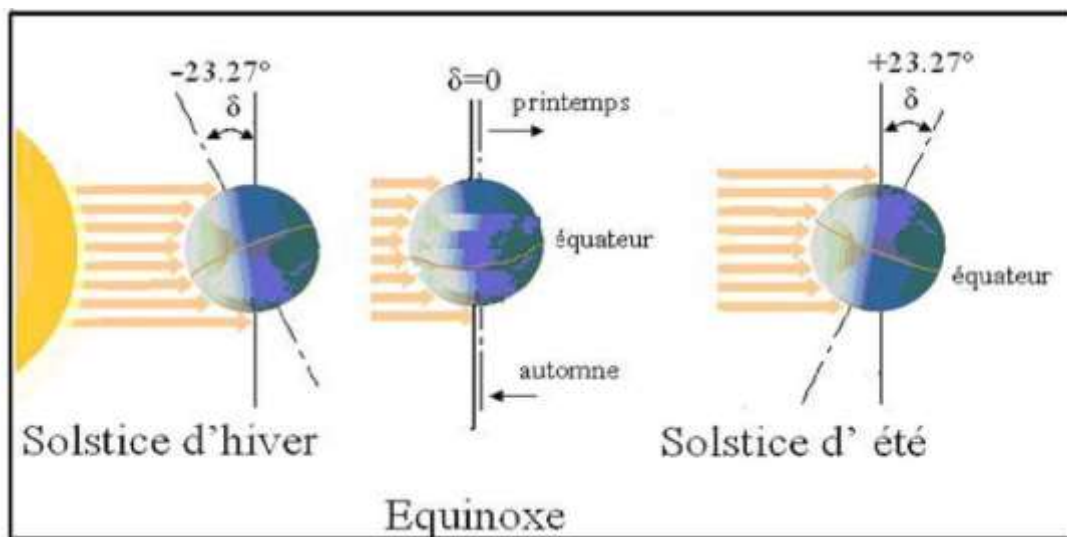


Figure (III.4): Coordonnées horizontales La déclinaison du soleil (δ)

N : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier

III.5.2.3. L'angle horaire ω : L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire

$$\omega = 15 (TSV - 12) \dots \dots \dots (III-6)$$

Où TSV est le temps solaire vrai.

III.6. Les temps solaires:**III.6.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V):**

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω . Il est donné sous la forme suivante :[30]

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \dots \dots \dots (III-7)$$

III.6.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M):

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante :

$$TSM = TSV - ET \dots \dots \dots (III-8)$$

$$E_T = 9.87 \sin \left[2 \cdot \frac{360}{365} (N - 81) \right] - 7.53 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] - 1.5 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] \dots \dots (III - 9)$$

E_T : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N : est le numéro du jour dans l'année

III.6.3. Le temps universel (TU):

En un lieu de longitude donnée, le temps universel est lié au temps solaire moyen (local) par la relation : [30]

$$TU = TSM \pm \frac{L}{15} \dots \dots \dots (III-10)$$

(+) pour longitudes EST,

(-) pour longitude OUEST.

Le temps universel se calcule donc par :

$$TU = TSM \pm \frac{L}{15}$$

III.6.4. Le temps légal (TL):

C'est le temps officiel de l'état :

$$T_L = TU + \Delta H \dots \dots \dots (III-11)$$

Étant le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré,

(+ $\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie)

III.6.5. Équation du temps:

La différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire apparent est appelée l'équation du temps. Sur Terre, elle varie entre 17 minutes en moins et 14 minutes en plus:

$$ET = TSV - TSM$$

L'équation du temps peut être approchée par la formule suivante :

$$ET = 9.87 \sin \left[2 \cdot \frac{360}{365} (N - 81) \right] - 7.53 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] - 1.5 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 81) \right] \dots \dots (III-12)$$

ET : est l'équation du temps exprime en minutes

N : est le numéro du jour dans la journée

III.7. Lever et coucher du soleil

L'angle horaire au lever et au coucher du soleil correspond à $h = 0$ (soleil à l'horizon), en remplaçant dans la formule (II.2), on trouve :

$$\omega_s = \pm \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \tag{III.13}$$

Un signe positif correspond au coucher du soleil et un signe négatif au lever de soleil.

$$\omega_c = + \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \dots\dots\dots(III.14)$$

$$\omega_l = - \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \dots\dots\dots(III.15)$$

Si la valeur du cosinus est supérieure à 1 il n'y a pas de lever (et pas de coucher), le Soleil est toujours sous l'horizon; si elle est inférieure à -1 il n'y a pas de coucher (et pas de lever), le Soleil est toujours au dessus de l'horizon. En outre, dans le cas ou $(-\tan \phi \tan \delta) = \pm 1$ alors le soleil n'est sur l'horizon que durant un instant seulement.

- Dans l'hémisphère nord, si :
 $\tan \phi \tan \delta > 1$: C'est la nuit polaire.

$\tan \phi \tan \delta < -1$: C'est le jour polaire.

La latitude des cercles polaires qui limitent les régions ou ces phénomènes sont observés est donc :

$$\tan \phi = \pm \tan \delta, \text{ donc : } \phi = \pm \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) = \pm 66^{\circ} 23' \dots \tag{III.16}$$

L'angle horaire ω_c au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_l = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ et l'heure solaire vrai du lever et du coucher de soleil est donc :

$$TSV_l = 12 + \frac{\omega_l}{15} = 12 - \frac{\arccos(-\tan \phi \tan \delta)}{15} \tag{III.17}$$

$$TSV_c = 12 + \frac{\omega_c}{15} = 12 + \frac{\arccos(-\tan \phi \tan \delta)}{15} \tag{III.17}$$

III.8. Durée du jour (dj) (Durée d'insolation)

La durée du jour est donnée par la relation suivante :

$$d_j = TSV_c - TSV_l = \omega_c - \omega_l = \frac{2\omega_c}{15} = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \tag{III.18}$$

$$\text{Avec : } TSV = 12 + \frac{\omega}{15}$$

$$TSV = 12 + 24\left(\frac{\omega}{360}\right) = 12 + \frac{\omega}{15}$$

L'heure solaire au lever et coucher du Soleil a donc pour valeur :

$$TSV_i = 12 - \frac{d_j}{2} \quad (\text{III.19})$$

$$TSV_c = 12 + \frac{d_j}{2} \quad (\text{III.20})$$

III .9. Gisement solaire dans le monde :

La situation géographique de notre planète nous montre un gisement solaire très élevé ce qui nous pousse à faire penser à l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable et facile à l'exploiter pour produire de l'électricité

La figure ((III.6) représente l'ensoleillement dans le monde.[32]

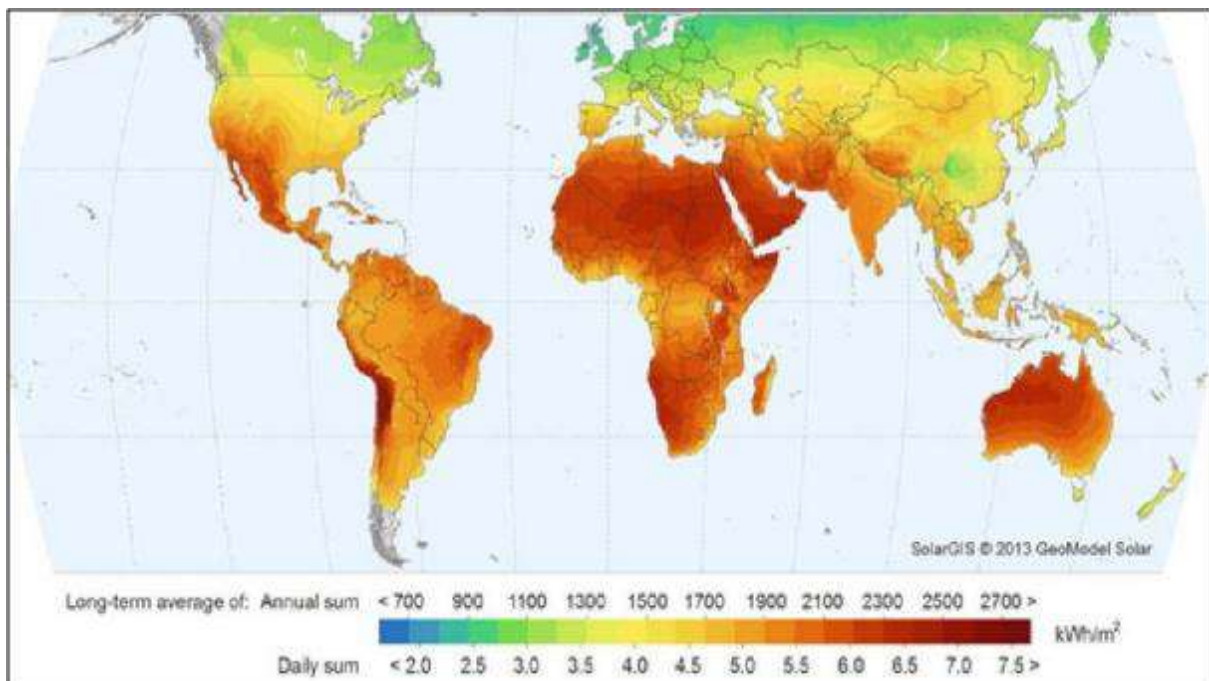


Figure (III.6) : Ensoleillement moyen annuel dans le monde [32]

III.10. Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée, il est utilisé pour simuler le fonctionnement

d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la figure (III.7).

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au Nord et 2263 kwh/m²/an au Sud du pays, ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [33]

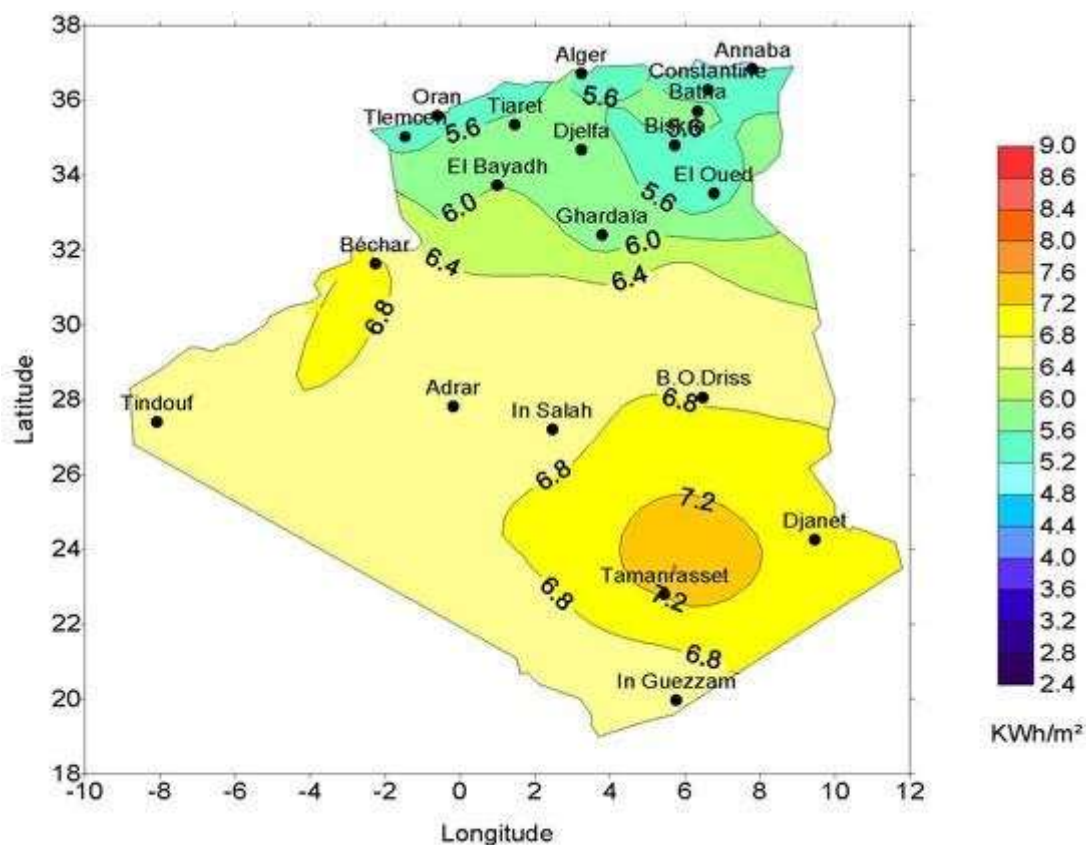


Figure III.7: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire en Algérie

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169,000TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire Algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi Ramel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire Algérien est

représentée dans le tableau (I,5) selon l'ensoleillement reçu annuellement [33].

III.11.Conclusion

Le rayonnement dépend des mouvements de la terre et le mouvement apparent du soleil dans le ciel, pour cela, nous avons présenté dans ce chapitre les paramètres géométriques du lieu et aussi les paramètres de localisation du soleil en termes de coordonnées horizontales et équatoriales et les paramètres du temps, ces paramètres influent sur le rayonnement incident sur terre.

Chapitre IV :
ESTIMATION DU RAYONNEMENT
SOLAIRE

IV.1. Différents Expression du rayonnement solaire par les chercheurs :**IV.1.1. Introduction:**

Plusieurs paramètres influent sur le fonctionnement d'un système solaire. Ces paramètres peuvent être d'environnement (température ambiante, vitesse du vent, rayonnement solaire, altitude...) ou bien des paramètres propres au système (inclinaison, fluide caloporteur, débit...).

La connaissance du rayonnement solaire et ces composantes sur des surfaces horizontale et inclinées est nécessaire et indispensable pour toute étude ou dimensionnement d'installations solaires. Or généralement, dans les stations météorologiques le rayonnement solaire global est mesuré sur des surfaces horizontales et sur le chef-lieu de chaque région[34].

Bien qu'il soit difficile de connaître la valeur de l'irradiation solaire pour un site précis, sous une orientation et une inclinaison bien déterminées, il existe quelques modèles approximatifs pour le calcul dans le cas où au moins le rayonnement global horizontal est mesuré ou estimé. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposés de relations empiriques qui lient les paramètres météorologiques aux différents paramètres radiométriques (éclairage global, diffus et direct).[34]

IV.2. Différents modèles du rayonnement solaire :**IV.2.1. Modèle de Lacis & Hansen :** (modèle semi empirique)

La formule générale proposée par Lacis & Hansen pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal est donnée par l'équation (IV -1):

$$G = I_{sc} \times \cos\theta_z \left[\frac{0.647 - \rho_s' - \alpha_0}{1 - 0.0685\rho} + 0.353 - \alpha_0 \right] \dots \dots \dots (IV - 1)$$

I_{sc} est la constante solaire extraterrestre calculée par :

$$I_{scn_j} = I_0 \times \left[1 + 0.033 \times \cos \left(\frac{360}{365} (n_j - 3) \right) \right] \dots \dots \dots (IV - 2)$$

Avec, I_0 la constante solaire moyenne égale à $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et n_j , le numéro de jour dans l'année ($n_j = 1$) pour le 1^{er} Janvier et $n_j = 365$ pour le 31 Décembre).

θ_z Est l'angle zénithal, $\theta_z = 90^\circ - h$ où h est la hauteur du soleil

Le coefficient α_0 correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct par la couche d'ozone, est calculé par la relation (IV -3) :

$$\alpha_0 = \frac{0.2118U_0}{10.042U_0 + 3.23 \cdot 10^{-4} U_0^2} + \frac{1.082U_0}{(1 + 138.6U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658U_0}{1 + (103.6U_0)^3} \dots \dots \dots (IV - 3)$$

Où, U_0 , l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par :

$$U_0 = I \times m_r \dots \dots \dots (IV - 4)$$

Où, m_r est la masse d'air optique relative donnée l'équation (IV -5):

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \dots\dots\dots(IV -5)$$

et, l représente la quantité d’ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d’ozone réduite (en cm) :[35],[36]

$$I = \frac{\{235 + [150 + 40 \sin(0.9856(nj - 30)) + 20 \sin(3L)] [\sin^2(1.28\phi)]\}}{1000} \dots\dots\dots(IV.6)$$

L et φ sont respectivement la longitude et la latitude du lieu.

α_ω représente le coefficient d’absorption du rayonnement direct par la vapeur d’eau, est donné par l’équation (IV.7)

$$\alpha_\omega = \frac{2.9X_\omega}{(1 + 141.5X_\omega)^{0.635} + 5.925X_\omega} \dots\dots\dots(IV -7)$$

X_ω est l’épaisseur d’eau condensable corrigée par trajet optique du rayonnement à travers cette couche, donnée par

$$X_\omega = m_a \times U_\omega \dots\dots\dots(IV -8)$$

U_ω est l’épaisseur d’eau condensable à la verticale du lieu (cm). Elle est donnée par l’équation (IV.9) ,[35.37]

$$U_\omega = \frac{0.943}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \dots\dots\dots(IV -9)$$

Avec, m_a la masse d’air corrigée exprimée par : [50]

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{10.3}\right)^{0.75} \times \left(\frac{273}{T}\right)^{0.5} \dots\dots\dots(IV -10)$$

P est la pression atmosphérique (mbar),elle peut être calculée à partir de[37] :

$$P = P_0 \exp(-0.0001184 \times z) \dots\dots\dots(IV -11)$$

P₀:est la pression atmosphérique au niveau de la mer (P₀ = 1013 mb);

z :est l’altitude du site (m) , par rapport au niveau de la mer; T , la température ambiante (K) et HR , l’humidité relative (%).

IV.2.2. Modèle de Hay-Davies

Comme le modèle précédent, le modèle proposé par Davies et Hay[38] en 1976 permet la détermination des composantes du rayonnement solaire au sol en fonction des différents coefficients de transmission des éléments constituant l’atmosphère a un instant quelconque de la journée.

IV.2.2.1.Rayonnement global reçu sur un plan horizontal

1. Rayonnement direct

La relation de calcul du rayonnement direct proposée par Davies & Hay est représentée par l’équation :

$$I = I_{sc} \times [(1 - \alpha_0) \tau_r - \alpha_\omega] \tau_a \cdot \cos(\theta_z) \dots\dots\dots(IV -12)$$

θ_z : L’angle zénithal du soleil.

Où α_0 est le coefficient correspondant à l'absorption du rayonnement solaire direct la couche d'ozone, calculée par :

$$\alpha_0 = \frac{0.2118U_0}{10.042U_0 + 3.23 \cdot 10^{-4}U_0^2} + \frac{1.082U_0}{(1 + 138.6U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658U_0}{1 + (103.6U_0)^3} \dots \dots \dots (IV - 13)$$

U_0 : l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par:

$$U_0 = 1 - m_r$$

m_r : la masse d'air optique relative.

$$m_r = [\cos(\theta_z) + 0.15(39.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \dots \dots \dots (IV - 14)$$

Et, l représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm) : [39][40]

τ_r : le coefficient de transmission après diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh, représenté par Davies et al :[38][41]

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262 m_a + 0.00933 m_a^2 - 0.00095 m_a^3 + 0.000437 m_a^4 \dots \dots \dots (IV - 15)$$

m_a : la masse d'air corrigée exprimée par la relation suivante:

$$m_a = \frac{p}{P_0} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \times z)}{\cos(\theta_z) + 0.15(39.885 - \theta_z)^{-1.253}} \dots \dots \dots (IV - 16)$$

P : la pression atmosphérique (mbar).

$$P = P_0 \times \exp(-0.0001184 \times Z) \dots \dots \dots (IV - 17)$$

P_0 : la pression atmosphérique au niveau de la mer.

α_ω : Le coefficient d'absorption du rayonnement direct de la vapeur d'eau, est donné par :

$$\alpha_\omega = \frac{2.9X_\omega}{(1 + 141.5X_\omega)^{0.635} + 5.925X_\omega} \dots \dots \dots (IV - 18)$$

X_ω : L'épaisseur d'eau condensable corrigée par le trajet du faisceau de rayonnement à travers cette couche, par :

$$X_\omega = m_a U_\omega$$

U_ω : L'épaisseur (cm) de l'eau condensable perpendiculairement à celle-ci. Elle a été donnée par l'équation :

$$U_\omega = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \dots \dots \dots (IV - 19)$$

HR : humidité relative.

τ_a : Le coefficient de transmission après diffusion par aérosol est donné par Mächler [42] selon l'équation :

$$\tau_a = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125\alpha) \exp[-\beta m_a(1.089\alpha + 0.5123)] \dots (IV - 20)$$

Tels que :

α Et β sont les coefficients représentant la visibilité du ciel et Coefficient de trouble d'Angströms.

2. Rayonnement diffus :

Sur un plan horizontal, le rayonnement diffus est la somme de trois composantes diffuses : D_r , D_a et D_m .

$$D_h = D_r + D_a + D_m \dots \dots \dots (IV -21)$$

D_r représente le rayonnement diffus de Rayleigh.

$$D_r = I_{sc} \tau_0 \tau_a (1 - \tau_r) 0.5 \cos(\theta_z) \dots \dots \dots (IV -22)$$

τ_0 : Le coefficient de transmission après absorption d'ozone :

$$\tau_0 = 1 - \alpha_0 \dots \dots \dots (III-37)$$

D_a Est le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols .[43]

$$D_a = I_{sc} (\tau_0 \tau_r - \alpha_\omega) \times [F_c \times \omega_0 (1 - \tau_a)] \cos(\theta_z) \dots \dots \dots (IV -23)$$

F_c : Le coefficient de dispersion directe dans l'atmosphère.

D_m Est le rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion

$$D_m = \frac{(I + D_a + D_r) \times \rho \times \rho_a'}{(1 - \rho \times \rho_a')} \dots \dots \dots (IV -24)$$

ρ_a' : L'albédo du ciel clair du site considéré.

$$\rho_a' = 0.0685 + 0.17 \omega_0 (1 - \tau_a) \dots \dots \dots (IV -25)$$

3. Rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé par :

$$G_h = I_h + D_h \dots \dots \dots (IV -26)$$

IV.2.3. Modèle de bird et hulstrom:

IV.2.3.1.Éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal[44]:

Dans Ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement direct est donné par la relation suivante :

$$B_n = 0.9751 \times I_{sc} \times \tau_r \times \tau_g \times \tau_0 \times \tau_\omega \times \tau_a \dots \dots \dots (IV -27)$$

avec BH est l'éclairement dû au rayonnement direct calculé sur un plan horizontal, tel que :

$$BH = B_n \sin(h)$$

Nous donnons ci-dessous les différentes équations des coefficients de transmission .

a).Diffusion de Rayleigh:[44]

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire est donné par la relation suivante :

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \times m a^{0.84} \cdot (1.0 + m a - m a^{1.01})] \dots \dots \dots (IV -28)$$

b).Diffusion par les aérosols:

Dans ce modèle, le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols concerne uniquement les deux longueurs d'onde ($\lambda = 0,38 \mu\text{m}$ et $\lambda = 0,50 \mu\text{m}$). Ce sont ces longueurs d'onde où il existe un minimum d'absorption par l'ozone. Il est donné par la relation suivante:

$$\tau_a = \exp[-K_a^{0.873} \times m_a^{0.9108} \times (1.0 + k_a - K_a^{0.7088})] \dots\dots\dots (IV -29)$$

Ou : $K_a = 0.2758 \cdot K_{a\lambda/\lambda} = 0,38\mu\text{m} + 0.35K_{a\lambda/\lambda} = 0,8\mu\text{m}$

c).Absorption par l'ozone: Le coefficient de transmission après absorption par l'ozone est donné par la relation suivante:

$$\tau_0 = 1 - \alpha_0 \dots\dots\dots (IV -30)$$

Ou : α_0 le coefficient d'absorption par l'ozone donné par :

$$\alpha_0 = 1 - 0.1611 \times U_3 \times (1.0 + 139.48 \cdot U_3)^{-0.3035} + 0.02715 \cdot U_3 (1.0 + 0.044 \cdot U_3 + 0.0003 \cdot U_3^2)^{-1} \dots\dots (IV -31)$$

Avec U_3 qui est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire dans la couche d'ozone, est définie comme suit :

$$U_3 = L_3 \cdot m_r \dots\dots\dots (IV -32)$$

d).Absorption par la vapeur d'eau:

$$\tau_\omega = 1 - \alpha_\omega \dots\dots\dots (IV -33).$$

Où : α_ω est le coefficient d'absorption par la vapeur d'eau, donné par :

$$A = 1 - 2.4959 \cdot U_1 [(1 + 79.034 U_1 (1 + 79.034 \cdot U_1) 6.385 \cdot U_1)^{0.6828} 6.385 \cdot U_1]^{-1} \dots\dots\dots (IV -34)$$

Avec U_1 qui est l'épaisseur d'eau condensable corrigée par la longueur du trajet optique, elle peut être calculée par la relation donnée ci-dessous:

$$U_1 = \omega \cdot m_r$$

Ou ω est la hauteur d'eau condensable.

$\omega = 0.493 \cdot \phi_{rps} / T$ avec :

$$P_s = P_s \exp(26.23 - 5416/T) \dots\dots\dots (IV -35)$$

IV.2.3.2.Eclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal [45] :

Dans ce modèle, l'éclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique:

$$D_H = D_r + D_a + D_m \dots\dots\dots (IV -36)$$

IV.2.3.3. Eclairement dû au rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh

$$D_r = 0.74 I_{0h} \cos \theta_z \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \tau_\omega \cdot \tau_{aa} \cdot F_c 0.5 (1 - \tau_{as}) (1 - m_a - m_a^{1.02}) \dots\dots (IV -37).$$

Avec $F_c = 0.84$, valeur recommandée par ce modèle et τ_{as} donné par :

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa} \dots \dots \dots (IV -38)$$

IV.2.3.4. Eclairage dû au rayonnement dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère [46]:

L'éclairage dû au rayonnement issu du phénomène de multi - réflexion est donné par l'expression suivante :

$$D_m = (B_H + D_r + D_a) \cdot \rho_g \cdot \rho_a' / (1 - \rho_g - \rho_a) \dots \dots \dots (IV -39)$$

IV.2.3.5. Eclairage dû au rayonnement global sur un plan horizontal:

L'éclairage dû au rayonnement global [47.48] sur un plan horizontale est comme suit :

$$G_H = B_H + D_H \dots \dots (IV -40)$$

IV.2.4. Modèle de Atwater& Ball

IV.2.4.1. Calcul du rayonnement global :[49]

La formule générale proposée par Atwater& Ball pour le calcul du rayonnement solaire global est donnée par l'équation mathématique (IV -41)

$$G = I_{sc} \times \cos \theta_z \times \left[\frac{(T_M - \alpha_0) \times \tau_a}{(1 - 0.0685 \times \rho)} \right] \dots \dots \dots (IV. 41)$$

Ou, T_M est donnée par la relation suivante : [49]

$$T_M = 1.021 - 0.0824 \times [m_0(949 \times 10^{-10} \times P + 0.051)]^{0.5} \dots \dots \dots (IV.42)$$

Et, m_0 est la masse d'air d'ozone donnée par :

$$m_0 = \frac{35}{(1224 \cos^2(\theta_z) + 1)^{0.5}} \dots \dots \dots (IV. 43)$$

Le coefficient d'absorption du rayonnement direct par la vapeur d'eau est donné par l'équation (IV -44):

$$a_w = 0.077 \times (U_w \times m_0) \dots \dots \dots (IV.44)$$

U_w est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm) donnée par EQ :(IV -9)

Le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols est fourni par L'expression suivante : [49]

$$\tau_a = \exp(-K_a \times m_a) \dots \dots \dots (IV.45)$$

ou

$$K_a = 0.2758 \cdot K_a \lambda / \lambda = 0,38 \mu m + 0.35 K_a \lambda / \lambda = 0,8 \mu m \dots \dots \dots (IV -46)$$

IV.2.5. Modèles pour l'estimation du rayonnement diffus du ciel

IV.2.5.1.modèle première génération

1). Modèle isotrope :

Le modèle Isotrope de Liu et Jordan (1962) est le plus simple de tous les modèles, c'est un modèle qui suppose que le ciel est isotrope Dans ce modèle, l'intensité du rayonnement diffus du ciel est supposée être uniforme sur toute la voûte céleste. Le rayonnement diffus du ciel sur un plan incliné avec une inclinaison (β) peut être une estimer par l'expression suivante[50][51][52][53][54][58]

$$I_d(\beta) = \frac{1}{2}I_d (1 + \cos \beta) \dots\dots\dots (IV -47)$$

Où I_d est le rayonnement diffus sur un plan horizontal

2).Modèle Circumpolaire :

Le modèle circumpolaire (1983) suppose que tout le rayonnement provient du disque solaire. C'est un modèle qui suppose que le ciel est sans nuages Il a été démontré que : [50][52]54][58]

$$I_d(\beta) = I_d r_b \dots\dots\dots (IV.48)$$

$$r_b = \frac{\sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega}{\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega} \dots\dots\dots (IV -49)$$

Où r_b best le rapport entre le rayonnement direct journalier sur un plan incliné à celui du plan horizontal.

φ Est la latitude (degrés) et β la pente de la surface à l'horizontale (degré). La déclinaison de la journée δ (degré) et l'angle horaire ω (degré)

IV.2.5.2.Modele deuxième génération :

Ce sont des modèles anisotropes ; ces modèles différentient entre rayonnement ciel clair et ciel couvert et offrent une certaine amélioration aux modèles de première génération.

a) Modèle Temps-Coulson :

Le modèle de Temps-Coulson (1977) pour un ciel clair prend en considération la correction de au rayonnement diffus horizon et diffus circonférence : Il peut être estime :[52][57][58]

$$I_d(\beta) = I_d \cos^2 \left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \cdot \left(1 + \cos^2 \theta_i\right) \sin^3 \theta_z \dots\dots\dots (IV -50)$$

θ_i : Angle d'incidence

θ_z : Angle zénithal du soleil

Le terme $\left(1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)\right)$ rend compte de l'effet horizon

Le terme $\left(1 + \cos^2 \theta_i\right) \sin^3 \theta_z$ pour l'effet circumpolaire

b. Modèle de Klucher :

Le modèle de Klucher (1979) est une généralisation du modèle Temps-Coulson pour tout type de ciel.[52][54][55][58]

$$I_d(\beta) = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) (1 + F \sin^3 \beta) \cdot (1 + F \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_z) \dots \dots \dots (IV -51)$$

F :est une fonction de modulation

$$F = 1 - \left[\frac{I_d}{I} \right]^2 \dots \dots \dots (IV -52)$$

Sa valeur est nulle lorsque le ciel est couvert et l'équation devient pour l'isotrope. Quand F tend à un, l'équation devient pour les conditions de ciel clair équation donnée par Temps et Coulson.

c. Modèle de Hay :

Le modèle de Hay (1979) est un modèle de rayonnement diffus du ciel .il est compose de la composante isotrope et de la composante circumpolaire. Il est donné par la relation :[52][53][54]

$$I_d(\beta) = I_d \left[\left(\frac{I - I_d}{I_0} \right) r_b + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{I - I_d}{I_0} \right) \right] \dots \dots \dots (IV -53)$$

d. Modèle de Reindl :

Reindl (1990) a utilisé les travaux de Hay et de Klucher et a proposé [52]

$$I_d(\beta) = I_d \left\{ (1 - F') \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \left[(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right)) \right] + F' r_d \right\} \dots \dots \dots (IV -54)$$

Avec

$$F' = \frac{IG - I_d}{IE} \quad ; \quad f = \sqrt{\frac{I_b}{IG}} \quad ; \quad r_d = \frac{I_d(\beta)}{I_d}$$

IV.2.6. Modèle de Liu et Jordan:

En 1960, Liu et Jordan[59] ont proposé un modèle empirique simple qui permet d'estimer les composantes du rayonnement solaire sur plan incliné ne nécessitant que quelques paramètres géo astronomiques tels que le numéro de jour de l'année, la hauteur du soleil et la latitude du lieu. L'avantage de ce modèle par rapport aux autres est qu'il permet de générer le flux solaire reçu au sol pour différents états du ciel et différentes inclinaisons de surfaces.[60,61]

IV.2.6.1. Calcul du rayonnement direct:

L'expression générale de l'irradiation directe sur un plan incliné d'un angle β' est sous la forme : I= I_h R_b.....(IV -55)

Où R_b le facteur d'inclinaison R_b du rayonnement direct est :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \dots\dots\dots (IV -56).$$

Mais sur un plan horizontal, $\beta' = 0$ donc $R_b = 1$, l'expression d'irradiation directe devient :

$$I = A. \sin(h) .exp\left(\frac{-1}{C.\sin(h + 2)}\right) \dots\dots\dots (IV -57)$$

A et C sont des données fournies dans le tableau (4.1) .

IV.2.6.2 Calcul du rayonnement diffus

L'expression générale de l'irradiation diffuse sur un plan incliné est : [61][60]

$$D = D_h. \left(\frac{1 + \cos \beta'}{2}\right) \dots\dots\dots (IV -58)$$

Si le plan est horizontal, $D = D_h$

$$D = D_h = B(\sin(h))^{0.4} \dots\dots\dots (III-59).$$

A, B et C sont des constantes qui tiennent compte de la nature du ciel. Elles sont données d'après le tableau suivant Tableau (4.1)

Les coefficients: A, B et C pour le modèle de Lui & Jordan

Tableau (4-1) paramètre décrivant la nature du ciel

Nature de ciel	A	B	C
Ciel très clair	1300	87	6
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel pollué	1200	187	5

IV.2.6.3. Calcul du rayonnement réfléchi:

Pour un plan incliné, l'irradiation réfléchie est donnée par :

D'autre part l'irradiation réfléchie sur un plan incliné est estimée par l'expression :

$$R = (I_h + D_h) \left(\frac{1 + \cos \beta'}{2}\right) . \rho \dots\dots\dots (IV -60)$$

Pour un plan horizontal, la composante solaire réfléchie est nulle.

IV.2.6.4. Calcul du rayonnement global:

L'irradiation globale est égale à la somme des composantes solaires directe, diffuse et réfléchi.

$$G = I_h R_b + D_h \left(\frac{1 + \cos \beta'}{2}\right) + \left(\frac{1 + \cos \beta'}{2}\right) \rho (I_h + D_h) \dots\dots\dots (IV -61)$$

Pour un plan horizontal :

$$G=G_h=I_h+D_h.....(IV -62)$$

IV.2.7. Modèle de DE PERRIN DE BRICHAMBAUT

Théoriquement, le rayonnement solaire peut être estimé à l'aide d'un modèle qui utilise le facteur de difficulté total de Linke (T). La définition d'un facteur de difficulté implique plusieurs hypothèses qui nécessitent la connaissance de nombreux paramètres climatiques.

IV.2.7.1. Le facteur de trouble de Linke

Le nombre d'atmosphères pures et sèches (sans aérosols, vapeur d'eau ou nuages) (par ciel clair) a été décomposé en trois facteurs de difficulté supplémentaires[62]

$$T^*_L=T_0+T_1+T_2.....(IV -63).$$

Avec

T_0 , T_1 et T_2 est donné par l'expression suivante :

T_0 : correspond à l'absorption de vapeur d'eau.

$$T_0=2.4-0.9 \sin (\varphi)+0.1(2+\sin(\varphi))A_{he}-0.2 Z(-1.22+0.14 A_{he})(1-\sin(h))..... (IV -64)$$

Avec

A_{he} : Variation saisonnière

$$A_{he}=\sin ((360/365)(nj-121))..... (IV -65).$$

Z : l'altitude du lieu.

nj : le numéro du jour dans l'année.

φ : la latitude du lieu.

h : la hauteur du soleil.

T_1 : Correspond à la diffusion moléculaire, à l'origine du bleu foncé du ciel.

$$T_1=0.89^Z.....(IV -66)$$

T_2 : Correspond à la diffusion (et une légère absorption) par les aérosols, rendant le ciel plus ou moins blanchâtre.

$$T_2=(0.9+0.4 A_{he})(0.63)^Z.....(IV -67)$$

IV.2.7.2. Rayonnement reçu sur un plan horizontal

➤ **Rayonnement direct**

Rayonnement solaire direct pour ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par la formule suivante [62]

On a: $\cos(i)=\sin(h)$

$$I_h=gne \sin(h) \left[\frac{T}{0.9+\frac{9.4}{0.89^Z} \sin (h)} \right] \dots \dots \dots (IV - 68)$$

Avec gne désigne le rayonnement hors atmosphère exprimé par la relation :

$$gne = [1 + 0.0334 \cos[\frac{360}{365}(nj-2)]] \times 1353 \dots \dots \dots (IV -69)$$

➤ **Rayonnement diffus :**

Rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal est donné par la formule suivante [6]:

$$D_h = gne \exp [-1 + 1.06 \log \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + b^2}] \dots \dots (IV -70).$$

Avec

$$b = \log T - 2.5 + 1.02(1 - \sin(h))^2 \dots \dots \dots (IV -71)$$

$a = 1.1$

➤ **Rayonnement global :**

$$G_h = I_h + D_h \dots \dots \dots (IV -72)$$

IV.2.7.3. Rayonnement reçue sur un plan incliné

1. Rayonnement direct

Pour tout plan de réception donné, la puissance du rayonnement direct incident s'exprime par : [62]. [63]

$$I_i = gne \cos(i) \exp \left[\frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{0.89Z} \sin(h)} \right] \dots \dots \dots (IV - 73)$$

$\cos(i)$ Est l'angle d'incidence sur le plan incliné est donné par :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\varphi - \beta) + \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) \dots (IV -74)$$

δ : La déclinaison du soleil.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + nj) \right] \dots \dots \dots (IV -75)$$

β : Inclinaison du plan.

ω : L'angle horaire.

$$\omega = (TSV - 12) 15^\circ \dots \dots \dots (IV -76)$$

2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus (D) est composé de trois parties [63]:

$$D_i = d_{ciel} + d_{sol} + d_{r\acute{e}trodiffuse} \dots \dots \dots (IV -77)$$

Rayonnement diffus de la part du ciel (d_{ciel})

$$d_{ciel} = \delta_a \cos(i) + \delta_i + \frac{\sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \dots \dots \dots (IV -78)$$

δ_d : La composante directe s'exprime par :

$$\delta_d = gne \exp[-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}] \dots \dots \dots (IV -79)$$

Avec : $a = 3.1 - 0.4b$

$$b = \log \tau' - 2.28 - 0.5 \log \sin(h) \dots \dots \dots (IV -80)$$

Où $\tau' = T_1 + T_2$

δ_i : La composante isotrope correspondant à un ciel de luminosité uniforme est donnée par :

$$\delta_i = D_h - \delta_a \sin(h) \dots \dots \dots (IV -81)$$

D_h : Le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

δ_h : correspond au cercle de l'horizon, donnée par :

$$\delta_h = gne \frac{-0.02a}{a^2 + ab + 1.8} \exp \sin(h) \dots \dots \dots (IV -82)$$

Où les facteurs a et b sont donnés par les termes :

$$a = \log T' - 3.1 (\sin(h))$$

$$b = [0.2 + 1.75 \log(\sin(h))]$$

Rayonnement diffus du sol (d_{sol}), représenté par la relation (IV -83) : [63]

$$d_{sol} = \delta_a \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \dots \dots \dots (IV -83)$$

: Hauteur de la normale au plan .

$$\gamma = 90 - \beta$$

La composante δ_a représente par :

$$\delta_a = \rho (I_h + d_h)$$

ρ : L'albédo du sol.

Rayonnement diffus rétrodiffuse ($d_{rétrodifuse}$) est donnée comme suit

$$d_{rétrodifuse} = \delta_r \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \dots \dots \dots (IV -84)$$

Utilise le terme δ_r donné par

$$\delta_r = 0.9(\rho - 0.2)(I_h + d_h) \exp\left(\frac{-4}{\sqrt{T^4}}\right)$$

3. Rayonnement global

$$G_i = I_i + D_i \dots \dots \dots (IV - 85)$$

IV.2.8. Modèle de CAPDEROU

Le modèle de Capderou [61] utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs des troubles.

A partir de ces facteurs, on peut exprimer les rayonnements directe et diffuse par ciel clair.

IV.2.8.1. Le facteur de trouble de Linke

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les Irradiations par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné

Par :

$$T^*_L = T_0 + T_1 + T_2 \dots \dots \dots (IV - 86)$$

Où T_0 : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Pour le calcul de ce facteur, Capderou à proposer l'expression suivante : [61-62-41-64-65]

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin(\varphi) + 0,1(2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0,2 z - (1,22 + 0,14 A_{he})(1 - \sin(h)) \dots (IV - 87)$$

$A_h = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(N_j - 121)\right)$ représente la variation saisonnière (degré)

T_1 : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O₂, CO₂, O₃) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par :

$$T_1 = 0,89^z \dots \dots \dots (IV - 88)$$

z : est l'altitude du lieu

T_2 : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption, il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β , T_2 est donné par :

$$T_2 = (0,9 + 0,4 A_{he})(0,63)^z : \dots \dots \dots (IV - 89)$$

z : est l'altitude du lieu

IV.2.8.2. Rayonnement reçu sur un plan horizontal**1. Rayonnement direct**

Le rayonnement directe par ciel clair obtenue sur un plan horizontal est donnée par:

$$I_h = I_0 \sin(h) C_{ts} \exp[-T^*_L (0.9 + \frac{9.4}{0.89Z} \sin(h))^{-1}] \dots (IV -90)$$

I_0 : Représente la constante solaire qui est par définition le flux énergétique reçu par une surface unité.

T^*_L : Est le facteur de trouble atmosphérique de linke.

C_{ts} : C'est la correction de distance terre-soleil définie par la relation suivant :

$$C_{ts} = 1 + 0.033 \cos(0.984 \times nj) \dots \dots \dots (IV -91).$$

2. Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus sur un plan horizontal est donné par l'expression suivante:

$$D_h = I_0 C_{ts} ((-1 + 1.06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2}) \dots \dots (IV -92)$$

Où : $a = 1.1$

$$b = \log(T^*_L - T_0) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(h))^2$$

3. Rayonnement global :

Le rayonnement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G_h = I_h + D_h \dots \dots \dots (IV -93)..$$

IV.2.8.3. Rayonnement global reçu sur un plan incliné**1. Rayonnement direct**

Le rayonnement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné [66]:

$$I_i = I_0 C_{ts} \cos(i) \exp(-T^*_L (0.9 + \frac{9.4}{0.89Z} \sin(h)) \dots \dots (IV -94)$$

2. Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus incident sur un plan incliné est donné par:

$$D_i = d_{ciel} + d_{sol} + d_{rétrodifusé} \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \dots \dots (IV -95)$$

Avec

d_{ciel} : Le diffus du ciel.

d_{sol} : Le diffus de sol.

$d_{rétrodifusé}$: Le diffus rétrodiffusé [67]

Le diffus du ciel d_{ciel} est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel et donnée par la relation suivante :

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \left(\frac{1 + \sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \right) \dots\dots (IV -96)$$

δ_d Est la composante directe ou circumpolaire. Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi-angle au sommet compris entre 3° et 15°. Elle peut être considérée aussi qu'elle provient directement du soleil [61, 68].

$$\delta_d = I_0 C_{ts} (-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}) \dots (IV -97).$$

Avec :

$$a = 3.1 - 0.4b$$

$$b = (T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h))$$

δ_i est la composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = D_h - \delta_d \sin(h) \dots\dots (IV -98)$$

D_h Est le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

δ_h Est la composante du cercle de l'horizon qui provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$\delta_h = I_0 C_{ts} \left(\frac{-0.02a}{a^2 + ab + 1.8} (\sin(h)) \right) \dots (IV -99)$$

Avec

$$a = \log(T_L - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h))$$

$$b = \exp(0.2 + 1.75 \log(\sin(h)))$$

d_{sol} : L'éclairement diffus du sol est caractérisé par l'albédo du sol qui indique la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque (α, γ).

$$d_{sol} = \delta_d + \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \dots\dots\dots (IV -100)$$

Ou

$$\delta_d = \rho G_h$$

G_h : est le rayonnement global horizontal.

$d_{rétrodifusé}$: Le diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol.

Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante :

$$d_{rétrodifusé} = 0.9(\rho - 0.2) G_h \exp \left(- \frac{4}{\sqrt{T^* L - T_0}} \right) \dots\dots\dots (IV -101).$$

3. Rayonnement globale :

Le rayonnement global reçu sur un plan incliné est donné par :

$$G_i = I_i + D_i \dots\dots\dots(IV -102)$$

IV.2.9. Modèle R. Sun

IV.2.9.1. Rayonnement global reçu sur un plan horizontal

1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair est donné par [69-70]

$$I_h = I_0 C_{ts} \exp[-0.8662 T_L^* m_a \delta_R (m_a)] \dots\dots (IV -103)$$

m_a : masse d'air

δ_R : L'épaisseur optique de Rayleigh respectivement.

2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus incident sur une surface horizontale est donné par :

$$D_h = I_0 T_n (T_L^*) F_d(\varphi) \dots\dots\dots (IV -104)$$

φ : Latitude de soleil.

L'estimation du facteur de transmission $T_n (T_L^*)$ permet d'obtenir une diffusion théoriquement claire sur une surface horizontale. L'expression suivante se présente sous la forme d'une fonction polynomiale du second ordre [71-72]

$$T_n (T_L^*) = -0.051843 + 0.030543 T_L + 0.0003797 T_L^2 \dots\dots\dots(IV -105)$$

F_d : La fonction de l'altitude solaire, elle est donnée par l'expression:

$$F_d (h_0) = A_1 + A_2 \sin(h_0) + \sin^2 (h_0) \dots\dots (IV -106).$$

A_i : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L^* corrigé. Définis par les expressions suivantes : [69-70]

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T_L + 0.0031408 T_L^2$$

$$A_1 = 0.0022 / T_n(T_L) \text{ Si } A'_1 T_n (T_L) > 0.0022$$

$$A_1 = A'_1 \text{ si } A'_1 T_n (T_L) \geq 0.0022$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_L - 0.011161 T_L^2$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_L - 0.0085079 T_L^2$$

3. Rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé comme suit :

$$G_h = I_h + D_h \dots\dots\dots(IV -107)$$

IV.9.2. Rayonnement global reçu sur un plan incliné

1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct normal sur un plan incliné I est obtenu en utilisant la relation suivante :

$$I_i = \frac{I_h \sin(\delta_{exp})}{\sin(h)} \dots\dots\dots(IV -108)$$

δ_{exp} Est la position du soleil par rapport à une surface inclinée.

2. Rayonnement diffus:

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes [73]

$$D_i = D_h F_B \dots\dots\dots(IV -109)$$

$$F_B = R_i + (\sin(\beta) - \beta \cos(\beta) - \pi \sin^2(\frac{\beta}{2})) N \dots\dots\dots(IV -110).$$

ou

$$R_i = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$$N = 0.00363 - 0.712 K_b - 0.6883 K_b^2 \dots\dots\dots(IV -111)$$

Où $K_b = \frac{I_h}{G_{oh}}$

$$G_{oh} = G_o \sin(h)$$

3. Rayonnement globale

Le rayonnement global sur un plan incliné est donné par la relation suivante :

$$G_i = I_i + D_i \dots\dots\dots(IV -112)$$

IV.2.10..Modèle Ashrae

Ashrae est un modèle empirique utilisé dans de nombreuses applications solaires dépendant de l'angle zénithal solaire θ_z et de certaines valeurs empiriques (A, B et C sont présentées dans le Tableau (4-2). Les équations suivantes expliquent de l'irradiante solaire globale G et le rayonnement solaire direct I_n au plan normale ainsi que le rayonnement solaire diffus D dans le plan horizontal :[74], sont donné respectivement par :

$$G = I_n \cos\theta_z + D \dots\dots\dots(IV -113)$$

$$I_n = A \exp\left(-\frac{B}{\cos(\theta_z)}\right) \dots\dots\dots(IV -114)$$

$$D = C \cdot I_n \dots\dots\dots(IV -115)$$

Tableau(4-2): A, B et C sont les valeurs recommandées par le modèle Ashrae :[74]

Mois	A	B	C
Janv	1230	0.142	0.058
Feb	1215	0.144	0.060
Mar	1186	0.156	0.071
Apr	1136	0.180	0.097
May	1104	0.196	0.121
Jun	1088	0.205	0.134
Jul	1085	0.207	0.136
Aout	1107	0.201	0.122
Sept	1152	0.177	0.092
Oct	1193	0.160	0.073
Nov	1221	0.149	0.063
Dec	1234	0.142	0.057

IV.2.11.Méthodes atmosphériques :

Ce sont un ensemble de relations théoriques utilisées pour le calcul du rayonnement solaire total ainsi que ses composantes en tenant compte des différents constituants de l'atmosphère.

Ces méthodes appelés les modèles atmosphériques, on peut les résumer comme suit :

-**Modèle 1** : Qui considère que l'atmosphère est reparti en un nombre de couches horizontales, il calcule les deux composantes directe et diffusée dans chaque couche [75].

-**Modèle 2** : c'est un ensemble de programmes pour déterminer les composantes du rayonnement solaire des différentes couches de l'atmosphère pour le cas ou les nuages n'existent pas, ces programmes se basent sur des lois physiques (diffusions Rayleigh et de Mie) [76].

-**Modèle 3** : c'est un modèle simple qui utilise les transmittances spectrales dues à la diffusion de Rayleigh [77].

- **Modèle 4** : modèle analytique qui se base, dans le calcul du rayonnement, sur les deux composantes directes et diffusée, et qui utilise comme point de départ la relation :

$$G = I \times \sin(h) + D \dots \dots \dots (IV -116)$$

IV.2.12.Modèle synthétique :

Ce modèle donne les composantes du rayonnement pour un beau temps en fonction d'un seul paramètre, par exemple, le facteur de trouble de Link (TL) [78],et parmi les modèles considérés par OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie), nous trouvons les relations suivantes :

- Eclairage global sur plan horizontal :[79]

$$G = \frac{(1300 - 57 \times T_L) \times (\sin(h)(36 + T_L))}{33} \dots \dots \dots (IV -117)$$

- Eclairage direct - normal

$$I = (1390 - 31 \times T_L) \times \exp\left[-\frac{T_L}{(12,6 \times \sin(h+2))} \right] \dots \dots \dots (IV -118)$$

- Eclairage diffus sur plan horizontal :[44],

$$D = 380 \times \exp\left(-\frac{4}{T_L}\right) (\sin(h) \frac{(T_L + 5,7)}{30}) \dots \dots \dots (IV -119)$$

A une heure donnée et pour le lieu considéré, on calcule la hauteur angulaire solaire, exprimée en degrés, et en choisissant TL.

IV.2.13.Méthodes qui utilisent les photos satellitaires

Ce sont des approximations récentes qui utilisent les images acquises par des satellites, parmi les premiers qui ont utilisés ces méthodes d'exploitation satellitaire on trouve Ellis et al :[80] qui ont travaillé avec des images de satellites à défilement. Puis, avec la mise en service du satellite géostationnaire GOES au-dessus de l'Amérique du Nord, les véritables initiateurs de cette méthodologie sont Tarpley :[81] et Gautier et al :[82].

Le premier a estimé à l'aide de méthodes statistiques, les irradiations horaires et journalières par le traitement de 7 à 10 images quotidiennes du canal visible du satellite GOES de la région des Grands Lacs des Etats-Unis, est basée sur les phénomènes d'absorption, de diffusion Rayleigh et de diffusion par l'eau. Par contre le second et son équipe ont développé, toujours avec les mêmes types d'images, un modèle physique " universel " d'estimation des irradiations globales horaires et journalières basé sur les échanges radiatifs. Les paramètres

utilisés sont principalement les points de rosée, les coefficients de diffusions de Rayleigh, l'absorbance des sommets de nuages. Ainsi, avec l'avènement d'autres satellites météorologiques tels que METEOSAT, GMS ou NOAA, plusieurs travaux d'équipes diverses ont utilisé des données de ces satellites [48].

IV.3..Conclusion :

Les modèles radiométriques :

les plus importants ont été présentés dans ce chapitre. Les modèles semi empiriques permettent de calculer les différentes composantes du rayonnement solaire au niveau du sol en utilisant comme paramètres d'entrée :

les paramètres astronomiques, les paramètres géographiques ainsi que les paramètres météorologiques. Les modèles météorologiques permettent de calculer l'irradiation globale et parfois diffuse au niveau du sol à partir de la moyenne mensuelle de l'insolation.

Ces modèles ont l'avantage d'être simples, ils utilisent des équations mathématiques pas trop lourdes pour l'étude de gisement solaire et l'estimation de l'énergie solaire incidente. Ils peuvent être appliqués généralement pour n'importe quelle région et n'importe quelle journée de l'année.

Les méthodes atmosphériques : méthodes qui utilisent les photos satellitaires, méthodes des paramètres géométriques et méthodes expérimentales. Nous exposons des modèles principales d'estimation du rayonnement solaire, telle que le modèle de Perrin de Brichambeaut, modèles semi-empiriques dans le cas du plan horizontal et modèle de Liu et Jordan dans un plan incliné.

Nous avons choisi dans notre projet pour l'estimation le modèle Davies –Hay.

Chapitre V :
APPLICATION

V -1. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

Nous proposons dans cette partie de présenter quelques résultats de modélisation numérique de l'effet des paramètres de géolocalisation sur les paramètres électrique d'une cellule photovoltaïque I(V) et P(V). On a utilisé le modèle proposée par Davies & Hay (figure 0) pour le calcul de l'intensité du rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi et global reçu par le sol. Les résultats sont présentés en termes de profils du courant et puissance en fonction de la tension électrique. Les paramètres de fonctionnement de la cellule photovoltaïque sont pris constants. Un code de calcul écrit en MATLAB a été utilisé pour la présentation des résultats (voir ANNEXE 1).

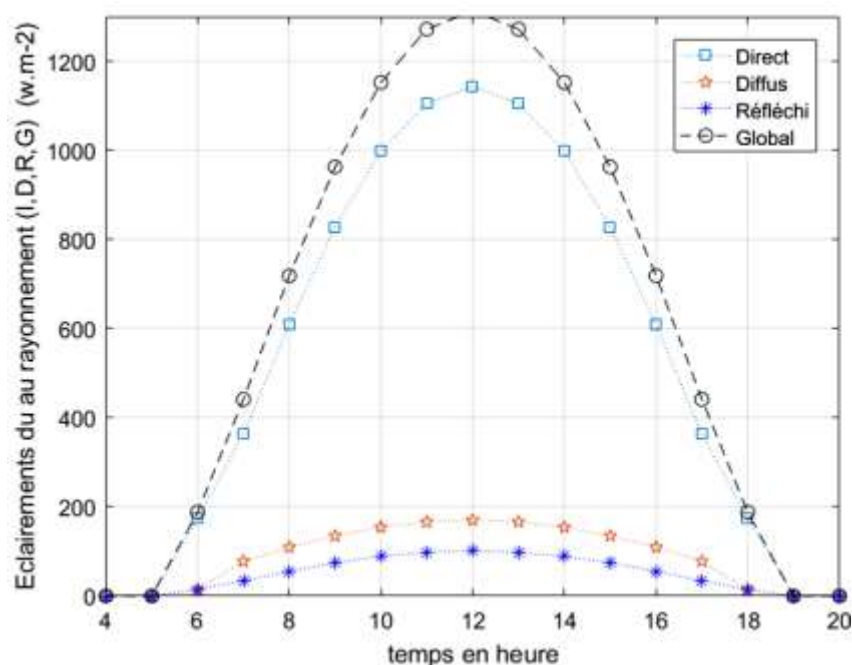


Figure (V-0) : profils du rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi et global selon le modèle de Davie&Hay a une échelle horaire

V -2. Algorithme de calcul :

1. Rayonnement direct

$$m_r = [\cos(\theta_z) + 0.15(39.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1}$$

$$U_0 = 1 - m_r$$

$$\alpha_0 = \frac{0.2118U_0}{10.042U_0 + 3.23 \cdot 10^{-4}U_0^2} + \frac{1.082U_0}{(1 + 138.6U_0)^{0.805}} + \frac{0.0658U_0}{1 + (103.6U_0)^3}$$

$$P = P_0 \times \exp(-0.0001184 \times Z)$$

$$m_a = \frac{p}{P_0} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \times z)}{\cos(\theta_z) + 0.15 (93.885 - \theta_z)^{-1.253}}$$

$$\tau_r = 0.972 - 0.08262 m_a + 0.00933 m_a^2 - 0.00095 m_a^3 + 0.000437 m_a^4$$

$$U_\omega = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right)$$

$$X_\omega = m_a U_\omega$$

$$\alpha_\omega = \frac{2.9 X_\omega}{(1 + 141.5 X_\omega)^{0.635} + 5.925 X_\omega}$$

$$\tau_a = (0.12445 \alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125 \alpha) \exp[-\beta m_a (1.089 \alpha + 0.5123)]$$

$$I = I_{sc} \times [(1 - \alpha_0) \tau_r - \alpha_\omega] \tau_a \cdot \cos(\theta_z)$$

2. Rayonnement diffus et réfléchi :

$$\tau_0 = 1 - \alpha_0$$

$$D_r = I_{sc} \tau_0 \tau_a (1 - \tau_r) 0.5 \cos(\theta_z)$$

$$D_a = I_{sc} (\tau_0 \tau_r - \alpha_\omega) \times [F_c \times \omega_0 (1 - \tau_a)] \cos(\theta_z)$$

$$\rho'_a = 0.0685 + 0.17 \omega_0 (1 - \tau'_a)$$

$$D_m = \frac{(1 + D_a + D_r) \times \rho \times \rho_a'}{(1 - \rho \times \rho_a')}$$

$$D_h = D_r + D_a + D_m$$

3. Rayonnement global

$$G_h = I_h + D_h$$

4. courant délivré par une cellule et la puissance

$$I_{Rs} = \frac{I_{oc}}{e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1}$$

$$I_0 = I_{Rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{kT} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}$$

$$I_{ph} = \left[I_{cc} + K_i (T - T_{ref}) \right] \frac{G}{G_{ref}}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V + R_s I}{N_s k T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

$$P = V \times I$$

Méthode du point fixe :

Pour la résolution numérique de l'équation non linéaire $I(V)$, on a utilisé la méthode du point fixe.

Le point fixe d'une fonction $\varphi(x)$ est un nombre réel α tel que $\varphi(\alpha) = \alpha$. Soit une fonction $f(x)$, on isole un terme contenant x de la sorte à pouvoir écrire $x_{new} = g(x_{old})$, ou bien $x_{n+1} = g(x_n)$. (c-à-d: $f(x) = x - g(x)$).

Algorithme :

0: **Input :** $x_0, \varepsilon, N_{max}, f(x), g(x)$

1: $N = 1$

2: **while** $N < N_{max}$, **do** step 3-9

3: **set** $x = g(x_0)$

4: **if** $|x - x_0| \leq \varepsilon$, **then**

5: **print** " après N itérations l'approximation obtenue est x et l'erreur maximale est $|x - x_0|$ "

6: **goto** 11

7: **endif**

8: **set** $N = N + 1$

9: **set** $x_0 = x$

10: **end while**

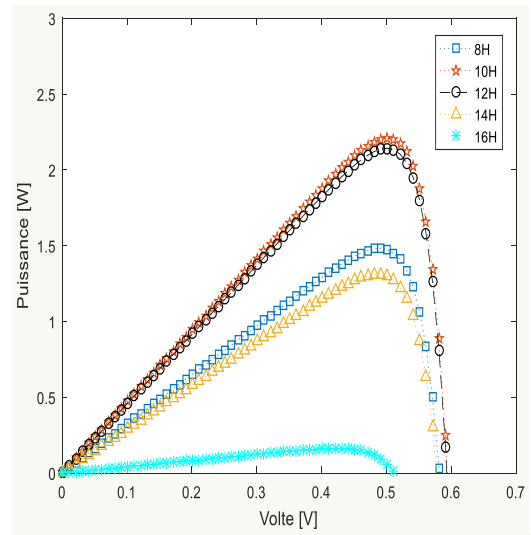
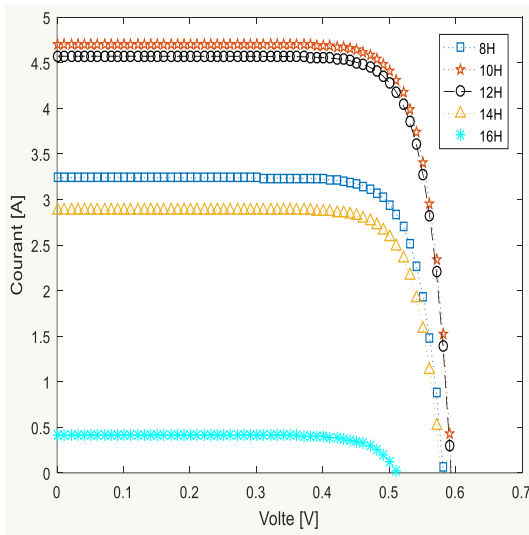
11: **end**

Effet du numéro de jour :

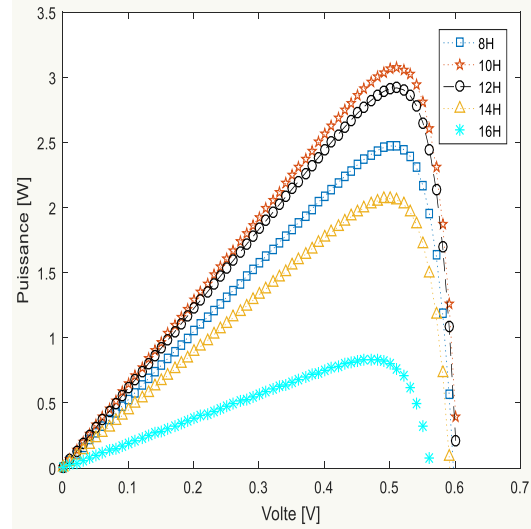
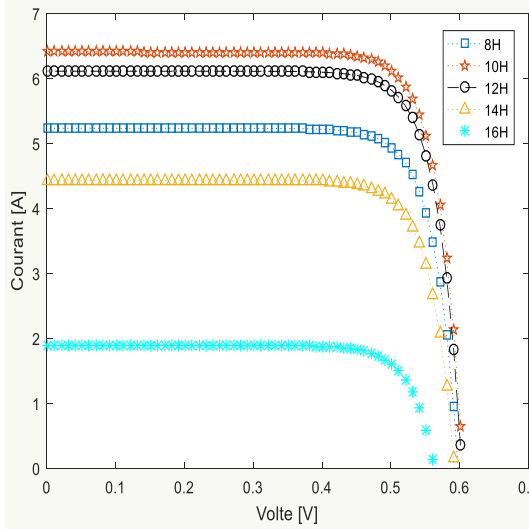
On fixe la latitude à 36° (BBA), l'altitude à ($z = 900$ m) et l'humidité à ($HR = 0.5$) et on varie le numéro de jours pour (15 février, 15 juin, 15 septembre) correspond à : $n_j = 46, 166, 258$ respectivement.

De la figure 1, les résultats montrent que le courant de circuit-ouvert I_{cc} et la puissance varie proportionnellement à l'ensoleillement. La tension à vide V_{oc} varie peu avec l'ensoleillement pouvant être considérée comme une constante la puissance maximale P_{max} est très sensible à l'horaires lorsque l'heure diminue de 16h, le courant I_{opt} est aussi très sensible à l'heure .

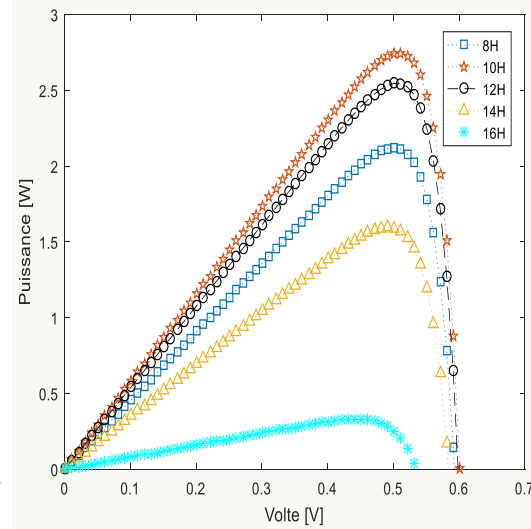
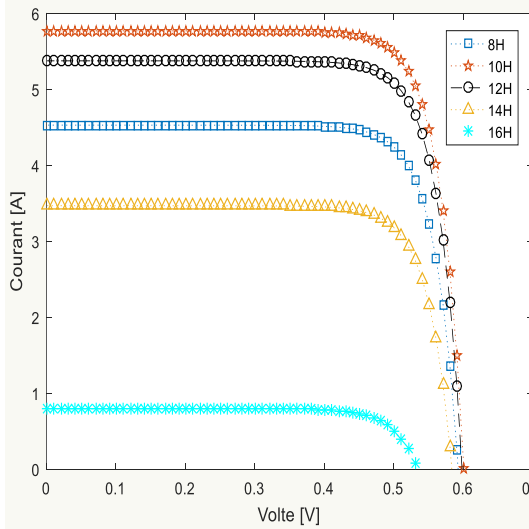
15 février



15 juin



15 septem bre



(a)

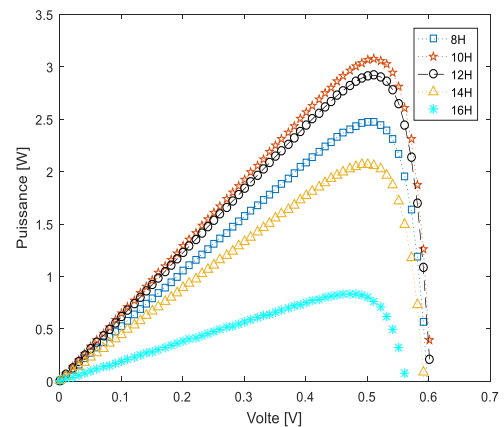
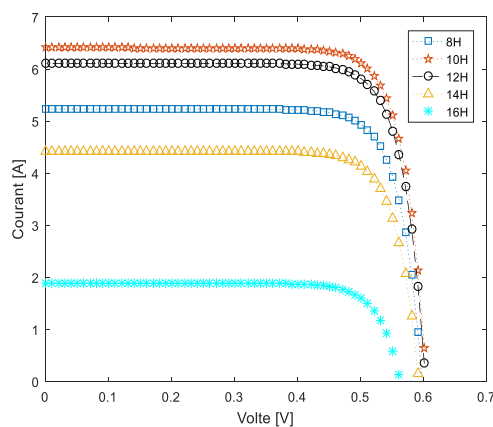
(b)

figure 1 : évolution de (a) : I(V) et (b) : P(V) pour différents jours de l'année

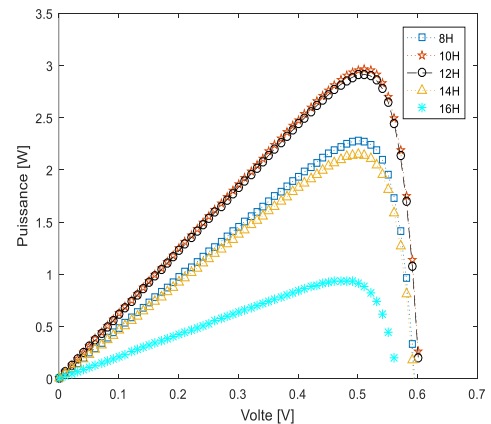
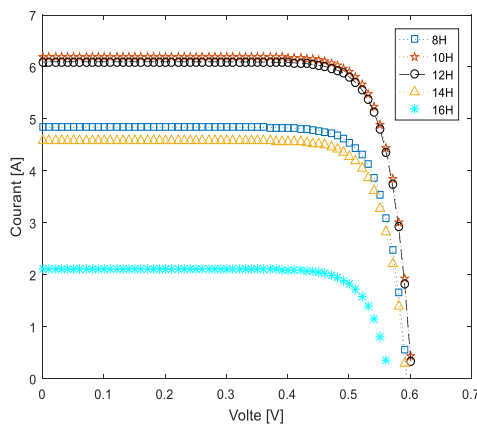
Effet de la latitude : On fixe le numéro de jours (15 Juin), l'altitude à ($z = 900$ m) et l'humidité à ($HR = 0.5$) et on varie la latitude du lieu pour (bordj Bou Arreridj, Ouargla, Tamanrasset). Les paramètres de fonctionnement de la cellule photovoltaïque sont pris constants.

D'après les résultats obtenus, figure 2, on remarque que : nous obtenons .Différentes courbes avec les mêmes puissances maximales au cours d'une différente latitude pendant la journée (15 juin). Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension, La puissance optimale de la cellule (PM) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Le rendement de la cellule PV est plus élevé dans latitude du sud (Tamanrasset et Ouargla) par rapport de BBA à cause de l'ensoleillement.

BBA



Ouargla



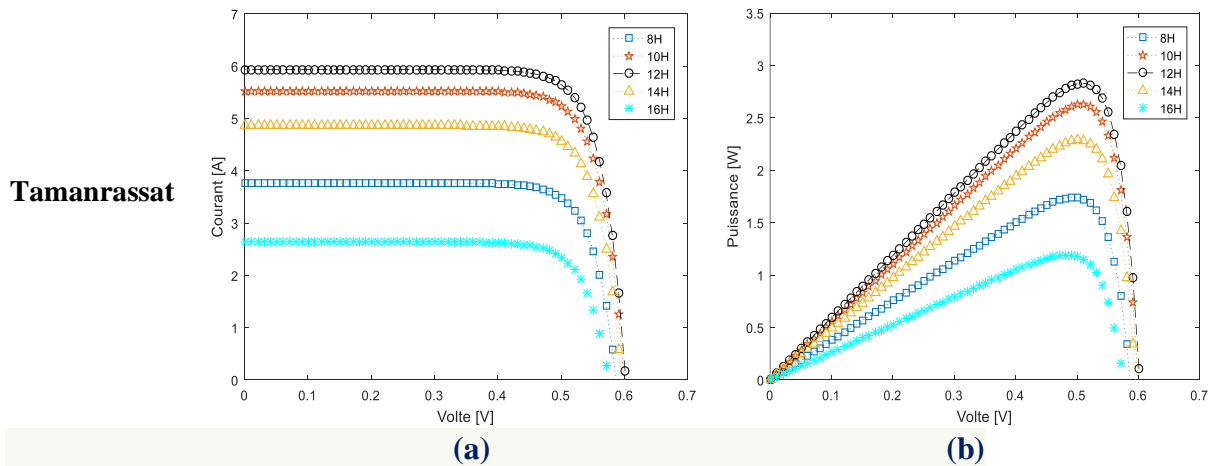


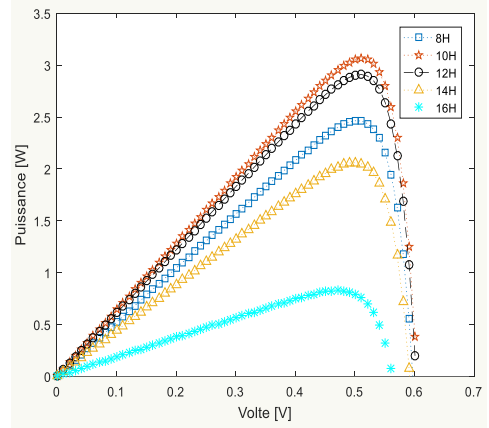
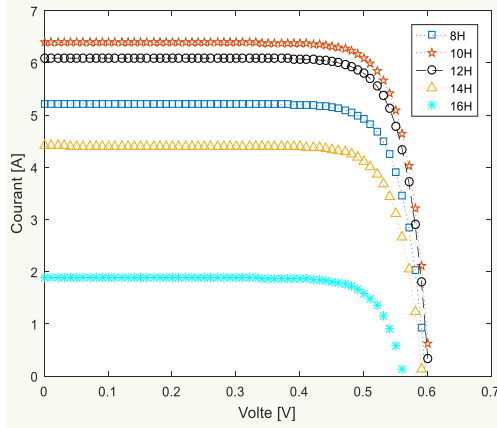
figure 2 : évolution de (a) : $I(V)$ et (b) : $P(V)$ pour différents latitudes

Effet d'altitude :

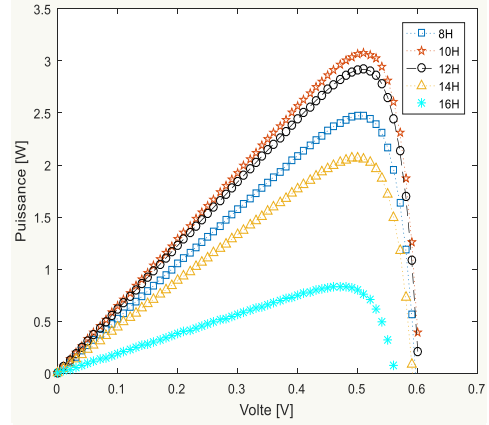
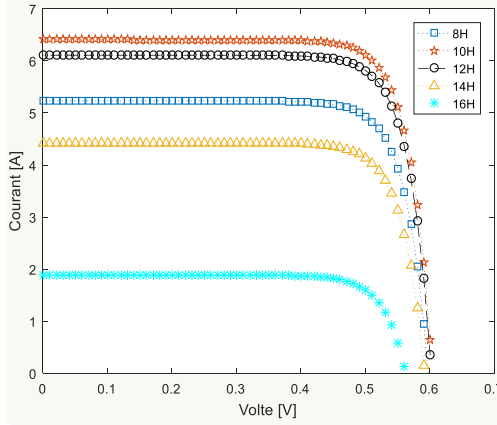
On fixe la latitude à 36° (BBA), le numéro du jour à 166 (15 Juin) et l'humidité à ($HR = 0.5$) et on varie l'altitude z ($z = 50m, 900m, 1500m, 10000m$).

Selon la distribution des profils de $I(V)$ et de $P(V)$ présentés sur la figure 3, on conclut que La tension de circuit ouvert V_{co} diminue avec l'augmentation de l'ensoleillement et inversement. le courant de court-circuit I_{cc} diminue en fonction de l'ensoleillement, si l'ensoleillement diminue le courant diminue et si l'ensoleillement augmente le courant augmente. la puissance maximale et diminue avec l'horaire de la journée fixe .on peut dire que la puissance varie proportionnellement à l'ensoleillement.

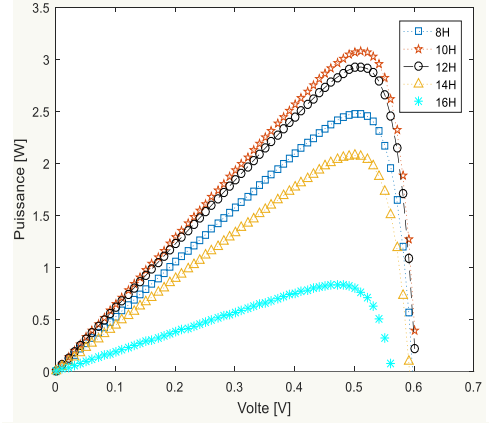
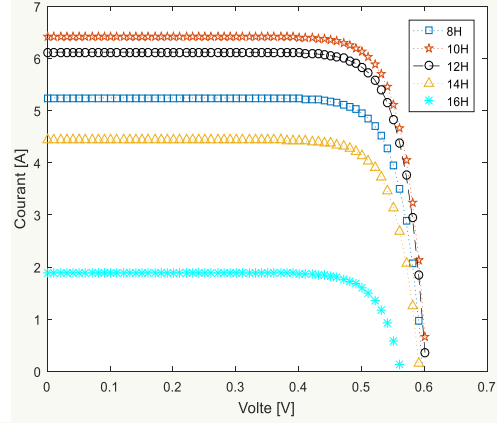
50 m



900 m



1500 m



10000 m

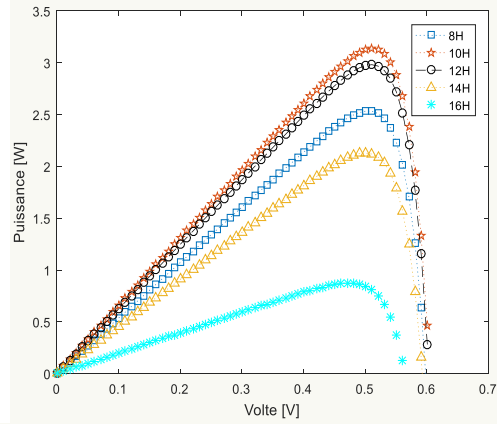
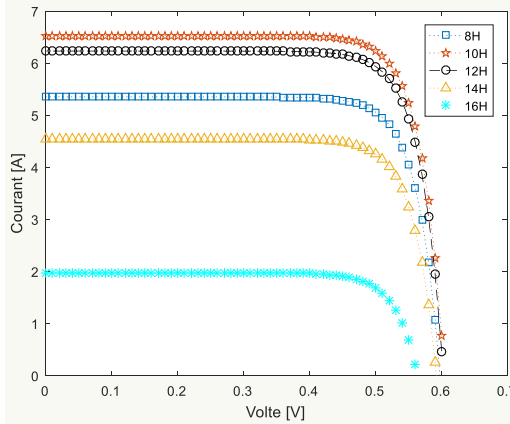


Figure 3 : évolution de (a) : $I(V)$ et (b) : $P(V)$ pour différents altitudes

Conclusion :

Nous avons présenté un ensemble de résultats obtenu par voie numérique, qui permettent de modéliser l'effet des paramètres de géolocalisation sur le rendement d'une cellule solaire. Nous avons utilisé le modèle proposée par Davies & Hay pour la présentation des résultats obtenus.

Les résultats de cette partie se résumant ainsi :le modèle deDavies & Hay donne des bonnes résultats qui permet un rendement plus élevée para port les autre modèles de calculs . L'effet de rendement et proportionnel à la situation géographique et les paramètres de localisation de lieu.

-L'objectif de ce travail est d'une simulation numérique avec le code MATLAB, afin de vérifier l'effet de des paramètres de localisation et géographiques sur le rendement d'une cellule solaire. Les résultats obtenus montrent que l'impact des paramètres de localisation et géographique sur le rendement et majeur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des plus essentielles parmi les différentes sources d'énergies existantes. Une connaissance de distribution du rayonnement solaire à un endroit géographique donné est très importante pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances : efficacité et durabilité, donc parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire apporte un atout favorable sur le développement du secteur énergétique d'un pays. Comme l'Algérie.

Dans ce travail, nous avons commencé par des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et la modélisation de la cellule.

Et ensuite le gisement solaire, sur le rayonnement solaire et l'atmosphère. Des telles notions sont nécessaires pour la mise en place des procédures de détermination de rayonnement solaire global, diffus, directe, réfléchi par plusieurs modèles pour les calculs.

Dans notre travail, nous avons testé un modèle mathématique semi empirique proposés par : Davies & Hay,. Ce modèles sont basés sur les données géographiques et météorologiques du site étudié, pour cela certains données utilisées pour leurs simulations ne sont pas disponibles, nous les avons considéré comme constantes.

A partir des résultats obtenus par ce modèle, nous avons constaté que Le rayonnement solaire global dans la région de Bordj Bou Arreridj varie fortement avec latitude et le numéro du jour, après la comparaison avec les valeurs, nous avons vu que le modèle (Davies& Hay) donne un bon résultat.

Dans un pays comme l'Algérie qui dispose un gisement solaire très important. Le photovoltaïque est sûrement un mode à suivre pour l'électrification des sites isolés. Alors, c'est le temps pour encourager l'investissement et la technologie en accord avec tous ce à une relation avec ce domaine à partir du développement des modules photovoltaïques de fabrication nationale à la formation des professionnels et spécialistes dans cette filière. Finalement on peut dire que l'utilisation d'énergie renouvelable demeure une stratégie Intelligente pour garantir des conditions de vie favorable aux générations futures.

Référence bibliographique

[1] "NEWS" de la Fédération Nationale des Travailleurs des Industries Electriques et Gazieres- FNTIEG N°67 , JANVIER 2011.

[2] HALOUANE, Assia. Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque. Mémoire Master. Université m'Hamed bougera boumerdes.2016/2017.

[3] OUBAZIZ, Jugurta Saïd et MONATY IBANDZO, Loucresh Yionel. . Modélisation des performances d'un panneau photovoltaïque (MINI-EESF).Mémoire Master. Université m'Hamed bougera boumerdes.2017.

[4] EDDINE, Touil Nacer et SLIMANE, Ghenbazi. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued. 2015.

[5] Ensoleillement en Belgique. 2006, eF4, pp. 1-1.

[6] KARKARINE, Abdelkader. Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque. Mémoire Master. Université badjimokhtar- annaba.2017..

[6] BAALLAOUI, Ahmed et MEHDI, Mohamed. L'importance et l'utilisation de la géologie dans l'exploitation des carrières (cas du gisement de koussan wilaya d'Adrar). Mémoire master. Université Abou bekrbelkaïd – TLEMCEN.2017.

[7] ABDEL, DJABOU ABDELLAH. Etude et mesure des données solaire d'un gisement solaire dans une zone isolée . Mémoire Master. Ahmed Daria Université Adrar.2015

[8] :<http://environmentgo.com/fr/utilisations-de-l'energie-solaire>

[9] C. Gautier, G. Diak, S. Masse, A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface from GOES Satellite Data. Journal of Applied Meteorology 19, 1005(1980).....

[10] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition>

[11] Ghbraoui Mouna et Haddag Mouna Simulation du rendement des différents types de cellules photovoltaïques en fonction de la température et l'éclairement Oum BOUAGUI 2020

- [12] Ghenissa Hocine Etude comparative de l'alimentation en électricité d'un site isolé par voie classique et système photovoltaïque cas de wilaya de Biskra Labreche Tolga .2014
- [13] DJENIDI ABDELKARIM, mémoire Master 2 « Etude d'un système Photovoltaïque Autonome » Université de Biskra 2013.
- [14] Dang Minh Trung « Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, études des systèmes reticulables ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux1, 2009.
- [15] philipe p agence paysage système photovoltaïque fabrication et impact environnemental juillet 2009
- [16] W. S. R. GREEN, M. A., Watt, M. E. "Applied Photovoltaics" Center of Photovoltaic Systems and Devices, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1994
- [17] Helali Kamelia, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative».
Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012
- [18] Messaouden hicham Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques 2013/2014
- [19] M. SLAMA Fateh, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique," UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-, 2011.
- [20] A.Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [21] W. S. R. GREEN, M. A., Watt, M. E. "Applied Photovoltaics" Center of Photovoltaic Systems and Devices, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1994
- [22] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [23] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.

[24] Charles Chauviagnet : L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981P22, 32 et p147-148.

[25] MR Maouedj Rachid, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah , Mémoire de magister, Université Abou BekrBelkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.

[26] <http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mepdf>

[27] Khoudrane Ismail ‘ ‘ Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ‘ ‘. Mémoire de master en énergétique. Université de KsdiMerbah Ouargla 2014.

[28] Beikacern, Fezzioui Naima, Energie solaire et capteur solaires Centre Universitaire de Béchar 2001.

[30] DUFFIE J. A. , BECKMAN W. A., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York,1974.

[31] :N. Benalouache" L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles" Thèse de docteur, Université de Sfax (2017).

[32]Mefti A., Bouroubi M.Y, Mimouni H.,(2002), « Evaluation du potentiel énergétique solaire », Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, pp.12, Décembre 2002

[33]A. Mefti, M.Bouroubi et A.Khellaf, « Analyse Critique du Modèle de l'Atlas de l'Algérie » Revue des Energies Renouvelables, 2(2), 69 – 85 (1999).

[34] :A GHILAS BRAHIMI .Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau

[35] M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi, ‘*Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclaircissements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair*’, Revue desEnergies Renouvelables Vol. 9 N°4 pp. 307 – 332 2006.

[36] T.K. Van Heuklon, ‘*Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models*’, Solar Energy, Vol. 22, N°1, pp. 63 – 68, 1979.

[37] M. Iqbal, ‘*An Introduction to Solar Radiation*’, Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, 1983.

- [38] J. A. Davies, J. E. Hay, «Calculation of the Solar Radiation Incident on a Horizontal Surface ». Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop. April 17-19, (1978). Canadian Atmospheric Environment Service, (1979).
- [39] M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi, «Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclaircissements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair», Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 pp. 307 – 332 (2006).
- [40] T.K. Van Heuklon, «Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models», Solar Energy, Vol. 22, N°1, pp. 63 – 68, (1979).
- [41] D. Saheb-Koussa, M. Koussa et M. Belhamel, «Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair», Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 pp 91 – 97,(2006).
- [42] M. Mächler, «Parameterization of Solar Irradiation under Clear Skies», M.A.Sc Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, (1983).
- [43] M. Iqbal, « An Introduction to Solar Radiation», Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, (1983).
- [44] **R.K. Swartman**, ‘Solar Radiation Estimates from Common Parameters’, Solar Energy, Vol. 11, pp. 170 -172, 1967.
- [45] **S.J. Reddy**, ‘An Empirical Method for Estimation of Net Radiation Intensity’, Solar Energy, Vol. 13, pp.289 - 291, 1971.
- [46] **A.A.M. Sayigh**, ‘Estimation of the Total Solar Radiation from Meteorological Data’, Solar Energy, Vol.19, pp. 307 - 311, Ed. Pergamon Press, 1977.
- [47] **H.P. Garget S.N. Garg**, ‘Prediction of Global Solar Radiation from Bright Sunshine Radiation Hours and Other Meteorological data’, Energy Conversion, Vol. 23, N°2, pp. 113 - 118, 1983.
- [48] **Hussain et al**, ‘Estimation of Global and Diffuse Irradiation from Sunshine Duration and Atmospheric Water Vapour Contents’, Solar Energy, Vol. 33, N°2, pp. 217 - 220, USA 984.
- [49] Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques

M. Mesri-Merad, I. Rougab, A. Cheknane et N.I. Bachari Département de Génie Electrique, Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur Université Amar Tilidji, Route de Ghardaïa, Laghouat, Algérie (reçu le 25 Février 2011 – accepté le 25 Septembre 2012. [50] M. Iqbal .Une introduction au rayonnement solaire, Academic Press, New York (1983) .

[51] J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', 3rd Ed. John Wiley and Sons, 2006.

[52] T.Muneer. Solar Radiation and Daylight Models . Elsevier Butterworth-Hermann Edition 2004 (chapitre 4.)

[53] B.Y.H. Liu et R.C.Jordan. L'ensoleillement quotidien sur des surfaces inclinées vers l'équateur, *Trans ASHRAE* 67 (1962), p. 529.

[54] Chanchal Kumar Pandey , A.K. Katiyar . A note on diffuse solar radiation on a tilted surface .Solar Energy 2009; volume 34 issue 11; pages 1764-1769.

[55] T.M. Klucher,. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces
Solar Energy (1979), volume 23; issue 2, pages.111-114.

[56] John E. Hay. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces .

Department of Geography, The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada
Solar Energy 1979; volume 23 issue 4; pages 301-307.

[57] Ralph C. Temps, K.L. Coulson .Solar radiation incident upon slopes of different orientations. . Solar Energy 1977.19(2):179-184.

[58] Efim G. Evseev, Avraham I. Kudish . The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. Solar Energy, March 2009, Pages 377-388.

[59] **A. Moumni et al**, 'Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra', 8ème Séminaire International sur la Physique Énergétique, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.

- [60] **R.E. Bird and R.L. Hulstrom**, 'Direct Insulation Models', Trans. ASME Journal of SolarEnergy Engineering, Vol. 103, pp. 182 - 192, 1982.
- [61] **Michel Capderou**, '*Atlas solaire de l'Algérie*', TOM 1, Vol 1 et 2, Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publication Universitaires, Algérie, 1987.
- [62] A.SFEIR, G.GUARRACINO, « ingénieur des systèmes solaires, application à l'habitat, techniques et documentation », Edition Paris, (1981).
- [63] D. Saheb-Koussa, M. Koussa et M. Belhamel, « Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair », Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 pp 91 – 97, (2006).
- [64] L. Diabaté, J. Remund, L. Wald, « Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa», Solar Energy, 75, 2003, 111-119.
- [65] F. Yettou , A. Malek , M. Haddadi, et A. Gama, «Etude Comparative De Deux Modèles De Calcul du Rayonnement Solaire Par Ciel Clair en Algérie », Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 331 - 346.
- [66] S. Benkaciali, K. Gairaa, «Techniques de modélisations de l'irradiation solaire sur un plan incliné», International Journal of ScientificResearch& Engineering Technology (IJSET), Vol.3-pp.102-108, (2015).
- [67] S.M.A. Bekkouche , « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires», Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen, (2009).
- [68] Y. El Mghouchi, « New model to estimate and evaluate the solar radiation», International Journal of Sustainable Built Environment, vol N°3, 2014, pp.225–234.
- [69] E .R. Bird, R.L.Hulstrom, « A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces», Seri Tr -642-761 February (1981).
- [70] J .Hofierka, M .Suri, «The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications», Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference (2002) - Trento, Italy, 11-13 September (2002).
- [71] A. Ricaud, «Gisement Solaire», Cythelia Sarl, Septembre (2009).

[72] E .Torlaschi, « Phénomènes Radiatifs dans L’atmosphère Terrestre», cours de Physique de L’atmosphère, (2003).

[73] A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, « Estimation du rayonnement solaire en ciel clair par des modèles empiriques: Application au site de Ghardaïa (Algérie) », 1st International Seminar On The Apport Of The Simulation In Technological Innovation, Ghardaïa (Algeria), Nov., 29-30,(2016).

[74] Mesri M., (2015), “Numerical methods to calculate solar radiation, validation through a new Graphic User Interface design”, *Energy Conversion and Management*, vol. 90: 436–445.

[75] N. Braslau, J. V. Dave, *J. Appl. Meteor* 12, 601 (1973).

[76] G.Ferran, Modélisation physique d’imagesde télédétection optique. Thèse de doctorat, Centre d’Études Spatiales de la Biosphère, Toulouse (2001).

[77] R. E. Bird, *Solar Energy* 32, 461 (1984).

[78] F. Linke, *Handbluchdergeophysik*, Borntrager Ed, Berlin 8, 239 (1929).

[79] Y. N’goran, Contribution à la modélisation du gisemen solaire. Thèse de doctorat, Université de Cocody Abidjan (2005).

[80] A. Ricaud, Photopiles solaires ; De la physique de la conversion photovoltaïque aux flières, matériaux et procedes. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne (1997)..

[81]J. D. Tarpley, *J. Appl. Meteor* 18, 1172 (1997).

ANNEXE

Programme de calculs :

```
clc
clear
close all
%***** données pour la cellule PV
K = 1.38e-23; % constante de Boltzmann (J.K-1)
q = 1.602e-19; % charge de l'électron (C)
Icc = 5.09; % Courant de court-circuit (A)
Vco = 0.601; % tension de circuit ouvert (V)
ki = 0.0032; % Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.
Ns=1% Nombre de cellules connectées en série dans un module
Np=1% Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module
Tf = 25+273; % température de fonctionnement
Tn = 25+273; % Température de référence (298 K)
Gn = 1000; % Irradiation de référence ( W/m²)
%G = [1000,800,600,400,200,100]; % Irradiation sur la surface de la cellule( W/m²)
Eg = 1.12; % Énergie de gap du semi-conducteur (1.12 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C)
a = 1.3; % Constante d'idéalité de la jonction (1<A<2)
Rs = 0.224; % résistance séries
Rp = 400.405; % résistance parallèle
% données sup.
C1=1 %input('entrer la valeur du décalage horaire C1= ');
C2=0 %input('l'heure d"été et d"hiver C2= ');
%% calcul de l'éclairement du au rayonnement direct I et diffus D et le
%% % % % % % modèle de Davies & Hay a une échelle horaire % % % % %
%% rayonnement global G a l'échelle horaire % % % % %
%% % Introduire les paramètres d'entrée du modèle % %
nj=166 %input ('donner le numéro du jour de l'année =');
lat=36 %input ('donner la valeur de la latitude lat=');
z=1000 %input ('donner la valeur de l'altitude z=');
lon=4 %input ('donner la valeur de la longitude lon=');
T=27 %input ('donner la valeur de la température en (c) T=');
HR=0.1 %input ('donner la valeur de l'humidité (<1)=');
```

```

rj=0.5 %input('donner la valeur de l'albedo du sol rj=');
T=T+273;
%constante solaire moyenne
cs=1367;
rd=pi/180;
%correction de la variation de la distance terre soleil
cts=1+0.034*cos(deg2rad((360/365)*(nj-3)));
%constante solaire corrigée
Csc=cs*cts;
cor=pi/180;
%calcul de la déclinaison du soleil
dec=23.45*sin(deg2rad(0.986*(nj+284)));
%coefficients d'extinction pour les longueurs d'ondes
%lambda =0.38 um et lambda =0.5 um
ka1=0.087;
ka2=0.069;
alpha=log(ka1/ka2)/log(0.5/0.38);
beta=ka1*(0.38^alpha);

wp=0.984*nj*rd;
g=0;
for j=1:24
g=g+1
    TL(j)=g;
%équation du temps ET
    ET=(-1E-4)*(2-
4797*cos(wp)+32265*cos(2*wp)+903*cos(3*wp)+73509*sin(wp)+93912*sin(2*wp)+3361*
sin(3*wp));
%temps solaire vrai TSV
tsv(j)=TL(j)-C1-C2+(ET+4*lat)/60;

%tsv(j)=g;
%angle horaire w
w(j)=15*(12-tsv(j));
%la hauteur du soleil h
    h(j)=asin(sin(lat*cor)*sin(dec*cor)+cos(dec*cor)*cos(w(j)*cor))/cor;
if h(j)<0
h(j)=0
end
%la distance zenithal
tz(j)=90-h(j);
%la mass d'air relative
mr(j)=[cos(cor*tz(j))+0.15*((93.885-tz(j))^-1.253)]^-1;
%la hauteur d'eau condensable
ps=exp(26.23-(5416/T));
ww=(0.493*HR*ps)/T;
%l'épaisseur d'eau condensable
Uw(j)=ww*mr(j);

```



```

    ta=(0.12445*alpha-0.0162)+(1.003-0.125*alpha)*exp(-
beta*mal*(1.089*alpha+0.5123));
%albedodu ciel clair ra
ra=0.0685+0.17*(1-ta)*wo;
%*****
*****
% % % % % % % % éclairement issu phénomène de multi réflexion terre
% % % % % % % % atmosphère Dm
%*****
*****
    Dm(j)=(Id(j)+Dr(j)+Da(j))*(rj*ra/(1-(rj*ra)));
%*****
*****
% % % % % % % % éclairement du au rayonnement diffus
%*****
*****
    D(j)=Dr(j)+Da(j)+Dm(j);
%*****
*****
% % % % % % calcul de l'éclairement du au rayonnement global G
%*****
*****
G(j)=Id(j)+D(j);
GG(j)=G(j);
end
% graphes

for j=8:2:16
% équations standard dans les documentations
Vtn = Ns*(K*Tn/q); % potentiel thermodynamique (V)
Ion = Icc/((exp(Vco/(a*Vtn)))-1); % Ip = IRsh: Courant shunt : Le courant de saturation
inverse de la diode (A)
Io = Ion*((Tf/Tn)^3)*exp(((q*Eg/(a*K))*((1/Tn)-(1/Tf)))); % Le courant de saturation (A)
Iphn = Icc;
Iph = (Iphn +ki*(Tf-Tn))*(GG(j)/Gn); % Le photo-courant (A)
Vt = Ns*(K*Tf/q);
dimen = Vco:-0.01:0;
I = zeros(size(dimen));
i = 1;
I(1) = 0;
for V = Vco:-0.01:0 % calcule du courant entre 2 points 1-circuit ouvert
% *** V=max 2-court circuit V=0.
I_part=Io*(exp((V+(I(i)*Rs))/(Vt*a))-1) + ((V+(Rs*I(i)))/Rp);
I(i)=Iph-I_part; % I(V)

% I_part=Np*Io*(exp((V+(I(i)*Rs))/(Ns*Vt*a))-1) + Np*((V+(Rs*I(i)))/Rp);
% I(i)=Np*Iph-I_part; % I(V)

% I_part=Np*Io*(exp((V+(I(i)*Rs*Ns/Np))/(Vt*a))-1) + ((V+((Rs*Ns/Np)*I(i)))/Rp*Ns/Np);
% I(i)=Np*Iph-I_part; % I(V)

```



```

V1(i)= V;
P(i) =V*I(i); % P(V)
i=i+1;
end
V=V1;
figure (1)
if j==8
plot (V,I,'b*')
hold on
end
if j==10
plot (V,I,'r*')
hold on
end
if j==12
plot (V,I,'y*')
holdon
end
if j==14
plot (V,I,'m*')
holdon
end
if j==16
plot (V,I,'c*')
hold on
end
axis ([0 0.7 0 8])
xlabel ('Volte [V]')
ylabel ('Courant [A]')
legend('8H','10H','12H','14H','16H')

```

hold on

```

figure (2)
if j==8
plot (V,P,'b*:')
hold on
end
if j==10
plot (V,P,'r*:')
holdon
end
if j==12
plot (V,P,'y*:')
hold on
end
if j==14
plot (V,P,'m*:')
hold on

```

```
end
if j==16
plot (V,P,'c*')
hold on
end
axis ([0 0.7 0 5])
xlabel ('Volte [V]')
ylabel ('Puissance [W]')
legend('8H','10H','12H','14H','16H')
hold on
end
```

```
figure (3)
plot(tsv,Id,'square:',tsv,D,'pentagram:',tsv,Dm,'b*:',tsv,G,'k--o')
legend('Direct','Diffus','Réfléchi','Global')
xlabel('temps en heure')
ylabel('Eclairements du au rayonnement (Id,D,R,G) (w.m-2)')
%axis([4 20 0 1300])
Grid on
```

Résumé :

Il est nécessaire, pour caractériser des modules photovoltaïques, d'avoir une connaissance approfondie sur le comportement électrique des différents cellules photovoltaïques et également sur les conditions climatiques, atmosphériques et géographiques. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'évaluation de l'impact des paramètres relatifs à l'environnement et aux paramètres de géolocalisation sur la conversion photovoltaïque à travers l'analyse de la caractéristique courant – tension et puissance-tension en utilisant le model de Davies & Hay pour la modélisation du rayonnement solaire et par conséquent, la modélisation du photo courant issue de la cellule photovoltaïque. Pour un bon rendement photovoltaïque, Les résultats conclus de notre étude citent l'importance de se mettre sous un éclairage élevé qui nécessite un bon choix des conditions climatiques et atmosphériques et des caractéristiques de la ressource en énergie solaire disponible, ainsi que, des coordonnées géolocalisation parfaites.

Mots-clés : Photovoltaïques, , Rayonnement, Matlab, Modèle de Davie -Hay, simulation

Abstract:

It is necessary, to characterize photovoltaic modules, to have an in-depth knowledge of the electrical behavior of the various photovoltaic cells and also of the climatic, atmospheric and geographical conditions. The objective of this work is to contribute to the evaluation of the impact of parameters relating to the environment and geolocation parameters on photovoltaic conversion through the analysis of the current-voltage and power-voltage characteristic using the Davies & Hay model for modeling solar radiation and therefore modeling the photocurrent from the photovoltaic cell. For a good photovoltaic yield, the concluded results of our study cite the importance of placing oneself under high illumination which requires a good choice of climatic and atmospheric conditions and the characteristics of the available solar energy resource, as well as perfect geolocation coordinates.

Keywords: Photovoltaics, , Radiation, Matlab, Davie -Hay model, simulation

ملخص

من الضروري ، لتوصيف الوحدات الكهروضوئية ، أن يكون لديك معرفة متعمقة بالسلوك الكهربائي لمختلف الخلايا الكهروضوئية وكذلك بالظروف المناخية والجوية والجغرافية. الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تقييم تأثير المعلمات المتعلقة بالبيئة ومعلومات تحديد الموقع الجغرافي على التحويل الكهروضوئي من خلال تحليل خصائص التيار مع الجهد و لنمذجة الإشعاع الشمسي و بالتالي نمذجة التيار الضوئي من الخلية Davies & Hay الطاقة مع الجهد باستخدام نموذج الكهروضوئية. للحصول على إنتاجية كهروضوئية جيدة ، تشير النتائج النهائية لدراستنا إلى أهمية وضع المرء تحت إضاءة عالية مما يتطلب اختيارًا جيدًا للظروف المناخية والجوية وخصائص مصدر الطاقة الشمسية المتاحة ، بالإضافة إلى مثالية إحداثيات تحديد الموقع الجغرافي.

الكلمات المفتاحية : الخلايا الكهروضوئية ، الإشعاع ، ماتلاب ، نموذج ديفيز و هاي ، المحاكاة