



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2021

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en Electrotechnique

Par

HOUIDEF Mohamed et CHEHAT Bendehiba

**Étude théorique et expérimentale de l'effet des paramètres climatiques
sur le rendement des modules photovoltaïque**

Soutenu le 07/07/ 2021 devant le jury composé de

Président	Mr. Abdelkader BOUKORTT	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur	Mr. Baghdad HADRI	Professeur	Université de Mostaganem
Rapporteur	Mr Saïd MESKINE	MC A	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2020/2021

Résumé

Le développement de production de l'énergie des systèmes photovoltaïques est incontournable dans les zones urbaines et moins urbaines. Notre pays dispose d'une superficie de plusieurs milliers de kilomètres carrés avec un climat variable tout au long de l'année. Mettre les systèmes photovoltaïques au bon endroit nécessite d'étudier l'impact des conditions climatiques et internes sur les performances des panneaux solaires, ce qui est essentiel pour comprendre le comportement de notre système ainsi que pour améliorer et optimiser les performances globales et la durée de vie de notre système énergétique.

MOTS CLES: Panneaux photovoltaïques, modélisation, batterie, gestion de l'énergie, température, performance, rendement.

Abstract

The development of energy production from photovoltaic systems essential in urban and less urban areas. Our country has an area of several thousand square kilometers with a variable climate throughout the year. Putting photovoltaic systems in the right place requires studying the impact of climatic and internal conditions on the performance of solar panels, which is essential to understand the behavior of our system as well as to improve and optimize the overall performance and duration of the solar panel, life time of our energy system.

KEYWORDS: Photovoltaic panels, modelling, batteries, energy management, temperature, performance, rendement.

ملخص

تطوير انتاج الطاقة من النظم الكهربائية الضوئية مهمة أساسية في الخدمة العامة في المناطق الحضرية وأقل حضرية ، بلدنا لديه مساحة شاسعة بالآلاف من الكيلومترات المربعة بمناخ متغير على مدار السنة ، ووضع الانظمة الكهربائية الضوئية في المكان المناسب يحتاج الى دراسة تأثير الظروف المناخية والداخلية لاداء الألواح الشمسية وهو أمر بالغ الأهمية لفهم سلوك نظامنا وكذلك تحسين الأداء العام وحياة نظام الطاقة لدينا .

كلمات مفاتيح : اللوحات الضوئية ، النمذجة ، البطاريات ، تسيير الطاقة ، الحرارة ، الكفاءة ، المرودية

Remerciements

Nous tenons premièrement à remercier avec prosternation, Allah le tout puissant de nous donner le courage et la patience pour terminer ce travail.

Cette thèse est le résultat de l'engagement de plusieurs personnes qui nous accompagnent dans ce passionnant parcours. Nous profitons de cette occasion pour leur exprimer toute notre gratitude et notre reconnaissance.

Nous tenons tout d'abord à remercier sincèrement notre Encadreur, le Professeur Saïd MESKINE pour avoir dirigé nos travaux de recherche ainsi que pour leurs disponibilités, leur patience et leurs précieux conseils. Nous remercions aussi les membres de jury les Professeurs : Mr. Abdelkader BOUKORTT, Mr. Baghdad HADRI d'avoir acceptés de juger ce modeste travail.

Enfin, nous nous permettons d'adresser nos remerciements à notre très chère famille

À qui nous dédions ce travail. Merci à nos parents qui nous ont toujours soutenu et accompagné, tout au long de ce chemin, nous remercions également tous nos frères, sœurs et amis pour leurs encouragements.

Sommaire

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	11
Chapitre I : Énergie Solaire - Les Bases Théoriques	13
1. Introduction :	14
2. Le soleil et l'énergie solaire	15
2.2. Le rayonnement solaire à la surface de la terre.....	17
2.3 Méthodologie de mesure du rayonnement solaire à la surface de la terre et données d'ensoleillement ..	19
2.4 Les principes physiques de la conversion du rayonnement solaire en chaleur ou en électricité	21
2.4.1 L'interaction rayonnement-matière	21
2.4.2 Les principes physiques pour une conversion thermique efficace	25
2.4.3. La conversion photovoltaïque	27
2.4.4. Qu'est-ce qui limite le rendement d'un capteur photovoltaïque ?	31
4. Conclusion	32
Chpaitre II. Etude par simulation de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des modules photovoltaïque. 33	
Introduction	34
La Bibliothèque PVLib-Python	34
I. Modélisation des performances PV	35
I.1. Modèles de circuits équivalents :	35
I.1.1. Le modèle De Soto :	36
I.1.2. Le modèle PVSyst :	37
I.1.3. Le Modèle SAPM (Sandia PV Array Performance Model) :	38
I.2. Les modèles météorologiques :	39
I.2.1. Les Observations météorologiques.....	39
I.2.2. Les Modèles de températures :	44
I.2.2.1. Modèle de température du module Sandia :	44
I.2.2.2. Modèle de température du module Faiman :	45
I.2.2.3. Modèle de température de cellule Sandia:	45
I.2.2.4. Modèle de température de cellule PVSyst :	45
I.2.3. Les modèles ciel clair :	46
I.2.3.1. Modèle Ineichen/Perez :	46
I.2.3.2. Le Modèle Solis Simplifié :	46
I.2.4. Les Modèles de ciel nuageux :	47
I.3. Modèles d'estimation DNI :	47
I.3.1. Modèle DISC :	47
I.3.2. Modèle DIRINT :	48
I.4. Les Modèles de Prévision :	48
I.4.1. Le modèle GFS.....	49
II. Simulation des performances PV :	49
II.1. Collection des données météorologiques	50
II.2. Calcul l'Énergie de PV Avec le modèle Ineichen/Perez:.....	50
II.3. Calcul l'Énergie de PV Avec le modèle GFS:	52
II.4. Calcul d'énergie de PV Avec le modèle PVGIS:	52
III. Résultats & discussions :	53
IV. Conclusion	54
Chapitre III : Etude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des modules photovoltaïque	55
1.Introduction	56
2.Moyens utilisés pour l'étude.....	56
Arduino uno :	56
Détecteur de chaleur & humidité DHT	57
Code d'exemple :	57
Résistance de chauffage	58
Mesure la tension en circuit ouvert (Voc) :	58
Le code Principale :	59
4.Les caractéristiques courant-tension mesurées et simulées.....	60
5.L'influence de la température sur la caractéristique courant-tension	63
<i>Conclusion générale</i> :	66
Bibliographie	68

Liste Des Figures

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Soleil et l'energie solaire [2]	15
Figure I.2: Spectre du soleil terrestre et extra-terrestre et comparaison avec le spectre du corps noir à 5900K [3]	16
Figure I.3: Première cause de variation du flux d'énergie solaire à la surface de la terre : sa rotation sur elle-même et sa révolution autour du soleil [2]	17
Figure I.4: Meilleurs sites pour l'installation des modules PV [2]	18
Figure I.5: Cartographies d'irradiation solaire (GHI) pour l'Algerie	20
Figure I.6: Cartographies d'irradiation solaire (DNI) pour l'Algerie	20
Figure I.7: Le transfert d'énergie entre le photon et l'électron : l'effet photoélectrique	21
Figure I.8: Schéma des bandes électroniques dans les différentes classes de matériaux (Isolants, Semi-conducteurs et conducteurs)	22
Figure I.9: Utilisation de l'effet de serre dans un capteur solaire pour minimiser les pertes par rayonnement. .	25
Figure I.10: Création de niveaux énergétiques proches de la bande de conduction (matériau de type n)	27
Figure I.11: Création de niveaux énergétiques proches de la bande de valence (matériau de type p)	28
Figure I.12: Schéma de principe d'un capteur photovoltaïque avec la jonction n/p, la photo-génération de paires Electron-Trou [2]	29
Figure I.13: Profil d'énergie dans un capteur photovoltaïque de type n/p et circulation des charges photo-générées.....	29
Figure I.14: Caractéristiques typiques Courant-Tension d'un capteur Photovoltaïque en fonction de l'irradiance.	30
Figure II.1: circuit équivalent de modèle à diode unique	35
Figure II.2: circuit équivalent de la perte de courant	38
Figure II.3: Le Modèle SAPM (Sandia PV Array Performance Model)	39
Figure II.4. Prédiction de la température de l'air de 06 a 08/06/2021	40
Figure II.5. RTD	40
Figure II.6. un anémomètre	41
Figure II.7. Prédiction de la vitesse du vent du 06 a 08/06/2021.....	41
Figure II.8. Les précipitations moyennes annuelles en Algerie.....	42
Figure II.9 : Prédiction des nuages (%)	43
Figure II.10. La turbidité de link simulé par PVLlib	44
Figure II.11: Carte de potentiel d'Algérie	52
Figure II.12 :) Carte de potentiel d'énergie Simulé par PVLlib +PVGIS	52
Figure II.13: Potentiel d'énergie Simulé par PVLlib +PVGIS	52
Figure III.1: Arduino uno	56
Figure III.2: DHT22	57
Figure III.3 : l'utilisation de détecteur de chaleur & humidité	59
Figure III.4 : unité de mesure : $I = f(V)$	61
Figure III.5 : Caractéristiques I-V mesuré et simulé	62
Figure III.6: les caractéristiques courant-tension et puissance tension simulées	64
Figure III.7: la configuration expérimentale	64

Liste Des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau II-1 :les valeurs représentatives des paramètres a et b	44
Tableau III-1 Tension et courant mesurés.....	62

Introduction générale

Introduction générale

Le climat à une forte influence, non seulement sur la température de cellule, mais aussi sur l'irradiation globale annuelle, à savoir l'irradiation reçue en un lieu par an. La connaissance de cette irradiation est importante si on veut apprécier la rentabilité d'une installation de module PV.

Dans cet objectif, notre travail s'articule autour du besoin de comprendre l'influence des paramètres climatiques sur les caractéristiques électriques et fonctionnement de module photovoltaïque, à l'aide de bibliothèque de simulation PVLIB-Python ainsi que par étude expérimentale.

L'augmentation constante du potentiel de performance à l'énergie solaire est un facteur fondamental pour assurer leur compétitivité, pour cet objectif, l'énergie électrique produite à partir du soleil est devenu l'un des facteurs les plus importants dans la société moderne. La disponibilité d'une énergie moins chère et plus écologique dans le monde entier est un défi central. L'expansion de l'utilisation de l'énergie renouvelable est une étape logique dans l'utilisation durable des ressources disponibles.

Comme dans toute autre domaine technique, la part de l'énergie solaire dans le bouquet énergétique est l'avenir de l'économie, elle dépend largement de son coût sur le marché. Leur réduction est à travers l'amélioration des méthodes existantes permet d'évaluer le potentiel des nouvelles énergies et la mise en œuvre de l'énergie possible.

Les coûts d'installation pour la production d'énergie électrique d'origine solaire n'ont pas encore atteint le niveau des coûts des autres producteurs qui alimentent les réseaux. De ce fait, le coût de production de 1 kWh est encore supérieur au prix moyen de l'électricité en Algérie, en résulte que le photovoltaïque s'est principalement développé jusqu'à maintenant par l'acquisition de petites parts de marché, ou « niches économiques ». Il s'agissait principalement de l'alimentation des consommateurs isolés, non raccordés au réseau, pour lesquels l'alternative photovoltaïque était économiquement intéressante. Une partie de ces installations concernent des consommateurs relativement modestes, tels que chalets de week-end, éclairage public, stations de pompage, signalisation routière et ferroviaire, etc. Leur puissance photovoltaïque installée varie entre quelques dizaines et quelques centaines de watts, et le stockage s'effectue habituellement avec des batteries.

Dans ce travail de mémoire, nous nous intéressons spécifiquement au changement du rendement des modules PV, en étudiant la relation entre les facteurs climatiques et l'efficacité de ces modules.

L'objectif de ce mémoire est donc de proposer, en prenant le moins de mesures possibles pour respecter les contraintes économiques, une technique électronique pour la détection et l'identification des lieux climatiques qui conduisent à une diminution de la

production. Il existe des systèmes de monitoring qui permettent de calculer la puissance fournie par les panneaux et l'énergie associée par l'intermédiaire des capteurs de tension et de courant. Il existe même des services qui permettent de faire la corrélation entre la production d'une installation et les conditions météorologiques, mais elle montre des limites, car elle ne permet pas de détecter et de localiser dans un temps bref, suite à l'apparition d'un défaut quelconque dans les différentes parties des panneaux et des installations.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre a pour but de présenter l'énergie solaire et ses utilisations avec une démonstration théorique plus détaillés sur l'énergie solaire photovoltaïque, panneaux et cellules photovoltaïques et leurs principales caractéristiques et fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients et l'importance de l'énergie solaire afin de présenter la source la plus importante pour notre pays, ainsi que le potentiel énergétique de notre pays.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un module photovoltaïque pour obtenir la caractéristique IV (modèle d'une seule diode). dans ce chapitre, les différents outils de simulation existants qui permettent d'obtenir la caractéristique I-V d'un champ PV ou un module est cité. Nous proposons un traitement et une interprétation des effets de paramètres climatique sur un panneau solaire, dont la détermination de ses performances a été faite sur la base d'une étude de la mesure de certaines de ses caractéristiques, tel que le courant-tension et température de cellules.

Le troisième chapitre résume l'étude expérimentale sur la variation des performances du module PV avec le changement différentes conditions climatologiques : température ambiante, éclairement...

Finalement, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale.

Chapitre I : Énergie Solaire - Les Bases Théoriques

1. Introduction :

La conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique, électrique ou chimique, pour nos usages, recouvre ce que l'on a coutume d'appeler l'énergie solaire. Cette énergie est devenue au fil du temps une des sources d'énergies renouvelables majeures au côté de la biomasse, de l'énergie hydraulique ou de l'énergie éolienne.

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à l'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde.

L'usage de l'Énergie solaire reste à ce jour assez faible si on la compare aux autres sources d'énergie. Même parmi les énergies renouvelables, elle reste encore minoritaire, ce qui est matière à paradoxe puisque la captation du rayonnement solaire reçu à la surface de la terre est de loin la ressource la plus abondante parmi toutes celles qui nous sont offertes.

Pour comprendre les différents modes de conversion du rayonnement de notre astre, des bases théoriques sont indispensables. On les acquiert en partant de la ressource, à savoir l'énergie issue de notre étoile et reçue à la surface de la terre, puis en explicitant les principes physiques régissant l'interaction entre le rayonnement et la matière lesquels conduisent à la conversion de ce rayonnement en chaleur ou en électricité dans les différents corps.

La conversion de la lumière en électricité, exploitant l'effet photovoltaïque, est découverte par Edmond Becquerel en 1839 [1], mais il faut attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène physique. En 1875, Werner von Siemens expose devant l'Académie royale des sciences de Prusse un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

En 1913, William Coblentz [2] dépose le premier brevet pour une cellule solaire, qui ne pourra jamais fonctionner. En 1916, Robert Andrews Millikan est le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire, mais pendant les quarante années suivantes, personne ne fera beaucoup de progrès en énergie solaire car les cellules photovoltaïques ont un trop faible rendement pour transformer la lumière du territoire en énergie. Le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

L'énergie qui atteint la terre peut être estimée par l'application de certaines lois fondamentales de la physique, en supposant que le soleil comme un émetteur corps noir, la température de la surface du soleil peut être estimée en utilisant la loi de déplacement de Wien pour la distribution de la longueur d'onde du rayonnement thermique à partir d'un corps noir [3].

$$\lambda_{max} = \frac{0,0029}{T} \quad (I.1)$$

0,0029 la constante de Wien (K en Kelvin. nm). T c'est la température de soleil en kelvin, et λ_{max} est la longueur d'onde d'émission d'intensité maximale en unité de nanomètres.

La radiation spectrale totale d'un (sphérique) radiateur corps noir idéal maintenu à une température d'environ 5780 K est donnée par la formule de Planck.

$$P(\lambda) = 2\pi \frac{hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/(k_b T \lambda)} - 1)} [Wm^{-2}nm] \quad (I.2)$$

h la constante de Planck ($6,623 \cdot 10^{-34}$ J.s), C vitesse de la lumière ($2,998 \cdot 10^8$ m.s⁻¹), k_b la constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹) et λ la longueur d'onde, l'intégration de $P(\lambda)$ sur toutes les longueurs d'onde donne une densité de puissance de $63,343 MWm^{-2}$ dégagée par la surface du soleil, une moyenne de 174 703 TW pour une irradiation totale arrivant juste au-dessus de l'atmosphère de la terre, chaque heure la terre reçoit plus d'énergie du soleil que fut consommée le monde dans l'ensemble de l'année 2007.

2. Le soleil et l'énergie solaire



Figure I.1 Soleil et l'énergie solaire [4]

Le soleil, notre étoile, est le siège comme toutes les étoiles de réactions chimiques libérant une énorme quantité d'énergie [4]. Il a été montré que c'est la réaction de fusion de quatre atomes d'hydrogène en un atome d'Helium 4 qui est impliquée (réaction de fusion nucléaire). La perte de masse impliquée par cette réaction dans le soleil est de $5 \cdot 10^9$ kg par

seconde, soit 5 millions de tonne par seconde. Ceci implique selon l'équation d'équivalence Masse (m)/Energie (E), la fameuse équation :

$$E = mc^2 \quad \text{(I.3)}$$

Une puissance de $4 \cdot 10^{26}$ W soit 400000 milliards de TW, une puissance absolument considérable.

Cette énergie est libérée dans le cœur du soleil, le noyau (Figure I.1). Des échanges énergétiques complexes ont lieu entre ce noyau et la périphérie, d'abord sous forme radiative dans une zone intermédiaire dite radiative, puis à travers la convection dans la couche périphérique dite convective.

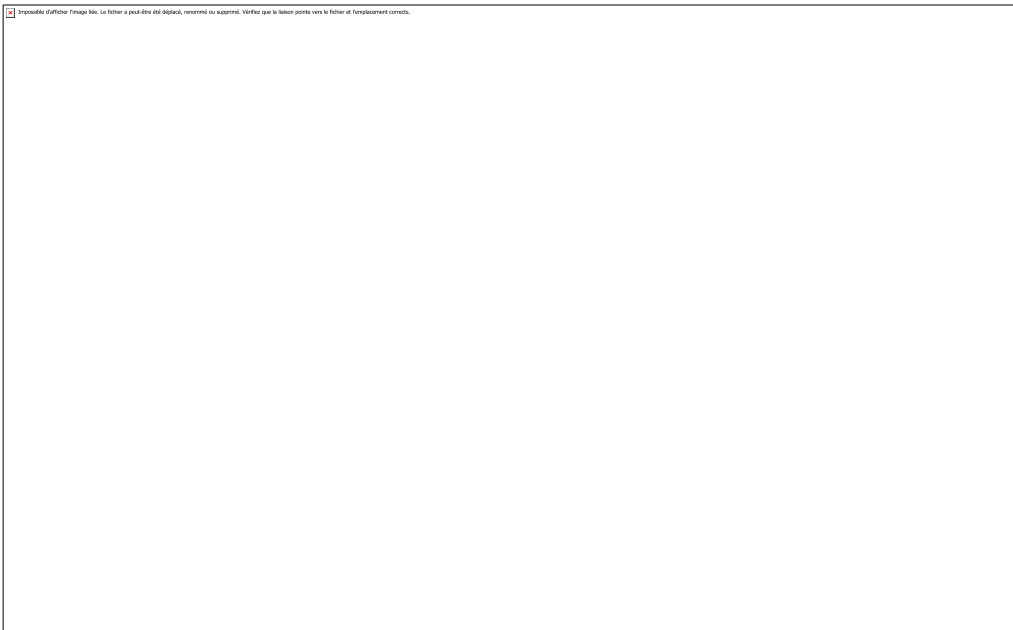


Figure I.2: Spectre du soleil terrestre et extra-terrestre et comparaison avec le spectre du corps noir à 5900K [4]

L'ensemble de cette puissance est évacuée à l'extérieur essentiellement sous forme de rayonnement électromagnétique (lumière) par cette surface périphérique dont la température est de 5900K et qu'on appelle la photosphère. Le spectre de cette lumière émise est donc très proche de celui du corps noir à cette température (courbe orange dans la Figure I.2).

Ce spectre couvre une large étendue de longueur d'onde de l'infrarouge assez profond jusqu'à l'ultraviolet. Bien-sûr, le maximum d'intensité se situe au milieu du spectre visible, ce qui n'est pas étonnant. Nos yeux se sont adaptés, au cours de l'évolution, pour capter ainsi le maximum de photons.

2.2. Le rayonnement solaire à la surface de la terre

Ce rayonnement arrive ensuite sans encombre jusqu'à la zone sub-atmosphérique de la terre au prorata de l'angle solide lié à la distance et à la taille de notre planète. La puissance reçue par cet hémisphère éclairé, infime par rapport à la puissance globale du soleil, représente tout-de-même encore une puissance gigantesque de 170 000 TW. Ce flux est plus de 2000 fois supérieure à nos besoins énergétiques actuels.

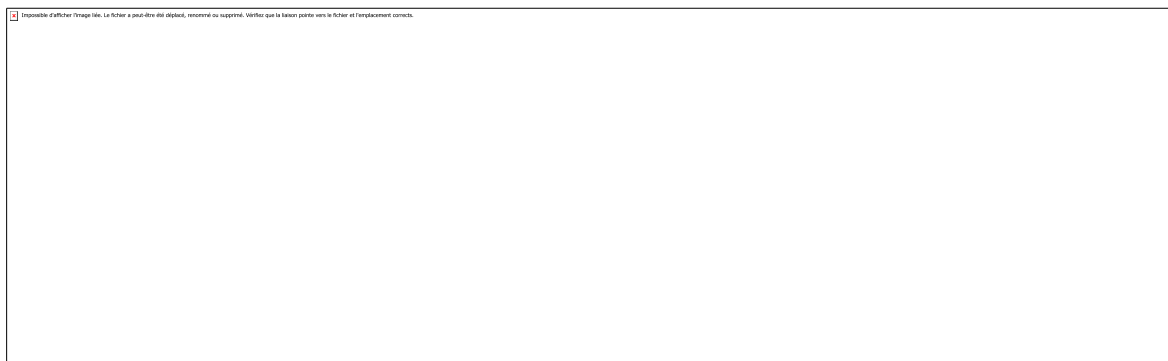


Figure I.3: Première cause de variation du flux d'énergie solaire à la surface de la terre : sa rotation sur elle-même et sa révolution autour du soleil [4]

Le rayonnement à la surface de la terre est bien entendu variable. Une première cause vient des mouvements de la terre par rapport au soleil : d'une part sa rotation sur elle-même autour de l'axe des pôles entraînant les cycles journaliers, et d'autre part sa révolution autour du soleil, qui, en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation, entraîne les cycles saisonniers (Figure I.3).

Ces cycles sont dépendants de la latitude du lieu et impliquent d'importants changements de disponibilité et de typologie de variation de l'énergie solaire selon les lieux et les saisons.

Une deuxième cause de variation tient à l'importante quantité d'eau dans l'atmosphère à l'origine des nuages. Ces derniers constituent un fort masque au rayonnement en diminuant la densité du rayonnement, mais sans toutefois l'annuler. Ce masque affiche lui aussi une grande variabilité qui n'est fortement atténuée que dans les régions désertiques continentales. Il s'agit de la variabilité météorologique. L'atténuation du rayonnement est d'ailleurs plus ou moins importante selon la densité du nuage en densité de particules constituées par les gouttelettes d'eau. Ces dernières réfléchissent et rediffusent le rayonnement vers l'espace et aussi vers le sol.

En présence de nuage, le rayonnement reçu par la surface de la terre ne vient donc plus essentiellement du disque solaire mais dans une partie notable, voire majoritaire, de l'ensemble de l'angle solide à l'exclusion du disque solaire. La moyenne de la couverture nuageuse dépend là aussi fortement du lieu et de son climat. La variation, contrairement à celle liée au mouvement de l'astre, est beaucoup plus aléatoire mais partiellement prévisible à partir des prévisions météorologiques.

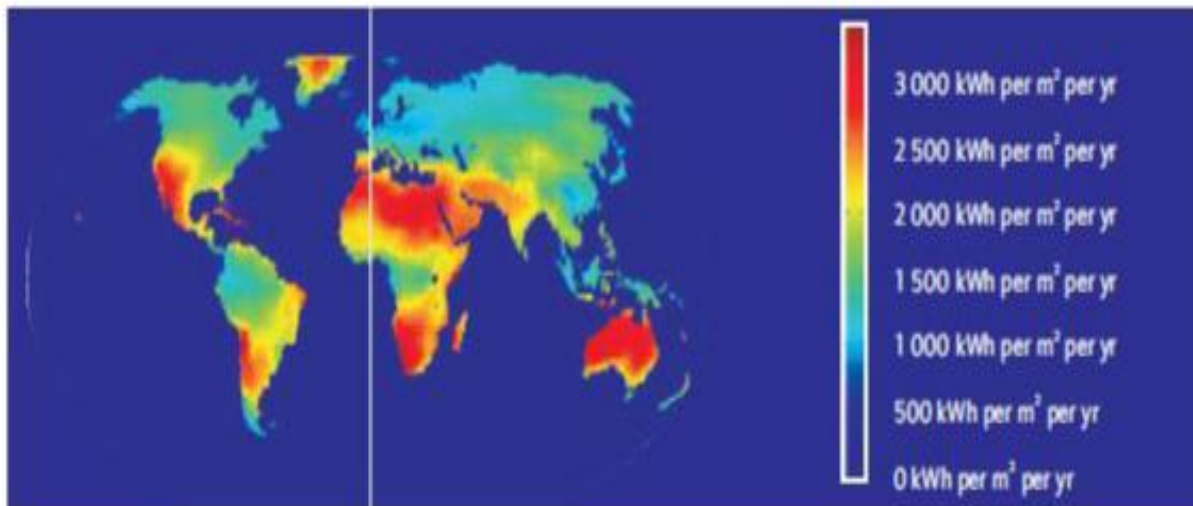


Figure I.4: Meilleurs sites pour l'installation des modules PV [4]

Les deux causes de variation (cycles astraux et climat) s'associent pour expliquer les importantes causes de variation annuelle. Un exemple est donné ci-dessous pour la France (Figure I.4). L'effet du climat (forte nébulosité des mois d'hiver) vient s'ajouter à la réduction de la durée du jour pour expliquer la faible contribution des mois d'hiver à l'irradiation annuelle globale.

2.3 Méthodologie de mesure du rayonnement solaire à la surface de la terre et données d'ensoleillement

En raison des interactions du rayonnement avec l'atmosphère et pour bien apprécier le flux d'énergie reçu par un capteur solaire selon son type, on a l'habitude de mesurer plusieurs types de paramètres d'irradiance [5] (densité du flux énergétique par unité de surface). Ces types d'irradiance sont exprimés en J/m^2 ou plus souvent pour des raisons pratiques en Wh/m^2 :

- un premier paramètre est l'irradiance directe reçue en un point donné depuis le disque solaire [6], appelé Irradiance directe normale (*Direct Normal Irradiance – DNI*) ; il est mesuré par un appareil pointé constamment sur le disque solaire et muni d'un diaphragme permettant d'éliminer le rayonnement non issu du disque solaire ; on appelle ce type d'appareil un pyréliomètre ; cette mesure de DNI est celle à laquelle on fait appel pour les systèmes solaires à concentration (voir plus loin) ;
- un deuxième paramètre est l'irradiance horizontale diffuse qui quantifie l'irradiance reçue par une surface horizontale à la surface de la terre par l'ensemble du ciel à l'exclusion du disque solaire, donc depuis un angle solide de 2π stéradians (180°) ; comme indiqué en 1.2, des molécules et des particules de l'atmosphère re-diffuse une partie du rayonnement qu'elles reçoivent vers la surface de la terre ; ce paramètre est appelé Irradiance horizontale diffuse (*Diffuse Horizontal Irradiance – DHI*) ;
- un troisième paramètre est l'irradiance horizontale globale qui quantifie l'irradiance reçue par une surface horizontale à la surface de la terre par l'ensemble du ciel, y compris le disque solaire ; il est appelé irradiance globale (*Global Horizontal Irradiance – GHI*) ;

$$GHI = DHI + DNI \cos(Z) \quad (I.4)$$

Où Z est l'angle zénithal, l'angle entre la droite reliant le point de la surface et le soleil et la droite verticale de ce lieu ; c'est ce paramètre que l'on utilise pour les capteurs plans. À noter qu'il quantifie uniquement l'irradiance reçue par le capteur si celui-ci est placé horizontalement ; si le capteur plan est différemment orienté, il faudra effectuer des corrections géométriques à appliquer sur GHI et DHI.

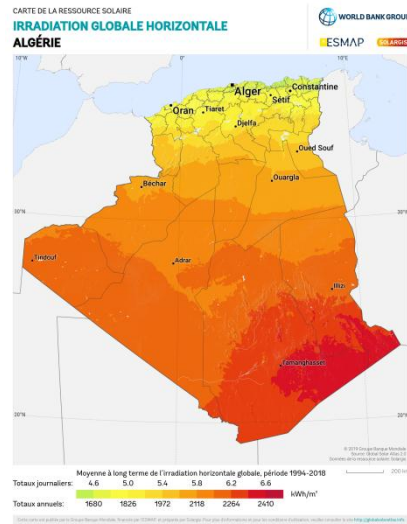


Figure I.5: Cartographies d'irradiation solaire (GHI) pour l'Algérie

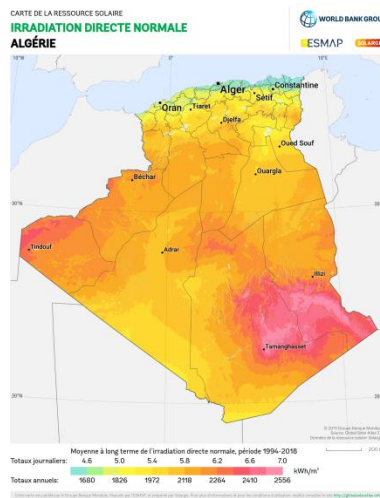


Figure I.6: Cartographies d'irradiation solaire (DNI) pour l'Algérie

À partir du relevé de ces données aux divers lieux de la planète et sur une période minimum d'une année, on a pu mesurer l'intégrale dans le temps de ces irradiances appelée irradiation en chaque lieu et dresser des cartes d'irradiation dénommées respectivement, Irradiation directe normale, Irradiation horizontale diffuse et Irradiation horizontale globale. Ces données et ces cartes sont des documents précieux pour prévoir la quantité d'énergie disponible et apprécier l'intérêt et la rentabilité d'une installation. Un exemple de cartes de DNI et de GHI pour l'Algérie et pour le monde est donné dans les Figures I.5 et I.6. On peut trouver un certain nombre de ces données et de ces cartes en accès libre ou payant sur des sites comme : <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/overview/>.

On constate à partir de ces cartes :

1. des différences notables dans l'énergie disponible selon les lieux mais avec une amplitude relative de GHI qui reste finalement plus modérée que ce qu'on imagine spontanément (à titre d'exemple il n'y a qu'un facteur de l'ordre de deux entre les endroits les plus ensoleillés et les moins ensoleillés en Algérie) ;
2. sans surprise, un maximum d'irradiation au niveau des zones tropicales et en particulier dans les déserts continentaux de ces zones ;
3. un avantage pour les fortes altitudes (à latitude égale).

2.4 Les principes physiques de la conversion du rayonnement solaire en chaleur ou en électricité

La conversion du rayonnement solaire en sources d'énergie utile passe par des capteurs solaires dont la compréhension du fonctionnement exige de remonter aux interactions du rayonnement solaire (les photons) avec la matière.

2.4.1 L'interaction rayonnement-matière

Dans la gamme de longueurs d'onde considérée, les photons du rayonnement solaire sont susceptibles de transmettre leur énergie aux électrons périphériques des atomes de la matière dans lesquels ils pénètrent. C'est l'effet dit photoélectrique.

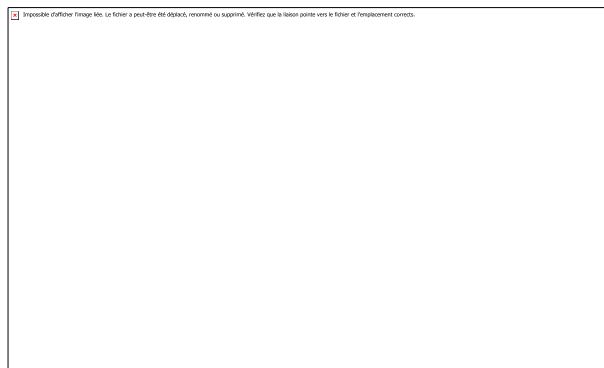


Figure I.7: Le transfert d'énergie entre le photon et l'électron : l'effet photoélectrique

Selon ce phénomène (Figure I.7), si cette interaction se produit, le photon cède la totalité de son quantum d'énergie à l'électron impliqué. C'est la mise en évidence de cet effet qui a permis à Einstein de montrer la quantification de l'énergie électromagnétique. Cette dernière ne peut donc pas être considérée seulement comme un phénomène vibratoire : on a en fait une dualité Onde/Particule à la fois pour les électrons et pour les photons. Cette mise

en évidence a bouleversé la physique et est à l'origine de la découverte de la mécanique quantique.

Comprendre ces mécanismes fondamentaux est essentiel si on veut comprendre le fonctionnement de l'Énergie solaire et tout particulièrement l'Énergie photovoltaïque.

Dans les solides, en raison de la proximité des atomes et en raison de leur caractère ondulatoire, les électrons périphériques des atomes occupent des niveaux d'énergie discrets et quantifiés très proches les uns des autres. Ils ne dépendent plus seulement de l'atome dont ils sont issus, mais de l'ensemble des atomes du solide et de la position de ceux-ci les uns par rapport aux autres [7].

Cette multitude de niveaux énergétiques très proches les uns des autres sont ainsi créés dans de larges intervalles d'énergie, que l'on appelle des bandes électroniques alors que dans d'autres intervalles, il n'y a aucuns niveaux énergétiques disponibles.

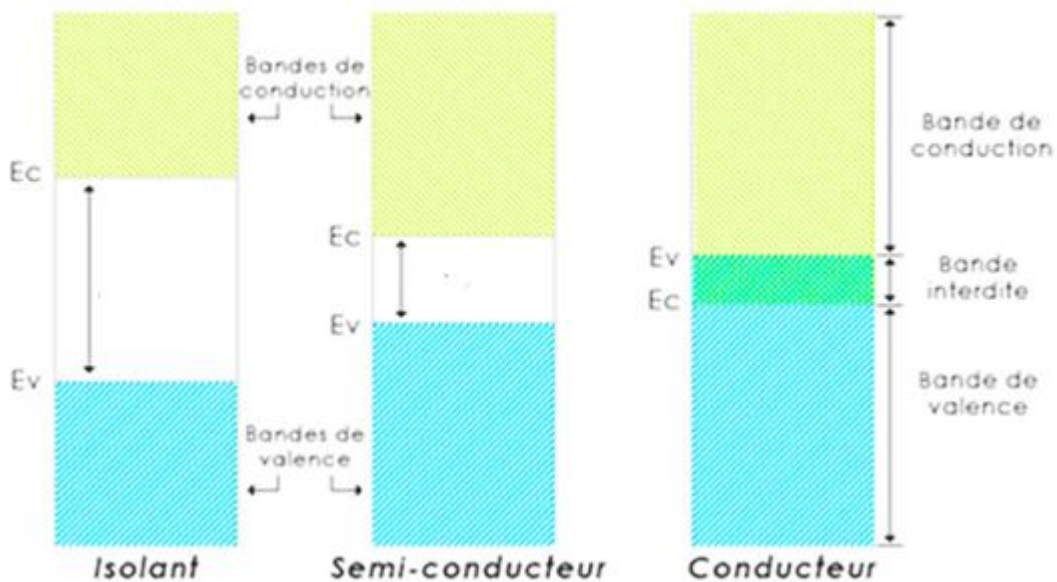


Figure I.8:Schéma des bandes électroniques dans les différentes classes de matériaux (Isolants, Semi-conducteurs et conducteurs) [4]

On distingue différents types de matériaux selon la structure de ces bandes et selon la population d'électrons périphériques disponibles. Ceux dans lesquels, à très basse température, les électrons les plus énergétiques remplissent totalement une bande appelée Bande de valence, sont appelés semi-conducteurs ou isolants selon les cas (Figure I.8).

Il existe dans ces matériaux au-dessus de la bande de valence une bande d'énergie dite interdite couvrant un segment d'énergie que les électrons ne pourront prendre et plus haut encore en énergie une bande d'énergie non occupée à basse température mais disponible et

qui pourra être partiellement peuplée par des électrons selon les cas. Cette bande est appelée la bande de conduction. La largeur énergétique de la bande interdite sera appelée E_g .

Dans ces matériaux, on ne pourra avoir de conduction électrique avec des électrons dits libres, et qui pourront se propager dans le solide, que s'ils franchissent la barrière énergétique constituée par la bande interdite de largeur E_g et passent dans la bande dite de conduction.

À signaler que la place qu'ils libèrent dans la bande de valence libérera aussi la possibilité d'un mouvement de charge électrique de même valeur que celle de l'électron mais de polarité inversée (de charge positive et non négative). C'est en fait cette absence localisée d'électron qui pourra se propager. On appelle cette charge positive mobile simplement un trou.

Un isolant est un semi-conducteur mais avec une énergie E_g très élevée de telle sorte qu'il est très difficile à un électron de franchir cette barrière énergétique. La conduction électronique y sera donc extrêmement limitée.

La deuxième grande catégorie de matériaux est celle des conducteurs (les métaux). Dans ces derniers, il n'y a pas de bande interdite. En réalité Bande de valence et de conduction se chevauchent. Les électrons sont libres et mobiles y compris à basse température et en l'absence d'excitation : il suffit donc de très peu d'énergie pour les placer dans un état où ils seront aptes à se mouvoir.

Si l'on s'attache à l'incidence de cette structure de bande électronique sur l'interaction Photon/Matière et en fait Photon/Électrons, on observe que lorsque un photon d'énergie E_n va pénétrer dans un de ces solides, il va pouvoir grâce à l'effet photoélectrique céder son énergie à un électron d'énergie E_1 , à condition qu'il existe dans ce solide un niveau $E_2 = E_n + E_1$ disponible dans ce solide.

On peut en fonction de ce phénomène, distinguer trois cas.

1. Le cas du semi-conducteur où l'énergie du photon est inférieure à E_g . Comme il n'y a pas de niveau énergétique $E_2 = E_n + E_1$ disponible pour l'électron, ce photon ne sera pas absorbé par le solide. Il traversera la matière et ressortira sans céder la moindre part d'énergie. Le matériau sera donc transparent pour tous les photons d'énergie comprise entre 0 et E_g . Si E_g est compris entre 1,5 et 3eV (spectre visible) le matériau nous apparaît coloré puisqu'il ne laisse passer qu'une partie du spectre. Si E_g est

inférieur à 1,5 eV il nous apparaît noir et Si E_g est supérieur à 3eV (spectre visible) il nous apparaît totalement transparent ou blanc.

2. Le cas du semi-conducteur où l'énergie du photon est supérieure à E_g . Le photon va en toute probabilité céder son énergie à un électron dont l'énergie peuplera un niveau dans la bande de conduction. Cet électron sera libre de se déplacer et on pourra assister sous certaines conditions à un photo-courant électrique. Sera aussi ainsi créé un « trou » libre qui pourra aussi participer à la photoconduction. On parlera alors de Photo-génération ou de génération de paires Électron-Trou.
3. Le cas du métal. Ici et quelque-soit le niveau énergétique le photon cédera systématiquement son énergie à un électron qui rejoindra un autre niveau énergétique mais dans la même bande d'énergie que celle où il était initialement. Il ne pourra rester dans un état excité et il retournera peupler la population initiale des électrons dans les niveaux inférieurs en cédant son excès d'énergie sous forme de chaleur par interaction avec les phonons (vibrations mécaniques du réseau atomique). Ceci se traduira par une élévation de température du matériau. In fine l'énergie de rayonnement solaire sera totalement convertie en chaleur.

Ces caractéristiques et ces phénomènes vont donc régir les capacités à tel ou tel matériau d'être un bon capteur thermique ou un bon capteur photovoltaïque.

Pour les capteurs thermiques, l'objectif sera de capter le maximum de photons dans tout le spectre et de se satisfaire du transfert naturel de leur énergie en chaleur sous forme de vibration du réseau. On recourra donc à des métaux avec quelques subtilités dans le traitement de leur surface.

Il est important toutefois de noter que la conversion de l'énergie des photons en chaleur représente le cas les plus courants y compris dans le cas des semi-conducteurs ou des matériaux organiques. Il faut de nombreuses conditions pour qu'une partie de l'énergie soit finalement convertie en énergie électrique capable d'alimenter un circuit extérieur (cas du photovoltaïque), ou en énergie chimique (cas de la photosynthèse).

La thermodynamique nous apprend que les systèmes tendent vers l'état de désordre maximum et donc vers l'entropie maximum, la chaleur qui représentant l'énergie d'entropie maximum.

2.4.2 Les principes physiques pour une conversion thermique efficace

La conversion du rayonnement en énergie thermique est naturelle et fréquente dans la plupart des matériaux. Il suffit de placer ceux-ci en face du soleil pour constater une élévation de la température.

Pour autant, obtenir un capteur solaire thermique efficace avec un rendement de conversion maximum (rapport entre l'énergie thermique récupérée à la sortie du capteur et l'énergie du rayonnement initiale) ne va pas de soi. Un certain nombre de conditions doivent être réunies :

- une captation efficace du rayonnement par le matériau absorbeur en évitant en particulier une forte réflexion en surface,
- une minimisation des pertes thermiques dans le capteur, soit par réémission de rayonnement infrarouge, soit par perte par conduction,
- un bon transfert thermique entre le matériau absorbeur et le fluide caloporteur, le fluide qui circule dans le capteur et qui permet d'extraire la chaleur et de la transférer aux points d'utilisation.



Figure I.9: Utilisation de l'effet de serre dans un capteur solaire pour minimiser les pertes par rayonnement. [4]

Le choix du matériau absorbeur est particulièrement important. Son coefficient d'absorption doit être maximum sur l'ensemble du spectre et son coefficient de réflexion minimum, afin de capter le maximum de photons. De plus, tout matériau chauffé émet des

photons. Compte tenu des températures concernées, ce rayonnement est émis dans le spectre infra-rouge. Cette émission intervient comme une perte et doit donc être minimisée.

La quantité d'énergie émise par rayonnement dépend, outre de la température du corps, d'une caractéristique intrinsèque du matériau, l'émissivité. On a donc intérêt à choisir un matériau à faible émissivité, dans les longueurs d'ondes concernées. Pour cela, on doit rajouter en surface du métal une couche spécifique limitant optiquement par des effets de résonance ou d'interférence le rayonnement infrarouge émis. Ces matériaux bon absorbeurs dans le spectre visible et proche et faibles émetteurs dans le spectre infra-rouge sont appelés Matériaux « Sélectifs » [8].

Pour minimiser le rayonnement infrarouge, on cherchera aussi le plus souvent à utiliser aussi l'effet de Serre. Il s'agit ici de rajouter, en ménageant une lame d'air ou de gaz, un matériau transparent pour le spectre du soleil mais absorbant pour le spectre infrarouge lointain, comme typiquement une plaque de verre.

Il convient alors de distinguer deux cas, les capteurs avec ou sans concentrateurs. En effet, si on cherche à obtenir des températures élevées au-delà de 200°C pour certaines applications, en particulier pour les centrales thermodynamiques, on devra utiliser des concentrateurs solaires (dispositifs optiques visant à concentrer les rayons du soleil). Dans ce dernier cas, on devra adapter le matériau sélectif à la température visée et donc aux longueurs d'onde du rayonnement infrarouge considéré.

Dans le cas d'une centrale thermodynamique dans laquelle la chaleur sera convertie en travail mécanique et *in fine* en électricité, la variation du rendement énergétique global avec la température de fonctionnement présentera un maximum (Figure I.10). En effet, si le rendement de Carnot de la centrale augmente linéairement avec la température, les pertes par rayonnement sont proportionnelles au produit de l'émissivité du matériau absorbeur et la température à la puissance quatre. Les pertes par rayonnement prennent largement le pas aux fortes températures.

24.3. La conversion photovoltaïque

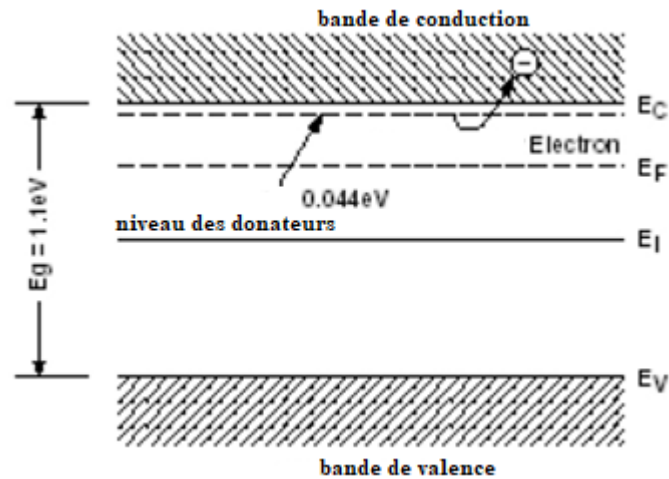


Figure I.10: Création de niveaux énergétiques proches de la bande de conduction (matériau de type n) [4]

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation de matériaux semi-conducteurs [9]. Dans ces matériaux, à condition que l'énergie des photons soit suffisante, l'effet photoélectrique aura pour effet la photo-génération ou génération de paires Électron-Trou qui deviendront mobiles et pourront sous certaines conditions transmettre une partie de l'énergie électrique ainsi acquise à un circuit extérieur.

La condition pour cette génération est que l'énergie du photon E_n soit supérieure à E_g , la largeur de la bande interdite du matériau. Il faut bien comprendre ici que la création d'électrons libres ne suffit pas en lui-même à produire un photo-courant et l'émergence d'un générateur électrique. Pour que les électrons puissent circuler dans le circuit extérieur et céder l'énergie ainsi acquise, il faut aussi créer une asymétrie d'énergie potentielle pour que les électrons libres (et les trous) aillent majoritairement dans une direction plutôt qu'une autre et ne se déplacent pas de façon totalement aléatoire. Il s'agit ici de créer une force motrice pour ces charges.

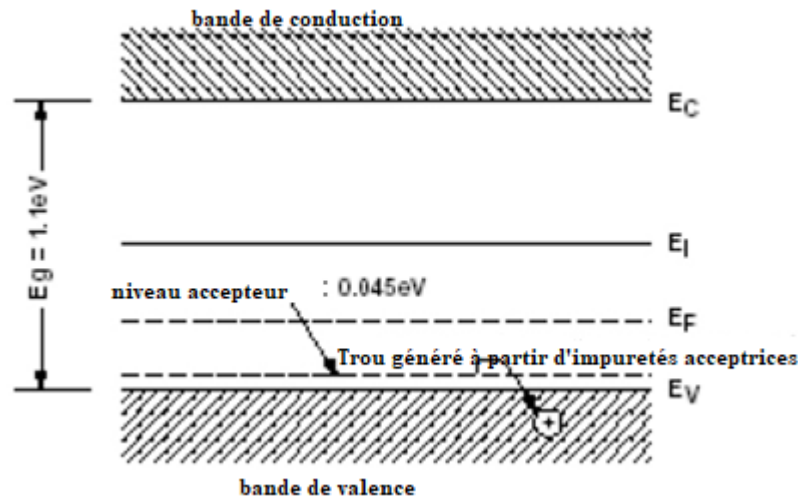


Figure I.11: Création de niveaux énergétiques proches de la bande de valence (matériau de type p) [4]

Pour cela, on exploite la possibilité d'accoler deux matériaux semi-conducteurs pour lesquels le profil des énergies disponibles pour les électrons n'est pas identique de part et d'autre d'une frontière. Ce type d'association est appelé une jonction (au sens électronique du terme).

Le moyen le plus simple et le plus courant pour créer une jonction est d'ajouter certaines impuretés dites dopantes dans ces matériaux. Ces impuretés, en créant des niveaux énergétiques dans la Bande interdite à proximité soit de la Bande valence soit de la Bande de conduction, déplacent le profil énergétique de la population des électrons à l'équilibre. Si les impuretés dites ajoutées créent des niveaux énergétiques proches de la bande de conduction dits donneurs, on parle de matériau de type n. Si les impuretés créent des niveaux énergétiques proches de la Bande de valence dits accepteurs, on parle de matériau de type p.

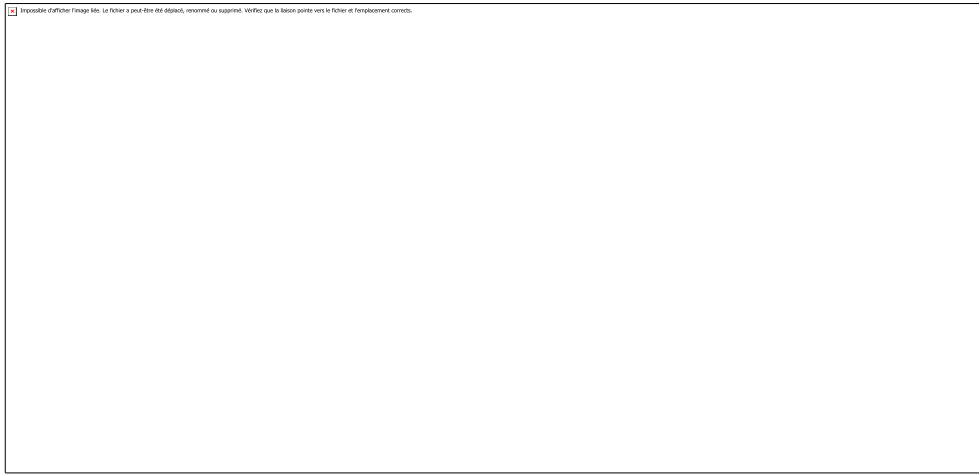


Figure I.12:Schéma de principe d'un capteur photovoltaïque avec la jonction n/p, la photo-génération de paires Electron-Trou [4]

Il suffira donc d'ajouter ces deux types d'impuretés de façon adéquate de part et d'autre de la jonction, en se débrouillant pour que l'on ait une majorité d'un type d'impuretés d'un côté et une majorité de l'autre type de l'autre côté. On parle alors de jonction p/n ou de jonction n/p.

Lorsqu'on ajoute des électrodes de part et d'autre de ce dispositif, on crée une diode, dispositif utilisé en électronique comme redresseur de courant car il laisse passer le courant si on la polarise électriquement dans un sens et le bloque si on la polarise dans l'autre.

Un capteur photovoltaïque est donc, par construction, une diode dans laquelle on préservera la possibilité à un maximum de photons de pénétrer (Figure I.13).

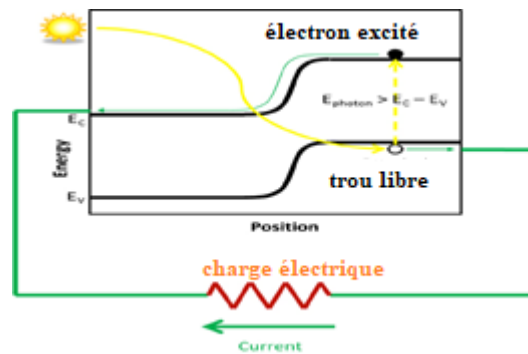


Figure I.13:Profil d'énergie dans un capteur photovoltaïque de type n/p et circulation des charges photo-générées. [4]

Soit le profil d'énergie dans un capteur photovoltaïque (Figure I.13). Lorsqu'un photon va générer une paire Électron-Trou, par exemple dans le matériau de type p (à droite sur la figure), l'électron ayant pénétré dans la bande de conduction par l'effet photoélectrique et étant devenu mobile, va être attiré vers la jonction d'abord par diffusion puis par accélération électrostatique dans la zone de la jonction elle-même. Il pourra ensuite alimenter le circuit extérieur, car un trou sera à même de circuler dans l'autre sens afin de maintenir l'équilibre entre les deux charges et d'éviter la formation d'une zone où l'on aurait une accumulation de charge et qui viendrait ainsi freiner le passage du courant.

En réalité, le courant réel sera aussi piloté par la résistance du circuit extérieur. Plus celle-ci sera élevée et s'opposera au passage du courant, plus on assistera à la création d'un profil de potentiel électrostatique à l'intérieur de la diode s'opposant à la circulation du courant. Dans le cas extrême du circuit Ouvert et donc sans passage de courant, on constatera une différence de potentiel aux bornes du dispositif lié au potentiel électrostatique créé par la jonction et lié essentiellement à la largeur de la bande interdite.

Plus la résistance sera faible, plus le courant sera élevé mais restera toujours limité par le nombre de paires Électron-Trou générés et donc par le flux incidents de photons.

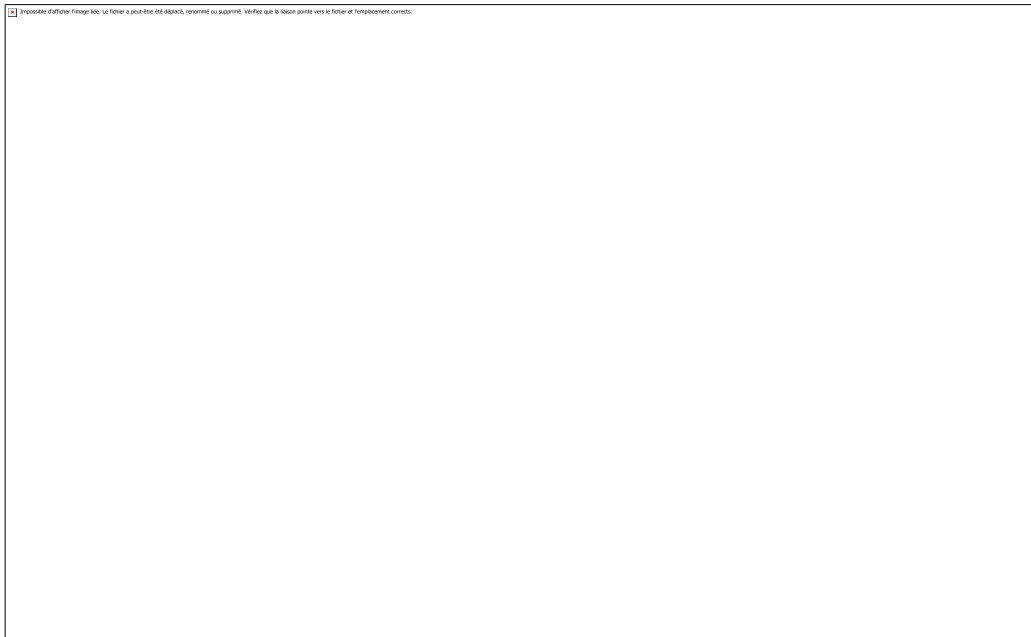


Figure I.14: Caractéristiques typiques Courant-Tension d'un capteur Photovoltaïque en fonction de l'irradiance. [4]

On obtient les caractéristiques Courant-Tension (Figure I.14) avec une tension en circuit ouvert V_{oc} , caractéristique de la jonction et des matériaux utilisés et un courant de Court-circuit I_{sc} proportionnel à la densité de puissance lumineuse.

Dans la pratique on s'attachera souvent, avec des dispositifs électroniques intermédiaires adéquats, à rechercher dans cette courbe, le point de puissance maximum, avec maximisation du produit Courant-Tension : VI.

2.4.4. Qu'est-ce qui limite le rendement d'un capteur photovoltaïque ?

Nous venons de décrire jusqu'ici les principes physiques régissant le fonctionnement d'un capteur photovoltaïque.

Nous allons, à partir de là analyser ce qui limite leur rendement de conversion, d'abord dans un capteur idéal, dans lequel tous les photons arrivant sur la capteur vont se traduire par un électron d'énergie E_g qui circule sans encombre jusqu'au circuit extérieur, puis dans un capteur réel dans lequel la circulation des photons et des électrons ne pourra se faire sans encombres.

Ces limites au rendement sont particulièrement importantes à comprendre quant aux choix des matériaux et des technologies utilisées.

4. Conclusion

Le solaire, qui est très apprécié dans les zones rurales et isolées. La quantité d'énergie absorbée par l'air et transformée en chaleur représente plus de 6000 fois la consommation d'énergie mondiale, l'hydraulique, l'éolien est de nos jours en développement rapide. Il offre de nombreux avantages, comme un faible impact environnemental et surtout local. Dans les pires conditions, une éolienne a une durée de vie d'au moins 20 ans. La géothermie a pour origine l'évacuation de la chaleur de l'intérieur du globe. Selon la température, il existe plusieurs types d'applications : la géothermie à haute température qui produit de l'électricité ; la géothermie à basse température qui est surtout employée pour le chauffage des locaux, et la biomasse. Les énergies renouvelables présentent donc de nombreux atouts : inépuisables, propres...etc. mais, elles nécessitent un prix élevé, de la main d'œuvre, et doivent appliquer le développement durable, et faire face à la concurrence des énergies fossiles, souvent moins chères.

Chpaitre II. Etude par simulation de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des modules photovoltaïque.

Introduction

Ce chapitre propose une description détaillée de la modélisation et simulation numérique des modules photovoltaïques à l'aide de l'outil PVLIB-Python qui est un kit fournit un ensemble de fonctions et de classes pour simuler les performances des systèmes d'énergie photovoltaïque [10].

PVLIB-Python a été porté à l'origine à partir de la boîte à outils PVLIB-MATLAB développée aux **Sandia National Laboratories** et implémente de nombreux modèles et méthodes développés dans les laboratoires¹.

L'emploi du module photovoltaïque dans des installations solaires nécessite une bonne connaissance de ses performance aussi, prévoir son comportement sous différentes conditions climatiques. L'obtention de données météorologiques et d'éclairement de haute qualité pour les études de modélisation des performances est l'une des étapes les plus importantes de la modélisation des performances PV, car l'incertitude des données d'éclairement représente généralement une grande partie de l'incertitude totale. Le modélisateur commence généralement avec des données historiques qui ont été compilées spécialement pour les applications solaires (par exemple, NSRDB, TMY). Cependant, lorsque les résultats du modèle sont utilisés pour des décisions d'investissement importantes, des données supplémentaires sont généralement utilisées (par exemple, des données satellitaires et des mesures au sol spécifiques au site).

La Bibliothèque PVLlib-Python

Python est un langage de programmation puissant et facile à apprendre. Il dispose de structures de données de haut niveau et permet une approche simple mais efficace de la programmation orientée objet. Parce que sa syntaxe est élégante, que son typage est dynamique et qu'il est interprété, Python est un langage idéal pour l'écriture de scripts et le développement rapide d'applications dans de nombreux domaines et sur la plupart des plateformes.

L'interpréteur Python et sa vaste bibliothèque standard sont disponibles librement, sous forme de sources ou de binaires, pour toutes les plateformes majeures et peuvent être librement redistribués. PVLlib une des bibliothèques libres et disponible sur le site <https://pypi.org/project/pvlib/> pour modéliser les performances des modules PV.

¹ Pour plus d'informations sur les programmes de modélisation des performances PV de Sandia Labs, visiter <https://pvpmc.sandia.gov/>. Ils collaborent avec le projet PVLIB MATLAB, mais opèrent indépendamment de celui-ci. le pvlib-python un excellent outil! Documentation: <http://pvlib-python.readthedocs.io> Code source: <https://github.com/pvlib/pvlib-python>

I. Modélisation des performances PV

I.1. Modèles de circuits équivalents :

Les modèles de circuits équivalents définissent l'intégralité de la courbe IV d'une cellule, d'un module ou d'un réseau en tant que fonction continue pour un ensemble donné de conditions de fonctionnement. Un modèle de circuit équivalent de base couramment utilisé est le modèle à diode unique, qui est dérivé de principes physiques (par exemple, Gray, 2011) et représenté par le circuit suivant pour une seule cellule solaire [11]:

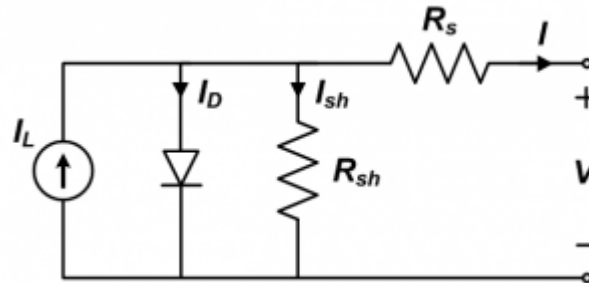


Figure II.1 circuit équivalent de modèle à diode unique

L'équation régissant ce circuit équivalent est formulée en utilisant la loi de Kirchoff pour le courant

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Ici, I_L représente le courant généré par la lumière dans la cellule, I_D représente le courant dépendant de la tension perdu à la recombinaison et I_{sh} représente le courant perdu en raison des résistances shunt. Dans ce modèle à diode unique, I_D est modélisé à l'aide de l'équation de Shockley pour une diode idéale :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

Où n est le facteur d'idéalité de la diode (sans unité, généralement compris entre 1 et 2 pour une seule cellule à jonction), I_0 est le courant de saturation, et V_t est la tension thermique.

L'écriture du courant de dérivation et la combinaison de cette équation et des équations ci-dessus donnent l'équation gouvernante complète du modèle à diode unique :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

Les cinq paramètres de cette équation sont essentiels à tous les modèles de circuits équivalents à une diode unique.

Pour un module ou un réseau photovoltaïque comprenant des cellules en série, et en supposant que toutes les cellules sont identiques et sous un rayonnement et une température uniformes et égaux (c'est-à-dire qu'elles génèrent un courant et une tension égaux), et

L'équation à diode unique pour un module ou un réseau devient:

$$I_M = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_M + I_M N_s R_s}{n N_s V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M N_s R_s}{N_s R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Où et sont respectivement le courant et la tension du module ou du réseau. Des précautions doivent être prises lors de l'implémentation des paramètres du modèle, car ils sont applicables à une cellule, un module ou un tableau. Les paramètres des modules ou des matrices sont strictement utilisés avec l'équation à diode unique pour, qui est la forme la plus couramment mise en œuvre.

Dans certaines mises en œuvre (par exemple, De Soto et al. [11]), la tension thermique, le facteur d'idéalité de la diode et le nombre de cellules en série sont combinés en une seule variable appelée facteur d'idéalité modifié :

$$a \equiv \frac{N_s n k T_c}{q} \quad (\text{II.5})$$

K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{eV/K}$).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \times 10^{-19} \text{C}$).

I.1.1. Le modèle De Soto :

Le modèle De Soto [11], également connu sous le nom de modèle à cinq paramètres, utilise les équations suivantes pour exprimer chacun des cinq paramètres primaires en fonction de la température de la cellule et de l'irradiation totale absorbée G_T :

$$I_L = \frac{G_T}{G_{ref}} \left[I_{L,ref} + \alpha_{Isc} (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (\text{II.6})$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left[\frac{T_c}{T_0} \right]^3 \exp \left[\frac{1}{k} \left(\frac{E_{g,ref}}{T_0} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right] \quad (\text{II.7})$$

$$E_g = E_{g,ref} \left[1 - 0.0002677 (T_c - T_{ref}) \right] \quad (\text{II.8})$$

$$R_s = \text{constant} \quad (\text{II.9})$$

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \frac{G_{ref}}{G_T} \quad (\text{II.10})$$

$n = \text{constant}$

α_{Isc} , le coefficient de température du courant de court-circuit

L'irradiation absorbée, G_T , est égale à l'irradiance POA atteignant les cellules PV (y compris les pertes de réflexion de l'angle incident mais pas la discordance spectrale). Dans chaque équation, l'indice « ref » fait référence à une valeur dans des conditions de référence.

Dans De Soto et al [11], le facteur d'idéalité modifié est utilisé et exprimé en fonction linéaire de la température de la cellule, ce qui équivaut à un facteur d'idéalité de diode constant. , appelé "modificateur de masse d'air", représente l'effet spectral, du changement de la masse d'air atmosphérique et de l'absorption correspondante, sur le courant lumineux. est le polynôme de la masse d'air du Sandia PV Array Performance Model (SAPM). Le terme est le coefficient de température (A/K) du courant de court-circuit, égal au coefficient de température du courant lumineux. Le terme est la bande interdite dépendante de la température (eV); donnée comme la série de Taylor simplifiée du premier ordre de la température de la bande interdite expérimentale. La constante empirique 0,0002677 est représentative des cellules au silicium à des températures de fonctionnement typiques, et elle est utilisée pour toutes les technologies de cellules.

1.1.2. Le modèle PVSyst :

PVSyst est un logiciel permettant de modéliser des systèmes photovoltaïques complets, notamment des modules PV, des onduleurs, des stockages d'énergie et des composants de connexion électrique. PVSyst utilise un modèle de module à diode unique avec les équations auxiliaires suivantes. Notez qu'ici nous utilisons et pour désigner le courant lumineux, l'irradiance absorbée et le coefficient de température de, respectivement, alors que dans le Guide de l'utilisateur de PVSyst, , , et sont utilisés pour ces quantités.

Dans le guide de l'utilisateur PVSyst, est utilisé pour désigner le facteur de qualité (idéalité) de la diode où nous utilisons. Le terme de tension de bande interdite est considéré comme constant dans PVSyst et les valeurs sont fournies pour diverses technologies (par exemple, 1,12 eV pour cSi) dans le Guide de l'utilisateur de PVSyst.

L'équation est publiée dans [1] et a été confirmée par des discussions entre ses auteurs et PVSyst. Dans le Guide de l'utilisateur de PVSyst, est écrit comme et est écrit comme ; est une fonction de l'irradiance, et est la valeur de la résistance shunt à l'irradiance de référence. Le terme est une constante, avec des valeurs données dans Mermoud et Lejeune, 2010 pour le CdTe (2,0), le silicium microcristallin (3,0) et toutes les autres technologies de modules (5,5).

Pour les modules amorphes, PVSyst modifie l'équation de la diode unique pour tenir compte des pertes de courant de recombinaison :

En modélisant la perte comme un drain de courant contrôlé tel que représenté dans le circuit équivalent suivant :

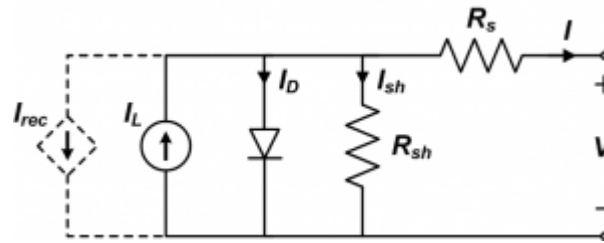


Figure II.2: circuit équivalent de la perte de courant

Le courant de recombinaison I_{rec} est régi par :

$$I_{rec} = I_L \frac{d_i^2}{m_{eff} [N_S V_{bi} - (V + IR_s)]} \quad (II.11)$$

L'inclusion de ce puits de courant modifie l'équation standard à diode unique en :

$$I = I_L \left[1 - \frac{d_i^2 / m_{eff}}{N_S V_{bi} - (V + IR_s)} \right] - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nN_S V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

où d_i est l'épaisseur de la couche intrinsèque qui sépare les jonctions p et n, V_{bi} est le potentiel de tension aux bornes de la couche intrinsèque, et $m_{eff}(\mu\tau_{eff})$ dans le PVsystem User's Guide, et $\mu\tau_{eff}$ dans Mermoud et Lejeune, 2010) est la longueur de diffusion effective du porteur de charge. Dans la mise en œuvre, $V_{bi} 0.9$ V par jonction est typique (voir le Guide de l'utilisateur PVsystem) et la quantité d_i^2 / m_{eff} est combinée en un seul paramètre.

PV. pvlib-python prend en charge deux manières de résoudre l'équation (3) :

- Fonction W de Lambert
- Algorithme de Bishop

La fonction `pvlib.pvsystem.singlediode()` permet à l'utilisateur de choisir la méthode à l'aide du méthode « mot-clé ».

I.1.3. Le Modèle SAPM (Sandia PV Array Performance Model) :

SAPM définit cinq points sur la courbe IV [12]. Ces points sont illustrés dans la figure ci-dessous.

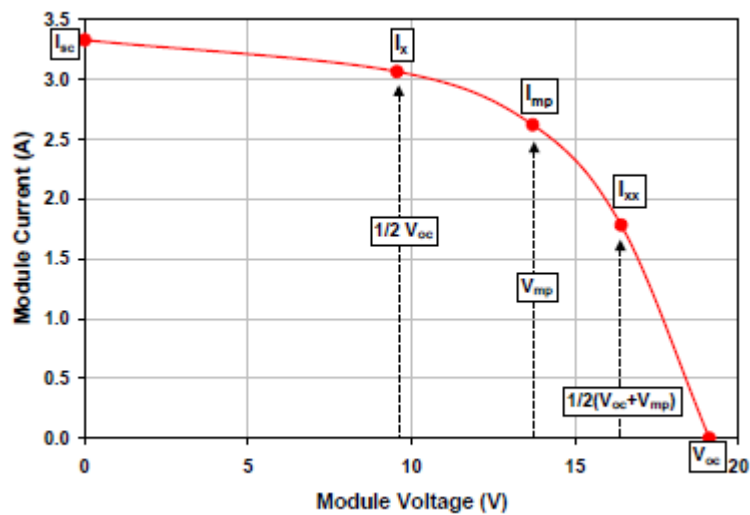


Figure II.3: Le Modèle SAPM (Sandia PV Array Performance Model)

Le SAPM définit les points principaux avec les équations suivantes :

$$I_{sc} = I_{sc0} \times f_1 \left(\frac{E_b f_2 + f_d E_d}{E_0} \right) \times (1 + \alpha_{Isc} (T_c - T_0)) \quad (\text{II.13})$$

$$I_{mp} = I_{mp0} (C_0 E_e + C_1 E_e^2) (1 + \alpha_{Imp} (T_c - T_0)) \quad (\text{II.14})$$

$$V_{oc} = V_{oc0} + N_s \delta \ln(E_e) + \beta_{Voc} (T_c - T_0) \quad (\text{II.15})$$

$$V_{mp} = V_{mp0} + C_2 N_s \delta \ln(E_e) + C_3 N_s (\delta \ln(E_e))^2 + \beta_{Vmp} (T_c - T_0) \quad (\text{II.16})$$

$$f_1(AM_a) = a_0 + a_1 AM_a + a_2 (AM_a)^2 + a_3 (AM_a)^3 + a_4 (AM_a)^4 \quad (\text{II.17})$$

$$f_2(AOI) = b_0 + b_1 AOI + b_2 (AOI)^2 + b_3 (AOI)^3 + b_4 (AOI)^4 + b_5 (AOI)^5 \quad (\text{II.18})$$

$$E_e = \frac{I_{sc}}{I_{sc0} \{1 + \alpha_{Isc} (T_c - T_0)\}} \quad (\text{II.19})$$

$$\delta = \frac{n \times k (T_c + 273.15)}{q} \quad (\text{II.20})$$

I.2. Les modèles météorologiques :

I.2.1. Les Observations météorologiques

L'observation est le premier maillon de la modélisation ou simulation de PV. En effet, la collecte des observations en mer, au sol, dans l'atmosphère et dans l'espace afin de connaître l'état de l'atmosphère, de l'océan superficiel, et du manteau neigeux, est la donnée d'entrée première pour tout travail météorologique ou climatique. La collecte de ces données, leur

transfert, leur diffusion et leur exploitation utilisent des systèmes d'information robustes et performants. Le développement du réseau d'observation et des infrastructures essentielles, notamment en termes de systèmes d'information, est une priorité de recherche scientifique de modélisation et simulation de PV.

Quelques stations de Météo utilisent des satellites, des réseaux de stations de mesures au sol, des bouées, des radiosondages, des capteurs embarqués sur les avions de ligne ou les navires.

Les mesures effectuées par tous ces instruments sont collectées, partagées avec les services météorologiques nationaux du monde entier. En plus de ses propres relevés, les stations de Météo échange les observations avec le réseau de la Veille météorologique mondiale géré par l'OMM. Les informations ainsi recueillies constituent les « données d'entrée » des modèles numériques.

Des observations météorologiques ou atmosphériques peuvent être effectuées pour améliorer les performances de certains modèles. Certaines mesures météorologiques ont de petites variations et peuvent être approximées en fonction de l'emplacement (par exemple, la pression atmosphérique peut être estimée à partir de l'altitude du site). D'autres, comme la température de l'air, qui ont une plus grande variation et jouent un rôle important dans les performances du système PV doivent être mesurés localement.

I.2.1.1. Température de l'air :

La température de l'air (également appelée température du bulbe sec) est la température de l'air ambiant lorsque l'appareil de mesure est protégé des radiations et de l'humidité. La méthode la plus courante de mesure de la température de l'air utilise un dispositif de température résistif (RTD) ou un thermocouple dans un écran anti-rayonnement. Le bouclier empêche la lumière du soleil d'atteindre le capteur (en évitant le chauffage radiatif), tout en permettant une circulation naturelle de l'air autour du capteur. Des appareils de mesure de température plus précis utilisent un écran qui force l'air à traverser le capteur.

La température de l'air est généralement mesurée sur l'échelle Celsius.

La température de l'air joue un rôle important dans les performances du système PV, car les modules PV et les onduleurs sont refroidis par convection par l'air ambiant.



Figure II.5. RTD

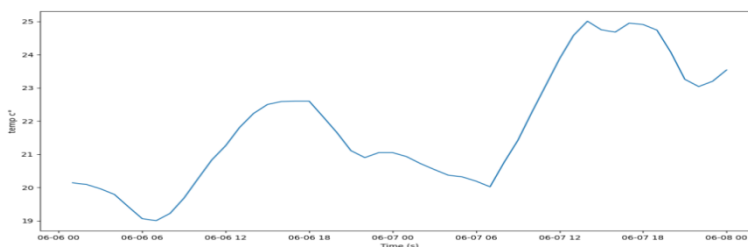


Figure II.4. Prévision de la température de l'air de 06 à 08/06/2021

I.2.1.2. Vitesse et direction du vent :

La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre. Le type le plus courant est l'anémomètre à coupelle, illustré sur le côté droit de l'image ci-dessous. Le nombre de rotations par intervalle de temps est utilisé pour calculer la vitesse du vent. La girouette de gauche sert à mesurer la direction du vent. La direction du vent est indiquée comme la direction à partir de laquelle le vent souffle.



Figure II.6.un anémomètre

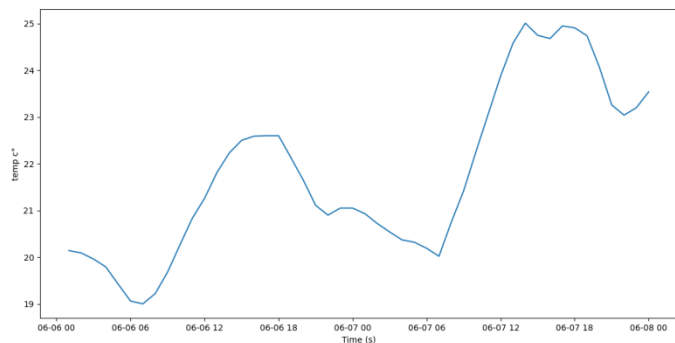


Figure II.7.Prévision de la vitesse du vent du 06 a 08/06/2021

I.2.1.3. Précipitation

Les précipitations sont généralement mesurées à l'aide d'un pluviomètre à seau basculant. C'est généralement un cylindre avec une surface de base connue qui permet aux précipitations d'entrer et est dirigé vers un entonnoir où il remplit un seau très petit et sensible qui pivote comme une balançoire de telle manière que lorsqu'un côté se remplit, il tombe et permet à l'eau de s'écouler de l'autre côté jusqu'à ce qu'elle baisse et que le cycle continue. Le nombre de pivots de l'axe est mesuré et est lié à la quantité de pluie qui tombe. Il est courant dans les climats froids de chauffer l'intérieur du cylindre de sorte que si les précipitations sont gelées, elles seront fondues et comptées.

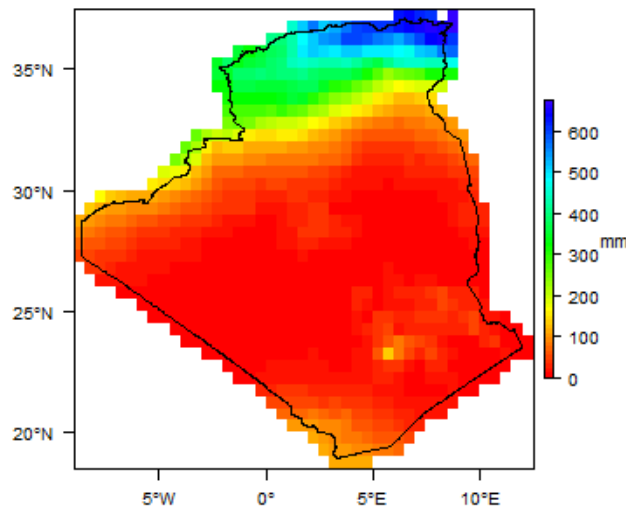


Figure II.8. Les précipitations moyennes annuelles en Algérie

I.2.1.4. Pression de l'air :

La pression atmosphérique est mesurée avec un baromètre. Les mesures de la pression atmosphérique sont utilisées dans la modélisation des performances PV pour aider à ajuster les estimations de la masse d'air. Les fluctuations de la pression atmosphérique sont corrélées aux variations de l'épaisseur de l'atmosphère et peuvent également entraîner des modifications systématiques du spectre solaire au sol.

La bibliothèque PVlib contient une fonction `x` pour convertir l'altitude en pression atmosphérique puis calculer la masse d'air, par exemple :

```
airmass = pvlib.atmosphere.get_relative_airmass(apparent_zenith)
pressure = pvlib.atmosphere.alt2pres(altitude)
airmass = pvlib.atmosphere.get_absolute_airmass(airmass, pressure)
```

I.2.1.5. Les nuages :

Les nuages sont constitués de petites gouttes d'eau et de cristaux de glace en suspension dans l'air. La plupart des nuages sont situés dans la troposphère ; ils se forment par condensation habituellement au niveau des courants ascendants. Selon leur altitude et leur composition, ils présentent diverses formes et propriétés. L'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) propose une classification des nuages en 10 principales classes.

L'impact des nuages sur le rayonnement perçu au sol est difficile à décrire de façon quantitative. En effet, les nuages d'un même type peuvent avoir un effet d'atténuation différent en fonction de leurs propriétés macroscopiques et microscopiques (géométrie, épaisseur optique, quantité d'eau liquide, etc). Cependant les nuages ont généralement un effet

réducteur sur le rayonnement reçu au sol puisqu'ils réfléchissent une partie de la lumière incidente vers l'espace. Diverses approches seront abordées au cours de cette étude pour caractériser de façon quantitative l'effet de la couverture nuageuse sur le rayonnement au sol.

La simulation ci-dessous représente la prédiction du pourcentage de nuages à la date d'édition de ce paragraphe, qui est le 06 juin 2021 vers deux heures du matin. La simulation a été développée par la fonction getweather, dont nous parlerons plus tard.

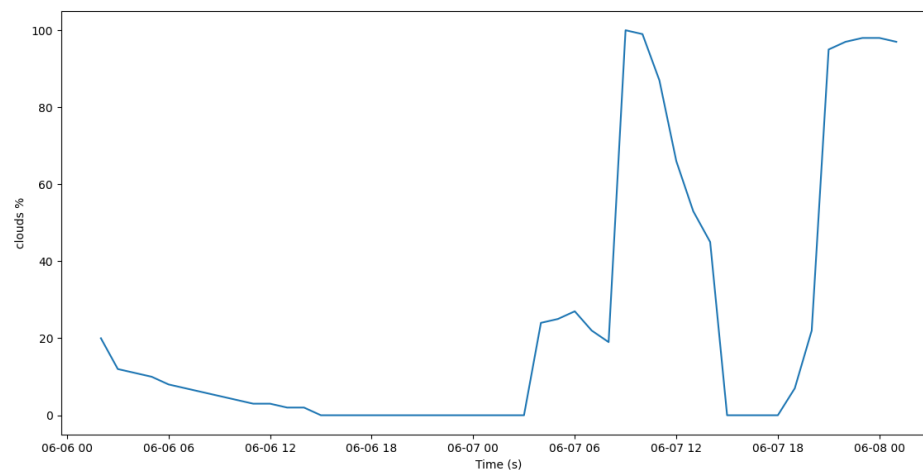


Figure II.9 : Prédiction des nuages (%)

I.2.1.6. La turbidité atmosphérique :

La turbidité est une mesure de la clarté du ciel, Le modèle de ciel clair d'Ineichen et Perez paramétrise l'irradiance en fonction de la turbidité de Linke : La dérivation des composantes du rayonnement solaire au sol à une grande échelle géographique et temporelle nécessite la connaissance de la transmittance atmosphérique en ciel clair aux mêmes échelles. Ces informations peuvent être obtenues via l'utilisation de coefficients de turbidité bien connus comme par exemple le coefficient de turbidité de Linke.

Le Facteur de trouble de Linke sert à caractériser le trouble atmosphérique (dû à la vapeur d'eau, la brume, aux fumées, aux poussières...) d'un ciel sans nuage ou peu nuageux. Ce facteur est intéressant quand on ne cherche pas à caractériser la composition spectrale du rayonnement au sol, mais simplement son contenu énergétique dans la bande.

La figure ci-dessous représente une simulation numérique du mois d'août par la bibliothèque PVlib, nous avons développé un des exemples contenus dans la bibliothèque pour simuler l'Afrique du Nord plus précisément et plus clairement que ce que contient le programme original.

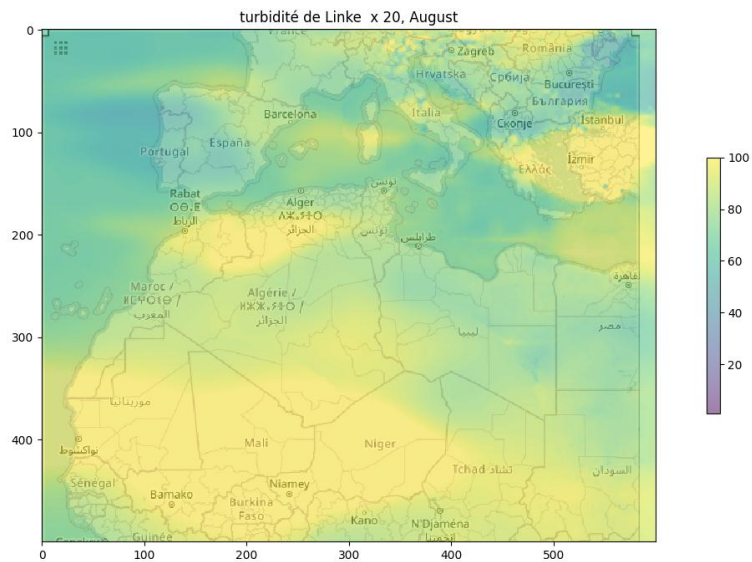


Figure II.10. La turbidité de link simulé par PVlib

I.2.2. Les Modèles de températures :

I.2.2.1. Modèle de température du module Sandia :

La mesure ou la prévision de la température du module est la première étape de l'estimation de la température de la cellule, qui est nécessaire pour prédire la courbe IV du module. La température du module dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment la température de l'air, l'éclairement, la vitesse du vent et les matériaux du module. La plupart des modèles sont en régime permanent et conviennent donc pour des pas de temps d'environ 30 minutes ou plus. Sandia et ASU viennent de publier un nouveau modèle de température de module transitoire basé sur une moyenne mobile d'un modèle en régime permanent :

Sandia [13] propose le modèle suivant pour estimer la température du module T_m :

$$T_m = E_{POA} \cdot (e^{a+b \cdot WS}) + T_a \quad (II.21)$$

E_{POA} Rayonnement solaire incident sur le module (POA) (W/m^2)

a et b sont des paramètres qui dépendent de la construction et des matériaux du module ainsi que de la configuration de montage du module. Le tableau ci-dessous répertorie les valeurs représentatives de ces paramètres pour divers types et configurations de modules courants.

Tableau II-1 : les valeurs représentatives des paramètres a et b

Type de module	Montage	A	B
Glass/cell/glass	Open rack	-3.47	-.0594
Glass/cell/glass	Close roof mount	-2.98	-.0471
Glass/cell/polymer sheet	Open rack	-3.56	-.0750
Glass/cell/polymer sheet	Insulated back	-2.81	-.0455
Polymer/thin-film/steel	Open rack	-3.58	-.113
22X Linear Concentrator	Tracker	-3.23	-.130

I.2.2.2. Modèle de température du module Faiman :

David Faiman [14] a présenté un modèle de température de module basé sur des concepts simples de transfert de chaleur. Le formulaire de modèle est :

$$T_m = T_a + \frac{E_{POA}}{U_0 + U_1 \times WS} \quad (II.22)$$

T_m est la température de la module (°C)

T_a est la température de l'air ambiant (°C)

E_{POA} est l'éclairement énergétique incident sur le plan du module ou du réseau (W / m^2)

U_0 est le composant de transfert de chaleur constant (W / m^2K)

U_1 est la composante de transfert de chaleur par convection (W / m^3sK)

WS est la vitesse du vent (m/s)

Dans son article, Faiman a mesuré l'irradiation, la vitesse du vent et les températures des modules sur sept types de modules différents et a ajusté les données aux valeurs de et . Notez que tous les modules avaient des couvercles en verre avant et des dos en Tedlar®.

Les valeurs U_0 varient de 23,5 à 26,5 avec un ajustement combiné = 25

Les valeurs de U_1 variaient de 6,25 à 7,68 avec un ajustement combiné = 6,84

I.2.2.3. Modèle de température de cellule Sandia:

Le modèle de température de la cellule Sandia estime la température de la cellule à partir de la température du module, de l'éclairement énergétique du plan du réseau, et d'un paramètre de différence de température, ΔT . Ce paramètre de différence définit la différence de température entre le module et la température de la cellule.

Le formulaire de modèle est :

$$T_c = T_m + \frac{E_{POA}}{E_0} \Delta T \quad (II.23)$$

Où E_0 est une irradiation de référence ($1000 W/m^2$).

I.2.2.4. Modèle de température de cellule PVsyst :

L'application de modélisation des performances PV, PVsyst, implémente un modèle de température de cellule basé sur le modèle de température du module Faiman. La forme du modèle est :

$$T_c = T_a + E_{POA} \frac{\alpha(1 - \eta_{tm})}{U_0 + U_1 \times WS} \quad (II.24)$$

Où

T_c est la température de la cellule (°C)

T_a est la température de l'air ambiant (°C)

α est le coefficient d'absorption du module (la valeur par défaut de PVsyst est de 0,9)

E_{POA} est l'éclairement énergétique incident sur le plan du module ou du réseau (W / m^2)

eta_m est l'efficacité du module PV (PVsyst par défaut est 0,1)

U_0 est le composant de transfert de chaleur constant ($W / m^2 K$)

U_1 est la composante de transfert de chaleur par convection ($W / m^3 sK$)

WS est la vitesse du vent (m/s)

PVsyst en dit peu sur les valeurs à utiliser pour U_0 et U_1 . Notez que les valeurs par défaut actuelles ne dépendent pas de la vitesse du vent ($U_1 = 0$)

Pour les baies autonomes, la valeur par défaut actuelle est : $U_0 = 29 W / m^2 K$;

$U_1 = 0 W / m^3 sK$

Pour les baies entièrement isolées (montage sur toit fermé), la valeur par défaut actuelle est :

$U_0 = 15 W / m^2 K$; $U_1 = 0 W / m^3 sK$

Les utilisateurs de PVsyst peuvent également saisir une NOCT (Nominal Operating Collector Temperature) à la place des valeurs U . Le programme calcule ensuite automatiquement les valeurs en fonction de $\alpha = 0.9$ et $eta_m = 0.1$.

I.2.3. Les modèles ciel clair :

Le rayonnement solaire par ciel clair est le rayonnement observé lorsqu'il n'y a aucun nuage. Il dépend donc de paramètres géométriques (distance Terre/Soleil, altitude) mais aussi de paramètres de l'atmosphère, puisque même sans nuages, les gaz et les particules en suspension, les aérosols, constituant l'atmosphère ont des interactions avec le rayonnement solaire qui dépendent des caractéristiques des particules. Plusieurs modèles ont été présentés dans la littérature pour caractériser le rayonnement "ciel clair", une étude comparative a été publiée en 2006] puis en 2013. On retiendra ici deux modèle, le modèle Ineichen/Perez et le modèle de Solis simplifié

I.2.3.1. Modèle Ineichen/Perez :

Ce modèle [15] tient compte à la fois des paramètres géométriques mais également de la variation de composition de l'atmosphère par l'intermédiaire du facteur de trouble de Linke (Linke Turbidity factor). Ce facteur inclut la réflexion du rayonnement par les aérosols mais aussi son absorption par les gaz de l'atmosphère. Ainsi, il caractérise l'atténuation du rayonnement par l'atmosphère : plus il est grand, plus l'atmosphère ciel clair atténue le rayonnement incident. Il est établi à partir d'une base de données de Trouble de Linke en moyenne mensuelle climatologique. En pratique, le modèle ciel clair présente les cycles journaliers (jour/nuit) et annuels.

I.2.3.2. Le Modèle Solis Simplifié :

Il s'agit d'un modèle [16] de rayonnement solaire par ciel clair qui est basé sur la relation Lambert Beer et le modèle de transfert radiatif (RTM) présenté par Ineichen et al.

Le modèle Solis simplifié paramétrise l'irradiation en termes d'eau précipitable et de profondeur optique d'aérosol.

I.2.4. Les Modèles de ciel nuageux :

L'article de 1982 présente le modèle MAC de ciel clair, Davies et McKay ont évalué quatre modèles de ciel nuageux [17] . Parmi eux, le modèle MAC de couche nuage a les meilleures performances, et avec son produit à trois couches, il correspond aux informations disponibles dans le API Web de prévision de localisation. Le pourcentage de couverture nuageuse totale et les quantités de nuages signalés dans trois couches (nuages hauts, moyens et bas) et le rayonnement horizontal global par ciel clair sont des entrées. Dans une autre étude (1995) utilisant des observations au sol des nuages dans l'Arctique, le modèle de couche nuageuse MAC a produit la plage d'erreur la plus faible par rapport à 11 autres modèles simples de ciel nuageux [18] . Des méthodes plus avancées pour la détection et la classification des nuages aux latitudes moyennes et élevées exploitent des capteurs à distance sur des satellites géostationnaires et en orbite polaire, tels que les progiciels des installations d'applications satellitaires d'EUMETSAT sur le soutien à la prévision immédiate et à la prévision à très court terme (NWC-SAF) fournissant des produits opérationnels d'imagerie en nuage sur l'Arctique et l'Europe.

Les modèles de couche nuageuse simples comme MAC prennent en considération les variations de la transmission des nuages avec le type de nuage. La transmission totale des nuages est le produit de la transmission des couches individuelles. L'équation peut être développée en une série géométrique pour tenir compte des réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère. Une seule réflexion du sol et une du nuage est considérée (ou on peut considérer l'effet de plusieurs réflexions à incorporer dans le dénominateur).

I.3. Modèles d'estimation DNI :

I.3.1. Modèle DISC :

L'algorithme DISC [19] convertit l'irradiation horizontale globale (GHI) en irradiation normale directe (DNI) grâce à des relations empiriques entre les indices de clarté globale et directe :

Soit G_0 rayonnement extraterrestre d'un jour de l'année

1. Calculer indice de clarté : $K_t = GHI/G_0$

2. Calculez la transmittance normale par ciel clair pour tous les angles de zénith solaire :

$$K_{nc} = 0.866 - 0.122 m_{a,p} + 0.0121 m_{a,p}^2 - 0.000653 m_{a,p}^3 + 0.000014 m_{a,p}^4$$

3. Calculer les coefficients a, b et c pour l'équation de transmission du faisceau :

Si $K_t \leq 0.60$

$$a = 0.512 - 1.56 K_t + 2.286 K_t^2 - 2.222 K_t^3$$

$$b = 0.370 + 0.962 K_t$$

$$c = -0.280 + 0.932 K_t - 2.048 K_t^2$$

Si $K_t > 0.60$

$$a = -5.743 + 21.77 K_t - 27.49 K_t^2 + 11.56 K_t^3$$

$$b = 41.4 - 118.5 K_t + 66.05 K_t^2 + 31.90 K_t^3$$

$$c = -47.01 + 184.2 K_t - 222.0 K_t^2 + 73.81 K_t^3$$

4. Calculer la transmission normale directe.

$$K_n = K_{nc} - \Delta K_n$$

where $\Delta K_n = a + b e^{cm_{a,p}}$

5. Calculer l'irradiation normale directe DIRINT :

$$G_{b,n,DISC} = G_0 K_n$$

6. Mettre $G_{b,n,DISC}$ à 0 if $\theta_Z > 87^\circ$, $GT < 1$, ou $G_{b,n,DISC} < 0$

I.3.2. Modèle DIRINT :

R. Perez et. Al [20] développe un modèle pour déterminer le DNI à partir du GHI en tant qu'amélioration du modèle DISC en utilisant des données GHI de séries chronologiques et des informations sur la température du point de rosée. L'efficacité du modèle DIRINT s'améliore avec chaque information fournie.

. «Le modèle DIRINT », améliore aussi l'estimation en classant l'angle zénithal, la transmittance horizontale globale et la température du point de rosée ; ou diverses fonctions de ces variables, y compris une dérivée temporelle de la transmittance horizontale globale. Chaque paramétrage ou « bac » est indicatif de l'état du ciel. L'impact de chaque casier possible est donné en trouvant un coefficient à partir d'une table de consultation à quatre dimensions, et en utilisant ce coefficient pour modifier le résultat DNI estimé à partir du modèle DISC. Perez et. L'article d'al. "Dynamic Global-to-Direct Irradiance Conversion Models", ne nomme le modèle DIRINT que le modèle "DISC modifié" (pour le distinguer d'un "modèle simple" qui a également été introduit dans l'article) et le nom " DIRINT » doit avoir été appliqué ailleurs.

I.4. Les Modèles de Préviation :

Pvlib-python fournit un ensemble de fonctions et de classes qui facilitent l'obtention de données de prévision météorologique et la conversion de ces données en une prévision de puissance photovoltaïque. Les utilisateurs peuvent récupérer des données de prévisions météorologiques normalisées pertinentes pour la modélisation de l'énergie photovoltaïque à partir des modèles NOAA/NCEP/NWS, notamment GFS, NAM, RAP, HRRR et NDFD. Une prévision de puissance photovoltaïque peut ensuite être obtenue en utilisant les données météorologiques comme entrées pour les capacités de modélisation complètes de pvlib python. Des implémentations standardisées, open source et de référence de méthodes de prévision utilisant des données accessibles au public peuvent aider à faire progresser l'état de l'art de la prévision de l'énergie solaire.

Pvlib-python utilise la bibliothèque Siphon d'Unidata pour simplifier l'accès aux données de prévision en temps réel hébergées sur le catalogue Unidata THREDDS. Siphon est idéal pour l'accès par programmation aux données THREDDS.

I.4.1. Le modèle GFS

Le Global Forecast System (GFS) est le modèle américain qui fournit des prévisions pour le monde entier. Le GFS est mis à jour toutes les 6 heures. Le GFS est exécuté à deux résolutions, 0,25 degrés et 0,5 degrés, et est disponible avec une résolution de 3 heures. Les prévisions du modèle GFS ont été présentées ci-dessus. Utilisez le GFS, entre autres, si vous voulez des prévisions pour 1 à 7 jours ou si vous voulez des prévisions pour n'importe où sur Terre.

II. Simulation des performances PV :

Un modèle est un système informatique qui simule le comportement phénomène naturel. Il est utilisé soit comme un laboratoire numérique pour étudier les processus de ce phénomène et mieux les comprendre, soit comme un outil d'aide à la prévision du temps.

Dans notre cas, la simulation numérique est basée sur une représentation discrète de la carte d'Algérie. Ils permettent de calculer les états successifs des paramètres atmosphériques définis à l'intérieur de chaque maille d'une grille bidimensionnel (la figure II.12). La taille de la maille définit les résolutions horizontale et verticale du modèle.

Nous avons pris quelques centaines de points de la carte de l'Algérie et fait une simulation numérique sur eux:

- ❖ Simulation de ciel clair pour déterminer GHI, DNI, DHI, Energie totale ... etc
- ❖ Simulation de ciel nuageux pour déterminer Les Paramètres Climatiques : température de l'air, vitesse du vent, pression, turbidité

En réalité, La résolution des équations d'un modèle ne se fait pas de façon indépendante pour chaque maille. En effet, l'expression des variations horizontales et verticales des diverses grandeurs ainsi que celle du transport de ces grandeurs par le vent, font intervenir des valeurs dans les mailles voisines. Les paramétrisations, elles, font souvent

intervenir des calculs le long de toutes les mailles d'une colonne verticale (pour décrire par exemple la chute de la pluie ou le transport turbulent vers le haut de la vapeur d'eau qui s'évapore à la surface de l'océan).

La discrétisation des équations n'a pas lieu uniquement dans l'espace mais également dans le temps. Le pas de temps, qui est l'équivalent pour le temps de la taille de la maille dans l'espace, sépare deux estimations successives de l'état de l'atmosphère par le modèle.

Les schémas numériques, même les plus sophistiqués, sont des méthodes de résolutions approchées dont la solution converge vers la solution exacte lorsque la résolution spatio-temporelle du modèle devient très fine. C'est pour cette raison que la résolution des modèles augmente au fur et à mesure que la capacité des calculateurs le permet.

Il faut s'assurer que le niveau d'erreur reste stable au cours de la simulation. Certains schémas numériques peuvent en effet voir leur erreur croître très rapidement si certaines conditions ne sont pas respectées.. Si ces conditions n'est pas vérifiées dans un schéma, l'erreur grossit jusque à atteindre des nombres infiniment grands, le schéma devient instable, on dit que le modèle explose.

De nombreux schémas de modélisation ont été proposés dans le passé et de nouveaux schémas sont encore publiés chaque année. La difficulté pour le modélisateur est de faire les choix qui permettent le meilleur compromis entre précision, stabilité et efficacité en temps de calcul. Ces choix ne sont pas indépendants de l'architecture du calculateur qui va être utilisé.

II.1. Collection des données météorologiques

L'observation est le premier maillon de la modélisation ou simulation de PV. En effet, la collecte des observations en mer, au sol, dans l'atmosphère et dans l'espace afin de connaître l'état de l'atmosphère, de l'océan superficiel, et du manteau neigeux, est la donnée d'entrée première pour tout travail météorologique ou climatique. La collecte de ces données, leur transfert, leur diffusion et leur exploitation utilisent des systèmes d'information robustes et performants. Le développement du réseau d'observation et des infrastructures essentielles, notamment en termes de systèmes d'information, est une priorité de recherche scientifique de modélisation et simulation de PV.

Dans notre projet Nous avons développé une fonction de plusieurs entrées en python pour calculer les grandeurs métrologiques selon les différentes régions géographiques et son altitude.

II.2. Calcul l'Énergie de PV Avec le modèle Ineichen/Perez:

Nous avons développé une fonction de plusieurs entrées pour calculer l'énergie générée par la cellule solaire dans différentes conditions météorologiques ou selon différentes régions géographiques et son altitude :

```
def getenergy(latitude, longitude, altitude, temp_air, wind_speed,
times):
```

Cette fonction fonctionne dans l'ordre suivant pour calculer l'énergie totale :

- la position de soleil : get_solarposition(times, latitude, longitude).
- Valeur de masse d'air relative : get_relative_airmass
- Pression d'air : alt2pres(altitude)
- Facteur de turbidité de link : lookup_linke_turbidity(times, latitude, longitude)
- Irradiation totale : get_total_irradiance
- Température de cellule interne avec le modèle Temp-SAPM
- Irradiation effective : sapm_effective_irradiance
- Energie dc avec le modèle SAPM
- Conversion de DC à AC (par exemple le modèle inverter.sandia)

Remarque : nous avons développé une autre version de modèle avec l'utilisation de ModelChain

Nous avons pris quelques centaines de points de la carte de l'Algérie et fait une simulation numérique sur eux, le résultat était, comme prévu, la présence de deux excellentes régions pour y installer des panneaux solaires, la région de Djanet et la région de Wilayat El Djelfa.

Ce qui a été observé, c'est que le modèle Ineichen/Perez n'est pas précis pour générer des valeurs de DNI. Nous pensons que ce modèle a besoin de beaucoup de modifications, (par exemple le modèle DIRINT) d'autant plus que la simulation numérique a montré une troisième région propice à l'installation de panneaux solaires (nord- ouest de l'Algérie), ce qui n'est pas raisonnable du moins pour la simulation que nous avons téléchargée depuis certains sites mondiaux.

Un enjeu important des années à venir consiste à améliorer la stabilité des modèles existants, c'est à dire leur capacité à s'adapter à toutes ces augmentations, tout en restant des outils utilisables par l'ensemble des chercheurs-développeurs et utiles pour les applications de prévision du temps.

Pour cela, nous avons fait une simulation en utilisant un modèle intégré à la bibliothèque PVlib, ce modèle est GFS, dont nous parlerons dans le paragraphe suivant.

```
def getweather():
    api_key = "8183ab6096df075b48a9e84d15c3c98f"
    lat = "35.9297"
    lon = "0.0930"
    url =
"https://api.openweathermap.org/data/2.5/onecall?lat=%s&lon=%s&appid=%s&units=metric" % (lat, lon, api_key)
    response = requests.get(url)
```

```
data = json.loads(response.text)
return data
```

II.3.Calcul l'Énergie de PV Avec le modèle GFS:

Ce modèle et après avoir recherché a son code source, nous avons trouvé que il est basé sur des modèles modifiés tels que Les Modèles DISC et DIRINT.

La fonction get_processed_data qui génère des valeurs de GHI, DHI et DNI dépend principalement des modèles mentionnés précédemment, Après simulation avec ce modèle, l'erreur précédente a été corrigée.

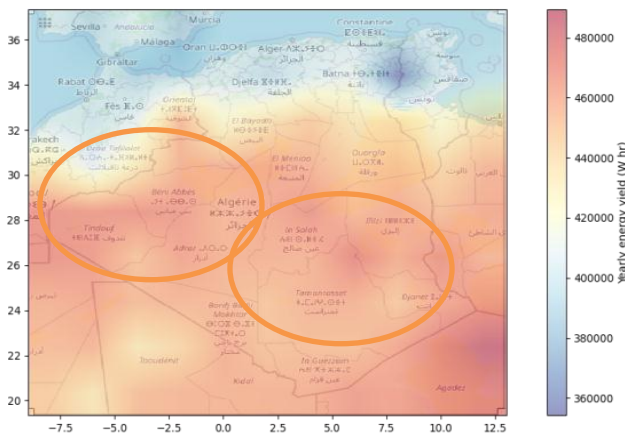


Figure II.12 :) Carte de potentiel d'énergie Simulé par PVlib +PVGIS

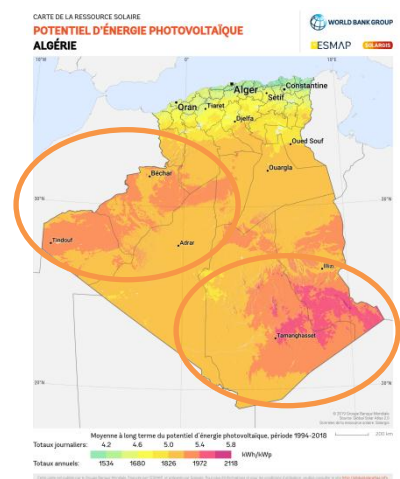


Figure II.11: Carte de potentiel d'Algérie

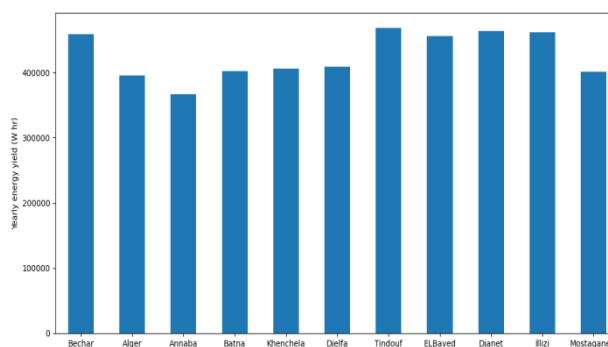


Figure II.13:Potentiel d'énergie Simulé par PVlib +PVGIS

II.4.Calcul d'énergie de PV Avec le modèle PVGIS:

L'application en ligne gratuite PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) est un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe en Afrique et en ASIE et en Amérique (et également pour site isolés).

A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes).

Par ailleurs PVGIS propose des cartes d'ensoleillement (irradiation en kWh/m²) et de température précises haute définition de la plupart des Pays du monde.

Nous développons une petite fonction sous python pour obtenir les données de site PVGIS. PVGIS donne de bons résultats :

III. Résultats & discussions :

- ❑ Comme prévu, Le schéma numérique de notre simulation donne deux excellentes régions pour y installer des panneaux solaires, la région de **Djanet** et la région sud de la Wilayat **El Bayed**.
- ❑ Le modèle GFS, Pas mal en simulation mais certains paramètres climatiques ne sont pas disponibles, cela peut être compensé par des fonctions API de site gratuit openweathermap.org
- ❑ En réalité, L'application d'un modèle ne se fait pas de façon indépendante pour chaque maille. En effet, l'expression des variations horizontales et verticales des diverses grandeurs ainsi que celle du transport de ces grandeurs par le vent, font intervenir des valeurs dans les mailles voisines. Les paramétrisations, elles, font souvent intervenir des calculs le long de toutes les mailles d'une colonne verticale.
- ❑ La discrétisation des modèles n'a pas lieu uniquement dans l'espace mais également dans **le temps**. Le pas de temps, qui est l'équivalent pour le temps de la taille de la maille dans l'espace, sépare deux estimations successives de l'état de climat par le modèle.
- ❑ De nombreux schémas de modélisation ont été proposés dans le passé et de nouveaux schémas sont encore publiés chaque année. La difficulté pour le modélisateur est de faire les choix qui permettent le meilleur compromis entre précision, stabilité et efficacité en temps de calcul.

IV. Conclusion

Notre travail se base sur la modélisation et simulation de l'énergie solaire pour produire l'électricité solaire. A cet effet nous avons détaillé une étude sur le gisement solaire en Algérie qui fait apparaître un potentiel considérable. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale est de l'ordre de 5 KWh sur la quasi-totalité du territoire national, quand la durée d'ensoleillement dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux et la zone Saharienne.

Nous avons présenté dans ce chapitre les performances des systèmes photovoltaïques qui sont fortement affectées par les paramètres climatologiques (Rayonnement solaire et Température) et par le type de cellule solaire. Nous avons utilisé la bibliothèque de simulation « PVlib » pour l'évaluation de rayonnement solaire global en Algérie et les meilleurs résultats pour les différentes régions sont obtenus pour le site d'Algérie. La valeur maximale de l'irradiation solaire globale estimée est obtenue aux mois de Juin et Juillet pour les différents sites. L'estimation par PVlib de la puissance annuelle de l'énergie fournie pour la région de Mostaganem est égale 400 kWh, était produite par le module, avec un taux d'efficacité du système PV acceptable.

Chapitre III : Etude expérimentale de l'effet des paramètres climatiques sur le rendement des modules photovoltaïques

1.Introduction

Ce chapitre a pour objectif général l'analyse expérimentale de l'influence des paramètres climatiques sur la production énergétique de modules photovoltaïques. La production énergétique d'un module PV est intimement liée à trois principaux paramètres électriques : la puissance maximale, le courant de court-circuit et la tension en circuit-ouvert. Ce travail s'intéressera particulièrement à la puissance maximale et à la tension en circuit-ouvert des modules photovoltaïques au silicium.

Plus spécifiquement, il s'agira d'étudier et de modéliser l'influence de la température et l'humidité sur la puissance maximale et la tension en circuit-ouvert des modules photovoltaïques.

Dans ce but, notre projet consiste à concevoir et réalisée un prototype d'incubateur autonome les commandes de température, humidité sont contrôlé par une interface Arduino suivant un programme adapté.

2.Moyens utilisés pour l'étude

Un incubateur est un dispositif composé essentiellement d'une enceinte fermée, qui peut être maintenue à une température et une humidité constantes grâce à un système de contrôle, et contient un module. Ils existent plusieurs types de mécanismes de régulation de température (thermostat): bilames, tubes à mercure avec contacts électriques ou thermostats électroniques à microprocesseurs. En raison de la précision de réglage, ce dernier est plus performant aux autres. Dans notre cas nous avons utilisé un capteur DHT.

Notre Système est composé par :

Arduino uno :

La carte la plus connu aujourd'hui est L'Arduino UNO. Elle est extrêmement bon marcher c'est aussi la plus simple à utiliser. En effet, avec cette carte qu'on va l'utilisée dans notre projet.



Figure III.1: Arduino uno

Détecteur de chaleur & humidité DHT

Le capteur DHT22 (aussi connu sous la référence AM2302) et son petit frère le DHT11 sont des capteurs de température et d'humidité "deux en un".

Le capteur DHT22 / AM2302 est capable de mesurer des températures de -40 à +125°C avec une précision de +/- 0.5°C et des taux d'humidité relative de 0 à 100% avec une précision de +/- 2% (+/- 5% aux extrêmes, à 10% et 90%). Une mesure peut être réalisée toutes les 500 millisecondes (soit deux fois par seconde). Le capteur DHT11 est lui capable de mesurer des températures de 0 à +50°C avec une précision de +/- 2°C et des taux d'humidité relative de 20 à 80% avec une précision de +/- 5%. Une mesure peut être réalisée toutes les secondes.

Le DHT22 et le DHT11 sont tous les deux compatibles 3.3 volts et 5 volts (le fabricant recommande cependant de toujours alimenter le capteur en 5 volts pour avoir des mesures précises). Ils ont aussi le même câblage et le même protocole de communication.

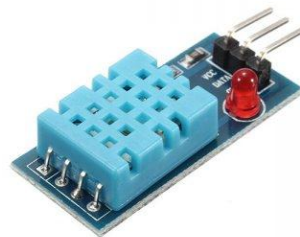


Figure III.2: DHT22

Code d'exemple :

```
1. #include <dht11.h>
2. #define DHT11PIN 4 // broche DATA -> broche 4
3.
4. dht11 DHT11;
5.
6. void setup()
7. {
8.   Serial.begin(9600);
9.   while (!Serial) {
10.    // wait for serial port to connect. Needed for native USB
    (LEONARDO)
11.   }
12.   Serial.println("DHT11 programme d'essai ");
13.   Serial.print("LIBRARY VERSION: ");
14.   Serial.println(DHT11LIB_VERSION);
```

```
15.   Serial.println();
16. }
17.
18. void loop()
19. {
20.   DHT11.read(DHT11PIN);
21.
22.   Serial.print("Humidité (%): ");
23.   Serial.print((float)DHT11.humidity, 2);
24.   Serial.print("\t");
25.   Serial.print("Température (°C): ");
26.   Serial.println((float)DHT11.temperature, 2);
27.
28.   delay(2000);
29. }
```

Résistance de chauffage

Le chauffage est assuré par une résistance chauffante contrôlé manuellement.

3. Mesure & teste

Le panneau utilisé est un panneau solaire type NE-80E1EJ silicium Polycristallin avec une puissance de sortie maximale de 5 W, une tension de circuit ouverte est de 18 V, un courant de court-circuit de 5,15 A, la tension de la puissance max V_m (V) est de 17,3 V. Le courant de la puissance max I_m (A) est de 4,63 A, le facteur de forme FF (%) est de 71,9. L'efficacité du panneau η (%) est 12,1, le coefficient de température pour p_{max} (% /°C) égale à -0,49, le coefficient de température pour V_{co} (% /°C) égale à -0,35, le coefficient de la température pour I_{cc} (% /°C) égale à 0,053.

Ces paramètres sont calculés sous les conditions standards température de 25°C, éclairement de 1000 W/m^2 , et la masse d'air AM 1,5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale). Les caractéristiques de ce panneau sont données dans la fiche technique du module.

Mesure la tension en circuit ouvert (V_{oc}) :

Le courant de court-circuit (I_{sc}) peut être mesuré avec la tension en circuit ouvert (V_{oc}) par un multimètre. Le courant maximum (I_{max}) et la tension maximale générée par le panneau (V_{max}) sont également mesurés.

Comme montre la Figure. 2.4, la Source de lumière est éloignée de 1 mètre du panneau photovoltaïque. L'inclinaison est choisie afin d'éviter la réflexion de l'ensoleillement.

L'éclairage est un paramètre important dans l'effet photovoltaïque. En effet, le rayonnement solaire incident sur les panneaux solaires permet de générer une puissance énergétique. La figure 2.5 présente la variation de rayonnement en fonction du temps.

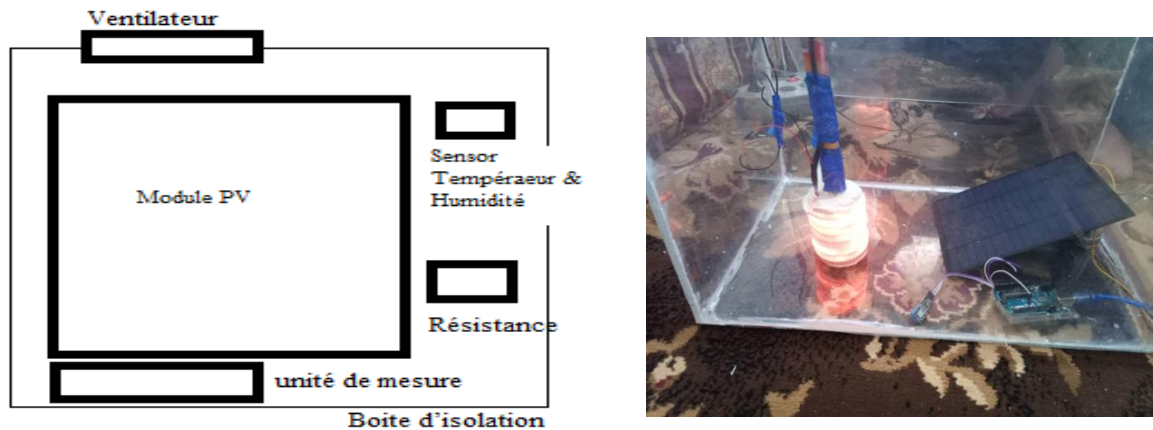


Figure III.3 :l'utilisation de détecteur de chaleur & humidité

Le code Principale :

```
#include "dht11.h"
#define DHT11PIN 4 // broche DATA -> broche 4
dht11 DHT11;
unsigned long previousMillis = 0; // will store last time LED was
updated
const long interval = 500; // interval at which to blink
(millisecons)
const int ledPin = 6; // the number of the LED pin
int ledState = LOW; // ledState used to set the LED
boolean state = false;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}
float FTemp, FHumidity, Fdc;
bool FVent;
float gettemp() {
  DHT11.read(DHT11PIN);
  float x = (float)DHT11.temperature;
  return x;
}
float gethumidity(){
  DHT11.read(DHT11PIN);
  FHumidity = (float)DHT11.humidity;
  return FHumidity;
}
float getdc(){
  Fdc = 12.78; //example
  return Fdc;
}
void settemp(float value){
  FTemp = value;
```

```
}  
void sethumidity(float value){  
    FHumidity = value;  
}  
void setonventirad(){  
    FVent = true;  
}  
void setoffventirad(){  
    FVent = false;  
}  
  
void loop() {  
    int value;  
    String str;  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
    if (Serial.available() > 0) {  
        char inchar = Serial.read();  
        Serial.println("received");  
        Serial.println(inchar);  
        switch (inchar) {  
            case '0':  
                Serial.println(gettemp());  
                break;  
            case '1':  
                Serial.println(gethumidity());  
                break;  
            case '2':  
                Serial.println(getdc());  
                break;  
            case '3':  
                while(!Serial.available())  
                {  
                    str = Serial.readString();  
                    if(str.length() >= 2 ) break;  
                }  
                //Serial.println(str);  
                settemp(str.toFloat());  
                Serial.println("value is set");  
                break;  
            case '4':  
                value = Serial.read();  
                sethumidity(value);  
                break;  
            case '5':  
                Serial.println("setonventirad");  
                setonventirad();  
                break;  
            case '6':  
                Serial.println("setoffventirad");  
                setoffventirad();  
                break;  
            case '7':  
                break;  
        }  
    }  
}
```

Etude Expérimentale :

L'éclairage augmente au fur et à mesure que le soleil se déplace perpendiculairement. En effet, Nous avons utilisé une lampe LED pour simuler notre projet.

4. Les caractéristiques courant-tension mesurées et simulées

Dans cette partie importante dans laquelle on a mesuré la puissance de sortie de panneau solaire utilisé. A l'aide d'un multimètre, on a mesuré le courant de court-circuit I_{CC} et la

tension du circuit ouvert V_{CO} . On constate également le courant maximal I_m et la tension maximale V_m générés par ce panneau en utilisant une résistance variable (rhéostat) de 0 à 100Ω , considéré comme une résistance de charge, branchée en parallèle avec notre panneau. La variation de cette résistance implique une variation des valeurs de I_m et V_m . La figure 2.6 illustre le montage utilisé pour mesurer la caractéristique $I=f(V)$.

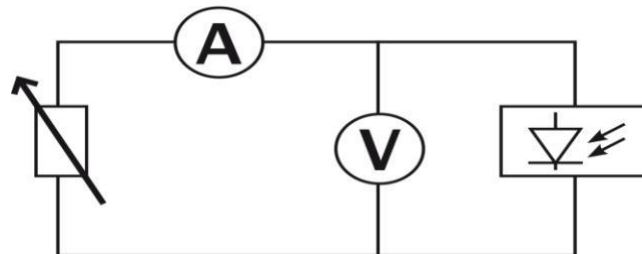


Figure III.4 :unité de mesure : $I=f(V)$.

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est caractérisé essentiellement par trois zones. La première zone le module fonctionne comme un générateur de courant ou le courant est proche du courant de court-circuit et la tension est faible. Dans la deuxième zone le module fonctionne comme un générateur de tension : dans ce cas la tension est proche de la tension à vide (circuit ouverte) V_{CO} et le courant est faible. Dans la troisième zone le module en état de fonctionnement optimal ou l'exploitation d'énergie est maximale et la puissance délivrée est maximisée par rapport aux autres zones.

Pour tracer la caractéristique courant-tension, comme le montre la figure III.5, et afin d'assurer que les conditions ambiantes reste les mêmes dans un temps assez court (changement de temps implique une variation de l'éclairement et de la température de jonction), on a pris des mesures de I_m et V_m à 12h30 min avec une température ambiante de 28°C et une température du module de 50°C .

La simulation des caractéristiques courant-tension du module, effectuée à l'aide du python et en intégrant les données du constructeur, la figure III.5 représente les caractéristiques mesurées et simulés.

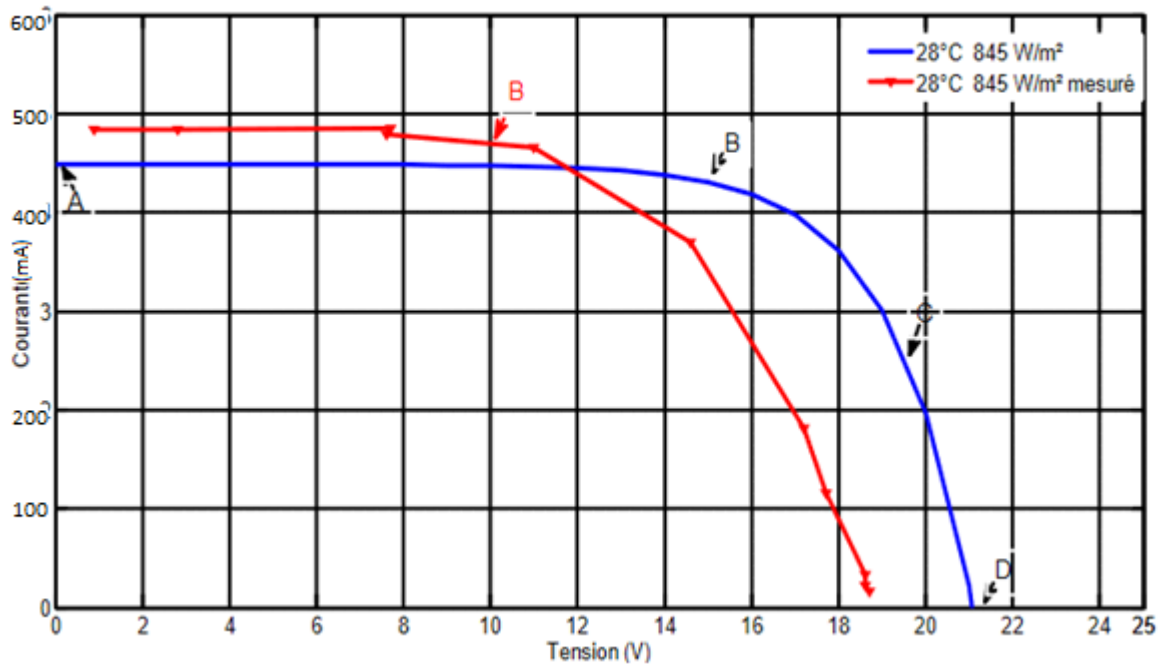


Figure III.5 :Caractéristiques I-V mesuré et simulé

Tableau III-1 Tension et courant mesurés

Température (C°)	Irradiance mesuré(W/m²)	Tension(V)	Courant(mA)
28°	845	18	100
28°	845	14	400
25°	750	17	80
25°	750	13	300
20°	500	16	65
20°	500	12	250

D'après les caractéristiques courant-tension simulés avec des valeurs données par le constructeur de panneau photovoltaïque et mesurés expérimentalement, on constate que :

- Les courbes courant-tension présentent presque la même allure.
- D'après les zones de fonctionnement du panneau, figure III.5 présente la différence entre les caractéristiques courant-tension mesurés et simulés sont divisés en trois zones :

1- La première zone [AB] : le panneau se comporte comme un générateur de courant c'est-à-dire que le courant est maximal et la tension est variable. On constate que la valeur du courant maximale de court-circuit I_{CC} dans les courbes simulées est plus importante que ceux mesurées. En effet, le courant de court-circuit qui est donné par le constructeur est de l'ordre de 515 mA dans les conditions standards ($T= 25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000 \text{ W/ m}^2$). Par contre, dans notre cas ou les conditions ne sont plus les mêmes, on a trouvé que $I_{CC} = 448 \text{ mA}$ simulée. il est de l'ordre de 484mA mesurée à une température ambiante de 28°C , avec un éclairage de l'ordre de 845 W/m^2 et une température de panneau de 50°C avec un écart de 31mA par apport au constructeur.

2- La deuxième zone [CD] : le panneau se comporte comme un générateur de tension c'est-à-dire le courant est faible et la tension est importante. On remarque dans cette zone que la différence des valeurs de tension est de l'ordre de 2,3 V (valeur mesurée 18,7 et valeur simulé 21V). Cette diminution au niveau de la tension est due à l'augmentation de la température de panneau qui est de l'ordre de 50°C .

3- La troisième zone [BC] : le fonctionnement de panneau est optimal, c'est-à-dire que la puissance est maximale. On constate que la pente des deux courbes (mesurée et simulée) n'est pas la même. En effet, le point de départ de cette zone, le point B dans la Figure III.5 des caractéristiques courant-tension simulés est d'environ 15V. Par contre dans les caractéristiques mesurées, ce point de départ est seulement de 10 V. Par conséquent, la valeur simulée est plus importante que celle mesurée.

5.L'influence de la température sur la caractéristique courant-tension

Afin de déterminer l'effet de la température sur les caractéristiques du panneau, on a simulé la tendance des courbes à l'aide du Python pour des différentes températures (25°C , 50°C , 75°C).

La figure III.6 montre les résultats de simulation de l'influence de température sur les caractéristiques courant-tension et puissance tension. Selon les allures des graphes, on peut interpréter comme suit : On observe une augmentation du courant probablement à cause de la diminution de la bande interdite par effet de la température.

On observe, d'après ces courbes simulées que lorsque la température augmente de 25°C à 75°C, la puissance chute de 25 %, c'est-à-dire de 8 à 6W environ.

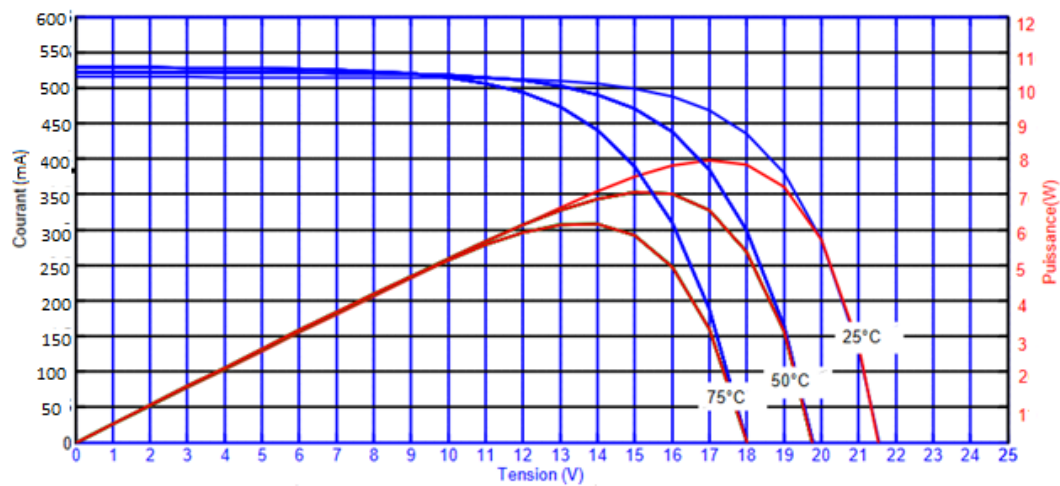


Figure III.6: les caractéristiques courant-tension et puissance tension simulées

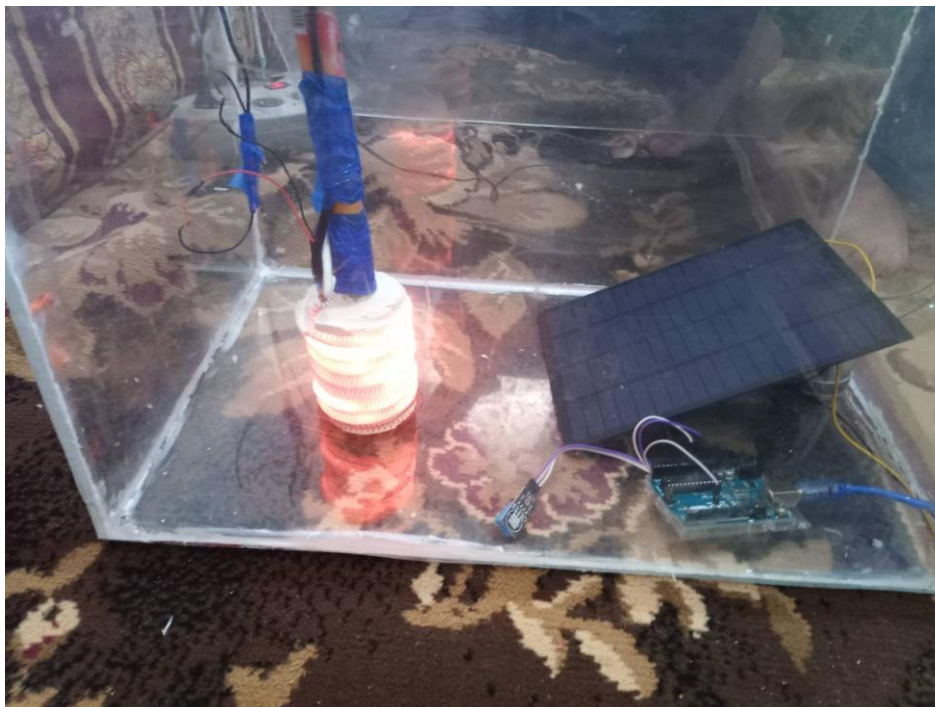


Figure III.7: la configuration expérimentale

Conclusion Générale

Conclusion générale:

La mise en place des données nécessaires à l'évaluation et au développement de ces systèmes, ainsi qu'au développement durable. L'objectif principal de ce travail est la contribution à l'augmentation de la production de l'énergie PV.

Nous avons présenté les différents paramètres climatiques et leurs effets, mettant l'accent avec une démonstration détaillée théorique et expérimentale sur l'influence de ces paramètres sur les modules photovoltaïques, en mettant en relief leurs principales caractéristiques, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Enfin on a simulé ces paramètres avec PVlib-python.

Pour cela, Nous avons proposé une description détaillée de la modélisation et simulation des modèles. L'emploi du module photovoltaïque dans des installations solaires (éclairage public ou pompage d'eau ...) nécessite une bonne connaissance de sa performance, et les différents facteurs qui affectent le rendement des panneaux, donc l'objectif de ce travail été d'étudier l'influence de la température du panneau et les paramètres climatiques sur le rendement photovoltaïque et donc sur les caractéristiques du panneau (puissance, courant et tension). Les essais ont été effectués sur un panneau solaire standard avec une puissance de sortie de 5W. La température est mesurée par un capteur Arduino. Les caractéristiques électriques sont mesurées par des multimètres sous différentes conditions d'éclairement fixe est variables (en fonction du temps) et de température. Avec une étude des caractéristiques des panneaux, pas seulement dans les conditions standards mais aussi dans les différentes conditions de fonctionnement réelle.

Références Bibliographiques

Bibliographie

- [1] [Online]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Energie_solaire
- [2] [Online]. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Energie-solaire-page-3.html>
- [3] V. Daniel, *Le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir*. 2003.
- [4] J. Jean-Pierre. (2018, Mar.) encyclopedie-energie. [Online]. <https://www.encyclopedie-energie.org/energie-solaire-les-bases-theoriques-pour-la-comprendre/>
- [5] M. Jean-Marie, *Introduction à la physique du Soleil, Cours, Hal Archives-ouvertes.fr*. 2010.
- [6] F. B. W., *Solar Radiation Measurement , WMO RAV Metrology Workshop, Melbourne, November*. 2011.
- [7] B. P. a. others, *Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. Solar Energy*, 110 pp. 561–577. 2014.
- [8] K. Charles, *Physique de l'Etat Solide, Dunod*. 1998.
- [9] S. J., *Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire. Revue de Physique appliquée, tome 14, Janvier*. 1979.
- [10] S. S. M., *Semiconductor devices, physics and technology. London : Wiley*. 2006.
- [11] pvlib python. [Online]. <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/>
- [12] D. Soto, W., S. A. Klein, and al, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance." *Solar Energy* 80(1): 78-88. 2006.
- [13] (2021) An Industry and National Laboratory collaborative to Improve Photovoltaic Performance Modeling. [Online]. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/point-value-models/sandia-pv-array-performance-model/>
- [14] (2021) An Industry and National Laboratory collaborative to Improve Photovoltaic Performance Modeling. [Online]. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/cell-temperature/sandia-cell-temperature-model/>
- [15] D. Faiman, "Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules." *Progress in Photovoltaics* 16(4): 307-315. 2008.
- [16] P. a. P. R. Ineichen, *A New Airmass Independent Formulation for the Linke Turbidity Coefficient. Solar Energy*, 73, 151-157. 2002.
- [17] P. Ineichen, "A broadband simplified version of the Solis clear sky model," *Solar Energy*, 82, 758-762. 2008.
- [18] M. D. Davies JA, *Estimating solar irradiance and components. Solar Energy*. 1982.
- [19] S. Kristian and G. Arild, *Predicting solar radiation using a parametric cloud model* . 2020.
- [20] E. L. Maxwell, "A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation". Solar Energy Research Institute, 1987.
- [21] Perez, et al., "Dynamic Global-to-Direct Irradiance Conversion Models". *ASHRAE Transactions-Research Series*, pp. 354-369. 1992.

