

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en

Génie de l'Environnement

Intitulé du thème :

**Etude de l'impact du changement climatique sur le
rendement énergétique des panneaux solaires
photovoltaïques.**

Présenté par :

LOUNIS Massyia

Composition de Jury :

Président :	M. Nabil MAMERI	Professeur (ENP)
Encadrante :	Mme Amina CHAHTOU	Maître de Recherche B (CDER)
Co-encadrante :	Mme Sadjia AROUA	Maître de Conférences B (ENP)
Examineur :	M. Ahmed MAZIGHI	Maitre-Assistant A (ENP)

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en

Génie de l'Environnement

Intitulé du thème :

**Etude de l'impact du changement climatique sur le
rendement énergétique des panneaux solaires
photovoltaïques.**

Présenté par :

LOUNIS Massylia

Composition de Jury :

Président :	M. Nabil MAMERI	Professeur (ENP)
Encadrante :	Mme Amina CHAHTOU	Maître de Recherche B (CDER)
Co-encadrante :	Mme Sadjia AROUA	Maître de Conférences B (ENP)
Examineur :	M. Ahmed MAZIGHI	Maitre-Assistant A (ENP)

ملخص:

الغرض من هذه المذكرة هو دراسة تأثير تغير المناخ على الكفاءة الطاقية للألواح الشمسية الكهروضوئية من نوع السيليكون متعدد الكريستال. لتحديد هذا التأثير، درسنا أولاً تأثير المناخ الحالي من خلال مراقبة تطور إنتاجية الطاقة (الغبار)، اعتماداً على تطور العوامل المناخية: الناتجة لوحدين من الخلايا الكهروضوئية (منزوعة الغبار وغير منزوعة درجة الحرارة والرطوبة والرياح. أتاحت مناقشات نتائجنا التجريبية تحديد هذا التأثير باستخدام التنبؤات المناخية لهذا الغرض. تم اقتراح في النهاية استراتيجية للاستخدام الفعال والاقتصادي للطاقة الشمسية الكهروضوئية.

الكلمات الدالة:

تغير المناخ، الطاقة الشمسية الكهروضوئية، درجة الحرارة، الرطوبة، سرعة الرياح، الطاقة القصوى، كفاءة الطاقة.

Abstract:

The purpose of this thesis is to study the impact of climate change on the energy yield of polycrystalline silicon photovoltaic panels. To determine this impact, we first studied the influence of the current climate by monitoring the evolution of the output energy yield of two PV modules (dedusted and undusted), according to the variation of the climatic parameters: temperature, humidity and wind. Discussions of our experimental results have allowed us to identify this impact using climate forecasts. A proposal for a strategy to adopt for an efficient and economical use of solar photovoltaic energy is proposed at the end.

Key Words:

Climate change, solar photovoltaic energy, temperature, humidity, wind speed, maximum power, energy efficiency.

Résumé :

L'objet de ce mémoire est l'étude de l'impact du changement climatique sur le rendement énergétique des panneaux solaires photovoltaïques de type silicium polycristallin. Pour déterminer cet impact nous avons étudié dans un premier temps l'influence du climat actuel par le suivi de l'évolution du rendement énergétique de sortie de deux modules PV (dépeussieré et non dépeussieré), en fonction de la variation des paramètres climatiques : température, humidité et vent. Les discussions de nos résultats expérimentaux ont permis de cerner cet impact s'aidant pour cela des prévisions climatiques. Une proposition de la stratégie à adopter pour une utilisation efficace et économe de l'énergie solaire photovoltaïque est proposée à la fin.

Mots clés :

Changement climatique, énergie solaire photovoltaïque, température, humidité, vitesse de vent, puissance maximale, rendement énergétique.

Remerciements :

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la patience d'accomplir ce travail.

Mes plus chaleureux remerciements vont à mon encadrante Dr CHAHTOU Amina pour tout le soutien qu'elle m'a apporté, sa disponibilité, ses conseils avisés et toutes les connaissances qu'elle a généreusement partagées avec moi afin de mener à bien ce présent travail.

Je tiens aussi à exprimer ma plus profonde gratitude à ma Co-encadrante Dr AROUA Sadjia de l'Ecole Nationale Polytechnique pour son aide précieuse et les efforts fournis.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de lire et d'évaluer ce mémoire.

Il va sans dire que j'adresse un hommage à l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et en particulier, au Pr MAMERI Nabil qui m'a le plus encouragé à travailler sur ce thème.

Merci à vous tous.

Dédicace :

Je dédie ce travail à ma mère, mon père, mon frère et à mes sœurs, les êtres les plus chers à mes yeux.

A mes amies, plus particulièrement Asma, Imene, Amira, Salima et Manal aussi à ma cousine Kahina.

A tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Massylia

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale..... 13

Partie bibliographique 15

I Changement climatique..... 16

I.1 Introduction..... 16

I.2 Définition de certains concepts 16

I.2.1 Changement climatique 16

I.2.2 Gaz à effet de serre..... 16

I.2.3 L'effet de serre..... 17

I.3 Le changement climatique dans le monde 18

I.4 Le changement climatique dans le bassin méditerranéen..... 20

I.5 Le changement climatique en Algérie 21

I.5.1 Principaux impacts des changements climatiques en Algérie 24

I.5.2 Stratégie d'adaptation de l'Algérie à la lutte contre le changement climatique : 25

II Energie solaire photovoltaïque 27

II.1 Introduction..... 27

II.2 Contexte énergétique mondiale 27

II.2.1 Énergies renouvelables dans le monde 29

II.3 Contexte énergétique algérien..... 29

II.3.1 Énergies renouvelables en Algérie 31

II.4 Energie solaire photovoltaïque 31

II.4.1 Potentiel solaire PV en Algérie 32

II.4.2 Rayonnement solaire..... 33

II.4.3 Module photovoltaïque 33

II.4.5 Grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire 37

II.4.6 Facteurs environnementaux et climatiques influençant l'efficacité des panneaux photovoltaïques 39

II.4.6.1 Influence de l'irradiation 39

II.4.6.2 Influence de la température	40
II.4.6.3 Influence de la poussière	42
II.4.6.4 Temps nuageux	43
II.4.6.5 Influence de l'humidité	43
II.4.6.6 Influence du vent	43
Partie expérimentale	45
I Matériel et méthode	46
I.1 Introduction.....	46
I.2 Présentation de l'organisme récepteur.....	46
I.3 Matériels utilisés.....	46
I.3.1 Charge électronique	47
I.3.2 Appareil d'acquisition de données	48
I.3.3 Capteur de vent ou anémomètre	48
I.3.4 Capteur d'irradiation.....	49
I.3.4.1 Capteur d'irradiation solaire à cellule de référence :	49
I.3.4.2 Pyranomètre	50
I.3.5 Capteur de température du module	50
I.3.6 Capteur de température ambiante	51
I.3.7 La station météorologique de Bouzareah :	51
I.3.8 Fiche technique du module PV :	53
I.3.9 Logiciel LabVIEW :	54
I.4 Mode opératoire	54
II Résultats et discussion.....	56
II.1 Introduction.....	56
II.2 Résultats obtenus.....	56
II.2.1 Données de température.....	58
II.2.2 Données de vitesse de vent.....	60
II.2.3 Données d'humidité	62
Conclusion générale et perspectives	66
Références bibliographiques	69

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques des modules PV utilisés lors de l'étude expérimentale.....53

Tableau II.1 : Récapitulatif des valeurs maximales de moyenne de puissances et ceux des rendements correspondants obtenus pour chacun des deux modules PV.....64

Liste des figures

Figure I.1 : Phénomène d'effet de serre naturel et anthropique.....	17
Figure I.2 : Changements de la température de surface globale.....	18
Figure I.3 : Changement de la température mondiale de surface de 1950-2100 pour différents taux d'émissions..... ;.....	19
Figure I.4 : Evolution de l'humidité moyenne annuelle sur terres (ligne verte), l'océan (bleu) et la moyenne mondiale (bleu foncé), par rapport à 1981-2010 et projections sur 2020.....	20
Figure I.5 : Réchauffement historique de l'atmosphère, au niveau mondial et dans le bassin méditerranéen	21
Figure I.6 : Evolution de la température moyenne annuelle à Alger et à Oran.....	22
Figure I.7 : Scénario de changement de la température moyenne pour l'année 2100 avec une sensibilité climatique moyenne de 2°C.....	23
Figure I.8 : Projections de la vitesse moyenne du vent en 2100 pour un réchauffement supposé de 2°C.....	24
Figure II.1 : Consommation mondiale d'énergie primaire par type d'énergie.....	28
Figure II.2 : Part de la nouvelle capacité de production installée chaque année 2001-2018.....	29
Figure II.3 : Consommation totale d'énergie finale (en kilotonne d'équivalent pétrole) en Algérie sur la période 1990-2018.....	30
Figure II.4 : Composition du rayonnement solaire.....	33
Figure II.5 : Cellule solaire PV à gauche et Module PV à droite.....	34
Figure II.6 : De la cellule à l'installation photovoltaïque.....	34
Figure II.7 : Interconnexion de 36 cellules photovoltaïques en série.....	35
Figure II.8 : Modules solaires photovoltaïques monocristallins (à gauche) et poly-cristallins (à droite).....	36
Figure II.9 : Panneau solaire transparent à couche mince à base de tellure de cadmium CdTe.....	36
Figure II.10 : Cellule PV dite de 3 ^{ème} génération	37
Figure II.11 : Courbe courant-tension (en rouge) et courbe puissance-tension(en bleu) d'une cellule photovoltaïque.....	37
Figure II.12 : Courbes caractéristiques courant-tension d'une cellule pour différents éclairagements et pour différentes technologies	38

Figure II.13 : Tests sur deux cellules solaires de même type en variant le taux d'irradiation et représentation courant-tension (I-V) correspondants	40
Figure II.14 : Evolution du rendement journalier du module en fonction de sa température moyenne.....	41
Figure II.15 : Réseau de caractéristique $I = f(U)$ suivant une température de module variable.....	41
Figure II.16 : Evolution de la puissance fournie par une cellule PV lorsque sa température de fonctionnement augmente	42
Figure I.1 : Schéma du système expérimental permettant de collecter les données climatiques et électriques correspondant à notre installation PV.....	47
Figure I.2 : Charge électronique N3300A, face avant.....	47
Figure I.3 : Charge électronique N3300A, face arrière.....	48
Figure I.4 : L'acquisition de données Keysight 34972A.....	48
Figure I.5 : Capteur de vent ou anémomètre	49
Figure I.6 : Capteur d'irradiation solaire à cellule de référence.....	50
Figure I.7 : Capteur d'irradiation de type 'pyranomètre'.....	50
Figure I.8 : Capteur de température du module.....	51
Figure I.9 : Capteur de température ambiante.....	51
Figure I.10 : Moyenne d'humidité à Ben Aknoun.....	52
Figure I.11 : Station météorologique Vantage pro 2 de Davis instruments et sa console de contrôle des données.....	52
Figure I.12 : Module PV de type silicium poly-cristallin.....	53
Figure I.13 : Interface du logiciel LabVIEW.....	54
Figure I.14 : Les deux modules PV : PV(A) (nettoyé) et PV(B) (non nettoyé).....	55
Figure II.1 : Nombre de données en fonction du temps et de la vitesse du vent pour PV(A).....	56
Figure II.2 : Nombre de données en fonction du temps et la vitesse du vent pour PV(B).....	57
Figure II.3 : Nombre de données en fonction du temps et de la température du module pour PV(A).....	57
Figure II.4 : Nombre de données en fonction du temps et de la température du module pour PV(B).....	57

Figure II.5 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la température (T) correspondant au module PV(A).....	59
Figure II.6 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la température (T) correspondant au module PV(B).....	60
Figure II.7 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la vitesse de vent (m/s) correspondant au module PV(A).....	61
Figure II.8 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la vitesse de vent (m/s) correspondant au module PV(B).....	62
Figure II.9 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et du taux d'humidité (%) correspondant au module PV(A).....	63
Figure II.10 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et du taux d'humidité (%) correspondant au module PV(B).....	64
Figure II.11 : Décoloration du module PV due à l'augmentation de sa température.....	65
Figure II.12 : Phénomène de formation de bulles à l'intérieur du module PV dû à la hausse de température.....	65

Liste des abréviations

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables.

ENR : Energies renouvelables.

EPST : Etablissement Publics à Caractère Scientifique et Technologique.

GES : Gaz à Effet de Serre.

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GTEP : Milliards de tonnes équivalent pétrole.

MIT : Massachusetts Institute of Technology (Institut de technologie du Massachusetts).

NOCT : Normal Operating Cell Temperature (Température nominale d'utilisation de la cellule photovoltaïque).

OPV : organic photovoltaics (photovoltaïque organique).

PENREE : Développement des Energies Renouvelables et d'Efficacité Energétique.

PNA-CC : Plan National d'Action pour les Changements Climatiques.

PNC : Plan National Climat.

PV : Photovoltaïque.

PVTL : Photovoltaic Test Laboratory (Laboratoire d'essais photovoltaïques).

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme [1].

Dans notre monde, la plupart de l'énergie est générée à partir de combustibles fossiles comme le charbon, le gaz, le pétrole, ... [2]. La diminution de jour en jour du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile et le lourd impact de ce régime énergétique sur l'environnement font que les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité ; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement [3].

L'une des plus lourdes conséquences du régime énergétique adopté actuellement de la part de la majorité des nations est bien le changement climatique. Causé de manière directe par les émissions de gaz à effet de serre (GES) présents en grande quantité dans l'atmosphère, ce phénomène présentera malgré les plans d'actions mis en place et les objectifs fixés concernant le climat, des effets qui se verront perdurer pour encore longtemps. Venant promettre une forte expansion dans les années à venir [4], il affectera plusieurs secteurs dont l'agriculture, le secteur médical [5] mais aussi celui des énergies renouvelables en général et de l'énergie solaire PV en particulier.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est l'une des énergies renouvelables les plus répandues, plus particulièrement pour les pays présentant un gisement solaire important. Cette énergie mérite vraiment d'être mise à contribution puisqu'elle est propre et n'émet pas de gaz à effet de serre [1].

Certes, ce type d'énergie permet de combler le fossé entre le climat et la science de l'énergie. Cependant, elle se voit comme préalablement citée fortement dépendante du climat, une dépendance qui pourrait affecter la faisabilité des futurs systèmes d'approvisionnement en énergie à faible émission de carbone. D'ailleurs, ces dernières années, de nombreuses recherches traitant de l'étude de l'efficacité de l'énergie solaire ont été menées et ont prouvé que l'efficacité énergétique des panneaux utilisés est fortement affectée par l'anormale évolution des paramètres climatiques notamment la température, le vent, l'humidité et l'irradiation.

Une fameuse question se pose donc : quelle sera la nature de l'impact du changement climatique sur les performances des installations photovoltaïques ? La réponse à cette question est vitale pour l'élaboration des plans de transition énergétique ainsi que pour

l'évaluation socio-économique et environnementale des projets futurs de centrales solaires PV [6].

Nous tenterons à travers ce travail mené dans le cadre d'un projet de fin d'étude de répondre à cette question. Le travail sera exposé en deux parties. La première partie est une synthèse bibliographique traitant des deux thématiques interdépendantes citées précédemment : le changement climatique et l'énergie solaire PV. La seconde partie traite de l'expérience sur laquelle se base l'étude en présentant et discutant les résultats expérimentaux relatifs à l'influence des différents paramètres climatiques sur le rendement énergétique de deux modules photovoltaïques. Une conclusion relate la nature de cet impact pour arriver à cerner grâce aux prévisions climatiques futures l'influence du changement climatique sur les performances des systèmes photovoltaïques. Des solutions seront apportées vers la fin pour améliorer les rendements énergétiques relatifs aux systèmes photovoltaïques en silicium fonctionnant sous des contraintes climatiques.

Partie bibliographique

I Changement climatique

I.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons connu le grave problème du changement climatique, représentant le défi le plus important auquel l'humanité est confrontée et la menace la plus importante pour toutes les espèces présentes sur terre. Les scientifiques ont confirmé que des changements fondamentaux dans le système climatique ont été clairement signalés en raison de l'augmentation rapide des températures mondiales causée par un effet de serre d'origine humaine [7].

Ce phénomène se verra apparaître dans certaines régions plus que d'autres [8] et s'accompagnera de perturbations d'autres paramètres climatiques tels que les précipitations, le vent et l'humidité [9-10]. Il apportera de lourds impacts sur la faune, la flore, la santé humaine et même la transition énergétique [5].

Dans ce chapitre nous expliquerons le phénomène du changement climatique d'une manière plus détaillée soutenu avec des chiffres et des figures pour présenter en fin le plan d'action mis en place à l'échelle nationale pour agir face à ce phénomène.

I.2 Définition de certains concepts

I.2.1 Changement climatique

Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) le changement climatique est défini comme un changement statistiquement significatif de l'état moyen du climat ou de sa variabilité qui persiste sur de longues périodes (décennies ou plus). Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des forçages externes.

On notera que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), dans son Article 1, définit les « changements climatiques » comme étant des 'changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables'.

I.2.2 Gaz à effet de serre

Les gaz appelés gaz à effet de serre (GES) sont des gaz présents dans notre atmosphère en très petites quantités. Ces gaz n'empêchent pas la lumière du soleil de nous atteindre, mais empêchent le rayonnement infrarouge émis par le sol de retourner dans l'espace. Ils font ainsi office de "couvercle" en retenant prisonnière l'énergie, donc une température élevée

Chapitre I : Le Changement Climatique

près du sol. Les deux gaz à effet de serre les plus importants (mais il y en a d'autres) sont parfaitement naturels et présents de longue date dans notre atmosphère : la vapeur d'eau occupant environ 0,3% de l'atmosphère et le gaz carbonique occupant plus de 0,037% de l'atmosphère, mais cette proportion a beaucoup varié au cours des âges [11].

I.2.3 L'effet de serre

L'effet de serre de notre atmosphère est un phénomène bénéfique. Sans ce phénomène qui permet un réchauffement supplémentaire du sol, la température moyenne à la surface de la terre serait de -18°C au lieu de $+15^{\circ}\text{C}$, rendant ainsi notre planète tout à fait inhospitalière pour les bipèdes que nous sommes. Ce qui est dangereux n'est pas le phénomène lui-même, parfaitement naturel et essentiel à notre existence, mais sa modification rapide du fait de l'homme appelé effet de serre additionnel, apportant de graves dangers potentiels à travers le changement climatique qu'il cause [11].

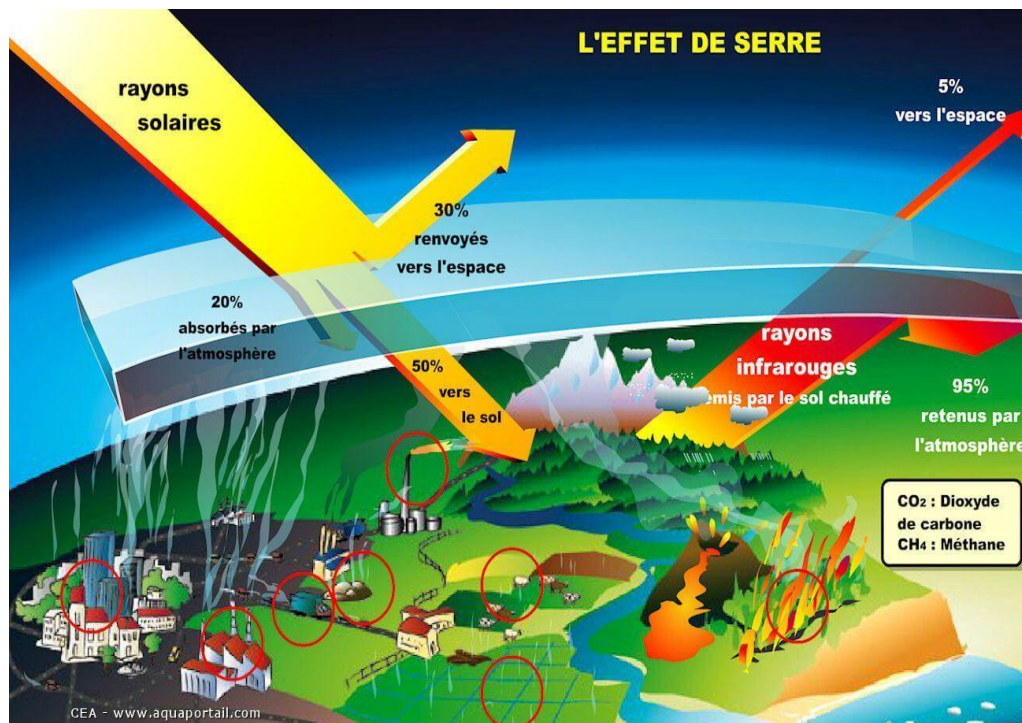


Figure I.1 : Phénomène d'effet de serre naturel et anthropique [12].

Explication du phénomène :

Lorsque le rayonnement solaire arrive sur notre planète, une bonne partie est directement réfléchi vers l'espace par les nuages, les diverses couches de l'atmosphère et par la surface de la terre. Le reste est absorbé par les divers composants de notre planète, puis finalement réémis vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. En effet, la surface de la Terre et l'atmosphère chauffent lorsqu'elles sont exposées à la lumière et en retour émettent des

Chapitre I : Le Changement Climatique

infrarouges. Les gaz à effet de serre, qui avaient laissé passer la lumière sans encombre, ont par contre la propriété d'absorber une partie de ces infrarouges. Ce faisant, ils en récupèrent l'énergie et chauffent. Les GES vont dissiper par la suite cette énergie en émettant eux aussi des infrarouges, dont une partie retourne vers le sol pour le chauffer. Cette interception de chaleur conduit donc ces gaz à effet de serre, puis l'atmosphère basse, puis la surface de la Terre, à être plus chauds. Bien sûr, le système finit toujours par s'équilibrer, mais il s'équilibre avec une température de surface supérieure à celle qu'il aurait si ces gaz n'étaient pas là. Les activités modernes de l'homme ont pour conséquence d'augmenter la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, qui ne laissent pas passer les infrarouges émis par la terre [11].

I.3 Le changement climatique dans le monde

Les activités humaines ont provoqué un réchauffement du climat de notre planète à un rythme plus rapide que tout ce que les gens ont connu depuis au moins 2000 ans. Ainsi, depuis le début des années 1950 un réchauffement de 1.1°C a déjà été enregistré comme représenté sur la figure I.2 [13-14].

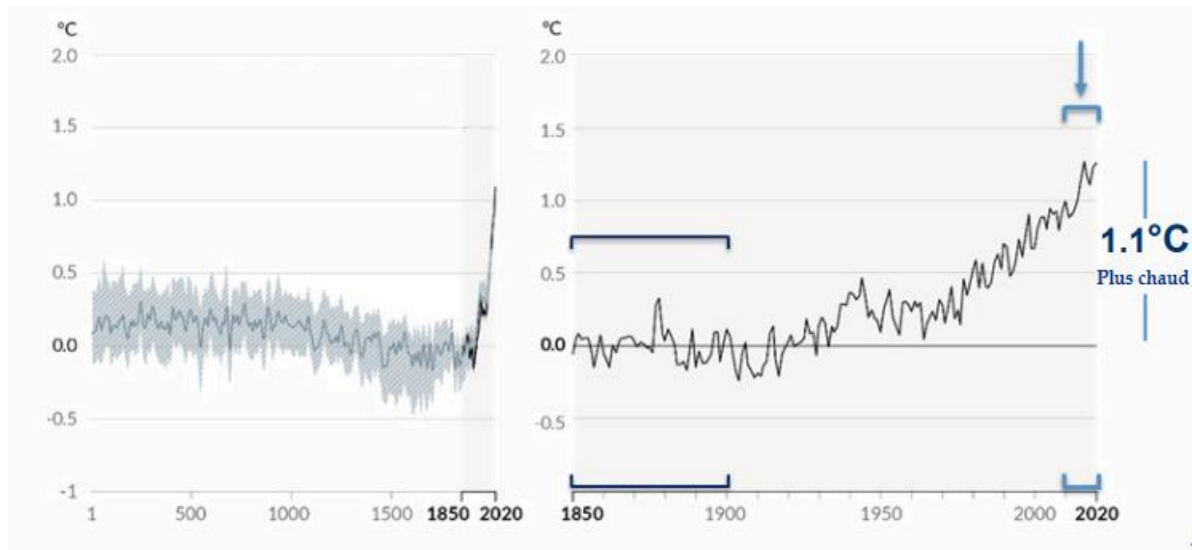


Figure I.2 : Changements de la température de surface globale [14].

Actuellement, le monde connaît des modifications climatiques anormales, très rapides et de grande ampleur. L'augmentation des températures d'ici à 2100 aura des conséquences sur l'évolution du climat sur tous les continents. Les inondations, les cyclones et les pénuries d'eau, par exemple, seront plus fréquents touchant plus particulièrement les continents d'Afrique et d'Asie [15] Le réchauffement planétaire de 1,5°C et 2°C sera dépassé à moins que des réductions importantes des émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre ne

Chapitre I : Le Changement Climatique

soient réalisées dans les prochaines décennies [14]. Dans le cas d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, les vagues de chaleur seront plus nombreuses, les saisons chaudes plus longues et les saisons froides plus courtes. Avec une hausse de 2 °C, les chaleurs extrêmes atteindraient plus souvent des seuils de tolérance critiques pour l'agriculture et la santé publique [7].

Comme préalablement citée, la hausse de température moyenne dépend directement du taux d'émissions de CO₂. La figure I.3 représente les changements de la température mondiale de surface de 1950-2100 suivant les taux d'émissions de CO₂. Nous voyons que pour un niveau intermédiaire de taux d'émission le réchauffement atteint est de 2°C aux environs de 2100. Et pour un niveau très élevé d'émissions un réchauffement de presque 5°C peut être atteint aux environs de la même année.

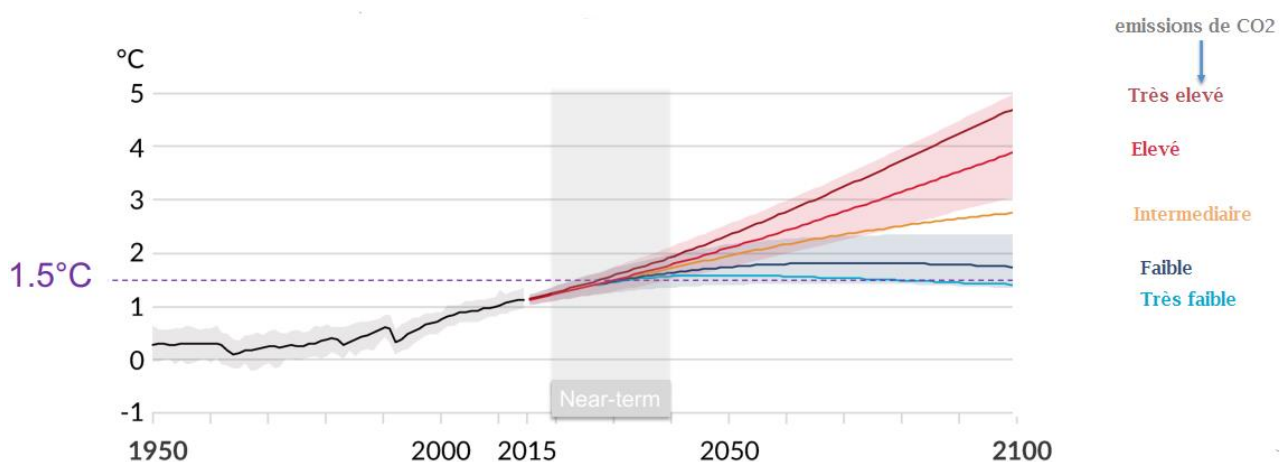


Figure I.3 : Changement de la température mondiale de surface de 1950-2100 pour différents taux d'émissions.

Selon le rapport sur le changement climatique publié en août 2021 par le GIEC, les régimes des vents pourraient être le prochain signe d'alerte négligé dans la prévision des crises climatiques. En général, les conversations sur le changement climatique se concentrent davantage sur la température que sur les régimes des vents. Mais la direction et la vitesse du vent sont fortement influencées par ce phénomène. La vitesse du vent sera considérablement réduite dans les années à venir en raison du changement climatique mais cela pourrait ne pas être le cas dans toutes les régions du monde. D'ailleurs, entre 1979 et 2018, la vitesse moyenne mondiale du vent terrestre (à l'exclusion de l'Australie) a déjà diminué de 0,063 m par seconde chaque décennie [16-17]

D'après d'autres prévisions le taux d'humidité subira aussi des variations. L'atmosphère, les terres et les océans se réchauffent tous. Cela signifie qu'une plus grande

quantité d'eau s'évapore de la surface de la terre et une plus grande quantité d'eau peut être retenue dans l'air sous forme de gaz, il y a donc une augmentation dans les taux d'humidité comme le montre la figure I.4. Cette augmentation se produit à la fois sur les terres (ligne verte) et dans les océans (ligne bleue) [10].

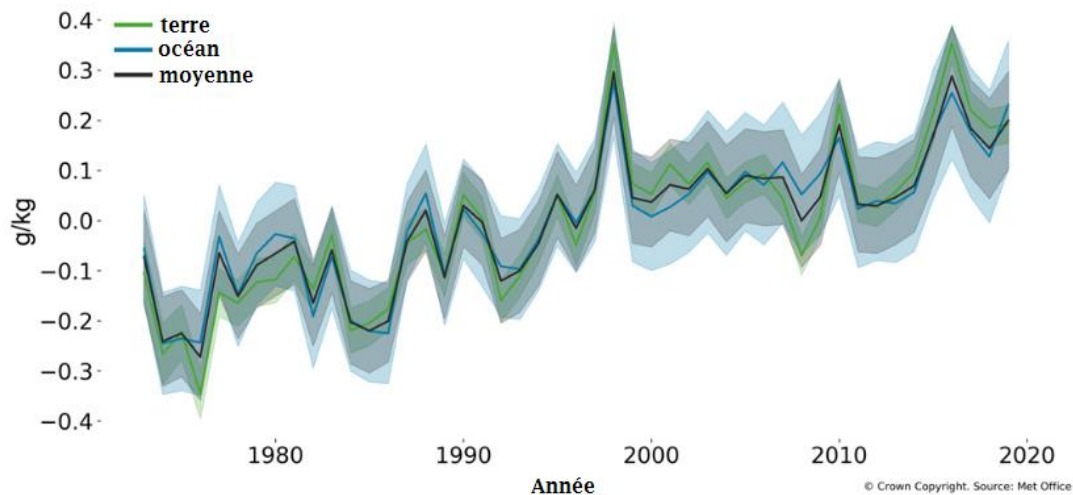


Figure I.4 : Evolution de l'humidité moyenne annuelle sur terres (ligne verte), l'océan (bleu) et la moyenne mondiale (bleu foncé), par rapport à 1981-2010 et projections sur 2020 [10].

I.4 Le changement climatique dans le bassin méditerranéen

En raison des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, le climat change dans le bassin méditerranéen, historiquement et selon les projections des modèles climatiques, plus rapidement que les tendances mondiales. Les températures annuelles moyennes sur terre et sur mer dans le bassin méditerranéen sont supérieures de 1,5°C à celles de l'ère préindustrielle et, selon les prévisions, augmenteront jusqu'en 2100, de 3,8 à 6,5°C supplémentaires dans le cadre d'un scénario de forte concentration élevée de gaz à effet de serre et de 0,5 à 2,0°C pour un scénario compatible avec l'objectif à long terme de la CCNUCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) [8].

La figure I.5 représente un réchauffement de l'atmosphère au niveau du bassin méditerranéen en (bleu) et au niveau mondial (en vert) présentés avec et sans lissage [18]. Il est clairement remarquable que le réchauffement au niveau du bassin est plus important atteignant en 2020 1,5°C contre 1°C au niveau mondial, ce qui fait d'elle une région fortement exposée au changement climatique.

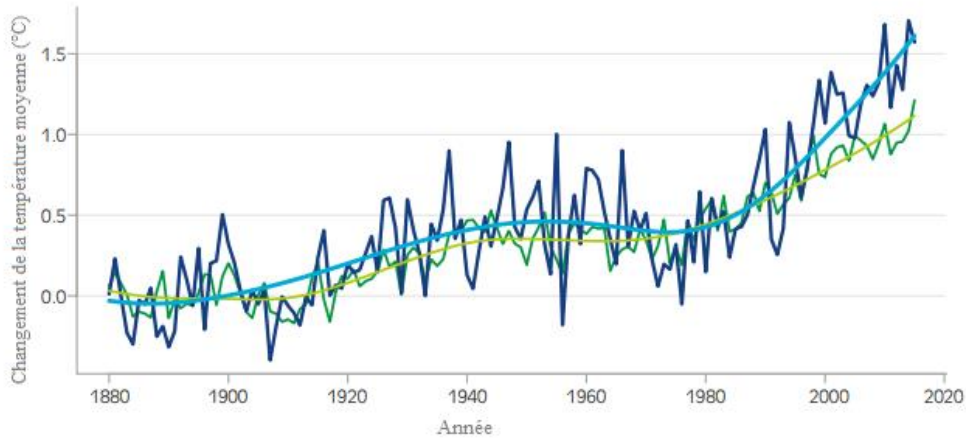


Figure I.5 : Réchauffement historique de l'atmosphère, au niveau mondial et dans le bassin méditerranéen [18].

Ce changement a fait apparaître un nombre croissant d'impacts sur l'ensemble du bassin. Ces impacts comprennent les conséquences multiples de vagues de chaleur, de sécheresses, d'inondations, d'acidification des océans et d'élévation du niveau de la mer [19]. Le niveau moyen de la Méditerranée a augmenté de 6 cm au cours des 20 dernières années. Cette tendance devrait s'accélérer (avec des différences régionales) au rythme global de 43 à 84 cm en 2100, mais probablement plus de 1m dans le cas de poursuite de la déstabilisation de la calotte glaciaire en Antarctique [8].

Concernant les variations apportées par ce phénomène sur le vent dans cette région, les résultats de recherche montrent une diminution de la vitesse moyenne du vent sur l'ensemble du bassin Méditerranéen à l'exception de certaines régions [20].

I.5 Le changement climatique en Algérie

Au Maghreb et plus spécifiquement, en Algérie, l'évolution récente du climat montre que le réchauffement climatique est plus important que la moyenne mondiale. En effet, si au niveau mondial la hausse de température au 20^{ème} siècle a été de 0,74°C, celle sur le Maghreb s'est située entre 1,5 et 2°C selon les régions, soit plus du double que la hausse moyenne planétaire [5].

La figure I.6 donne l'évolution de la température des stations d'Alger et d'Oran de 1970 à 2015. Cette figure, basée sur les données quotidiennes de température, indique que la température a augmenté de plus de 1,5°C au cours de cette période.

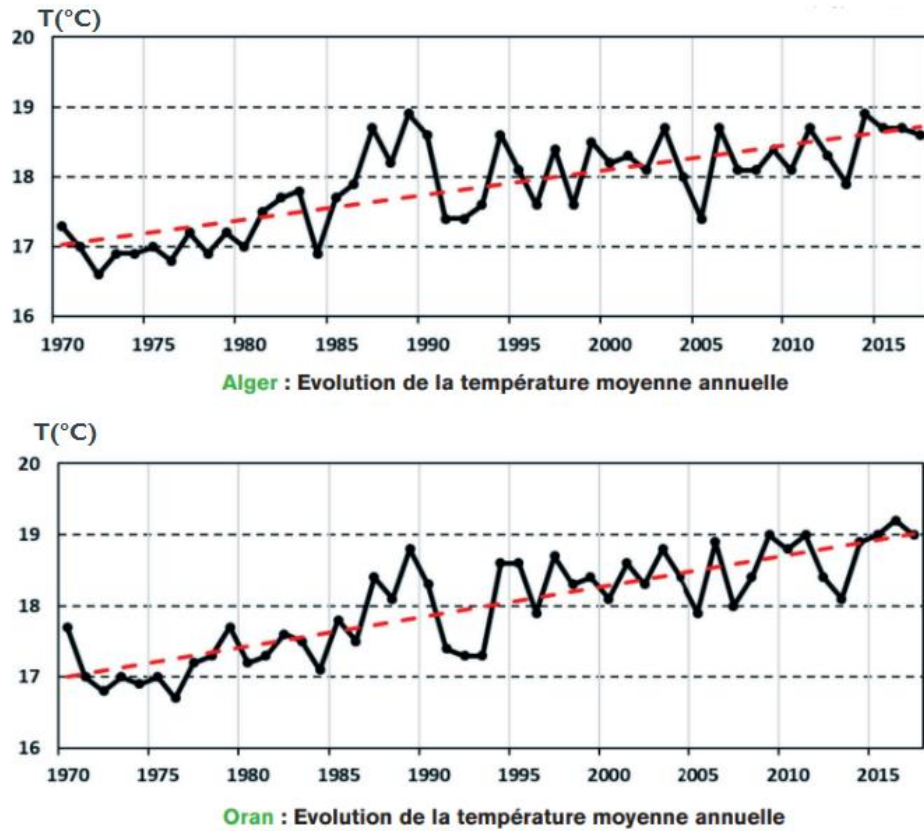


Figure I.6 : Evolution de la température moyenne annuelle à Alger et à Oran [5].

La figure I.7 représente un scénario de la hausse des températures présenté par l’atlas du GIEC comme prévisions sur l’année 2100 pour un réchauffement supposé de 2°C. On remarque qu’au niveau de l’Algérie le réchauffement au niveau national varie de 2 à 3°C aux environs de la même année.

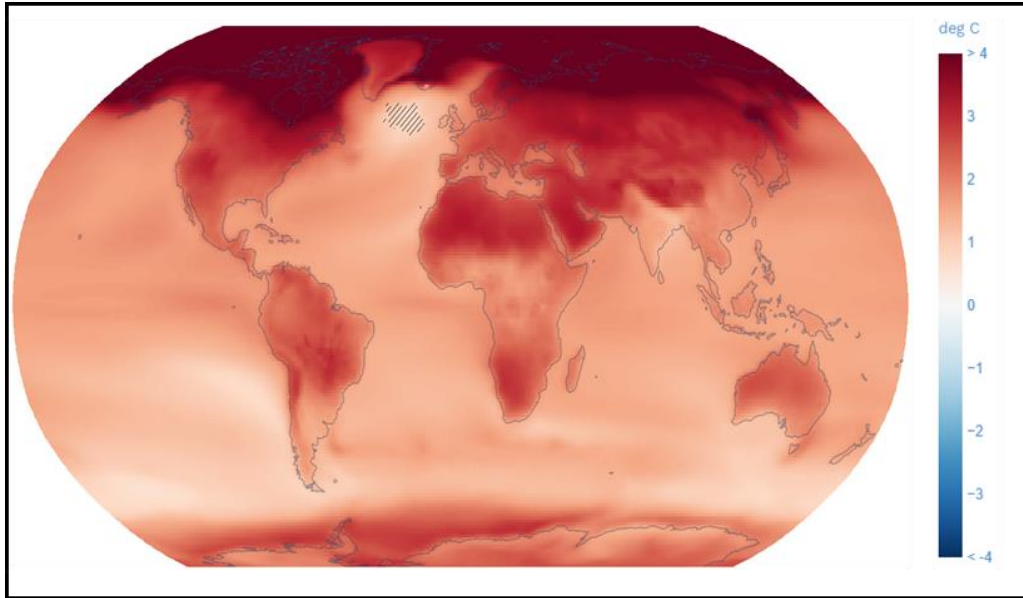


Figure I.7 : Scénario de changement de la température moyenne pour l'année 2100 avec une sensibilité climatique moyenne de 2°C [21].

Les projections climatiques de l'avenir indiquent donc que "l'Algérie ressentira davantage les effets des changements climatiques" [22]. Le pays va éventuellement subir encore plus de variations importantes des hausses des températures et des baisses conséquentes des précipitations. *"De nombreuses études montrent que les projections climatiques sous-estiment la hausse de température et la baisse des précipitations sur le Maghreb. Ce qui montre que les pays du Maghreb vont subir, plus que d'autres, les effets du changement climatique [...]"* [23].

Concernant les variations de vitesse de vent, la figure I.8 indique les projections de variations pour l'année 2100 pour un réchauffement de 2°C. On remarque qu'en Algérie la vitesse du vent varie de 4 à 5 m/s [21].

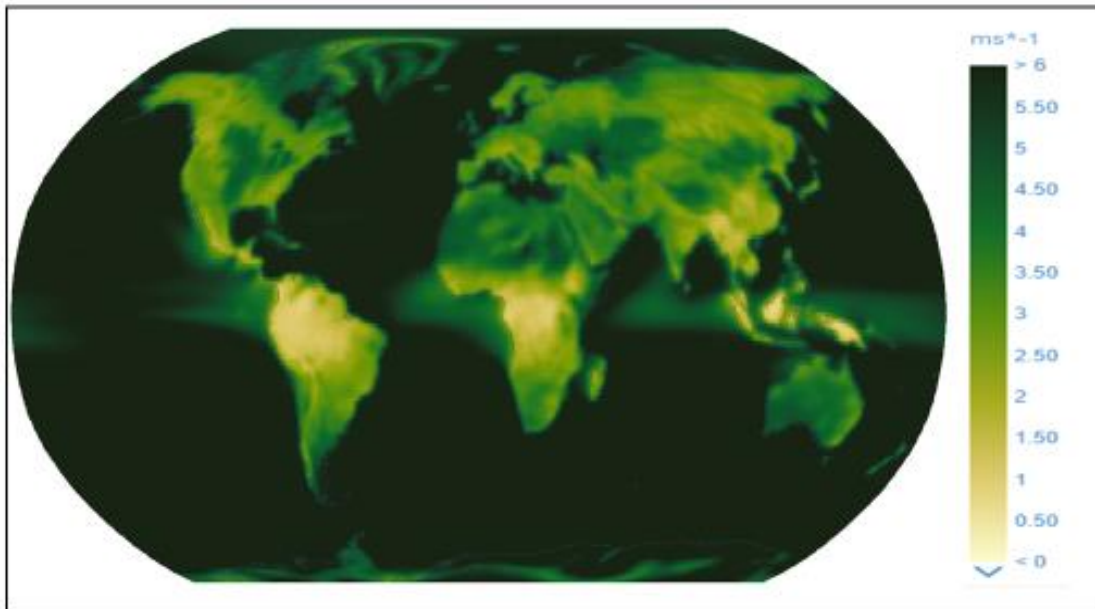


Figure I.8 : Projections de la vitesse moyenne du vent en 2100 pour un réchauffement supposé de 2°C [21].

I.5.1 Principaux impacts des changements climatiques en Algérie

Autre qu'avoir des conséquences sur les événements climatiques extrêmes tels que la sécheresse, les vagues de chaleur et les feux de forêts, les changements climatiques impactent sur divers secteurs [5] :

- Le secteur de l'agriculture à travers la désertification, la baisse de productivité et l'augmentation de l'érosion due à la dégradation du couvert végétal et des sols ;
- Le secteur de la pêche puisqu'il y a une nette baisse de la ressource propre à la consommation ;
- Le secteur de l'habitat, il y a une dégradation accélérée des infrastructures et des équipements publics ;
- Le secteur industriel et des transports, qui subissent une perturbation des performances ;
- Le secteur de l'eau et ce en présence de pénurie de ressources hydriques et dégradation de la qualité de l'eau. Mais aussi perturbation du cycle à travers :
 - La diminution du taux de précipitation. A titre d'exemple, le Nord-Ouest de l'Algérie, région connue pour son faible régime pluviométrique, a connu une réduction de l'ordre de 40% des précipitations annuelles à partir de la première moitié des années 1970 [24] ;
 - L'élévation du niveau de mer puisque l'élévation en Algérie semble 3 à 4 fois plus rapide comparativement à la moyenne mondiale qui est de 1.5-2 mm/an provoquant

Chapitre I : Le Changement Climatique

l'érosion et même la disparition des plages (par ex. West Beach à Sidi Fredj, à l'ouest d'Alger), et par conséquent une perte de l'écotourisme et de l'intérêt économique [25].

- Secteur de la santé par la propagation de plusieurs pathologies dues principalement aux vagues de chaleur ainsi que l'augmentation des fréquences des pathologies respiratoires liées à la pollution de l'air ;
- Secteur de l'énergie en perturbant ses performances et en augmentant et les risques sur la sécurité des installations et la demande en énergie.

I.5.2 Stratégie d'adaptation de l'Algérie à la lutte contre le changement climatique :

Le pays prend progressivement conscience de l'importance cruciale de la dimension de la vulnérabilité ainsi que de l'adaptation aux impacts du changement climatique. C'est pourquoi il a ratifié la Convention Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) en 1994 et le Protocole de Kyoto en 2005, a élaboré sa Communication Nationale en 2001 incluant le Plan National d'Action pour les Changements Climatiques (PNA-CC).L'Algérie a ratifié l'Accord de Paris en 2016, un accord universel historique et juridiquement contraignant entré en vigueur le 4 novembre 2016 pour limiter le changement climatique [24]. Elle a adopté par la suite une autre démarche volontaire pour lutter contre les changements climatiques et s'adapter aux nouvelles conditions climatiques du pays qu'est le plan National Climat (PNC) [5].

Plan National Climat de l'Algérie

Le PNC a été validé par le conseil de gouvernement en date du 21 septembre 2019. Il renferme en partie les actions devant être mises en œuvre par l'Algérie pour respecter ses engagements afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'Algérie s'est engagée à la suite de l'Accord de Paris sur les changements climatiques, à réduire de 7% ses émissions de gaz à effet de serre avec ses propres moyens, et 22% avec un soutien financier et technologique international d'ici 2030 [5].

Pour atteindre ces objectifs, le gouvernement s'engage à [26] :

- Renforcer la protection de l'environnement et lutter contre toutes les formes de pollution, promouvoir des technologies de production plus propres et prévenir et atténuer les impacts négatifs sur l'environnement ;
- Élaborer des plans nationaux et locaux pour s'adapter au changement climatique et renforcer la résilience à ses impacts ;

Chapitre I : Le Changement Climatique

- Développer les énergies renouvelables hors réseau avec une capacité de production de 1 000 MW d'ici 2030, dont 500 MW d'ici 2024.

A noter que l'Algérie a été l'un des premiers pays d'Afrique à ratifier toutes les sections des accords internationaux sur la protection de l'environnement (dont Protocole de Kyoto et la Convention de Barcelone). Toutefois, leur mise en application et leur surveillance sont inadaptées. Par exemple, des conférences et des séminaires sont organisés presque tous les ans pour parler des problèmes écologiques. Des accords, des lois et des projets sont prévus mais leur mise en application est très limitée en ce qui concerne l'espace (souvent seulement dans la capitale) et le temps [25].

In fine, la mise en œuvre du PNC contribue à la transition énergétique de l'Algérie vers une énergie durable en développant des énergies renouvelables conduisant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) puisque l'énergie est comme déjà citée le secteur le plus émetteur de ces gaz [5]. Elle songe à travers son programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (ENR) et d'efficacité énergétique adopté en février 2011 par le gouvernement de s'appuyer sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire [27] puisque le gisement solaire constitue, sans aucun doute, le gisement d'avenir pour l'Algérie. Sauf que l'énergie solaire se voit impactée par différents facteurs : techniques, économiques, paysagers et même climatiques [27-30].

II Energie solaire photovoltaïque

II.1 Introduction

La demande énergétique mondiale augmente de façon spectaculaire. Ce fait existe depuis longtemps, depuis l'existence de l'homme jusqu'à nos jours. Comme sa disponibilité, son abondance ou sa rareté affecte le mode de vie humain, la demande croissante accompagnée de la croissance démographique crée de nouveaux défis, dont certains peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement. Malgré ces efforts, le problème est toujours présent. L'augmentation de la production d'énergie spécifiquement à partir d'énergie fossile crée un problème majeur qui, d'une manière ou d'une autre, a encouragé positivement les gouvernements et les organisations concernés à travailler ensemble sur les politiques futures pour développer des sources alternatives de production d'énergie plus respectueuses de l'environnement. Le meilleur moyen de réduire les dégâts est donc clair : mettre en œuvre des mesures pour développer les énergies renouvelables [31,32]. Et l'une des formes les plus prometteuses d'énergie renouvelable est sans doute l'énergie solaire photovoltaïque produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque [33]. Ce type d'énergie renouvelable est très intéressant plus particulièrement pour un pays tel que l'Algérie qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde [31,34].

Néanmoins, la technique de production d'énergie par voie photovoltaïque solaire se voit impactée par certains paramètres climatiques dont la température, l'humidité et le vent [35].

Dans ce chapitre, une étude du contexte énergétique global à l'échelle nationale et internationale sera présentée. Nous donnerons l'état des lieux sur l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie pour ensuite donner une description plus technique de ce type d'énergie renouvelable citant certaines grandeurs caractéristiques importantes. Nous avancerons ensuite l'impact de certains paramètres climatiques sur le rendement énergétique des panneaux photovoltaïques pour ainsi évoquer l'impact relatif au changement climatique.

II.2 Contexte énergétique mondiale

À l'échelle mondiale, la consommation d'énergie ne cesse de croître, ayant doublé en 40 ans (hors crise sanitaire), principalement portée par la croissance de la demande asiatique, et notamment par celle de la Chine. La consommation mondiale d'énergie primaire s'élève à 14,3 Milliards de tonnes équivalent pétrole (GTEP) en 2018 deux fois plus qu'en 1978 (7,0 Gtep). En 2018, le mix énergétique primaire mondial est largement dominé par les énergies fossiles. Le charbon, le gaz naturel et les produits pétroliers sont

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

restés, dans cet ordre, les trois premières sources d'approvisionnement. Quant à la consommation en énergies solaires, éolienne et géothermique, elle a significativement augmentée au cours des années [36].

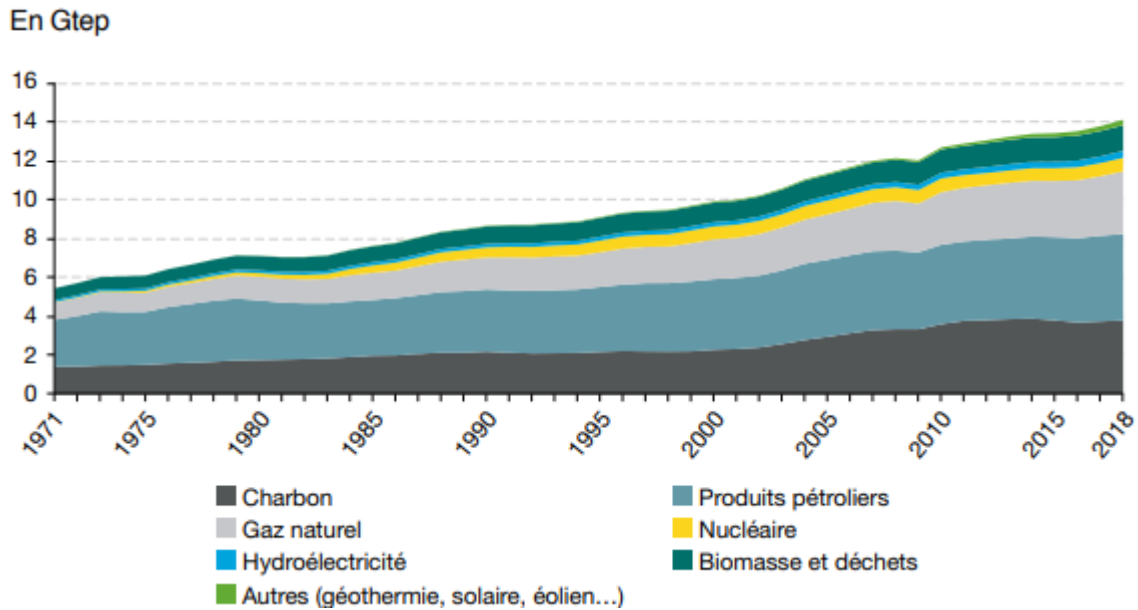


Figure II.1 : Consommation mondiale d'énergie primaire par type d'énergie [36].

Les principales sources d'énergie sont donc les sources fossiles. Ces ressources sont présentes en quantité limitée et la production d'énergie à travers elles impactant négativement sur notre environnement : (réchauffement climatique, pollution atmosphérique, pluies acides et marées noires) [37,38]. C'est ainsi que nous augmentons chaque jour un peu plus le risque de rendre la planète invivable pour l'humanité. Tout cela pour maintenir en vie encore quelques années un système énergétique devenu obsolète. Pourtant, les solutions sont à portée de main. Dans un monde menacé et dopé à l'énergie bon marché sous pression de l'épuisement prévisible des ressources, les énergies renouvelables apparaissent comme la seule vraie piste de solution : disponibles à foison, réparties sur l'ensemble de la planète et inépuisables. Convaincus que cette transition énergétique est une chance et non un fardeau, un nombre toujours croissant de villages, villes, territoires et pays font le choix d'un système énergétique basé sur une consommation plus sobre de l'énergie, plus efficace, produite par des sources propres, locales, pourvoyeuses d'activité et d'emplois : les énergies renouvelables [39].

II.2.1 Énergies renouvelables dans le monde

Les énergies renouvelables semblent être une voie privilégiée, qui a connu une croissance exponentielle ces dernières années [40] l'expression «énergies renouvelables» désigne toutes les formes d'énergie produites de manière durable à partir de sources renouvelables, y compris la bioénergie, l'énergie géothermique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie des océans, l'énergie des vagues et l'énergie thermique des mers, l'énergie éolienne et l'énergie solaire[41]. De nombreux gouvernements ont donné la priorité au développement des énergies renouvelables pour réduire les émissions et atteindre les objectifs climatiques internationaux ainsi que pour des avantages socio-économiques [42].

Ce type d'énergie est en croissance régulière depuis déjà plusieurs années. La figure II.2 illustre la part de la production d'électricité dans le temps depuis 2001 relative aux énergies renouvelables et non renouvelables. La ligne rouge indique la part moyenne des énergies renouvelables dans la croissance totale par an. Ces dernières sont en nette progression à travers les années (64 % en 2018) puisqu'elles permettent clairement de résoudre une bonne partie des problèmes écologiques auxquels le monde est confronté [31,43].

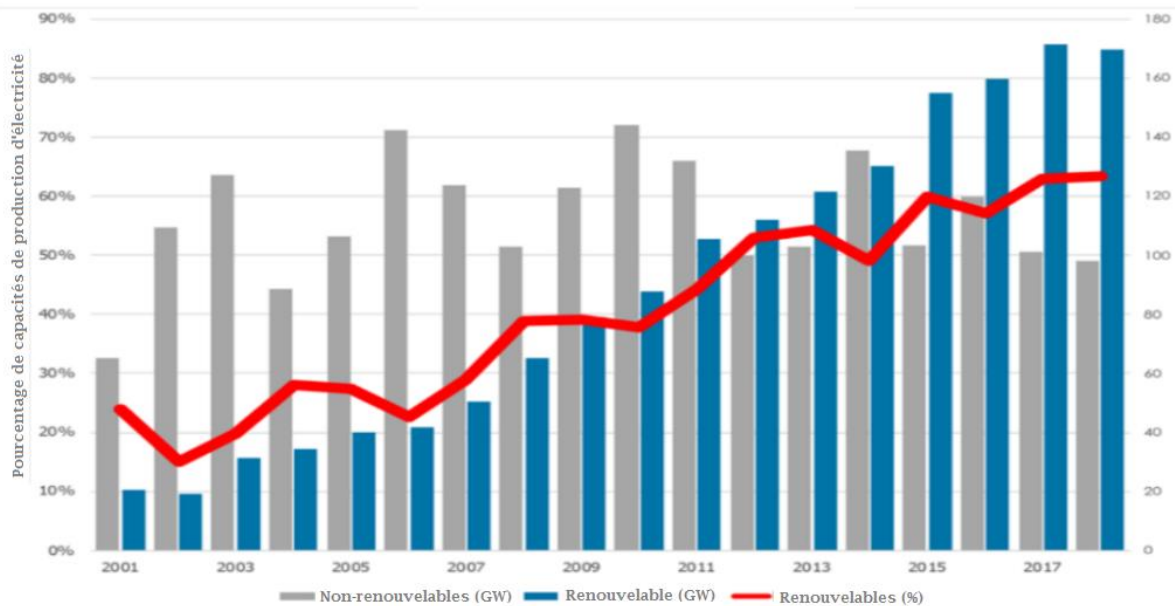


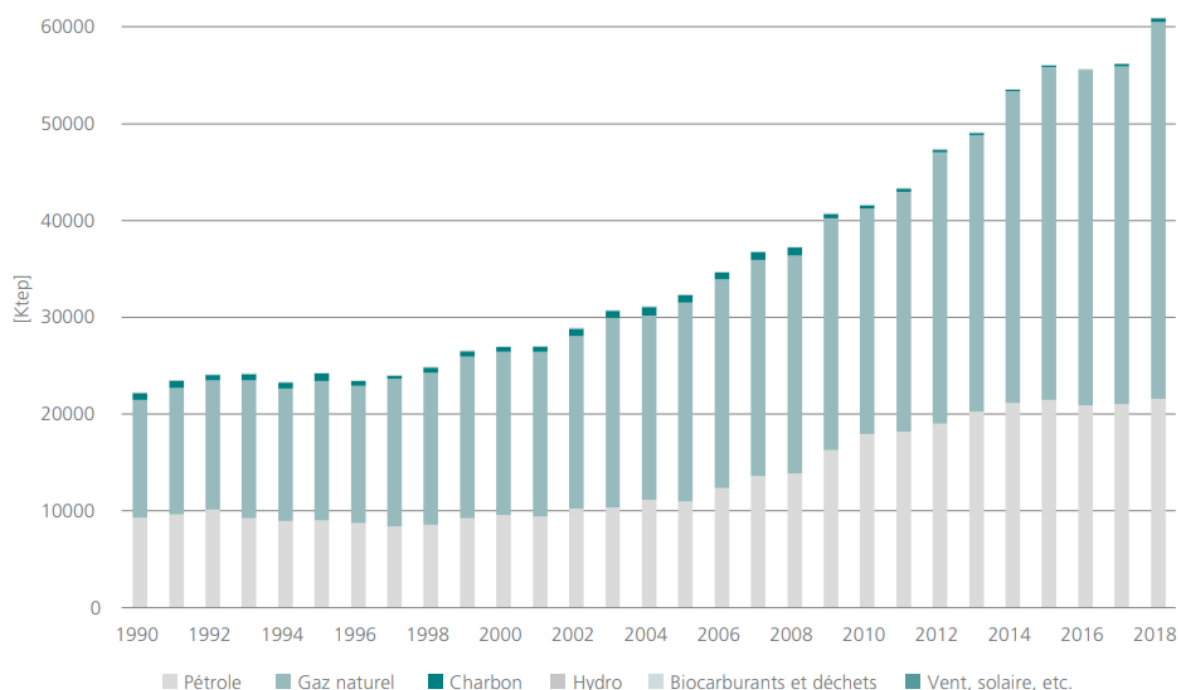
Figure II.2 : Part de la nouvelle capacité de production installée chaque année 2001 - 2018 [44].

II.3 Contexte énergétique algérien

L'Algérie est dixième pays producteur de gaz naturel au monde et non loin de là pour le pétrole (18ème position en 2019) avec une production de 1033 Milliers de

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

barils par jour selon le "Trading Economicus Journal" dans une étude effectuée en avril 2020 [45]. Ce pays produit 99% de son électricité à partir de sources fossiles, ressources menacées d'extinction dans les 30 prochaines années [46]. Le gaz naturel représentait en 2018 encore 63,8%, le pétrole 35,4% et le charbon 0,6%, tandis que les énergies renouvelables représentaient au total une part négligeable de 0,1% comme indiqué sur la figure II.3 [47].



Source : données basées sur AIE, 2020a

Figure II.3 : Consommation totale d'énergie finale (en kilotonne d'équivalent pétrole) en Algérie sur la période 1990-2018 [47].

C'est pourquoi, la politique énergétique en Algérie vise à relever le défi de l'accroissement des capacités de production dans l'objectif d'assurer son autosuffisance [37]. La consommation nationale d'énergie est en nette augmentation, à titre d'exemple elle a triplé en 22 ans de 9,7 Millions de tonnes équivalent pétrole en 1976 à 32,5 en 1998 [28]. C'est ce qui pousse ce pays à s'engager sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [37].

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

II.3.1 Énergies renouvelables en Algérie

Les énergies renouvelables, en Algérie, notamment le photovoltaïque sont connues entre les années 80 et 90, mais sans suite à cause de la rente pétrolière. Ce n'est qu'en 2011, que le gouvernement a commencé à envisager des solutions écologiques globales et durables en investissant dans cette énergie selon un programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE). Ceci a lieu lorsque le pays a commencé à faire face à des contraintes persistantes d'autosuffisance et de surconsommation énergétiques [47,48].

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique. Ainsi, grâce à ce programme 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable [24, 37, 47, 48].

Certes, pour l'instant les chiffres montrent que les énergies renouvelables ne jouent qu'un rôle marginal dans le mix énergétique. Elles ne sont en mesure de remplacer les combustibles fossiles pour répondre aux besoins énergétiques croissants de l'Algérie, mais l'analyse montre que l'Algérie a déjà franchi les premiers pas d'une transition vers les énergies renouvelables puisqu'elle est classée comme entrant dans la phase «Décollage des ENR». Néanmoins, les énergies fossiles jouent toujours un rôle dominant dans le secteur énergétique algérien et dans l'économie en général [47].

II.4 Energie solaire photovoltaïque

L'une des formes les plus prometteuses d'énergie renouvelable est le soleil, qui peut être exploitée à la fois pour le chauffage et la production d'électricité. Le soleil est considéré comme la source d'énergie illimitée qui dégage bien plus d'énergie que nous n'en avons besoin. La quantité d'énergie qu'il libère (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [49]. Son rayonnement constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante et peut être utilisé de diverses manières dont les deux plus connus [50,51] :

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

- Sa chaleur peut être concentrée pour chauffer de l'eau sanitaire, des immeubles, des séchoirs, ou bien un liquide en circulation afin de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur ou d'une dynamo. C'est le solaire thermique.

- Sa lumière peut être transformée directement en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque qui permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule photovoltaïque qui génère un courant électrique continu [52,53]. Nous nous concentrerons durant notre étude plus particulièrement sur ce dernier type d'énergie qu'est l'énergie solaire photovoltaïque.

En raison de ses avantages intéressants, au cours des deux dernières décennies, l'énergie photovoltaïque s'est considérablement développée dans le monde entier. Depuis 1998, le taux de croissance annuel moyen des parcs solaires photovoltaïques (PV) est de 35% [40]. Actuellement dans le monde, elle continue de croître rapidement et à très grand rythme malgré les difficultés économiques auxquelles le marché fait face. Le PV est en passe de devenir une source majeure d'électricité dans le monde [54]. De nombreux pays songent donc à adopter la filière d'énergie photovoltaïque dans leur source de consommation énergétique par raison de ses nombreux avantages, ce qui n'est pas loin d'être l'ambition de l'Algérie [55].

II.4.1 Potentiel solaire PV en Algérie

En Algérie, le potentiel national en énergies renouvelables est fortement dominé par le solaire. Malgré la lente expansion du pays dans ce domaine, cette énergie est considérée comme une opportunité et un levier de développement économique et social, puisque de par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un potentiel d'énergie solaire des plus élevés au monde avec une irradiation moyenne quotidienne de 6,57 kWh/m², soit un total annuel compris entre 2 000 kWh/m² et 2 650 kWh/m² [47, 54,55].

La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse 3000 heures annuellement et peut atteindre 3900 heures (Hauts-Plateaux et Sahara). Ce potentiel est l'équivalent de « 37 milliards de m³ de gaz, soit 10 grands gisements de gaz naturel ». Comme 86% de l'Algérie est couverte par le désert du Sahara, il existe donc un bon potentiel pour la mise en œuvre de projets solaires à grande échelle [47,56].

L'Algérie dispose donc du potentiel nécessaire pour devenir un acteur majeur du secteur des énergies renouvelables plus particulièrement celui du solaire photovoltaïque.

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

L'exploitation de ce type d'énergie lui permettra d'être indépendante des énergies fossiles et de protéger l'environnement sous tous ses aspects, en procurant aux générations futures leur vie et leurs biens premiers [47,48].

II.4.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la source essentielle par le biais duquel l'énergie électrique est produite. Cela grâce à la cellule photovoltaïque qui est la constituante essentielle du panneau PV et qui joue le rôle de convertisseur instantané d'énergie. Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. Ce rayonnement transporte une énergie issue des réactions de fusion nucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons) qui a lieu au cœur du soleil. Indispensable à toute vie terrestre, cette énergie s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2) [50,57].

Outre sa variabilité au cours du temps, le rayonnement solaire est polychromatique. Il s'étend du proche ultraviolet au proche infrarouge, comme le montre la figure II.4 :

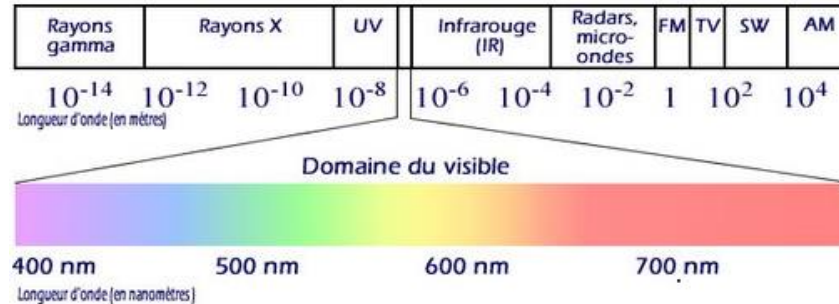


Figure II.4 : Composition du rayonnement solaire [58].

II.4.3 Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est la constitution d'une multitude de petites unités nommées cellules photovoltaïques connectées entre elles. Ces unités représentent l'unité de base de tout le système photovoltaïque et l'élément actif dans lequel se produit l'effet photovoltaïque. Elles permettent de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique. Elles constituent donc un générateur électrique mais de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles [52,59].

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

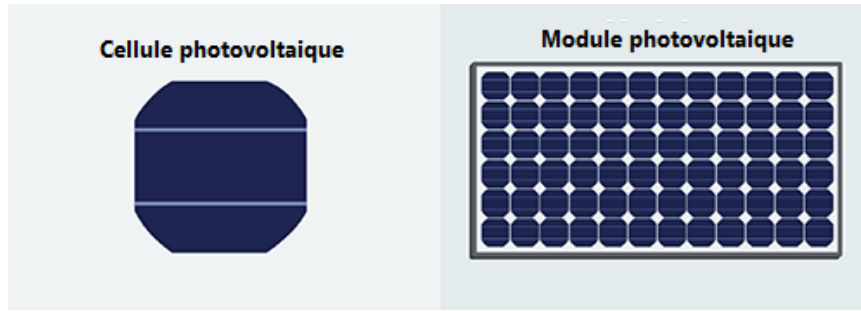


Figure II.5 : Cellule solaire PV à gauche et Module PV à droite.

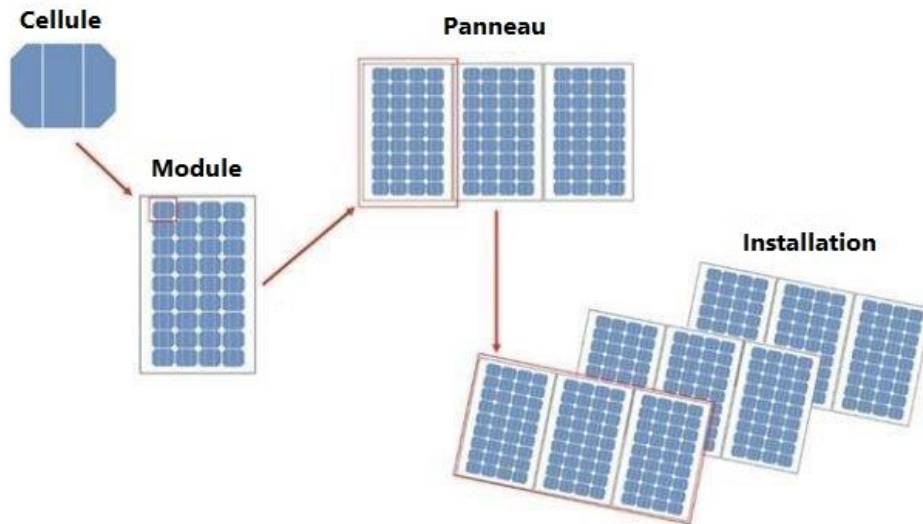


Figure II.6 : De la cellule à l'installation photovoltaïque.

Des feuilles minces d'acétate d'éthyle et de vinyle ou de butyral de polyvinyle sont utilisées pour relier les cellules entre elles et pour les protéger des intempéries. Les modules sont normalement enfermés entre une couverture transparente (généralement en verre) et une feuille de support résistante aux intempéries (généralement constituée d'un polymère fin ou de verre). Une cellule solaire typique au silicium ne produit qu'environ 0,5 volt c'est pourquoi 36 cellules solaires sont en général connectées pour donner une tension d'environ 18V [59].

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

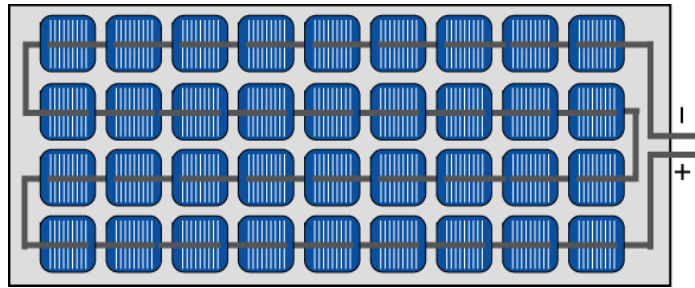


Figure II.7 : Interconnexion de 36 cellules photovoltaïques en série.

La plupart des modules solaires sont de conception similaire à base de silicium cristallin, ils représentent 88% de la production mondiale de modules photovoltaïques estimée à 1,8 gigawatt-crête (GWc). Le silicium est un matériau alliant abondance, innocuité, stabilité et coût relativement modeste, ses propriétés naturelles en tant que semi-conducteur sont modifiées par deux autres éléments, le bore et le phosphore, afin de créer un déséquilibre permanent [40,59]. Malgré la similitude dans le matériau de conception, ces modules varient en termes de taille et de puissance produite selon la nature et la forme des cellules solaires qui les constituent. Ainsi, nous en distinguons deux principaux types [60, 61]:

- **Modules monocristallins** : Les premiers modules étaient monocristallins et avaient des cellules rondes, de couleur bleu foncé, noire ou grise. Ces panneaux ayant une puissance de sortie élevée, occupent moins d'espace et durent longtemps. Bien entendu, cela signifie aussi qu'ils sont les plus chers. Mais, elles ont tendance à être légèrement moins affectées par les hautes températures que les modules poly-cristallins. La grande pureté du silicium fait que ce type de panneau solaire à l'un des taux de rendement les plus élevés. Les plus récents atteignant d'ailleurs plus de 20 %. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules poly-cristallines [40, 52, 59].
- **Modules poly-cristallins** : Aujourd'hui, les modules cristallins sont poly-cristallins, sont découpés en cellules carrées ou rectangulaires et ont généralement un ton moucheté bleuâtre. Le processus gaspille moins de matériaux mais produit un module moins efficace de rendement plus faible (environ 15%), une efficacité spatiale moindre et une durée de vie plus courte car plus sensibles aux températures élevées. Cependant, la baisse des coûts en plus de la disponibilité sur le marché des énergies renouvelables en a fait un procédé compétitif [59,60].

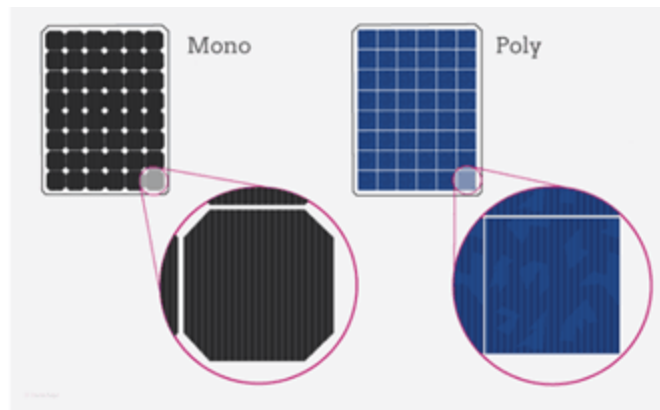


Figure II.8 : Modules solaires photovoltaïques monocristallins (à gauche) et poly-cristallins (à droite).

Les récents développements dans les technologies des cellules solaires ont donné naissance à deux autres filières de modules photovoltaïques :

- **Filière des cellules photovoltaïques à couche mince :**

Souvent appelées solaire photovoltaïque de deuxième génération car ont historiquement succédé à des cellules de silicium cristallin plus épaisses. Elles représentent 17 % du marché et sont issues des technologies du revêtement de différents supports accumulés, ces supports représentent des couches minces de quelques microns d'épaisseur constitués de matériaux photosensibles efficaces pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire. On peut classer ce type de cellules solaires en trois grandes catégories : les cellules basées sur le silicium amorphe, les cellules basées sur du tellure de cadmium (TeCd) et enfin celles basées sur un alliage de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium (Cu(In,Ga)Se₂, noté CIGS). Elles peuvent respectivement atteindre des rendements record pour des cellules photovoltaïques de 16,3 %, 17,3 % et 20,3 %. L'intérêt de ces filières réside dans la faible quantité de matériaux [40, 62,63].



Figure II.9 : Panneau solaire transparent à couche mince à base de tellure de cadmium CdTe [64].

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

- **La filière des cellules photovoltaïques de 3^{ème} génération :**

Les panneaux photovoltaïques organiques offrent une différenciation importante par rapport aux panneaux dits de 1^{re} génération et de 2^{ème} génération. Couramment désignée par le sigle OPV (organic photovoltaics) et directement tirée de l'électronique imprimée : des cellules solaires organiques dérivées du carbone sont directement imprimées sur support plastique. Ces panneaux sont souples, fins, légers, de couleurs et formes variées [65].

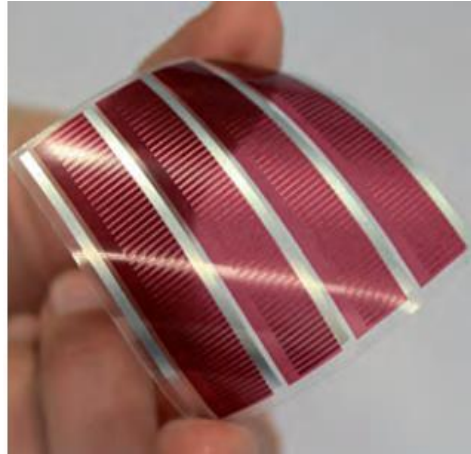


Figure II.10 : Cellule PV dite de 3^{ème} génération [65].

II.4.5 Grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

Les fabricants de cellules solaires photovoltaïques produisent des courbes courant-tension (I-V), qui indiquent le courant et la tension auxquels la cellule photovoltaïque génère la puissance de sortie maximale. Ces courbes sont basées sur une cellule placée dans des conditions normales d'ensoleillement et de température, sans ombre [53].

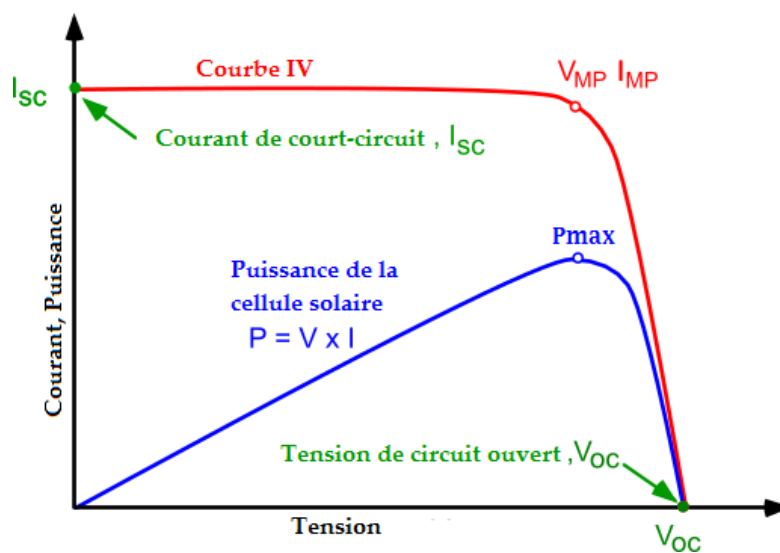


Figure II.11 : Courbe courant-tension (en rouge) et courbe puissance-tension(en bleu) d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

Les courbes courant-tension et puissance-tension typiques à la cellule PV diffèrent selon l'intensité de rayonnement et du matériau de conception du module photovoltaïque. La figure II.13 indique des courbes caractéristiques I-U pour différentes technologies de cellules et différents éclairagements.

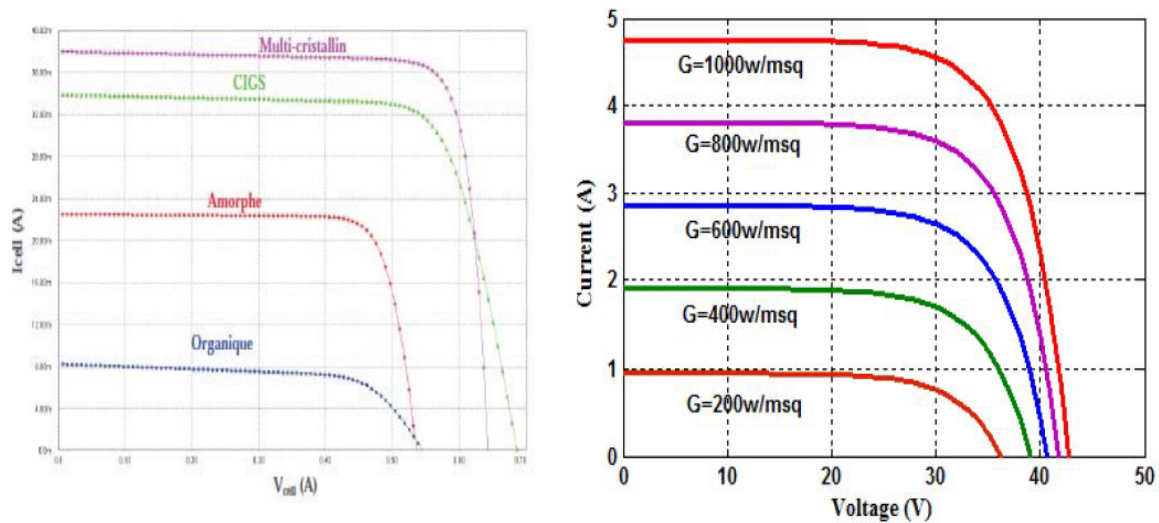


Figure II.12 : Courbes caractéristiques courant-tension d'une cellule pour différents éclairagements et pour différentes technologies [52].

Différents paramètres fondamentaux caractérisent cette cellule PV :

Courant de court-circuit I_{sc}

Un module photovoltaïque produit son courant maximal lorsqu'il n'y a pratiquement aucune résistance dans le circuit. Il s'agit d'un court-circuit entre ses bornes positive et négative. Dans ce cas, la résistance est nulle et la tension dans le circuit est nulle. Sa valeur typique est d'à peu près une dizaine de milliampères par centimètre carré de cellule [50, 59, 66].

Tension du circuit-ouvert V_{oc}

Cette tension signifie que la cellule PV n'est pas connectée à une charge externe et ne produit donc pas de courant. Elle se situe autour de 0.6 V pour la cellule en silicium [50, 59, 66].

Puissance maximale P_{max}

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance, en ce point la puissance fournie par le panneau PV est à sa valeur maximale [50, 59], ainsi :

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

$$P_{max} = I_{mp} * V_{mp}$$

Les valeurs I_{mp} et V_{mp} se situent au "genou" de la courbe courant-tension (Figure II.12).

Le rendement η

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il est défini par la relation suivante [66] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{E * S} = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{E * S}$$

E : éclairement incident (W/m^2)

S : surface du module (m^2)

Le rendement d'une cellule est très important car grâce à ce paramètre différentes cellules peuvent être comparées [67].

II.4.6 Facteurs environnementaux et climatiques influençant l'efficacité des panneaux photovoltaïques

Plusieurs paramètres environnementaux et climatiques ont une influence sensible sur le comportement des modules PV [68]. Les performances des systèmes PV sont fortement affectées par des facteurs internes et externes dont beaucoup dépendent de l'emplacement géographique. Parmi ces paramètres : le rayonnement, la température, le vent et la pollution. Tout type de changement climatique provoque des changements dans les radiations solaires et dans la température ambiante, entraînant ainsi des changements dans la performance de la production solaire PV [35,69].

Plusieurs études ont été d'ailleurs établies sur l'impact de ces paramètres-ci sur l'efficacité des panneaux solaires PV et sont arrivées à différents résultats :

II.4.6.1 Influence de l'irradiation

Une étude sur l'influence de la température et l'irradiation sur les paramètres photovoltaïques dans les conditions réelles de fonctionnement indique que pour des panneaux photovoltaïques de technologie monocristalline et poly-cristalline la valeur de la puissance maximale augmente lorsque l'irradiation solaire du site augmente [70], ainsi le rendement énergétique du panneau PV diminue avec la diminution du taux d'irradiation.

En fait, un panneau solaire capte le maximum d'énergie lumineuse quand il est perpendiculaire aux rayons solaires, or l'angle d'incidence de ces rayons varie au cours de la journée et au cours des saisons. Et encore, plus l'ensoleillement est important, plus l'énergie

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

produite dans les cellules solaires est élevée, et par conséquent l'installation photovoltaïque est performante [71]. La quantité de lumière solaire qui tombe donc sur la face de la cellule photovoltaïque affecte sa production.

La figure II.13 représente un dispositif mis en place pour prouver l'influence de l'ensoleillement. On effectue un test sur deux cellules solaires photovoltaïques de même type en variant le taux d'irradiation et présentons par la suite les graphiques de courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) qui leurs sont relatives, suivant les différents niveaux d'éclairage. On remarque sur les graphes des figures, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. Il est clair que les valeurs de courant, tension et puissances diminuent considérablement avec la diminution du taux d'irradiation [53].

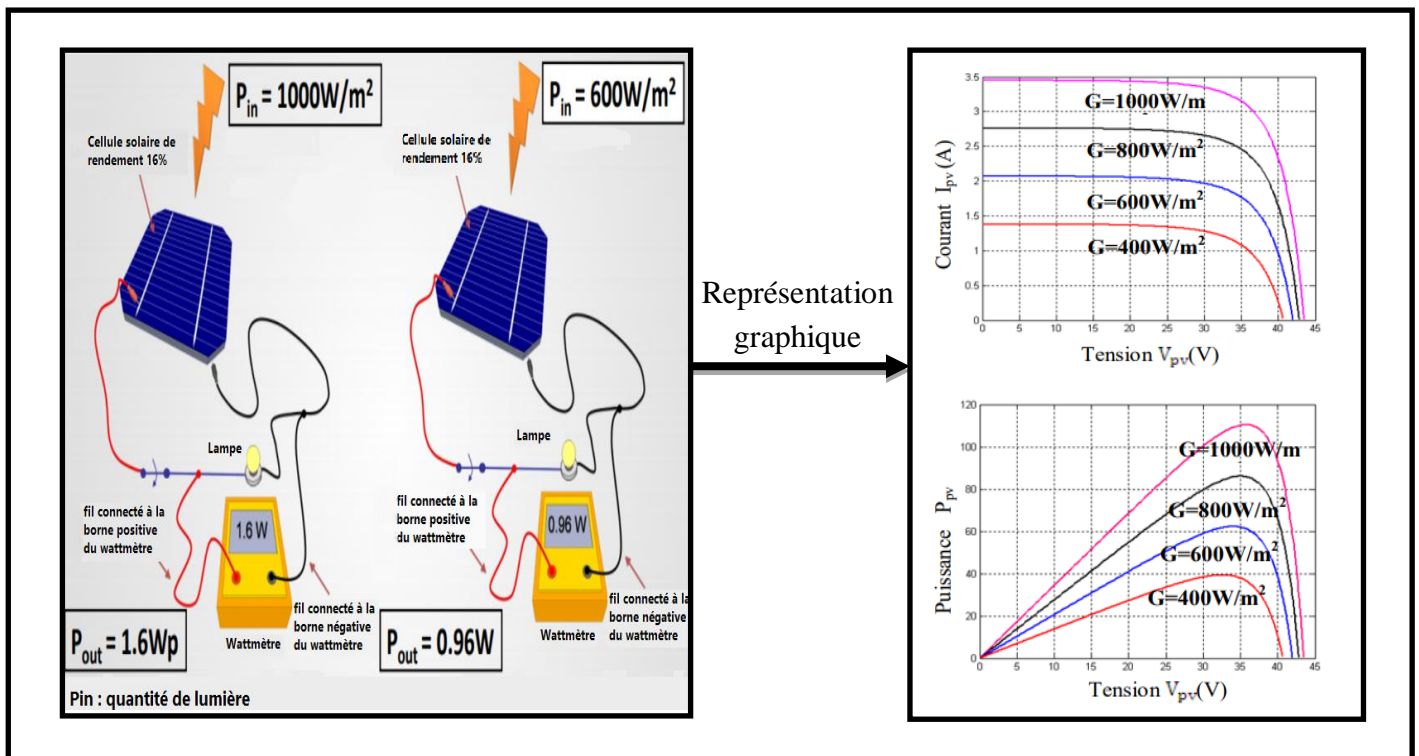


Figure II.13 : Tests sur deux cellules solaires de même type en variant le taux d'irradiation et représentation courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) correspondants [30].

II.4.6.2 Influence de la température

L'efficacité des modules PV diminue d'environ 0,5% pour chaque augmentation de température de 1°C . Cela signifie que les températures élevées de l'air ambiant dans des situations où l'irradiation solaire directe est élevée peuvent avoir un impact significatif sur la puissance de sortie maximale possible. L'augmentation de la température a un effet négatif

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

sur les modules actuels en couches minces et en Si cristallin avec une diminution de performance pour le Silicium Cristallin. La figure II.14 représente l'évolution du rendement énergétique d'un module PV en fonction de la température. Nous remarquons que plus la température augmente plus le rendement diminue. La température a donc un impact négatif sur l'efficacité des panneaux PV [72].

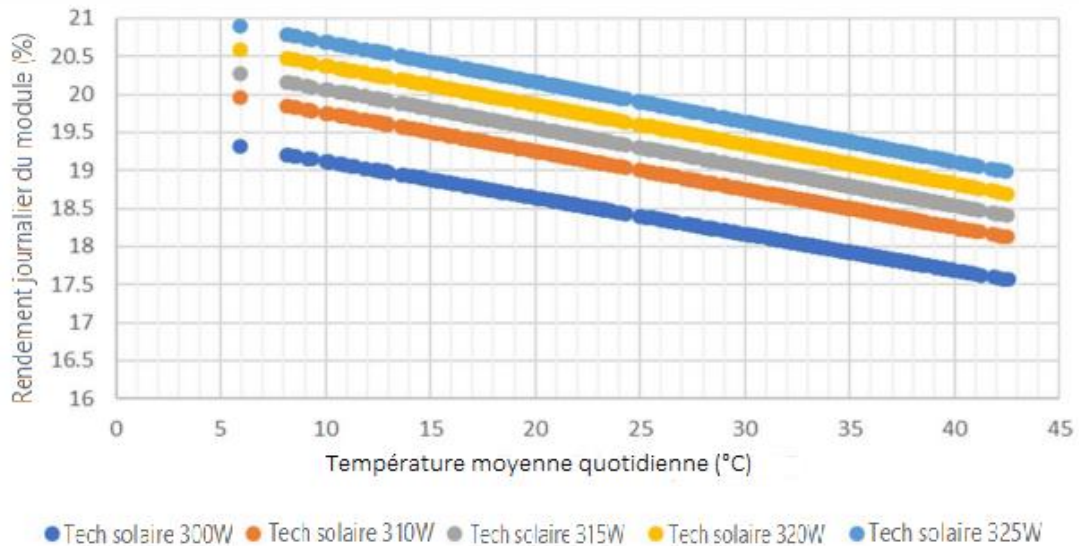


Figure II.14 : Evolution du rendement journalier du module en fonction de sa température moyenne [72].

C'est ainsi que la température de la cellule augmente au point de provoquer une détérioration du matériau. La tension et la tension en circuit ouvert (V_{oc}) diminuent comme le montre la figure II.15 [72].

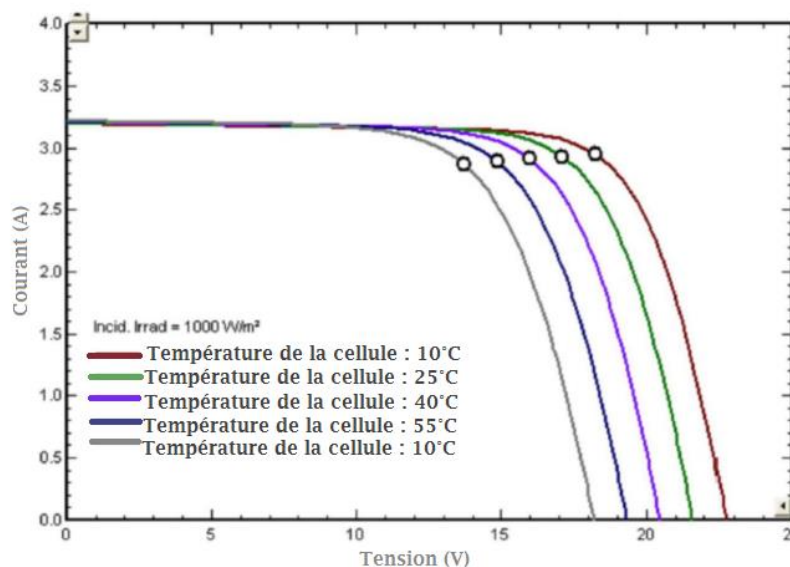


Figure II.15 : Réseau de caractéristique $I=f(U)$ suivant une température de module variable [72].

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

La diminution de la valeur de tension implique la diminution de la valeur de puissance fournie par le module. Ceci apparaît clairement sur la figure II.16 et prouve bien que la hausse de température réduit l'efficacité du module PV [72].

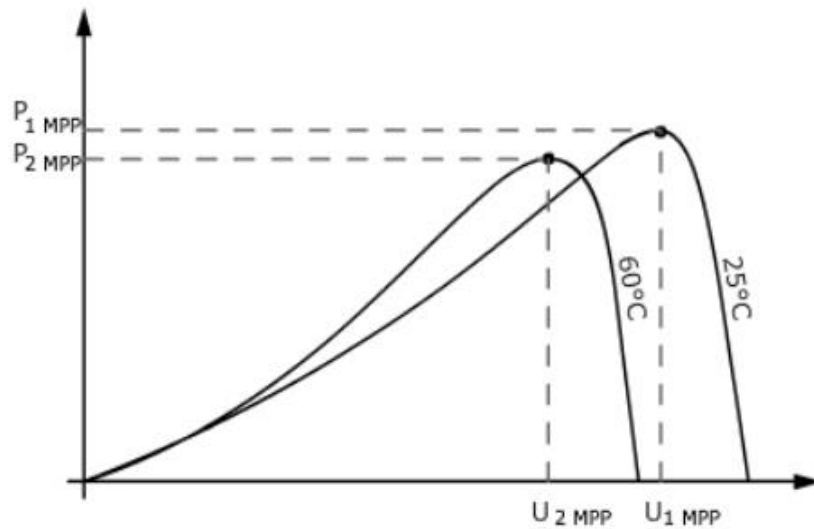


Figure II.16 : Evolution de la puissance fournie par une cellule PV lorsque sa température de fonctionnement augmente [52].

Le phénomène s'explique par le mouvement de certains photons n'éjectant pas d'électrons mais générant de la chaleur de par leur mouvement sur la surface du module. Le taux de conversion photon-électron est faible car un certain nombre de conditions doivent être réunies pour que ce phénomène se produise. Ainsi, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs PV a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue [52,72].

Cela suggère que pour une meilleure efficacité, nous devons avoir besoin d'un système de refroidissement pour refroidir le module. Actuellement différentes méthodes existent comme le refroidissement par air forcé, le refroidissement par eau, ... [72].

II.4.6.3 Influence de la poussière

La saleté et la poussière peuvent s'accumuler sur la surface du module solaire, entraînant une réduction significative de l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface du module PV et entraînant une détérioration marquée de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Ceci implique une diminution dans le rendement. Bien que diverses méthodes de nettoyage des systèmes PV existent actuellement, il est plus réaliste d'estimer

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

le rendement du système en tenant compte de la réduction due à l'accumulation de poussière pendant la saison sèche [59,69,73].

II.4.6.4 Temps nuageux

Un temps nuageux réduit l'efficacité, en diminuant à la fois la quantité de rayonnement solaire atteignant le sol et la température de l'air ambiant [34].

Contrairement à l'impact de la poussière qui influe à long terme, la couverture nuageuse peut faire varier la production photovoltaïque de manière significative sur une échelle de temps de quelques minutes puisqu'elle impacte de manière immédiate [74,75]. Ainsi, les nuages présentent une relation inverse avec la production d'énergie solaire. Celle-ci diminue lorsque l'épaisseur de la couverture nuageuse augmente. Dans un même lieu géographique, le pourcentage de perte de la puissance de sortie due à une couverture nuageuse légère sur module photovoltaïque est estimé à 23,80%. De même, le pourcentage de perte de puissance de sortie due à une forte couverture nuageuse sur un module photovoltaïque est estimé à 66,75% [76].

II.4.6.5 Influence de l'humidité

L'influence de l'humidité varie de diverses manières selon son augmentation ou sa diminution au niveau de l'atmosphère :

Gwandu a indiqué que l'humidité influence le niveau d'irradiation de la lumière solaire, ce qui a pour conséquence de réduire les radiations soumises au panneau PV en raison de la réflexion causée par les particules de vapeur d'eau [77]. Aussi, l'accumulation de poussière est pire avec une humidité plus élevée puisque des dépôts solides se forment sur la surface du panneau PV diminuant de ses performances [34,35]. Mais, l'effet de l'humidité le plus important et affectant les cellules solaires à long terme est la corrosion de la cellule et des joints métalliques ainsi que la nécrose des polymères utilisés. Ces phénomènes ont lieu lors de l'exposition prolongée des modules photovoltaïques à l'humidité entraînant la pénétration d'eau dans le module [78].

Cependant, elle peut aussi avoir un impact positif puisque l'humidité et le vent, ensemble, peuvent augmenter l'efficacité du PV dans les climats chauds en jouant tous deux un rôle important dans le refroidissement des surfaces PV [35].

II.4.6.6 Influence du vent

La puissance et le rendement des panneaux photovoltaïques augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent, ce qui traduit l'effet du vent comme facteur d'aération

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

pour les cellules du capteur PV. Le vent joue le rôle d'un refroidisseur des cellules ce qui réduit la température du module et augmente de son efficacité [79] présentant ainsi un effet compensateur de l'impact négatif de la surchauffe des panneaux solaires lors des journées chaudes [80].Après l'éclairement et la température ambiante, le vent est le paramètre ayant le plus d'influence sur la température de fonctionnement du système PV [68].

Mekhilef durant son étude a observé que l'augmentation de la vitesse du vent a provoqué une réduction de l'humidité de l'air atmosphérique, ce qui entraîne un meilleur rendement du panneau. Cependant, une vitesse de vent élevée peut entraîner une augmentation de la poussière et la disperser autour des modules PV, entraînant une baisse de la performance des cellules plus particulièrement dans la région du Sahara où les vents forts sont souvent associés à des tempêtes de sable [34,81].

Il a donc été clairement démontré qu'un nombre important de paramètres climatiques plus particulièrement l'humidité, la température et le vent influent considérablement sur l'efficacité des panneaux solaires PV [72,77, 79].

Dans les prochaines années, l'ensemble des paramètres climatiques cités varieront fortement en raison d'un changement climatique inévitable. Les prévisions climatiques dans la région du bassin méditerranéen et du Maghreb le confirment, il y aura une nette hausse dans les températures influant directement sur le taux d'humidité relative dans l'atmosphère qui ira à décroître [10, 14, 21].

Selon une étude effectuée au Massachusetts Institute of Technology (MIT), il y a réduction du rendement énergétique des installations photovoltaïques au silicium dû à l'augmentation des températures en raison du réchauffement de la planète en 2100. D'après cette étude, le réchauffement de la planète n'est pas le seul aspect pertinent du changement climatique qui affectera le rendement énergétique. Les modifications de l'ensoleillement et de l'humidité affecteront la quantité de lumière qui atteint un panneau puisque les variations de l'ensoleillement auront un effet immédiat qui pourrait bien être plus perceptible que celui de la température [82]. Nous tenterons nous aussi à travers notre étude expérimentale d'identifier l'impact de certains paramètres climatiques pour pouvoir cerner par la suite celui du changement climatique sur le rendement énergétique des panneaux PV.

Partie expérimentale

I Matériel et méthode

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude expérimentale des performances de deux modules PV en fonction de l'évolution des paramètres climatiques : température, vent, humidité, en définissant les outils et la méthodologie utilisés.

I.2 Présentation de l'organisme récepteur

Le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) est un établissement Public à caractère Scientifique et Technologique (EPST) chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développements, scientifiques et technologiques, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse. Celui-ci est composé de plusieurs divisions dont celle de l'énergie solaire photovoltaïque qui comprend parmi ses missions l'amélioration des performances des systèmes PV en effectuant des essais au niveau du laboratoire d'essais photovoltaïques PVTL (Photovoltaic Test Lab) principalement rattaché à ce centre.

I.3 Matériels utilisés

Nos essais expérimentaux s'effectueront au sein du laboratoire d'essais photovoltaïque PVTL. Celui-ci est situé dans la ville d'Alger dans la commune Ben Aknoun, les coordonnées de latitude, de longitude et d'altitude de ce site sont respectivement comme suit : $36^{\circ} 44'44,94''\text{N}$, $3^{\circ} 00'46,80\text{E}$ et 236 mètres au niveau d'un site considéré comme semi-urbain avec une zone chaude et humide.

La configuration de mesure expérimentale comprend les principales parties suivantes : modules PV, charge électronique, système d'acquisition, capteur d'irradiation, capteur de vent, capteur de température et capteur d'humidité. Les machines de mesure ont été représentées respectivement du suivi à l'analyse de données sur la Figure I.1.

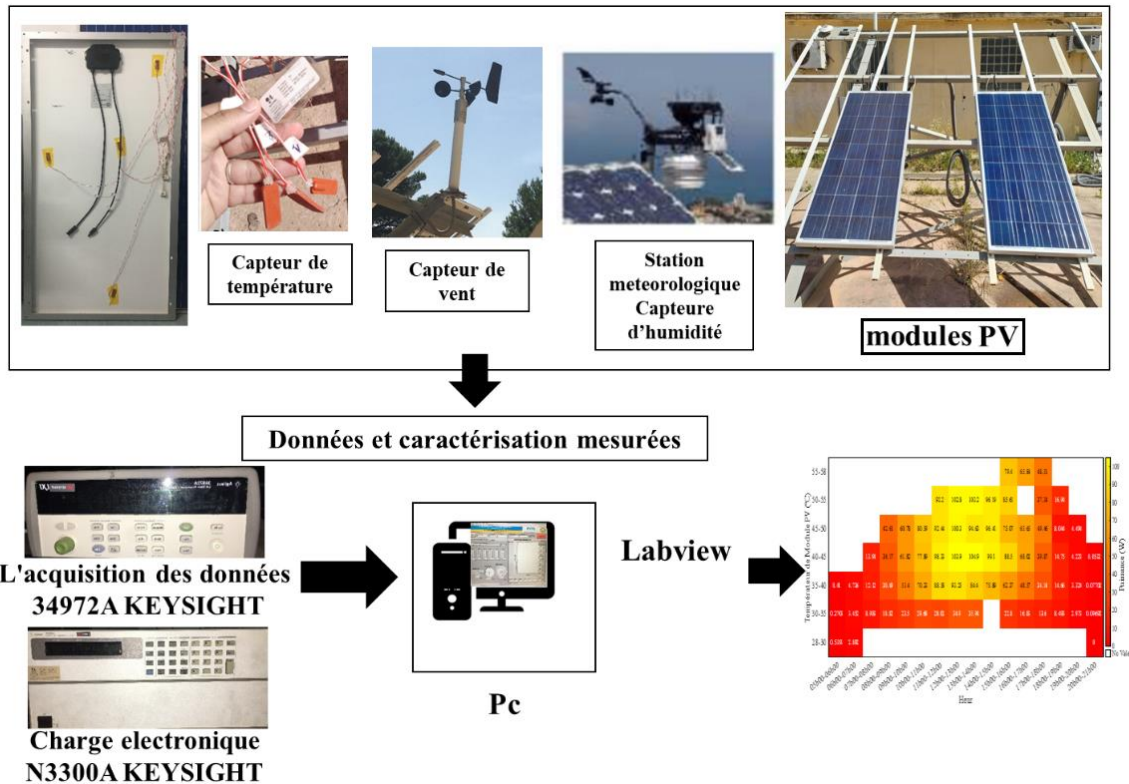


Figure I.1 : Schéma du système expérimental permettant de collecter les données climatiques et électriques correspondant à notre installation PV.

Nous présentons ci-dessous la description de chaque équipement utilisé :

I.3.1 Charge électronique

Système de tracé de la courbe I-V et de la courbe P-V du module photovoltaïque. Il permet de recueillir les données de tension, de courant et de puissance des modules PV testés (P_{max} , I_{cc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} et FF). La charge électronique utilisée dans notre laboratoire est Keysight N3300A (Figure I.2, Figure I.3). Les canaux 3 et 4 sont destinés au test de performance à STC (standard test condition). Le reste des canaux sont utilisés lorsqu'il y a lieu de faire un monitoring, ce qui est le cas de notre étude expérimentale.



Figure I.2 : Charge électronique N3300A, face avant.



Figure I.3 : Charge électronique N3300A, face arrière.

I.3.2 Appareil d'acquisition de données

L'acquisition de données Keysight 34972A est un système qui est connecté à plusieurs capteurs et qui recueille et sauvegarde leurs mesures (Figure I.4).

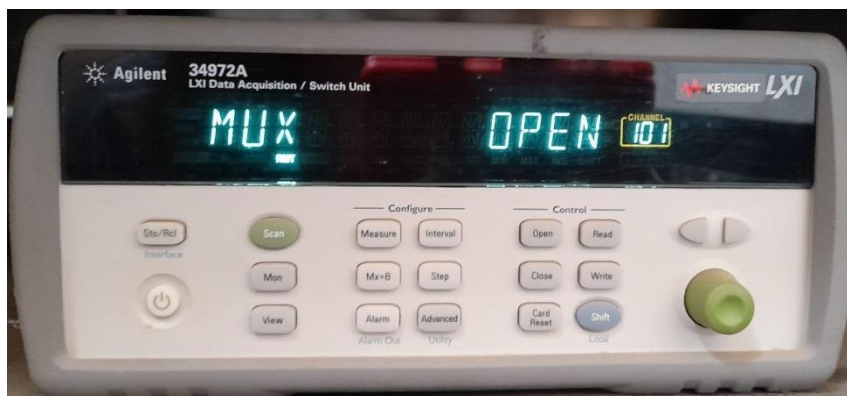


Figure I.4 : Appareil d'acquisition de données Keysight 34972A.

Plusieurs capteurs et appareils sont utilisés pour déterminer une large gamme de données des différents paramètres climatiques. Surnommés capteurs environnementaux, ils sont destinés à superviser l'éclairement, la température, la vitesse du vent et l'humidité sur un site donné :

I.3.3 Capteur de vent ou anémomètre

Le capteur de vent de référence DNA121#C fournit des mesures très précises et robustes de la vitesse horizontale du vent ainsi que sur la direction du vent. Le signal de sortie du capteur couvre une plage de 0 à 60 m/s.



Figure I.5 : Capteur de vent ou anémomètre.

I.3.4 Capteur d'irradiation

Les deux types de capteurs présentés ci-dessous sont les deux outils les plus populaires utilisés par l'industrie photovoltaïque (PV) pour mesurer l'irradiation :

I.3.4.1 Capteur d'irradiation solaire à cellule de référence :

Le capteur d'irradiation de référence Si-01TC-Test est une cellule solaire fabriquée en silicium monocristallin, il s'agit donc d'une miniature de panneaux PV installée au sommet du module PV testé afin de mesurer l'irradiation sur le plan du module. Son rôle est de mesurer de manière précise l'énergie solaire rayonnée sur l'installation des panneaux photovoltaïques (W/m^2) et de surveiller les performances de l'installation solaire. La réponse spectrale qu'il reçoit est comparable à celle des modules PV puisque le capteur mesure uniquement la partie spectrale que la cellule solaire peut convertir en électricité. C'est pourquoi l'utilisation de ce type de capteur permet une analyse exacte des rendements énergétiques PV et une meilleure détection des changements dans la performance du système PV avec une évaluation plus rapide de l'efficacité de son fonctionnement.

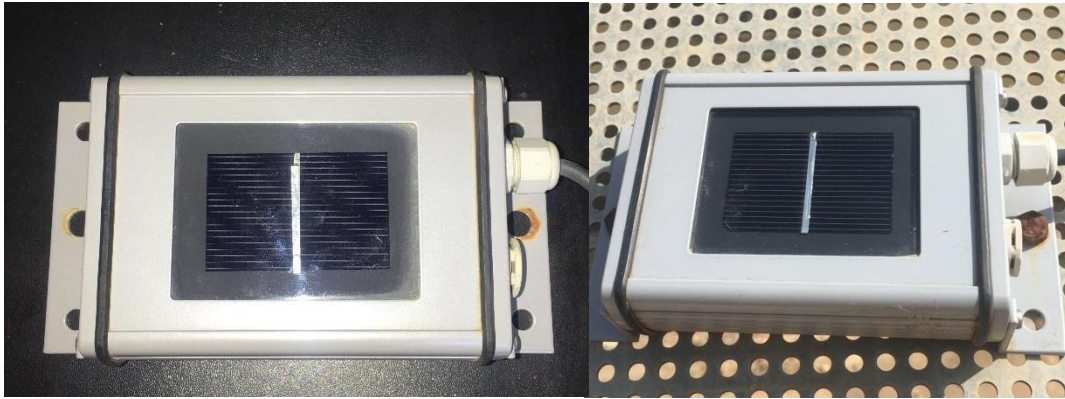


Figure I.6 : Capteur d'irradiation solaire à cellule de référence.

I.3.4.2 Pyranomètre

C'est un instrument de mesure d'irradiation solaire de référence DPA154. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il a contrairement au capteur d'irradiation solaire à cellule de référence la particularité de mesurer toute la gamme spectrale du soleil c'est-à-dire le rayonnement global (direct et diffus) qui atteint la surface terrestre. Il permet une très faible erreur directionnelle (adaptée à la fois à une installation horizontale ou inclinée).



Figure I.7 : Capteur d'irradiation de type 'pyranomètre'.

I.3.5 Capteur de température du module

Le capteur de température du module de référence PT100 mesure la température à l'arrière du module photovoltaïque.

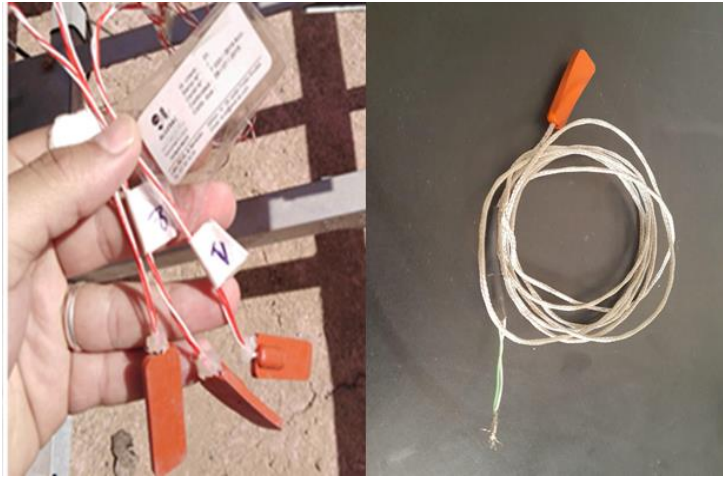


Figure I.8 : Capteur de température du module.

I.3.6 Capteur de température ambiante

Le capteur de température ambiante de référence SE1000-SEN-TAMB-S2 mesure la température environnante à l'ombre. Il est placé sur le site au niveau duquel se trouve l'installation PV.

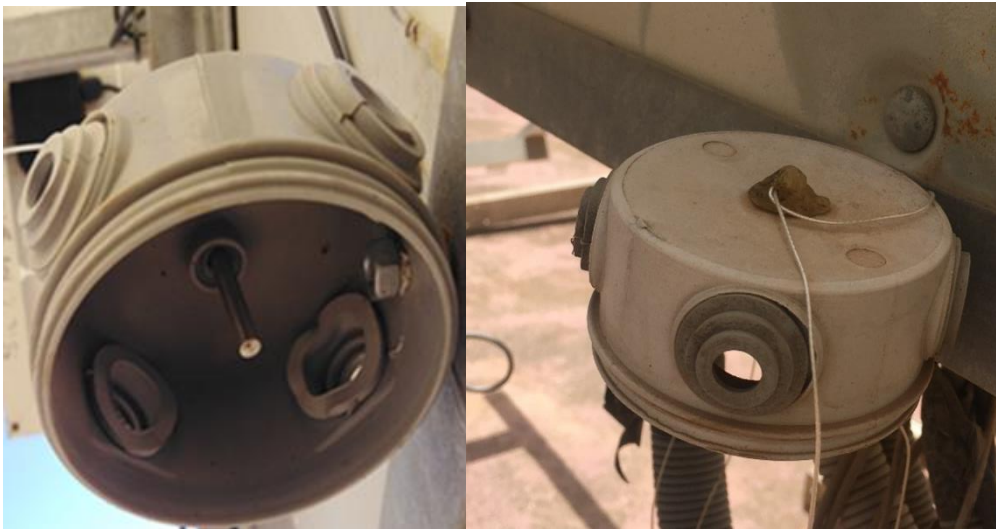


Figure I.9 : Capteur de température ambiante.

I.3.7 La station météorologique de Bouzareah :

La station météorologique de Bouzaréah se trouve au niveau du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) dans la ville de Bouzaréah, Alger, près de la côte méditerranéenne.

Cette station révèle que l'humidité annuelle relative au niveau de la commune de Bouzaréah est de 66,5 % [83]. Cette commune présente le même taux d'humidité que celle de

Ben Aknoun (moyenne annuelle de 66,16%) pour l'année 2021 tel que représenté sur la figure I.10, similitude due principalement au rapprochement géographique entre les deux.

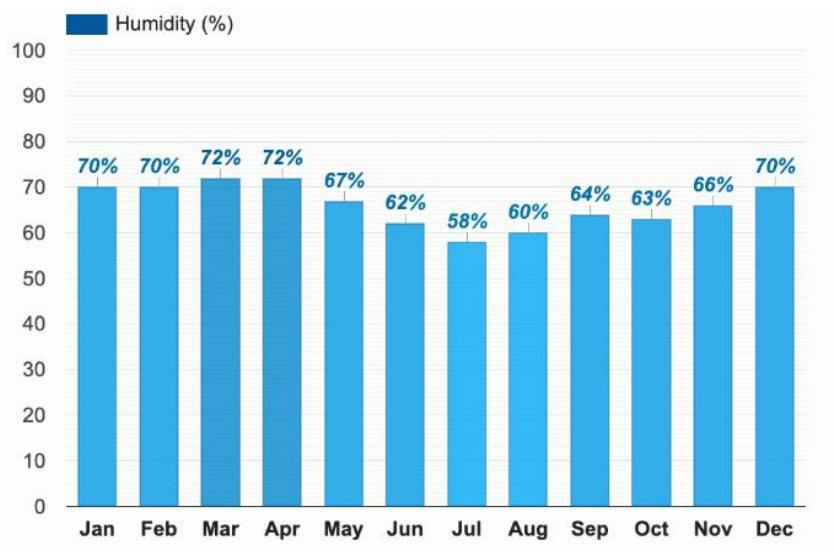


Figure I.10 : Moyenne d'humidité à Ben Aknoun [84].

Nous utiliserons durant notre étude expérimentale les données relatives à l'humidité procurées par la station météorologique de Bouzaréah puisque la similitude du climat entre les deux communes nous permet ceci.

Cette station météorologique est nommée Vantage pro 2 de la marque Davis instruments, comprend un ensemble de capteurs polyvalents (un pluviomètre, un capteur de température et d'humidité ainsi qu'un anémomètre) et une console de contrôle des données récoltées permettant la transmission des données sans fil par un signal radio.



Figure I.11 : Station météorologique Vantage pro 2 de Davis instruments et sa console de contrôle des données.

C'est donc les données d'humidité procurées par cette station transmises à travers la console de contrôle qui seront discutées dans le chapitre suivant.

I.3.8 Fiche technique du module PV :

Le module Photovoltaïque utilisé est de type silicium poly-cristallin, de dimensions 1482*674*45 mm dont les propriétés sous les conditions de rayonnement et de température (1000W/m² et 25°C) sont présentées dans le Tableau I.1 :

Tableau I.1 : Caractéristiques des modules PV utilisés lors de l'étude expérimentale.

Paramètres	Module PV
Puissance maximale (Pmax)	150W
Tension de circuit ouvert (Voc)	22,9V
Courant de court-circuit (Isc)	8,59A
Voltage en Pmax (Vmp)	18,5V
Courant en Pmax (Imp)	8,11A
Température nominale d'utilisation de la cellule PV (NOCT)	45±2°C
Tolérance de puissance	±5%



Figure I.12 : Module PV de type silicium poly-cristallin.

I.3.9 Logiciel LabVIEW :

Étant connecté à la charge électronique et à l'acquisition des données qui est connecté à son tour aux capteurs environnementaux, ce logiciel permet le monitoring des modules PV servant l'expérimentation. C'est-à-dire faire le suivi et le contrôle des différents paramètres correspondant à chacun des modules PV (P_{max} , I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp}) de manière continue. Cette interface graphique nous permet aussi d'avoir une visibilité directe sur les données des paramètres climatiques qui nous intéressent : température et vitesse du vent.

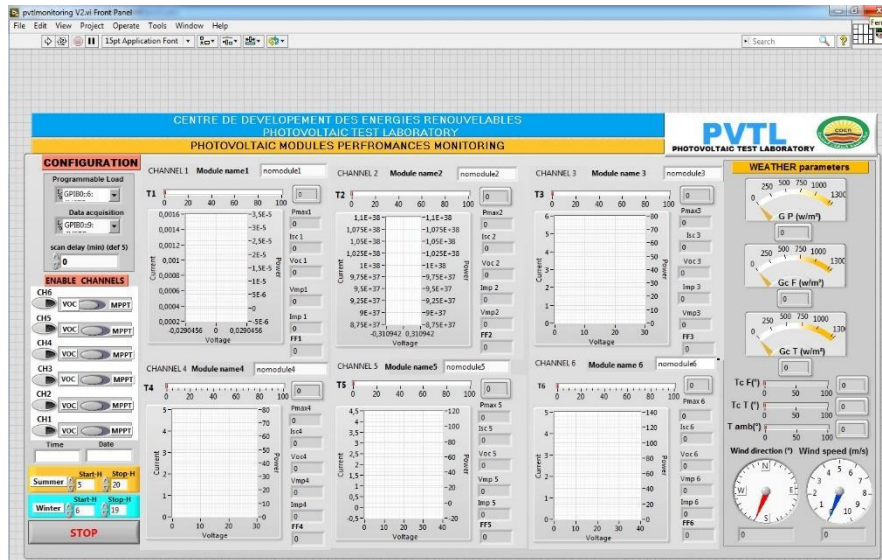


Figure I.13 : Interface du logiciel LabVIEW.

I.4 Mode opératoire

L'étude expérimentale consiste en l'utilisation de deux modules photovoltaïques (nommés PV(A) et PV(B)) de type silicium poly-cristallin présentant les mêmes caractéristiques (indiqués dans le tableau I.1).

La différence entre les deux modules réside dans le nettoyage. Chaque matin le module PV(A) est nettoyé avec de l'eau pour enlever toute trace de poussière contrairement au module PV(B) qui reste non nettoyé durant toute la durée de l'expérience. Les deux modules sont connectés au système préalablement décrit et nous obtenons grâce au logiciel Labview les données sur l'ampérage, le voltage et la puissance correspondant aux modules ainsi que ceux des paramètres climatiques : humidité, vitesse de vent et température qui leurs sont correspondants. A noter que le système nous collectera tous les jours ces données de 5h jusqu'à 20h tout au long de la période expérimentale qui durera 30 jours.

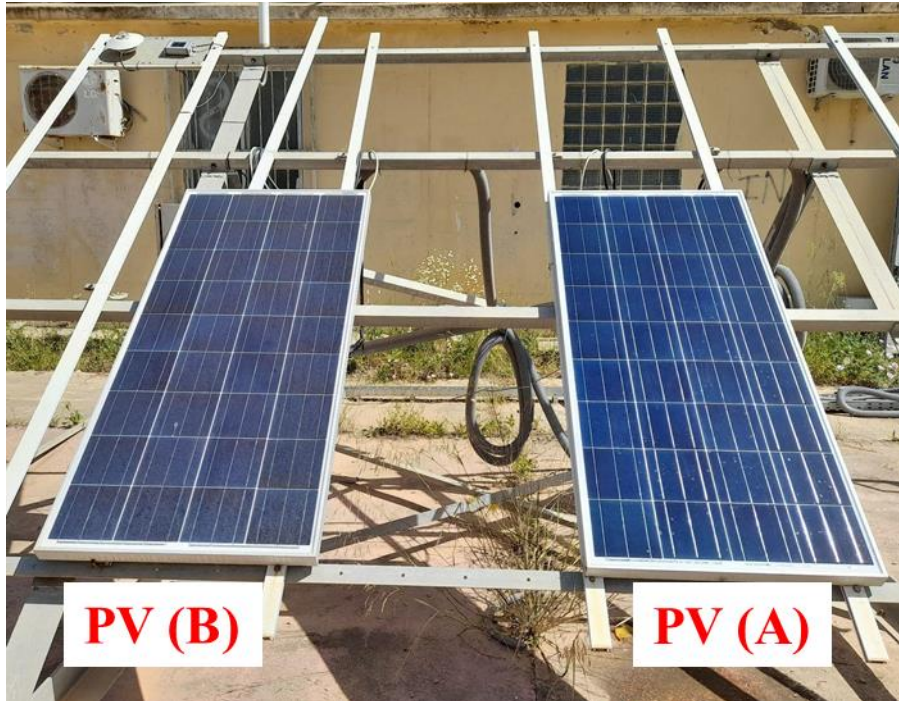


Figure I.14 : Les deux modules PV : PV(A) (nettoyé) et PV(B) (non nettoyé).

II Résultats et discussion

II.1 Introduction

Ce présent chapitre est consacré à la discussion des données de température, de vent et d'humidité ainsi que ceux de puissances et de rendement qui leur sont relatives en distinguant les deux modules PV(A) (nettoyé) et PV(B) (non nettoyé). Nous pourrions par la suite grâce à nos résultats expérimentaux et aux projections climatiques, cerner l'impact qui fait l'objet de notre étude s'aidant des interprétations de nos résultats et des travaux de recherches préalablement cités.

II.2 Résultats obtenus

Il est d'abord primordial de noter que le type de représentation graphique utilisé pour l'illustration de nos données est le heatmap. C'est une représentation graphique dont le principe est de faire correspondre à l'intensité d'une grandeur variable qui est dans notre cas la moyenne des données de puissance (W) de sortie du module PV au point de puissance maximale (obtenues au cours du mois de juin grâce au monitoring) un nuancier de couleurs sur une matrice à deux dimensions. Il permet de donner aux données un aspect visuel plus facile à saisir qu'un tableau de statistiques. Les figures II.1, II.2, II.3 et II.4 représentent le nombre de données en fonction du temps et des différents paramètres climatiques pour chacun des deux modules PV. Chaque case comprend le nombre de données existantes pour les intervalles correspondants. Nous adoptons ces graphiques puisqu'ils permettent une illustration simple et efficace lorsqu'une grande quantité de données se présente, ce qui est notre cas vue l'adoption du monitoring comme méthode de suivi.

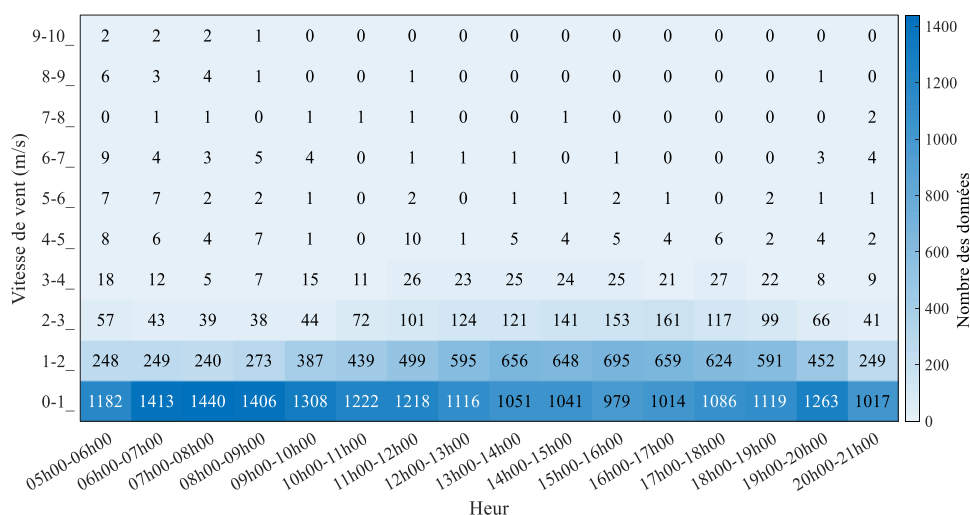


Figure II.1 : Nombre de données en fonction du temps et de la vitesse du vent pour PV(A).

Chapitre II : Résultats et Discussion

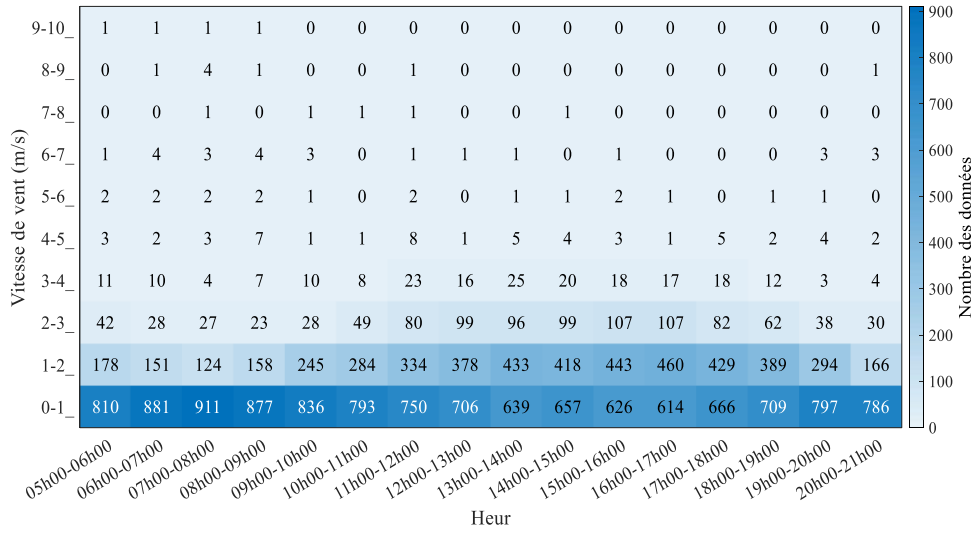


Figure II.2 : Nombre de données en fonction du temps et la vitesse du vent pour PV(B).

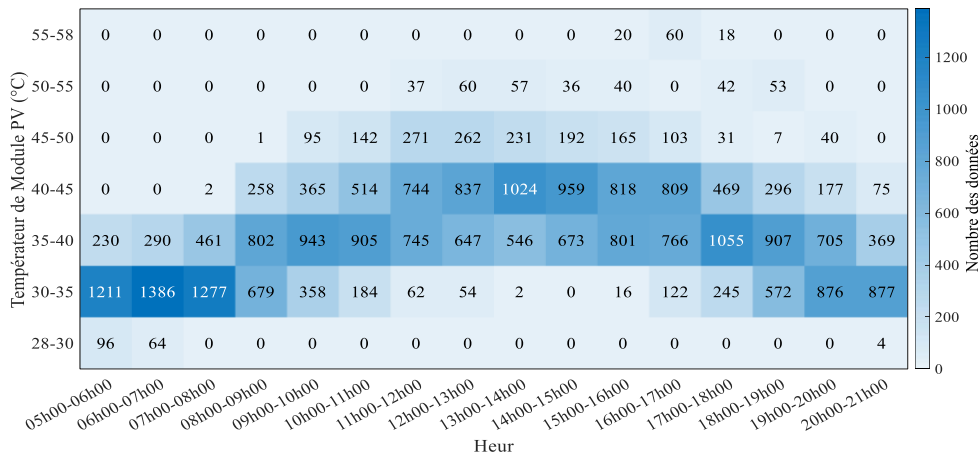


Figure II.3 : Nombre de données en fonction du temps et de la température du module pour PV(A).

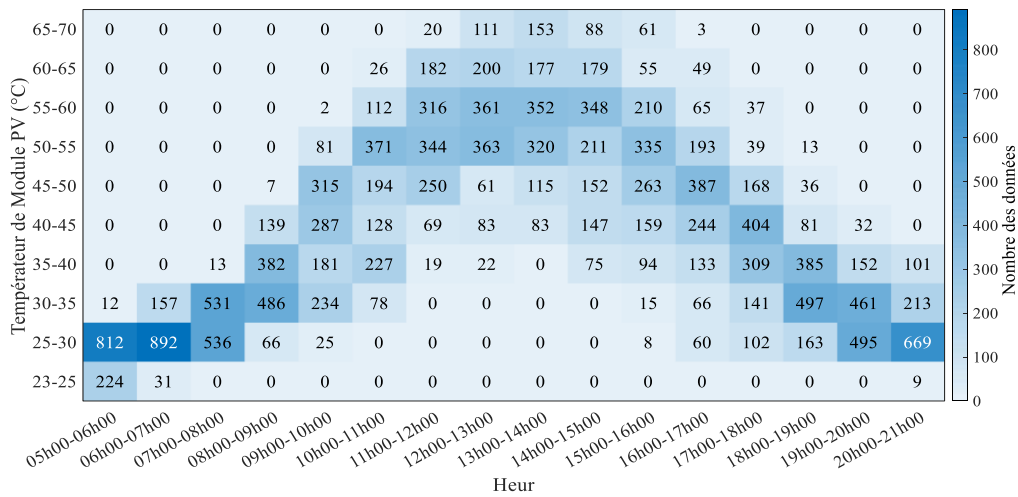


Figure II.4 : Nombre de données en fonction du temps et de la température du module pour PV(B).

Chapitre II : Résultats et Discussion

Aussi, l'ensemble des discussions qui se feront auront lieu seulement dans l'intervalle de temps [12h ; 14h] puisque c'est durant cette plage horaire que l'ensoleillement présente une irradiation conventionnelle de 1000 W/m² uniforme sur toutes les cellules. Comme notre étude est basée sur le suivi des variables température, vent et humidité nous préférons discuter nos résultats dans un intervalle de temps correspondant à une irradiation constante et conventionnelle pour faciliter la visualisation de l'impact des paramètres suivis seulement.

II.2.1 Données de température

Module PV(A)

La figure II.5 représente le heatmap indiquant le changement de puissance en fonction de la température et du temps de 5h à 21h pour une durée d'un mois relatif au module PV(A). Sur chaque case de le heatmap est inscrite une valeur de puissance maximale. Chaque valeur correspondant à la moyenne des valeurs enregistrées sur une période d'un mois de l'ensemble des données de puissance (W) de sortie du module PV au point de puissance maximale. Dans un premier temps on remarque que les puissances maximales atteintes sont importantes entre midi et 14h correspondant à une température variant de 30 à 55 °C puisque durant cette plage horaire l'ensoleillement est important, l'irradiation maximale atteint les 1000W/m² (les rayonnements solaires sont perpendiculaires à la surface de la terre).

La plus grande valeur de puissance correspondant à 104,9W a été atteinte pour une température appartenant à un intervalle de [40°C, 45°C]. Pour cette valeur de puissance maximale, le rendement est de 10,5 %. Cela veut dire que 10,5 % de la lumière captée s'est réellement transformée en électricité.

$$\eta = P_{\max} / E * S = 104,9 / (1000 * 0.999) = 10,5\%$$

$$\text{avec } S = 1482 * 674 = 0.999 \text{m}^2$$

A noter que plus le rendement est important plus la quantité d'électricité produite par le panneau solaire PV par rapport à l'énergie solaire reçue est importante.

Nous remarquons par la suite que la plage de température pour laquelle la puissance la plus importante a été atteinte est exactement adéquate à la température nominale de fonctionnement de la cellule préalablement citée dans les caractéristiques des modules PV utilisés et qui vaut 45±2°C. Une fois cette plage de température dépassée, les valeurs de puissance vont décroître atteignant les 94,63W. Pour cette valeur de puissance le rendement

Chapitre II : Résultats et Discussion

énergétique du panneau diminue fortement atteignant les 9,5% ce qui indique l'impact négatif de la hausse de température pour une température qui excède les 45°C.

Pour des températures plus basses comprises dans un intervalle de [30°C ; 40°C] les données de puissance ne sont pas vraiment intéressantes ce qui est peut-être dû au manque d'irradiation par raison de présence d'une couverture nuageuse malgré la plage horaire correspondant à [12h ; 14h] sur laquelle un fort ensoleillement est censé être présent.

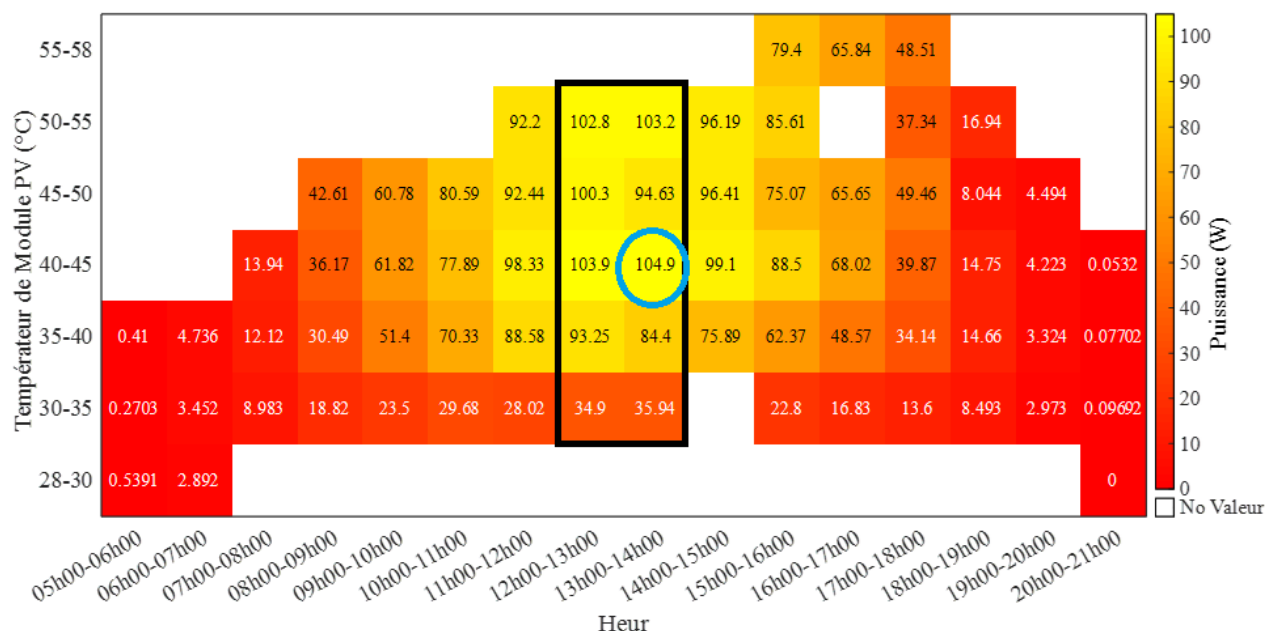


Figure II.5 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la température (T) correspondant au module PV(A).

Module PV(B) :

La figure II.6 représente le heatmap indiquant le changement de puissance en fonction de la température de 5h à 21h pour une durée d'un mois. Ces données sont relatives au module PV(B) non nettoyé c'est-à-dire non soumis aux conditions d'hygiène relatives au bon fonctionnement des panneaux PV. Nous relevons de cette figure les remarques suivantes :

L'intervalle de température [45°C ; 65°C] correspond à des valeurs de puissances intéressantes sur la plage horaire [12h ; 14h], la plus grande valeur vaut 91,06W produite pour une température de module comprise entre 60°C et 65°C et correspondant à un rendement de 9,10%. Les grandeurs de températures atteintes sont bien plus importantes que celles atteintes par le PV(A) représentées sur la figure II.5 (température maximale atteinte : 70°C par le PV(B) contre 55°C par le PV(A)). Ceci est dû à la présence de la couche de poussière qui participe à la surchauffe du module PV. Cette surchauffe s'accompagne d'une

Chapitre II : Résultats et Discussion

nette diminution des valeurs de puissance par rapport au module PV(A) (figure II.5). Les pertes de rendement confirment ceci puisque pour une température comprise entre 65 et 70°C la puissance diminue jusqu'à atteindre 80,95W ce qui correspond à un rendement de 8,10% seulement, présentant une très faible valeur de rendement. Ceci prouve clairement l'impact négatif de la hausse de température sur le rendement des panneaux solaires (pour une température qui excède les 65°C) que subit le PV(B) plus que le PV(A).

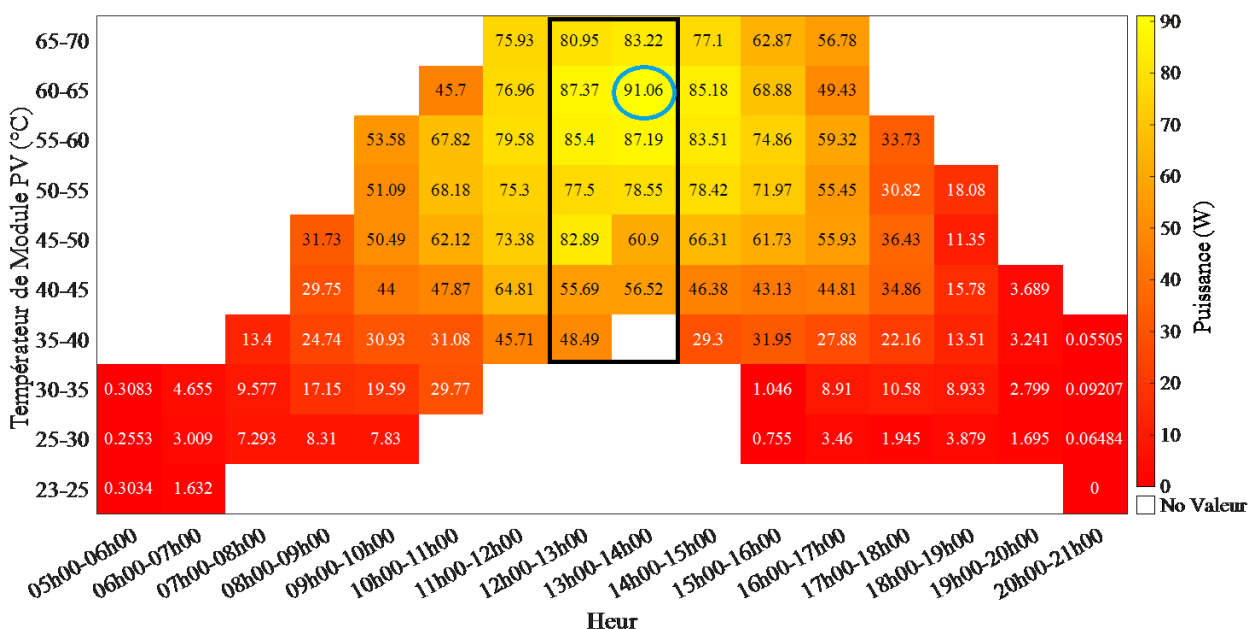


Figure II.6 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la température (T) correspondant au module PV(B).

II.2.2 Données de vitesse de vent

Module PV(A)

La figure II.7 représente le heatmap indiquant le changement de puissance en fonction de la vitesse de vent (m/s) et du temps (heure) de 5h à 21h pour une durée d'un mois relatif au module PV(A). D'après cette figure, on remarque que les valeurs de puissance les plus importantes sont atteintes pour une vitesse de vent comprise entre 4 et 7 m/s sur une plage horaire [12h ; 14h] et atteignant comme valeur maximale 116,4W c'est-à-dire un rendement de 11,7%.

Mais pour des vitesses de vent de valeurs inférieures comprises dans le domaine [0m/s ; 4m/s] il n'y a aucun effet notable sur la puissance produite et le rendement du module varie de 9.3% à 9,9%.

L'origine des valeurs de puissance intéressantes relatives à l'intervalle de vitesse de vent [4m/s ; 7m/s] est le rôle refroidisseur que joue le vent sur les cellules PV puisque les

Chapitre II : Résultats et Discussion

échanges convectifs sont favorisés, et, par conséquent, la température du module diminue ce qui augmente de son efficacité. Pour les valeurs de vitesses de vent inférieures, cette variable climatique ne constitue plus un facteur d'aération pour le module PV et l'énergie produite par les cellules PV ne dépend que des paramètres habituels d'éclairement solaire, de température, d'humidité et la nature des cellules elles-mêmes[68, 79].

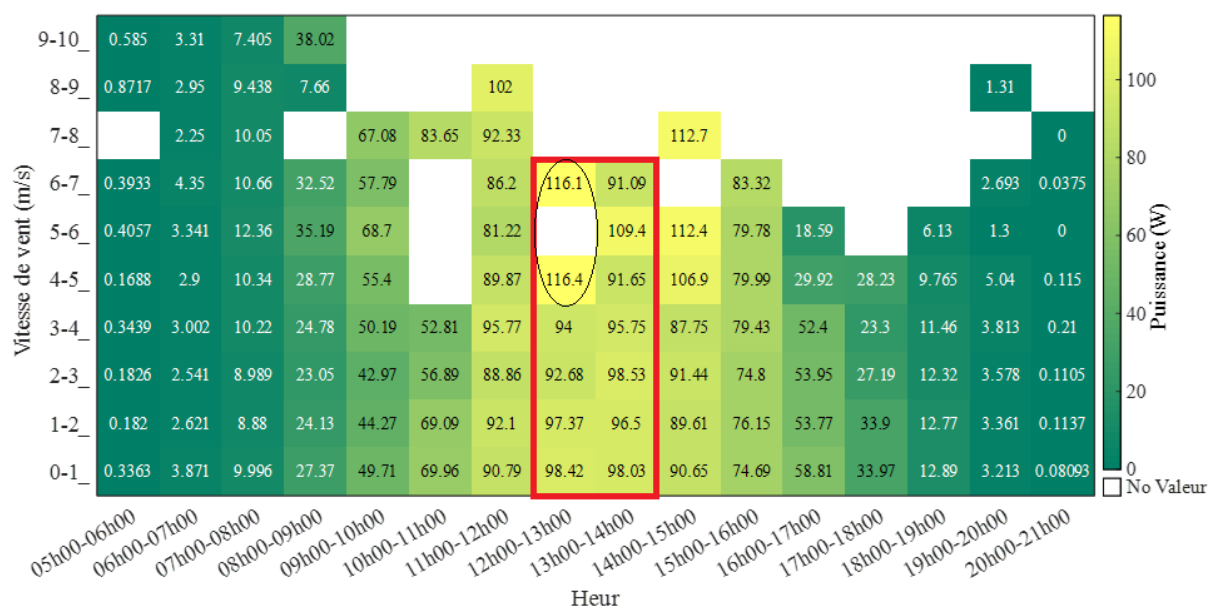


Figure II.7 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la vitesse de vent (m/s) correspondant au module PV(A).

Module PV(B) :

La figure II.8 représente le heatmap indiquant le changement de puissance en fonction du temps et de la vitesse du vent de 5h à 21h pour une durée d'un mois relatif au module PV(B). On constate concernant cette figure que le domaine de vitesse de vent présentant des valeurs de puissance intéressantes dont la valeur maximale est de 101,6W correspondant à un rendement de 10.2% est le même que celui du PV(A) (Figure II.7), c'est-à-dire [4m/s ; 7m/s]. Sur ce domaine l'impact positif (refroidisseur) du vent est fortement présent. Mais pour une baisse de vitesse de vent inférieur à 4m/s la puissance chute directement atteignant une valeur de 75,64W correspondant à un rendement de 7,6%.

L'effet compensateur que présente le vent affecte plus le module PV(B) que le module PV(A) puisque la hausse des valeurs de puissance correspondant à la hausse des valeurs de vitesse de vent est plus importante pour le module PV(B). Ceci est dû au phénomène de surchauffe que subit plus le module PV(B) non nettoyé que le vent arrive à compenser.

Chapitre II : Résultats et Discussion

Concernant l'impact négatif du vent (disperseur de poussière sur la surface du module PV), celui-ci n'a pas été remarqué.

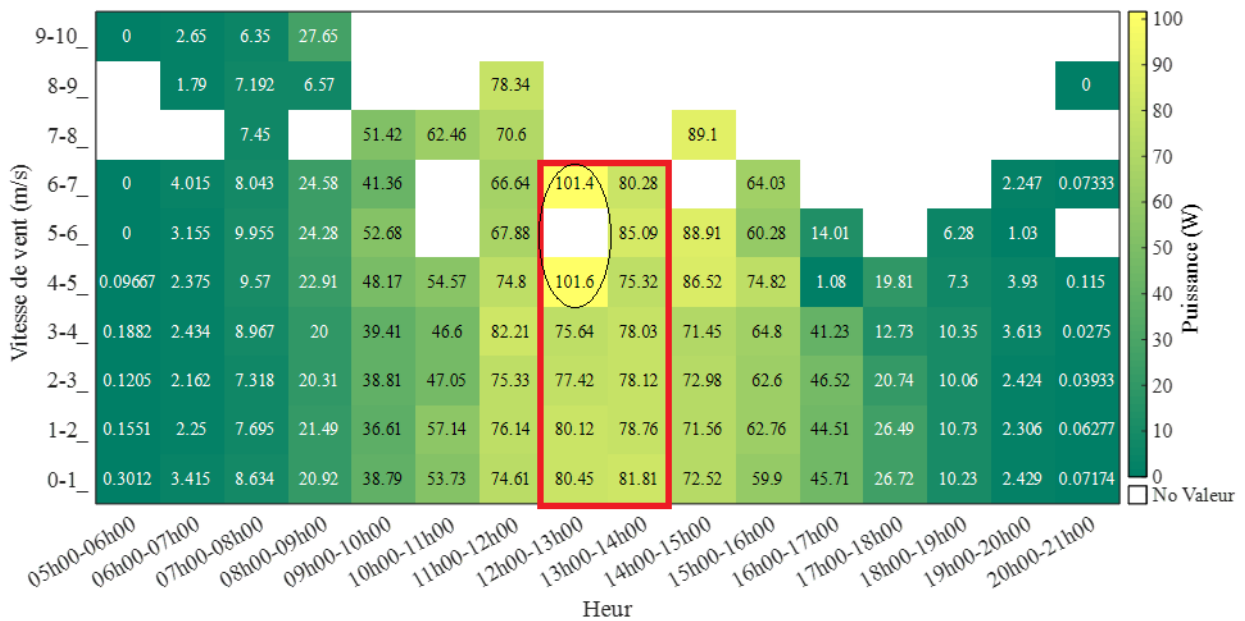


Figure II .8 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et de la vitesse de vent (m/s) correspondant au module PV(B).

II.2.3 Données d'humidité

Module PV(A)

La figure II.9 représente le heatmap indiquant le changement de puissance en fonction du temps et du taux d'humidité de 5h à 21h pour une durée d'un mois relatif au module PV(A). Nous remarquons que la plus grande valeur de puissance sur l'intervalle de temps [12h ; 14h] vaut 115,3W présentant ainsi un rendement de 11,5%. Il est notable que pour de bas taux d'humidité inférieur à 55% les valeurs de puissance sont importantes variant de 90,98 à 115,3 W. Mais plus le taux d'humidité augmente, plus les valeurs de puissance diminuent atteignant même une valeur minimale de 59,74 W représentant une valeur très faible de rendement de 6% correspondant à une perte de 5.5%. A noter que l'ensemble des pertes de rendement calculées sont calculées par rapport au rendement maximal atteint par le module correspondant dans le cas de figure correspondant.

Chapitre II : Résultats et Discussion

Cette diminution de puissance revient au manque de rayonnement atteignant le module PV due principalement à l'effet de la vapeur d'eau dans l'atmosphère [77].

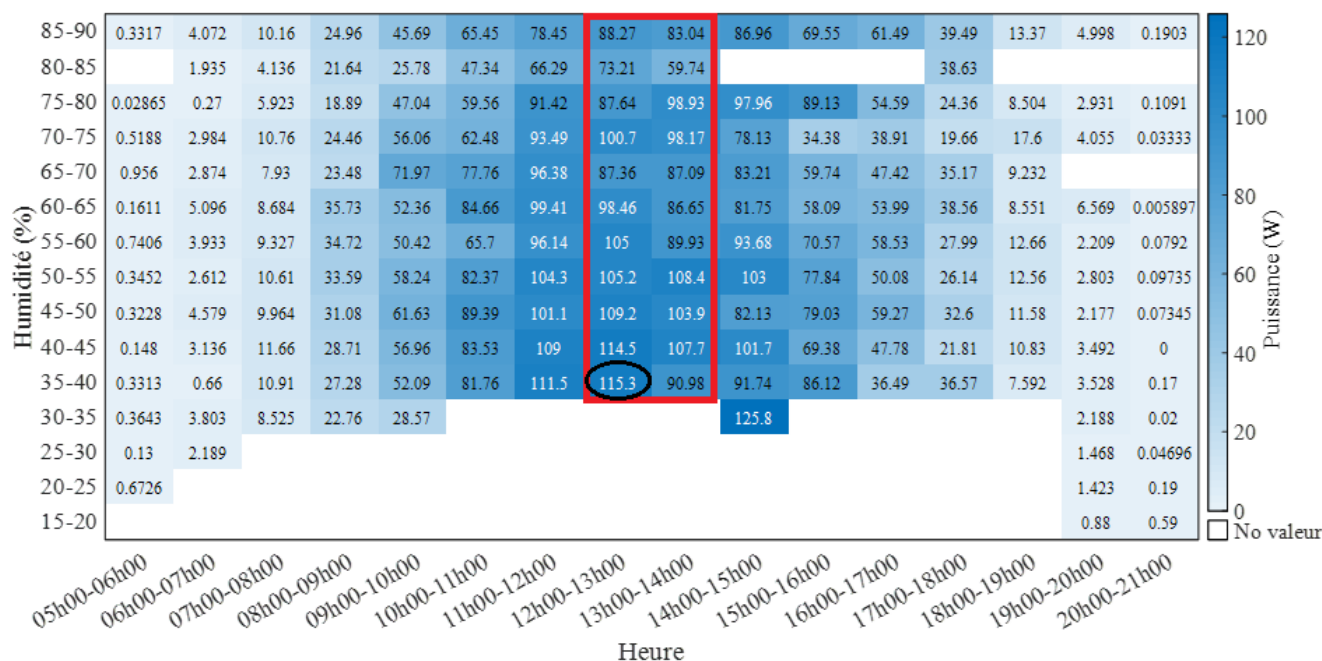


Figure II.9 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et du taux d'humidité (%) correspondant au module PV(A).

Module PV(B)

La figure II.10 représente le heatmap indiquant le changement de puissance en fonction du temps et du taux d'humidité de 5h à 21h pour une durée d'un mois relatif au module PV(B). Nous remarquons que la plus grande valeur de puissance sur l'intervalle de temps [12h ; 14h] vaut 91.78 W présentant ainsi un rendement maximal de 9,2% atteint pour un taux d'humidité compris entre 40 et 45%, ce rendement est inférieur à celui correspondant au module PV(A) sur la même plage horaire. Nous remarquons aussi que plus le taux d'humidité augmente, plus les valeurs de puissance diminuent jusqu'à atteindre une valeur minimale de 65,47 W atteinte pour une humidité comprise entre 85% et 90% représentant ainsi un rendement de 6,6% correspondant à une perte de 2.6% par rapport à la valeur maximale de puissance atteinte.

L'ensemble des valeurs de puissance délivrées par le module PV(B) sont inférieures par rapport au module PV(A), ceci est dû à l'accumulation de poussière sur le module PV(B) qui avec l'augmentation du taux d'humidité empire les performances du module PV, puisque des dépôts solides se forment empêchant les rayonnements solaires de bien atteindre la surface du module. Ceci impacte de manière directe le rendement énergétique [34,35].

Chapitre II : Résultats et Discussion

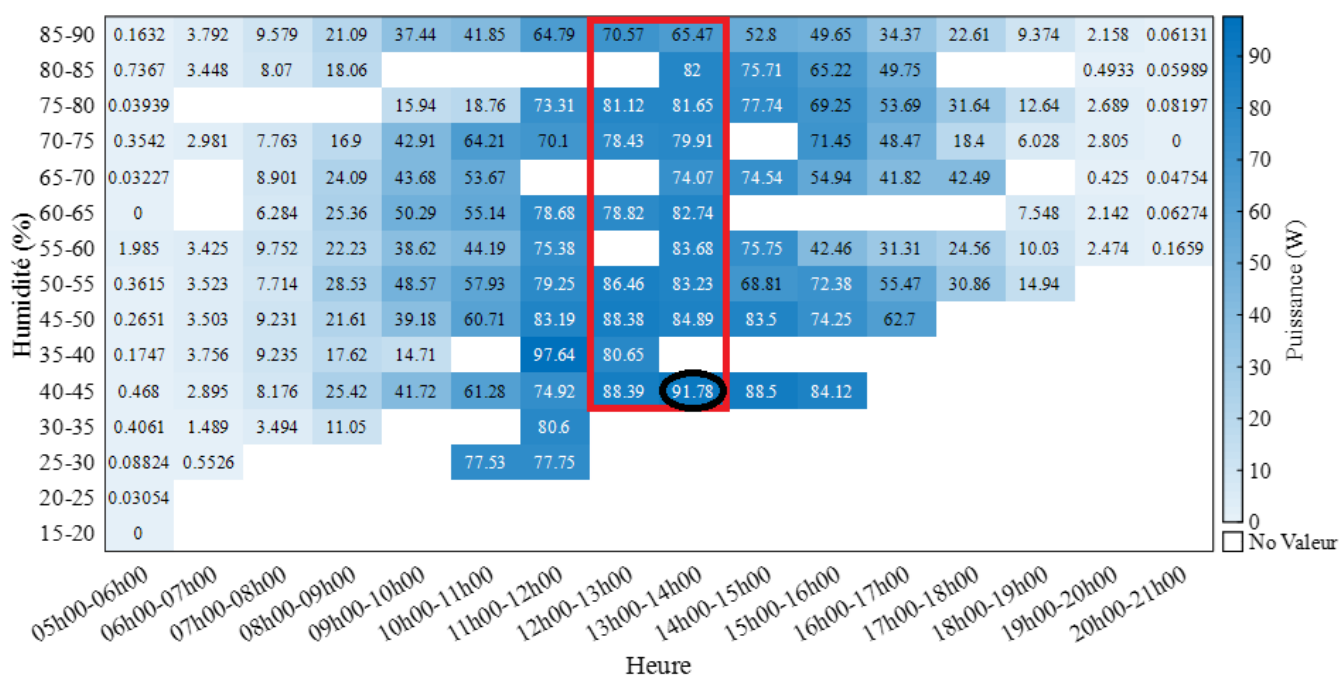


Figure II.10 : Moyenne de puissance maximale obtenue en fonction du temps (heure) et du taux d'humidité (%) correspondant au module PV(B).

Tableau II.1 : Récapitulatif des valeurs maximales de moyenne de puissances et ceux des rendements correspondants obtenus pour chacun des deux modules PV.

Paramètre	Température	Vent	Humidité
Météorologique	(Fig II.2 et II.3)	(Fig II.4 et II.5)	(Fig II.6 et II.7)
Puissance max PV(A)	104,9W	116.4W	115.3W
Rendement PV(A)	10,5%	11.7%	11,5%
Puissance max PV(B)	91.06W	101.6W	91.78W
Rendement PV(B)	9.1%	10.2%	9.2%

Ce tableau représentatif nous permet de faire une analyse comparative claire et de résumer les impacts précédemment citées. Il est clair que les valeurs de puissance moyenne obtenues au cours d'un mois relatives au module PV(A) sont plus intéressantes. Ceci est dû

Chapitre II : Résultats et Discussion

de manière directe à la pollution atmosphérique causant les dépôts de poussière et d'une manière indirecte à la hausse des paramètres de température et d'humidité causant respectivement : la surchauffe du module PV par conduction avec la couche de poussière puisqu'elle présente un bon conducteur thermique et la formation de dépôts solides ralentissant le phénomène PV [34].

Les figures II.11 et II.12 représentent des panneaux solaires PV défectueux ayant été utilisés au niveau du CDER et sur lesquels l'impact des paramètres climatiques (température et humidité) est visuellement observable.

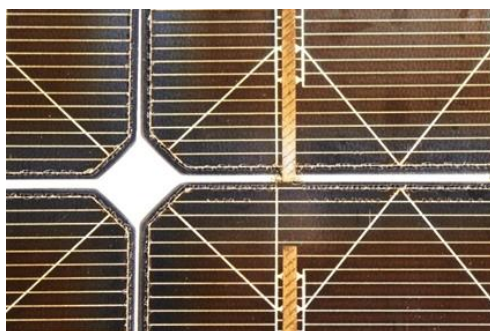


Figure II.11 : Décoloration du module PV due à l'augmentation de sa température.

La figure II.9 représente le phénomène de formation de bulles à l'intérieur du module PV. Ce phénomène est observé uniquement dans l'encapsulant situé au-dessus des cellules PV et à l'intérieur du module, résulte de la dégradation des matériaux produisant ainsi des gaz tels que CO, CO₂ et CH₄ qui se retrouvent piégés dans le module. Ces bulles freinent la dissipation de la chaleur des cellules, augmentent la surchauffe, réduisent la durée de vie du module, diminuent l'absorption du rayonnement solaire et augmentent la réflexion de la lumière solaire influant ainsi négativement sur les performances du module PV [85].

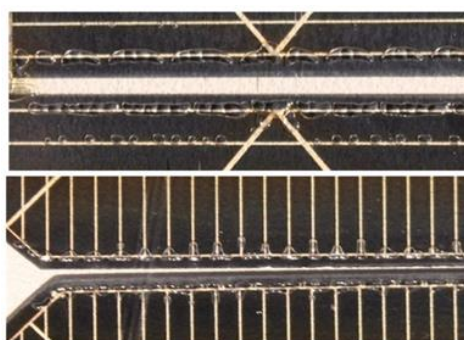


Figure II.12 : Phénomène de formation de bulles à l'intérieur du module PV dû à la hausse de température.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

A l'issue de ce travail, nous avons pu mettre en évidence l'influence des conditions climatiques : température, humidité et vent sur les performances des panneaux solaires PV. L'impact de la hausse de température a été durant notre étude expérimentale négatif pour des températures excédant certains degrés, notamment 45°C pour le module PV(A) nettoyé et 65°C pour le module PV(B) non nettoyé. Ceci a impacté négativement sur les performances énergétiques des deux modules PV. Le module PV(B) (non nettoyé) atteint une température maximale de 70°C nettement supérieure à celle du module PV(A) qu'est de 55°C. L'effet de la hausse du taux d'humidité a aussi été négatif pour un taux d'humidité excédant les 55% puisque les deux modules PV(A) et PV(B) présentent une perte de rendement atteignant les 5.5% pour l'humidité contre 1% pour la température. Ces valeurs de baisse de rendement sont à peu près les mêmes pour les deux modules PV, mais pour le PV(B) les valeurs de puissances obtenues sont moins intéressantes (atteignant la valeur de puissances minimale de 65.47W) due de manière directe à la présence de la poussière qui aggrave l'impact des paramètres climatiques.

Contrairement aux travaux de recherches scientifiques préalablement citées qui considèrent la température comme l'un des deux facteurs ayant le plus d'influence sur l'efficacité des modules PV [68], l'humidité a eu plus d'influence que la température. Ceci peut être dû au lieu où l'expérience a été effectuée qui est proche de la côte méditerranéenne représentant une zone assez humide.

L'effet compensateur du vent a réellement été visible durant notre étude pour une vitesse moyenne dépassant les 4m/s améliorant ainsi le rendement énergétique des modules PV. Une augmentation de la vitesse du vent s'est accompagnée d'une augmentation de rendement énergétique de 2.6% à 2.4% pour les deux modules PV, bien que les puissances de sortie du module PV(A) soient plus intéressantes atteignant 116.4W pour un module PV de puissance maximale (sous un rayonnement de 1000W/m² et une température de 25°C) de 150W.

L'impact du changement climatique sur le rendement énergétique des panneaux solaires PV est négatif. D'abord, puisque les discussions précédentes accompagnant les résultats expérimentaux de notre étude appuyés par des travaux de recherches mondiaux indiquent bien que l'impact des hausses de température et d'humidité (excédant certaines valeurs) sur le rendement énergétique des panneaux PV est négatif. Aussi, car les prévisions climatiques nous promettent une hausse de température qui atteindra les 3°C en Algérie en 2100 [21]

provoquant de manière directe une hausse du taux d'humidité dans l'atmosphère [10]. Le réchauffement de la planète n'est donc pas le seul aspect pertinent du changement climatique qui affectera le rendement énergétique. Les modifications de l'ensoleillement à travers la hausse de l'humidité affecteront considérablement la quantité de lumière qui atteint un panneau, représentant ainsi un effet immédiat. Néanmoins, l'effet compensateur du vent sera fort probablement présent puisque les prévisions du GIEC sur les variations de la vitesse moyenne du vent (en m/s) pour l'année 2100 assurent que la vitesse du vent en Algérie variera de 4 à 5m/s [21]. Ceci est avantageux mais ne suffira probablement pas pour compenser l'effet des hausses de température et d'humidité prédites. Quant à l'effet négatif disperseur du vent, il sera fort probablement absent pour ces vitesses moyennes.

Il a aussi été clairement notable durant notre étude que la poussière déposée sur les panneaux PV aggrave l'impact négatif de la hausse des paramètres climatique de température et d'humidité. La mise en place de techniques de nettoyage continu tel que les systèmes d'auto-nettoyage des panneaux solaires PV à travers de robot nettoyeur pourrait aider à alléger l'impact négatif préalablement cité [86].

L'impact du changement climatique représente une contrainte dans l'atteinte des objectifs nationaux fixés par l'Algérie à travers son PNC, comprenant : le développement des énergies renouvelables hors réseau avec une capacité de production de 500 MW d'ici 2024 et 1000 MW d'ici 2030 [26]. Faut-il baisser les bras face à un problème aussi épineux ? Non, car toutes ces prévisions ne tiennent pas compte des possibles améliorations technologiques. Il serait judicieux pour l'atteinte des objectifs fixés de se tourner vers d'autres technologies de cellules PV plus résistantes aux climats extrêmes tels que les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin qui ont tendance à être moins affectées par les hautes températures [40, 52,59]. L'utilisation de panneau solaire de type bifacial pourrait aussi être une solution intéressante à ce type de problème, puisque d'après une étude effectuée au Qatar ce type de panneau PV est meilleur que le PV mono-facial en termes d'impact de changement climatique. Il offre aussi un meilleur rendement énergétique 30 % supérieur à celui du PV mono-facial [87] puisqu'il permet de produire de l'énergie des deux côtés avec possibilité de choix de type de modèle (mono-cristallins ou poly-cristallins) [88]. Mais pour des raisons économiques l'adoption de ces technologies nécessite d'abord la réalisation d'études technico-économiques sur des projets optant pour ces technologies puisque leurs prix restent élevés.

Références bibliographiques

References bibliographies

- [1] SALAHEDDINE BENSALAM. Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires [en ligne]. MAGISTER : Energétique et Mécanique des Fluides. SETIF : UNIVERSITE FERHAT ABBAS, 2011. [consulté le 23/04/2022].
- [2] Ministère de la transition énergétique, République de France. Chiffres clés de l'énergie Édition 2021 [en ligne]. 2021, P23-43. [Consulté le 25/04/2022]. Disponible sur : <<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffrescles-energie-2021/pdf/chiffres-cles-de-l-energie-edition-2021.pdf>>.
- [3] IRENA. FUTURE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC [en ligne]. 2019, P4. [consulté le 23/04/2022]. Disponible sur : https://irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf
- [4] Ian Marius Peters, Tonio Buonassisi. The Impact of Global Warming on Silicon PV Energy Yield in 2100 [en ligne]. 2019. [Consulté le 22/05/2022]. Disponible sur : <https://arxiv.org/abs/1908.00622>
- [5] Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables. Plan national climat [en ligne]. 2019. P 22-28.[consulté le 23/05/2022].Disponible sur :<https://www.me.gov.dz/a/?wpdmpro=plan-national-climat>
- [6] F.T Ahmer, A.B.Baloch, S.G.Al-Ghamdi. Impact of climate change on solar monofacial and bifacial Photovoltaics (PV) potential in Qatar. 2021. [consulté le 25/06/2022].Disponible sur :<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722004449>
- [7] OMM, GIEC, PNUE. COMMUNIQUÉ DE PRESSE sur le Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante. 9 août 2021. P1-2. [Consulté le 17/04/2022]. Disponible sur :https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_fr.pdf
- [8] Mediterranean Experts on Climate and environmental Change. MATE AND ENVIRONMENTAL CHANGE IN THE MEDITERRANEAN BASIN Current situation and risks for the future. Mai 2021. P6. [consulté le 15/05/2022]. Disponible sur : http://www.medecc.org/wp-content/uploads/2021/05/MedECC_MAR1_Front-matter.pdf

Références bibliographiques

- [9] IPCC. Climate change widespread, rapid, and intensifying [en ligne]. [Consulté le 19/05/2022]. Disponible à l'adresse :<https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>
- [10] MET Office Climate Dashboard. Humidity [en ligne]. [Consulté le 19/05/2022]. Disponible sur l'adresse :<https://climate.metoffice.cloud/humidity.html>
- [11] Jean-Marc JANCOVICI. Le réchauffement climatique (le changement climatique) : réponse à quelques questions élémentaires [en ligne]. Disponible sur :<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/40/108/40108843.pdf>
- [12] Aquaportail. Effet de serre: définition, explications [en ligne]. [Consulté le 19/05/2022]. Disponible à l'adresse :<https://www.aquaportail.com/definition-2411-effet-de-serre.html>
- [13] IPCC. IPCC at UNFCCC COP26. [en ligne]. [consulté le 30/04/2022]. Disponible sur :<https://apps.ipcc.ch/outreach/viewevent.php?e=1>
- [14] IPCC. SIXTH ASSESSMENT REPORT Working Group I – The Physical Science Basis. 4 November 2021. [consulté le 05/05/2022]. Disponible sur :
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/11/IPCCWG1ar6slides_SBSTA_MASTER.pdf
- [15] UNICEF France. La lutte contre le réchauffement climatique. P3. [consulté le 04/05/2022]. Disponible à l'adresse :https://www.unicef.fr/sites/default/files/fiche_thematique_changement_climatique_0.pdf
- [16] GreenMatters, The IPCC Climate Change Report Sheds Light on How Wind Patterns Could Change Drastically [en ligne]. [consulté le 07/05/2022]. Disponible à l'adresse :<https://www.greenmatters.com/p/climate-change-wind-patterns>
- [17] EnergyMonitor, Weekly data: Changes in wind speed caused by climate change may affect future wind power output [en ligne]. [consulté le 05/05/2022]. Disponible à l'adresse :<https://www.energymonitor.ai/finance/risk-management/weekly-data-changes-in-wind-speed-caused-by-climate-change-may-affect-future-wind-power-output>
- [18] UN environment programme, Mediterranean action plan, Plan Bleu. 2020. State of the Environment and Development in the Mediterranean. P62. [consulté le 10/05/2022]. Disponible sur :https://planbleu.org/wp-content/uploads/2021/04/SoED_full-report.pdf
- [19] IPCC WGII. Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region [en ligne]. [consulté le 09/05/2022]. Disponible sur :https://planbleu.org/wpcontent/uploads/2021/04/SoED_full-report.pdf

Références bibliographiques

- [20] I.Koletsis, V.Kotroni, K.Lagouvardos, T.Soukissian. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes [en ligne]. 13 January 2016. P1-6.[consulté le 04/05/2022]. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116001106>
- [21] IPCC. IPCC WGI Interactive Atlas, Regional Information [en ligne]. [Consulté le 19/05/2022]. [consulté le 08/05/2022]. Disponible sur l'adresse : <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- [22] Ministère De l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Plan d'Action et Stratégie Nationale sur la Biodiversité [en ligne]. 2003. P13.[consulté le 13/05/2022]. Disponible sur : <https://www.cbd.int/doc/world/dz/dz-nbsap-v2-fr.pdf>
- [23] Mohamed Chabane. Comment concilier changement climatique et développement agricole en Algérie [en ligne]. 2012. P78. [consulté le 12/05/2022]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/273184713_Comment_concilier_changement_climatique_et_developpement_agricole_en_Algerie
- [24] UNESCO. Changements climatiques enjeux et perspectives au Maghreb [en ligne]. 2010. [consulté le 10/05/2022]. Disponible sur : <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000215511>
- [25] Personnel de Caritas Algérie. 2011, 20 Juillet. Changement climatique en Algérie. Caritas [en ligne]. [consulté le 18/05/2022]. Disponible sur : <https://www.caritas.org/2011/07/changementclimatiqueenalgerie/?lang=fr#:~:text=D'autres%20aspects%20des%20cons%C3%A9quences,disparition%20des%20plages%20%3A%20par%20ex>
- [26] Legal Doctrine. Emission de gaz à effet de serre, pollution : quel engagement juridique pour l'Algérie [en ligne] [Consulté le 16/04/2022]. Disponible sur : <https://legal-doctrine.com/edition/Emission-de-gaz-%C3%A0-effet-de-serre-pollution-quel-engagement-juridique-pour-lAlg%C3%A9rie/>
- [27] Ministère de l'Energie. Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie [en ligne]. Janvier 2016. [Consulté le 17/04/2022]. P3. Disponible à l'adresse : https://rise.esmap.org/data/files/library/algeria/RE/RE%2013.3%20Plaquette_PNEREE_2016_Fr.pdf
- [28] MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT. Communication nationale initiale sur l'élaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques [en ligne]. Mars

Références bibliographiques

2001. P11, 21. [consulté le 28/05/2022]. Disponible sur : <https://unfccc.int/resource/docs/natc/algnc1.pdf>
- [29] République Française, Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement. Étude sur le potentiel de développement de l'énergie solaire et géothermique en Basse-Normandie [en ligne]. Aout 2011. P1. [consulté le 13/04/2022]. Disponible sur : http://www.etudesnormandie.fr/upload/crbn_cat/1/453_1627_ET73.pdf
- [30] S. Jerez, I. Tobin, R. Vautard, J. P. Montavez, J. M. Lopez-Romero, F. Thais, B. Bartok, O. B. Christensen, A. Colette, M. Deque, G. Nikulin, S. Kotlarski, E. V. Meijgaard, C. Teichmann & M. Wild. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. 11 Dec 2015. [consulté le 01/05/2022]. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/ncomms10014.pdf>
- [31] M. Tidjani, N. Mansouri. A sustainable energy model for Algeria in 2030: the study of Electro-mobility in the transport sector. Mémoire : Chemical engineering. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2020, [consulté le 21/04/2022].
- [32] Bureau Veritas, GIZ. Efficacité Énergétique [en ligne]. P11. [Consulté le 20/04/2022]. Disponible sur : https://energypedia.info/images/e/e6/Efficacit%C3%A9_Energ%C3%A9tique.pdf.
- [33] TNA. Évaluation des Besoins en Technologies et Plans d'Actions Technologiques pour l'Atténuation des Changements Climatiques [en ligne], P1. [Consulté le 25/04/2022]. Disponible sur : https://www.ctcn.org/sites/www.ctcn.org/files/UNFCCC_docs/ref10x10_3.pdf.
- [34] A. Patt, S. Pfenninger & J. Lilliestam. Vulnerability of solar energy infrastructure and output to climate change [en ligne]. 2013. [consulté le 24/04/2022]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/258162307_Vulnerability_of_solar_energy_in_frastructure_and_output_to_climate_change
- [35] A. Al-Bashir, M. Al-Dweri, A. Al-Ghandoor, B. Hammad, W. Al-Kouz. Analysis of Effects of Solar Irradiance, Cell Temperature and Wind Speed on Photovoltaic Systems Performance. 2019, P2. [consulté le 01/05/2022]. Disponible sur : <https://doi.org/10.32479/ijeeep.8591>
- [36] Ministère de la transition énergétique, République de France. Chiffres clés de l'énergie Édition 2021 [en ligne]. 2021, P23-43. [Consulté le 25/04/2022]. Disponible sur : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/editionnumerique/chiffres-cles-energie-2021/pdf/chiffres-cles-de-l-energie-edition-2021.pdf>

Références bibliographiques

- [37] Z.Rahal. Étude, conception et évaluation d'un système de gestion d'énergie destiné à une habitation alimentée par énergie solaire photovoltaïque. Mémoire : Automatique. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2020.[consulté le 13/04/2022].
- [38] Misitia Ravaloson. Énergies fossiles : définition, utilisation, impact et épuisement [en ligne]. [Consulté le 25/04/2022]. Disponible à l'adresse : <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/energies-fossiles>
- [39] Raphaël Claustre, Marc Jedliczka, Meike Fink. énergies renouvelables : en finir avec les idées reçues ! [en ligne]. P1. [Consulté le 26/04/2022]. Disponible sur : <https://cler.org/wp-content/uploads/2017/02/ENR-2015-BAT3-web1.pdf>
- [40] BECHANE LEILA. Etude de l'amélioration des propriétés de matériaux semi-conducteurs pour des applications comme cellules photovoltaïques. Thèse de doctorat : Optique et Mécanique de Précision. Sétif : Université Ferhat Abbas – Sétif, 2022. [consulté le 28/04/2022].
- [41] IRENA. Statuts de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables [en ligne]. P4. [consulté le 01/05/2022]. Disponible sur : [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/AboutIRENA/Statute/Authentic Versions of the Statute French.pdf?la=en&hash=CC9727146C64FB8A5B51F42DE16DEEABB1717C79](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/AboutIRENA/Statute/Authentic%20Versions%20of%20the%20Statute%20French.pdf?la=en&hash=CC9727146C64FB8A5B51F42DE16DEEABB1717C79)
- [42] IRENA. FUTURE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC [en ligne]. 2019, P4. [Consulté le 20/05/2022]. Disponible sur : [https://irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA Future of Solar PV 2019.pdf](https://irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf)
- [43] KHACHATRYAN Knar. Le rôle des énergies renouvelables dans la politique énergétique de l'union européenne [en ligne]. Mémoire. Nice : Centre International de Formation européenne, Institut Européen des Hautes Études Internationales, 2006/2007. [consulté le 26/04/2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.ie-ei.eu/IE-EI/Ressources/file/memoires/2007/MemoireKhachatryan.pdf>
- [44] IRENA. Renewable capacity highlights [en ligne]. 2019, P3. Disponible sur : https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/RE_capacity_highlights_2019.pdf?la=en&hash=BA9D38354390B001DC0CC9BE03EEE559C280013F
- [45] Trading Economics. PRODUCTION DE PÉTROLE BRUT - LISTE DES PAYS [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://fr.tradingeconomics.com/country-list/crude-oil-production>

Références bibliographiques

- [46] Algérie Presse Service. L'Algérie produit 99% de son électricité à partir du gaz naturel [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.aps.dz/economie/91036-1-algerie-produit-99-de-son-electricite-a-partir-du-gaz-naturel>
- [47] S.Raquel Ersoy, J.Terrapon-PfaffP. LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DE L'ALGÉRIE [en ligne]. Mai 2021. P15-19. Disponible sur : <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/algerien/18344-20211004.pdf>
- [48] Khaoui Diffalah. Qu'est-ce qu'agir avec justice à l'égard des générations futures en matière d'énergies renouvelables : comparaison entre la France et l'Algérie [en ligne]. 2021, pp 278. [Consulté le 22/04/2022]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03483489v2>
- [49] B. Flèche - D. Delagnes. Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE [en ligne], Juin 2007, P2. [consulté le 20/04/2022]. Disponible sur : <https://www.docdéveloppementdurable.org/file/Energie/Solairephotovolta%C3%AFque/Energie-Solaire-Photovoltaïque.pdf>
- [50] T.DJELLOUT, S.MAKOUR. Etude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe [en ligne]. Mémoire : Génie électrique. Tizi-Ouzou : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017. [consulté le 13/05/2022].
- [51] Jean Caillaud. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE [en ligne]. [consulté le 02/05/2022]. Disponible : <https://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/spip.php?article309>
- [52] Philippe Guibert. TP Energie Solaire [en ligne]. Paris : Université Pierre et Marie Curie, P4-16. [consulté le 01/05/2022]. Disponiblesur : <https://www.energieenvironnementupmc.fr/userfiles/file/cours/Travauxpratiques/MasterEESolaire.pdf>
- [53] BELAID LALOUNI Sofia. Cours Energie Solaire Photovoltaïque [en ligne]. Bejaia : Université A.MIRA de BEJAIA. 2014/2015, P1-23. [consulté le 06/05/2022]. Disponible sur : http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/st06_lessons_ge-energie_solaire.pdf
- [54] Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. [en ligne] Thèse de doctorat : Physique. Paris : UNIVERSITE PARIS-SUD, 2015. Disponible sur :

Références bibliographiques

- https://tel.archivesouvertes.fr/tel01164783/file/VD2_MAMBRINI_THOMAS_16122014.pdf. [consulté le 01/05/2022].
- [55] Ministère de l'Environnement. Programme national de développement des énergies renouvelables. [consulté le 05/05/2022]. Disponible sur : https://www.me.gov.dz/a/?page_id=2086
- [56] Ministère de l'énergie. Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie [En ligne]. [consulté le 03/05/2022]. Disponible sur : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [57] M.ALI SLIMANE, B.TIGRINE. Etude Théorique et simulation de la centrale photovoltaïque de GHARDAÏA [en ligne]. Mémoire : Electrotechnique. Tizi-Ouzou : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017. [consulté le 23/05/2022].
- [58] [1] PhotoVoltaire. De la lumière à l'électricité [en ligne]. [consulté le 20/05/2022]. Disponible sur : <https://www.photovoltaique.info/fr/info-ou-intox/lenergie-solaire/de-la-lumiere-a-lelectricite/>
- [59] A. Bhatia. Design and Sizing of Solar Photovoltaic Systems [en ligne]. P10-30. [consulté le 20/05/2022]. Disponible sur : <https://www.cedengineering.com/userfiles/Design%20and%20Sizing%20of%20Solar%20Photovoltaic%20Systems%20R2.pdf>
- [60] Ed Franklin. Solar Photovoltaic (PV) System Components. ARIZONA: The University of Arizona, 2018, P2-91. [consulté le 08/05/2022]. Disponible sur : <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1742-2018.pdf>
- [61] Bernard Equer. Reflets de la Physique [en ligne]. 2008, P13-21. [consulté le 28/05/2022]. Disponible sur : www.sfpnet.fr.
- [62] Daniel Lincot. Les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat [en ligne]. P130. [consulté le 23/05/2022]. Disponible sur : https://www.mediachimie.org/sites/default/files/chimie_habitat_127.pdf
- [63] PR.Cabarrocas, N.Naghavi. Photovoltaïque : les filières couches minces [en ligne]. [consulté le 09/05/2022]. Disponible sur : <https://books.openedition.org/editions-cnrs/11061?lang=fr>
- [64] Halo. Panneau solaire transparent à couche mince à base de Tellure de Cadmium [en ligne]. [consulté le 13/05/2022]. Disponible à

Références bibliographiques

- l'adresse : <https://haloeng.com/panneausolairetransparentacouchemincedetellururedacadmiumcdte-article-en-francais/>
- [65] Stéphane POUGHON. Photovoltaïque organique : le solaire photovoltaïque sur-mesure de 3e génération – l'exemple de DisaSolar [en ligne]. P1. [consulté le 23/05/2022]. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1051/phys/20136642>
- [66] HADJAB Moufdi. Développement des Performances d'un Système Photovoltaïque [en ligne]. Mémoire : Electronique. SIDI BEL ABBES : UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES, 2011.[consulté le 01/06/2022].
- [67] Thomas Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. THÈSE DE DOCTORAT : PHYSIQUE. Paris : UNIVERSITE PARIS-SUD, 16 décembre 2014. [consulté le 13/05/2022].
- [68] Emmanuel AMY DE LA BRETEQUE. Etude du Comportement Thermique de Modules Photovoltaïques en Vue de la Prédiction de leur Production Electrique sur Site [en ligne].Thèse de doctorat : Physique, Modélisation et Sciences pour l'Ingénieur. PROVENCE : Institut des Systèmes Thermiques Industriels, 20 octobre 2006. [consulté le [25/04/2022]. Disponible à l'adresse : <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/40/107/40107806.pdf>
- [69] H.Athar, B.Ankit& P.Rupendra. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module [en ligne]. 2017. [consulté le 13/05/2022]. Disponible sur : <https://jrenewables.springeropen.com/articles/10.1186/s40807-017-0043-y>
- [70] Ibrahim NEYA. Etude de l'influence de la température sur les paramètres photovoltaïques dans les conditions réelles de fonctionnement [en ligne]. Mémoire : ELECTRICITE. Burkina Faso : Laboratoire Energie Solaire et Economies d'Energie (LESEE), 2015. [consulté le 30/05/2022]. Disponible sur : http://documentation.2ieedu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2078
- [71] CDER. L'influence des paramètres climatiques en Algérie sur les performances des systèmes photovoltaïques. [consulté le 28/05/2022]. Disponible sur : https://www.cder.dz/vlib/PNRE/pdf/PNRE_019.pdf
- [72] Abu Bakar Khan. Effect of Temperature and Wind Speed on Efficiency of PV Module [en ligne]. 2020, P3-13. [consulté le 28/05/2022]. Disponible sur : [10.13140/RG.2.2.28345.93282](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28345.93282)

Références bibliographiques

- [73] Miqdam T. Chaichan, Hussein A. Kazem, Ali H.A. Al-Waeli and Kamaruzzaman Sopian. The effect of dust components and contaminants on the performance of photovoltaic for the four regions in Iraq: a practical study [en ligne]. 2020. [consulté le 27/05/2022]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/rees/2019009>
- [74] Y.Sun, G.Szűcs and R. Brandt. Solar PV output prediction from video streams using convolutional neural networks [en ligne]. 2018. [consulté le 29/05/2022]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1039/C7EE03420B>
- [75] A.Bonkaney, S.Madougou and R.Adamou. Impacts of Cloud Cover and Dust on the Performance of Photovoltaic Module in Niamey [en ligne]. 2017. [consulté le 20/05/2022]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>
- [76] J. A. Amusan, E.B.Otokunefor. The Effect of Cloud on the Output Performance of a Solar Module [en ligne]. 2019. [consulté le 26/05/2022]. Disponible sur : <https://www.semanticscholar.org/paper/TheEffectofShadowontheOutputPerformanceofAmusanOtokunefor/a6ab24aa05fdc5a09356bef93a5faa3816cd6b5e>
- [77] Gwandu, B.A.L., and Creasey, D.J. Humidity: A factor in the appropriate positioning of a photovoltaic power station [en ligne]. 1995, P1. [consulté le 27/05/2022]. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00073-S](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00073-S)
- [78] R.Hamdi1, S.A.Hafad, H.A.Kazem, M.T.Chaichan. Humidity impact on photovoltaic cells performance: A review [en ligne]. 2018. [consulté le 30/05/2022]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/profile/SanaaAbdulhadi/publication/329425029_Humidity_impact_on_photovoltaic_cells_performance_A_review/links/5c0cd62a299bf139c749cb1/Humidity-impact-on-photovoltaic-cells-performance-A-review.pdf
- [79] Zouaoui Hayet. Impact des conditions météorologiques sur le rendement d'un panneau solaire PV [en ligne]. Mémoire : physique appliquée. Oum el Bouaghi : Université Larbi ben M'hidi Oum el Bouaghi, 2020. [consulté le 13/05/2022]. Disponible sur : <http://bib.univoeb.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/10300/1/MEMOIRE%20FINAL%20PH.pdf>
- [80] D.Waterworth, A.Armstrong. Southerly winds increase the electricity generated by solar photovoltaic systems [en ligne]. 2020. [consulté le 25/06/2022]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.085>
- [81] Miqdam T Chaichan. Effect of Humidity on Photovoltaic Performance Based on Experimental Study [en ligne]. 2015, P1. [consulté le 13/06/2022]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/profile/MiqdamChaichan/publication/289546072_Effect_o

Références bibliographiques

- [f_humidity_on_photovoltaic_performance_based_on_experimental_study/links/5697d5bb08ae1c427905253b/Effect-of-humidity-on-photovoltaic-performance-based-on-experimental-study.pdf](#)
- [82] I.M.Peters, T.Buonassisi. The Impact of Global Warming on Silicon PV Energy Yield in 2100 [en ligne]. 2020. [consulté le 01/06/2022]. Disponible sur : <https://sci-hub.se/10.1109/pvsc40753.2019.8980515>
- [83] N. Belhaouas, F. Mehareb, E. Kouadri-Boudjelthia, H. Assem, S. Bensalem, F. Hadjrioua, A. Aissaoui, H. Hafdaoui, A. Chahtou, K. Bakria, D. Saheb-Koussa. The performance of solar PV modules with two glass types after 11 years of outdoor exposure under the mediterranean climatic conditions [en ligne]. 2021. [consulté le 03/06/2022]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/profile/Nasreddine-Belhaouas>
- [84] Weather Atlas. Climate and monthly weather forecast Ben Aknoun, Algeria [en ligne]. [consulté le 05/06/2022]. Disponible sur l'adresse : <https://www.weather-atlas.com/en/algeria/ben-aknoun-climate#temper>
- [85] E.Kouadri-Boudjelthia, F.Chekired, N.Belhaouas, Z.Smara, F.Mehareb. Bubbles formation on the photovoltaic cells fingers: Visual inspection of 30-year-old modules [en ligne]. 2021. [Consulté le 05/06/2022]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.077>
- [86] Cleaner. HyCleaner Solar facelift [en ligne]. [consulté le 02/06/2022] Disponible sur : https://hycleaner.eu/fr/produkte/hycleanerblacksolar/?gclid=Cj0KCQjwzLCVBhD3ARIsAPKYTcQwbYXH1rv1LvK25itR8fYeqKfEWySZwSgtiziLHzsIPx4b5grtg0aAhIkEALw_wcB
- [87] F.Tahir, A.B.Baloch, S.G.Al-Ghamdi. Impact of climate change on solar monofacial and bifacial Photovoltaics (PV) potential in Qatar [en ligne]. 2021. [consulté le 01/06/2022]. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722004449>
- [88] Solar Power World. What are bifacial solar modules? [en ligne]. [consulté le 06/06/2022]. Disponible sur : <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/04/what-are-bifacial-solar-modules/>