

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de génie Electrique et Informatique

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Microélectronique

Mémoire de Fin d'Etude de Master Acadimique

Thème :

Etude et simulation de la dégradation des panneaux solaires au cours du temps en intégrant les facteurs environnementaux et réalisation d'un système de surveillance et nettoyage automatique d'un panneau solaire

Présenté par :

BOUBCHIR Koceila

BOUDIA Dayef

Dirigé par :

Mme BOUARABA Fazia

Mme KOUSSA Djohra

Mémoire soutenu publiquement le 29/06/2025 devant le jury composé de :

Mme HATTEM Djedjiga professeur UMMTO Présidente

Mme BOUSSOUM Ouiza MCA UMMTO Examinatrice

Mme SAHEB Djohar Maitre de Recherche CDER Co-Promotrice

Mme BOURABA Fazia MCB UMMTO Promotrice

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENT

Avant toute chose, nous rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, pour m'avoir accordé la santé, la patience, la force et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail. Sans Sa volonté, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Madame SAHEB Djohara, directrice de recherche au CDER de Bouzaréah (Centre de Développement des Énergies Renouvelables), pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de ce projet. Son encadrement scientifique et humain a grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Je remercie également ma promotrice universitaire, Madame BOURABA Fazia, pour sa confiance, son suivi attentif et ses orientations éclairées. Sa pédagogie, sa rigueur académique et son soutien constant ont été d'un grand apport à ma formation.

Nous n'oublions pas d'exprimer toute notre gratitude à l'ensemble de l'équipe pédagogique, ainsi qu'au personnel technique et administratif du centre et de mon établissement, pour l'environnement favorable qu'ils ont su créer.

Enfin, je remercie chaleureusement ma famille, mes collègues, mes amis et tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et nous ont soutenu durant ce parcours.

Dayef et Kouciela

Dédicaces

« Le courage ne rugit pas toujours. Parfois, le courage, c'est cette petite voix à la fin de la journée qui dit : "Je recommencerai demain." »

-- Mary Anne Radmacher

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs mois d'efforts, de recherches, de doutes et de persévérance, à toutes les personnes qui ont marqué mon parcours, soutenu mes ambitions et cru en mes capacités, même dans les moments d'incertitude.

- *À mes chers parents, piliers inébranlables de ma vie, je vous adresse toute ma gratitude et mon amour. Vous m'avez transmis les valeurs de travail, de respect et de persévérance*
- *Ma sœur Tania, qui a toujours cru en moi quand je doutais.*
- *Mes tantes Sabiha et Saadia et leurs époux,*
- *Mes oncles Boussad et Belaid et leurs épouses.*
- *Mes cousins et cousines adorés. (Gaya, Erwan, Liame, Léa, Céline, Sam, Meziane, Lamara, Alinia, Lhadî)*
- *À mon binôme, compagnon de route dans cette aventure.*
- *Mes amis Chachnak et Kouciela, Belaid, Inès, Jugurtha, Meziane, Tanina, Syphax, Lyes, Kamel, Céline, Lynda, Cylia, Gaya*

Dayef

Dédicaces

« Celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas ALLAH »

-Le prophète (que la prière d'Allah et son salut soient sur lui)-

- *À la mémoire de ma grand-mère, Tu as quitté ce monde, mais jamais mon cœur. Tu m'as appris la force douce, la foi discrète et la générosité du cœur. Ton amour continue de m'accompagner chaque jour. Aujourd'hui, je t'honore à travers ces Pages, avec tout mon respect et toute ma tendresse.*
- *À mes parents, Merci pour votre amour, vos encouragements et votre confiance. Votre présence a été ma force et ma lumière dans chaque étape de ma vie. Merci pour tout ce que vous m'avez transmis, je vous adresse ici ma gratitude la plus profonde.*
- *À ma famille, Racines solides, branches tendres, vous êtes l'arbre sous lequel j'ai grandi. Je vous dédie chaque ligne, chaque effort, chaque réussite.*
- *À mon enseignante au primaire, vous avez été une étoile dans mon enfance, vous avez écrit les premières lignes de mon histoire, vous avez cru en moi avant que je crois en moi, merci à vous Sayidati.*
- *À mes professeurs du nouveau lycée de BOUDJIMA, à ceux qui, chaque jour allument des étincelles de savoir dans les yeux de leurs élèves, à ceux qui m'ont guidé avec sagesse et passion dans les chemins de l'apprentissage qui sont parfois sinueux, je vous rends hommage dans ces pages, fruits de ce que vous avez semé.*
- *À les profs en université, Je vous adresse ma profonde gratitude pour la qualité de votre enseignement, Ce travail est en partie le fruit de ce que vous m'avez transmis. votre disponibilité, et votre accompagnement tout au long de mon parcours.*
- *À mon binôme, Ce travail aurait été bien plus difficile sans toi. Cette aventure partagée m'a beaucoup appris, et je suis fier de ce que nous avons accompli ensemble. Merci pour tout !*
- *À mes amis, vous avez rendu ce parcours plus léger, et cette réussite plus belle, Merci pour votre présence constante, Votre amitié a été un vrai pilier dans ce parcours.*

Koceila.

Liste d'abréviation

PV Photovoltaïque

MPP Maximum Power Point (Point de puissance maximale)

MPPT Maximum Power Point Tracking (Suivi du point de puissance maximale)

I-V Courant-Tension (Current-Voltage)

P-V Puissance-Tension (Power-Voltage)

Voc Open Circuit Voltage (Tension en circuit ouvert)

Isc Short Circuit Current (Courant de court-circuit)

P_{max} Puissance maximale

R_s Résistance série

R_{sh} Résistance parallèle (shunt)

I₀ Courant de saturation inverse

I_L Courant photogénéré

n Facteur d'idéalité de la diode

G Irradiation solaire (W/m²)

T Température (en °C ou K selon le contexte)

α Coefficient de dégradation (en %/an ou %/°C)

UV Ultraviolet

MATLAB Matrix Laboratory (Logiciel de simulation numérique)

EVA Éthylène-acétate de vinyle (Matériau encapsulant)

P_n Puissance nominale du panneau

RTC Real Time Clock (Horloge temps réel)

DC Direct Current (Courant continu)

LCD Liquid Crystal Display (Écran à cristaux liquides)

I2C Inter-Integrated Circuit (Interface de communication série)

UNO Arduino Uno (Carte de développement à microcontrôleur)

L298N Référence du module de commande de moteurs double pont H

REF Référence (généralement utilisée pour indiquer une source ou une figure)

ISIS Intelligent Schematic Input System (Module de schématisation de Proteus)

MATLAB Matrix Laboratory (Environnement de calcul numérique)

PV Photovoltaïque

I-V Courant-Tension (Current-Voltage)

P-V Puissance-Tension (Power-Voltage)

V_{oc} Tension de circuit ouvert (Open Circuit Voltage)

I_{sc} Courant de court-circuit (Short Circuit Current)

P_{max} Puissance maximale (Maximum Power)

USB Universal Serial Bus

C/C++ Langages de programmation utilisés avec Arduino

Liste des figure

Figure I.1 : Les énergies renouvelables [Ref]	4
Figure I.2 : L'énergie éolienne [Ref]	4
Figure I.3 : L'énergie hydraulique [Ref].....	5
Figure I.4 : la biomasse [Ref].....	6
Figure I.5 : panneaux photovoltaïques	6
Figure I.6 : Structure et diagramme de bande d'une cellule.	7
Figure I.7 : Principe de la cellule solaire.....	8
Figure I.8 : Caractéristiques I(V) d'une cellule solaire.....	9
Figure I.9 : schéma explicatif du branchement série.....	11
Figure I. 10 : caractéristique d'un panneau solaire avec des cellules branchées en série	12
Figure I.11 : schéma explicatif du branchement série.....	12
Figure I.12 : caractéristique du branchement parallèle	12
Figure I.13 : schéma explicatif du montage mixte parallèle /série	13
Figure I.14 : caractéristique du montage mixte.....	13
Figure I.15 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [10]	14
Figure I.16 : effet de température sur les performances des panneaux solaires.....	16
Figure I.17 : effet de l'éclairement sur les performances des panneaux solaires.....	17
Figure I. 18 : module photovoltaïque dégradé	19
Figure I.19 : corrosion d'un panneau photovoltaïque	19
Figure I.21 : image d'un panneau fissuré.....	21
Figure II.22 : Installation photovoltaïque autonome.....	24
Figure II.23 : champ photovoltaïque.....	25
Figure II.24 : Regulateur MPPT	25
Figure II.25 : Dispositif de stockage d'énergie électrique par batterie.....	26

Figure II.25 :convertisseur DC / AC.....	26
Figure II.26 : Évolution des températures moyennes mensuelles à Bouzaréah,.....	29
Figure II.27 : Évolution des températures moyennes mensuelles à BATNA.....	30
Figure II.28 : Évolution des températures moyennes mensuelles à GHARDAIA.....	30
Figure II.29 : Évolution des températures moyennes mensuelles à ADRAR.....	30
Figure II.30 : éclairement moyen à Adrar en 2024.....	32
Figure II.31 : éclairement moyen à BATNA en 2024.	33
Figure II.32 : éclairement moyen à GHARDAIA en 2024.....	33
Figure II.33 : éclairement moyen à Adrar en 2024.....	33
Figure II.34 : variation de l'humidité a bouzaréah en 2024.....	36
Figure II.35 : variation de l'humidité à BATNA en 2024	36
Figure II.36 : variation de l'humidité à GHARDAIA en 2024.....	37
Figure II.37 : Variation de l'humidité a ADRAR en 2024	37
Figure II.38 : logo du logiciel MATLA	44
Figure III. 40 : influence de la température sur la tension du circuit ouvert	48
Figure III.41 : Variation de la puissance Maximale délivrée par le module photovoltaïque en fonction du temps pour différentes valeurs de température.	50
Figure III.42 : Influence de variation de températures sur le point de puissance maximale (MPPT).....	50
Figure III.43 : Influence de l'irradiation sur le courant généré par le module photovoltaïque	51
Figure III .44 : Influence de l'irradiation sur la puissance délivrée par le module photovoltaïque.....	52
Figure III.45 : Variation de la puissance Maximale délivrée par le module photovoltaïque en fonction du temps pour différentes valeurs de l'irradiation solaire.....	53
Figure III.46 : Evolution de la puissance délivrée par un panneau photovoltaïque en fonction du temps, pour différentes valeurs du coefficient de dégradation α	55
Figure III.47 : Evolution de la dégradation des panneaux solaires en Algérie.....	58

Figure IV.48 : carte Arduino UNO [REF].	62
Figure IV.49 : module DS1307 RTC (Real Time Clock) REF.....	63
Figure IV.50 : Moteur DC à courant continu REF.....	63
Figure IV.51 : Driver L298N. REF.....	64
Figure IV.52 : afficheur LCD avec module I2C. REF.....	64
Figure IV.53 : pompe à eau. REF	65
Figure IV.54 : module relai. REF.....	65
Figure IV.55 : schéma de simulation sur ISIS Protues	67
Figure IV. 57 : image du système de nettoyage	70

Sommaire

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

I.1 Introduction.....	3
L'énergie photovoltaïque présente un intérêt particulier pour l'Algérie, vu qu'elle dispose d'un gisement solaire propice au développement de cette forme d'énergie.	3
I.2 Les énergies renouvelables	3
I.2.1 L'énergie éolienne :	4
I.2.2 Energie hydraulique	4
I.2.3 La biomasse	5
I.2.4 L'énergie photovoltaïque	6
I.3 Principe de la cellule solaire	6
I.3.1 Les Paramètres de la cellule solaire	8
I.3.2 Les principales technologies solaires photovoltaïques :	10
I.3.2.1 Technologies de 1 ère génération (silicium mono et polycristallin).....	10
I.3.2.2 Technologies de 2ème génération.....	10
I.3.2.3 Technologies de 3 ^{ème} génération (Les cellules organiques)	10
I.4 Groupement d'un module photovoltaïque	11
I.4.1 Groupement en série	11
I.4.2 Groupement en parallèle	12
I.4.3 Groupement mixte série parallèle.....	12
I.5 Modèle équivalent à une cellule photovoltaïque.....	13
I.6 Les facteurs influençant le rendement d'une cellule photovoltaïque.....	15
I.6.1 Les facteurs industriels	15
I.6.2 Les facteurs environnementaux	16
I.7 Dégradation d'un module photovoltaïque	18
I.7.1 Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïque.....	19
I.8 Conclusion	21

Chapitre II : Modélisation de système et collection des données

II.1. Introduction	23
II.2. Description du système photovoltaïque	23
II.3. Collection des données nécessaires	27
II.3.1. Données climatiques températures moyennes en 2024	28
II.3.2. Éclairement solaire moyen en 2024.....	31
II.3.3. Humidité moyenne en 2024.....	34
II.3.4. Vitesse moyenne du vent en 2024	37
II.4. Modèle mathématique et hypothèse de travail :	39
II.4.1. Modèle I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque	39
II.4.2. Interprétation de l'équation :	39
II.5. Influence de la température sur la formule :	40
II.5.1. Influence sur le courant de saturation (I_0) :	40
II.5.2. Influence sur la tension de sortie :	40
II.5.3. Influence de la tension sur la formule :	41
II.5.4. Influence de l'éclairement :	41
II.5.5. Influence de l'irradiation sur la photo courant :	41
II.6. Modèles Empiriques	42
II.6.1. Modèle de Taux de Dégradation Linéaire (LDM - Linear Degradation Model).....	42
II.7. Outil de développement.....	43
II.7.1. Présentation générale de MATLAB	43
II.7.2. Pourquoi choisir MATLAB ?	44
Conclusion.....	45

Chapitre III : Résultats de simulation et analysé

1. Introduction	46
2. Scénario simulé	46
3. Analyse des résultats de simulation	47
3.1. Influence de la température sur la tension du circuit ouvert (V_{oc})	47
3.2. Influence de la température sur la puissance :	48
3.4. L'influence de l'irradiation sur la puissance délivrée	51

3.5. Influence de l'irradiation sur le point de puissance maximale (MPPT).....	53
3.6.Effet combiné de l'irradiation et de la température sur le point de puissance maximale (MPPT).....	53
4.Évolution de la puissance délivrée par un panneau solaire en fonction du temps, pour différentes valeurs du coefficient de dégradation α	54
5. Analyse critique des résultats	56
6. Analyse Comparative de la Dégradation des Panneaux Solaires en Algérie après 20 Ans d'Exposition Climatique	58

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

IV.1 Introduction :.....	61
IV.2 Présentation du prototype.....	61
IV.3 Les étapes de la réalisation.....	61
IV.3.1 Partie matérielle	61
IV.3.2 Partie logiciel	65
IV.4 Conception du système	67
IV.4.1 Assemblage des composants :.....	69
IV.4.2 Les étapes de simulation	70
IV.5. Tests et validation	70
IV.5.1. Déroulement des tests	71
IV.5.2 Résultats observés	71
IV.6. Conclusion	72
Conclusion générale	73

Références bibliographiques

Chapitre I :
État de l'art sur la production d'électricité
photovoltaïque

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

I.1 Introduction

Dans le but de satisfaire les besoins énergétiques mondiaux qui ne cessent d'augmenter ces dernières décennies sous l'effet de la croissance économique d'une part, et l'évolution des modes de vie des populations d'autre part et parvenir à un développement durable sur ces trois dimensions : économique, sociale et environnementale, les énergies renouvelables apparaissent comme un bon compromis. Ce sont des énergies inépuisables basées sur des sources renouvelables ; biomasse, éolienne, le photovoltaïque, l'hydraulique

L'énergie photovoltaïque présente un intérêt particulier pour l'Algérie, vu qu'elle dispose d'un gisement solaire propice au développement de cette forme d'énergie.

L'objectif de ce premier chapitre est d'introduire les notions de base de l'énergie solaire photovoltaïque, nous présenterons, dans une première partie des généralités sur le système photovoltaïque. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire vu qu'elle est le composant de base des centrales photovoltaïques ainsi que les paramètres qui influencent le rendement de ces dernières. Dans la deuxième partie nous décrivons les mécanismes clés de la dégradation des panneaux photovoltaïques sous l'effet des facteurs environnementaux qui tendent à réduire leurs performances.

I.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont devenues un élément central de la transition énergétique mondiale, visant à réduire notre dépendance aux énergies fossiles et à limiter les impacts environnementaux négatifs, tels que les émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique. En exploitant des sources d'énergie naturellement disponibles et infinies, comme le soleil, le vent ou l'eau, ce qui les rend plus durables à long terme par rapport aux sources conventionnelles.

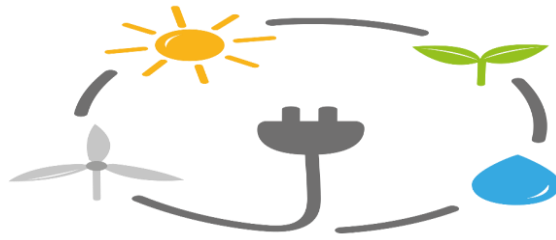


Figure I.1 : Les énergies renouvelables [1]

I.2.1 L'énergie éolienne

C'est l'énergie du vent elle utilise la force de ce dernier (énergie cinétique) pour produire un courant électrique

- **Principe :** le vent entraîne la rotation des pales de l'éolienne qui sont monté sur un axe accouplé à un alternateur qui va transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.



Figure I.2 : L'énergie éolienne [2]

I.2.2 Energie hydraulique

C'est une des énergies les plus anciennes. Elle est générées grâce au mouvement de l'eau qui se produit dans les rivières ou les réservoirs ou elle se trouve

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

- **Principe:** l'eau entraîne une turbine fixée à un axe qui fait tourner à son autre extrémité un aimant qui tourne à l'intérieur d'une bobine pour avoir un courant électrique généré par induction magnétique.



Figure I.3 : L'énergie hydraulique [3].

I.2.3 La biomasse

Cette forme d'énergie utilise des matières organiques tel que le bois, les déchets, les résidus alimentaires pour produire de l'énergie (chaleur, électricité)

- **Principe :** les matières organiques sont introduites dans la chambre de combustion ou en les brûlant, elle dégage de la chaleur, cette dernière est transmise à des tubes remplis d'eau qui tapissent la chaudière. L'eau ainsi chauffée est dirigée vers un ballon dans lequel elle se transforme en vapeur qui fait **tourner** une turbine qui fait tourner à son tour un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en électricité.



Figure I.4 : la biomasse [4].

1.2.4 L'énergie photovoltaïque

C'est une autre façon de produire de l'électricité en utilisant la lumière du soleil

- ❖ **Principe** : La conversion photovoltaïque est assurée grâce aux cellules solaires qui absorbent les ondes lumineuses du soleil et les transforment en un courant électrique.



Figure I.5 : panneaux photovoltaïques [5]

I.3 Principe de la cellule solaire

C'est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est formée par l'association de deux régions dopées d'une manière différente : une région de type (P), une région de type (N).

- **Région P** : elle se fait par introduire des atomes « trivalents » tel que le Bore, qui ont la possibilité d'accepter des électrons à fin d'obtenir un excès des trous, donc région positivement chargée.
- **Région N** : elle est produite par l'introduction des atomes « pentavalents » tel que le phosphore, qui possède des électrons supplémentaires par rapport à l'atome initiale (Si), donc une possibilité de fournir des électrons lorsqu'ils reçoivent une énergie suffisante. La région est négativement chargée.

Lors de l'association de deux régions comme suit : la région N exposée au soleil (partie supérieure), la région P c'est la partie inférieure, les électrons et les trous se déplacent par diffusion, au voisinage de leurs interface, ce qui entraîne une recombinaison entre eux ce qui crée une zone non neutre électriquement d'atomes de Phosphore chargée positivement, et une

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

autre zone d'atomes de Bore chargée négativement. Il résulte ainsi un champ électrique appelé champ électrique interne au sein du semi-conducteur. Ce champ électrique s'accompagne de l'apparition d'une différence de potentiel V_d entre la région P et N créant ainsi la zone de charge d'espace (ZCE).

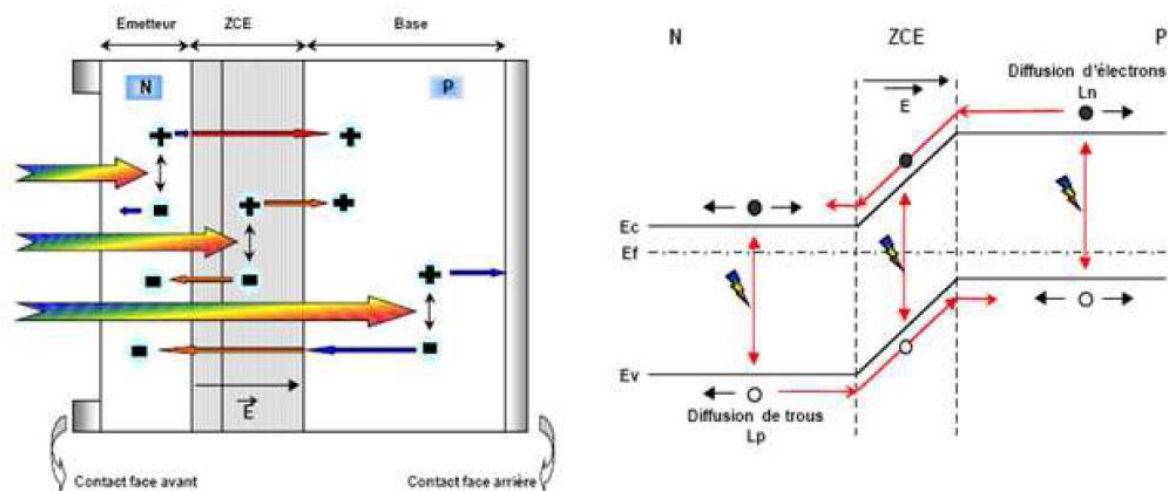


Figure I.6 : Structure et diagramme de bande d'une cellule [6]

Le potentiel de diffusion provoque un champ électrique intrinsèque à la jonction, dans une la zone de charge d'espace (ZCE). À l'équilibre, cette zone désertée de porteurs libres est présente essentiellement dans la région la moins dopée, et sa largeur est généralement inférieure à $1 \mu\text{m}$. On distingue alors dans la diode p/n, deux types de zones : les zones neutres où il n'y a aucun champ électrique, et la ZCE où le champ électrique intrinsèque accélère les porteurs minoritaires vers la zone où ils sont majoritaires.

Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique [7].

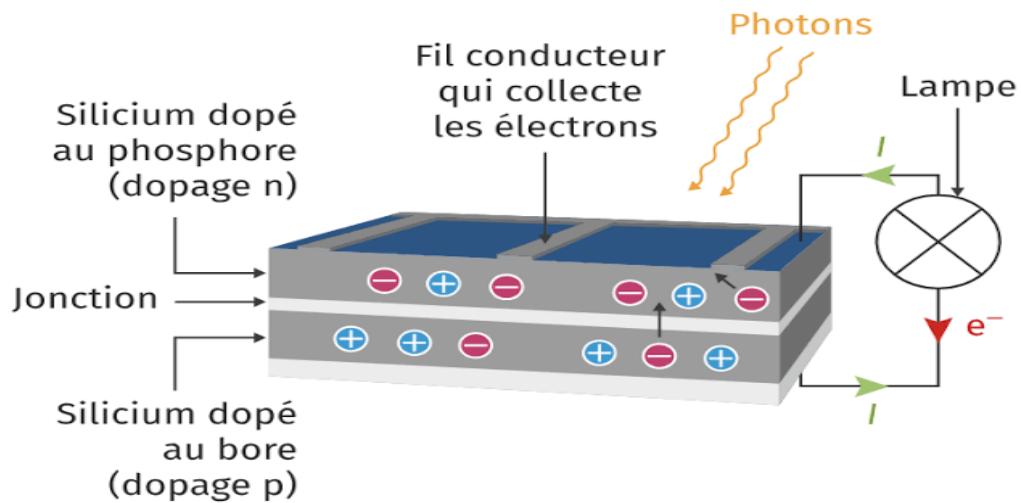


Figure I.7 : Principe de la cellule solaire [7].

I.3.1 Les Paramètres de la cellule solaire

La cellule solaire est caractérisée par plusieurs paramètres tel que :

➤ **Tension de circuit ouvert V_{co}**

La tension de circuit ouvert représente la tension maximale que le panneau solaire peut délivrer lorsqu'il est éclairé mais non connecté à un circuit électrique.

➤ **Courant de court-circuit I_{cc}**

Le courant de court-circuit indique la quantité maximale de courant électrique que le panneau peut fournir sous une intensité lumineuse spécifique sous une tension nulle.

➤ **Puissance électrique**

La puissance électrique détermine la capacité de production en électricité de l'installation.

❖ **Puissance crête:** elle représente la capacité de production d'énergie exprimée en watt crête (Wc), elle correspond à la production maximale délivrée par le panneau photovoltaïque sous les conditions standards ($E=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$, ciel dégagé). Elle est décrite par : $P_c = V_{co} * I_{cc}$

❖ **Puissance maximale :** c'est l'efficacité de production de l'énergie sous des conditions réelles en tenir compte de plusieurs paramètres.

$$P_m = V_m * I_m$$

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

➤ Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme est définie comme étant le rapport entre une puissance maximale fournie par la cellule et la puissance crête du panneau, il est décrit par :

$$FF = P_m / V_{co} * I_{cc}$$

➤ Rendement de la cellule photovoltaïque

C'est le rapport entre la puissance maximale délivré par la cellule et la quantité d'énergie solaire reçue, autrement dit c'est le taux de conversion photoélectron d'un panneau solaire noté (η), il est définit selon l'équation suivante :

$$\eta = P_m / G * S$$

G : irradiation, puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2)

S : surface effectuée d'un panneau photovoltaïque (m^2)

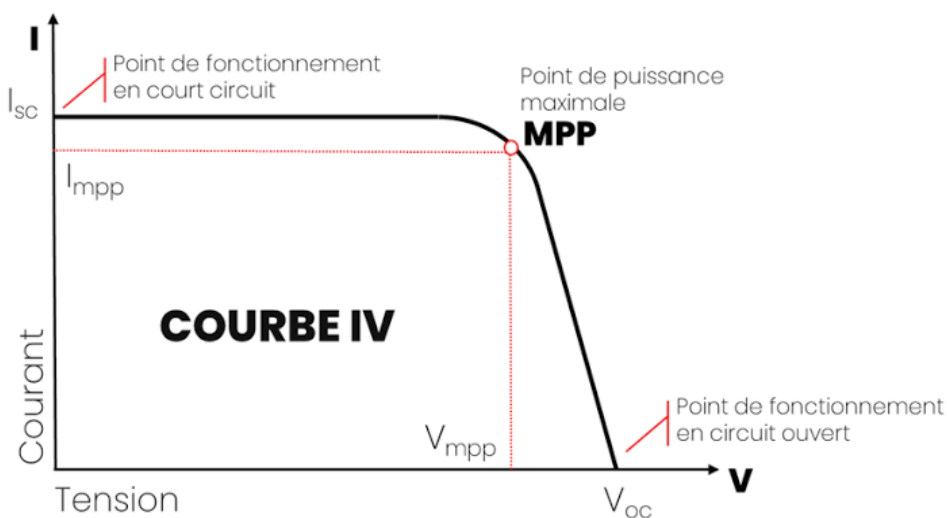


Figure I.8 : Caractéristiques I(V) d'une cellule solaire. Ref

I.3.2 Les principales technologies solaires photovoltaïques :

I.3.2.1 Technologies de 1 ère génération (silicium mono et polycristallin)

Bien que plus ancienne, cette technologie domine depuis toujours le marché en raison de sa technologie bien maîtrisée sa robustesse et de ses performances. Les cellules en silicium cristallin (c-Si) se divisent en deux catégories distinctes : le silicium monocristallin (mc-Si) et le silicium poly-cristallin (pc-Si). La différence entre ces deux types de technologies réside principalement dans le rapport performance/prix des dispositifs. En effet, des rendements supérieurs à 25% ont été obtenus pour les photopiles à base du silicium monocristallin, mais leur prix demeure plus important par rapport aux cellules à base de silicium polycristallin qui fournissent des rendements de l'ordre de 22%. [8]

I.3.2.2 Technologies de 2ème génération

Ces technologies nécessitent peu ou pas de silicium. L'idée principale visée est d'utiliser moins de matière pour la fabrication des cellules solaires en couches minces tout en maintenant l'efficacité des technologies de premières générations. Parmi les matériaux ayant cette caractéristique, nous citons le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe), et le Cuivre/Indium/Sélénium (CIS) ou Cuivre/Indium/Galium/Sélénium (CIGS).

Les filières à couches minces possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19% [8].

I.3.2.3 Technologies de 3ème génération (Les cellules organiques)

Les cellules solaires organiques font aujourd'hui l'objet d'un sujet d'étude très actif. Les progrès de ces technologies sont très rapides. Elles offrent beaucoup d'avantages par rapport aux cellules à base de matériaux inorganiques: la facilité de fabrication et de manipulation, la possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles, et grâce à des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. Ce type de cellules est en phase de recherche et de développement dans les laboratoires, malgré les rendements et les durées de vie inférieures à celles des cellules inorganiques [8].

I.4 Groupement d'un module photovoltaïque

I.4.1 Groupement en série

L'association série d'un certain nombre de cellule ou de panneaux, permet d'augmenter la tension du générateur PV. Les panneaux d'une seule branche sont alors traversés par le même courant, tandis que la tension augmente proportionnellement selon le nombre de cellule mise en série, la caractéristique résultant du branchement série est obtenus par l'addition des tension élémentaire de chaque cellule

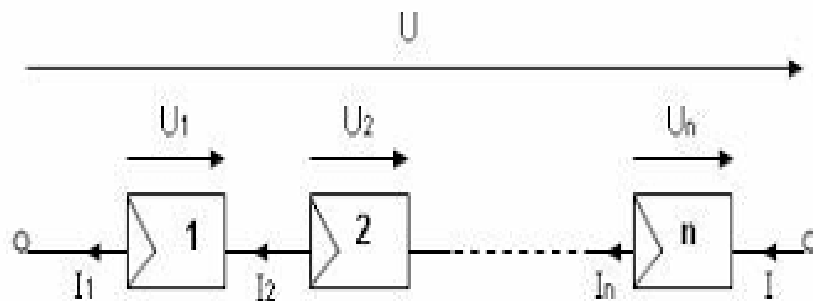


Figure I.9 : schéma explicatif du branchement série

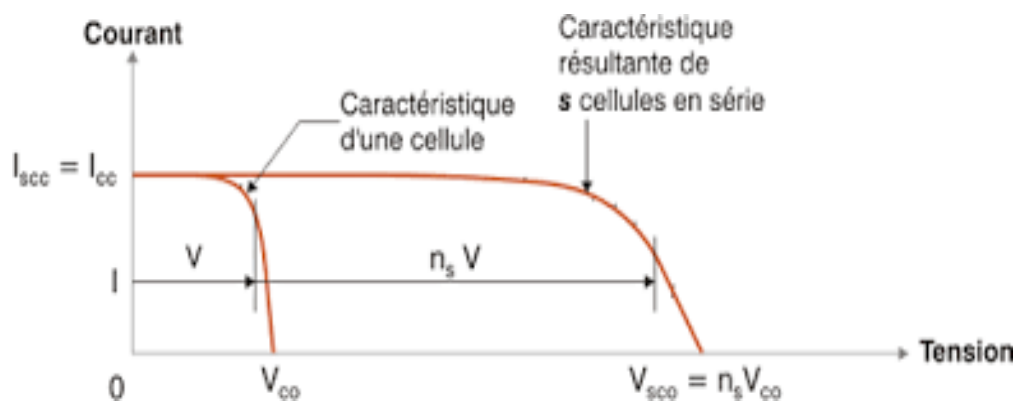


Figure I. 10: caractéristique d'un panneau solaire avec des cellules branchées en série REF

I.4.2 Groupement en parallèle

Le branchement parallèle des cellules solaires consiste à relier les bornes positives de plusieurs cellules entre elle, ainsi que les bornes négatives, ce qui permet d'accroître le courant de sortie tout en maintenant la même tension que celle d'une cellule.

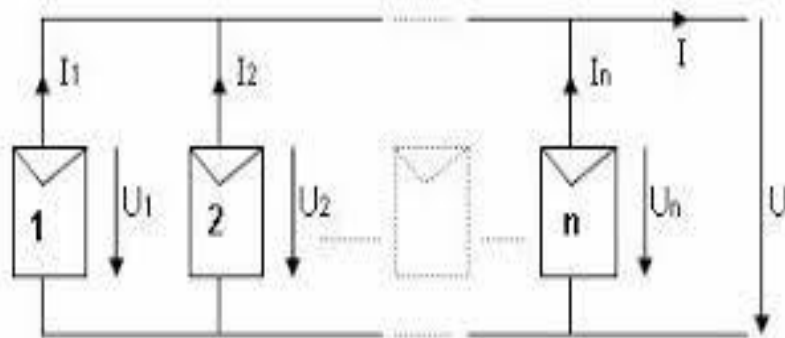


Figure I.11 : schéma explicatif du branchement série REF

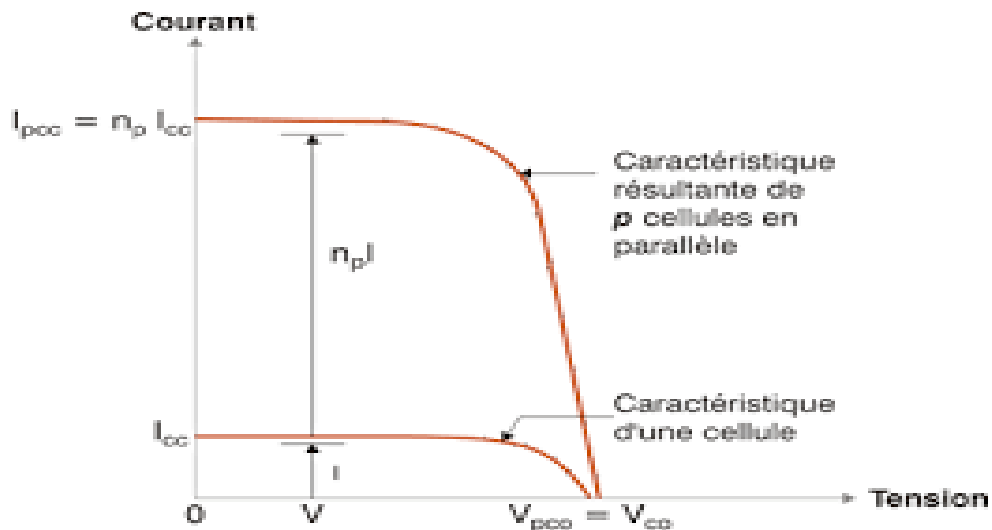


Figure I.12 : caractéristique du branchement parallèle REF

1.4.3 Groupement mixte série parallèle

L'assemblage mixte série parallèle est une solution innovante et adaptable pour les installations solaires, puisque elle combine le bénéfice des deux montages traditionnelles, ce

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

dernier consiste à regrouper les panneaux solaires en plusieurs séries, puis à connecter ces séries ensemble en parallèle, ce branchement permet d'augmenter à la fois la tension et le courant au sein du système, en tirant partie de la somme des tension des montages en série et l'addition des courant des montages en parallèle

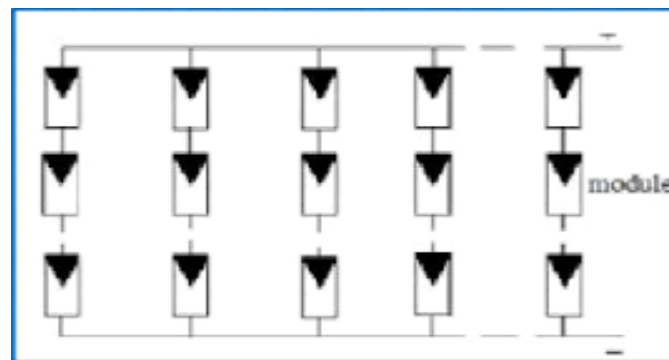


Figure I.13 : schéma explicatif du montage mixte parallèle /série REF

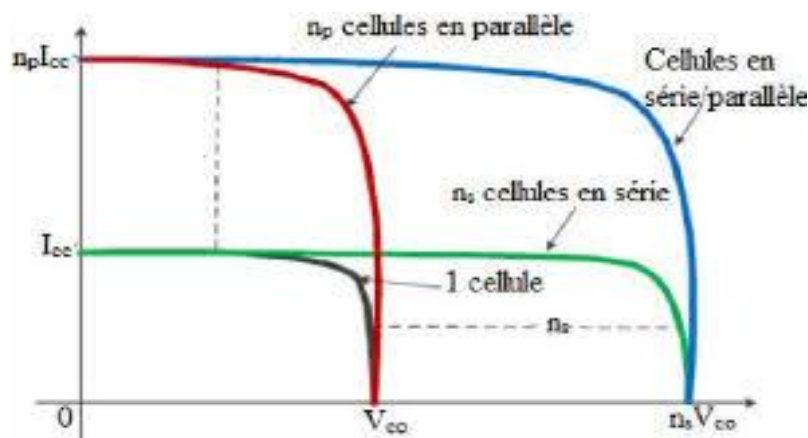


Figure I.14 : caractéristique du montage mixte REF

I.5 Modèle équivalent à une cellule photovoltaïque

La figure (I.15) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{pv} monté en parallèle avec une diode.

Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

- **Résistance série (Rs)** : elle caractérise les pertes à travers les grilles de collecte, et les mauvais contacts ohmiques des cellules. La pente de la courbe $I=f(V)$ au point V_{co} représente l'inverse de la résistance série ($\frac{1}{R_s}$).
- **Résistance shunt (Rsh)** : c'est la résistance parallèle qui représente la résistance de fuite provenant des courants parasites à l'intérieur du matériau. La pente de la courbe $I=f(V)$ au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($\frac{1}{R_{sh}}$).

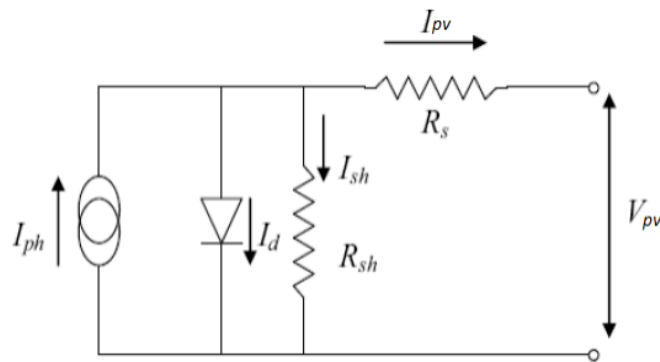


Figure I.15: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV **REF**

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par la formule :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} * R_{ser})}{nKT} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1)$$

Où

I_{sat} : est le courant de saturation,

K : est la constante de Boltzmann ($1,38110^{-23} J/K$),

T : est la température effective des cellules en Kelvin (K),

q : est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19} C$),

n : est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$),

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

IPV : est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

VPV : est la tension aux bornes de cette même cellule,

I_{pv} : est la photo -courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),

R_{shu} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

R_{ser} : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

I_d : le courant qui traverse la diode.

I.6 Les facteurs influençant le rendement d'une cellule photovoltaïque

L.6.1 Les facteurs industriels

- **Le type de silicium** : le silicium utilisé pour la production des panneaux photovoltaïques joue un rôle important dans la production énergétique.
- **La surface** : Plus la surface est grande, plus le nombre de cellules est élevées et plus la production énergétique est importante.[10]
- **L'orientation** : elle est hyper importante, les panneaux doivent être installés de manière à capter le maximum de rayonnement solaire du matin au soir (l'orientation au sud pour les pays au-dessus de l'équateur, et l'orientation au nord pour les pays au-dessous de l'équateur.).[10]
- **Inclinaison** : c'est l'angle suivant lequel les cellules vont recevoir la lumière en fonction de la position de soleil sur l'horizon. Les cellules doivent être positionnées à la perpendiculaire des rayons solaires (90°). En tenir compte les changements de la trajectoire du soleil en fonction des saisons, une inclinaison de 30% est idéale pour bénéficier d'une production d'énergie optimale.[10]

INCLINAISON \ ORIENTATION	0°	30°	60°	90°
EST	93%	90%	78%	55%
SUD - EST	93%	96%	88%	66%
SUD	93%	100%	91%	68%
SUD - OUEST	93%	96%	88%	66%
OUEST	93%	90%	78%	55%

Tableau I.2 : effet de l'inclinaison et l'orientation sur la production énergétique[9]

I.6.2 Les facteurs environnementaux

- La température :** les performances des panneaux solaires sont fortement influencées par la température. Les températures élevées réduisent l'efficacité des panneaux de 0.2% à 0.5% de la production d'énergie pour chaque degré de plus, tandis que les températures basses tendent à l'augmenter. Il est donc essentiel de choisir le panneau adapté au climat donné.[11]

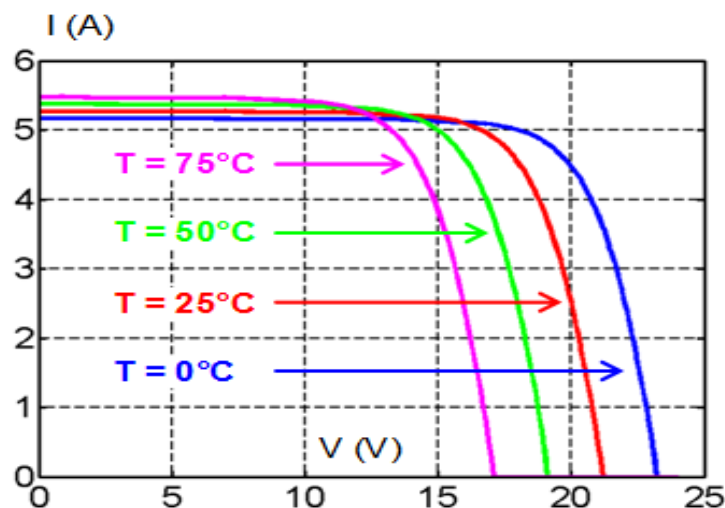


Figure I.16 : effet de température sur les performances des panneaux solaires REF

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

- **Eclairement** : l'éclairement a un impact direct sur la production énergétique d'un panneau solaire. Une augmentation de l'éclairement augmente le courant de court-circuit et diminue la tension à vide ce qui favorise l'augmentation de la puissance maximale délivrée. [12]

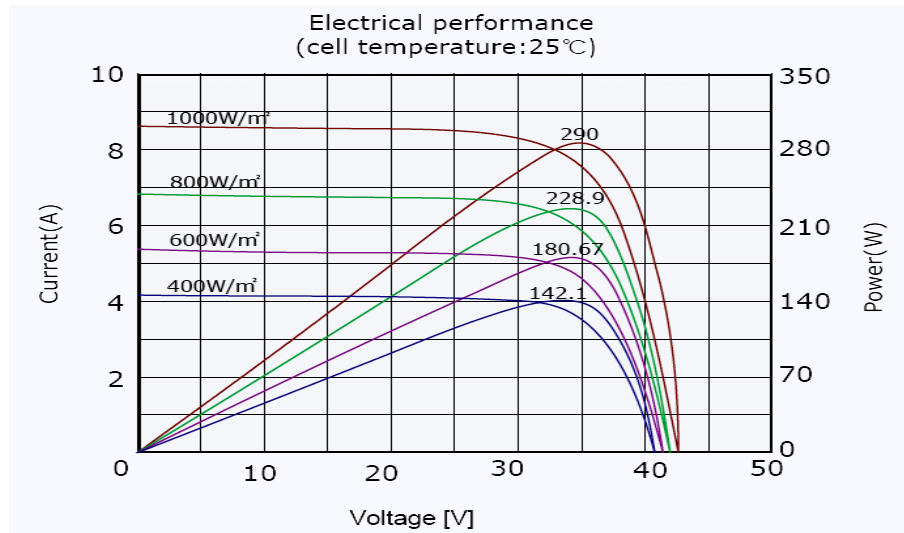


Figure I.17 : effet de l'éclairement sur les performances des panneaux solaires REF

- **Humidité** : l'accumulation d'humidité a un impact sur les panneaux solaires. Si le verre est détérioré, l'encapsulant et les couches protectrices peuvent s'abîmer, entraînant une infiltration d'eau ou d'humidité dans les couches du panneau, ce que crée la corrosion et détérioration des cellules photovoltaïques[13]. Si l'humidité arrive à pénétrer dans les couches du panneau, il y a un risque de condensation, ce que entraîne la corrosion des produits métalliques ou d'abîmer les différents matériaux du panneau.
- **Vent de sable** : la saleté et la poussière qui s'accumulent sur la surface des panneaux solaires agissent comme une barrière entre les rayons du soleil et les cellules photovoltaïques. Cela réduit la quantité de lumière, ce qui entraîne une diminution d'énergie de production. [14]
- **L'ombrage** : Les cellules des panneaux solaires sont plus efficaces lorsqu'elles sont exposées à la lumière directe du soleil. L'ombrage causé par les arbres, les bâtiments

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

ou d'autres objets peut réduire la quantité de lumière solaire qui atteint les cellules. Cela réduit la quantité d'électricité produite.[15]

I.7 Dégradation d'un module photovoltaïque

La dégradation d'un module photovoltaïque est un processus par lequel l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité diminue au fil du temps, la performance des modules photovoltaïque peut être dégradé suite à plusieurs facteurs à savoir ; la température, l'humidité, l'irradiation, la poussière, la neige et la pluie, l'exposition à l'ultraviolet, le vent de sable, les chocs mécanique, le cycle thermique, le cycle de vie ...etc.

Le module photovoltaïque dégradé peut ne jamais perdre sa fonction principale qui consiste à généré de l'électricité à partir de l'ensoleillement, même si son utilisation reste optimal. D'après WOHLGEMUTH [16] les contributeurs considèrent que le module PV est dégradé lorsque sa puissance atteint un niveau en dessous de 80 % de sa valeur initial



Figure I. 18 : module photovoltaïque dégradé [17]

I.7.1 Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïque

Quand on parle de la dégradation du panneau ou bien du module PV celle-ci se traduit par la détérioration progressive des caractéristiques d'un composant ou d'une partie d'un système ce qui induit à une diminution de performances.

Ces différentes parties sont : le verre, les interconnexions entre les cellules, le matériau de l'encapsulation (en ETHYLENE), le film polymère de protection qui est généralement en TEDLAR, les colles qui assure l'adhérence entre le différent composant des modules .

Les modes de dégradation des modules sont nombreuses on cite :

➤ La corrosion

Cette dernière attaque les connexions métalliques des cellules du module (PV) créant ainsi une augmentation des courants de fuite générant une perte de performance, cela dit la corrosion dégrade aussi l'adhérence entre les cellules et le cadre métallique.

La cause principale de la corrosion est l'humidité, elle pénètre dans les modules PV à travers les bords stratifiés provoque la corrosion .La rétention et la condensation de l'humidité dans l'enveloppe du module augmente la conductivité électrique du matériau, une étude précédente avait démontré que la corrosion apparaissait au bout de 1000 h d'exposition du module sous une température de 85°C et une humidité de 85% [16]

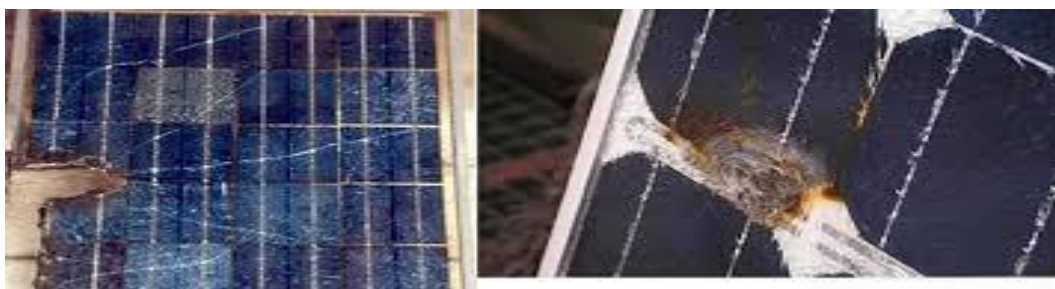


Figure I.19 : corrosion d'un panneau photovoltaïque [16]

➤ La délamination

Elle traduit la perte d'adhérence entre le polymère qui encapsule la cellule ou entre les cellules et le verre avant. Ce type de détérioration est le plus courant dans les conditions chaudes et humides, il favorise l'infiltration de l'humidité dans le module et provoque ensuite

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

divers réaction chimique à l'intérieur du module, entraînant des dégradation comme la corrosion des métaux formant la structure du module, de même, il favorise l'augmentation de la réflexion lumineuse dans le module photovoltaïque. La délamination est plus sévère lorsqu'elle se produit sur les bords du module, en plus de la dégradation de la puissance, elle provoque des risques électriques pour le module et l'installation toute entière. Des anciennes recherches démontrent que la liaison interrassiale peut être attaquée chimiquement par l'acide fluorhydrique formée par le fluor et l'oxyde d'étain contenus dans le module.[16]

➤ La décoloration

La décoloration de l'EVA est un mode de dégradation principale dans les modules Photovoltaïques en silicium cristallin. Ce mode de dégradation du module photovoltaïque se traduit par le changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation qui est généralement en Ethylène-acétate de vinyle (EVA) ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant les deux chercheur ORESKI et WALLNER ont déclaré que les causes principales de la décoloration de l'EVA sont les rayons ultraviolets combiné à l'eau sous des températures d'exposition supérieur a 50°C et provoquant ainsi un changement de la structure chimique du polymère[16]



Figure I.20 : panneau photovoltaïque décoloré [16]

➤ Les casses et les fissures d'une cellule

Les cellules photovoltaïques conventionnelles sont très fragiles. Comme leur nom l'indique, les microfissures sont de minuscules fissures pouvant apparaître sur les panneaux et difficiles

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

à détecter à l'œil nu. Au fil du temps et des fluctuations des conditions météorologiques, ces fissures peuvent s'agrandir et devenir plus visibles. Elles vont alors perturber le flux d'énergie du panneau et réduire le rendement énergétique de l'installation.

Les microfissures surviennent à l'étape de la production des panneaux photovoltaïques, mais elles peuvent aussi être causées par une négligence ou une maladresse lors de l'expédition ou de l'installation, ou encore par un événement météorologique imprévu comme la grêle. Pour éviter ces inconvénients

Il est généralement impossible de détecter à l'œil nu les fissures de cellules sur le module déjà opérationnel sachant qu'un module photovoltaïque fissuré peut toutefois continuer à faire son travail. Les modules photovoltaïques avec fissures et bris de verre présentent un risque de choc électrique et de pénétration de l'humidité plus élevé. Les casses, les bris de verre et les fissures sont généralement suivies des autres types de dégradation tels que la corrosion, la décoloration, la délamination

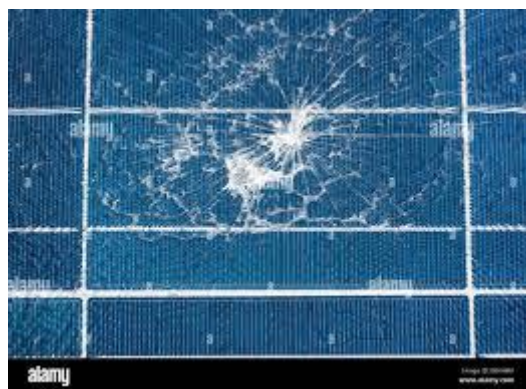


Figure I.21 : image d'un panneau fissuré [16]

I.8 Conclusion

Pour conclure ce chapitre consacré à l'état de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque, il apparaît clairement que le photovoltaïque, principalement basé sur la technologie du silicium cristallin, constitue aujourd'hui une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses et en pleine maturation technologique. Les avancées récentes ont permis d'améliorer significativement le rendement des cellules solaires, qui approche désormais les 20% en conditions commerciales, tout en réduisant les coûts de

Chapitre I : État de l'art sur la production d'électricité photovoltaïque

production, notamment grâce à l'optimisation des procédés de fabrication et à la réduction de l'épaisseur des cellules, qui représentent une part majeure du coût final des modules

Chapitre II

Modélisation de système et collection des données

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous attacherons à décrire le système photovoltaïque étudié, à savoir un système photovoltaïque autonome, c'est-à-dire un système permettant de convertir de l'énergie solaire lumineuse en énergie électrique sans être au réseau électrique cette étude sera menée dans différentes zones climatiques de l'Algérie, un pays caractérisé par une grande diversité climatique. On distingue en effet quatre (04) zones climatiques principales. Nous commencerons par le nord du pays, marqué par climat méditerranéen, en prenant pour site d'étude Bouzaréah, une localité côtière de la wilaya d'Alger Ensuite, nous aborderons la zone des hauts plateaux, en étudiant les données climatiques de la wilaya de Batna. La troisième étape de l'étude concernera le Sud, que l'on peut subdiviser en deux (02) zones climatiques : une zone semi-aride, représentée par la wilaya de Ghardaïa, puis une zone à climat extrêmement aride, illustrée par la wilaya d'Adrar.

On terminera par la région du sud là où on peut diviser en deux (02) zones climatiques ; L'objectif de cette étude est d'établir un modèle mathématique ainsi que des hypothèses de travail concernant la dégradation des panneaux solaires due aux facteurs environnementaux, Ce travail sera réalisé à l'aide du logiciel **MATLAB**, qui nous permettra de vérifier la validité des hypothèses formulées en amont.

II.2. Description du système photovoltaïque

Dans cette étude, notre attention se porte sur une installation PV autonome. Ces systèmes sont conçus pour fonctionner de manière totalement autonome, sans recours à un autre recours à une autre sans source d'énergie. Ils sont principalement utilisés dans les zones isolées, éloignées des réseaux électriques classiques. Il existe plusieurs types de systèmes autonomes, correspondant à qui montre les différentes configurations possibles.

Dans certains cas, les panneaux solaires sont directement reliés à une charge. Ce mode de fonctionnement dépend entièrement de l'ensoleillement instantané, ce qui signifie que la puissance disponible fluctue au cours de la journée. Il est adapté à certaines charges en courant continu, comme les batteries ou l'accumulateur électrochimique, capables de supporter une tension variable. Un exemple courant de cette configuration est le pompage solaire direct, dans lequel l'énergie produite est utilisée en temps réel pour actionner une pompe à eau pendant les heures ensoleillées.

Cependant, dans la majorité des cas, un dispositif électronique de type MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) est intercalé entre le générateur solaire et la charge. Ce système permet d'optimiser le fonctionnement du générateur en le maintenant à son point de puissance maximale, malgré les variations de l'ensoleillement.

En résumé, une installation photovoltaïque autonome se compose de plusieurs éléments essentiels : le champ photovoltaïque, un redresseur, un onduleur, des batteries, etc.

Ce type de système est capable de fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour alimenter divers récepteurs (éclairage, équipement domestiques, etc.) tout en restant totalement indépendant du réseau électrique conventionnel (tel que Sonelgaz).

Autrement dit, il s'agit d'un couplage direct entre la production et la consommation. Ce genre d'installation est particulièrement utilisé dans les sites isolés, où le raccordement au réseau serait techniquement difficile ou économiquement non viable.

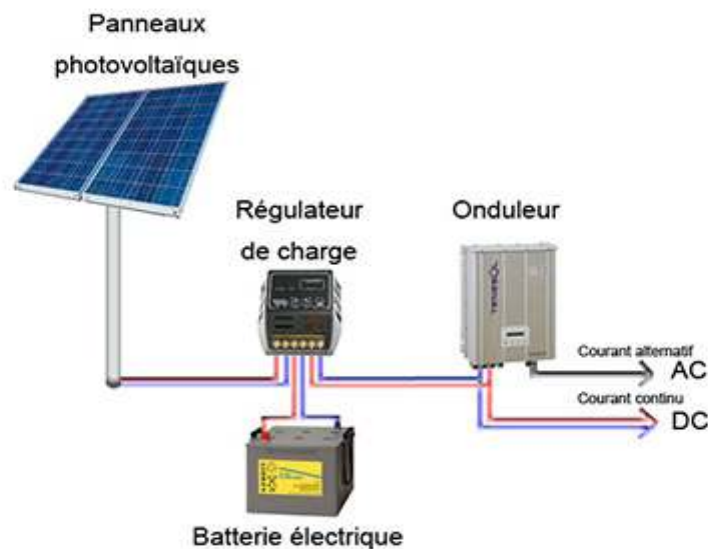


Figure II.22 : Installation photovoltaïque autonome. [18]

➤ **Principaux composants d'une centrale photovoltaïque autonome :**

Un système photovoltaïque autonome pour une maison isolée comprend généralement :

- **Panneaux solaires** : installés sur le toit ou au sol, ils captent l'énergie solaire.



Figure II.23: champ photovoltaïque [18].

- **Régulateur de charge MPPT** : optimise la production en maintenant les panneaux à leur puissance maximale.



Figure II.24: Regulateur MPPT [19].

- **Batteries de stockage** : stockent l'énergie produite pour une utilisation ultérieure, notamment la nuit.



Figure II.25 : Dispositif de stockage d'énergie électrique par batterie [18]

- **Onduleur** : convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) pour alimenter les appareils domestiques.



Figure II.26 : convertisseur DC / AC [19]

- **Tableau de distribution** : assure la protection et la répartition de l'électricité dans la maison.

II.3. Collection des données nécessaires

Les quatre sites sélectionnés pour cette étude – **Bouzaréah**, **Batna**, **Ghardaïa** et **Adrar** – présentent des profils climatiques contrastés en raison de leur position géographique. **Bouzaréah**, située à environ 8 km à l'ouest d'Alger (36°47'N, 3°01'E), se trouve sur les hauteurs dominant la baie d'Alger. Elle bénéficie d'un climat méditerranéen, avec des hivers doux et pluvieux, et des étés chauds. La température y a atteint un record de **48,7°C en juillet 2023** et est descendue jusqu'à **-3°C en janvier 1985** [1][4]. **Batna**, positionnée dans le Nord-Est de l'Algérie (35°33'N, 6°10'E), à la jonction des chaînes de l'Atlas tellien et saharien, connaît un climat semi-aride. Elle affiche des températures moyennes de **4°C en janvier** et jusqu'à **35°C en juillet**, avec des extrêmes de **-7°C en hiver** et **45°C en été**, et reçoit environ **390 mm de précipitations annuelles** [3][4]. Plus au sud, **Ghardaïa** (32°29'N, 3°41'E), localisée à 600 km au sud d'Alger dans le nord du Sahara, bénéficie d'un climat désertique subtropical. Les températures minimales en hiver peuvent approcher **0°C**, tandis que l'été voit des températures maximales dépassant **45°C**. La durée d'ensoleillement atteint **14h05min en été**, avec des tempêtes de sable fréquentes au printemps [7]. Enfin, **Adrar** (27°52'N, 0°17'W), au cœur du désert algérien, possède un climat saharien hyper-aride, avec des températures estivales moyennes de **46°C**, et un ensoleillement exceptionnel d'environ **3 978 heures par an**, faisant d'elle l'une des villes les plus chaudes et ensoleillées au monde [3][7]. Ces caractéristiques géographiques et climatiques font de Ghardaïa et Adrar des sites hautement favorables à l'énergie solaire, tandis que Batna pourrait convenir à des solutions hybrides intégrant l'énergie éolienne, et Bouzaréah à des systèmes urbains tempérés.



Figure montrant les 4 zones géographiques étudiées

II.3.1. Données climatiques des températures moyennes en 2024

Les quatre localités présentent des profils thermiques distincts :

- **Bouzaréah** ($36^{\circ}47'N$, $3^{\circ}01'E$) présente un climat méditerranéen. Les températures en janvier, février et décembre sont autour de $15^{\circ}C$, indiquant un hiver tempéré. D'avril à août, les températures s'élèvent progressivement, culminant à $28,05^{\circ}C$ en août. Les baisses progressives en automne annoncent un hiver doux. Ce climat favorise une vie confortable et des activités agricoles ou touristiques.
- **Batna** ($35^{\circ}33'N$, $6^{\circ}10'E$), de climat semi-aride et en altitude, connaît un hiver froid avec des moyennes de $6,38^{\circ}C$ en janvier et $5,14^{\circ}C$ en décembre, avec des nuits pouvant descendre à $-3^{\circ}C$. L'été est chaud avec une moyenne de $27,91^{\circ}C$ en juillet, pouvant dépasser $33^{\circ}C$. Ce profil montre une grande amplitude thermique typique d'un climat continental.
- **Ghardaïa** ($32^{\circ}29'N$, $3^{\circ}41'E$) montre un climat désertique avec un hiver doux ($10,31^{\circ}C$ en décembre) et un été très chaud ($34,4^{\circ}C$ en juillet). La température monte progressivement de février ($12,67^{\circ}C$) à mai (près de $25^{\circ}C$), puis chute en automne. Ces conditions traduisent une alternance de chaleur intense et de fraîcheur modérée.
- **Adrar** ($27^{\circ}52'N$, $0^{\circ}17'W$) se caractérise par un climat saharien hyper-aride. Les températures moyennes dépassent $40^{\circ}C$ entre juin et août ($40,9^{\circ}C$ à $42,6^{\circ}C$). Les mois

les plus frais, janvier et décembre, tournent autour de 14°C. Cela confirme sa réputation de région parmi les plus chaudes au monde.

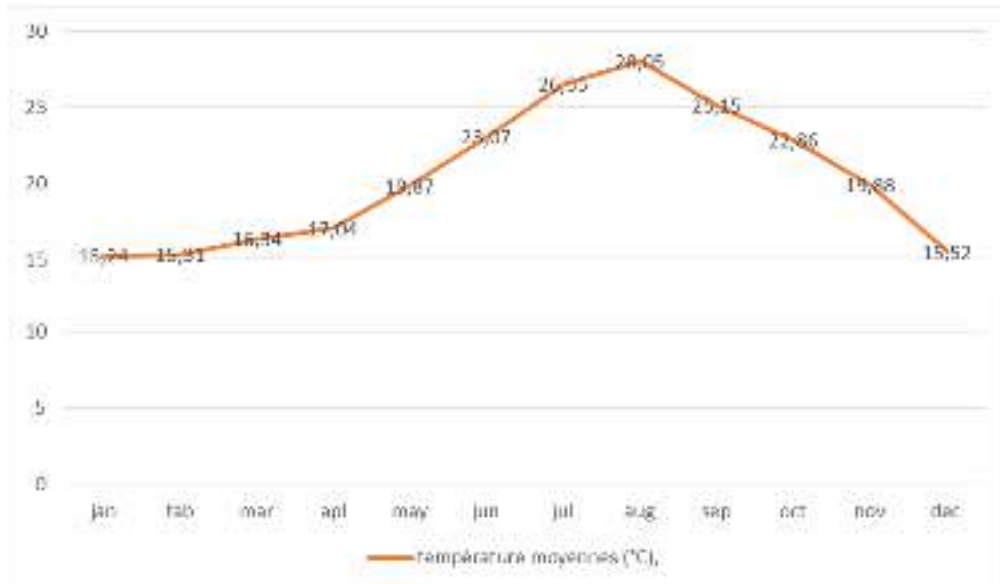


Figure II.27 : Évolution des températures moyennes mensuelles à Bouzaréah,

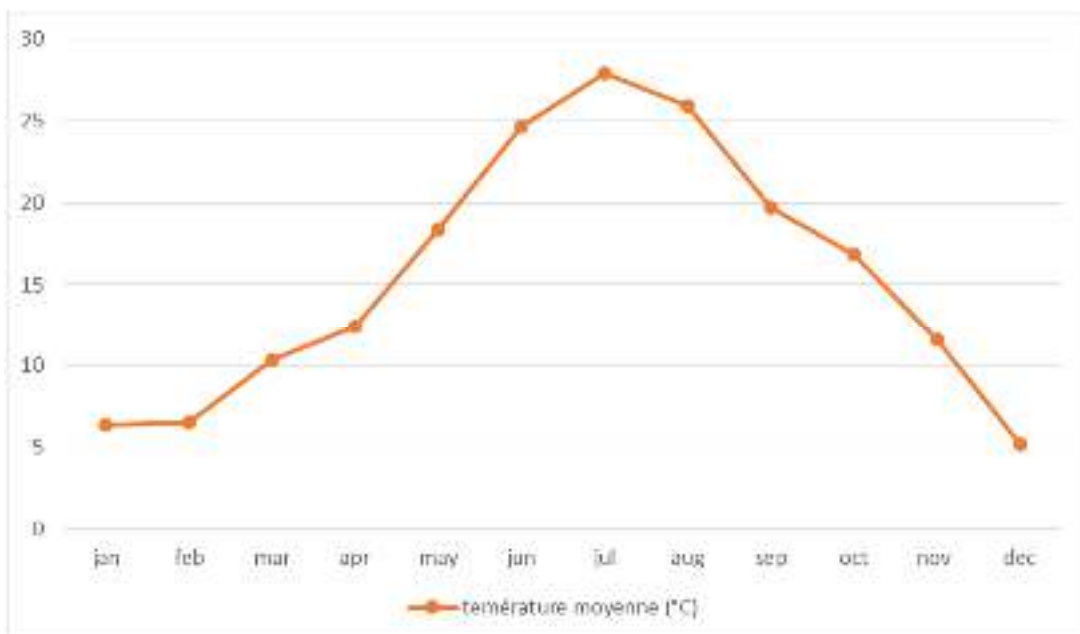


Figure II.28 : Évolution des températures moyennes mensuelles à BATNA

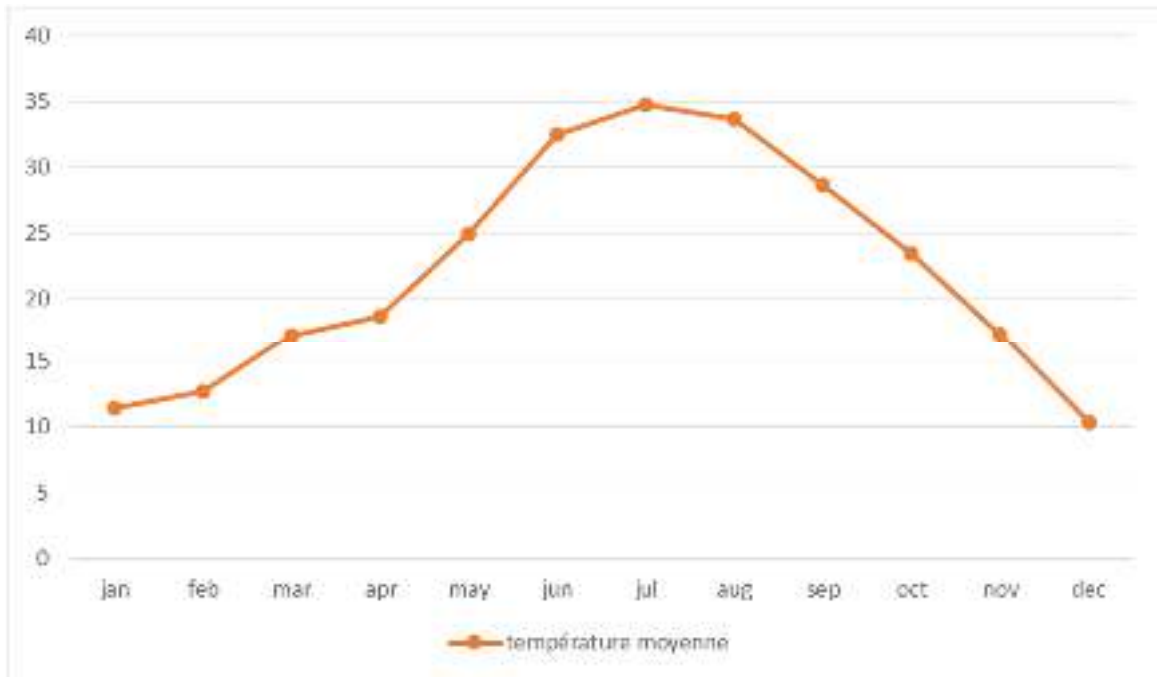


Figure II.29: Évolution des températures moyennes mensuelles à GHARDAIA



Figure II.30 : Évolution des températures moyennes mensuelles à ADRAR

II.3.2. Éclairement solaire moyen en 2024

- **Bouzaréah**

À Bouzaréah, l'éclairement moyen est fortement influencé par la saison. De décembre à février, les valeurs sont faibles (entre 2,15 et 3,04 kWh/m²/jour), principalement en raison des journées courtes et d'une couverture nuageuse fréquente. En mars et avril, l'augmentation rapide de l'éclairement (4,80 puis 6,10 kWh/m²/jour) marque la transition vers le printemps. Les mois de mai, juin et juillet affichent les valeurs les plus élevées (entre 7,3 et 7,4 kWh/m²/jour), traduisant un fort ensoleillement estival. Ensuite, l'éclairement diminue progressivement en août (6,30) et septembre (4,87), avant de chuter plus nettement en octobre et novembre. Ces variations sont typiques du climat méditerranéen chaud de Bouzaréah, avec des étés très ensoleillés et des hivers nuageux.

- **Batna**

À Batna, l'évolution de l'éclairement suit une tendance similaire. Les mois de décembre à février enregistrent des valeurs faibles (entre 2,20 et 3,43 kWh/m²/jour), en raison de la faible hauteur solaire et de la nébulosité hivernale. L'augmentation est notable en mars (5,26) et avril (6,00), annonçant une période plus lumineuse. De mai à juillet, l'éclairement atteint ses pics (entre 7,06 et 7,46 kWh/m²/jour), témoignant d'un ensoleillement intense. En août (6,51) et septembre (4,74), les valeurs commencent à diminuer, avant une baisse plus significative en octobre et novembre. Ces données reflètent le climat semi-aride de Batna, avec des étés courts, très chauds et dégagés, et des hivers longs, froids et partiellement nuageux.

- **Ghardaïa**

À Ghardaïa, l'analyse mensuelle montre une grande variation saisonnière. En décembre, mois hivernal généralement couvert, l'éclairement moyen est de 3,22 kWh/m²/jour, ce qui reflète une atmosphère moins transparente et la rareté des journées dégagées. À l'inverse, en juillet, caractérisé par un ciel clair et un fort ensoleillement, l'éclairement atteint un maximum de 7,77 kWh/m²/jour. Cette variation illustre bien le contraste entre les mois d'hiver, où le disque solaire est souvent masqué, et l'été, où l'irradiation est maximale grâce à un ciel dégagé et une durée d'ensoleillement importante.

- **Adrar**

Dans la région saharienne d'Adrar, les valeurs d'éclairement sont globalement très

élevées tout au long de l'année. Les valeurs maximales sont atteintes en mai, juin, juillet et août, mois les plus lumineux, avec des journées longues et un ensoleillement intense. À l'inverse, la période de novembre à février présente les valeurs les plus basses (entre 3,55 et 5,31 kWh/m²/jour), en lien avec un angle solaire plus bas, des jours plus courts et, occasionnellement, un ciel voilé. Ce profil est typique d'un climat désertique chaud, où l'intensité du rayonnement solaire reste élevée même en hiver.

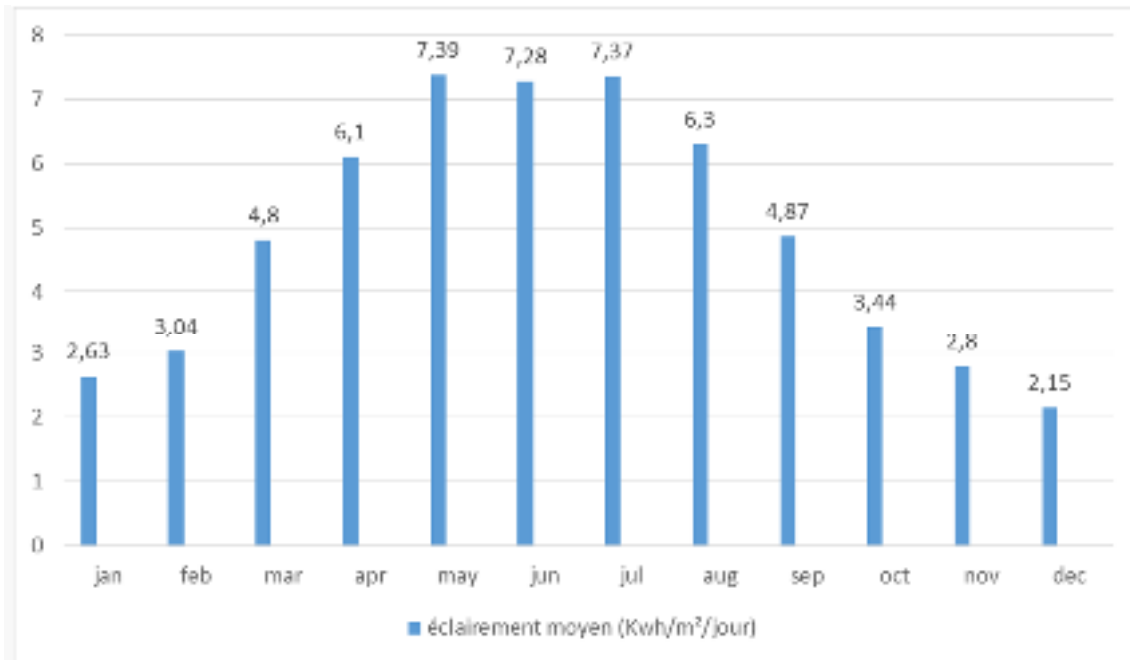


Figure II.31 : éclaircissement moyen à Adrar en 2024.

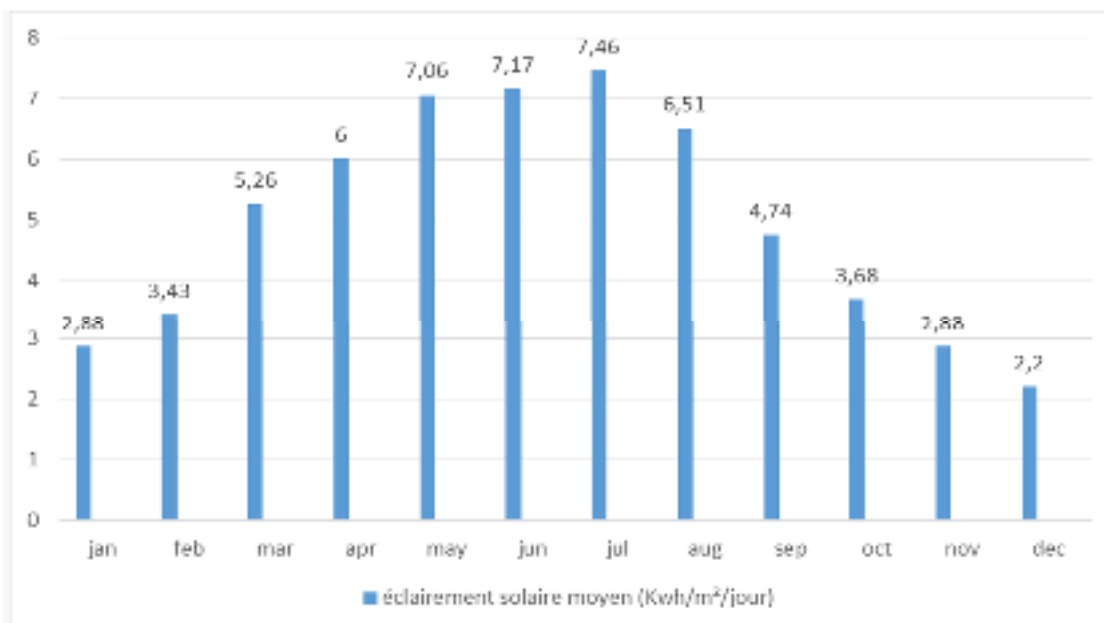


Figure II.32 : éclaircissement moyen à BATNA en 2024.

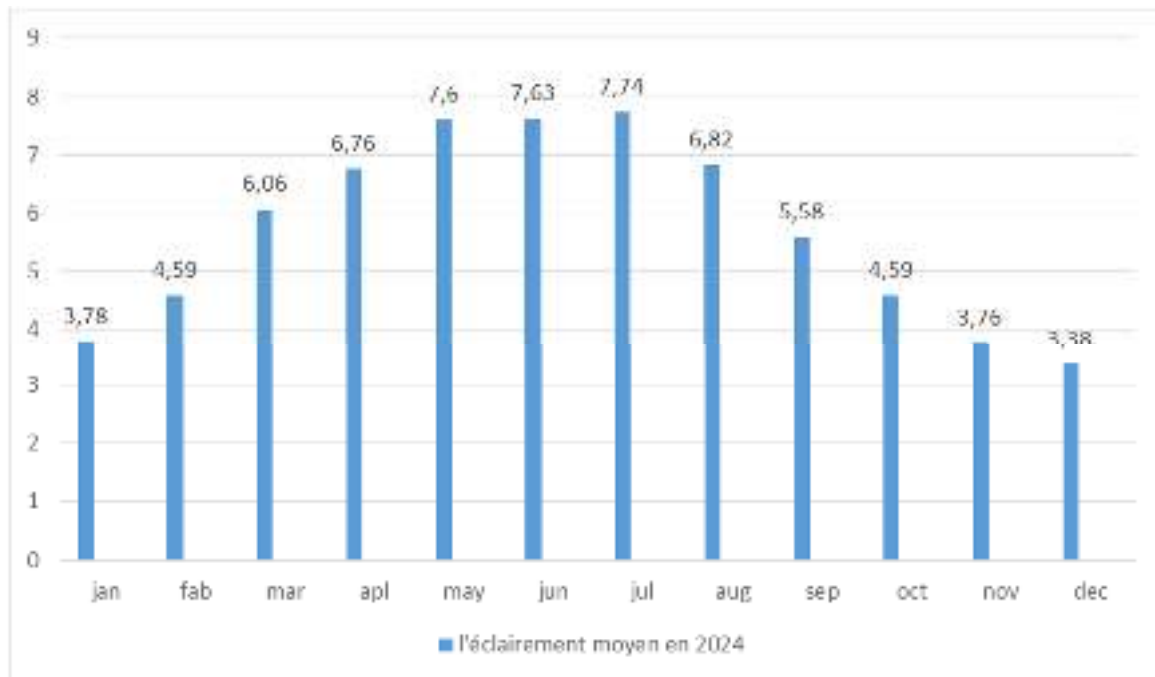


Figure II.33 : éclairement moyen à GHARDAIA en 2024.

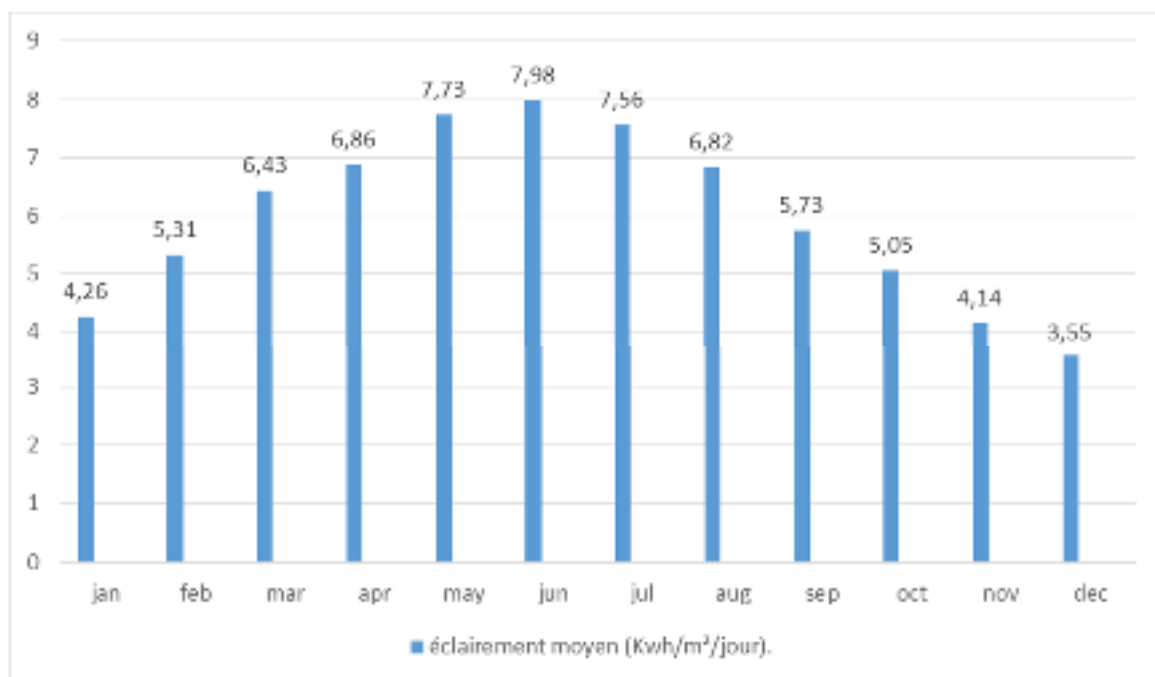


Figure II.34: éclairement moyen à Adrar en 2024.

II.3.3. Humidité moyenne en 2024

- **Bouzaréah**

À Bouzaréah, l'humidité relative reste relativement constante tout au long de l'année, oscillant entre 70 % et 76 %. Cette stabilité est caractéristique du climat méditerranéen tempéré, fortement influencé par la proximité de la mer Méditerranée.

Les mois d'hiver (décembre à février) présentent des taux d'humidité plus élevés, souvent associés à un ciel couvert et des précipitations fréquentes. Le mois de novembre est généralement le plus humide de l'année, en lien avec l'intensification des pluies à cette période.

Même pendant l'été, malgré des températures élevées, l'humidité relative reste modérément élevée (autour de 71-73 %), accentuant ainsi la sensation de chaleur. Cette humidité constante joue un rôle important dans le confort thermique, la végétation et les conditions environnementales locales.

- **Batna**

À Batna, les variations de l'humidité relative sont plus marquées et traduisent un climat semi-aride continental. Les mois les plus humides sont novembre (71,66 %), décembre (74,8 %), janvier (67,75 %) et février (69,7 %), ce qui correspond à la saison froide et humide. Cette période est caractérisée par une couverture nuageuse plus fréquente et des précipitations plus abondantes.

À partir de mars, l'humidité diminue progressivement pour atteindre ses valeurs les plus basses en juin (39,42 %) et en juillet (30,5 %), typiques de la saison chaude et sèche.

En septembre et octobre, l'humidité augmente de nouveau (jusqu'à 63,23 %), marquant le retour progressif vers la saison humide.

Ce cycle annuel – humidité élevée en automne/hiver, faible en été – est typique des régions de l'intérieur au climat continental.

- **Ghardaïa**

Dans la région désertique de Ghardaïa, les niveaux d'humidité relative sont globalement plus faibles mais suivent une tendance similaire, influencée principalement par la température.

Le mois de décembre est le plus humide de l'année, avec une moyenne de 54,13 %, tandis que juillet affiche la valeur la plus basse avec seulement 16,47 %.

Cette variation montre l'impact direct de la température sur l'humidité relative : plus l'air est chaud, plus il est sec, tandis que des températures plus basses permettent à l'air de retenir davantage de vapeur d'eau. Cela reflète un climat aride où les étés sont extrêmement secs et les hivers légèrement plus humides.

- Adrar

L'humidité à Adrar est mieux représentée par l'humidité spécifique, qui exprime la quantité de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec. De janvier à avril, les valeurs sont basses (environ 2,7 à 3 g/kg), traduisant un air très sec pendant les mois froids.

À partir de mai, l'humidité spécifique augmente régulièrement pour culminer en septembre à environ 9 g/kg. Cette hausse est due à la capacité accrue de l'air chaud à retenir l'humidité, ce qui rend l'atmosphère plus humide malgré l'aridité du climat.

Cela illustre bien la dynamique saharienne : un air très sec en hiver et plus humide en été, sans toutefois atteindre les niveaux d'humidité relative observés dans les régions côtières ou montagneuses.

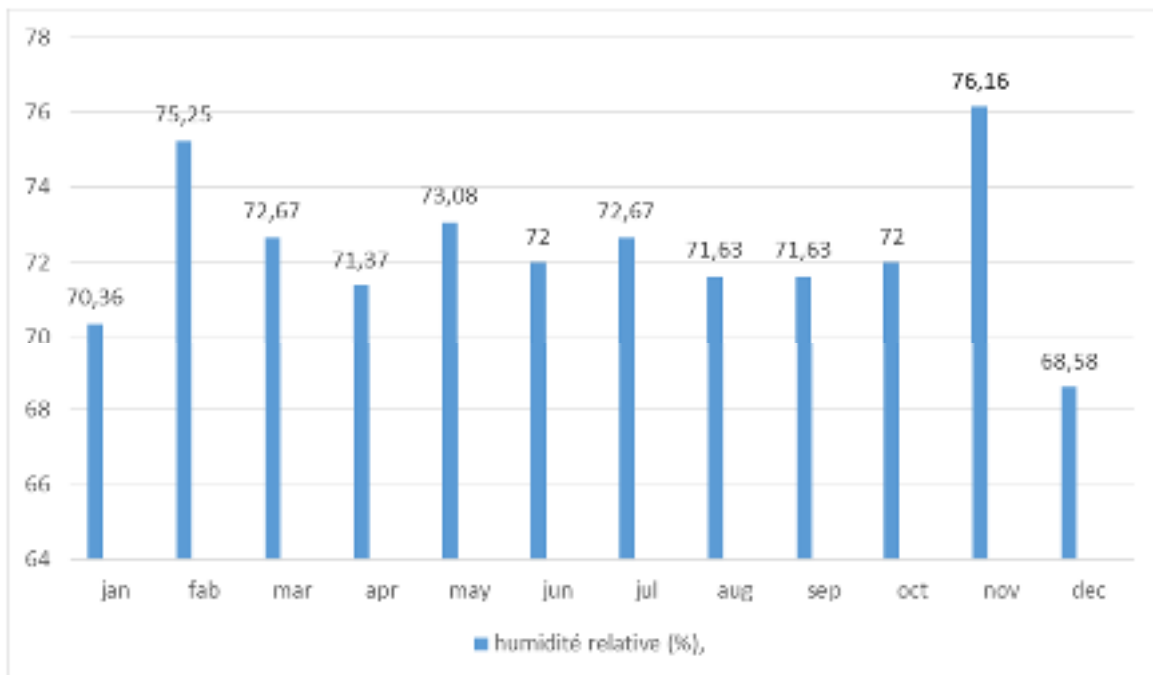


Figure II.35 : variation de l'humidité à Bouzaréah en 2024

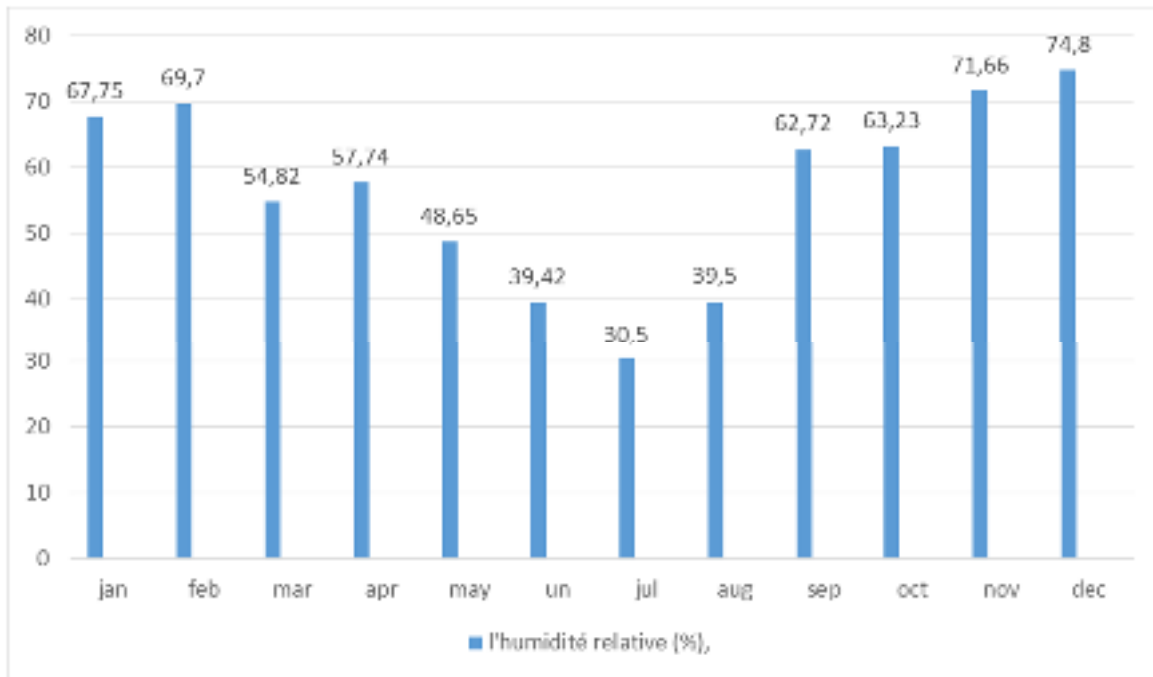


Figure II.36 : variation de l’humidité à BATNA en 2024

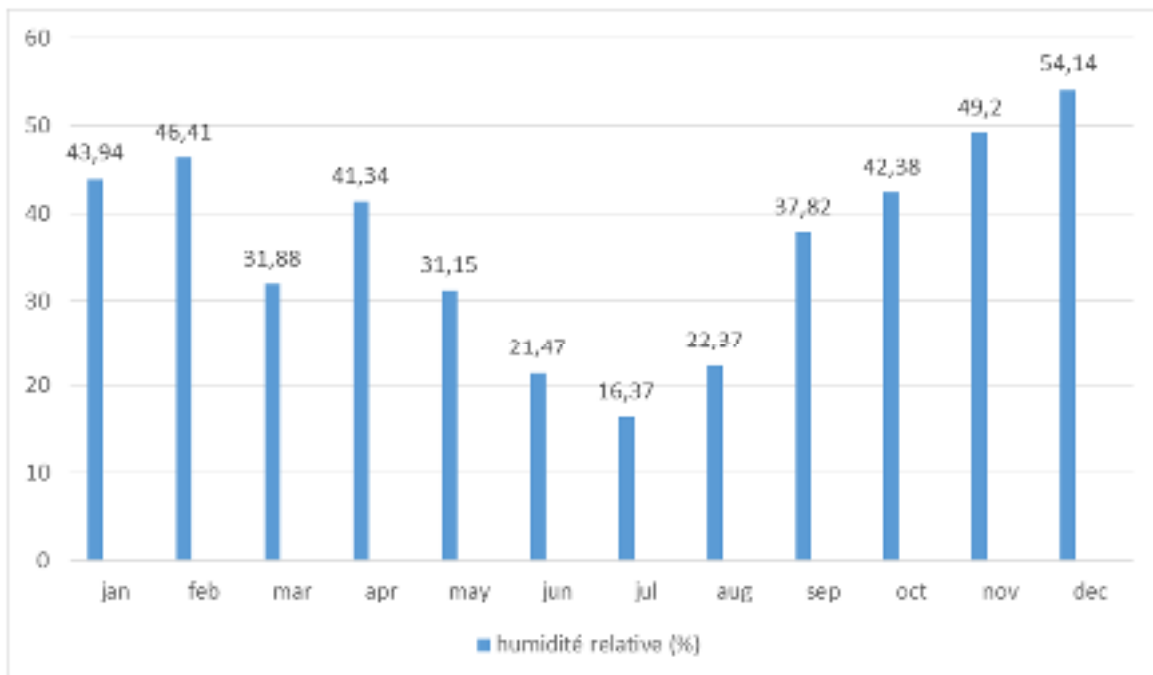


Figure II.37 : variation de l’humidité à GHARDAIA en 2024

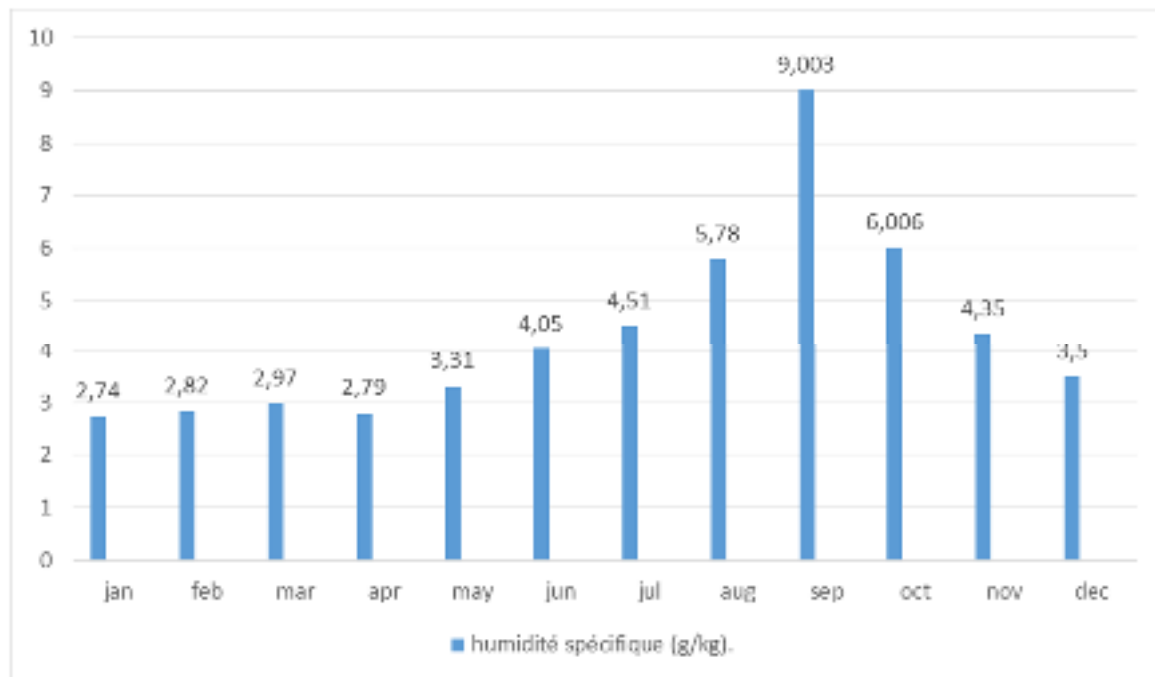


Figure II.38 : Variation de l'humidité a ADRAR en 2024

II.3.4. Vitesse moyenne du vent en 2024

- Bouzaréah

À Bouzaréah, les vitesses moyennes du vent présentent une dynamique saisonnière typique d'un climat méditerranéen côtier.

Les mois les plus venteux sont l'hiver et le début du printemps, avec des valeurs atteignant 6,01 m/s en février, 5,92 m/s en mars et 5,03 m/s en janvier.

À partir de mai, les vitesses diminuent progressivement, pour atteindre un minimum estival en juillet avec 3,98 m/s.

De septembre à décembre, les vitesses se stabilisent autour de 4,4 à 4,5 m/s, indiquant un vent modéré à faible en automne.

Cette variation est cohérente avec la stabilité atmosphérique estivale et les perturbations hivernales fréquentes.

- **Batna**

Les vitesses moyennes du vent à Batna sont globalement modérées, variant entre 2,9 m/s (en novembre) et 4,22 m/s (en février).

Les mois les plus venteux sont février et mars, avec des vitesses autour de 4 m/s. En automne, les vents deviennent plus faibles, notamment en octobre et novembre. Ces données sont caractéristiques d'un climat semi-aride continental, avec des vents généralement légers à modérés, influencés par des écarts de température journaliers importants.

- **Ghardaïa**

À Ghardaïa, la vitesse moyenne du vent présente une variabilité saisonnière bien marquée. La période la plus venteuse s'étend de février à juin, avec un pic observé en avril (5,48 m/s). Durant la seconde moitié de l'année, les vitesses diminuent, atteignant un minimum en septembre (3,32 m/s).

Une légère reprise est notée en hiver, mais les vents restent globalement moins forts qu'au printemps.

Cette dynamique reflète l'effet des changements thermiques rapides dans un climat désertique, où les vents peuvent être renforcés par des gradients de pression marqués au printemps.

- **Adrar**

Les données de 2024 à Adrar montrent que les vitesses moyennes du vent les plus élevées sont enregistrées en février, avril et juillet, atteignant environ 5 m/s. Ces pics coïncident souvent avec des périodes de transition climatique (fin d'hiver, printemps, début d'été), propices à l'instabilité atmosphérique.

À l'inverse, les mois de juin, octobre et novembre enregistrent les vitesses les plus basses (entre 3,66 et 3,79 m/s), ce qui traduit une plus grande stabilité atmosphérique à ces périodes. Cette configuration est typique des régions sahariennes où les vents sont conditionnés par les cycles thermiques diurnes et les gradients de pression saisonniers.

II.4. Modèle mathématique et hypothèse de travail :

II.4.1. Modèle I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque

-Le modèle courant-tension (I-V) d'un panneau photovoltaïque repose sur l'équation de Shockley, qui décrit le comportement de la diode représentant la cellule photovoltaïque. Cette équation permet de modéliser la relation entre le courant de sortie et la tension appliquée, et constitue la base pour générer les courbes I-V et P-V du module.

$$I = I_l - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kt}} - 1 \right)$$

Cette équation, issue de la physique des semi-conducteurs et connue sous le nom d'équation de Shockley pour une cellule solaire, modélise le comportement électrique d'une cellule solaire, qui peut être vue comme une diode PN exposée à la lumière. Elle exprime le courant I en fonction de la tension V et des paramètres suivants :

D'où :

- I : Courant , de sortie de la cellule solaire à la tension V (en Ampères).
- I_L : Courant de lumière, proportionnel à l'irradiation lumineuse (en Ampères).
- I_0 : Courant de saturation inverse de la diode (en Ampères).
- q : Charge élémentaire de l'électron (environ 1.602×10^{-19} Coulombs).
- V : Tension aux bornes de la cellule solaire (en Volts).
- n : Facteur d'idéalité de la diode (sans unité, généralement entre 1 et 2).
- k : Constante de Boltzmann, (1.381×10^{-23} J/K).
- T : température absolue en Kelvin.

II.4.2. Interprétation de l'équation :

Cette équation exprime le courant électrique I fourni par une cellule solaire en fonction de la tension V à ses bornes, de l'éclairement et de la température.

Elle prend en compte deux phénomènes :

- la génération de courant par la lumière (I_L).
- Le comportement naturel de la cellule comme une diode :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

II.5. Influence de la température sur la formule :

II.5.1. Influence sur le courant de saturation (I_0) :

-La température exerce une influence significative sur l'équation de la cellule solaire, principalement à travers son impact sur le courant de saturation inverse I_0 . Ce courant I_0 est lié au mouvement des porteurs minoritaires (électrons dans la région P et trous dans la région N) sous l'effet de l'agitation thermique.

- **Augmentation de I_0 avec la température** : Plus la température augmente, plus l'agitation thermique est importante, ce qui favorise la génération et le déplacement des porteurs minoritaires. Par conséquent, le courant de saturation I_0 croît avec la température. Mathématiquement, I_0 a une dépendance exponentielle avec la température (bien que cette dépendance soit souvent simplifiée dans les modèles de premier ordre).
- **Impact sur le courant de sortie de la cellule** : Le courant de saturation I_0 agit comme un "signal parasite" pour la jonction PN. Il représente un courant qui circule en sens inverse du courant photo-généré I_L . Par conséquent, une augmentation de I_0 due à une température plus élevée réduit le courant de sortie net I de la cellule solaire pour une tension V donnée. En d'autres termes, la performance de la cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température."

II.5.2. Influence sur la tension de sortie :

Lorsque ($i=0$), la tension de circuit ouvert (V_{co}) s'écrit sous la forme suivante :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

A travers cette formule on constate que :

- Le terme $\left(\frac{KT}{q}\right)$ augmente avec la température (T).
- (I_0) augmente exponentiellement avec la température.

Donc, cela fait baisser le logarithme : $\left(\ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)\right)$, et à la finale diminution de la tension de sortie de la cellule.

II.5.3. Influence de la tension sur la formule :

La tension a un impact sur le courant de saturation, lors de l'augmentation de tension, l'exponentiel augmente très vite ce qui implique un courant de fuite important, et comme :

$$I = IL + I_0$$

Le courant net disponible en sortie de la cellule solaire va diminuer.

Remarque :

Le chiffre 1 dans la formule garantit que le courant est nul lorsque la tension est nulle.

II.5.4. Influence de l'éclairement :

Le photo courant généré dans une cellule solaire lorsqu'elle est exposée à la lumière. Il résulte de l'absorption des photons par le matériau semi-conducteur. Une plus grande intensité lumineuse, caractérisée par un flux de photons plus élevé, entraîne la génération d'un nombre accru de paires électron-trou, ce qui se traduit par un photo courant plus élevé.

II.5.5. Influence de l'irradiation sur la photo courant :

La relation entre le courant de lumière et l'irradiation s'écrit par :

$$IL = IL_0 \times \frac{G}{G_0}$$

D'où :

- IL_0 est le courant de lumière sous l'irradiation standard G_0 (généralement 1000 W/m²),
- G est l'irradiation à un instant donné,
- G_0 est l'irradiation de référence (1000 W/m²).

Cette équation montre que le courant photo-généré IL est directement proportionnel à l'éclairement G . Cela signifie que si l'intensité lumineuse augmente, le courant généré par la cellule augmente également.

- Lorsque l'éclairement G augmente par rapport à G_0 , le courant augmente en conséquence.
- Lorsque l'éclairement G diminue, par exemple pendant les journées nuageuses ou au crépuscule, le courant photo-généré IL diminue également.

II.6. Modèles Empiriques

Ces modèles sont basés sur l'analyse de données expérimentales et permettent de quantifier la perte de puissance au fil du temps.

II.6.1. Modèle de Taux de Dégradation Linéaire (LDM - Linear Degradation Model)

Ce modèle suppose que la puissance d'un module photovoltaïque diminue linéairement avec le temps, à un taux constant exprimé en pourcentage par an.

Dégradation en puissance :

- Formule :

$$P(t) = P_0(1 - rdt)$$

Cette formule est une relation linéaire qui modélise la dégradation de la puissance d'un panneau solaire (ou tout autre système de production d'énergie) au cours du temps.

D'où :

- $P(t)$ est la puissance à l'instant t ,
- P_0 est la puissance initiale,
- ⊖ rd est le taux de dégradation annuel combiné, tenant compte de facteurs comme la température, l'humidité et le rayonnement (exprimé en fraction, par exemple 0.005 pour 0.5%/an). Ce taux global varie généralement entre 0.005 et 0.01 (0.5% à 1%/an), mais il est important de noter que les contributions individuelles de la température, de l'humidité et du rayonnement varient en fonction du climat et de la technologie du panneau.
- t est le temps écoulé depuis l'installation, exprimé en années.

Cette formule exprime une décroissance linéaire de $P(t)$ à partir de P_0 , avec un taux proportionnel à rd .

- Au début à $t=0$:

$$P(t) = P_0(1 - rdt)$$

Va devenir :

$$P(t) = P_0(1 - 0) = P_0$$

Donc $P(t)=P_0$ (état initial).

- Après un certain $t > 0$: la puissance s'écrit par sa formule :

$$P(t) = P_0(1 - rdt)$$

Interprétation :

Cette formule suppose une décroissance linéaire de la puissance $P(t)$ au fil du temps, à partir de sa valeur initiale P_0 . Le taux de dégradation annuel combiné rd quantifie la perte de performance par année, résultant de l'accumulation des effets de la température, de l'humidité, du rayonnement ultraviolet, de la corrosion, de l'encrassement et d'autres facteurs liés au vieillissement.

Analyse :

- **À l'instant initial ($t=0$) :** La formule donne $P(0) = P_0$, ce qui correspond à la puissance nominale du panneau neuf.
- **Pour $t > 0$:** La puissance $P(t)$ diminue linéairement avec le temps, en fonction du taux de dégradation annuel combiné rd .

Observation :

La puissance diminue linéairement avec le temps, et la vitesse de cette diminution est directement liée au taux de dégradation annuel combiné rd , qui intègre les effets de la température, de l'humidité et du rayonnement.

II.7. Outil de développement

II.7.1. Présentation générale de MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) est un logiciel spécialisé dans le calcul numérique matriciel. Sa force réside dans sa capacité à manipuler efficacement des vecteurs et des matrices/tableaux de nombres.

Principales caractéristiques :

- **Calcul matriciel :** MATLAB offre un ensemble complet d'opérateurs et de fonctions pour la manipulation de matrices, notamment le produit et l'inversion matricielle (inv), la transposition ($'$), le calcul des valeurs propres (eig), et des fonctions de création et de manipulation de matrices (diag , rand , ones , zeros , linspace).
- **Environnement de travail :** L'environnement MATLAB se présente sous la forme d'un espace de travail (Workspace) où un interpréteur de commandes exécute des opérations et fonctions. Les sources de ces fonctions, écrites en langage MATLAB, C ou Fortran, sont accessibles et modifiables.

- **Extensibilité** : L'utilisateur peut créer et ajouter ses propres fonctions, en s'inspirant des fonctions existantes.
- **Résolution d'équations** : MATLAB propose des fonctions pour la résolution numérique d'équations différentielles (linéaires et non-linéaires).
- **Traitement de données** : Des fonctions dédiées au traitement de données expérimentales sont disponibles, telles que min, max, mean, cumsum, sort, std, diff, ainsi que des fonctions d'interpolation (polyfit, interp1).
- **Visualisation** : L'interface graphique de MATLAB facilite le tracé de courbes et la création de graphiques 2D ou 3D de grande qualité (plot, stairs, stem, hist, mesh, surf, plot3).
- **Langage de programmation** : Bien que le langage MATLAB contienne un minimum de structures de programmation (boucles, conditions, sous-routines), il reste simple et rapide à utiliser, offrant une grande tolérance (syntaxe simple, pas de définition de types). Cela facilite la mise au point et permet un gain de temps appréciable.



Figure II.39: logo du logiciel MATLA

II.7.2. Pourquoi choisir MATLAB ?

MATLAB offre de nombreux avantages, ce qui en fait un choix attractif pour le calcul scientifique et l'ingénierie :

Avantages :

- Développement rapide : Programmation et affichage plus rapides que dans de nombreux autres langages.
- Riche bibliothèque : Une vaste collection de fonctions intégrées pour le calcul, l'analyse de données et la visualisation.
- Intégration avec d'autres langages : Possibilité d'inclure du code C/C++ pour des performances optimales.
- Exécution immédiate : Langage interprété, pas de compilation requise, ce qui réduit les délais de développement.
- Flexibilité : Possibilité d'exécuter du code en dehors du programme principal.
- Lisibilité du code : Code clair et facile à comprendre, ce qui facilite la maintenance et la collaboration.
- Aide intégrée : Documentation et aide complète et bien structurée.

Inconvénients :

- Vitesse de calcul : Peut-être moins rapide que des langages compilés comme C/C++ (bien qu'il soit optimisé pour les calculs matriciels).
- Coût : Logiciel commercial (alternative gratuite : Scilab).
- Applications exécutables : Les applications autonomes sont moins pratiques à générer et à distribuer.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé les données climatiques pertinentes pour le rendement, et le fonctionnement et la durée de vie des modules photovoltaïques. Nous avons étudié la température, l'humidité, la vitesse du vent et l'éclairement solaire pour quatre zones différentes d'Algérie. Ces données ont été présentées sous forme de graphiques mensuels pour l'année 2024. Cette analyse constitue une préparation à la simulation sur le logiciel MATLAB, en s'appuyant sur un modèle mathématique et des hypothèses de travail définies

Chapitre III

Résultats de simulation et analysé

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de simulation du comportement électrique des cellules photovoltaïques à partir du modèle de Shockley. Réalisées sous MATLAB, ces simulations permettent d'analyser l'effet de l'irradiation et de la température sur les courbes I-V et P-V, ainsi que sur le point de puissance maximale (MPP), dans des conditions représentatives du climat algérien.

Les résultats sont confrontés à des données expérimentales issues de la littérature, afin de valider la pertinence du modèle. Cette analyse met aussi en évidence l'intérêt d'une modélisation plus complète intégrant les résistances parasites (R_s , R_{sh}) et un courant de saturation ajusté dynamiquement avec la température.

L'étude inclut également l'évolution de la puissance délivrée par un panneau photovoltaïque en fonction du temps, pour différentes valeurs du coefficient de dégradation α , illustrant l'impact cumulatif des mécanismes de vieillissement. Enfin, une comparaison des performances sur quatre sites algériens (Bouzareah, Batna, Ghardaïa, Adrar) permet d'évaluer la durabilité des modules selon les conditions climatiques locales.

2. Scénario simulé

Dans le prolongement du chapitre précédent, où la modélisation électrique de la cellule photovoltaïque a été établie à partir de l'équation de Shockley modifiée, le présent chapitre est consacré à la simulation numérique du comportement de la cellule sous diverses conditions environnementales. L'objectif est d'analyser l'impact de la température et de l'irradiation solaire sur ses performances électriques.

La simulation a été réalisée sous MATLAB, en s'appuyant sur un modèle assimilant la cellule photovoltaïque à une source de courant en parallèle avec une diode idéale. Trois niveaux d'irradiation ont été considérés (200 W/m², 600 W/m² et 1000 W/m²), correspondant respectivement à un faible, moyen et fort ensoleillement. De même, trois températures ambiantes (25 °C, 50 °C et 75 °C) ont été sélectionnées afin d'évaluer l'influence thermique sur les grandeurs électriques caractéristiques.

Les variables indépendantes dans cette simulation sont la température et l'irradiation, tandis que les grandeurs étudiées incluent :

- la courbe I-V (courant-tension),
- la courbe P-V (puissance-tension),
- la tension de circuit ouvert (V_{oc}),
- le courant de court-circuit (I_{sc}),
- e la puissance maximale délivrée (P_{max}).

Les principales hypothèses retenues sont :

- éclairement uniforme et température homogène sur la cellule,
- facteur d'idéalité de la diode constant ($n = 1.3$),
- relation linéaire entre le photocourant I_L et l'irradiation,
- courant de saturation inverse I_0 considéré constant pour simplifier l'analyse.

Les résultats attendus indiquent que l'augmentation de l'irradiation induit une hausse proportionnelle du courant de sortie et de la puissance maximale, tandis qu'une élévation de la température entraîne une réduction de la tension de circuit ouvert et donc une baisse du rendement global.

Cette simulation vise à mettre en évidence le rôle déterminant des conditions climatiques dans le comportement instantané des cellules photovoltaïques, et à valider expérimentalement la pertinence du modèle précédemment développé.

3. Analyse des résultats de simulation

3.1. Influence de la température sur la tension du circuit ouvert (V_{oc})

Les résultats de la simulation montrent clairement que la tension de circuit ouvert (V_{oc}) diminue avec l'augmentation de la température.

Interprétation

Comme présenté dans l'équation de la tension V_{oc} exposée au chapitre 2, une élévation de la température augmente l'agitation thermique dans le semi-conducteur, ce qui entraîne une hausse du courant de saturation inverse I_0 . Cette augmentation de I_0 se traduit par une diminution de V_{oc} .

En d'autres termes, lorsque la température s'élève, les porteurs de charges (électrons-trous) possèdent plus d'énergie, ce qui favorise le courant de fuite à travers la jonction PN. Cela se traduit par une réduction progressive de la tension de circuit ouvert.

D'après la littérature, la tension Voc baisse en moyenne de 0,3 % à 0,5 % par degré Celsius, ce qui peut affecter les performances électriques des modules, notamment dans les zones chaudes.

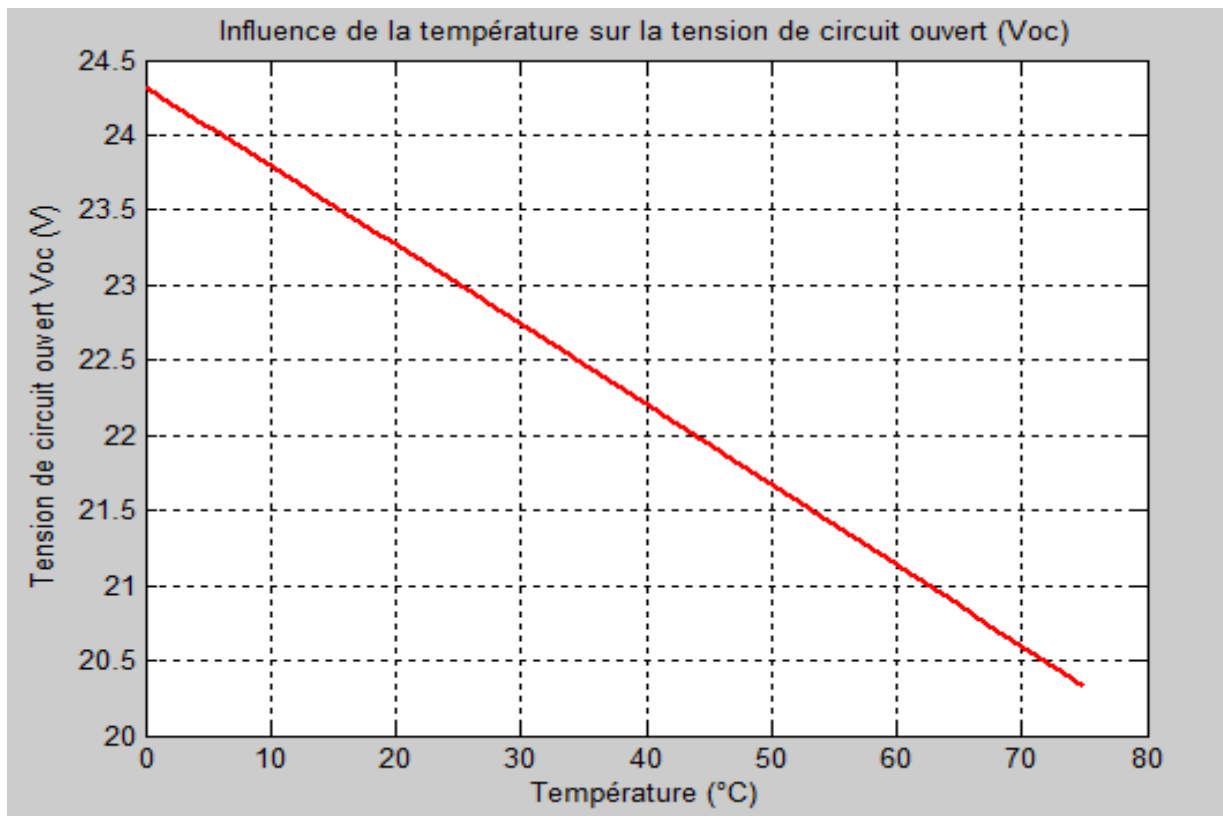


Figure III. 40 : influence de la température sur la tension du circuit ouvert

3.2. Influence de la température sur la puissance :

L'analyse de la courbe de la Figure 2 met en évidence qu'une élévation de la température ambiante entraîne une diminution de la puissance maximale (Pmax) délivrée par le module photovoltaïque.

D'un point de vue électrique, la puissance générée s'exprime par la relation :

$$P = V \times I$$

où V est la tension et I l'intensité du courant.

Lorsque la température augmente, le courant de sortie I tend à croître légèrement. En revanche, la tension à vide (V_{co}) diminue de façon plus marquée. Cette baisse de tension, plus significative que l'augmentation du courant, conduit à une diminution nette de la puissance délivrée par le module.

Le coefficient de température de la puissance est généralement de l'ordre de $-0,4 \text{ \%/}^{\circ}\text{C}$. Cela signifie que pour chaque degré Celsius supplémentaire, la puissance maximale diminue d'environ $0,4 \%$, ce qui peut affecter considérablement les performances du système dans les environnements à forte température.

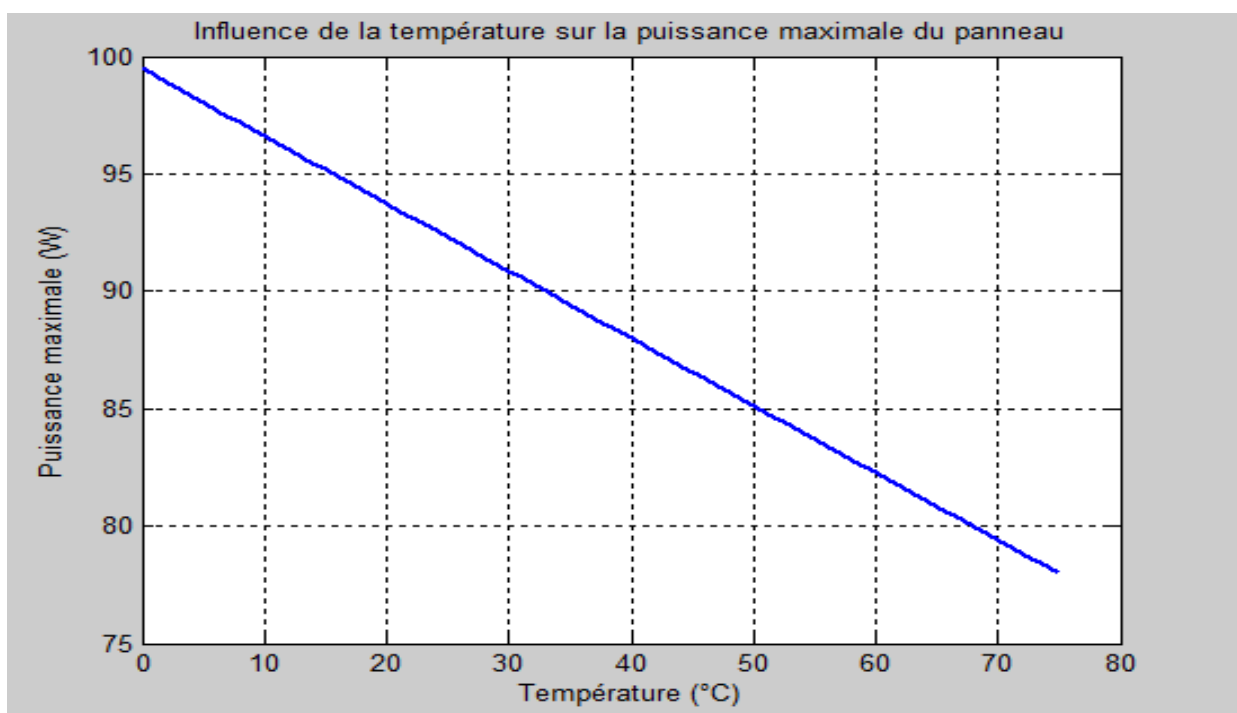


Figure III.41 : Variation de la puissance Maximale délivrée par le module photovoltaïque en fonction du temps pour différentes valeurs de température.

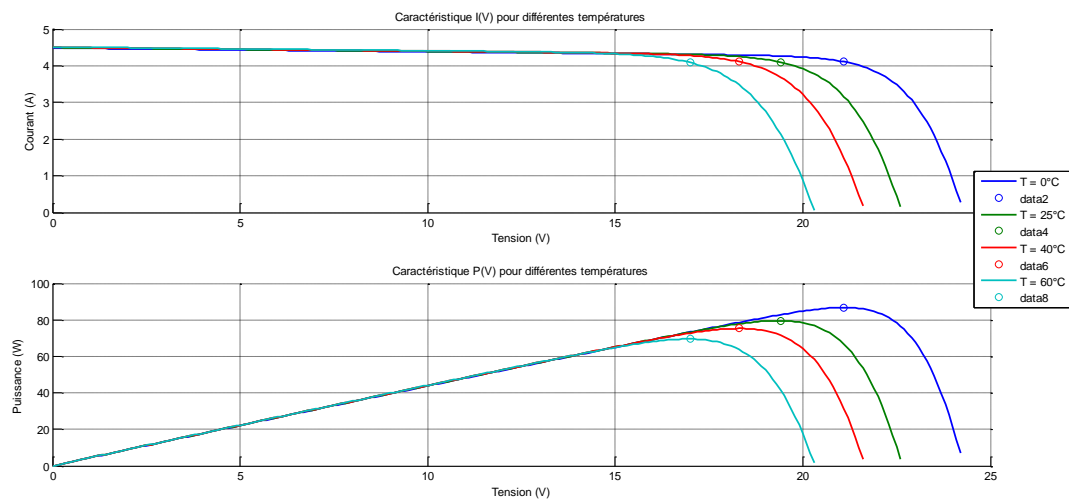


Figure III.42 : Influence de variation de températures sur le point de puissance maximale (MPPT)

Cette figure met en évidence l'influence de la température de fonctionnement sur la puissance maximale du module. On observe que l'augmentation de la température entraîne une diminution progressive de la puissance délivrée. Cette baisse est due principalement à la réduction de la tension en circuit ouvert, comme expliqué au chapitre 2. Plus la température est élevée, plus la dégradation de la puissance est prononcée au fil du temps.

3.3L'influence de l'irradiation sur le courant généré

Le courant produit par le module photovoltaïque dépend directement de l'irradiation solaire reçue. L'analyse de la courbe de la figure 4 montre clairement que lorsque l'éclairement augmente, le courant généré augmente également. Inversement, une baisse de l'irradiation entraîne une diminution du courant.

Cette variation s'explique par le fait que le courant photogénéré est proportionnel à l'irradiation, comme mentionné dans le chapitre précédent. Ainsi, toute fluctuation de l'ensoleillement impacte instantanément la quantité de courant produite par le module.

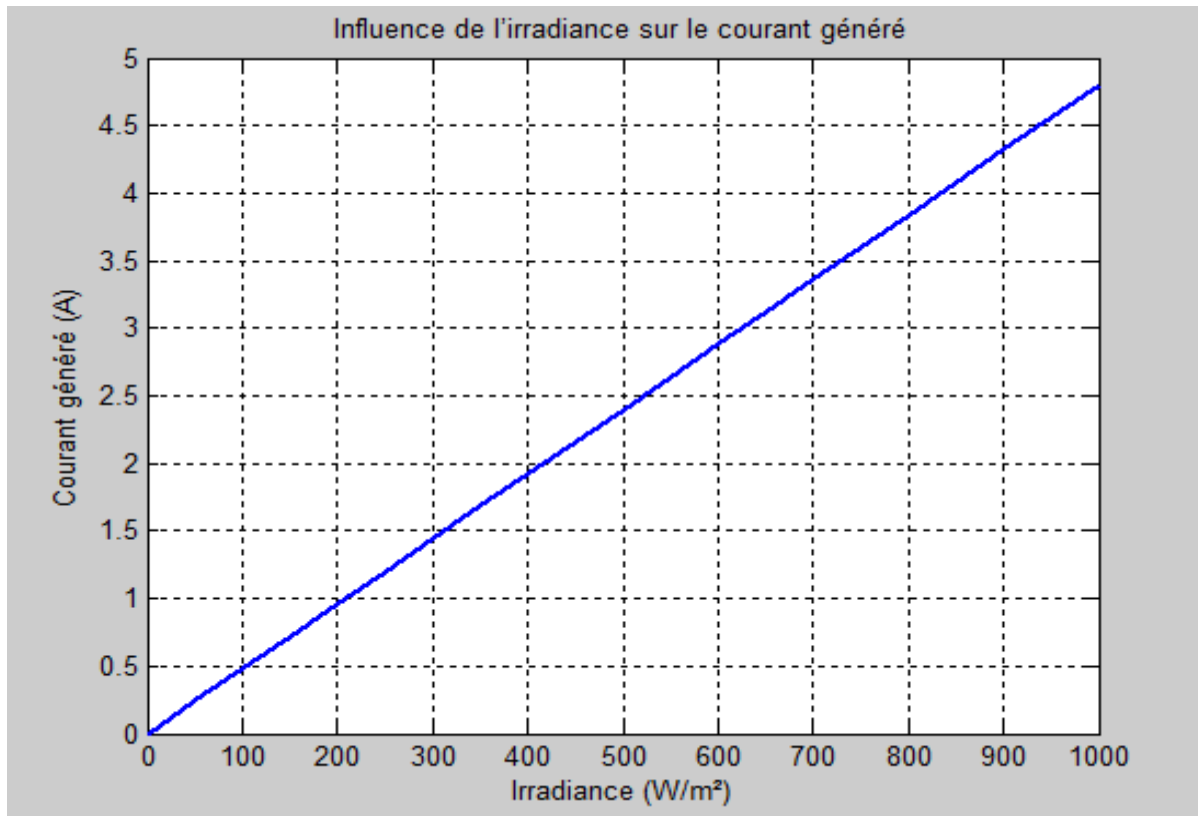


Figure III.43 : Influence de l'irradiation sur le courant généré par le module photovoltaïque

La figure 4 met en évidence la relation proportionnelle entre le niveau d'irradiation solaire et le courant de sortie du module. Une augmentation de l'éclairement entraîne une élévation du courant généré, illustrant la sensibilité du comportement électrique du module aux variations d'ensoleillement.

3.4. L'influence de l'irradiation sur la puissance délivrée

La puissance maximale délivrée par un module photovoltaïque augmente de manière quasi linéaire avec l'irradiation solaire. Cette tendance est bien illustrée par la courbe présentée ci-dessous, qui montre que plus l'éclairement n'est élevé, plus la puissance produite n'est importante.

Cette évolution s'explique par la relation déjà citée dans le chapitre précédent, reliant la puissance maximale à l'irradiation. Ainsi, lorsque l'irradiance augmente, le courant généré augmente proportionnellement tandis que la tension reste relativement stable, ce qui conduit à une augmentation globale de la puissance.

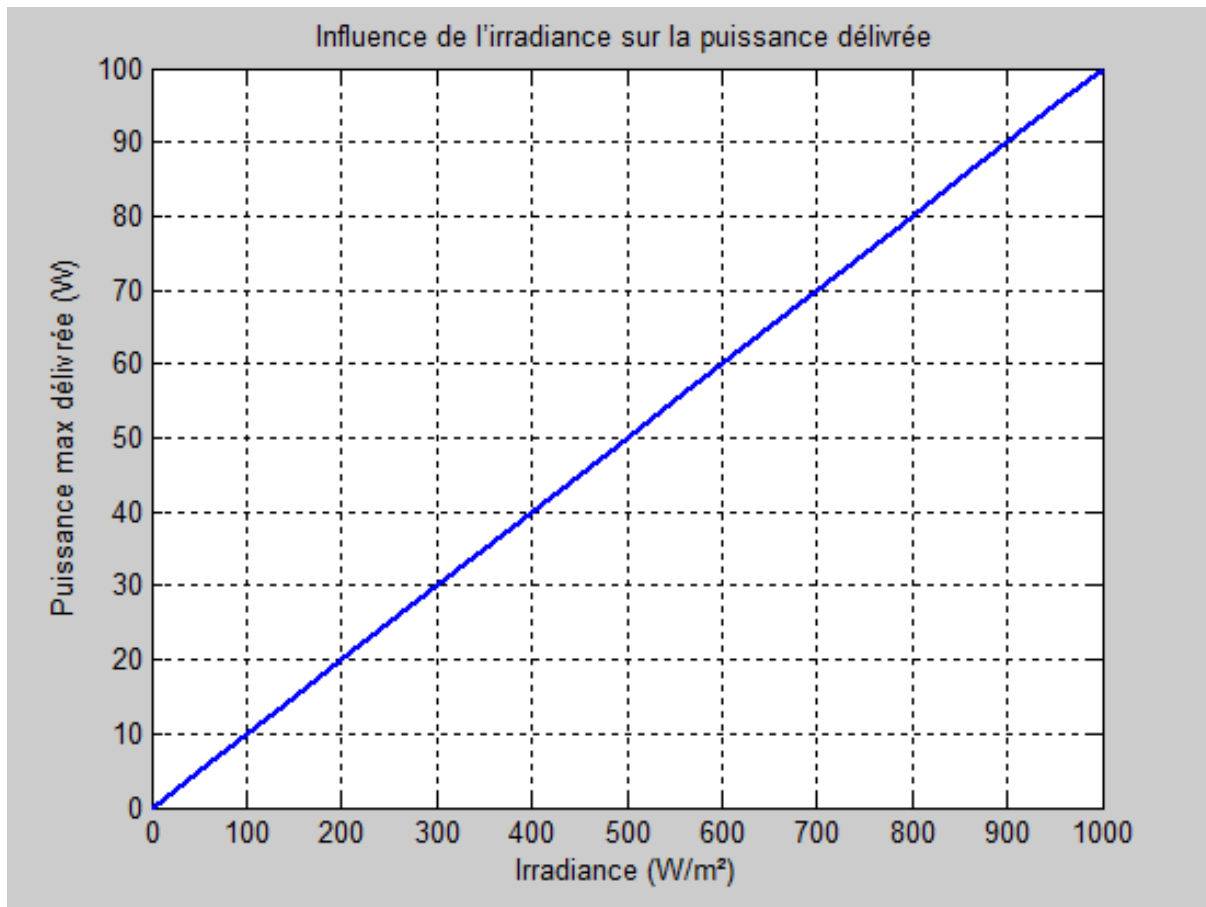


Figure III .44 : Influence de l'irradiation sur la puissance délivrée par le module photovoltaïque

La figure 5 illustre la progression de la puissance maximale en fonction de l'irradiation. On constate une relation quasi linéaire entre l'éclairement et la puissance, confirmant que la performance du module est fortement dépendante du niveau d'ensoleillement.

3.5. Influence de l'irradiation sur le point de puissance maximale (MPPT)

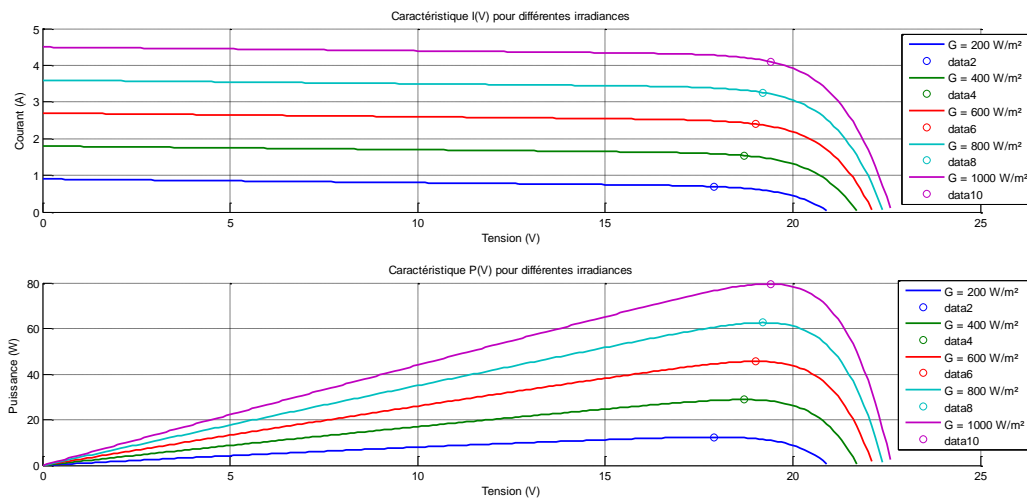


Figure III.45 : Variation de la puissance Maximale délivrée par le module photovoltaïque en fonction du temps pour différentes valeurs de l'irradiation solaire.

Chaque courbe correspond à un niveau d'irradiation donné (ex. 200 W/m², 400 W/m², 600 W/m², 800 W/m², 1000 W/m²). On observe que plus l'irradiation n'est élevée, plus la puissance maximale délivrée n'est importante. Cette figure illustre la relation quasi linéaire entre l'irradiation et la puissance produite, comme modélisé au chapitre 2.

L'augmentation de l'irradiation déplace le point de puissance maximale (MPPT) vers des valeurs supérieures Figure 6 . Cela signifie que le système doit continuellement ajuster son point de fonctionnement pour capter le maximum d'énergie disponible. Un système de suivi du MPPT efficace est donc essentiel pour maintenir un rendement optimal, surtout sous des conditions d'ensoleillement variables.

3.6.Effet combiné de l'irradiation et de la température sur le point de puissance maximale (MPPT)

Le point de puissance maximale (MPPT) d'un module photovoltaïque est simultanément influencé par l'irradiation solaire et la température de fonctionnement. L'augmentation de l'irradiation se traduit par une élévation du courant généré, ce qui entraîne une hausse de la puissance maximale. En revanche, une élévation de la température réduit sensiblement la tension en circuit ouvert, ce qui tend à diminuer la puissance maximale délivrée.

Lorsque ces deux paramètres varient simultanément, leur effet combiné peut soit renforcer, soit atténuer la puissance produite. Par exemple, une forte irradiation accompagnée d'une température élevée peut compenser partiellement les pertes liées à la chaleur, mais sans les annuler complètement. Cette interaction rend le suivi du point de fonctionnement optimal plus complexe, car le point de puissance maximale se déplace continuellement sur la courbe courant-tension (I-V) du module.

Dans ce contexte, l'utilisation d'un algorithme de suivi dynamique du MPPT s'avère indispensable. Il permet une adaptation en temps réel aux variations des conditions environnementales, afin d'optimiser en permanence le rendement énergétique du système photovoltaïque.

4.Évolution de la puissance délivrée par un panneau solaire en fonction du temps, pour différentes valeurs du coefficient de dégradation α

Le graphe 7 illustre les variations de la puissance délivrée par un panneau photovoltaïque en fonction du temps, pour différentes valeurs du coefficient de dégradation α . On observe une diminution progressive de la puissance avec le temps sur l'ensemble des courbes, ce qui est conforme aux attentes. Cette tendance s'explique par l'effet cumulatif du vieillissement du module, déjà modélisé dans le chapitre 2.

Cette représentation permet d'évaluer l'impact de plusieurs mécanismes de dégradation sur les performances du module sur une période de 25 ans. Les différentes courbes traduisent les contributions individuelles et/ou combinées de ces mécanismes à la baisse progressive de la puissance.

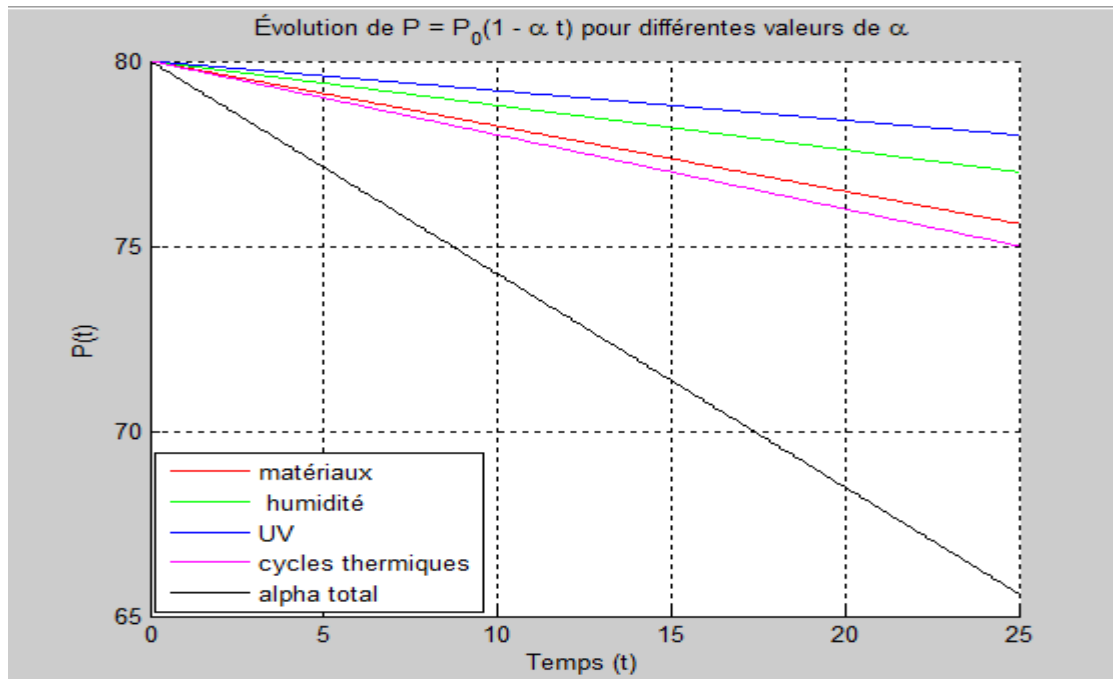


Figure III.46 : Evolution de la puissance délivrée par un panneau photovoltaïque en fonction du temps, pour différentes valeurs du coefficient de dégradation α

➤ **Interprétation des différentes courbes :**

- **Courbe rouge :** Dégradation due aux matériaux :

Cette courbe illustre la perte de performance liée à la dégradation intrinsèque des matériaux constituant le module photovoltaïque (verre, encapsulant, cellules, etc.). Ce type de dégradation est progressif et inévitable, même en l'absence de sollicitations environnementales agressives.

- **Courbe verte :** Effet de l'humidité :

L'humidité peut s'infiltrer à l'intérieur du module par des défauts d'étanchéité ou des microfissures, . Elle provoque alors une corrosion des contacts électriques ou une altération de l'adhérence entre les couches. La perte de puissance observée est supérieure à celle causée uniquement par la dégradation des matériaux .

- **Courbe bleue :** Impact des rayonnements UV :

Le rayonnement ultraviolet détériore certains matériaux polymères , en particulier l'EVA (éthylène-acétate de vinyle - encapsulant), ce qui affecte à long terme la transparence et

diminue la quantité de lumière transmise aux cellules. Bien que cet effet soit lent, il agit de manière continue sur le long terme.

- **Courbe magenta** : Cycles thermiques :

Les variations de température journalières et saisonnières provoquent des dilatations et contractions répétées au sein du module. Ces sollicitations mécaniques entraînent l'apparition de microfissures, de délaminations ou de ruptures de soudures, ce qui engendre une dégradation plus marquée que les mécanismes précédents.

- **Courbe noire** : Effet combiné (alpha total) :

Cette courbe représente la dégradation globale du module lorsque tous les mécanismes sont en compte simultanément. Elle montre un taux de perte cumulé, avec une puissance qui chute à environ 65 W après 25 ans, soit une diminution d'environ 18,75 % par rapport à la puissance initiale. Elle constitue une représentation réaliste du vieillissement en conditions extérieures typiques

5. Analyse critique des résultats

Les graphes étudiés mettent en évidence que la perte de performance d'un module photovoltaïque est un processus multifactoriel, dominé par l'interaction simultanée de plusieurs mécanismes environnementaux. Cette complexité impose, dans le cadre d'une installation à long terme, une série de mesures préventives essentielles :

- Le choix de matériaux résistants à l'humidité et aux rayonnements UV,
- L'amélioration de l'étanchéité des modules pour éviter les infiltrations,
- L'intégration d'un surdimensionnement ou d'un plan de maintenance préventive,

Ainsi que la prise en compte des coefficients de dégradation dans les modèles de simulation de productibilité, afin d'obtenir des prévisions plus fiables sur le long terme.

Les résultats obtenus à partir des simulations sous MATLAB permettent de caractériser avec précision le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque soumise à différentes conditions environnementales, en particulier la température et l'irradiation. Les courbes I-V et P-V générées dans divers scénarios évoluent de manière conforme aux principes physiques qui régissent le fonctionnement des cellules solaires :

- une augmentation de l'irradiation se traduit par une élévation du courant de court-circuit (I_{sc}) et de la puissance maximale (P_{max}),
- tandis qu'une élévation de la température provoque une baisse notable de la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et une légère diminution de P_{max} .

Par exemple, à température constante (25 °C), le courant simulé passe de $1,0\text{ A}$ à $5,0\text{ A}$ lorsque l'irradiation augmente de 200 à 1000 W/m^2 . Inversement, pour une irradiation constante de 1000 W/m^2 , la tension V_{oc} chute d'environ $0,63\text{ V}$ à $0,58\text{ V}$ lorsque la température augmente de 25 °C à 75 °C . Cette tendance est cohérente avec l'effet thermique sur le courant de saturation (I_0), tel que prévu par la théorie des semi-conducteurs.

Ces résultats sont en bon accord avec les données expérimentales issues de la littérature. Par exemple, dans l'étude de Diantoro et al. (2018) menée sur des cellules photovoltaïques en silicium monocristallin, la tension de circuit ouvert mesurée à 33 °C était de $0,5728\text{ V}$, avec un courant de court-circuit de $0,7608\text{ A}$. Nos simulations, réalisées dans des conditions similaires ($G = 1000\text{ W/m}^2$, $T \approx 30\text{ °C}$), donnent des résultats comparables, avec $V_{oc} \approx 0,57\text{ V}$ et $I_{sc} \approx 0,76\text{ A}$. Cette concordance valide l'approche utilisée, notamment le modèle de Shockley, sous réserve que les paramètres du modèle (facteur d'idéalité n , courant de saturation I_0 , et photocourant de référence) soient convenablement calibrés.

Cependant, certaines divergences peuvent apparaître, en particulier dans la zone de puissance maximale. Elles s'expliquent principalement par les simplifications introduites dans le modèle, telles que l'absence de résistance série (R_s) et de résistance shunt (R_{sh}), ou l'hypothèse de valeurs fixes pour I_0 , alors que ce paramètre est en réalité fortement dépendant de la température.

6. Analyse Comparative de la Dégradation des Panneaux Solaires en Algérie après 20 Ans d'Exposition Climatique

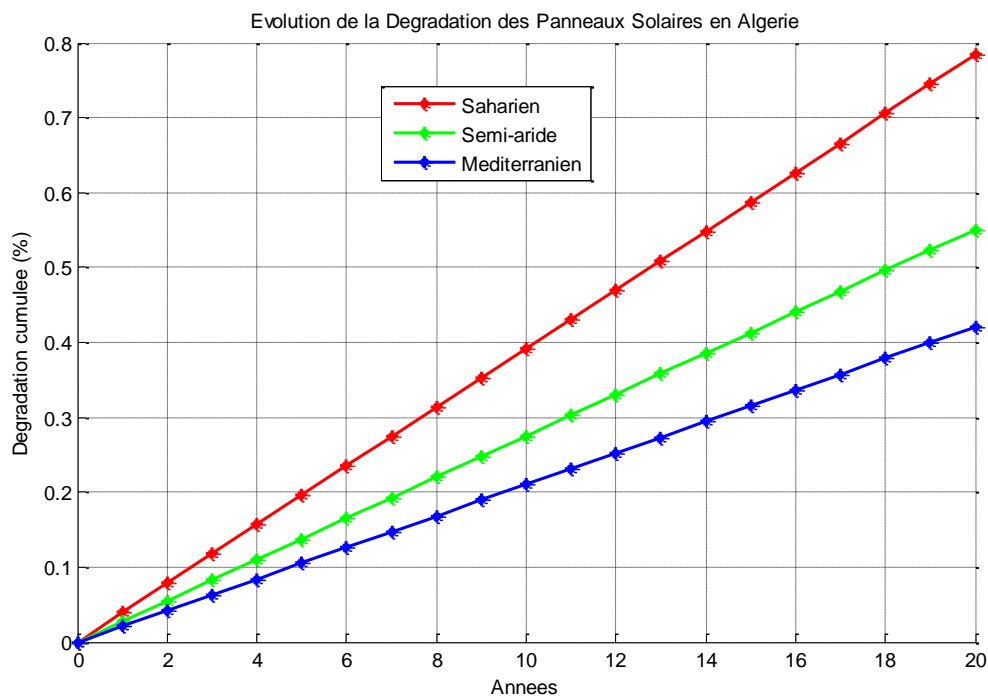


Figure III.47 : Evolution de la dégradation des panneaux solaires en Algérie

Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué la dégradation des performances des modules photovoltaïques installés depuis 20 ans sur quatre sites représentatifs des différentes zones climatiques de l'Algérie : **Bouzareah** (zone méditerranéenne), **Batna** (zone semi-aride), **Ghardaïa** (zone semi-aride), et **Adrar** (zone saharienne). Voir figure ci-dessus

Résultats de la Dégradation Moyenne Observée

Zone climatique	Localisation(s)	Taux de dégradation (%)
Saharienne	Adrar	0,78 %
Semi-aride	Batna, Ghardaïa	0,55 %
Méditerranéenne	Bouzareah	0,42 %

➤ *Interprétation des Résultats*

• **Zone saharienne (Adrar – 0,78 %)**

Cette région enregistre la plus forte dégradation des modules photovoltaïques. Les conditions climatiques extrêmes, caractérisées par des températures très élevées, un rayonnement UV intense et des cycles thermiques journaliers importants, contribuent à l'usure accélérée des matériaux encapsulants et au vieillissement prématuré des cellules.

• **Zone semi-aride (Batna, Ghardaïa – 0,55 %)**

Dans ces régions, les modules présentent une dégradation modérée. Bien que les températures soient élevées en été, les conditions sont relativement moins extrêmes que dans le sud saharien. La baisse du taux d'humidité et l'alternance thermique influencent néanmoins les performances à long terme.

• **Zone méditerranéenne (Bouzareah – 0,42 %)**

Cette zone montre la plus faible dégradation, principalement grâce à un climat tempéré, une humidité modérée et des températures plus douces, réduisant ainsi le stress thermique subi par les modules. Ces conditions favorisent une meilleure longévité des composants photovoltaïques.

7. Conclusion

À l'issue de ce chapitre, il apparaît clairement que le modèle basé sur l'équation de Shockley constitue un outil pertinent et efficace pour simuler et analyser le comportement électrique des cellules photovoltaïques. Les simulations réalisées sous MATLAB ont permis de reproduire fidèlement les variations du courant, de la tension et de la puissance en fonction des paramètres environnementaux, notamment la température et l'irradiation.

Les résultats obtenus montrent une bonne cohérence avec les données expérimentales issues de la littérature, confirmant ainsi la validité du modèle utilisé dans des conditions standards. Toutefois, pour améliorer davantage la précision et la représentativité des simulations, il serait pertinent d'intégrer une modélisation plus complète prenant en compte les résistances série et

parallèle, ainsi qu'un ajustement dynamique du courant de saturation en fonction de la température.

L'analyse de l'évolution de la puissance délivrée par les modules photovoltaïques sur le long terme met en évidence une dégradation progressive, plus ou moins prononcée selon les conditions environnementales. Cette diminution de performance, liée à divers mécanismes de vieillissement tels que l'humidité, les rayonnements UV, les cycles thermiques ou encore l'altération des matériaux, souligne la nécessité d'inclure les effets de la dégradation dans les études de productibilité pour des estimations plus réalistes.

Par ailleurs, l'étude de cas menée sur quatre sites algériens représentatifs (Bouzareah, Batna, Ghardaïa et Adrar) révèle une corrélation claire entre les conditions climatiques et le rythme de dégradation. Les régions sahariennes se distinguent par une usure plus marquée, tandis que les zones à climat méditerranéen affichent une meilleure stabilité des performances dans le temps.

Ces résultats soulignent l'importance de sélectionner des technologies photovoltaïques adaptées au contexte climatique local et de définir des stratégies de maintenance différenciées afin d'assurer la fiabilité et la durabilité des installations solaires. En définitive, cette étude constitue une contribution significative à la compréhension du comportement des systèmes photovoltaïques en conditions réelles et ouvre la voie à des travaux futurs fondés sur des modèles plus dynamiques et représentatifs du terrain.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

IV.1 Introduction :

Dans le cadre de ce projet, nous avons conçu et réalisé un prototype de système automatique destiné à assurer le nettoyage régulier d'un panneau solaire sans intervention humaine. Le système repose sur une idée simple mais efficace : au lieu d'utiliser des capteurs complexes pour détecter la saleté ou la baisse de performance, une horloge temps réel (RTC) est utilisée pour déclencher le nettoyage à intervalles réguliers, en l'occurrence une fois toutes les 24 heures. Cette solution permet de réduire considérablement les coûts et la complexité du système, tout en garantissant un entretien quotidien des panneaux solaires.

Ce chapitre présente les principales étapes de la mise en œuvre du projet : la simulation du système sous Proteus, la réalisation pratique, ainsi que les tests fonctionnels et l'analyse du comportement du système.

IV.2 Présentation du prototype

Le cœur du système est constitué d'un microcontrôleur (type Arduino) programmé pour lire l'heure à partir de l'horloge RTC. À une heure précise de la journée (par exemple à 6h du matin), le microcontrôleur active automatiquement un mécanisme de nettoyage, généralement constitué d'une brosse motorisée qui se déplace le long du panneau pour éliminer la poussière ou les débris accumulés. Ce système peut être alimenté par le même panneau solaire qu'il entretient, assurant ainsi une autonomie énergétique totale.

Ce prototype, bien que simple, offre une solution pratique et robuste pour les installations photovoltaïques situées dans des environnements poussiéreux, en assurant un entretien régulier sans capteurs ni supervision permanente. Il représente une approche économique et efficace pour préserver le rendement énergétique des panneaux solaires sur le long terme.

IV.3 Les étapes de la réalisation

IV.3.1 Partie matérielle

Afin de réaliser notre système de nettoyage automatique pour panneau solaire, un ensemble de composants électroniques a été sélectionné avec soin, en tenant compte de leur fiabilité, de leur simplicité d'intégration ainsi que de leur compatibilité avec une architecture embarquée à base de microcontrôleur.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

Ci-après les principaux éléments ayant servi à la conception du dispositif :

- **Carte Arduino Uno :**

La carte Arduino Uno constitue l'unité centrale de traitement du système. Elle est chargée de l'exécution du programme de pilotage, de la communication avec l'horloge temps réel, ainsi que du contrôle des moteurs. Ce choix s'explique par sa facilité de mise en œuvre, sa large diffusion dans la communauté des développeurs embarqués, ainsi que par la disponibilité de ressources documentaires et de bibliothèques logicielles adaptées.

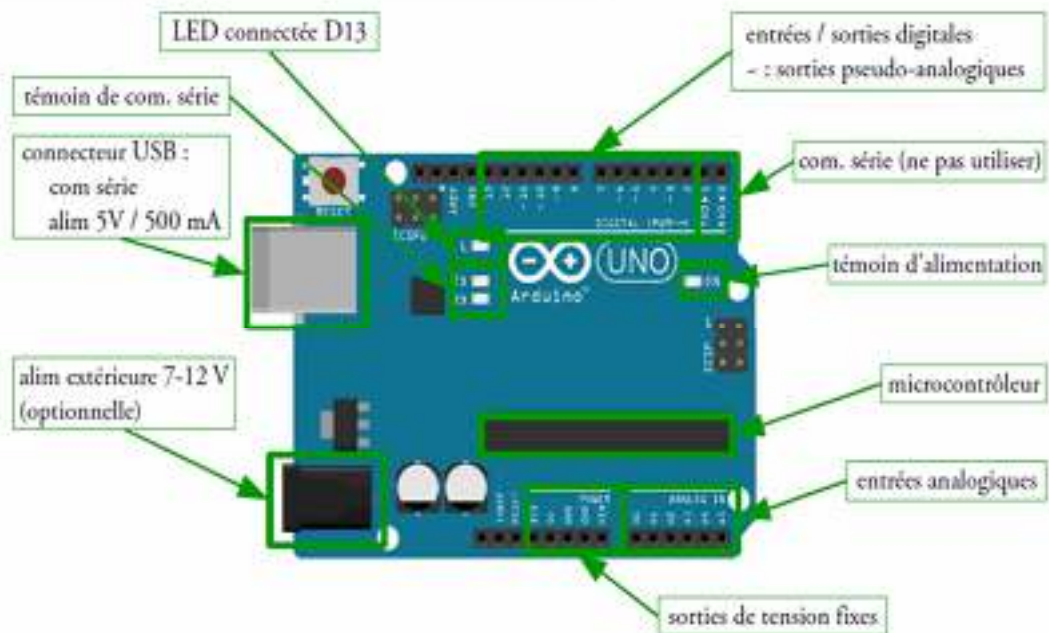


Figure IV.48 : carte Arduino UNO

- **Module RTC DS1307 (horloge temps réel) :**

Ce module permet de conserver une mesure précise du temps, y compris en cas de coupure d'alimentation, grâce à l'intégration d'une pile de sauvegarde. Il est utilisé pour programmer l'exécution automatique du cycle de nettoyage à un moment précis de la journée, avec une répétition toutes les 24 heures. Cette approche permet d'assurer un nettoyage régulier.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

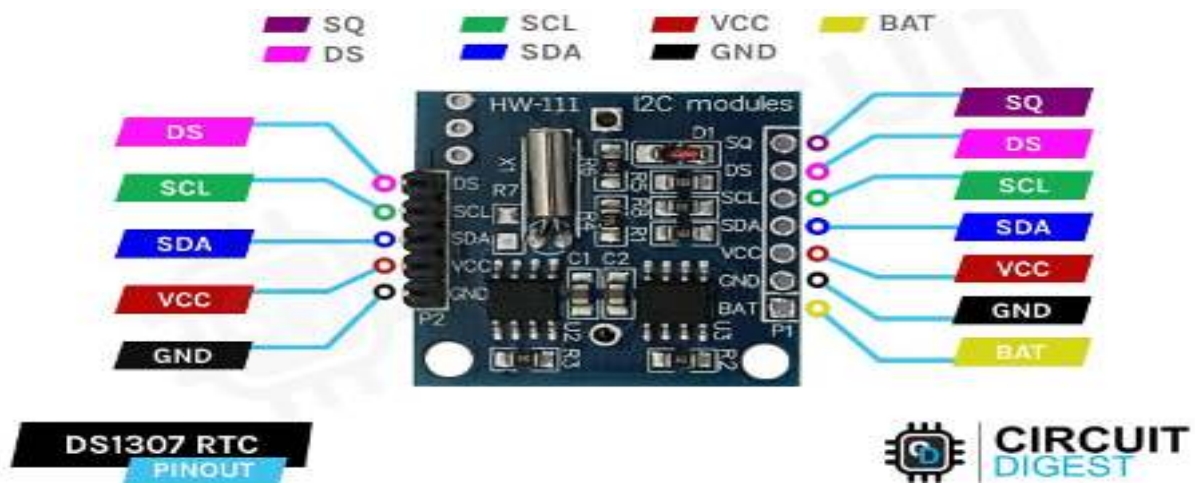


Figure IV.49 : module DS1307 RTC (Real Time Clock) [24]

- **Deux moteurs à courant continu (DC) :**

Les moteurs à courant continu sont employés pour actionner le mécanisme de nettoyage. L'un est chargé du déplacement linéaire de la brosse sur la surface du panneau solaire, tandis que le second peut, selon la configuration mécanique, assurer une rotation ou un mouvement complémentaire.



Figure IV.50 : Moteur DC à courant continu

- **Module de commande de moteurs (type L298N) :**

Ce module fait office d'interface de puissance entre le microcontrôleur et les moteurs. Il permet de contrôler la direction et la vitesse de rotation des moteurs via des signaux de commande provenant de l'Arduino. Il garantit également une alimentation adéquate des charges motrices.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

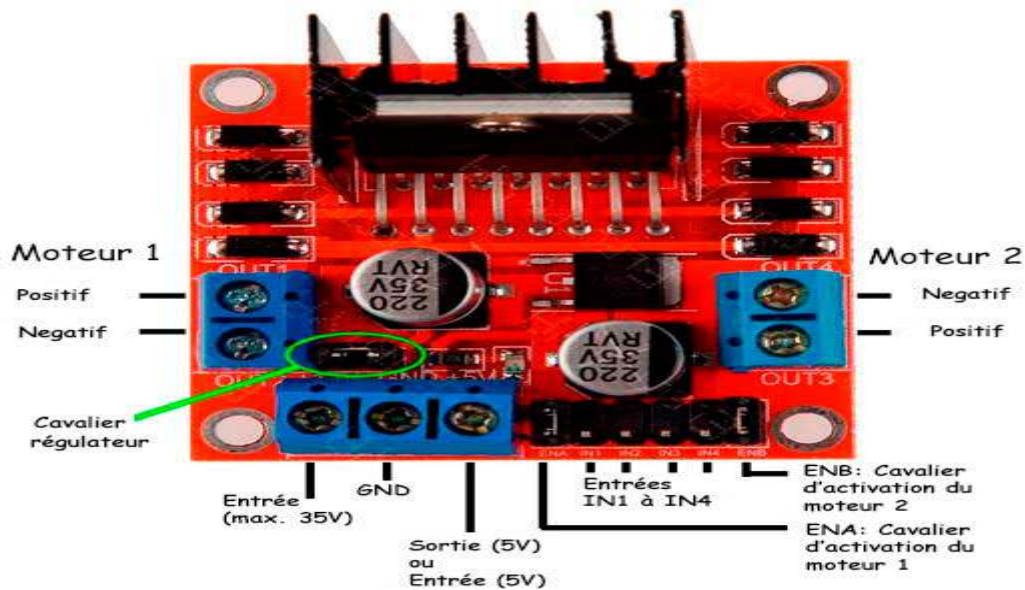


Figure IV.51: Driver L298N [20]

- **Écran LCD I2C 16x2 :**

L'afficheur LCD permet de visualiser des informations utiles relatives au fonctionnement du système, telles que l'heure courante, l'état du cycle (attente, en cours, terminé), ou des messages de diagnostic. Grâce à l'utilisation de l'interface I2C, le câblage est réduit à deux lignes de communication, ce qui simplifie le montage et libère des broches sur la carte Arduino.



Figure IV.52 : afficheur LCD avec module I2C. [21]

- **Pompe à eau :**

C'est un dispositif électromécanique, contrôlée automatiquement par la carte. Grâce à ce contrôle, on peut automatiser l'allumage et l'arrêt de la pompe selon un horaire programmé.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique



Figure IV.53 : pompe à eau. [22]

- **Un relai :**

C'est un dispositif électromécanique, dans notre montage il agit comme un interrupteur commandé électriquement par un signal venant de la carte arduino pour faire fonctionner la pompe à eau en toute sécurité.



Figure IV.54 : module relai. [23]

L'ensemble des composants permet de réaliser un système autonome, robuste et facilement reproductible, tout en évitant l'usage de capteurs complexes. L'alimentation du dispositif peut être assurée directement par le panneau solaire, rendant le système particulièrement adapté aux installations isolées ou à faible maintenance, notamment dans les zones à fort ensoleillement et à forte exposition aux poussières.

IV.3.2 Partie logiciel

- **Arduino :**

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

Le logiciel Arduino constitue l'environnement de développement principal pour la programmation des cartes Arduino. Il s'agit d'un logiciel open source, gratuit et multiplateforme. L'Arduino permet d'écrire, de compiler et de téléverser des programmes, appelés sketches, sur les microcontrôleurs des cartes Arduino.

L'interface de l'Arduino est conçue pour être simple et accessible, même pour les débutants. Elle propose des fonctionnalités essentielles telles que l'édition de code en langage C/C++, la compilation pour vérifier la syntaxe et la cohérence du programme, ainsi que le téléversement direct du code compilé vers la carte Arduino via un port USB. Par ailleurs, il intègre un moniteur série qui facilite la communication en temps réel entre l'ordinateur et la carte, permettant ainsi de visualiser les données échangées ou de déboguer le programme.

Le logiciel offre également une gestion simplifiée des bibliothèques, qui sont des ensembles de fonctions préprogrammées permettant d'étendre les capacités des cartes Arduino, notamment pour interfacier divers capteurs, modules ou composants électroniques. Cette modularité contribue à la polyvalence et à la popularité de la plateforme Arduino dans de nombreux domaines, allant de l'éducation à la recherche, en passant par l'ingénierie et les projets personnels.

ISIS Protues :

ISIS (Intelligent Schematic Input System) est un module du logiciel Proteus, utilisé pour la conception et la simulation de circuits électroniques. Il permet de créer des schémas électriques, d'ajouter des composants, et surtout de simuler leur fonctionnement sans avoir besoin de construire le circuit physiquement.

On a utilisé ce logiciel pour simuler notre montage afin de regrouper tous les composants avec un programme Arduino qui assure le fonctionnement.

La figure ci-dessous illustre le branchement de notre système

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

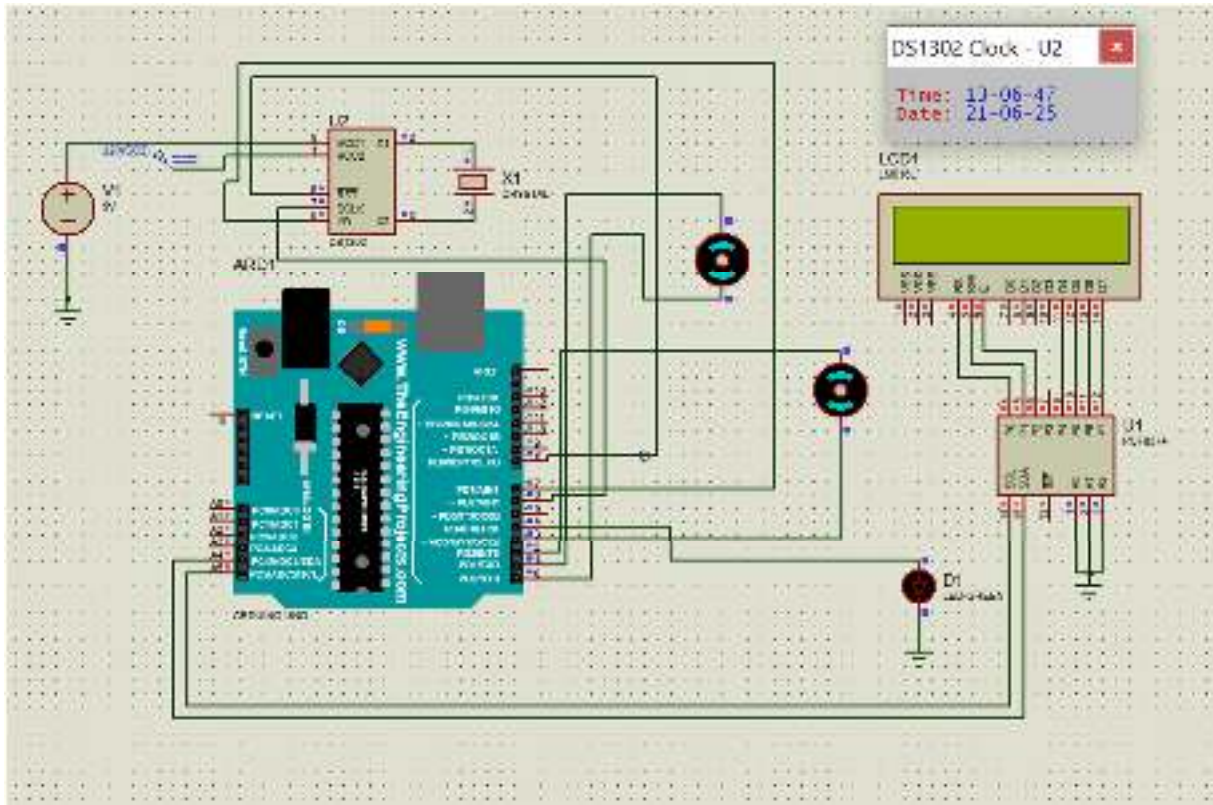


Figure IV.55: schéma de simulation sur ISIS Protues

IV.4 Conception du système

Un organigramme fonctionnel a été élaboré pour décrire les différentes étapes du fonctionnement : lecture de l'heure, comparaison avec l'heure de déclenchement, activation des moteurs de nettoyage, arrêt automatique et retour à l'état de veille.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

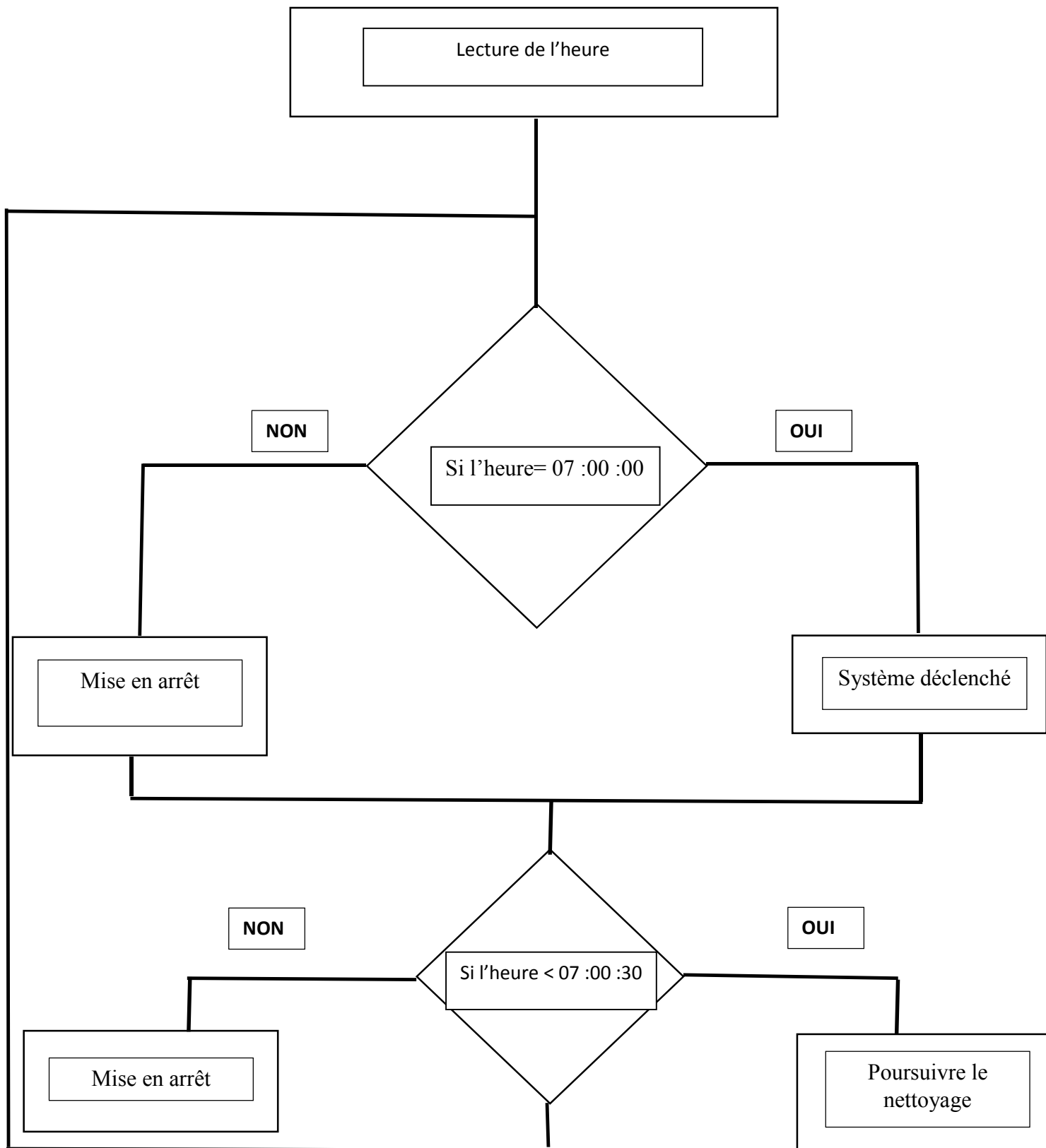


Figure 56 : Organigramme du système réalisé

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

IV.4.1 Assemblage des composants :

Le système est constitué :

- D'une carte Arduino Uno, connectée à un module RTC (DS1302),
- De deux moteurs à courant continu (DC) pour le mouvement du mécanisme de nettoyage.
- D'un driver de moteur L298N.
- D'un écran LCD I2C 16x2 pour l'affichage d'informations.

Chaque composant a été câblé selon son branchage spécifique ;

- Le module RTC communique via une interface série avec la carte Arduino.
- Le module driver reçoit des signaux de commande depuis l'Arduino pour alimenter les moteurs.
- L'écran LCD est connecté via le protocole I2C pour afficher l'heure actuelle et l'état du système.



Figure IV. 57 : image du système de nettoyage

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

Un support mécanique simple a été conçu pour fixer la brosse ou le mécanisme de nettoyage, entraîné par les moteurs. Le système est alimenté par une source externe, ou potentiellement par le panneau solaire lui-même via une batterie tampon.

IV.4.2 Les étapes de simulation

Le programme a été écrit en langage Arduino (voir l'annexe). Il inclut les bibliothèques nécessaires (RTClib.h, Wire.h, LiquidCrystal_I2C.h, iarduino_RTC.h,) pour gérer respectivement l'horloge, l'interface I2C et l'écran LCD.

les étapes de simulation sont :

- Initialisation des composants.
- Lecture continue de l'heure à partir du module RTC.
- Comparaison de l'heure avec une valeur prédéfinie (par exemple 06h00).
- Si la condition est remplie, activation des moteurs pendant une durée fixe (ex. 30 secondes).
- Arrêt des moteurs et affichage de l'état « Nettoyage terminé ».
- Retour à la boucle de veille.

IV.5. Tests et validation

Le prototype a été testé en conditions réelles simulées pour valider son autonomie et son efficacité. Les résultats ont montré que le système répond aux attentes : il déclenche le nettoyage automatiquement à l'heure définie, active correctement les moteurs, et signale chaque étape sur l'écran LCD.

L'objectif de cette phase était de vérifier le bon fonctionnement du système de nettoyage d'évaluer la précision du déclenchement horaire, la fiabilité de la commande des moteurs, la stabilité du système dans le temps, ainsi que l'efficacité réelle du nettoyage effectué de manière autonome.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

IV.5.1. Déroulement des tests

Les tests ont été effectués en conditions contrôlées, sur une maquette intégrant un panneau solaire simulé, une brosse motorisée et les différents composants électroniques. Le nettoyage a été programmé pour se déclencher chaque jour à 07h00, à l'aide du module d'horloge temps réel (RTC DS1307). Plusieurs cycles de nettoyage ont été observés sur plusieurs jours consécutifs.

Avant chaque déclenchement, une fine couche de poussière a été appliquée manuellement sur le panneau afin de simuler des conditions réelles d'empoussièrement. Le système a ensuite été mis sous tension, et son comportement a été surveillé à l'aide de l'affichage LCD et d'un chronomètre externe pour vérifier la synchronisation.

IV.5.2 Résultats observés

Dans l'ensemble, le système a démontré une bonne stabilité et un comportement cohérent :

- Le module RTC a permis un déclenchement très précis à l'heure souhaitée. Aucun décalage notable n'a été relevé au cours des différents jours de test. Même en cas de coupure temporaire de l'alimentation, l'horloge a conservé l'heure exacte grâce à la pile de sauvegarde intégrée.
- Les moteurs à courant continu, contrôlés via le driver L298N, se sont activés correctement à chaque déclenchement. Ils ont permis à la brosse de parcourir toute la surface du panneau selon le schéma défini, avec une durée de fonctionnement d'environ 30 secondes, suffisante pour un nettoyage superficiel.
- L'écran LCD I2C a également bien rempli son rôle en affichant des informations claires sur l'état du système (heure actuelle, démarrage du nettoyage, fin du processus). Cela a facilité la supervision lors des tests.

Enfin, l'efficacité du nettoyage a pu être évaluée visuellement. La brosse motorisée a réussi à retirer une grande partie de la poussière, rendant la surface du panneau visiblement plus propre.

Chapitre IV : conception et réalisation d'un système de nettoyage automatique

IV.6. Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté les différentes étapes de la réalisation de notre système de nettoyage automatique d'un panneau solaire, depuis sa conception jusqu'à sa mise en œuvre. Le prototype, basé sur une horloge temps réel et un mécanisme motorisé, a démontré un fonctionnement autonome et fiable. Les tests effectués ont validé la précision du déclenchement, l'efficacité du nettoyage de surface, ainsi que la stabilité générale du système. Malgré l'absence de capteurs, les résultats sont satisfaisants pour une application simple et périodique. Le système réalisé remplit ainsi les objectifs initiaux et ouvre la voie à d'éventuelles améliorations, notamment en matière d'adaptabilité et de gestion intelligente de l'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'explorer de manière approfondie la dégradation des panneaux solaires sous l'effet de divers facteurs environnementaux tels que la poussière, l'humidité, les rayons UV et les variations de température. Ces éléments, souvent négligés, ont un impact direct et mesurable sur le rendement et la durée de vie des systèmes photovoltaïques.

Grâce à une modélisation électrique précise et à une simulation numérique réalisée sous MATLAB, nous avons pu quantifier l'influence de la température et de l'irradiation solaire sur les performances électriques de la cellule photovoltaïque. Les résultats obtenus confirment que si l'irradiation accroît la production d'énergie, l'élévation de la température, au contraire, réduit l'efficacité du système. Pour répondre à ces défis, une solution innovante a été proposée : la conception et la réalisation d'un système intelligent de surveillance et de nettoyage automatique. Ce dispositif, capable de détecter l'encrassement et d'intervenir sans assistance humaine, constitue une réponse concrète pour optimiser la performance des installations solaires dans des environnements hostiles.

En conclusion, cette étude met en lumière l'importance de l'entretien automatisé et de la surveillance en temps réel dans la pérennisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. Elle ouvre également la voie à de futures améliorations, notamment en intégrant des solutions connectées ou des algorithmes de prédiction pour une gestion encore plus intelligente de l'énergie solaire.

Référence et bibliographie

- [1] Adapté de diverses représentations pédagogiques – ADEME, IRENA, Wikipédia].
- [2] <https://www.futura-sciences.com>
- [3] <https://www.velocitaenergies.fr>
- [4] <https://www.ksb-fluidexperts.fr>
- [5] <https://www.irena.org/publications>
- [6] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470974704>
- [7] Nelson, J. The Physics of Solar Cells, Imperial College Press, 2003. Chapitre 3 : The p-n Junction
- [8] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley, 2011.[8]
- [9] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, 2013 (4th ed.).[9]
- [10] Green, M. A. (2000) "Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years." Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 13(5), 447–455.[10]
- [11] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. 4th Edition, Wiley.
- [12] Messenger, R. A., & Ventre, J. P. (2010) Photovoltaic Systems Engineering. 3rd Edition, CRC Press.
- [13] Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013) "Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Wiley.
- [14] Masters, G. M. (2013) Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2nd Edition, Wiley.
- [15] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Filho, E. R. (2009) "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays"
- [16] Wohlgemuth, J. H. (2008). "Reliability of PV modules" Conference Record of the 2008 IEEE 33rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 1–6
- [17] Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). "Photovoltaic Degradation Rates—An Analytical Review"[17]

- [18] Quaschnig, V. (2022). Understanding Renewable Energy Systems. Routledge
- [19] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley.
- [20] Luque, Antonio, and Steven Hegedus (Eds.). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley, 2011.
- [21] Green, M. A., "Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications", Prentice-Hall, 1982.
- [22] <https://www.se.com/>
- [23] adaptée de *Keyestudio*, documentation technique du module relais 5V, 1 canal, 2022.
- [24] <https://learn.adafruit.com/ds1307-real-time-clock-breakout-board>

Résumé

Ce mémoire traite de la dégradation des panneaux solaires au fil du temps, en intégrant les principaux facteurs environnementaux tels que la poussière, l'humidité, les rayonnements UV et les variations de température, qui altèrent progressivement leur rendement énergétique.

Après une modélisation électrique rigoureuse des cellules photovoltaïques basée sur l'équation de Shockley modifiée, une simulation numérique sous MATLAB a permis d'étudier l'impact de l'irradiation et de la température sur les performances électriques (courbes I-V et P-V, Voc, Isc, Pmax).

Les résultats ont montré que l'irradiation améliore la puissance produite, tandis que la température dégrade la tension de sortie. Pour contrer cette perte de performance, un prototype de système intelligent de surveillance et de nettoyage automatique a été conçu. Ce système autonome détecte l'encrassement des panneaux en temps réel et déclenche un nettoyage sans intervention humaine, garantissant ainsi un fonctionnement optimal et durable.

L'ensemble de ce travail démontre l'importance de la gestion intelligente des installations photovoltaïques pour maximiser leur efficacité, surtout dans les environnements à fortes contraintes climatiques.