



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie Électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies Électrotechnique énergies Renouvelables

Réf. :

Présenté et soutenu par :

Necib Mohamed Djoubrane Eddine
Boudounet Soufiane

Le : Lundi 26 mai 2025

Amélioration des performances d'une station PV destinée au pompage PV

Jury :

Dr.	GUERGAZI Aicha	MCA	Université de Biskra	Président
Pr.	MOUSSI Ammar	PR	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	MOHAMMEDI Messaoud	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024-2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Energies Renouvelables

Réf. : Entrez la référence du document

Amélioration des performances d'une station PV destinée au pompage PV

Le : Lundi 26 Mai 2025

Présenté par :

- NECIB Mohamed Djoubrane
- BOUDOUNET Soufiane

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. MOUSSI Ammar

Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Remerciement

*Avant tout, je remercie le bon dieu tout-puissant de nous avoir donné le courage
et la volonté nécessaires pour accomplir ce travail.*

*Nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la
réalisation de ce mémoire, en particulier le Professeur **Ammar Moussi**. Un grand
merci également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en
évaluant notre travail , Leurs remarques et suggestions ne feront que parfaire ce
travail.*

Dédicace

Je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour Ses bienfaits et Son soutien

tout au long de mon parcours.

*J'exprime ma profonde gratitude à mes chers parents, mon père **Nacer Eddine**
et ma mère **Boumaâraf Sabah**, pour leur amour, leurs sacrifices et leurs
prières constantes. Je remercie également mes sœurs, **Sara** et **Narimane**, pour
leur présence, leur soutien et leur tendresse inestimable.*

*Un remerciement spécial à mon binôme **Soufiane Boudounet**, pour son aide,
sa patience et sa précieuse collaboration.*

*Mes sincères remerciements à mes deux amies fidèles, **Fatima et Imen**, pour
leur encouragement et leur bienveillance.*

*Je tiens aussi à remercier mon ami et frère de cœur **Djerrou Sofiane**, pour son
soutien moral et sa présence constante.*

*Enfin, merci à toute ma famille, mes amis, et à toutes les personnes présentes et
qui m'ont soutenue de près ou de loin*

Djoubrane necib

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Mon cher grand-père **Messaoud** et ma chère grand-mère **Aïcha Lekssir**, pour leur sagesse, leur tendresse et leurs prières qui m'ont toujours accompagné.*

*Mon père **Rafik** et ma mère **Bezza Wafa**, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices silencieux.*

*Mes frères et sœurs : **Nessrine, Hadjar, Zakaria, Inès, Badr-elddine** et **Amir**, pour leur présence, leur affection et leurs encouragements tout au long de ce parcours.*

Je remercie également mes enseignants à toutes les étapes de ma scolarité pour leurs enseignements précieux, leur patience et leur soutien constant.

*Je tiens aussi à remercier mon binôme **Djoubrane Necib** et sa famille pour leur soutien et leur gentillesse.*

Mes amis proches pour leur amitié précieuse et leurs moments de partage.

Et tout particulièrement, à ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin, par un geste, une parole ou une pensée bienveillante.

Soufiane Boudounet

- Résumé

Ce mémoire a pour objectif l'amélioration des performances d'une station photovoltaïque destinée au pompage d'eau, à travers l'utilisation de techniques de refroidissement par eau. Le travail combine une étude théorique approfondie, une simulation sous MATLAB/Simulink et une validation expérimentale en conditions réelles. Les résultats montrent que la hausse de température des panneaux photovoltaïques réduit considérablement leur rendement, impactant négativement le débit d'eau. L'introduction d'un système de refroidissement par eau a permis une amélioration significative de l'efficacité du système. Ce projet apporte une contribution concrète à la valorisation des énergies renouvelables, notamment dans les zones isolées.

Mots-clés : énergie solaire, pompage photovoltaïque, panneaux PV, refroidissement par eau, rendement.

- Abstract

This work aims to improve the performance of a photovoltaic pumping system through water-based cooling techniques. The study integrates a thorough theoretical analysis under MATLAB/Simulink simulations, and an experimental validation in real operating conditions.

Results indicate that elevated panel temperatures significantly reduce electrical output, thereby decreasing water flow. Implementing a water cooling system led to a noticeable improvement in overall efficiency. This project contributes to the development of practical and sustainable renewable energy solutions, especially for remote areas lacking access to conventional energy.

Keywords: solar energy, photovoltaic pumping, PV panels, water cooling, efficiency.

- الملخص :

تهدف هذه المذكرة إلى تحسين أداء محطة طاقة شمسية مخصصة لضخ المياه، من خلال استخدام تقنيات التبريد بالماء. يجمع العمل مع تأكيد تجريبي للنتائج تحت ظروف عملية حقيقية. بين دراسة نظرية معمقة، ومحاكاة باستخدام أرضية MATLAB/Simulink

تُظهر النتائج أن ارتفاع درجة حرارة الألواح الكهروضوئية يؤدي إلى انخفاض كبير في كفاءتها، مما يؤثر سلبًا على معدل تدفق المياه. وقد سمح إدخال نظام تبريد بالماء بتحقيق تحسن ملحوظ في فعالية النظام. يُقدم هذا المشروع مساهمة عملية في تثمين مصادر الطاقة المتجددة، خاصة في المناطق المعزولة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الضخ الكهروضوئي، الألواح الشمسية، التبريد بالماء، المردودية

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : L'énergie solaire et la technologie photovoltaïque	4
Introduction	5
I.1 le soleil.....	5
I.1.1 Les Caractéristiques de notre Soleil	5
I.1.2 Le Soleil : Une Source Inépuisable et Durable d'Énergie	5
I.2 Le mouvement de la Terre.....	7
I.3 Les rayonnements solaires émis dans l'espace	7
I.3.1 Les rayonnements solaires atteignant la Terre	8
I.3.2 Types de rayonnement solaire à la surface terrestre.....	9
I.4 Les angles solaires	10
I.5 L'énergie solaire et la technologie photovoltaïque	11
I.5.1 Aperçu historique :.....	11
I.6 La technologie photovoltaïque : La cellule photovoltaïque comme composant essentiel.	12
I.6.1 Principe de fonctionnement.....	12
I.7 Classification des technologies de cellules solaires	12
I.7.1 Les cellules solaires de première génération.....	13
I.7.2 Cellules solaires de deuxième génération.....	13
I.7.3 Les cellules photovoltaïques de troisième génération	14
I.8 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	14
I.8.1 Modèle Équivalent d'une Cellule photovoltaïque avec un diode	14
I.9 La courbe I-V et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque	16
I.9.1 Les conditions standardisées (STC).....	17
I.10 Le générateur photovoltaïque.....	17
I.11 Les techniques d'association des cellules photovoltaïques.....	18
I.11.1 Association en série :.....	18
I.11.2 Association en parallèle :	18
I.11.3 Association mixte :.....	19
I.12 Les systèmes photovoltaïques.....	20
I.13 Les types des systèmes photovoltaïques.....	22
I.14 Les facteurs influençant le rendement du système photovoltaïque.....	22

I.15 Stratégies d'optimisation de l'absorption du rayonnement solaire par les cellules photovoltaïques	24
I.16 Réduction efficace de la température des cellules photovoltaïques.....	24
I.16.1 Le refroidissement par air :	25
I.16.2 Le refroidissement par eau :.....	26
Conclusion.....	31
Chapitre II : Système de pompage photovoltaïque	32
Introduction	33
II.1 Principe de fonctionnement du système de pompage photovoltaïque	33
II.2 Caractéristiques des pompes DC pour pompage photovoltaïque	34
II.2.1 Définition et principe de fonctionnement d'une pompe DC	34
II.2.2 Avantages et inconvénients des pompes DC	35
II.3 Composants clés du système de pompage photovoltaïque	36
II.3.1 Les panneaux photovoltaïque.....	36
II.3.2 Le régulateur de charge	36
II.3.3 La pompe DC :	37
II.3.4 Le système de stockage de l'eau (réservoir)	38
II.4 Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque	38
II.4.1 Dimensionnement du générateur photovoltaïque	38
II.5 Optimisation et performances du système	40
II.5.1 Orientation et inclinaison des panneaux solaires.....	40
II.5.2 Réduction des pertes énergétiques	40
II.6 Effets des conditions climatiques sur les performances d'un système photovoltaïque, en particulier sur le débit	41
II.6.1 Effet du rayonnement solaire (E) sur le débit	41
II.6.2 Effet de la température (T) sur le débit :.....	41
II.6.3 Relation combinée entre le rayonnement (E), la température (T) et le débit:	42
II.6.4 D'autres paramètres environnementaux (vent, poussière, humidité) sur le système PV	42
Conclusion.....	43
Chapitre III : L'application pratique	44
Introduction	45
III.1 La technique que nous avons adoptée pour améliorer les performances du panneau solaire connecté à un système de pompage.....	45

III.2 Les équipements utilisés dans notre expérience de pompage photovoltaïque	46
III.2.1 Le panneau solaire.....	46
III.2.2 La pompe à eau.....	47
III.2.3 MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	48
III.2.4 La batterie.....	49
III.3 Les composants Arduino et capteurs utilisés dans notre système de pompage photovoltaïque	50
III.3.1 Arduino UNO.....	50
III.3.2 Le capteur de température LM35.....	51
III.3.3 Le capteur de température DS18B20	51
III.3.4 Capteur de Courant ACS712.....	52
III.3.5 Capteur de tension DC0-25V.....	52
III.4 Pistolet thermomètre infrarouge.....	52
III.5 Les éléments de protection.....	52
III.5.1 Les fusibles.....	53
III.6 Outils pour l'installation de notre système de pompage	53
III.7 L'installation finale	56
Conclusion.....	58
Chapitre IV : Simulation/Résultats et discussion	59
Introduction	60
IV.1 Modèle du générateur PV.....	60
IV.2 Conversion DC-DC (Buck).....	61
IV.3 Simulation d'un système MPPT basé sur l'algorithme P&O sous MATLAB/Simulink	63
IV.4 Schéma final de la simulation du système photovoltaïque avec convertisseur Buck et algorithme MPPT P&O.....	64
IV.5 Courbes I-V et P-V obtenues par simulation	64
IV.6 Évolution des températures ambiante et de la cellule photovoltaïque avec et sans refroidissement	65
IV.6.1 Variation de la température d'eau de refroidissement	66
IV.7 Variation de la tension, le courant et la puissance de sortie	66
IV.8 Analyse du taux d'amélioration de la puissance grâce au refroidissement	68
Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70
Référence.....	72

Liste des symboles utilisés.....	77
Appendix.....	79

.

Liste des figures

I.1 Cycle de vie du soleil	5
I.2 La révolution de la Terre autour du Soleil	6
I.3 Le spectre électromagnétique solaire visible.	8
I.4 Les différents types de rayonnement solaire : direct, diffus et réfléchi.	9
I.5 Cellule photovoltaïque.....	11
I.6 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.7 Modélisation électrique équivalente d'une cellule photovoltaïque réelle.....	14
I.8 Courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module photovoltaïque.....	15
I.9 Structure d'un générateur photovoltaïque : de la cellule au générateur (Cellule → Module → Panneau → Générateur)	16
I.10 Association en série des cellules photovoltaïques.....	17
I.11 Association en parallèle des cellules photovoltaïques.....	18
I.12 Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension.....	22
I.13 Influence de la température sur les courbes courant-tension	22
I.14 Refroidissement des panneaux utilisant des dissipateurs thermiques.....	25
I.15 Image du refroidissement par convection naturelle et forcée de l'air	25
I.16 Refroidissement du panneau par immersion dans l'eau.....	26
I.17 (Ocean Sun, avec autorisation) : (a) Projet pilote d'Ocean Sun situé sur la côte ouest de la Norvège. (b) Modules posés directement sur la membrane. (c) Modules surélevés à l'aide de tuyaux en plastique.....	26
I.18 Pulvérisation d'eau sur les panneaux photovoltaïque	27
I.19 Pulvérisation avant-arrière du panneau solaire.....	28
I.20 flux d'eau uniforme sur la surface du panneau.....	28
I.21 Le circuit d'eau derrière le panneau.....	29
I.22 Modèle d'un capteur hybride PVT.....	30
II.1 Système du pompage solaire	33
II.2 Panneaux photovoltaïque	35
II.3 La pompe DC	36
III.1 Panneau photovoltaïque utilisé dans notre système.....	45
III.2 La pompe à eau 12V à courant continu	46

III.3 Technologie MPPT (P&O) : suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques.....	47
III.4 Technologie MPPT : suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques.....	48
III.5 ARDUINO UNO	49
III.6 Le capteur de température LM35.....	50
III.7 Le capteur de température LM35 avec ARDUINO	50
III.8 Capteur de courant ACS712.....	51
III.9 Capteur de tension DC0-25V.....	51
III.10 Pistolet thermomètre infrarouge.....	51
III.11 Les portes fusibles.....	52
III.12 Un fusible de 6(A).....	52
III.13 Les plaques de forex	53
III.14 Tuyaux d'eau	54
III.15 Modèle de l'entrée et la sortie	54
III.16 L'entrée et la sortie d'eau.....	54
III.17 Boîtier technique d'un système de pompage solaire autonome.....	55
III.18 Mise en place et câblage finale du système de pompage solaire avec système de refroidissement	56
III.19 Schéma de refroidissement des panneaux photovoltaïques par eau.....	56
IV.1 Modélisation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK à l'aide du bloc PV Array.....	59
IV.2 Schéma de simulation du convertisseur BUCK.....	60
IV.3 Modèle de simulation MPPT dans MATLAB.....	61
IV.4 Organigramme de l'algorithme MPPT P&O	61
IV.5 Schéma de simulation du convertisseur BUCK	62
IV.6 Courbes caractéristiques obtenues par simulation.....	63
IV.7 Température de la cellule PV et température ambiante dans les deux essais...	64
IV.8 Température de l'eau à l'entrée et à la sortie dans l'essai de refroidissement	65
IV.9 La tension et le courant de sortie dans les deux essais	66
IV.10 La puissance du module dans les deux essais	66
IV.11 La variation de puissance entre les deux essais	67

Liste de Tableau

I.1 Comparaison entre le soleil et la terre	6
I.2 Principales ondes avec leurs longueurs d'onde et leurs usages.....	8
I.3 Conditions de test standard STC	17
III.1 Caractéristique technique et physique de panneau photovoltaïque ALPV85....	47
III.2 Caractéristiques techniques de la pompe à eau 12V DC	48
III.3 Caractéristiques principales de contrôleur solaire Biltema25-5099	49
III.4 Caractéristiques principales de la batterie RITAR 100AH12V.....	49
III.5 Caractéristiques principales de la carte ARDUINO UNO.....	50
III.6 Caractéristiques de base du capteur LM35.....	51

Introduction Général

Introduction Générale

L'énergie solaire représente aujourd'hui l'une des principales alternatives aux sources d'énergie fossiles, tant en raison de son abondance que de son faible impact environnemental. Face aux défis croissants que sont le changement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables, les énergies renouvelables s'imposent comme un choix stratégique incontournable. Parmi celles-ci, l'énergie photovoltaïque connaît une croissance significative, en particulier dans les pays bénéficiant d'un fort ensoleillement, à l'instar de l'Algérie, qui figure parmi les pays au plus fort potentiel solaire dans le monde.

Dans ce contexte, l'exploitation de l'énergie solaire dans des applications concrètes, notamment dans les zones rurales et isolées, revêt une importance cruciale. Parmi les applications prometteuses, le pompage photovoltaïque constitue une solution durable et autonome pour l'approvisionnement en eau potable ou l'irrigation agricole, sans dépendance à un réseau électrique centralisé.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, le rendement des systèmes photovoltaïques reste limité par plusieurs facteurs environnementaux, au premier rang desquels figure l'élévation de la température des modules solaires. En effet, de nombreuses études ont montré qu'une hausse de la température des cellules photovoltaïques entraîne une baisse significative de la tension de sortie, ce qui diminue la puissance électrique produite. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les régions chaudes, où les températures élevées sont fréquentes, notamment en été.

Pour faire face à ce problème, plusieurs solutions techniques ont été proposées afin d'améliorer les performances thermiques des modules photovoltaïques. Parmi ces solutions, le refroidissement à l'eau s'est révélé être une méthode efficace, simple et accessible pour maintenir les modules à des températures modérées, favorisant ainsi une meilleure efficacité énergétique. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, qui vise à étudier et à optimiser les performances d'une station solaire dédiée au pompage de l'eau, en intégrant une technique de refroidissement par eau. Pour ce faire, une méthodologie complète a été adoptée, articulée autour des axes suivants :

- Une étude théorique approfondie sur le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, l'impact thermique sur les cellules solaires, et les principes du pompage solaire de l'eau .
- Une modélisation et une simulation numérique du système à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink ;

- Une validation expérimentale à travers la mise en place d'un prototype réel dans les conditions climatiques locales, afin d'évaluer l'efficacité de la solution proposée.

Ce travail s'inscrit donc dans une démarche de valorisation des systèmes photovoltaïques à travers des solutions techniques réalistes et applicables sur le terrain, dans le but de contribuer à l'amélioration de la fiabilité et de l'efficacité énergétique des stations solaires de pompage, tout en répondant aux objectifs de durabilité et de développement des zones rurales.

Chapitre I

L'énergie solaire et la technologie photovoltaïque

Introduction :

Dans le contexte mondial actuel, avec la transition vers les énergies renouvelables et une diminution de la dépendance d'énergie fossiles, l'énergie solaire émerge comme une solution prometteuse et durable. Le Soleil, une étoile composée d'hydrogène et d'hélium, est la principale source d'énergie de notre système solaire. Avec les découvertes scientifiques modernes, nous pouvons convertir cette énergie en électricité grâce aux technologies photovoltaïques. Ce chapitre fournit une analyse détaillée des attributs physiques du Soleil, y compris sa structure interne, ses propriétés thermiques, ses mécanismes de fusion nucléaire, les types de rayonnement solaire, sa propagation dans l'espace et son interaction avec l'atmosphère terrestre. Il met également en évidence les éléments des systèmes photovoltaïques et leur fonctionnement, ainsi que les stratégies pour optimiser leur efficacité énergétique dans diverses situations climatiques.

I.1 Le soleil

C'est une étoile naine jaune de type spectral G2V, composée principalement d'hydrogène (74%) et d'hélium (24%). Elle possède la plus grande masse du système solaire, représentant 99,86% de la masse totale, ce qui en fait le centre du système solaire autour duquel gravitent les planètes et les objets célestes, y compris notre planète, la Terre. L'énergie du Soleil nous parvient sous forme de chaleur et de lumière.[1]

I.1.1 Les Caractéristiques de notre Soleil

Le Tableau I.1 ci-dessous résume les principales caractéristiques du Soleil par rapport à la Terre, afin de mieux comprendre les différences fondamentales entre les deux.

I.1.2 Le Soleil : Une Source Inépuisable et Durable d'Énergie

Il y a 4,6 milliards d'années, la gravité a provoqué la contraction et la rotation d'un immense nuage de gaz et de poussière cosmique, connu sous le nom de nébuleuse solaire. Ce processus a conduit à la formation d'un noyau chaud et dense en son centre. Lorsque la température a atteint 10 millions de kelvins, ce qui est connu sous le nom de fusion nucléaire de l'hydrogène a commencé, permettant ainsi au Soleil de se stabiliser dans un état d'équilibre thermique et radiatif, équilibre qui perdure encore aujourd'hui [2] Figure I.1 .

Tableau I.1 : Comparaison entre le Soleil et la Terre

Caractéristique	Soleil	Terre	Unité
Type spectral	G2V (Naine jaune)	Planète tellurique	–
Diamètre moyen	1.39×10^6	12742	Km
Masse	1.989×10^{30}	5.972×10^{24}	Kg
Température du noyau	15×10^6	5200	K
Température de surface	5500	Moyenne : 288	K
Luminosité	3.846×10^{26}	N/A	W
Gravité de surface	274	9.81	m/s ²
Distance au Soleil	–	1.496×10^8	Km
Période de révolution	–	365.25	Jours

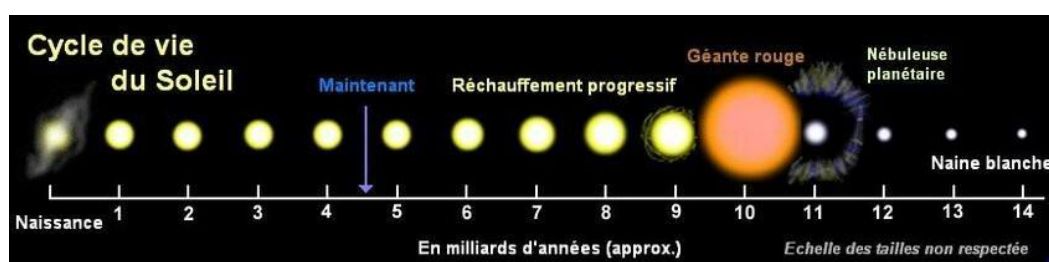


Figure I.1 : Cycle de vie du soleil

- Équation de la Fusion Nucléaire :

Voici l'équation de base de la fusion nucléaire, illustrant la combinaison de deux noyaux légers :



La fusion nucléaire continuera jusqu'à l'épuisement de l'hydrogène, une étape estimée à environ 5 milliards d'années. Cette durée extrêmement longue à l'échelle humaine nous pousse à considérer le soleil comme une source d'énergie renouvelable. Cependant, d'un point de vue physique, cette ressource n'est pas infinie, car après l'épuisement de l'hydrogène, le Soleil se transformera en une géante rouge, puis en une naine blanche à la

fin de son cycle de vie. [3]

I.2 Le mouvement de la Terre

La Terre réalise deux types de mouvements principaux dans l'espace, lesquels ont un impact direct sur le cycle jour/nuit et les saisons :

La rotation terrestre correspond au mouvement de la Terre autour de son axe fictif, lequel est incliné d'environ $23,45^\circ$ par rapport au plan de son orbite autour du Soleil. Ce phénomène, d'une durée d'environ 24 heures, est responsable de l'alternance entre le jour et la nuit.[4] En raison de cette rotation continue, chaque point de la surface de la Terre est alternativement exposé à la lumière du soleil puis plongé dans l'obscurité, engendrant ainsi le cycle quotidien. [5]

Le mouvement autour du soleil est le mouvement de la Terre autour du soleil dans une orbite elliptique, et ce cycle dure environ 365,25 jours, ce qui est connu sous le nom d'année. Pendant ce mouvement, la distance entre la Terre et le soleil change, mais l'inclinaison axiale de la Terre ($23,45^\circ$) reste constante, ce qui entraîne des variations dans la quantité de lumière solaire qui atteint différentes régions de la terre au cours de l'année, formant ainsi les quatre saisons : le printemps, l'été, l'automne et l'hiver [6]. Figure I.2

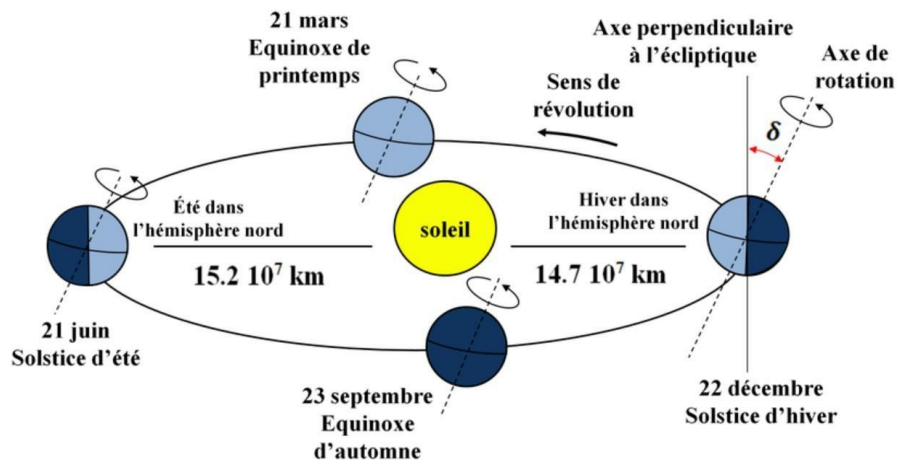


Figure I.2 : La révolution de la Terre autour du Soleil

I.3 Les rayonnements solaires émis dans l'espace

Au cœur du Soleil (le noyau), sous une température extrêmement élevée et une pression immense, se produit une réaction appelée fusion nucléaire. Dans cette réaction, les atomes d'hydrogène puis leurs isotopes fusionnent de manière successive,

libérant une énergie colossale qui se propage depuis le centre de la réaction vers l'espace. Lorsque l'énergie issue de la réaction de fusion dans le noyau du Soleil atteint la photosphère elle est libérée dans l'espace sous forme de rayonnement électromagnétique avec différentes longueurs d'onde. La quantité de rayonnement Solaire dans l'espace est estimée à environ 1361 W/m^2 , et elle est appelée la constante solaire. Cette valeur de référence est essentielle dans les études de l'énergie solaire [7].

Tableau I.2 : Principales ondes avec leurs longueurs d'onde et leurs usages

Type d'onde	Longueur d'onde	Usage	%
Ondes radio	$> 1 \text{ mm}$	Radio, TV, radars	0.1%
Infrarouge	$1 \text{ mm à } 0.8 \text{ }\mu\text{m}$	Vision nocturne, télécommandes	49%
Lumière visible	$0.8 \text{ à } 0.4 \text{ }\mu\text{m}$	Vision diurne, photosynthèse	42%
Ultraviolet	$0.4 \text{ à } 0.05 \text{ }\mu\text{m}$	Bronzage, purification de l'eau	7%
Rayons X	$0.05 \text{ }\mu\text{m à } 10^{-2} \text{ Å}$	Radiographie	1.5%
Rayons gamma	$< 10^{-2} \text{ Å}$	—	0.4%

I.3.1 Les rayonnements solaires atteignant la Terre

L'atmosphère empêche les rayons X et les rayons gamma d'atteindre la surface de la Terre, tout en permettant le passage de la lumière visible, des rayons ultraviolets (UV-A uniquement) et d'une partie des rayons infrarouges. La quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre est estimée à environ $1000 \text{ watts/mètre carré}$ par jour ensoleillé, en raison de l'absorption et de la diffusion par l'atmosphère. Cette valeur est également essentielle dans les études et les applications de l'énergie solaire.[8] Figure I.3.

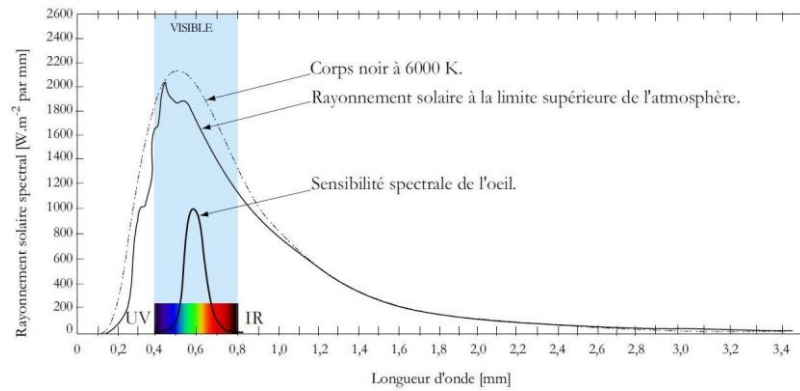


Figure I.3 : Le spectre électromagnétique solaire visible.

I.3.2 Types de rayonnement solaire à la surface terrestre

Il y a trois types des rayonnements solaires :

- **Rayonnement direct** : Il s'agit de la radiation solaire qui parvient directement à la surface terrestre sans être diffusée par l'atmosphère. Elle atteint son paroxysme lorsque le ciel est clair[9].
- **Rayonnement diffus** : Cette émission découle de la diffusion de la lumière solaire par les particules présentes dans l'atmosphère (gaz, poussières, gouttelettes d'eau, etc.). Il touche la surface de la Terre dans plusieurs directions et constitue une portion significative du rayonnement global par temps nuageux [10].
- **Rayonnement global** : Le rayonnement global est l'addition du rayonnement direct (I_d) émis par le soleil et du rayonnement diffus (I_s) qui découle de la dispersion de la lumière au sein de l'atmosphère[10].

Il est calculé sur une surface plane et est défini par l'équation suivante :

$$I_g = I_d + I_s \quad (\text{I.4})$$

où :

- I_g : Rayonnement global (W/m^2),
- I_d : Rayonnement direct (W/m^2),
- I_s : Rayonnement diffus (W/m^2),
- **Rayonnement réfléchi (albédo)** : C'est le rapport entre la totalité du rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre et la totalité du rayonnement solaire qui arrive. Elle oscille entre 0 (absorption complète sans réflexion) et 1 (réflexion intégrale sans absorption).[11] L'albédo est influencé par la composition et la teinte de la surface : les

surfaces claires telles que la neige réfléchissent plus de rayonnement que les surfaces sombres comme les mers ,Figure I.4 .

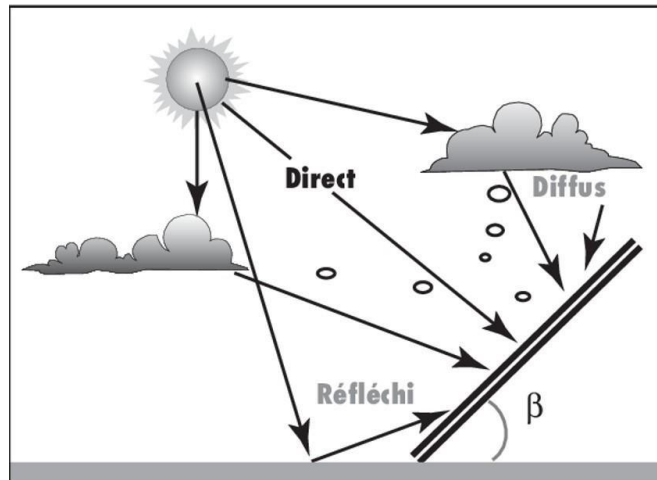


Figure I.4 : Les différents types de rayonnement solaire

I.4 Les angles solaires

Les angles solaires se réfèrent à un ensemble d'angles géométriques utilisés pour définir la position du Soleil dans le ciel par rapport à un point spécifique sur la surface terrestre. Ces angles ont un impact direct sur la quantité de rayonnement solaire reçue. Il est crucial de saisir ces angles afin de diriger les panneaux solaires de façon à maximiser leur rendement [12]. Parmi les angles solaires, les plus importants sont :

- **L'angle de hauteur solaire (Angle d'élévation)** L'angle de hauteur solaire correspond à l'élévation apparente du Soleil dans la sphère céleste par rapport à l'horizon terrestre. Il s'agit de l'angle formé par la direction des rayons solaires et le plan horizontal local. Sa valeur fluctue tout au long de la journée, culminant à midi solaire. Plus l'angle d'élévation est grand, plus l'intensité du rayonnement solaire reçu à la surface terrestre est élevée. Cela dépend de la latitude, de la date et de l'heure.
- **L'angle de déclinaison solaire** L'angle de déclinaison correspond à l'angle formé par les rayons solaires et le plan de l'équateur terrestre. L'inclinaison de l'axe de la Terre est d'environ $23,45^\circ$. L'inclinaison de l'axe terrestre varie tout au long de l'année entre $+23,45^\circ$ (lors du solstice d'été) et $-23,45^\circ$ (lors du solstice d'hiver). Elle exerce une forte influence sur l'élévation du Soleil dans le ciel en fonction des saisons, et donc sur la quantité d'énergie solaire disponible.

- **L'angle azimutal solaire** L'angle azimutal est utilisé pour déterminer la position du Soleil par rapport au nord géographique dans le plan horizontal. L'angle est mesuré en degrés dans le sens horaire à partir du nord (0°), en passant par l'est (90°), le sud (180°) et l'ouest (270°). Cet angle fournit des informations sur l'azimut solaire à un moment précis. Il est crucial d'ajuster l'orientation des panneaux solaires pour maximiser leur exposition.
- **L'angle d'incidence** L'angle d'incidence désigne l'angle formé par les rayons solaires incidents et la surface du panneau solaire. Il s'agit d'un élément essentiel qui influence la performance des installations.

I.5 L'énergie solaire et la technologie photovoltaïque

I.5.1 Aperçu historique :

Depuis longtemps, l'homme utilise la lumière et la chaleur du soleil dans sa vie quotidienne. Les Grecs et les Romains ont commencé à expérimenter avec l'énergie solaire dès l'Antiquité. Ils utilisaient des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et créer des feux. Aujourd'hui la technologie pour utiliser l'énergie solaire a souvent avancé, surtout après que le physicien français **Edmond Becquerel** a découvert l'effet photovoltaïque en **1839**[12]. Il a été observé que certains matériaux créent de l'électricité quand ils sont exposés à la lumière du soleil.

Cette découverte a permis de faire avancer la technologie des panneaux solaires. En **1954**, des chercheurs des **Bell Labs** ont créé la première cellule solaire en silicium qui transforme bien la lumière du soleil en électricité [13]. Cela a permis d'utiliser cette technologie plus largement. Avec le temps, les panneaux solaires ont été utilisés sur les satellites dès les années **1960**, puis se sont progressivement répandus dans les systèmes de production d'électricité sur terre.

Aujourd'hui, l'énergie solaire photovoltaïque est devenue l'une des principales sources d'énergie renouvelable, grâce aux améliorations dans sa fabrication et à l'augmentation de l'efficacité des panneaux solaires. De plus, baisser les coûts de production en vérité une bonne solution pour une transition énergétique plus durable et écologique. Cette étude expliquera les idées clés sur l'énergie solaire et la technologie des panneaux solaires. Elle parlera de leur histoire et de leurs principales utilisations dans notre monde aujourd'hui.

I.6 La technologie photovoltaïque : La cellule photovoltaïque comme composant essentiel

Élément fondamental de la technologie photovoltaïque La cellule photovoltaïque constitue l'élément essentiel de la technologie photovoltaïque. Elle permet de convertir directement l'énergie solaire en électricité via le biais of l'effet photovoltaïque, un phénomène découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Cette technologie est essentielle à la transition énergétique vers des sources renouvelables et durables.

I.6.1 Principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque fonctionne grâce à l'effet photovoltaïque, qui permet de convertir la lumière solaire en électricité de manière directe en utilisant des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lors de leur absorption, les photons provoquent l'émission d'électrons dans le matériau, induisant ainsi un courant électrique continu (DC) qui est ensuite canalisé par le champ électrique interne de la cellule pour différentes applications [14]. Figure I.5 et Figure I.6



Figure I.5 : Cellule photovoltaïque

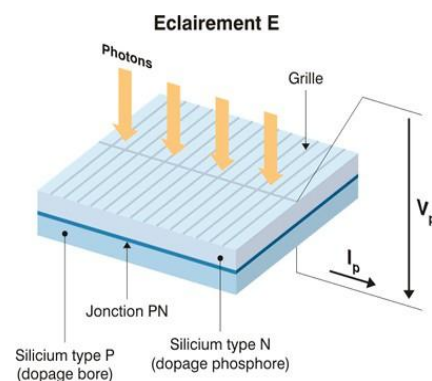


Figure I.6 principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.7 Classification des technologies de cellules solaires

Les cellules solaires sont généralement classées selon le matériau à partir duquel elles sont fabriquées [15]. Sur cette base, on peut énumérer les différents types suivants :

I.7.1 Les cellules solaires de première génération

Ce sont les cellules solaires fabriquées à partir de silicium cristallin, elles sont les plus courantes et les plus utilisées sur le marché mondial [16]. Elles se divisent en deux types principaux :

- **Cellules monocristallines** : Les cellules photovoltaïques monocristallines sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium pur. Elles offrent un rendement élevé, généralement compris entre 18% et 23% , ce qui les rend très efficaces pour la production d'énergie solaire. Cependant, leur coût de fabrication est plus élevé par rapport à d'autres types de cellules. Elles se distinguent par leur couleur noire uniforme, qui leur confère une esthétique particulière.
- **Cellules polycristallines** : Les cellules photovoltaïques polycristallines sont composées de plusieurs cristaux de silicium. Elles offrent un rendement modéré, généralement entre 15 % et 18%, ce qui les rend moins efficaces que les cellules monocristallines. Cependant, elles sont moins chères à produire. Leur couleur est bleutée, avec un aspect cristallin visible à la surface.

I.7.2 Cellules solaires de deuxième génération

Les cellules solaires de cette génération sont connues sous le nom de cellules à couches minces. Leur coût de production est inférieur à celui de la première génération en raison de l'utilisation de méthodes de fabrication différentes. Elles sont plus légères et plus flexibles. En général, leur rendement est inférieur à celui de la première génération.

Cellules à couches minces : Les cellules à couches minces représentent la deuxième génération de technologies photovoltaïques. Elles se distinguent par leur matériau actif d'une épaisseur variant de quelques nanomètres à quelques micromètres, ce qui les rend légères et, dans certains cas, flexibles. Bien que les rendements aient été historiquement plus faibles que ceux du silicium cristallin, des progrès récents ont permis d'atteindre des rendements allant jusqu'à 19.9% pour le CIGS et 16.5% pour le CdTe en laboratoire, ce qui rend ces technologies compétitives pour des applications spécifiques.

I.7.3 Les cellules photovoltaïques de troisième génération

Les cellules solaires de troisième génération représentent des technologies innovantes qui dépassent les systèmes traditionnels basés sur le silicium ou les couches minces. Cette génération vise à atteindre une efficacité plus élevée et à réduire les coûts en utilisant de nouveaux matériaux et des techniques avancées [17]. Les plus importantes sont :

- **Cellules multi-jonctions** : Composées de plusieurs couches de matériaux différents, chaque couche absorbant une partie spécifique du spectre lumineux. Elles affichent une très haute efficacité, jusqu'à 40,8% en laboratoire, et sont souvent utilisées dans les satellites et applications spatiales.
- **Cellules pérovskites** : Basées sur des matériaux à structure cristalline spécifique, faciles à fabriquer, avec une efficacité dépassant 25% en laboratoire. Elles présentent encore des défis en termes de stabilité et de durée de vie.
- **Cellules organiques** : Fabriquées à partir de molécules organiques, légères, flexibles et imprimables. Leur efficacité est plus faible, environ 6,1%, adaptées aux applications portables et aux fenêtres transparentes.
- **Cellules sensibilisées aux colorants (DSSC)** : Utilisent un colorant organique pour absorber la lumière. Leur efficacité est faible, autour de 11,1%, adaptées aux environnements peu lumineux et applications intérieures.

I.8 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque est une représentation simplifiée sur le plan électrique qui permet de décrire le fonctionnement d'une cellule solaire à l'aide de composants électriques. Ce modèle revêt une importance cruciale dans l'analyse, la simulation et l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques [18].

I.8.1 Modèle Équivalent d'une Cellule photovoltaïque avec une diode

La représentation électrique équivalente d'une cellule photovoltaïque réelle à diode unique permet de décrire son fonctionnement non idéal, incluant les pertes ohmiques et les fuites. En utilisant une source de courant photo-généré, une diode, une résistance en série et une résistance shunt, il est possible de tracer la courbe I-V afin d'optimiser la conception des systèmes solaires [18], Figure I.7.

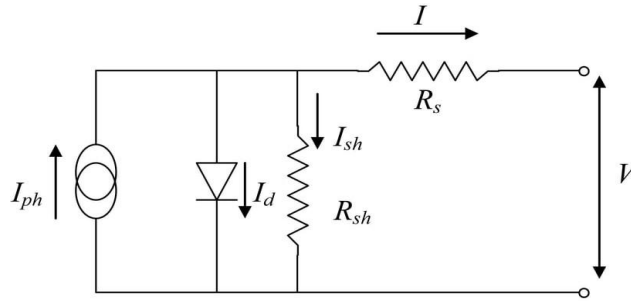


Figure I.7 : Modélisation électrique équivalente d'une Cellule photovoltaïque avec une diode

- où :
- I : Courant de sortie de la cellule photovoltaïque.
- V : Tension de sortie de la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : Courant photo-généré, proportionnel à l'irradiance solaire.
- I_d : Courant traversant la diode.
- I_{sh} : Courant de fuite à travers la résistance parallèle.
- R_s : Résistance série de la cellule.
- R_{sh} : Résistance parallèle (shunt) représentant les pertes par fuite

L'équation du module équivalent d'une cellule photovoltaïque :

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (1.5)$$

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_t} \right) - 1 \right] \quad (1.6)$$

$$I_{SH} = \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.7)$$

$$I = I_{PH} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_t} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1.8)$$

Avec $V_T = \frac{KT}{q}$: Tension thermique

- K : constante de Boltzmann
- T : Température T en kelvins
- q : Charge
- n : Facteur d'idéalité de la diode (typiquement $1 \leq n \leq 2$)

I.9 La courbe I-V et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

La courbe courant-tension dans les conditions standardisées (STC) représente l'un des outils les plus importants pour analyser les performances de la cellule photovoltaïque, car elle reflète la relation entre le courant et la tension générés par la cellule photovoltaïque. En étudiant cette courbe, nous pouvons extraire les principales caractéristiques qui déterminent la qualité et l'efficacité de la cellule [19]. Figure I.8

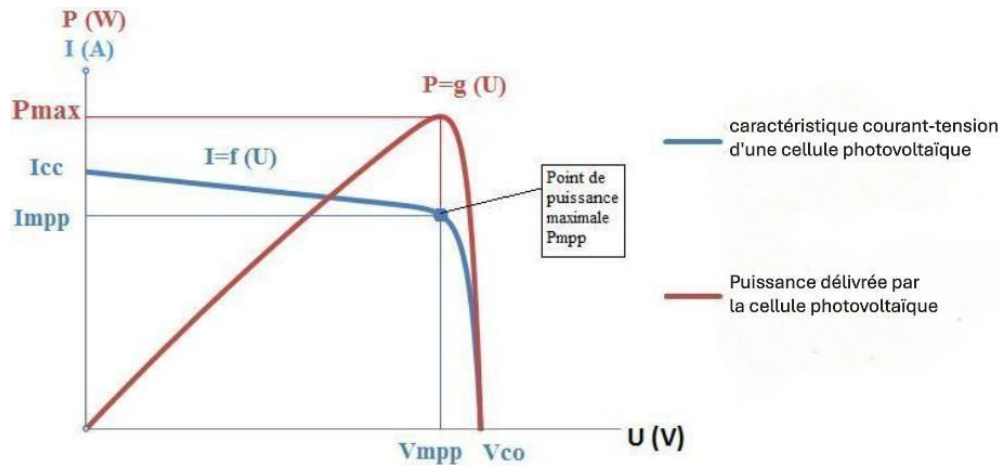


Figure I.8 : Courbes caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module photovoltaïque

- Le courant de court-circuit (I_{cc}) : courant maximal délivré par la cellule lorsque la tension est nulle ($V = 0$).
- La tension de circuit ouvert (V_{co}) : tension maximale mesurée lorsque le courant est nul ($I = 0$).
- Le courant au point de puissance maximale (I_{mpp}) : courant correspondant au point où la puissance est maximale.
- La tension au point de puissance maximale (V_{mpp}) : tension à laquelle la puissance produite est maximale.
- La puissance maximale (P_{max}) : produit de V_{mpp} et I_{mpp} , représentant la puissance de sortie maximale de la cellule.
- Le facteur de forme (FF) : indicateur de la qualité de la cellule, défini par la relation

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.9)$$

- Le rendement (η) : pourcentage de l'énergie solaire convertie en énergie électrique, défini par $\eta = \frac{P_{max}}{S \times G}$ avec S : Surface du panneau (m^2) et G : Irradiance solaire W/m^2 ,)

I.9.1 Les conditions standardisées (STC)

C'est l'ensemble des conditions et normes idéales appliquées pour tester les panneaux photovoltaïques pour comparer leurs performances de manière uniforme. Ces normes sont utilisées mondialement [20].

Tableau I.3 – Conditions de Test Standard (STC)

Paramètre	Valeur
Irradiance solaire (G)	1000 W/m ²
Température de la cellule (T_c)	25 °C
Masse d'air (AM)	1.5

I.10 Le générateur photovoltaïque

Selon l'échelle et l'application du système, un générateur photovoltaïque peut être constitué de cellules photovoltaïques, de modules, de panneaux solaires ou d'un champ de générateurs [21], Figure I.9 :

- **La cellule photovoltaïque** est l'élément fondamental qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.
- **Le module photovoltaïque** est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques connectées entre elles pour produire une puissance supérieure.
- **Le panneau photovoltaïque** regroupe plusieurs modules afin d'augmenter encore la production d'énergie.
- **Le générateur photovoltaïque** est formé par l'assemblage de plusieurs panneaux solaires pour fournir des quantités importantes d'électricité, adapté aux grandes installations.

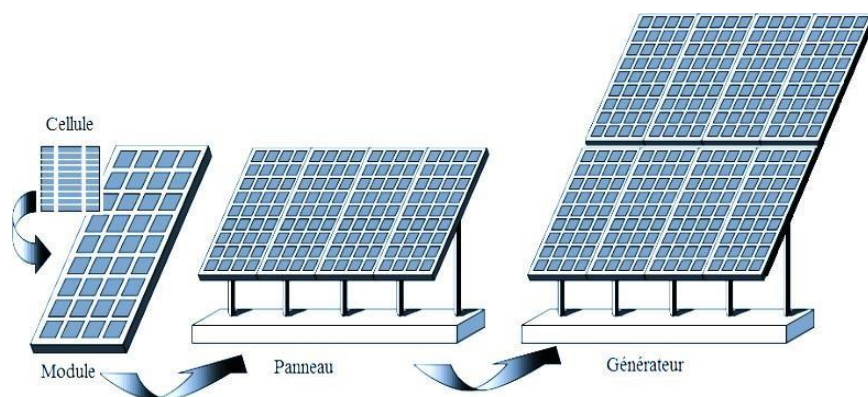


Figure I.9 : Structure d'un générateur photovoltaïque : de la cellule au générateur

I.11 Les techniques d'association des cellules photovoltaïques

Le raccordement des cellules photovoltaïques vise à obtenir différents niveaux de courant et de tension afin de répondre aux besoins de l'utilisateur. Elles sont assemblées de différentes manières, en tenant compte du type de charge. Cette méthode aide à augmenter l'efficacité du système. Il existe trois principales méthodes d'association : en série, en parallèle et en configuration mixte [22].

I.11.1 Association en série :

Regrouper les cellules en série (N_s) augmente la tension du GPV, mais le courant qui passe dans les cellules reste identique. La tension augmente en fonction du nombre de cellules en série (N_s), ce qui permet d'augmenter la puissance du GPV. Figure I.10

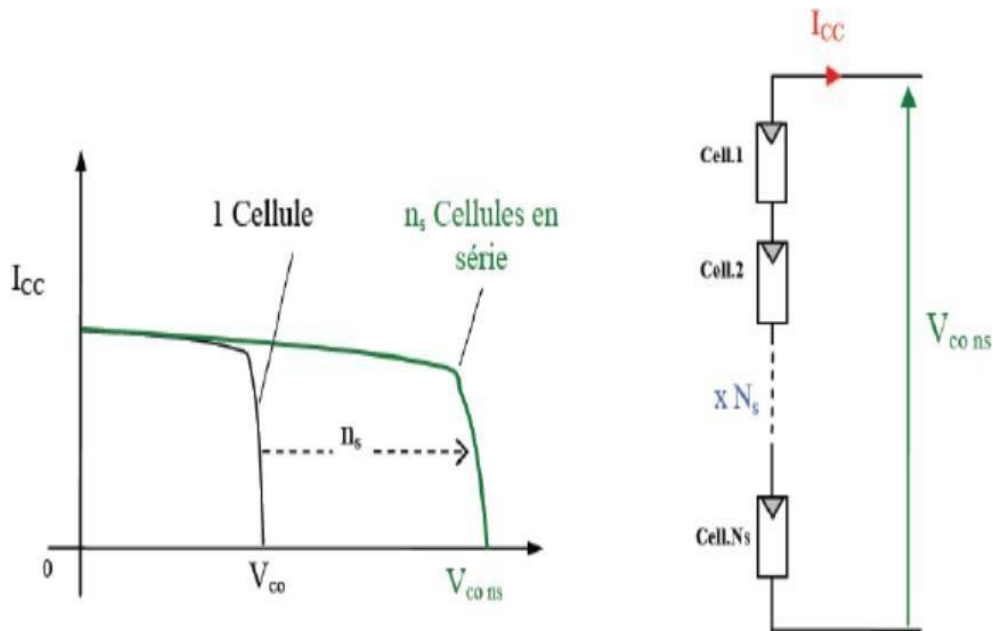


Figure I.10 : Association en série des cellules photovoltaïques

I.11.2 Association en parallèle :

Mettre les cellules en parallèle (N_p) augmente le courant du panneau solaire, tandis que la tension reste la même. Le courant augmente si le nombre de cellules en parallèle (N_p) augmente, ce qui aide à avoir plus de puissance tout en gardant la tension stable. Figure I.11

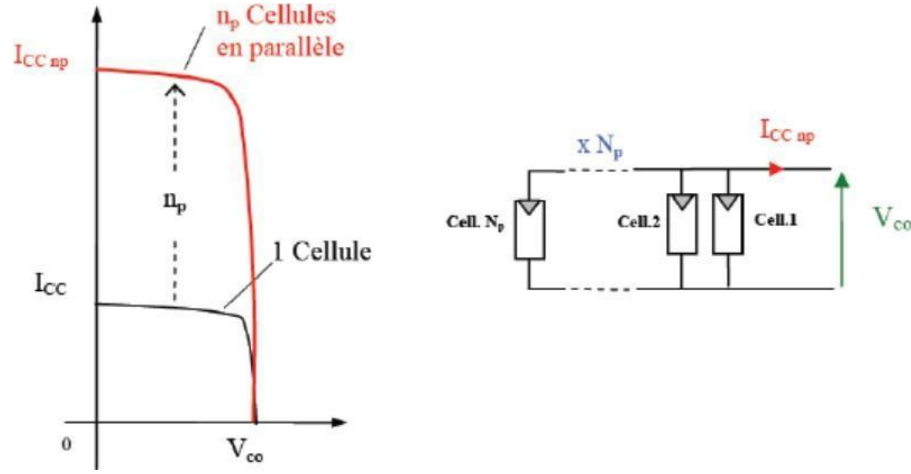


Figure I.11 : Association en parallèle des cellules photovoltaïques

On a :

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (1.10)$$

$$I_{cc} = I_{ccNs} \quad (1.11)$$

$$P_{PV} = V_{coNs} \times I_{cc} \quad (1.12)$$

$$P_{PV} = (N_s \times V_{co}) \times I_{cc} \quad (1.13)$$

- I_{cc} : le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque.
- V_{co} : la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.
- V_{coNs} : la tension de circuit ouvert résultante de N_s cellules connectées en série.
- I_{ccNs} : le courant de court-circuit d'une association de N_s cellules en série.

De plus, on peut écrire :

$$I_{ccNp} = N_p \times I; V_{co} = V_{coNp} \quad (1.14)$$

$$P_{PV} = V_{co} \times I_{ccNp} \quad (1.15)$$

- I_{cc} : le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque.
- V_{co} : la tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.
- I_{ccNp} : le courant de court-circuit total obtenu par l'association en parallèle de N_p cellules.
- V_{coNp} : la tension de circuit ouvert d'un groupe de N_p cellules connectées en parallèle.

I.11.3 Association mixte :

L'association mixte fait référence à la combinaison des connexions en série et en parallèle des cellules photovoltaïques. Cette configuration offre la possibilité de modifier à la fois la tension et le courant du générateur photovoltaïque en fonction des exigences

particulières de l'application. En enchaînant plusieurs chaînes de cellules en série et en les reliant ensuite en parallèle, nous optimisons la puissance totale du système tout en renforçant sa flexibilité et sa fiabilité. Pour une configuration mixte, la puissance globale du générateur photovoltaïque peut être calculée grâce à l'équation suivante [23].

La puissance totale du générateur photovoltaïque est déterminée par la relation suivante :

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \quad (1.16)$$

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (1.17)$$

$$P_{PV} = N_s \times V_{pv} \times N_p \times I_{pv} \quad (1.18)$$

I.12 Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque désigne un dispositif qui a pour fonction de transformer de manière directe l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique en utilisant des cellules photovoltaïques, en plus de divers équipements auxiliaires nécessaires pour garantir un rendement optimal. Les éléments essentiels d'un système photovoltaïque comprend :

- **Le générateur photovoltaïque** : constitué d'un ensemble de cellules ou de panneaux solaires qui convertissent le rayonnement solaire en électricité.
- **Le régulateur** : le rôle du régulateur de charge est de surveiller et de réguler la circulation de l'énergie entre les panneaux solaires et les batteries afin d'éviter la surcharge ou la décharge excessive.
- **Les batteries** : Les batteries stockent l'énergie excédentaire produite par le générateur photovoltaïque pour l'utiliser en cas d'insuffisance d'irradiation solaire, assurant ainsi l'autonomie du système.
- **L'onduleur** : l'onduleur est un dispositif électrique qui a pour fonction de convertir le courant continu (DC) produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif afin d'alimenter les appareils fonctionnant en courant alternatif (AC), tout en adaptant la tension et la fréquence aux besoins spécifiques des équipements ou du réseau électrique.
- **Les charges électriques** : désignent les appareils et équipements qui consomment l'énergie (éclairage, électroménager, pompes, etc.)

I.13 Les types des systèmes photovoltaïques

En fonction de leur configuration et de leur usage, les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être catégorisés en différentes sortes [24]. On distingue les types majeurs de systèmes photovoltaïques :

- **Systèmes photovoltaïques autonomes (aussi appelés isolés) :**

Ces dispositifs ne sont pas reliés au réseau électrique. On les utilise dans des zones reculées où l'accès à l'électricité est impossible. L'énergie produite est conservée dans des accumulateurs pour une utilisation future.

- **Systèmes photovoltaïques branchés au réseau (ou système relié au réseau) :**

Ces dispositifs sont reliés au réseau d'électricité publique. Le surplus d'énergie généré est inséré dans le réseau, offrant au propriétaire un avoir ou une rémunération pour l'énergie excédentaire. Ils n'ont pas besoin de batteries pour le stockage.

- **Systèmes hybrides de production d'énergie solaire :**

Il s'agit de systèmes qui associent une source d'énergie photovoltaïque à une autre, généralement un générateur électrique ou une liaison au réseau électrique.

I.14 Les facteurs influençant le rendement du système photovoltaïque

Une variété d'éléments sont responsables de la détermination du degré de réussite des systèmes photovoltaïques dans la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Quelques exemples de ces composants incluent la conception et l'installation du système, les matériaux utilisés pour fabriquer les cellules solaires, et l'environnement autour du système. En prêtant une attention particulière à ces facteurs, la performance des systèmes photovoltaïques peut être améliorée dans une large gamme d'environnements et de conditions [25]. Cela entraine augment la quantité d'énergie qu'ils produisent et de leur capacité à être durables. Enfin, il existe deux facteurs externes importants qui ont un impact direct sur leur efficacité, et ils sont les suivants :

- **L'irradiation solaire**

L'irradiance solaire affecte directement la production d'énergie dans les systèmes PV. Plus l'irradiance augmente, plus la quantité d'électricité produite par les cellules PV augmente.

- La température

La température ambiante affecte directement le rendement du générateur photovoltaïque, de sorte que plus la température augmente, plus la tension produite par le générateur photovoltaïque diminue.

La température de la cellule photovoltaïque est influencée à la fois par la température ambiante et par l'irradiance solaire. Cette relation peut être estimée à l'aide de l'équation suivante :

$$T_c = T_{amb} + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) * E \quad (1.19)$$

où :

— T_c : Température de la cellule photovoltaïque (°C),

— T_{amb} : Température ambiante (°C),

— E : Irradiance solaire incidente sur le panneau (W/m^2),

— $NOCT$: Température nominale de fonctionnement de la cellule (°C), généralement entre 42 et 48 °C.

Cette équation montre que la température du panneau est généralement plus élevée que celle de l'air ambiant, et que l'écart dépend principalement de l'intensité de l'irradiance solaire et des caractéristiques thermiques du module. Figure I.12 et Figure.I.13

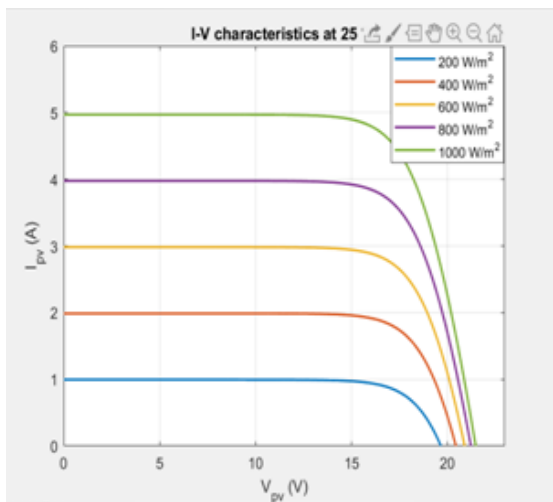


Figure I.12 : Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension

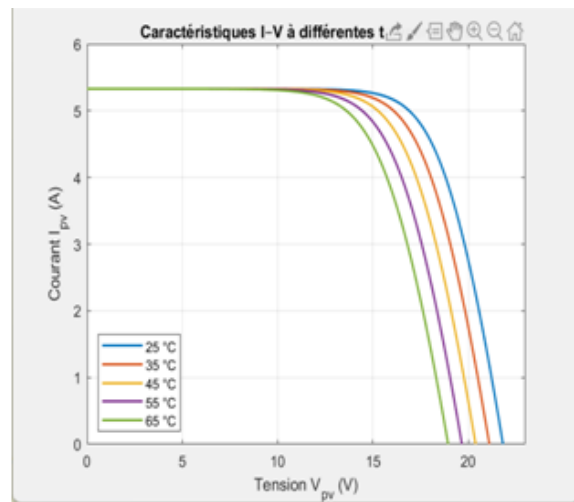


Figure I.13 : Influence de la température sur les courbes courant-tension

I.15 Stratégies d'optimisation de l'absorption du rayonnement solaire par les cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs stratégies adoptées pour améliorer la capture de l'irradiation solaire par les panneaux photovoltaïques [25]. Ces stratégies contribuent à améliorer les performances, parmi lesquelles :

- Utilisation des systèmes de suivi solaire (Solar Tracking Systems) :

Cette technique repose sur le suivi du rayonnement solaire pendant la journée. Elle permet d'orienter le panneau solaire vers la position du soleil afin de capter le rayonnement direct. Cette méthode est inspirée de la fleur de tournesol.

- Réglage de l'orientation :

Les panneaux solaires sont orientés vers le sud dans l'hémisphère nord afin de faire face au soleil et capter un maximum de rayonnement solaire.

- Réglage de l'inclinaison :

L'angle d'inclinaison des panneaux solaires dépend de la position géographique (ligne de latitude). Il est recommandé de régler l'angle d'inclinaison égal à la latitude pendant l'automne et le printemps. En hiver, il faut ajouter 10 degrés pour améliorer les performances, tandis qu'en été, il est conseillé de réduire l'angle de 10 degrés afin d'augmenter la période d'exposition au rayonnement solaire direct et d'optimiser la production d'énergie.

- Nettoyage des panneaux solaires :

Le nettoyage régulier des panneaux solaires est très important car l'accumulation de poussière et de sable sur la surface du panneau entraine une obstruction partielle du rayonnement solaire, ce qui réduit l'efficacité du générateur photovoltaïque.

I.16 Réduction efficace de la température des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs méthodes de refroidissement pour réduire l'effet négatif de l'élévation de la température de la cellule photovoltaïque, et les deux moyens de refroidissement les plus utilisés aujourd'hui sont le refroidissement par air et le refroidissement par eau.

I.16.1 Le refroidissement par air :

C'est une technique basée sur le contact entre la surface du panneau solaire et l'air, permettant un échange thermique entre eux, ce qui contribue à réduire la température du panneau. Cette technique est classée en deux catégories :

a) Refroidissement passif à l'air :

- Le refroidissement naturel à l'air :

Ce procédé utilise la convection naturelle de l'air pour refroidir les panneaux solaires. L'efficacité peut être améliorée en ajustant l'angle d'inclinaison du panneau, favorisant ainsi la circulation d'air et l'échange thermique. Cette méthode est simple, sans consommation d'énergie, mais moins efficace que le refroidissement actif.

- Système de refroidissement utilisant des dissipateurs thermiques :

L'étude de Mittelman et al explore l'utilisation d'un réfrigérant passif avec des dissipateurs thermiques. Ils ont installé une plaque en aluminium perforée à l'arrière des panneaux photovoltaïques (PV) afin d'optimiser le transfert de chaleur entre les panneaux et l'air environnant. Les résultats ont montré une diminution significative de la température de fonctionnement et une amélioration de l'efficacité électrique des panneaux, avec une augmentation de 10% de la tension et une augmentation de 18,67% du point de fonctionnement maximal [26]

b) Refroidissement actif par air (Refroidissement forcé) :

L'étude menée par Mittelman et al en 2013 a exploré l'impact de l'utilisation d'un flux d'air forcé pour améliorer les performances électriques des panneaux photovoltaïques. L'équipe a installé un ventilateur pour fournir un flux d'air forcé autour des panneaux solaires afin d'améliorer leur refroidissement. Les résultats ont montré que cette technique a contribué à réduire la température des panneaux, ce qui a conduit à une augmentation de l'efficacité électrique des panneaux solaires.

Avec une augmentation de la tension de 10 % et une augmentation du point de fonctionnement maximal de 18,67% [27].



Figure I.14 : Refroidissement des panneaux utilisant des dissipateurs thermiques [26]



Figure I.15 :Image du refroidissement par convection naturelle et forcée de l'air [27]

I.16.2 Le refroidissement par eau :

C'est une technique basée sur le contact entre la surface du panneau solaire et l'eau, permettant un échange thermique entre eux, ce qui contribue à réduire la température du panneau. Cette technique est classée en deux catégories.

a) Le refroidissement passif par eau :

- Le refroidissement par immersion dans l'eau : L'étude menée par une équipe a examiné l'impact de l'immersion dans l'eau pour le refroidissement sur les performances des

panneaux solaires dans des conditions climatiques réelles. Les résultats ont montré que l'immersion, des cellules solaires dans l'eau a permis de réduire la température de surface entre 31 et 39°C, ce qui a entraîné une augmentation de l'efficacité électrique de 17,8 % à une profondeur de 1 cm [28].



- Figure I.16 : Refroidissement du panneau par immersion dans l'eau [28]
- Refroidissement des panneaux photovoltaïques flottants (FPV) : Dans une étude réalisée sur la performance du système **FPV** développé par **Ocean Sun AS**, la comparaison entre deux groupes de modules solaires – l'un refroidi par air naturel et l'autre en contact direct avec une membrane flottante à la surface de l'eau a montré que ce dernier a réalisé une augmentation du rendement de 5 à 7% par rapport au premier [29] , Figure I.17.



Figure I.17: (a) Projet pilote d'Ocean Sun situé sur la côte ouest de la Norvège.

(b) Modules posés directement sur la membrane.

(c) Modules surélevés à l'aide de tuyaux en plastique

b) Le refroidissement actif par eau :

- Refroidissement par pulvérisation avant des panneaux photovoltaïques : Les bus pompent l'eau devant les panneaux solaires avec une pompe et des tubes. Des études précédentes ont montré des résultats prometteurs, avec une amélioration de l'efficacité énergétique jusqu'à 15% en conditions climatiques extrêmes [30]. Bien que gourmande en eau, cette méthode reste une solution rentable et performante pour les systèmes solaires flottants. Une étude de Nizetic et al. a montré que le refroidissement frontal augmentait la puissance électrique de 14,6%. Moharram et al. ont créé un système pour refroidir les panneaux solaires, abaissant la température de 35°C, Figure I.18, [31].

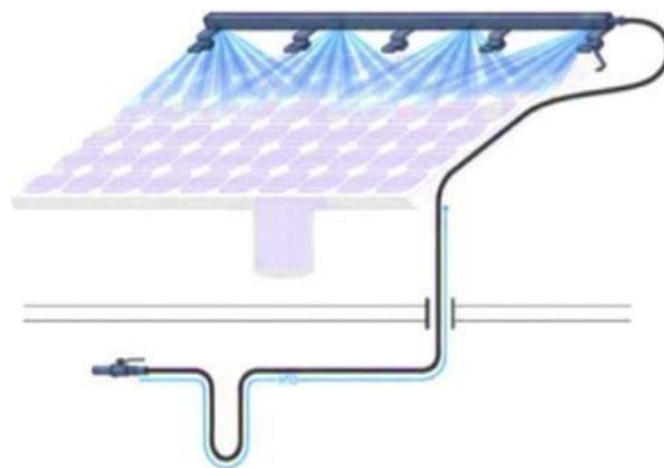
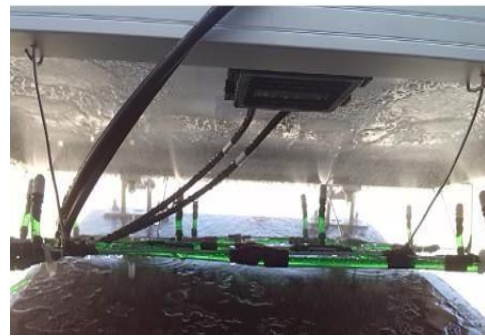


Figure I.18 : Pulvérisation d'eau sur les panneaux photovoltaïques

- Refroidissement par pulvérisation avant-arrière des panneaux photovoltaïques : L'article, rédigé par M. A. Othman et son équipe en 2020, présente une technique de refroidissement alternative pour les panneaux photovoltaïques (PV) consistant à appliquer un spray d'eau sur les surfaces des panneaux. Cette méthode refroidit simultanément les deux faces du panneau, ce qui permet d'étudier l'impact global du refroidissement par pulvérisation d'eau sur les performances des panneaux en conditions d'irradiation solaire maximale. Les résultats expérimentaux montrent une augmentation maximale de la production d'énergie électrique de 16,3 % (efficace 7,7 %) et une amélioration de l'efficacité électrique de 14,1 % (efficace 5,9 %). De plus, la température du panneau a été réduite de 54°C à 24°C. Cette technique présente également un effet auto-nettoyant sur la surface des panneaux, ce qui contribue à améliorer leur rendement à long terme, Figure I.19 [32].



a) Surface avant du panneau



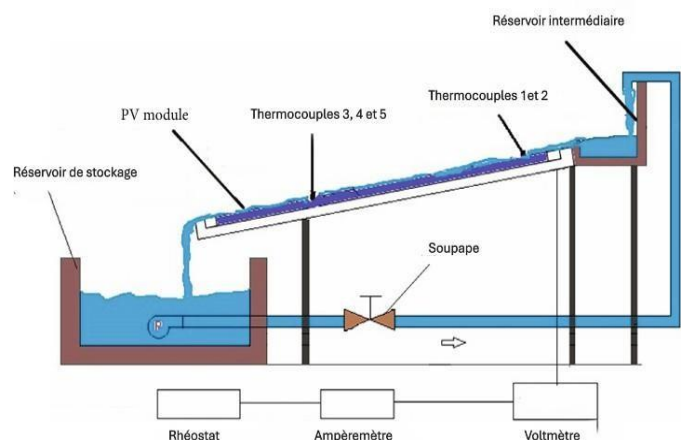
(b) Surface arrière du panneau

Figure I.19: Pulvérisation avant-arrière du panneau solaire

- Refroidissement avec un flux d'eau constant sur la surface du panneau solaire :

Une expérience scientifique menée par M. S. Govardhanan et al. en 2020 examine l'impact du refroidissement par flux d'eau uniforme sur les modules photovoltaïques (PV). Les modules PV fonctionnent généralement à des températures élevées, ce qui réduit leur efficacité et leur production d'énergie. Un refroidissement efficace permet de diminuer la température du module et d'augmenter sa production d'énergie. L'étude se concentre sur un système de refroidissement utilisant un flux d'eau continu provenant d'un réservoir situé au-dessus du module photovoltaïque. Des expériences ont été réalisées avec et sans refroidissement, et les résultats ont montré une amélioration significative de l'efficacité du module PV grâce à la réduction de sa température. Une augmentation de la puissance de 23 W a été observée avec un taux de débit massique élevé (5,3 kg/min), soit une amélioration de 15 % par rapport au module sans refroidissement. Les résultats ont été comparés aux travaux précédents et ont montré une amélioration notable. Les résultats théoriques sont en accord avec les expérimentations, Figure I.20 , [33].

Figure I.20 : flux d'eau uniforme sur la surface du panneau



- Refroidissement avec un flux d'eau constant sur la surface arrière du PV :

L'étude réalisée par M. S. Govardhanan et ses collègues en 2020 a examiné les défis liés à la baisse de l'efficacité de conversion d'énergie dans les systèmes photovoltaïques en raison de l'augmentation de la température des cellules solaires pendant le fonctionnement. Pour remédier à ce problème, trois techniques de refroidissement ont été testées : le refroidissement par film d'eau, le refroidissement arrière et le refroidissement combiné qui associe les deux méthodes. Une caméra infrarouge a été utilisée pour mesurer la répartition des températures à la surface du module PV pendant les expériences. Les résultats ont montré que le refroidissement par film d'eau a réduit la température de 16°C et augmenté la production d'énergie de 22%, tandis que le refroidissement arrière a abaissé la température de 18°C et amélioré la production de 29,8%. Le refroidissement combiné s'est avéré le plus efficace, avec une réduction de température de 25°C et une augmentation de la production d'énergie de 35% par rapport au module sans refroidissement, Figure I.21, [34].

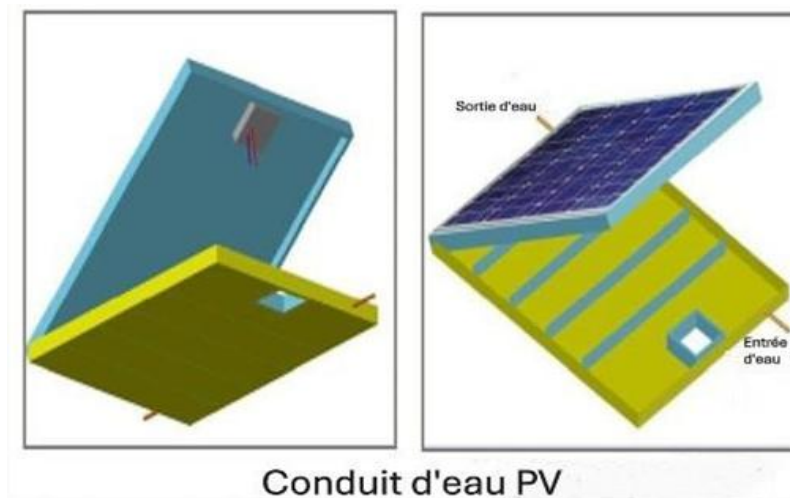


Figure I.21 : Le circuit d'eau derrière le panneau

- Système de refroidissement hybride pour la surface arrière : Une étude a évalué la performance des panneaux photovoltaïques (PV) avec un système hybride de refroidissement par eau pour améliorer leur efficacité. Un modèle numérique a été créé avec EES pour étudier les paramètres électriques et thermiques impactant la performance. Une expérience a testé l'effet d'un échangeur thermique derrière le panneau solaire. Les résultats ont confirmé la concordance entre le modèle numérique et les mesures expérimentales à Dhahran, Arabie Saoudite. Le refroidissement par eau a baissé la température du panneau de 20%, augmentant ainsi son efficacité de 9% [35]. Figure I.22

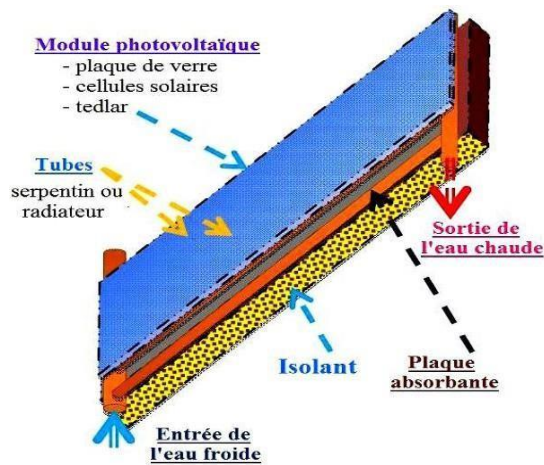


Figure I.22 : Modèle d'un capteur hybride PVT

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements physiques et astronomiques de l'énergie solaire, en mettant en évidence le Soleil en tant que source d'énergie renouvelable et durable. Nous avons analysé le processus de fusion nucléaire au cœur du Soleil, principal mécanisme à l'origine de l'émission d'énergie sous forme de rayonnement. En outre, nous avons présenté les technologies photovoltaïques, leurs composants essentiels, ainsi que les méthodes permettant d'optimiser leur rendement. Ce chapitre constitue ainsi un socle théorique indispensable pour aborder les études spécialisées des systèmes photovoltaïques, en fournissant un cadre de référence essentiel au développement de techniques visant à améliorer l'efficacité des unités photovoltaïques, notamment dans des conditions environnementales contraignantes.

Dans cette optique, nous proposons une méthode de refroidissement des modules solaires utilisés dans les systèmes de pompage photovoltaïque pour l'irrigation. L'idée consiste à utiliser une partie de l'eau pompée pour refroidir les modules, avant de la réintroduire dans le circuit d'irrigation.

Chapitre II

Système de Pompage Photovoltaïque

Introduction

L'énergie renouvelable, telle que l'énergie photovoltaïque, est la plus répandue dans le monde, elle est également respectueuse de l'environnement et s'appuie sur des technologies modernes et efficaces, sur lesquelles tout le monde parie comme une source alternative d'énergie conventionnelle dans un avenir proche. La principale préoccupation des chercheurs pour une utilisation optimale des énergies renouvelables [36].

Dans ce contexte, l'énergie solaire, en particulier l'énergie photovoltaïque, occupe une place centrale grâce à son abondance, sa gratuité et sa facilité d'exploitation. Elle s'avère être une solution idéale, surtout dans les régions rurales et éloignées où l'accès au réseau électrique reste limité, voire inexistant.

Parmi les nombreuses applications de l'énergie photovoltaïque, le système de pompage de l'eau se distingue comme une alternative propre, fiable et adaptée aux besoins en zones isolées. Ce type de système repose essentiellement sur l'utilisation directe de l'électricité produite par les panneaux solaires pour alimenter une pompe à courant continu (DC), assurant ainsi un fonctionnement autonome, économique et respectueux de l'environnement.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le système de pompage photovoltaïque, en mettant en évidence son principe de fonctionnement, ses composants principaux (notamment la pompe DC), ainsi que les critères de dimensionnement et les avantages qu'il offre. Il abordera également les différentes applications et les perspectives de développement de cette technologie dans le cadre d'un développement durable.

II.1 Principe de fonctionnement du système de pompage photovoltaïque :

Le système de pompage photovoltaïque s'impose aujourd'hui comme une solution durable, surtout dans les milieux isolés. Il réduit la dépendance aux énergies fossiles, diminue les coûts d'exploitation à long terme et nécessite peu de maintenance. Son autonomie et sa fiabilité en font une technologie de choix pour les besoins en eau potable, en irrigation ou en élevage dans les zones à faibles ressources.

Généralement, lorsqu'on veut faire fonctionner un récepteur à tout moment, jour ou nuit, ensoleillement ou non, avec un système photovoltaïque, on utilise une batterie d'accumulateurs [37]. Cependant, dans le cas des systèmes de pompage, l'approche est différente : il est plus simple, plus économique et plus judicieux de stocker l'eau pompée plutôt que l'énergie

électrique elle-même. Cette stratégie permet non seulement d'éviter les coûts supplémentaires liés aux batteries, mais aussi de s'affranchir des contraintes d'entretien et de durée de vie limitées de ces dernières.

Ainsi, les systèmes de pompage photovoltaïque sont souvent conçus pour fonctionner uniquement pendant les heures d'ensoleillement, avec un réservoir de stockage d'eau dimensionné pour couvrir les besoins durant les périodes sans soleil. Cette logique renforce l'efficacité globale du système, tout en conservant sa simplicité et sa robustesse.

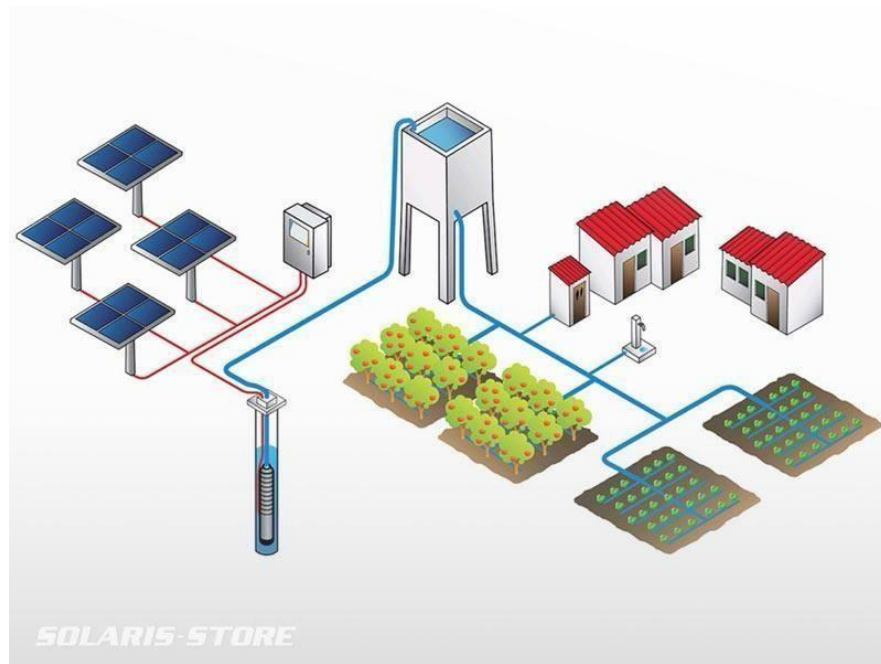


Figure II.1 : Système de pompage solaire

II.2 Caractéristiques des pompes DC pour pompage photovoltaïque:

II.2.1 Définition et principe de fonctionnement d'une pompe DC :

La pompe solaire est devenue au fil des ans la meilleure solution pour s'approvisionner en eau dans les zones où le réseau d'eau fait défaut. Plusieurs types de pompes solaires (pompe AC, pompes DC, pompes hybrides, etc.) jouent ce rôle. Ici nous allons vous présenter la pompe solaire DC ou pompe solaire à courant continu .

La pompe solaire DC est une pompe à eau fonctionnant directement avec le courant continu produit par les panneaux solaires. Ceci par opposition aux pompes solaires AC qui fonctionnent avec du courant alternatif, transformé (de DC à AC) par un onduleur placé entre les panneaux solaires et la pompe.

Le fonctionnement de la pompe solaire DC, à l'instar des autres pompes solaires, est relativement simple. En effet, des panneaux solaires captent directement l'énergie émise par le soleil et la transforment en courant continu dit courant DC.

Ce courant est utilisé directement par la pompe dans son fonctionnement. En général, la pompe DC fonctionne au fil du soleil, c'est-à-dire quand l'ensoleillement est suffisant. Cela peut poser des problèmes les jours où le soleil est moins présent ou bien si le débit journalier de votre pompe est inférieur à vos besoins. La pompe DC peut être immergée (elle est alors plongée intégralement au fond d'un puits ou d'un forage) ou de surface (elle reste alors à la surface et aspire l'eau par le biais d'un tuyau d'aspiration) [38].

Ce type de pompe s'intègre parfaitement dans les systèmes de pompage photovoltaïques grâce à sa simplicité de mise en œuvre, son efficacité énergétique et sa compatibilité directe avec la production solaire. Elle constitue un élément clé dans la réussite des projets d'alimentation en eau dans les zones rurales, tout en favorisant une approche durable et écologique.

II.2.2 Avantages et inconvénients des pompes DC :

- Les avantages :

Les pompes à courant continu (DC) offrent plusieurs avantages qui en font une solution privilégiée pour le pompage photovoltaïque :

- Compatibilité directe avec les panneaux photovoltaïques, sans besoin d'onduleur.
- Simplicité d'installation et de maintenance, adaptée aux zones isolées.
- Efficacité énergétique, avec un bon rendement sous un ensoleillement suffisant.

- Les inconvénients :

Malgré leurs nombreux avantages, les pompes DC présentent certaines limites :

- Dépendance à l'ensoleillement : leur fonctionnement est directement lié à l'intensité solaire ,ce qui peut limiter le pompage pendant les jours nuageux ou en début/fin de journée.
- Puissance limitée : les pompes DC sont généralement moins puissantes que les modèles à courant alternatif, ce qui peut restreindre leur utilisation à de faibles profondeurs ou débits modérés.

II.3 Composants clés du système de pompage photovoltaïque :

Les pompes solaires sont adaptées pour toutes les applications classiques de pompage. Elles offrent un atout particulier dans les endroits reculés n'ayant pas d'alimentation électrique sur secteur. Si le besoin d'eau est nécessaire en dehors des heures d'ensoleillement, il faut y adjoindre, soit des batteries soit une réserve tampons de stockage de l'eau [39].

Le système de pompe solaire se compose d'une surface de panneaux solaires, régulateur, La pompe DC, et réservoir.

II.3.1 Les panneaux photovoltaïques :

Les panneaux solaires sont la principale source d'énergie du système. Il capte le rayonnement solaire et le convertit en électricité sous forme de courant continu (DC). Ses performances dépendent de plusieurs facteurs, dont l'orientation, l'inclinaison, le niveau de lumière du soleil et la température ambiante. Leur taille doit être adaptée à la consommation de la pompe.



Figure II.2 : panneaux photovoltaïques

II.3.2 Le régulateur de charge :

Le régulateur pour panneaux solaires photovoltaïques est aussi appelé « contrôleur de charge », « régulateur de charge », « contrôleur solaire », ou encore « chargeur de batterie solaire ». Comme ses différents noms le suggèrent, il a pour rôle d'assurer la gestion des batteries de stockage et d'optimiser ces dernières, comprises dans les installations solaires qui en sont équipées afin de conserver le surplus de production [40].

Le régulateur de charge est placé entre les panneaux photovoltaïques et les batteries. Il contrôle la tension et le courant provenant des panneaux pour éviter la surcharge des batteries, ce qui pourrait les endommager [40]. De plus, il empêche la décharge excessive des batteries en coupant l'alimentation lorsque la tension descend en dessous d'un seuil critique. Cette gestion permet de maintenir les batteries dans une plage de fonctionnement sécurisée, généralement entre 40 % et 95 % de leur capacité.

Il permet aussi d'accroître la puissance des panneaux solaires. Il existe actuellement deux principaux types de régulateurs, PWM et MPPT [41].

II.3.3 La pompe DC :

La pompe à courant continu (DC) est un composant essentiel des systèmes de pompage photovoltaïque. Elle fonctionne directement avec l'électricité produite par les panneaux solaires, éliminant ainsi le besoin d'un onduleur.

On retrouve principalement deux types de pompes DC [37] :

- **La pompe de surface** : qui est positionnée au-dessus du point d'eau avec une entrée pour l'aspiration et une sortie pour le refoulement.
- **La pompe immergée** : qui est, comme son nom l'indique, immergée dans l'eau, l'aspiration se fait directement au niveau de la pompe.

Les pompes DC offrent plusieurs avantages [42]:

- Moteur synchrone DC sans balais à aimant permanent.
 - Roue en cuivre.
 - Garniture mécanique en alliage : durée de vie plus longue et haute fiabilité.
 - Protection intelligente contre le manque d'eau : lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits.
- Cependant, leur performance dépend de l'ensoleillement, ce qui peut limiter leur fonctionnement pendant les périodes nuageuses ou la nuit. Figure II.3

Figure II.3 : La pompe



DC

II.3.4 Le système de stockage de l'eau (réservoir) :

Dans un système de pompage photovoltaïque, le stockage de l'eau est une alternative stratégique au stockage de l'énergie. En effet, comme la disponibilité de l'énergie solaire est limitée aux heures d'ensoleillement, il est plus judicieux d'exploiter l'électricité solaire lorsqu'elle est disponible pour pomper

l'eau et la stocker dans un réservoir pour une utilisation différée. Ce choix permet non seulement de simplifier le système (en évitant l'usage de batteries coûteuses et contraignantes), mais aussi d'améliorer sa fiabilité, en assurant une réserve d'eau même pendant les périodes nuageuses ou la nuit.

Le réservoir peut être placé en hauteur, permettant ainsi une distribution gravitaire de l'eau sans recourir à une autre source d'énergie. Il joue également un rôle dans la régulation de la demande, en fournissant de l'eau en continu, indépendamment de la disponibilité immédiate du rayonnement solaire. Ce dispositif est particulièrement adapté aux applications agricoles ou rurales, où les besoins en eau peuvent varier selon les jours ou les saisons.

II.4 Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque :

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque est une étape essentielle pour assurer son efficacité et sa durabilité. Il consiste à adapter les composants du système aux besoins en eau spécifiques et aux conditions d'ensoleillement du site d'installation.

Pour dimensionner correctement un système de pompage, il faut prendre en compte plusieurs facteurs

[37] :

- Tout d'abord, le type d'application (arrosage, abreuvement, eau potable...)
- Ensuite, les besoins journaliers en eau en fonction de la saison
- Pour finir, les caractéristiques du lieu de pompage (coordonnées, en surface, immergé, profondeur, distance, HMT)

II.4.1 Dimensionnement du générateur photovoltaïque [35] :

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage $G_{ce} = 1000 \text{ W/m}^2$ et température de cellule $T_c = 25 \text{ °C}$)

$$P_p = n_g * A * G_{ce} \quad (\text{II.1})$$

Où :

p_p : Puissance de sortie sous CSM (W)

η : Rendement du générateur à la température de référence (25 °C)

A : Surface active du générateur (m²)

: Éclairement dans les CSM(1000W/m²)

L'énergie électrique journalière , est donner par :

$$E_e = n_{pv} * A * G_{dm}(\beta) \quad (II.2)$$

Où :

η_{pv} : Rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_{dm}(\beta)$: irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison

β (kWh/m²/jour).

Le rendement η_{pv} peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$n_{pv} = F_m[1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})]n_g \quad (II.3)$$

Où :

F : Facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum.

γ : Coefficient de température des cellules. γ prend des valeurs entre 0,004 et 0.005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T_c : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement. L'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique par l'expression

$$E_e = \frac{E_h}{n_{MB}} \quad (II.4)$$

Où :

E_h : Énergie hydraulique moyenne mensuelle (kWh)

η_{MB} : Rendement du sous-système moteur-pompe.

En substituant les équations (II.2), (II.3) et (II.4) dans (II.1), nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_p = \frac{G_{ce}}{F_m[1-\gamma(T_c-T_{c,ref})]G_{DM}(\beta)} * \frac{E_h}{n_{MB}} \quad (II.5)$$

Le choix du nombre de modules, ainsi que leur configuration (série/parallèle), est ensuite effectué en fonction des tensions et courants requis par la pompe, en veillant à rester compatible avec les caractéristiques du contrôleur de charge et les pertes du système.

II.5 Optimisation et performances du système :

II.5.1 Orientation et inclinaison des panneaux solaires :

L'orientation et l'inclinaison des panneaux photovoltaïques sont des paramètres essentiels pour optimiser la captation de l'énergie solaire.

- Orientation : En théorie, il est conseillé d'orienter ses panneaux solaires au Sud (Sud-Est ou Sud-Ouest éventuellement). En pratique, l'orientation du panneau solaire est imposée par l'orientation de la toiture.
- Inclinaison : En théorie, la meilleure inclinaison du panneau solaire est un angle entre 30° et 35° qui permet aux capteurs d'être perpendiculaires aux rayons solaires. En pratique, l'inclinaison du panneau solaire est dictée par l'inclinaison de la toiture [43].

II.5.2 Réduction des pertes énergétiques :

Outre les pertes électriques classiques dans le câblage ou le contrôleur, d'autres types de pertes peuvent aussi impacter l'efficacité globale d'un système de pompage photovoltaïque.

Aussi impacter l'efficacité globale d'un système de pompage photovoltaïque [44] :

- Pertes dues à l'encrassement des panneaux

L'accumulation de poussière, sable ou débris sur les modules photovoltaïques réduit la quantité de rayonnement solaire reçue par les cellules, ce qui entraîne une baisse significative de la production énergétique. Un entretien régulier et un nettoyage adapté permettent de maintenir un rendement optimal.

- Surchauffe des panneaux photovoltaïques

Les modules photovoltaïques perdent en efficacité lorsque leur température dépasse une certaine limite. Des solutions comme la ventilation naturelle, l'espacement adéquat entre les panneaux et la surface de montage ou encore le refroidissement passif peuvent contribuer à réduire cette surchauffe.

- Pertes dues à une mauvaise inclinaison saisonnière

Une inclinaison inappropriée des panneaux photovoltaïques par rapport à la position du soleil peut entraîner une diminution de l'énergie captée.

II.6 Effets des conditions climatiques sur les performances d'un système Photovoltaïque, en particulier sur le débit :

Les performances d'un système de pompage photovoltaïque sont étroitement liées aux conditions climatiques. Parmi les plus influents, on retrouve le rayonnement solaire (l'irradiance solaire (E)), la température ambiante (T), et le bon dimensionnement du système. Ces facteurs influencent directement la production d'énergie électrique par les panneaux solaires, ce qui affecte le fonctionnement de la pompe et, par conséquent, le débit d'eau.

II.6.1 Effet du rayonnement solaire (E) sur le débit :

Le rayonnement solaire (L'irradiance solaire) est le facteur principal qui détermine la quantité d'énergie produite par un module photovoltaïque. Une augmentation de l'irradiance entraîne une augmentation de la tension et du courant délivrés par le panneau, ce qui permet de faire fonctionner la pompe à un régime plus élevé. En conséquence, le débit augmente proportionnellement à l'intensité du rayonnement solaire, jusqu'à atteindre les limites techniques de la pompe [45] [46].

Exemple : En plein été, avec un ensoleillement supérieur à 800 W/m^2 , la pompe peut fonctionner à pleine capacité, assurant un débit élevé. En revanche, lors d'un ciel nuageux, où l'irradiance chute en dessous de 300 W/m^2 , la production d'énergie est réduite, provoquant un débit très faible, voire un arrêt de la pompe [45].

II.6.2 Effet de la température (T) sur le débit :

La température ambiante agit de manière indirecte sur le débit via son impact sur le rendement des panneaux photovoltaïques. En général, l'élévation de la température réduit la tension de sortie des panneaux, ce qui diminue la puissance fournie à la pompe. Ainsi, plus la

température augmente, plus la performance du système PV diminue, ce qui peut engendrer une baisse du débit [45] [46].

Il est aussi important de noter que la pompe elle-même peut être affectée par des températures extrêmes si elle n'est pas bien adaptée ou protégée [46].

II.6.3 Relation combinée entre le rayonnement (E), la température (T) et le débit :

Le débit d'un système de pompage photovoltaïque dépend à la fois du rayonnement solaire et de la température ambiante. Une irradiance élevée permet au système de générer plus d'énergie, ce qui améliore le fonctionnement de la pompe. Toutefois, une température élevée réduit l'efficacité des panneaux solaires, diminuant la puissance disponible.

En pratique, le débit varie durant la journée : il augmente le matin avec le rayonnement, atteint un maximum vers midi, puis diminue progressivement en fin d'après-midi à mesure que l'irradiance baisse et que la température augmente [45][46]

II.6.4 d'autres paramètres environnementaux (vent, poussière, humidité) sur le système PV:

Outre l'irradiance solaire et la température, d'autres facteurs environnementaux tels que le vent, la poussière et l'humidité relative influencent significativement les performances des systèmes photovoltaïques, notamment en ce qui concerne le débit dans les applications de pompage d'eau.

- Effet du vent : La vitesse du vent joue un rôle crucial dans le refroidissement des panneaux photovoltaïques. Une augmentation de la vitesse du vent améliore le transfert de chaleur par convection, réduisant ainsi la température de fonctionnement des modules et augmentant leur efficacité. Des études ont montré qu'une augmentation de la vitesse du vent peut entraîner une amélioration de l'efficacité du système PV jusqu'à 4,2 %.

- Effet de la poussière : L'accumulation de poussière sur la surface des panneaux photovoltaïques réduit la transmission du rayonnement solaire, diminuant ainsi la production d'énergie. Selon des recherches, la présence de poussière peut entraîner une réduction de la tension de sortie des modules PV jusqu'à 25 %.

Effet de l'humidité : Une humidité relative élevée peut affecter négativement les performances des cellules photovoltaïques. L'humidité peut pénétrer dans les modules PV par des microfissures ou des défauts d'encapsulation, provoquant la corrosion des composants

internes et réduisant ainsi la durée de vie et l'efficacité des modules. **[45-49]**

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail le système de pompage photovoltaïque en tant que solution durable, efficace et adaptée aux besoins en eau dans les zones éloignées ou non raccordées au réseau électrique. Le principe de fonctionnement de ce système repose sur la conversion directe de l'énergie solaire en électricité, permettant l'alimentation autonome d'une pompe à courant continu (DC), souvent associée à un réservoir de stockage d'eau.

Les caractéristiques des pompes DC ont été analysées, soulignant leur simplicité, leur compatibilité directe avec les panneaux solaires, ainsi que leurs limites en termes de puissance et de dépendance à l'ensoleillement. Nous avons ensuite décrit les composants clés du système, à savoir les panneaux photovoltaïques, le régulateur de charge, la pompe DC et le réservoir, tout en mettant en évidence leur rôle et leur importance dans l'efficacité globale du système. Une attention particulière a été accordée au dimensionnement correct du système, étape cruciale pour garantir un fonctionnement optimal et une couverture adéquate des besoins en eau. L'optimisation des performances, notamment à travers l'orientation, l'inclinaison des panneaux, et la réduction des pertes énergétiques, constitue également un levier important pour améliorer le rendement.

Enfin, nous avons montré que les conditions climatiques, telles que l'irradiance solaire, la température, la vitesse du vent, la présence de poussière et le taux d'humidité, influencent directement le fonctionnement du système, notamment en ce qui concerne le débit de la pompe. Comprendre et anticiper ces effets permet de mieux adapter les systèmes aux réalités locales et d'en maximiser l'efficacité.

Ainsi, le système de pompage photovoltaïque se présente non seulement comme une alternative écologique aux systèmes conventionnels, mais aussi comme une technologie d'avenir qui contribue activement aux objectifs du développement durable.

Chapitre III

Réalisation pratique

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la partie expérimentale de notre projet, axée sur la mise en œuvre d'un système de pompage photovoltaïque avec un dispositif de refroidissement destiné à améliorer les performances du panneau solaire. Cette étape est cruciale dans le cadre de la validation de notre étude, car elle permet de passer de la théorie à la pratique. Nous détaillerons le choix et les caractéristiques des équipements utilisés (panneau solaire, pompe, MPPT, batterie, capteurs, etc.), les différentes phases d'installation, ainsi que les méthodes de mesure adoptées. L'objectif principal de cette expérimentation est d'analyser l'impact du refroidissement sur l'efficacité énergétique du système de pompage photovoltaïque.

III.1 La technique que nous avons adoptée pour améliorer les performances du panneau solaire connecté à un système de pompage :

À travers nos recherches approfondies, il a été démontré que le refroidissement arrière actif à l'eau constitue la solution la plus efficace, comparativement au refroidissement par air ou au refroidissement passif à l'eau. En effet, cette méthode permet une meilleure dissipation thermique, ce qui contribue de manière significative à l'amélioration du rendement des panneaux photovoltaïques.

En conséquence, nous avons adopté cette technique dans notre expérimentation, en mettant en place un système de refroidissement basé sur un contact direct entre l'eau et la face arrière du panneau photovoltaïque, afin d'assurer un échange thermique optimal. Le principe consiste à détourner une partie de l'eau pompée vers l'arrière du panneau solaire, où elle absorbe la chaleur, avant de réintégrer le circuit d'irrigation. Ce procédé permet une utilisation rationnelle de l'eau sans aucun gaspillage.

Le système a également été équipé de capteurs de courant et de tension permettant de suivre les performances du panneau solaire en temps réel, à la fois avec et sans refroidissement.

L'objectif principal de ce dispositif est de réduire la température des cellules photovoltaïques pendant leur fonctionnement, afin de limiter l'impact négatif de la chaleur sur la tension électrique, ce qui permet d'améliorer l'efficacité globale du système et d'augmenter la production d'énergie destinée à l'alimentation de la pompe.

III.2 Les équipements utilisés dans notre expérience de pompage photovoltaïque :

Dans le cadre de notre expérience visant à améliorer l'efficacité d'un système de pompage photovoltaïque, le choix des équipements a été d'une importance capitale. Dans cette section, nous allons passer en revue tous les composants que nous avons utilisés, en tenant compte de leurs caractéristiques techniques et de leur rôle dans le système.

III.2.1 Le panneau solaire

Le panneau solaire est le composant principal de tout système de pompage photovoltaïque, car il est considéré comme le générateur qui se charge de convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Nous avons choisi un panneau solaire de type mono qui correspond aux besoins du système de pompage. Nous l'avons choisi sur la base de sa capacité de production.

Le panneau solaire est le composant principal de tout système de pompage photovoltaïque. Figure III.1



Figure III.1 : Panneau photovoltaïque utilisé dans notre système

Tableau III.1 : Caractéristiques techniques et physiques du module photovoltaïque ALPV85

Caractéristique	Valeur	Unité	Remarque
Type de panneau	ALPV85	-	-
Puissance nominale (P_{max})	85	W	-
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	21.5	V	-
Tension à puissance max (V_{mp})	17.2	V	-
Courant de court-circuit (I_{sc})	5.30	A	-
Courant à puissance max (I_{mp})	4.93	A	-
Nombre de cellules	36	-	Monocristallines
Dimensions (L × l × h)	1200 × 540 × 35	mm	-
Taille des cellules	156 × 156	mm	-
Poids	8.5	kg	-

III.2.2 La pompe à eau

La pompe à eau 12V à courant continu est couramment utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques en raison de son efficacité et de ses caractéristiques adaptées à notre expérience. Figure III.2



Figure III.2 : La pompe à eau 12V à courant continu

Tableau III.2 : Caractéristiques techniques de la pompe à eau 12V DC

Caractéristique	Valeur	Unité
Nom	Pompe à eau 12V DC	–
Type	Pompe centrifuge sans balais	–
Tension nominale	12	V
Courant maximal	1000	mA
Puissance	22	W
Débit maximal	800	L/h
Hauteur de refoulement	5	m
Température max de l'eau	100	°C

III.2.3 Régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

C'est une technique adoptée dans les systèmes photovoltaïques pour ajuster en continu le courant et la tension du générateur photovoltaïque afin d'obtenir la puissance électrique maximale possible (MPP), indépendamment des variations de l'irradiation solaire et de la température de la cellule. Figure III.3



Figure III.3 : Régulateur de charge Technologie MPPT (P&O)

Tableau III.3 Caractéristiques principales du contrôleur solaire Biltema 25-5099

Propriété	Valeur
Tension nominale	12/24 Volts DC
Courant de charge maximal	10 Ampères
Puissance d'entrée maximale	130 W à 12 V 260 W à 24 V
Tension d'entrée maximale	150 Volts
Dimensions de l'unité	143 × 71 × 37 mm
Classe de protection	IP64

III.2.4 La batterie

La batterie Ritar 12V 100Ah c'est une batterie rechargeable utilisée pour stocker l'énergie électrique dans les systèmes PV. Figure III.4



Figure III.4 : Technologie MPPT : Suivi du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques

Propriété	Valeur
Tension nominale	12 Volts
Capacité	100 Ah
Type de batterie	AGM / Gel
Tension de charge complète	14.4 - 14.7 Volts
Tension de flottement	13.5 - 13.8 Volts
Température de fonctionnement	-20°C à 50°C
Durée de vie estimée	8 - 10 ans
Dimensions	330 × 173 × 220 mm
Poids	28 - 30 kg
Résistance interne	≤ 5 mW
Courant de décharge maximal	1000 A (5 s)

Tableau III.4 : Caractéristiques principales de la batterie Ritar 100Ah 12V

III.3 Les composants Arduino et capteurs utilisés dans notre système de pompage photovoltaïque

Notre système de pompage photovoltaïque utilise la carte Arduino UNO pour surveiller les capteurs de température, de courant et de tension. Tandis que le module MPPT vise à maximiser l'efficacité des panneaux solaires, ces capteurs permettent de surveiller les performances du système.

III.3.1 Arduino UNO

La carte de développement Arduino UNO est largement utilisée dans de nombreux projets de programmation électronique, car elle permet de contrôler divers capteurs, moteurs et éclairage. Il est possible de la programmer en utilisant l'IDE Arduino. Figure III.5



Figure III.5 : Arduino UNO

Tableau III.5 : Caractéristiques principales de la carte Arduino UNO

Propriété	Valeur
Microcontrôleur	ATmega328P
Tension de fonctionnement	5V
Nombre de broches numériques	14 (dont 6 PWM)
Broches analogiques	6
Mémoire Flash	32KB
Fréquence d'horloge	16 MHz
Port USB	Type-B
Courant de sortie maximal	50mA (par broche)

III.3.2 Le capteur de température LM35

Ce capteur est largement utilisé en raison de sa facilité d'utilisation, de sa faible consommation d'énergie, ainsi que de la plage de mesure qu'il offre. Figure III.6



Propriété	Valeur
Plage de mesure	-55°C à +150°C
Précision	±0,5°C
Tension d'alimentation	4V à 30V
Sortie	10 mV/°C

Figure III.6 : Le capteur de température LM35

Tableau III.6 : Caractéristiques LM35

III.3.3. Le capteur de température DS18B20

Le capteur DS18B20 est un capteur numérique pour mesurer la température, il fournit des lectures avec une grande précision via le protocole 1-Wire et peut mesurer des températures de -55°C à +125°C avec une précision de ±0,5°C. Il est particulièrement idéal pour mesurer la température des liquides. Figure III.7



Figure III.7 : Le capteur de température LM35 avec Arduino

III.3.4 Capteur de Courant ACS712

Le capteur de courant ACS712 est un capteur analogique qui permet de mesurer le courant électrique (AC) et (DC) avec une grande précision. Il fournit une sortie proportionnelle au courant détecté et est disponible en différentes plages de mesure. Figure.III.8

III.3.5 Capteur de tension DC0-25V

Le capteur de tension DC 0-25V est un module permettant de mesurer la tension continue jusqu'à 25V. Il convertit la tension mesurée en une sortie analogique compatible avec les micro-contrôleurs comme Arduino. Figure III.9

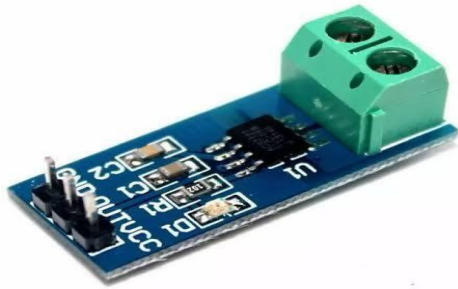


Figure III.8: Capteur de Courant ACS712

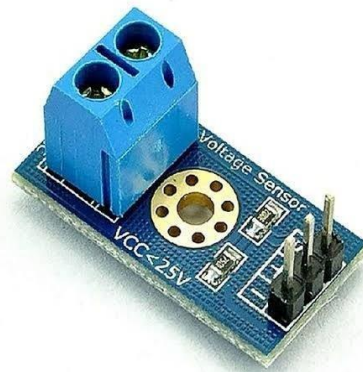


Figure III.9: Capteur de tension DC0-25V

III.4 Pistolet thermomètre infrarouge

C'est un appareil utilisé pour mesurer la température à distance en utilisant les infrarouges sans contact direct avec les surfaces, de manière à envoyer un rayon vers la surface dont on veut mesurer la température, Figure III.10



Figure III.10 : Pistolet thermomètre infrarouge

III.5 Les éléments de protection

Les composants de protection sont des dispositifs utilisés pour protéger les circuits électriques contre les surtensions, les surintensités, les courts-circuits.

III.5.1 Protection par Fusible.

- Le fusible : est un dispositif de protection électrique qui coupe le courant lorsque l'intensité dépasse une valeur définie. Dans notre expérience, un fusible de 6 ampères (6A) a été utilisé, qui fond automatiquement au-delà de cette limite.
- Les porte-fusibles : sont des dispositifs utilisés pour installer des fusibles dans les circuits électriques de manière sécurisée, permettant de protéger les équipements contre les surtensions ou les courts-circuits. Figure III.11 et Figure III.12



Figure III.11 : Les porte-fusibles



Figure III.12 : Un fusible de 6(A)

III.6 Outils pour l'installation de notre système de pompage

- Support en Forex pour le refroidissement des panneaux PV

Dans le but d'améliorer l'efficacité du système de refroidissement par eau, un support a été réalisé en Forex, un matériau en PVC expansé reconnu pour sa légèreté, sa résistance à l'humidité et aux rayons UV, ainsi que sa facilité de découpe.

Le support est constitué de plaques de dimensions 60×25 cm, fixées à l'arrière du panneau photovoltaïque. Ces plaques comportent des ouvertures horizontales permettant la circulation de l'eau ou le passage des conduites. Cette configuration assure une répartition uniforme de l'eau de refroidissement sur la surface du panneau, favorisant ainsi un échange thermique efficace.

L'intégration de ce support contribue à la réduction de la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques, ce qui permet une amélioration notable du rendement énergétique global du système. Figure III.13

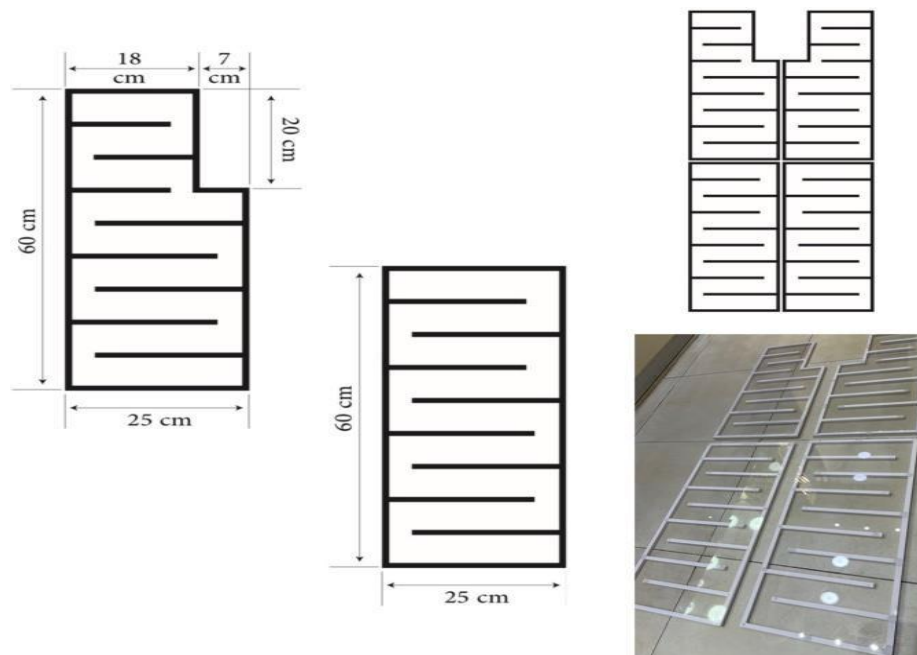


Figure III.13 : Plaques de forex

- Tuyauterie

Ce sont des conduits utilisés pour transporter l'eau d'un point à un autre. Les tuyaux que nous avons utilisés ont des dimensions de 8 mm pour le petit tuyau et de 20 mm pour le grand tuyau. Figure III.14



Figure III.14 Tuyaux d'eau

- Pipes d'entrée et de sortie

Nous avons conçu une entrée et une sortie principales, chacune comportant quatre trous secondaires, ainsi qu'un cinquième trou dédié à l'installation du capteur DS18B20 pour mesurer la température de l'eau à l'entrée et à la sortie. Figure III.15 et Figure III.16

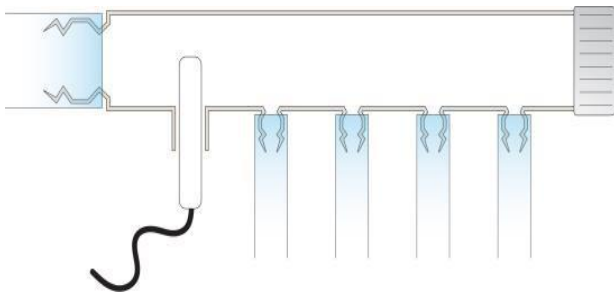


Figure III.15 : Modèle des pipes d'entrée et de la sortie



Figure III.16 : Pipes réalisées

III.7 L'installation finale

La procédure pratique de réalisation de notre prototype inclus les étapes suivantes :

✓ Préparation des panneaux arrière :

- Nous avons percé une entrée et une sortie pour chaque plaque Forex.
- Nous avons collé les plaques sur la surface arrière du panneau solaire à l'aide de silicone.

✓ Connexion des tuyaux secondaires :

- Nous avons relié les entrées des plaques à l'entrée principale de l'eau à l'aide de tuyaux de 8 mm de diamètre.
- Nous avons relié les sorties des plaques à la sortie principale avec les mêmes tuyaux de 8 mm.

✓ Connexion des tuyaux principaux :

- L'entrée principale est connectée à la sortie de la pompe par un tuyau de 20 mm de diamètre.
- L'entrée de la pompe est reliée à un tuyau de même taille (20 mm) immergé dans l'eau.
- La sortie principale est également connectée à un tuyau de 20 mm de diamètre qui mène vers le réservoir d'eau.

✓ Connexion des capteurs à l'Arduino :

- Nous avons connecté les capteurs à l'Arduino et ajouté des écrans pour afficher les résultats de la courbe I-V et la température de l'eau à l'entrée et à la sortie.
- Le tout est placé dans un coffret étanche en PVC e boîte en plastique avec le MPPT et les porte-fusibles. Figure III.17

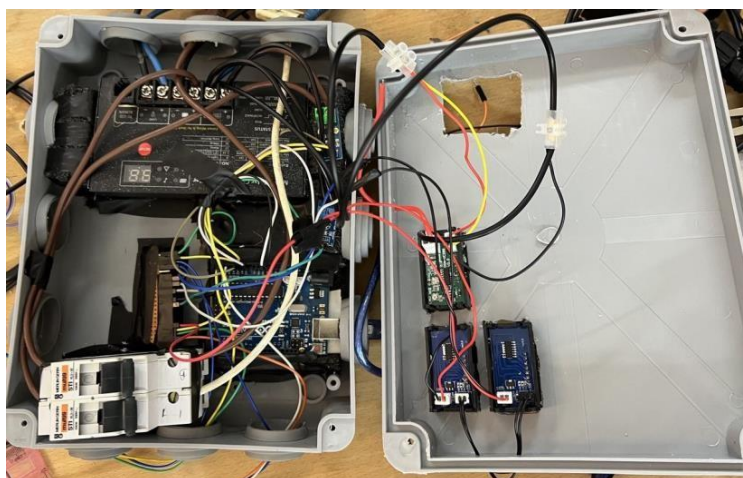


Figure III.17 : Boîtier technique d'un système de pompage solaire autonome

✓ Installation finale :

- Finalement, nous avons placé le panneau solaire sur un support en métal et avons installé la boîte en plastique ainsi que la pompe dessus. Figure III.18, Figure III.19 .



Figure III.18 : Mise en place et câblage final du système de pompage solaire avec système de refroidissement

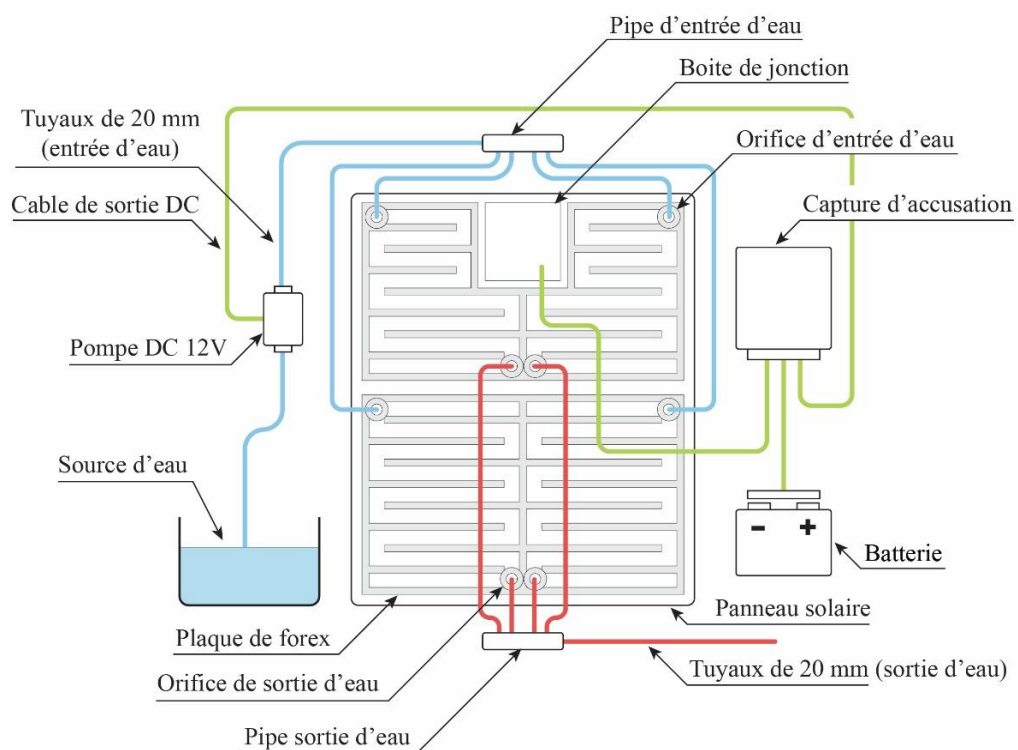


Figure III.19 : Schéma de refroidissement des panneaux photovoltaïques Par eau

Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire de manière détaillée la mise en œuvre pratique du système de pompage photovoltaïque étudié. L'installation des différents composants, le choix judicieux du matériel, ainsi que l'intégration des capteurs et de la carte Arduino ont constitué une étape essentielle dans la vérification de notre hypothèse de départ : l'amélioration du rendement par le refroidissement du panneau. Malgré certaines difficultés techniques rencontrées, des solutions adaptées ont été mises en place pour garantir le bon fonctionnement du système.

Ces travaux pratiques ouvrent ainsi la voie à une analyse plus approfondie des résultats expérimentaux qui seront abordés dans les chapitres suivants.

Chapitre IV

Simulation/Résultats et discussion

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats de deux séries d'essais : la première sans refroidissement, la seconde avec un système de refroidissement par eau pour améliorer l'échange thermique.

Le but de cette analyse est d'évaluer les performances du module photovoltaïque dans deux situations en comparant les paramètres électriques (tension, courant, puissance) et les températures de la cellule solaire.

Cette étude cherche à montrer la relation entre la température de la cellule et son rendement, et à évaluer l'efficacité du système de refroidissement pour limiter la dégradation thermique des performances, un facteur clé pour le rendement des modules photovoltaïques, surtout dans les régions chaudes.

IV.1 Modèle du générateur PV

Le Module photovoltaïque est modélisé à l'aide du bloc PV Array dans MATLAB/Simulink. Ce bloc simule le comportement électrique du module en fonction de deux entrées principales : l'irradiation solaire (W/m^2) et la température des cellules ($^{\circ}\text{C}$). Figure IV.1

Figure 1 le modèle repose sur la caractéristique courant-tension (I.13) et prend en compte l'effet de la température et de l'ensoleillement sur la puissance produite. Il fournit des sorties telles que le courant, la tension et la puissance, permettant d'analyser l'impact des conditions climatiques sur la performance du système photovoltaïque.

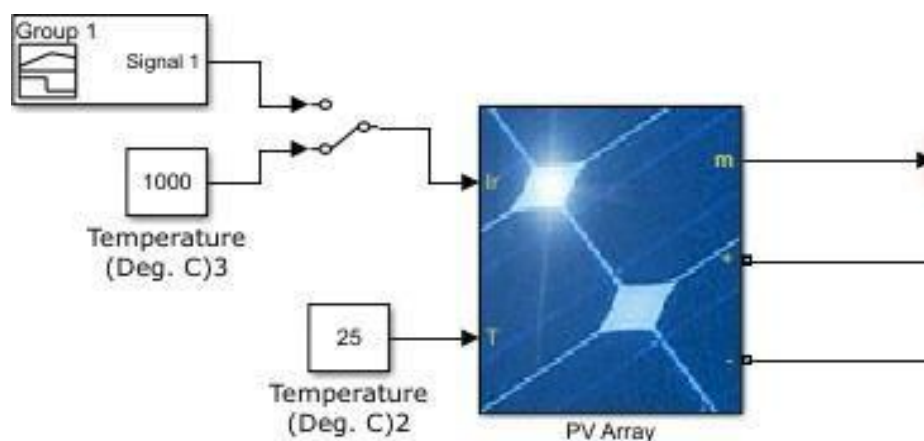


Figure IV.1 : Modélisation d'un panneau photovoltaïque sous MATLAB/Simulink à l'aide du bloc PV Array

IV.2 Conversion DC-DC (Buck)

Comme le régulateur de tension utilisé pratiquement utilise un convertisseur abaisseur, dans notre modèle, nous avons utilisé un convertisseur Buck pour abaisser la tension provenant du panneau photovoltaïque afin qu'elle soit adaptée à la sortie 12V (charge de batterie) et l'alimentation d'une pompe à eau. Ce convertisseur joue un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie, permettant de stabiliser la tension et d'optimiser le transfert de puissance vers la charge Figure IV.2 .

Le convertisseur que nous avons implémenté est composé de :

- Un transistor IGBT servant d'interrupteur, commandé par un signal PWM.
- Une diode de roue libre pour maintenir la continuité du courant lorsque le transistor est désactivé.
- Une inductance pour stocker l'énergie et réduire les ondulations de courant.
- Un condensateur (C) pour lisser la tension de sortie.
- Un bloc de commande qui génère le signal PWM en fonction de l'algorithme MPPT de type Perturb and Observe.

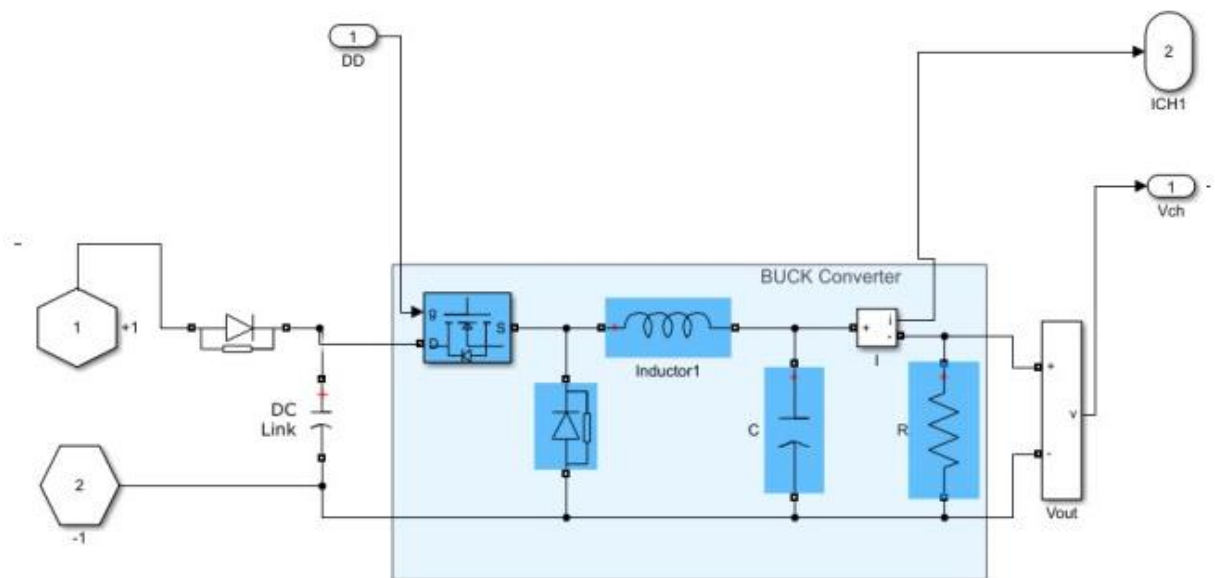


Figure IV.2 : Schéma de simulation du convertisseur Buck

La relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie du convertisseur Buck est donnée par :

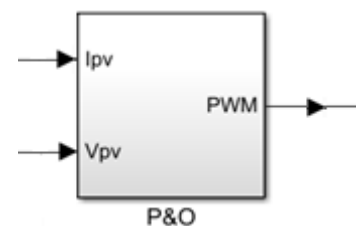
$$V_{out} = \alpha \cdot V_{in} \quad (IV.1)$$

Où α présente le rapport cyclique (duty cycle), c'est-à-dire la proportion du temps pendant l'interrupteur est fermé pendant une période de modulation PWM.

IV.3 Simulation d'un système MPPT basé sur l'algorithme P&O sous MATLAB/Simulink

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode permettant d'extraire la puissance maximale possible d'un panneau photovoltaïque en ajustant dynamiquement son point de fonctionnement en fonction des variations d'ensoleillement et de température.

Figure IV.3 : Modèle de simulation MPPT dans MATLAB



L'algorithme P&O est une technique simple et largement utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques.

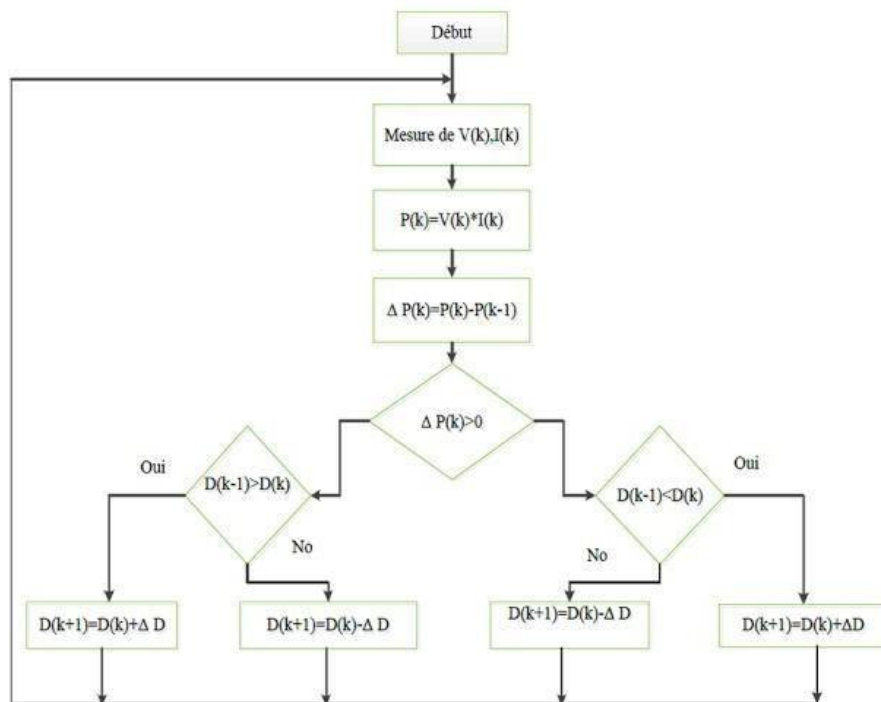


Figure IV.4 : Organigramme de l'algorithme MPPT Perturb and Observe (P&O)

IV.4 Schéma final de la simulation du système photovoltaïque avec Convertisseur Buck et algorithme MPPT P&O :

Ce schéma représente le résultat final d'une simulation visant à améliorer les performances d'un système photovoltaïque en appliquant l'algorithme MPPT de type Perturb and Observe (P&O), associé à une technique de régulation de tension.

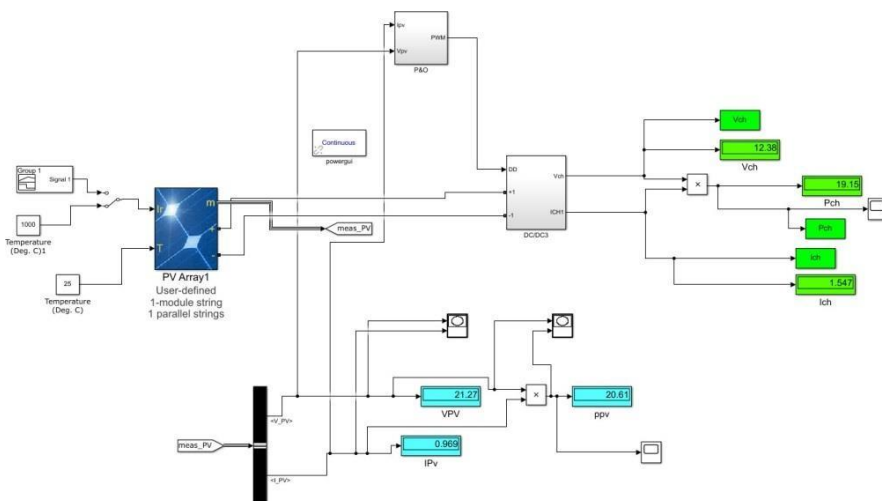


Figure IV.5 : Schéma de simulation du convertisseur Buck

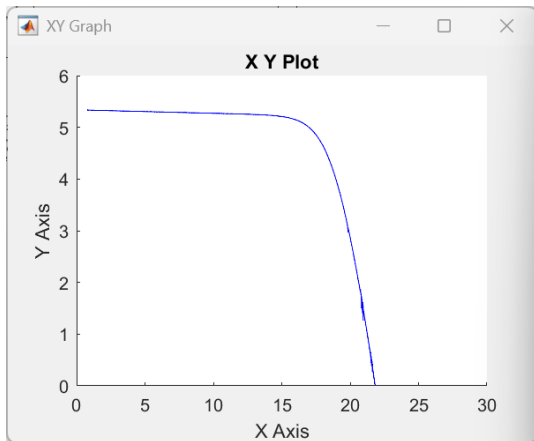
➤ Remarque :

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas réalisé la simulation de la pompe à eau Utilisée dans le système, car aucune information technique détaillée ni fiche technique n'a été trouvée à son sujet. Par souci de rigueur scientifique et afin d'éviter toute approximation non fondée,

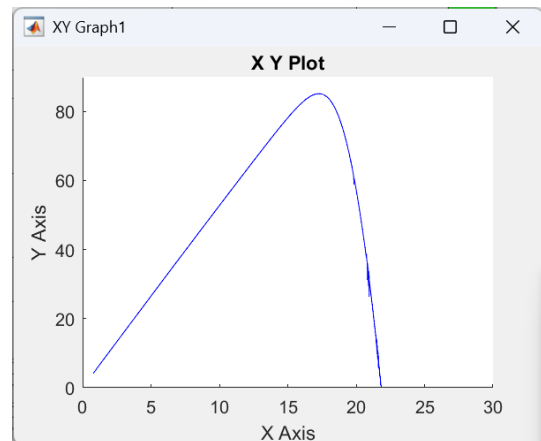
nous avons donc choisi de ne pas inclure cette simulation dans notre travail. Cette démarche garantit la fiabilité et la validité des résultats obtenus dans les parties simulées du système.

IV.5 Courbes I-V et P-V obtenues par simulation

Lors de la simulation d'un système photovoltaïque sous les conditions standardisées dites STC on obtient deux courbes principales représentant la performance du panneau solaire. La première est la courbe intensité-tension (I-V), qui montre la relation entre le courant électrique et la tension aux bornes du panneau. Le courant est maximal (courant de court-circuit, I_{sc}) lorsque la tension est nulle, puis il diminue progressivement jusqu'à atteindre zéro à la tension de circuit ouvert (V_{oc}). La deuxième courbe est la courbe puissance-tension (P-V), qui représente la puissance délivrée par le panneau en fonction de la tension, mettant en évidence le point de puissance maximale (MPP), c'est-à-dire la condition optimale pour extraire la puissance maximale. Ces courbes sont essentielles pour analyser et optimiser la performance des panneaux photovoltaïques dans des conditions normalisées Figure IV.6.



(a) Courbe I-V



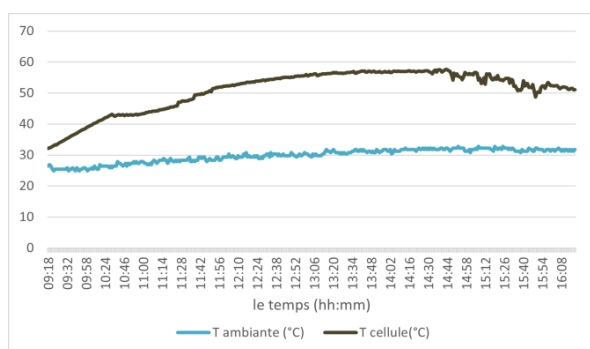
(b) Courbe P-V

Figure IV.6 : Courbes caractéristiques obtenues par simulation

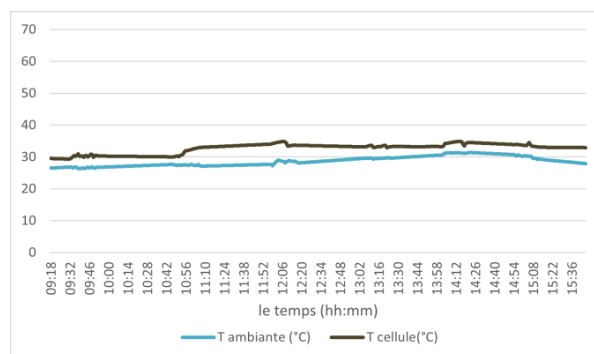
IV.6 Évolution des températures ambiante et celle de la cellule photovoltaïque avec et sans refroidissement

En vue d'investiguer l'effet de la température sur les performances du système PV, nous avons mesuré la température du panneau solaire en utilisant un capteur LM35 fixé fermement à la surface du panneau, et recouvert d'une couche isolante thermiquement dans le but de mesurer uniquement la température du panneau sans être influencé par l'environnement ambiant. Nous avons également placé un autre capteur LM35 pour mesurer la température ambiante, afin qu'il serve de référence.

Nous avons enregistré les mesures dans des conditions naturelles sans refroidissement du panneau, et nous avons également enregistré les mesures dans le cas du refroidissement du panneau. Les résultats sont illustrés dans les figures ci-dessous. Figure IV.7



(a) sans refroidissement



(b) avec refroidissement

Figure IV.7 : Température de la cellule PV et température ambiante dans les deux essais

Le refroidissement par un flux d'eau continu sur la surface arrière du panneau solaire a considérablement réduit la température des cellules par rapport aux cellules exposées aux conditions naturelles, de sorte que l'eau entrant à une température d'environ 28 degrés assure un refroidissement continu et maintient une température modérée pour les cellules.

IV.6.1 Variation de La température d'eau de Refroidissement

L'eau utilisée comme fluide caloporteur dans le système de refroidissement absorbe l'excès de température des cellules solaire d'où l'élévation de température du liquide. Dans notre expérience, l'eau était pompée depuis la source avec une température quasiment constante d'environ 28 °C. Figure IV.8

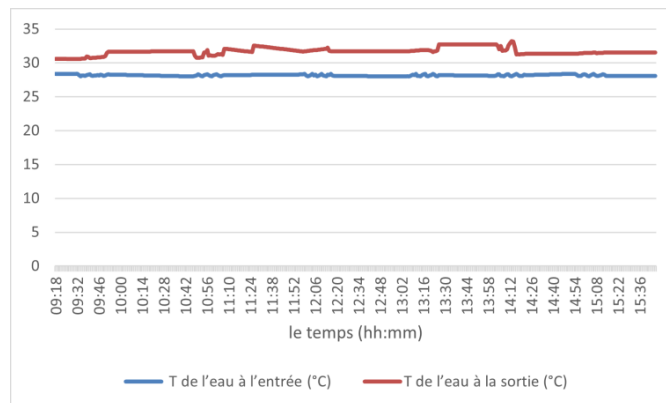


Figure IV.8 : Température de l'eau à l'entrée et à la sortie ; Essai de refroidissement

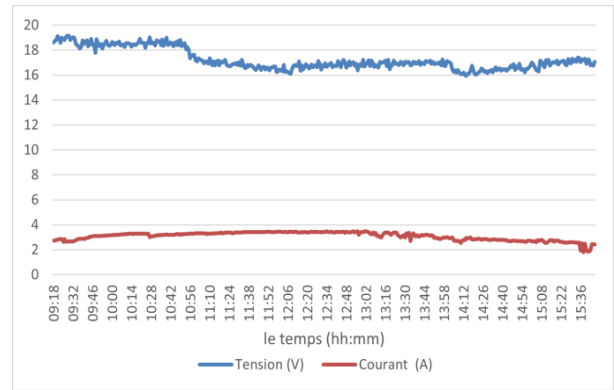
Grâce à son écoulement continu et à l'échange thermique direct avec le panneau photovoltaïque, elle a permis de contrôler efficacement la température du module. Cette performance est attribuée à la haute capacité thermique de l'eau, qui lui a permis d'absorber la chaleur de manière efficace, entraînant ainsi une diminution de la température du panneau et une amélioration de son rendement.

IV.7 Variation de la Tension, le courant et la puissance de sortie

Dans les deux essais, nous avons obtenu les valeurs du courant et de la tension à l'aide de capteurs connectés à l'Arduino. La figure ci-dessous, illustre la variation de ces deux paramètres. Le courant ne varie pas considérablement vu qu'il est proportionnel à l'éclairement et faiblement sensible à la température tandis que la tension varie d'une manière considérable.



(a) sans refroidissement



(b) avec refroidissement

Figure IV.9 : La Tension et le courant de sortie dans les deux essais

Par suite de ces variations, la puissance du module photovoltaïque a été déterminée en appliquant la relation : $P = I \times V$. On voit bien l'amélioration portée à la puissance de sortie par suite du refroidissement. Figure IV.10

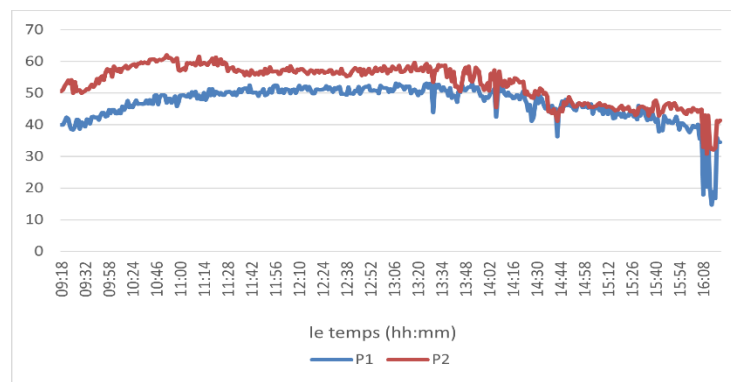


Figure IV.10 : La puissance générée avec et sans refroidissement

L'augmentation de la puissance en cas de refroidissement du panneau solaire est due à l'amélioration de la tension qui augmente avec la baisse de la température de la cellule, et vice versa.

Pour bien mettre en évidence cette amélioration on calcule la différence entre la puissance du module photovoltaïque sans système de refroidissement et celle avec refroidissement, nous avons obtenu la courbe suivante représentant l'évolution de ΔP (différence de puissance) entre les deux cas. Figure IV.11

$$\Delta P = P_{2_{\text{refroidi}}} - P_{1_{\text{non-refroidi}}} \quad (\text{IV.2})$$

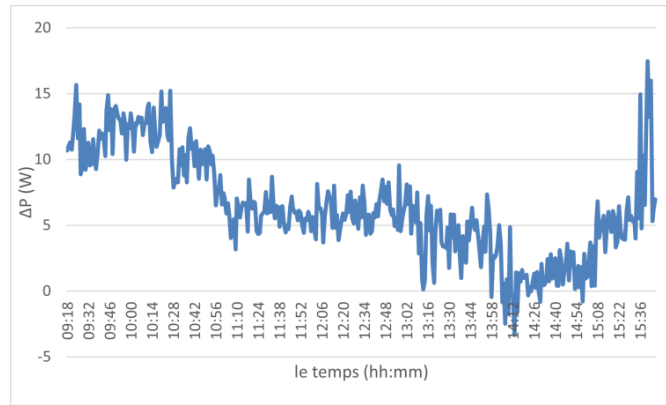


Figure IV.11 : la variation de puissance entre les deux essais

D'après la courbe, on observe une amélioration notable de la puissance lors du refroidissement, puisque la valeur de ΔP reste positive pendant presque toute la durée de l'essai, ce qui indique que le système de refroidissement a contribué à améliorer les performances du module photovoltaïque.

IV.8 Analyse du taux d'amélioration de la puissance grâce au refroidissement

Nous avons calculé la puissance moyenne du module photovoltaïque sans refroidissement P1 ainsi que la puissance moyenne avec refroidissement actif par eau P2, et les résultats obtenus sont les suivants :

- Puissance avec refroidissement actif par eau :

$$P_{\text{refroidi}} = 53.198 \text{ W}$$

- Puissance sans refroidissement :

$$P_{\text{non-refroidi}} = 46.818 \text{ W}$$

Ainsi, la différence de puissance (amélioration des performances) due au refroidissement est donnée par :

$$\Delta P = P2_{\text{refroidi}} - P1_{\text{non-refroidi}} = 53.198 - 46.818 = 6.38 \text{ W} \quad (\text{IV.3})$$

La formule pour calculer le taux d'amélioration est :

$$\text{Taux d'amélioration} = \frac{\Delta P}{P_{\text{non-refroidi}}} * 100 \quad (\text{IV.4})$$

Donc, le Taux d'amélioration est ;

$$\Delta P\% = \frac{6.38}{46.818} * 100 = 13.63\% \quad (\text{IV.5})$$

Ce qui indique que le système de refroidissement a permis une amélioration notable des performances du module photovoltaïque.

Cette expérience peut être considérée comme réussie en raison de l'amélioration significative

observée dans l'efficacité du panneau photovoltaïque.

Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'impact significatif de la température des cellules photovoltaïques sur les performances globales des systèmes solaires. Les résultats obtenus à travers la modélisation et l'expérimentation ont montré qu'un système de refroidissement par eau continue permet une réduction efficace de la température des cellules, entraînant ainsi une amélioration notable de la tension, du courant et, par conséquent, de la puissance électrique produite. Une amélioration de 13,63% a été constatée, ce qui témoigne de l'efficacité de cette approche, notamment dans les zones à climat chaud. L'étude a également démontré l'importance de l'intégration entre les outils de simulation (comme l'algorithme MPPT de type Perturbe and Observe) et les dispositifs matériels (convertisseur Buck, capteurs, systèmes de refroidissement), pour concevoir des systèmes photovoltaïques performants et optimisés.

En somme, cette analyse confirme que le contrôle thermique constitue un levier essentiel pour améliorer le rendement des modules photovoltaïques, et ouvre la voie à des recherches futures portant sur des techniques de refroidissement innovantes, durables et économiquement viables.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre des efforts visant à améliorer les performances des stations photovoltaïques dédiées au pompage de l'eau, en particulier dans les zones isolées où l'accès à l'électricité conventionnelle est limité. À travers cette étude, nous avons exploré les différents aspects techniques et pratiques liés aux systèmes photovoltaïques, en mettant en évidence un facteur crucial qui influence leur rendement : l'élévation de la température des modules solaires.

Les résultats obtenus, tant par la simulation que par l'expérimentation, ont montré que la hausse de température des cellules photovoltaïques diminue significativement leur efficacité, ce qui se répercute négativement sur la puissance délivrée et donc sur le débit de pompage. Dans ce contexte, le recours à des techniques de refroidissement par l'eau s'est avéré être une solution efficace pour réduire la température des modules et améliorer leur performance électrique. Par ailleurs, l'étude a porté sur la modélisation complète du système PV en passant par le convertisseur Buck et les conditions climatiques. Grâce à l'environnement MATLAB/Simulink, nous avons pu évaluer l'effet de la température sur les performances du système PV.

Du côté expérimentation, on a mis en évidence l'effet positif du refroidissement des modules solaires. L'expérience a montré qu'on peut améliorer énormément la puissance de sortie en utilisant une procédure de refroidissement adéquate. Dans nos tests, une augmentation jusqu'à 13% est atteinte. Bien sûr, chaque technique a ses propres avantages et inconvénients et ces contraintes technico-économiques.

En conclusion, cette recherche met en évidence l'importance d'une approche intégrée combinant conception adaptée, contrôle efficace et refroidissement par eau afin d'optimiser les performances des systèmes de pompage photovoltaïque. Nous recommandons de poursuivre les travaux dans ce domaine à travers des expérimentations en conditions réelles, en vue de développer des systèmes de refroidissement hydrauliques simples, économiques et applicables à grande échelle, contribuant ainsi à une transition énergétique durable dans les régions les plus vulnérables.

Références Bibliographiques

- [1] CESAR. The structure of the sun. https://cesar.esa.int/upload/201807/the_suns_structure_booklet.pdf, 2018.
- [2] P. Judge. The Sun : A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2020.
- [3] Britton Olson. Fusion regulation in the sun, 2020.
- [4] SAAD Bendaoud. Earth rotates on itself, the revelation of the qur'an more than 1400 years ago. *Emirati Journal of Space and Astronomy Sciences*, 1(2) :14–37, 2023.
- [5] John M Wahr. The earth's rotation. IN : Annual review of earth and planetary sciences. Volume 16 (A88-52285 22-46). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1988, p. 231-249., 16 :231–249, 1988.
- [6] Lucas J Lourens. The variation of the earth's movements (orbital, tilt, and precession) and climate change. In *Climate change*, pages 583–606. Elsevier, 2021.
- [7] A. Labouret, P. Cumunel, J.-P. Braun, and B. Faraggi, *Cellules solaires – Les bases de l'énergie photovoltaïque*, 5^e éd. Paris, France: Dunod, 2010.
- [8] Pierre Bessemoulin and Jean Oliviéri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La météorologie*, 2000(31) :42–59, 2000.
- [9] C Riou, C Valancogne, and Philippe Pieri. Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne-vérification expérimentale. *Agronomie*, 9(5) :441–450, 1989.
- [10] Abdelhamid M'Raoui, Samira Mouhous, Ali Malek, and Boumediene Benyoucef. Etude statistique du rayonnement solaire à alger. *Revue des Energies Renouvelables*, 14(4) :637– 648, 2011.
- [11] JA Coakley. Reflectance and albedo, surface. *Encyclopedia of atmospheric sciences*, 12, 2003.
- [12] Jérôme Fatet. Les recherches d'Edmond Becquerel sur la nature de la lumière entre 1839 et 1843, histoire d'une interaction réussie entre science et photographie. PhD thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2005.
- [13] Martin A Green. The path to 25% silicon solar cell efficiency : History of silicon cell

- evolution. *Progress in photovoltaics : research and applications*, 17(3) :183–189, 2009.
- [14] Lewis M Fraas and Larry D Partain. *Solar cells and their applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [15] Lari Nousiainen, Joonas Puukko, Anssi Mäki, Tuomas Messo, Juha Huusari, Juha Jokipii, Jukka Viinamäki, Diego Torres Lobera, Seppo Valkealahti, and Teuvo Suntio. Photovoltaic generator as an input source for power electronic converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(6) :3028–3038, 2012.
- [16] JW Bishop. Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar cells*, 25(1) :73–89, 1988.
- [17] Viorel Badescu. Simple optimization procedure for silicon-based solar cell interconnection in a series–parallel pv module. *Energy Conversion and Management*, 47(9-10) :1146–1158, 2006.
- [18] K Arulkumar, K Palanisamy, and D Vijayakumar. Recent advances and control techniques in grid connected pv system—a review. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3) :1037–1049, 2016.
- [19] Bhalachandra V Chikate, Y Sadawarte, and BDCOE Sewagram. The factors affecting the performance of solar cell. *International journal of computer applications*, 1(1) :0975–8887, 2015.
- [20] G. Mittelman, A. Alshare, and J. H. Davidson. A model and heat transfer correlation for rooftop integrated photovoltaics with a passive air cooling channel. *Solar Energy*, 83(8):1150–1160, 2009.
- [21] R Mazón-Hernández, José Ramón García-Cascales, F Vera-García, AS Káiser, and Bryan Zamora. Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, 2013(1) :830968, 2013.
- [22] Saurabh Mehrotra, Pratish Rawat, Mary Debbarma, and K Sudhakar. Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of*

- Science, Environment and Technology, 3(3) :1161–1172, 2014.
- [23] Torunn Kjeldstad, Dag Lindholm, Erik Marstein, and Josefine Selj. Cooling of floating photovoltaics and the importance of water temperature. *Solar Energy*, 218 :544–551, 2021.
 - [24] S. Nizetic, D. Coko, A. Yadav, and F. Grubisic-Cabo. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel : the performance response. *Energy Conversion and Management*, 108 :287–296, 2016.
 - [25] Khaled A Moharram, MS Abd-Elhady, HA Kandil, and H El-Sherif. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4) :869–877, 2013.
 - [26] Sandro Nižetić, Duje Čoko, Ankit Yadav, and Filip Grubišić-Čabo. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel : The performance response. *Energy conversion and management*, 108 :287–296, 2016.
 - [27] MSGovardhanan, G Kumaraguruparan, M Kameswari, R Saravanan, M Vivar, and K Srithar. Photovoltaic module with uniform water flow on top surface. *International Journal of Photoenergy*, 2020(1) :8473253, 2020.
 - [28] Osama Abdellatif. Experimental investigation of different cooling methods for photovoltaic module. In 11th international energy conversion engineering conference, page 4096, 2013.
 - [29] Haitham Bahaidarah, Abdul Subhan, P Gandhidasan, and S Rehman. Performance evaluation of a pv (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 59 :445–453, 2013.
 - [30] S. Nizetic, D. Coko, A. Yadav, and F. Grubisic-Cabo. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel : the performance response. *Energy Conversion and Management*, 108 :287–296, 2016.
 - [31] Khaled A Moharram, MS Abd-Elhady, HA Kandil, and H El-Sherif. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4):869–877, 2013.

- [32] Sandro Nižetić, Dujė Čoko, Ankit Yadav, and Filip Grubišić-Čabo. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel : The performance response. *Energy conversion and management*, 108 :287–296, 2016.
- [33] MSGovardhanan, G Kumaraguruparan, M Kameswari, R Saravanan, M Vivar, and K Srithar. Photovoltaic module with uniform water flow on top surface. *International Journal of Photoenergy*, 2020(1) :8473253, 2020.
- [34] Osama Abdellatif. Experimental investigation of different cooling methods for photovoltaic module. In 11th international energy conversion engineering conference, page 4096, 2013.
- [35] Haitham Bahaidarah, Abdul Subhan, P Gandhidasan, and S Rehman. Performance evaluation of a pv (photovoltaic) module by back surface water
- [36] D. A. e. S. Abderrezzak, *Etude d'un système de pompage photovoltaïque*, OUARGLA, 2021/2022.
- [37] «EXPERT DU SOLAIRE,» SOLARIS, depuis 2002. [En ligne]. Available at <https://www.solaris-store.com/>.
- [38] «Senegrid,» [En ligne]. Available: <https://senegrid.sn/equipements/pompe-solaire/modeles-dc#>.
- [39] «Groupe ATEO,» [En ligne]. Available: https://prokcsmmedia.blob.core.windows.net/sys-master-images/h75/hb2/9896997617694/Pompe%20solaire_compressed.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- [40] «l'énergie tout compris.f,» [En ligne]. Available: https://www.lenergiesoutcompris.fr/autres-travaux/solaire/pieces-detachees/regulateur?utm_source=chatgpt.com
- [41] «Calculeo oar effy,» [En ligne]. Available: https://www.calculeo.fr/eco-travaux/panneaux-solaires-photovoltaiques/le-regulateur-solaire?utm_source=chatgpt.com.
- [42] «Difful,» [En ligne]. Available: <https://fr.diffulpump.com/oid1751514/pages.htm>.
- [43] «TERRE SOLAIRE,» 2024. [En ligne]. Available: https://terresolaire.com/Blog/batiment-solaire/inclinaison-panneau-solaire-orientation/#elementor-toc_heading-anchor-0.
- [44] «ScienceDirect,» [En ligne]. Available: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [45] A. M. A.-E. A. E.-S. a. M. E. M. Soliman, «“Performance analysis of solar PV water

- pumping system under Egyptian climate conditions,” Alexandria Engineering Journal, vol. 89, pp. 267– 276,» 2023. [En ligne]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37648770>.
- [46] S. Abdelaziz, «Étude et simulation d’un système de pompage d’eau par énergie photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO),» 2021. [En ligne]. Available: <https://dspace.ummto.dz/items/63978444-e783-4607-aeb3-d4cd3cf736d9>.
- [47] R. S. a. A. S. S. Mekhilef, «“Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 5, pp. 2920–2925,,» 2012. [En ligne]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112001050>.
- [48] W.Z. Leow, «Influence of wind speed on the performance of photovoltaic panel,” Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 15, no. 1, pp. 60–68,,» 2019. Available: <https://www.researchgate.net/publication/334142111>.
- [49] A. M. E.-S. a. F. M. Hussein, «“Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells,” Solar Energy, vol. 51, no. 6, pp. 505–511,,» 1993. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X9390103B>.

Liste des symboles utilisés

- I : courant de sortie de la cellule photovoltaïque.
- V : tension de sortie de la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : courant photo-généré, proportionnel à l'irradiance solaire.
- I_d : courant traversant la diode.
- I_{sh} : courant de fuite à travers la résistance parallèle (shunt).
- R_s : résistance série de la cellule photovoltaïque.
- R_{sh} : résistance parallèle (shunt) représentant les pertes par fuite.
- I_0 : courant de saturation inverse de la diode.
- n : facteur d'idéalité de la diode.
- V_T : tension thermique, calculée par $V_T = kT/q$.
- k : constante de Boltzmann.
- T : température absolue en kelvins.
- q : charge élémentaire de l'électron.
- I_{cc} : courant de court-circuit (lorsque $V = 0$).
- V_{co} : tension de circuit ouvert (lorsque $I = 0$).
- I_{mpp} : courant au point de puissance maximale.
- V_{mpp} : tension au point de puissance maximale.
- P_{max} : puissance maximale délivrée par la cellule photovoltaïque.
- FF : facteur de forme, donné par $FF = P_{max} / (V_{co} \times I_{cc})$.
- η : rendement de conversion, défini par $\eta = P_{max} / P_{in}$.
- P_{in} : puissance d'entrée (énergie solaire incidente).
- G : irradiance solaire instantanée (W/m^2).
- G_{ce} : irradiance de référence en conditions STC ($1000 W/m^2$).
- $G_{dm}(\beta)$: irradiation journalière moyenne sur une surface inclinée d'angle β .
- β : angle d'inclinaison du panneau photovoltaïque.
- E : irradiance solaire réelle sur la surface du panneau.
- AM : masse d'air, généralement égale à 1.5 en conditions STC.
- T_c : température de la cellule photovoltaïque.
- T_{amb} : température ambiante.
- $T_{c,ref}$: température de référence, généralement $25^\circ C$.

- NOCT : température nominale de fonctionnement de la cellule.
- γ : coefficient de température de rendement.
- η_g : rendement du générateur à température de référence.
- η_{pv} : rendement moyen journalier du générateur.
- F_m : facteur de couplage (entre production réelle et MPP).
- E_{hyd} : énergie hydraulique moyenne mensuelle (kWh).
- η_{mp} : rendement global du sous-système moteur-pompe.
- N_s : nombre de cellules photovoltaïques connectées en série.
- N_p : nombre de cellules connectées en parallèle.
- P_{PV} : puissance totale produite par le champ photovoltaïque.
- V_{coNs} : tension totale en circuit ouvert des cellules en série.
- I_{ccNp} : courant total de court-circuit des cellules en parallèle.

Annexes

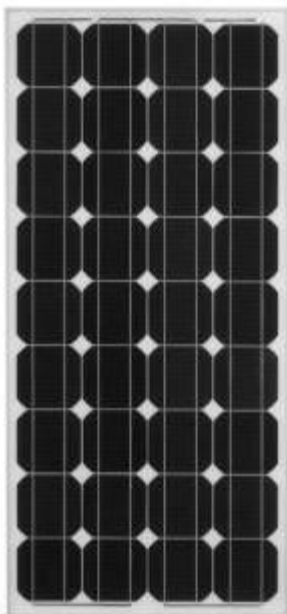
Annexe A: Module solaire photovoltaïque ALPV85-125M-36 :



ALPV85-125M-36

MODULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

FICHE TECHNIQUE



PRÉSENTATION DU PRODUIT

Les modules solaires de ALPV, ont été développés par nos spécialistes, pour apporter aux utilisateurs pérennité et sécurité, dans le respect de l'environnement. La tolérance positive de nos modules (0/+5W), garantie a nos clients la réception d'une puissance correspondant au montant investi voir supérieur. (la puissance du modules est testée systématiquement)

QUALITÉ

Notre longue expérience industriel et nos réalisations dans le domaine du solaire sont un gage de qualité garantissant a nos clients le positionnement dans la durée.

Les composants, soigneusement sélectionnés, proviennent des sources les plus reconnues et les plus utilisés.

CARACTÉRISTIQUES

- Assemblé avec des cellules monocristallines de haute efficacité.
- Cadre en aluminium anodisé sans rivet, une forte résistance mécanique.
- Verre trempé de haute transmissibilité à faible teneur en fer.
- Boîte de jonction standard imperméable à l'eau (IP65), avec diode Bipass, qui protègent le module de brûlure causée par l'ambrage (effet de hot-spot).

PARAMÈTRES MÉCANIQUES

Cellule (mm)	mono 125x125
Poids (Kg)	8,5
Dimension (Lg x Lr x H)	1225x545x35
Nombre de cellules	36 (9x4)
Nombre de diodes	2
Conditions D'emballage	30 module/palette

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

Tension maximale du système	DC 700V
Température de fonctionnement	-40°~+85°
Tolérance de puissance	0/+5%

GARANTIE

5 ans garantie de produit

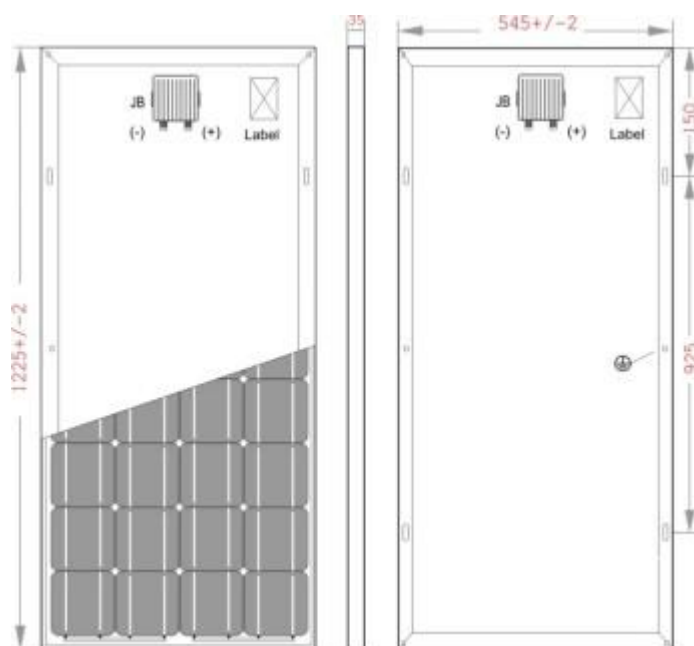
Sur la puissance nominale : 25 ans (80%) et 10 ans (90 %)

SARL ALGERIAN PV COMPANY
Zone industrielle desserte N8 Tiemcen Algérie
Tel: +213 43 27 80 72 / +213 43 27 79 03 Fax: +213 43 27 30 31
www.alpvcompany.com

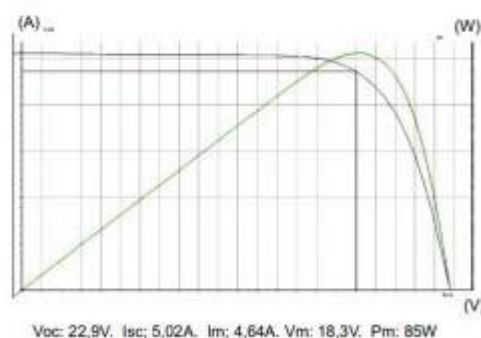
ALPV85-125M-36

MODULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

FICHE TECHNIQUE



COURBES I-V



PARAMÈTRES ELECTRIQUE

TYPE	ALPV85-125M-36
Puissance nominale (sous conditions STC)	85W
Tension de circuit ouvert (Voc/V)	21,83
Tension nominale (Vmp/V)	17,27
Courant de court circuit (Isc/A)	5,33
Courant nominal (Imp/A)	4,93
Coefficient de température Isc	+0,069%/C°
Coefficient de température Voc	-0,39%/C°
Coefficient de température Pmp	-0,46%/C°

Données de modules datant du 12 avril 2011
Sauf fautes de frappe, erreurs de traduction: Sous réserve d'erreurs, d'erreurs de contenu, de sens et d'impression!
Le fabricant se réserve des modifications techniques dans le cadre du développement de la technologie

SARL ALGERIAN PV COMPANY
Zone industrielle desserte N8 Tiemcen Algérie
Tel: +213 43 27 80 72 / +213 43 27 79 03 Fax: +213 43 27 30 31
www.alpvcompany.com



Caractérisé par CDER

Annex B: Régulateur de charge MPPT :

MT2410 User Manual

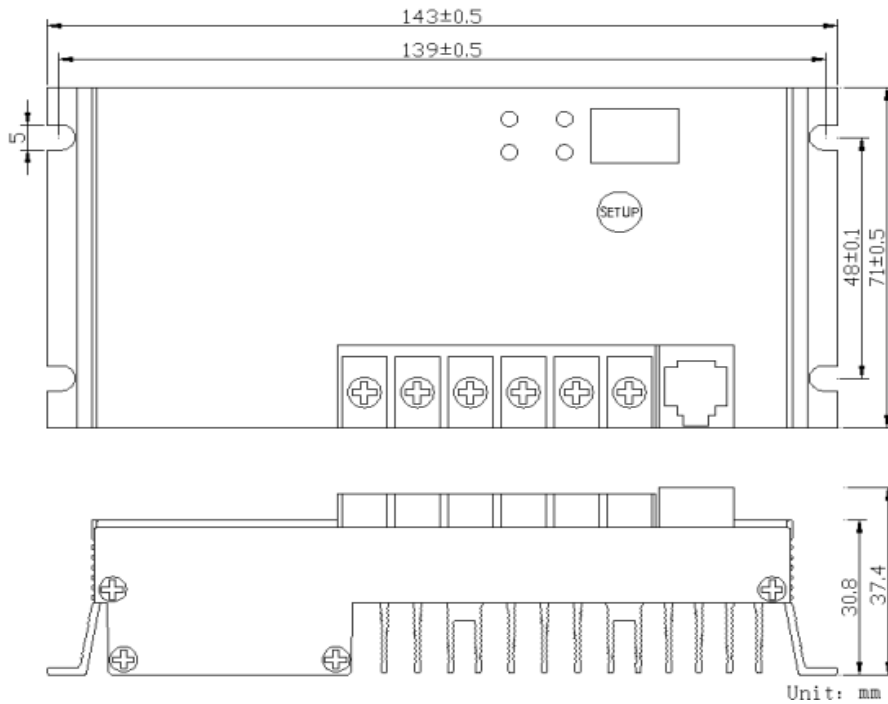


Mode	MT2410	
Battery voltage	12V	24V
Max. power of solar panel	130W	260W
Charge current	10A	
Discharge current	10A	
Max. solar input voltage	150V	

III. Front View Schematic



IV. Structure Drawing:



X. Parameters

Parameters	Value	
Model	MT2410	
System voltage	12V	24V
Max. input power of solar panel	130W	260W
Transfer efficiency	$\leq 96\%$	$\leq 97\%$
Rated charge/ discharge current	10A	
No load loss	< 15mA	
Max. input voltage of solar panel	< 150V	
MPPT tracing efficiency	> 99%	
Over voltage protection	16.5V	33.0V
Limited charge voltage	15.5V	31.0V
Equalizing charge voltage	15.2V	30.4V
Equalizing charge interval	30 days	
Boosting charge voltage	14.4V	28.8V
Floating charge voltage	13.8V	27.6V
Over-discharge recover voltage	12.5V	25.0V
Over discharge voltage	11.0V	22.0V

Boosting charge time	2 hours
Equalizing charge time	1 hour
Over temperature protection	Yes
Light-operated voltage (on)	5V
Light-operated voltage (off)	6V
Light-operated delay time	5min
Working temperature	-35°C ~ +65°C ;
Weight	430g
Altitude	≤3000m
Dimension	143*71*37.4 (mm)
Installation dimension	139*48(mm)
Overload protection	Load current≥1.25 times rated current, cut off the load within 10 seconds; Load current≥1.5 times rated current, cut off the load within 5 seconds
Protections	1.Reverse connection. 2.Inner over temperature. 3.The voltage of PV input terminal is over value. 4.Over load 5.Reverse charging protection at night. 6. TVS lightning protection 7. Waterproof: IP 64

Annex C: Batterie Ritar RA 12-100 :

Specification

Cells Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	100Ah@10hr-rate to 1.75V per cell @25°C
Weight	Approx. 30 Kg
Max. Discharge Current	500 A (5 sec)
Internal Resistance	Approx. 5 mΩ
Operating Temperature Range	Discharge: -20°C~60°C Charge: 0°C~50°C



Constant Current Discharge Characteristics Unit: A(25°C)

F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	374	268	195	115	65.0	39.9	26.1	21.6	17.0	12.3	10.4	5.5
1.67V	364	255	191	113	64.7	39.6	26.0	21.5	16.9	12.2	10.3	5.4
1.70V	343	246	188	112	64.1	39.3	25.8	21.4	16.8	12.1	10.2	5.3
1.75V	308	227	179	109	63.5	39.0	25.7	21.2	16.6	12.0	10.1	5.2
1.80V	278	207	165	105	62.0	38.3	25.0	20.7	16.3	11.8	10.0	5.1
1.85V	242	185	148	98	58.9	36.6	23.9	19.7	15.6	11.3	9.7	4.8

Constant Power Discharge Characteristics Unit: W(25°C)

F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	671	490	361	216	124	76.5	50.2	41.6	32.8	23.8	19.5	10.3
1.67V	657	468	354	214	123	76.2	50.1	41.5	32.6	23.7	19.3	10.2
1.70V	620	453	349	211	122	75.5	49.8	41.3	32.5	23.5	19.2	10.1
1.75V	558	418	333	206	121	74.8	49.5	41.0	32.2	23.3	19.0	10.0
1.80V	502	380	306	197	118	73.7	48.3	39.9	31.7	22.8	18.8	9.9
1.85V	434	337	273	185	112	70.3	45.9	38.0	30.1	22.0	18.2	9.5

All mentioned values are average values.

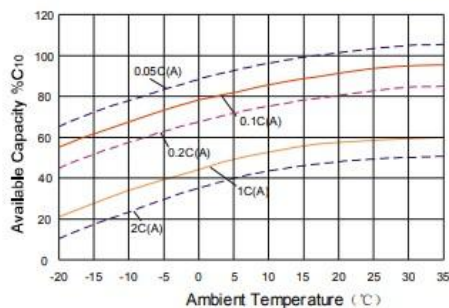


RA12-100 (12V100Ah)

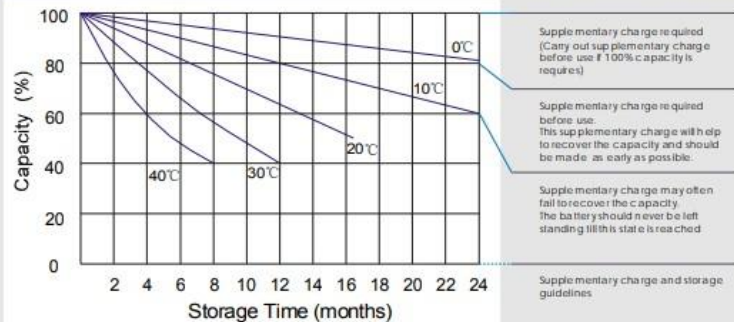
RA12-100 is a general purpose battery with 10 years design life time in float charging use. As with all Ritar batteries, all RA models are rechargeable, highly efficient, leak proof and maintenance free.



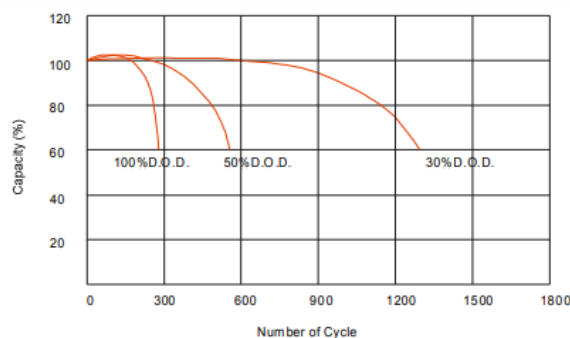
Temperature effects curve



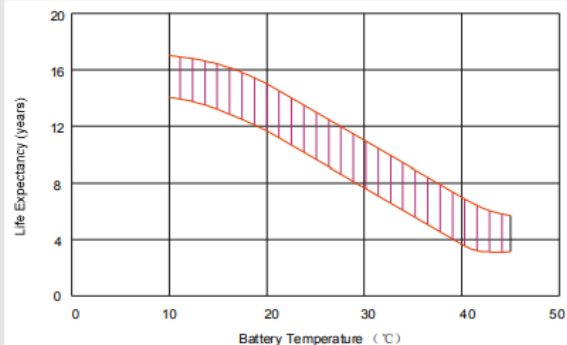
Storage characteristic



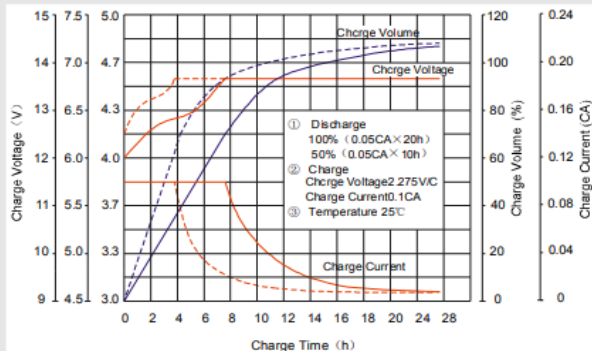
Life characteristics of cyclic use



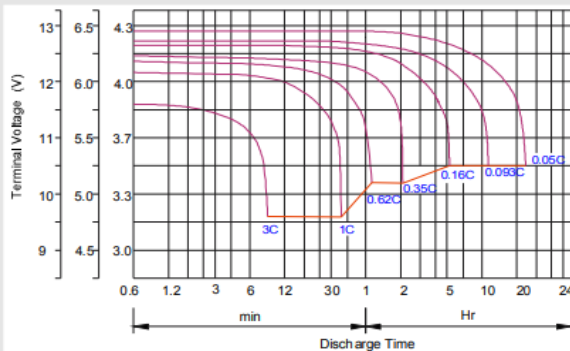
Effect of temperature on long term float life



Charge characteristic Curve for standby use



Discharge characteristic Curve



Charging Procedures(12V series)

Application	Charge Voltage (V)			Max. Charge Current
	Temperature	Set point	Allowable range	
Cycle Use	25°C	14.7	14.4~15.0	0.3C
Standby	25°C	13.7	13.6~13.8	0.3C

Charge the batteries at least once every six months, if they are stored at 25°C.

Charging Method:

Constant Voltage	-0.2Cx2h +14.4~15.0V,24h,Max. Current 0.3CA
Constant Current	-0.2Cx2h +0.1CAx12h
Fast	-0.2Cx2h +0.3CAx4h

Discharge Current VS. Discharge Voltage

Final Discharge Voltage V/cell	1.75V	1.70V	1.60V
Discharge Current (A)	(A) ≤0.2C	0.2C< (A) <1.0C	(A) ≥1.0C

Charging Procedures(6V series)

Application	Charge Voltage (V)			Max. Charge Current
	Temperature	Set point	Allowable range	
Cycle Use	25°C	7.35	7.25~7.45	0.3C
Standby	25°C	6.85	6.8~6.9	0.3C

SHEN ZHEN RITAR POWER CO.,LTD.

Room 405, Tower C, Huahan Building, Jangshan Road 16, North High-tech Industrial Park, Nanshan District, Shenzhen, 518057, China
URL: www.ritarpower.com Tel: +86-755-33981668 Fax: +86-755-83475180

Annex D : Capteur de température LM35



Product
Folder



Order
Now



Technical
Documents



Tools &
Software



Support &
Community



LM35

SNIS159H – AUGUST 1999 – REVISED DECEMBER 2017

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

1 Features

- Calibrated Directly in Celsius (Centigrade)
- Linear + 10-mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at 25°C)
- Rated for Full -55°C to 150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low-Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates From 4 V to 30 V
- Less Than 60-μA Current Drain
- Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air
- Non-Linearity Only ±¼°C Typical
- Low-Impedance Output, 0.1 Ω for 1-mA Load

2 Applications

- Power Supplies
- Battery Management
- HVAC
- Appliances

Device Information⁽¹⁾

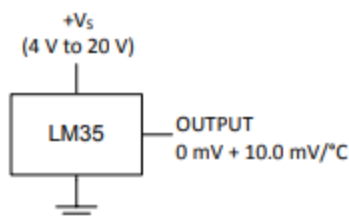
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM35	TO-CAN (3)	4.699 mm × 4.699 mm
	TO-92 (3)	4.30 mm × 4.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.91 mm
	TO-220 (3)	14.986 mm × 10.16 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

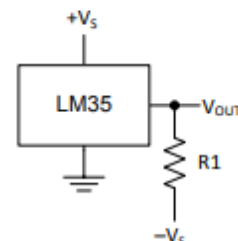
3 Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature devices with an output voltage linearly-proportional to the Centigrade temperature. The LM35 device has an advantage over linear temperature sensors calibrated in Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 device does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±¼°C at room temperature and ±¼°C over a full -55°C to 150°C temperature range. Lower cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low-output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 device makes interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 device draws only 60 μA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 device is rated to operate over a -55°C to 150°C temperature range, while the LM35C device is rated for a -40°C to 110°C range (-10° with improved accuracy). The LM35-series devices are available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D devices are available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D device is available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Full-Range Centigrade Temperature Sensor



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu A$
 $V_{OUT} = 1500 \text{ mV at } 150^\circ\text{C}$
 $V_{OUT} = 250 \text{ mV at } 25^\circ\text{C}$
 $V_{OUT} = -550 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$

Annex E: Capteur de tension DC 0–25V :

Voltage Detection Sensor Module 25V

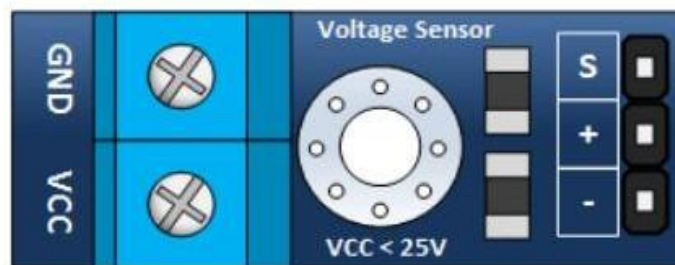
Basics

The Arduino analog input is limited to a 5 VDC input. If you wish to measure higher voltages, you will need to resort to another means. One way is to use a voltage divider. The one discussed here is found all over Amazon and eBay.

It is fundamentally a 5:1 voltage divider using a 30K and a 7.5K Ohm resistor.

Keep in mind, you are restricted to voltages that are less than 25 volts. More than that and you will exceed the voltage limit of your Arduino input.

Basic Connection



Inputs

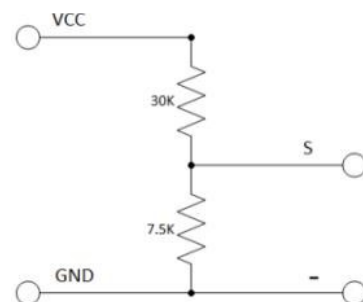
- **GND** – This is where you connect the low side of the voltage you are measuring. Caution! : This is the same electrical point as your Arduino ground.
- **VCC**: This is where you connect the high side of the voltage you are measuring

Outputs

- **S**: This connects to your Arduino analog input.
- **– (or minus)**: This connects to your Arduino ground.
- **+**: This is not connected. It does absolutely nothing... zilch... nada... jack diddly doo doo.

Schematic

The schematic for this is pretty straight forward. As previously mentioned, it's just a couple of resistors. In fact, you could build your own in a pinch.



Annex F : Capteur de courant ACS712



ACS712

Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kV_{RMS} Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

FEATURES AND BENEFITS

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC-8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.4 kV_{RMS} minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



PACKAGE: 8-Lead SOIC (suffix LC)



Not to scale

DESCRIPTION

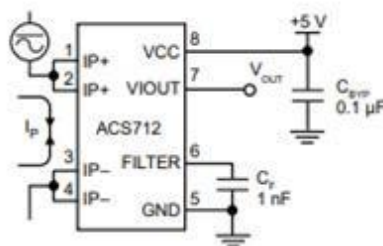
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

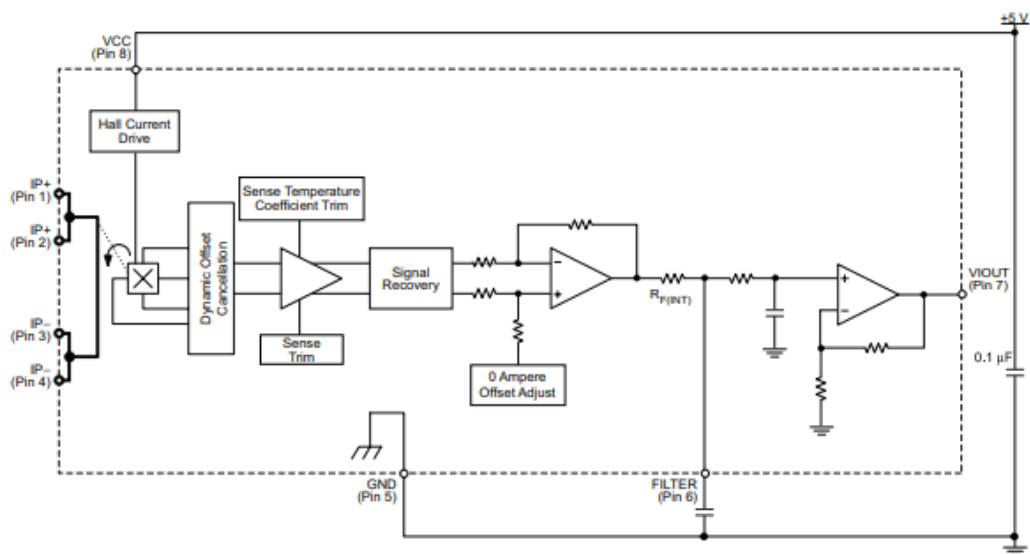
Continued on the next page...

Typical Application

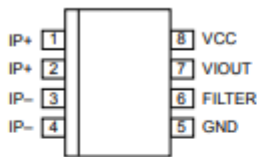


Application 1: The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_P , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Pinout Diagram



Terminal List

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

Annex G : Capteur de température DS18B20:

Click [here](#) for production status of specific part numbers.

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

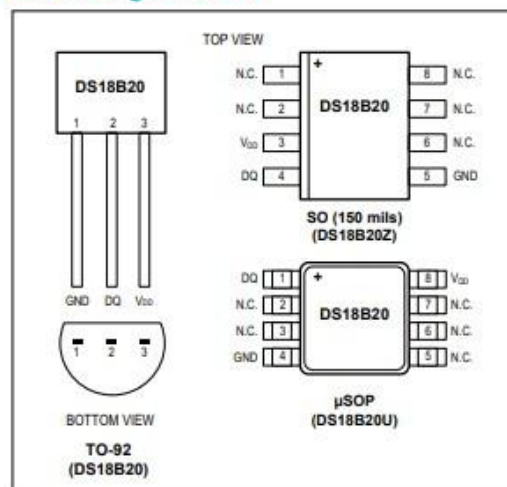
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
 - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
 - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
 - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
 - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
 - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

Annex H : Arduino UNO



Arduino® UNO R3

User Manual
SKU: A000066



Description

The Arduino® UNO R3 is the perfect board to get familiar with electronics and coding. This versatile development board is equipped with the well-known ATmega328P and the ATmega 16U2 Processor.

This board will give you a great first experience within the world of Arduino.

Target areas:

Maker, introduction, industries



Arduino® UNO R3

Features

- **ATmega328P** Processor
 - **Memory**
 - AVR CPU at up to 16 MHz
 - 32 kB Flash
 - 2 kB SRAM
 - 1 kB EEPROM
 - **Security**
 - Power On Reset (POR)
 - Brown Out Detection (BOD)

- **Peripherals**

- 2x 8-bit Timer/Counter with a dedicated period register and compare channels
- 1x 16-bit Timer/Counter with a dedicated period register, input capture and compare channels
- 1x USART with fractional baud rate generator and start-of-frame detection
- 1x controller/peripheral Serial Peripheral Interface (SPI)
- 1x Dual mode controller/peripheral I2C
- 1x Analog Comparator (AC) with a scalable reference input
- Watchdog Timer with separate on-chip oscillator
- Six PWM channels
- Interrupt and wake-up on pin change

- **ATMega16U2 Processor**

- 8-bit AVR® RISC-based microcontroller

- **Memory**

- 16 kB ISP Flash
- 512B EEPROM
- 512B SRAM
- debugWIRE interface for on-chip debugging and programming

- **Power**

- 2.7-5.5 volts

Annex I : Thermomètre infrarouge (Pistolet)

FL

Technical Data

572-2 Infrared Thermometer

The best choice when things are really hot

The Fluke 572-2 Infrared Thermometer is the one product you can use in high-temperature industrial environments all around the world. Whether you work in power utility, metal refining and smelting, glass, cement or petrochemical environments, the new 572-2 allows you to carry the most trusted name in test tools anywhere you need accurate, high-temperature and high distance-to-spot measurements.

With a straight-forward user interface and soft-key menus, the Fluke 572-2 makes even complex measurements easy. Quickly navigate and adjust emissivity, start data logging, or turn on and off alarms, with just a few pushes of a button.



Product highlights

With a rugged, easy-to-use, ergonomic design, the Fluke 572-2 can stand up to tough industrial, electrical, and mechanical environments.

- Measure -30 °C to 900 °C (-22 °F to 1652 °F)
- 60:1 distance to spot ratio with dual laser sighting for fast, accurate targeting
- Multi-language interface (user select)
- Current Temperature plus MAX, MIN, DIF, AVG temperature displays
- Compatible with standard mini-connector K-type thermocouples, including ones you already own and have installed.
- Adjustable emissivity and pre-defined emissivity table
- Infrared and thermocouple temperature on backlit display
- Last reading Hold (20 seconds)
- High and low temperature alarm
- Data storage and review (99 data sets)
- Tripod mount
- 12 or 24 hour clock
- USB 2.0 computer interface cable
- FlukeView® Forms Documenting Software
- Two-year warranty

572-2 specifications

Infrared measurements	
Infrared temperature range	-30 °C to 900 °C (-22 °F to 1652 °F)
IR accuracy (Calibration geometry with ambient temperature 23 °C ± 2 °C)	$\geq 0\text{ °C}$: $\pm 1\text{ °C}$ or $\pm 1\%$ of the reading, whichever is greater $\geq -10\text{ °C}$ to $< 0\text{ °C}$: $\pm 2\text{ °C}$ $< -10\text{ °C}$: $\pm 3\text{ °C}$ $\geq 32\text{ °F}$: $\pm 2\text{ °F}$ or $\pm 1\%$ of the reading, whichever is greater $\geq 14\text{ °F}$ to $< 32\text{ °F}$: $\pm 4\text{ °F}$ $< 14\text{ °F}$: $\pm 6\text{ °F}$
IR Repeatability	$\pm 0.5\%$ of reading or $\pm 0.5\text{ °C}$ ($\pm 1\text{ °F}$), whichever is greater
Display Resolution	0.1 °C / 0.1 °F
Distance:Spot	60:1 (calculated at 90 % energy)
Minimum spot size	19 mm
Laser sighting	Offset dual laser, output < 1 mW
Spectral Response	8 μm to 14 μm
Response Time (95 %)	< 500 ms
Emissivity	Digitally adjustable from 0.10 to 1.00 by 0.01 or via built-in table of common materials
Measurement options	
Hi/Low alarms	Audible and two-color visual
Min/Max/Avg/Dif	Yes
Switchable celsius and fahrenheit	Yes
Backlight	Two levels, normal and extra bright for darker environments
Probe input	K-type thermocouple Simultaneous display of probe and IR temperature
Trigger lock	Yes
Data storage	99 points
Display	Dot matrix 98 x 96 pixels with function menus
Communication	USB 2.0
K-type thermocouple specifications	
K-type thermocouple input temperature range	-270 °C to 1372 °C (-454 °F to 2501 °F)
K-type thermocouple input accuracy (with ambient temperature 23 °C ± 2 °C)	$< -40\text{ °C}$: $\pm (1\text{ °C} + 0.2\text{ °F}/1\text{ °C})$ $\geq -40\text{ °C}$: $\pm 1\%$ or 1 °C , whichever is greater $< -40\text{ °F}$: $\pm (2\text{ °F} + 0.2\text{ °F}/1\text{ °F})$ $\geq -40\text{ °F}$: $\pm 1\%$ or 2 °F , whichever is greater
K-type thermocouple resolution	0.1 °C/0.1 °F
K-type thermocouple repeatability	$\pm 0.5\%$ of reading or $\pm 0.5\text{ °C}$ ($\pm 1\text{ °F}$), whichever is greater
Measurement range (K-type thermocouple bead probe)	-40 °C to 260 °C (-40 °F to 500 °F)
Accuracy	$\pm 1.1\text{ °C}$ ($\pm 2.0\text{ °F}$) from 0 °C to 260 °C (32 °F to 500 °F). Typically within 1.1 °C (2.0 °F) from -40 °C to 0 °C (-40 °F to 32 °F)
Cable length	1 m (40 in) K-type thermocouple cable with standard miniature thermocouple connector and bead termination
General specifications	
Operating temperature	0 °C to 50 °C (32 °F to 122 °F)
Storage temperature	-20 °C to 60 °C (-4 °F to 140 °F)
Relative humidity	10 % to 90 % RH non-condensing up to 30 °C (86 °F)
Operating altitude	2000 meters above mean sea level
Weight	0.322 kg (0.7099 lb)
Power	2 AA Batteries
Battery life	8 hours with laser and backlight on; 100 hours with laser and backlight off, at 100 % duty cycle (thermometer continuously on)
Safety and compliance	IEC 60825-1 FDA Laser Class II EMC 61326-1 CE Compliance CMC 沪制01120009

Recommended temperature probes

Probe	Usage
80PK-1	The general purpose bead probe is for quick, accurate surface temperatures and air temperatures within ducts, vent temperatures.
80PK-8	Pipe clamp probes (2) are essential for tracking continuously changing temperature differentials on hydronic tubing and pipe loops, and good for quick, accurate refrigerant temperatures.
80PK-9	The insulation-piercing probe provides a sharp tip to pierce pipe insulation and flat probe tip for good surface thermal contact, air temperatures within ducts, and vent temperatures.
80PK-11	Flexible cuff thermocouple temperature probe is a convenient way to attach a thermocouple to a pipe while keeping hands free.
80PK-25	The piercing probe is the most versatile option. Good for checking air temperature in ducts, surface temperature under carpets/pads, liquids, thermometer wells, vent temperatures, and for penetrating pipe insulation.
80PK-26	The tapered probe is a good general-purpose gas and surface probe, with a good length and low mass tip casing for faster reaction to surface and air temperatures.



Ordering information 572-2 Infrared Thermometer

Includes

Infrared thermometer with contact thermometer capabilities, K-type thermocouple bead probe, USB 2.0 computer interface cable, FlukeView® Forms Documenting Software, hard carrying case, getting started guide (print) and user's manual (CD).

Fluke. *The Most Trusted Tools in the World.*

Fluke Corporation

PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.

Fluke Europe B.V.

PO Box 1186, 5602 BD
Eindhoven, The Netherlands

For more information call:

In the U.S.A. (800) 443-5853 or
Fax (425) 446-5116
In Europe/M-East/Africa +31 (0) 40 2675 200 or
Fax +31 (0) 40 2675 222
In Canada (800)-36-FLUKE or
Fax (905) 890-6866
From other countries +1 (425) 446-5500 or
Fax +1 (425) 446-5116
Web access: <http://www.fluke.com>

©2013 Fluke Corporation.
Specifications subject to change without notice.
Printed in U.S.A. 6/2013 6000240A_EN

Modification of this document is not permitted
without written permission from Fluke Corporation.