République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie électrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Présenté par :

1. Nawal Maroufi
2. Islam Tamma

Intitulé :

Conception et implémentation d'un système de surveillance à distance pour la gestion des performances d'un système photovoltaïque

Soutenue le : 29/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : Imad Eddine TENDERT	Président
Dr : Mohamed Nadjib KATEB	Examinateur
Dr : Youssef REHOUMA	Encadreur
Dr : Abdelkader Azzeddine BENGHARBI	Co-Encadreur

Année académique :2024/2025

Dédicace

Je dédie ce mémoire en gage de gratitude et de reconnaissance, fruit de plusieurs années d'efforts et de persévérance, à ceux qui ont été, après Dieu, la source de chaque pas accompli dans mon parcours scientifique et humain.

À ceux Don't les prières ont été la lumière qui a illuminé mon chemin, et Don't le soutien a été la force qui m’a poussée à continuer.

À ma chère mère, qui a semé dans mon cœur la patience et dans mon esprit l’amour du savoir. Ses prières m’ont accompagnée à chaque instant.

À mon cher père, mon pilier et ma fierté, qui m’a appris qu’avec la volonté et la foi, rien n’est impossible.

À ma seconde mère, qui a été un véritable soutien, m’offrant un amour sincère et un appui sans hésitation. Sa présence dans ma vie est une bénédiction pour laquelle je rends grâce chaque jour.

À mes frères et sœurs, compagnons de joie et de défi, Don't la présence dans ma vie est un soutien inestimable.

Et à tous ceux qui m’ont appris une lettre, offert un mot, adressé une prière ou posé un geste de soutien tout au long de ce parcours.

Nawal Maroufi

Dédicace

Un Dieu Don't la nuit n’est douce que par Sa gratitude, Don't le jour n’est agréable que par l’obéissance à Ses commandements, et Don't les instants ne sont apaisants que par Son souvenir, Allah – Glorifié soit Son Nom.

À celui qui a transmis le message et accompli la mission en toute fidélité notre maître Mohammed, que la paix et les bénédictions soient sur lui.

Je dédie le fruit de mes efforts à ceux qui m’ont recommandé de toujours leur témoigner respect et bienveillance mes chers parents.

À celui qui a orné mon nom des plus beaux titres, à celui Don't je porte fièrement le nom que ta vie soit douce, ô maître des hommes. Celui qui m’a soutenue sans limites et donné sans compter, je prie Dieu qu’Il prolonge ta vie pour que tu puisses voir les fruits mûrs de tes sacrifices… Mon cher père.

À celle sous les pieds de qui se trouve le Paradis, à celle qui a facilité mes épreuves par ses prières, véritables secrets de ma réussite… Ma chère mère.

À mon pilier inébranlable, à celui qui m’a été donné comme appui, refuge et force… Mon cher frère.

À moi-même, qui ai misé sur la réussite patiente et persévère, car le chemin est encore long.

Et à tous ceux qui m’ont appris une lettre, offert un mot, adressé une prière ou manifesté leur soutien à n’Importe quel moment de ce parcours.

Avec tout mon amour, Islam Tama

Remerciements et Gratitude

Louange à Dieu, par Sa grâce et Sa faveur, les objectifs sont atteints, les chemins deviennent accessibles, et les portes de la réussite et du succès s'ouvrent. Louange à Dieu qui nous a permis d'achever ce travail en paix, avec bien et bénédiction.

Comme on dit : "Celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas Dieu." Ainsi, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre honorable encadreur, le Dr. Youssef Rehouma, et notre co-encadreur, Dr. Abdelkader Azzeddine Bengharbi, qui n'ont jamais perçu nos questionnements comme une faiblesse, mais comme une opportunité d'apprentissage. Nous les remercions chaleureusement pour leur soutien indéfectible, leurs orientations éclairantes et leur patience tout au long de ce travail, depuis sa conception jusqu'à son aboutissement. Qu'Allah les récompense abondamment pour leur bienveillance et leur engagement, et leur ouvre les portes du succès dans toutes leurs entreprises.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté de discuter ce travail et pour les efforts qu'ils ont fournis pour le lire et l'évaluer.

Enfin, merci à tous ceux qui ont croisé mon chemin, ne serait-ce qu'avec un mot aimable…

Un mot proche a parfois été une bouée de sauvetage

Résumé

Dans ce projet, nous avons développé un système visant à surveiller en temps réel les performances réelles d'un système photovoltaïque solaire, en collectant des données essentielles telles que la température des panneaux solaires, la tension et le courant. La méthodologie du système repose sur l'utilisation de plusieurs capteurs, à savoir : le capteur de température (MAX6675), le capteur de courant (ACS712) et le capteur de tension (B25), tous connectés à une carte Arduino Uno pour lire les valeurs et les convertir en données exploitables.

Ces données sont affichées sur un écran LCD et enregistrées périodiquement sur une carte SD au format CSV. Il est également possible de surveiller et d'analyser les données en connectant la carte Arduino Uno à un ordinateur et en utilisant l'application Excel pour leur traitement.

Le système a démontré une grande efficacité dans la surveillance instantanée des performances du système, le suivi des enregistrements pour l'analyse de l'efficacité, et la détection précoce des pannes. Il présente également un potentiel d'évolution futur, notamment par son intégration avec des technologies avancées telles que l'apprentissage automatique ou les applications mobiles.

Mots Clés : Système Photovoltaïque, Arduino Uno, Capteurs, Excel

Summary

In this project, we develped a system aimed at real-time monitoring of the actual performance of a solar photovoltaic system by collecting essential data such as the temperature of the solar panels, voltage, and current. The system's methodology is based on the use of several sensors, namely: the trmperature sensor (MAX6675), the current sensor (ACS712), and the voltage sensor (B25), allconnected to an Arduino Uno board to read the valures and convert them into usable data.

These data are displayed on an LCD screen and periodically recorded on an SD card in CSV format. It is also possible to monitor and analyze the data by connecting the Arduino Uno board to a computer and using Excel for data processing.

The system has demonstrated high efficiency in instant monitoring of system performance, tracking records for efficiency analysis, tracking records for efficiency analysis, and early fault detection. It also persents, potential for future development, particulary through integration with advanced technologies such as machine learning or mobile appications.

Key words : Photovoltaic System, Arduino Uno, Sensors, Excel.

ملخص

في هذا المشروع، قمنا بتطوير نظام يهدف الى مراقبة الاداء الفعلي لمنظومة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الوقت الحقيقي، وذلك من خلال جمع بيانات حيوية تشمل درجة حرارة الالواح الشمسية، والجهد الكهربائي، والتيار. تعتمد منهجية عمل النظام على استخدام مجموعة من الحساسات، وهي: حساس الحرارة (MAX6675)، حساس التيار (ACS712) وحساس الجهد الكهربائي (B25)، والمتصلة جميعها بلوحة Arduino Uno لقراءة القيم وتحويلها الى بيانات فعلية.

يتم عرض هذه البيانات على شاشة LCD، كما تخزن دوريا على بطاقة SD بصيغة CSV. ويمكن أيضا مراقبة البيانات وتحليلها عن طريق ربط لوحة Arduino Uno بجهاز كومبيوتر واستخدام تطبيق Excel لمعالجتها.

اظهر النظام فعلية عالية في تقديم رصد لحظي لأداء المنظومة، وتتبع السجلات لتحليل الكفاءة، والكشف المبكر عن الاعطال. كما يتمتع بإمكانية التطوير مستقبل من اجل دمجه مع تقنيات متقدمة مثل التعلم اللي او تطبيقات الهاتف المحمول.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي، أرد وينو اينو، حساسات، اكسل

Sommaire

Liste des figures 1
Liste des tableaux **2**
Liste des Abréviations **3**
Introduction Générale 1
Chapitre 1 État De l'Art De Système d'Acquisition PV 3
1.1. Introduction 3
1.2. System photovoltaïque 3
1.2.1. Technologie photovoltaïque 3
1.2.1.1. Effet photovoltaïque 3
1.2.1.2. Cellules photovoltaïques 4
1.2.1.3. Différents types de cellules photovoltaïques 4
1.2.1.4. Circuit équivalent 5
1.2.1.5. Effets de la température et de l'irradiance 6
1.2.2. Surveillance des systèmes photovoltaïques 8
1.2.3. Nécessité de surveiller les modules PV et les conditions environnementales 8
1.3.Arduino Uno 9
1.3.1. Définition 9
1.3.2. Propriétés de l'Arduino Uno : 10
1.3.3. Composants de l'Arduino Uno 10
1.3.3.1. Capteur de tension B25 11
1.3.3.2. Capteur de courant ACS712 12
1.3.3.3. Capteur de température (Thermocouple) 14
1.2.1. Afficheur LCD 16
1.3.4.1. Définition 16
1.3.4.2. Fonctions des broches du LCD 16
1.2.2. Adaptateur de carte SD 17
1.2.3. Contrôleur de charge solaire 18
1.2.4. Batterie 18
1.3.Conclusion 19
Chapitre 2 Réalisation Et Tests 20
2.1. Introduction 20
2.2. Étapes de sélection et d'installation des capteurs 20
2.2.1. Capteur de tension 20
2.2.2. Capture de courant 20

2.2.3. Capteur de température (MAX6675 + thermocouple type K) 21
2.2.4. Écran LCD 16×2 21
2.2.5. Adaptateur de carte SD 22
2.3. Schémas de connexion des capteurs 233
2.4. Code et programme 24
2.4.1. Programme Arduino IDE 24
2.4.2. Code 25
2.5. Consulter et extraire des données du système 30
2.5.1. Affichage sur écran LCD 30
2.5.2. Exploitation des données dans Excel 30
2.5.3. Ulisation d'une carte mémoire SD 31
2.6. Conclusion 33
Chapitre 3 Résultats Et Discussion 34
3.1. Introduction 34
3.2. Expérience 34
3.3. Résultat 35
3.4. Discussions de Résultats 39
2.5. Conclusion 43
Conclusion Générale 44
Références 45

Liste des figures

Figure 1.1. Représentation schématique d'une cellule solaire 4
Figure 1.2. Types de modules photovoltaïques.....5
Figure 1.3. Modèle à une seule diode d'une cellule PV.....6
Figure 1.4. Courbes I-V pour différents niveaux d'irradiance à 25°C [13]. 6
Figure 1.5. Courbes I-V à différentes températures pour 1000 W/m² [13].....7
Figure 1.6. Courbes P-V d'un module PV:.....7
Figure 1.7 Carte Arduino Uno. 9
Figure1.8 Éléments de l'Arduino 11
Figure1.9 Capteur de Tension B25 12
Figure1.10 Schéma du B25.....12
Figure1.11 Capteur de courent ACS712 13
Figure1.12 Effet Hall 13
Figure1.13 Thermocouple de type K 14
Figure 1.14 Écran LCD 1602A 16
Figure 1.15 Connexions de l'écran LCD. 16
Figure 1.16 Module adaptateur pour carte micro SD.....17
Figure 1.17 Contrôleur de charge solaire PWM 18
Figure 1.18 Batterie utilisée dans le système solaire 19
Figure 2.1 Schéma de l'ensemble des composants connectés à la carte Arduino Uno. 23
Figure 2.2 Schéma de connexion des composants matériels au régulateur de charge du panneau solaire.....23
Figure 2.3 Interface de L'IDE Arduino. 24
Figure 2.4 Afficher les résultats sur LCD 30
Figure 2.5 Illustration de la transmission des données série vers Excel. 31
Figure 2.6 Exemple de fichier texte généré par la carte SD.....32
Figure 2.7 Procédure d'accès au fichier .txt via un ordinateur.....32
Figure 3.1 Composants matériels connectés à la carte Arduino. 34
Figure 3.2 Montage global du système photovoltaïque expérimental : panneau solaire, régulateur de charge CM3024Z, batterie de stockage, carte Arduino UNO, Carte SD, capteurs et écran LCD.....35
Figure 3.3 courbe de tension photovoltaïque et tension batterie 40
Figure 3.4 courbe de courant photovoltaïque et courant batterie 40
Figure 3.5 Courbe de puissance photovoltaïque et puissance batterie 41
Figure 3.6 Courbe de température 42
Figure 3.7 Courbe de radiation 42

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Propriétés de l'Arduino Uno.....10
Tableau 1.2 propriétés et valeurs des thermocouples de type K.....14
Tableau 1.3 Fonction des broches du MAX6675 15
Tableau 1.4 Fonctions des broches de l'écran LCD.....17
Tableau 1.5 Caractéristique de la batterie.....18
Tableau 2.1 Connexion du capteur de tension à l'Arduino 20
Tableau 2.2 Connexion du capteur de courant à l'Arduino.....21
Tableau 2.3 Connexion du capteur de température.....21
Tableau 2.4 Connecter un écran LCD à un Arduino 22
Tableau 2.5 Connexion d'un adaptateur de carte mémoire à un Arduino.....22
Tableau 3.1 Résultats expérimentaux du système 36

Liste des Abréviations

XIXe : 19

Voc : Tension en circuit ouvert

CdTe : Tellurure de cadmium

CIGS : Séléniure de cuivre-indium-gallium

Icc : Courant de court-circuit

Iph : Courant généré par la lumière

ID : Courant de recombinaison dépendant de la tension

Ish : Courant de perte à travers la résistance de shunt

Rs/Rsh : Résistances série et de shunt, respectivement

I : Courant fourni par la cellule

V : Tension aux bornes de la cellule

MPP : Point de puissance maximale

PV : Photovoltaïque

VI : Instrumentation virtuelle

PC : Personale computer

IOT : Internet des objets

IDE : Environnement de développement intégré

PWM : Modulation de largeur d'impulsion

E/S : Entrée, sortie

LED : Diode électroluminescent

TX : Transmission

RX : Réception

USB : Universal serial bus

GND : Broche de masse

SPI : Interface de périphérie série

LCD : Liquid cristal display

ADC : Convertisseur analogique-numérique

MISO : Donné de l'esclave actif vers le maitre

DC : Courant continu

AC : Courant alternatif

VCC : Tension d'entrée

Introduction Générale

L'énergie constitue l'un des piliers fondamentaux sur lesquels repose le développement économique et social à travers le monde. Cependant, la dépendance croissante aux sources d'énergie traditionnelles telles que le pétrole, le gaz Et le charbon a engendré d'Importants problèmes environnementaux, notamment le changement climatique, la pollution de l'air et l'épuisement des ressources naturelles. Cette situation a conduit à une prise de conscience mondiale de la nécessité d'adopter des sources d'énergie alternatives et durables, parmi lesquelles les énergies renouvelables occupent une place centrale.

Dans ce contexte, l'énergie solaire est considérée comme l'une des sources d'énergie propre les plus abondantes et les plus importantes, en raison de ses nombreux avantages environnementaux et économiques. Néanmoins, les performances des panneaux solaires photovoltaïques (PV) restent sensibles à plusieurs facteurs environnementaux, tels que le rayonnement solaire, la température, l'accumulation de saleté et de poussière, ainsi que la dégradation progressive des composants techniques. D'où la nécessité de systèmes de surveillance intelligents permettant de suivre les performances des panneaux et de détecter en temps réel les pannes ou les baisses d'efficacité.

Les technologies d'électronique open-source, notamment la plateforme Arduino, ont permis de proposer des solutions à faible coût et faciles à mettre en œuvre pour développer des systèmes de surveillance et de contrôle intégrés. En les combinant avec les technologies de l'Internet des objets (IoT), il est désormais possible de créer des systèmes capables de collecter des données environnementales et électriques, de les stocker, de les analyser, voire de les transmettre à des plateformes distantes pour affichage ou surveillance.

Cette mémoire vise à concevoir et à mettre en œuvre un système intégré de surveillance des performances environnementales et électriques d'un panneau solaire, en s'appuyant sur une carte Arduino UNO, ainsi qu'une série de capteurs pour mesurer la tension, le courant, la température et l'Intensité du rayonnement solaire. Le projet comprend également l'utilisation d'un écran LCD et le stockage des données sur une carte SD, afin de les analyser ultérieurement à l'aide de logiciels tels que Microsoft Excel.

Ce travail a pour objectifs :

- D'améliorer l'efficacité de l'exploitation de l'énergie solaire dans des environnements opérationnels réels.

- De soutenir la maintenance préventive grâce au suivi en temps réel des performances.
- De proposer un modèle à faible coût et évolutif, adapté aux applications d'énergie durable, notamment dans les zones rurales ou agricoles.

Cette mémoire est divisée en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente le cadre théorique des panneaux photovoltaïques et des technologies de l'Internet des objets.
- Le deuxième chapitre traite des aspects logiciels et techniques du développement du système.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats et à la discussion des performances du système dans des conditions opérationnelles réelles.

Chapitre 1 État De l'Art De Système d'Acquisition PV

1.1. Introduction

L'énergie, définie comme la capacité à accomplir un travail, constitue le fondement de tous les phénomènes mécaniques, thermiques et chimiques dans la nature ainsi que dans les systèmes techniques. Les cellules photovoltaïques transforment la lumière solaire en électricité à travers l'effet photovoltaïque, tandis que la plateforme Arduino, de type open source, facilite la commande de dispositifs électroniques et permet une interaction aisée avec divers capteurs et actionneurs.

1.2. System photovoltaïque

1.2.1. Technologie photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Edmond Becquerel, lorsqu'il a observé la génération d'un courant électrique en exposant des électrodes d'argent plongées dans un électrolyte à la lumière [1]. Ce phénomène est resté relativement méconnu jusqu'à l'émergence des semi-conducteurs, notamment après l'invention du transistor et les travaux de Shockley, Bardeen et Brattain sur les jonctions P-N en 1949 [2]. Depuis lors, la technologie photovoltaïque a connu un essor considérable, s'imposant comme une filière industrielle majeure. Si les premières expériences photoélectriques semblaient anodines au XIXe siècle, elles ont pourtant ouvert la voie à des dispositifs optoélectroniques au cœur de la transition énergétique et de la lutte contre la dépendance aux énergies fossiles [1].

1.2.1.1. Effet photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du soleil en électricité par le biais de panneaux solaires. Ce processus repose sur l'effet photovoltaïque, une manifestation particulière de l'effet photoélectrique. Sous l'effet de la lumière (photons), des électrons sont excités dans un matériau semi-conducteur vers un niveau d'énergie supérieur. Contrairement à l'effet photoélectrique où les électrons sont éjectés, ceux-ci restent confinés dans le matériau, permettant la génération d'un courant. Cette conversion est réalisée grâce à des cellules photovoltaïques, généralement constituées d'une jonction P-N à base de semi- conducteurs [2].

1.2.1.2. Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque permet de transformer la lumière en électricité via l'effet photovoltaïque. Elle se compose de deux couches de silicium : l'une dopée de type P (généralement au bore), l'autre de type N (au phosphore), formant une jonction P-N, illustrée à la Figure 1.1 [3]. L'absorption de photons dans cette jonction libère des électrons, créant ainsi des paires électron-trou, ce qui engendre une tension électrique entre les bornes. La tension en circuit ouvert (Voc) varie généralement entre 0,45 et 0,58 V. Le courant maximal, quant à lui, correspond au courant de court-circuit (Icc), mesuré lorsque les bornes de la cellule sont connectées sans résistance [3].

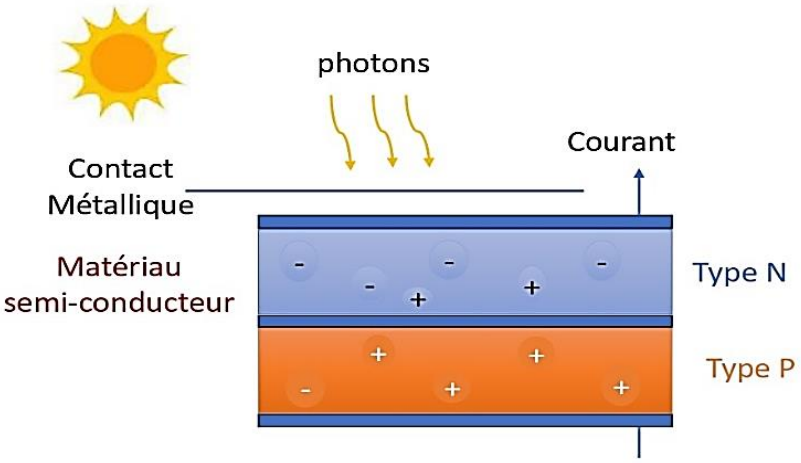


Figure 1.1. Représentation schématique d'une cellule solaire

1.2.1.3. Différents types de cellules photovoltaïques

Selon [4], divers matériaux sont utilisés pour les cellules photovoltaïques : tellurure de cadmium (CdTe), séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS), ainsi que des composés organiques et polymères. Toutefois, le marché est dominé par les cellules au silicium cristallin, disponibles en plusieurs variantes, chacune présentant des caractéristiques spécifiques (Figure 1.2) [5] :

- **Cellules monocristallines** : Très efficaces (rendement de 18 à 19 %), elles se distinguent par leur apparence homogène et leur coût élevé, variant de 0,83 € à 1,25 € par watt [6][7].
- **Cellules polycristallines** : Issues de silicium recristallisé, elles comportent plusieurs cristaux orientés aléatoirement. Leur rendement est légèrement inférieur (16–17 %),

avec un coût plus abordable, entre 0,75 € et 0,83 € par watt [6][7].

- **Cellules amorphes (ou couches minces)** : Fabriquées par dépôt de silicium sur un support en verre, elles nécessitent moins de matière première. Leur rendement est plus faible (~9 %), mais elles sont plus économiques (0,58 € à 0,83 € par watt) [6][7].

Figure 1.2. Types de modules photovoltaïques

1.2.1.4. Circuit équivalent

Les cellules photovoltaïques peuvent être modélisées électriquement par des circuits à diode. Le modèle à une diode est le plus couramment utilisé, car il offre un bon compromis entre complexité et précision [8][9]. Les modèles à deux [10] ou trois diodes [11] permettent de représenter plus finement certains phénomènes physiques, comme la recombinaison ou les courants de fuite. Le schéma à une diode est illustré à la Figure 1.3 [12].

- $\mathbf{I_{ph}}$: courant généré par la lumière (photo courant)
- $\mathbf{I_d}$: courant de recombinaison dépendant de la tension
- $\mathbf{I_{sh}}$: courant de perte à travers la résistance de shunt
- $\mathbf{R_s}$ **/** $\mathbf{R_{sh}}$: résistances série et de shunt, respectivement

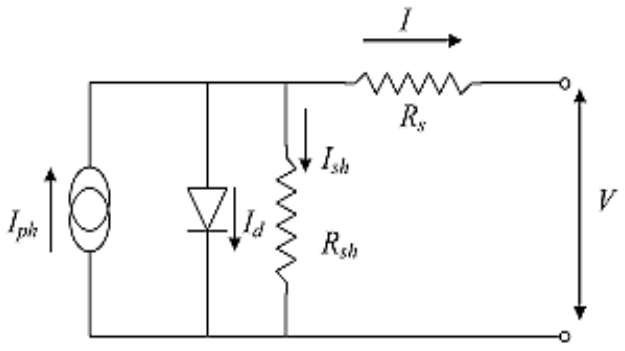


Figure 1.3. Modèle à une seule diode d'une cellule PV

1.2.1.5. Effets de la température et de l'irradiance

Les performances d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de l'irradiance solaire et de la température ambiante. Une irradiance élevée augmente le courant de sortie avec une légère hausse de la tension (Figure 1.4), tandis qu'une température élevée diminue la tension de sortie (Figure 1.5).

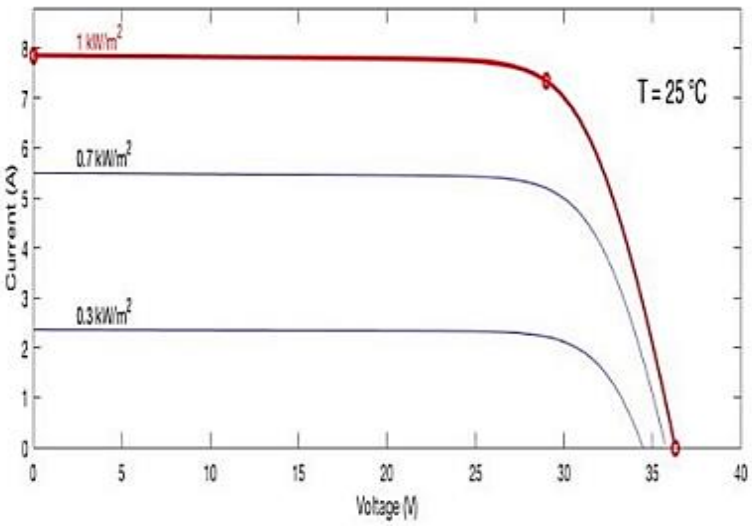


Figure 1.4. Courbes I-V pour différents niveaux d'irradiance à 25°C [13]

.

.

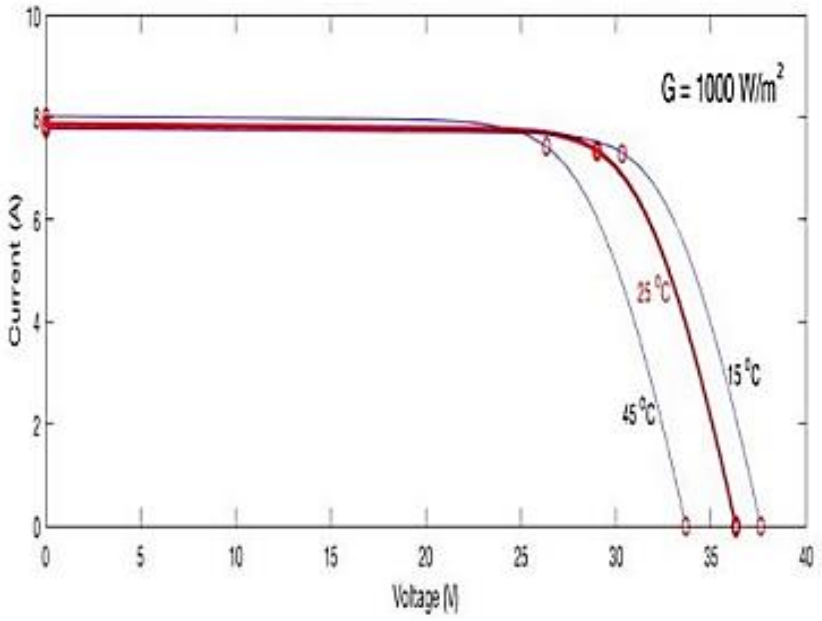


Figure 1.5. Courbes I-V à différentes températures pour 1000 W/m² [13]

.

La puissance de sortie est directement proportionnelle à l'irradiance, mais inversement liée à la température. Ce comportement provoque un déplacement du Point de Puissance Maximale (MPP), influençant ainsi le rendement global du système (Figure 1.6) [14].

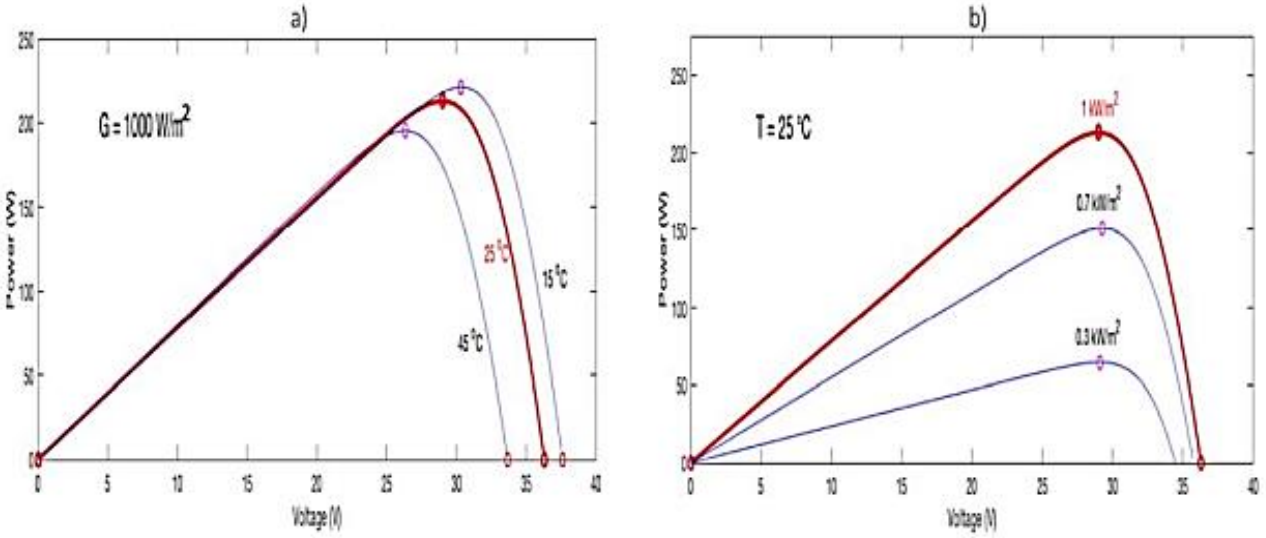


Figure 1.6. Courbes P-V d'un module PV:

(a) À différentes températures, 1000 W/m² ;

(b) À différents niveaux d'irradiance, à 25°C

1.2.2. Surveillance des systèmes photovoltaïques

La technologie photovoltaïque est confrontée à plusieurs obstacles freinant son adoption massive, notamment un coût d'investissement relativement élevé et une efficacité encore limitée. En outre, garantir une fiabilité optimale des systèmes représente un autre défi majeur [15]. Afin d'en optimiser l'exploitation, il est indispensable d'assurer un suivi continu des paramètres photovoltaïques en conditions réelles. Cela permet d'améliorer la fiabilité, de maximiser la production et de faciliter la prise de décision [16].

Plusieurs travaux ont été consacrés au développement de systèmes de surveillance. En 2006, Aristizabal a proposé une solution utilisant l'instrumentation virtuelle (VI) pour collecter à la fois les données de performance du système et les paramètres environnementaux tels que l'irradiance et la température [17]. En 2009, Anwari a présenté une architecture de surveillance d'un système PV de 5 kW intégrant des capteurs, une passerelle sans fil et un ordinateur, permettant un accès distant aux données via un réseau sans fil [18]. En 2005, Van Dyk, Gxasheka et Meyer ont, quant à eux, mis au point un système de surveillance basé sur PC capable de tracer les courbes I–V en conditions climatiques réelles [19].

Ces initiatives ont généralement recours à des serveurs web embarqués pour le traitement et la visualisation des données via Ethernet. Toutefois, la plupart des dispositifs d'acquisition sont filaires, nécessitent une intervention de proximité et une gestion manuelle [20]. Bien que des systèmes sans fil existent, ils sont souvent onéreux, limités en termes de paramètres mesurés et reposent sur des logiciels propriétaires ou des services cloud commerciaux. L'usage de solutions open source reste encore marginal [20].

1.2.3. Nécessité de surveiller les modules PV et les conditions environnementales

La prédiction de la production d'un système photovoltaïque, que ce soit avant ou après son installation, demeure une tâche complexe en raison de la multiplicité des facteurs environnementaux et techniques impliqués. La maîtrise de ces variables permettrait toutefois d'améliorer la précision des analyses de rendement et de rentabilité [21]. À cette fin, diverses simulations ont été réalisées pour évaluer les performances des installations PV selon des approches techniques et économiques [22].

Cependant, les prévisions issues de ces simulations sont souvent moins précises que les évaluations de terrain, du fait de l'incertitude sur les données d'entrée. Ainsi, des études expérimentales in situ s'avèrent nécessaires pour une évaluation fiable des performances, en tenant compte des variations climatiques locales. Ces essais pratiques permettent aussi de comparer différentes technologies PV afin de choisir la plus adaptée au site [23].

Un autre enjeu consiste à établir une corrélation entre l'énergie théorique prévue et celle réellement produite, dans le but de comprendre le comportement à long terme du système [24]. Pour y parvenir, il convient de mesurer un ensemble de paramètres propres aux modules PV (tension, courant, puissance) ainsi que des variables environnementales telles que l'ensoleillement, la température ambiante et l'humidité [25].

1.3. Arduino Uno

1.3.1. Définition

L'Arduino Uno est une carte électronique libre de droits, dont le matériel et le logiciel sont entièrement ouverts. Elle est conçue pour le prototypage rapide et peut être programmée à l'aide de l'environnement de développement intégré **Arduino IDE**, qui s'appuie principalement sur le langage **C++**. Cette plateforme permet aux utilisateurs de rédiger, compiler et transférer facilement du code vers la carte pour piloter divers composants électroniques [26]. Grâce à sa simplicité d'utilisation et sa grande flexibilité, l'Arduino Uno est largement adopté dans les domaines de l'enseignement, de la recherche et de l'automatisation.

C++ pour écrire et téléverser le code sur la carte physique [26].

Figure 1.7 Carte Arduino Uno.

1.3.2. Propriétés de l'Arduino Uno :

Tableau 1.1 Propriétés de l'Arduino Uno

Microcontrôleur	**ATmega328P**
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'entrée (recommandée)	7-12V
Tension d'entrée (limite)	6-20V
Broches d'E/S numériques	14(dont 6 fournissent une sortie PWM)
Broches d'E/S numériques PWM	6
Broches d'entrée analogique	6
Courant continu par boche d'E/S	20mA
Courant continu pour la boche 3.3V	50mA
Mémoire Flash	32Ko (ATmega328P) dont 0.5Ko utilisés par le chargeur de démarrage
SRAM	2Ko (ATmega328P)
EEPROM	1Ko (ATmega328P)
Vitesse d'horloge	16MHz
LED_BUILTIN	13
Longueur	68.6 millimètres
Largeur	53.4 millimètres
Poids	25g

1.3.3. Composants de l'Arduino Uno

La carte **Arduino Uno** est constituée de plusieurs éléments essentiels permettant son fonctionnement et son interaction avec divers périphériques. Voici les principaux composant :

1. **Broches numériques** : utilisées pour l'entrée/sortie de signaux numériques.
2. **LED intégrée sur la broche 13** : souvent utilisée pour les tests de base.
3. **LED d'alimentation** : indique que la carte est sous tension.
4. **Microcontrôleur ATmega** : le cœur de la carte, responsable de l'exécution du code.
5. **Broches analogiques** : destinées à la lecture de signaux analogiques.
6. **Broches GND et 5V** : fournissent les connexions de masse et d'alimentation.
7. **Connecteur d'alimentation externe** : permet d'alimenter la carte sans passer par

l'USB.

8. **LEDs TX et RX** : signalent la transmission (TX) et la réception (RX) de données série.
9. **Port USB** : utilisé pour programmer la carte et l'alimenter via un ordinateur.
10. **Bouton de réinitialisation** : permet de redémarrer le programme exécuté par le microcontrôleur.

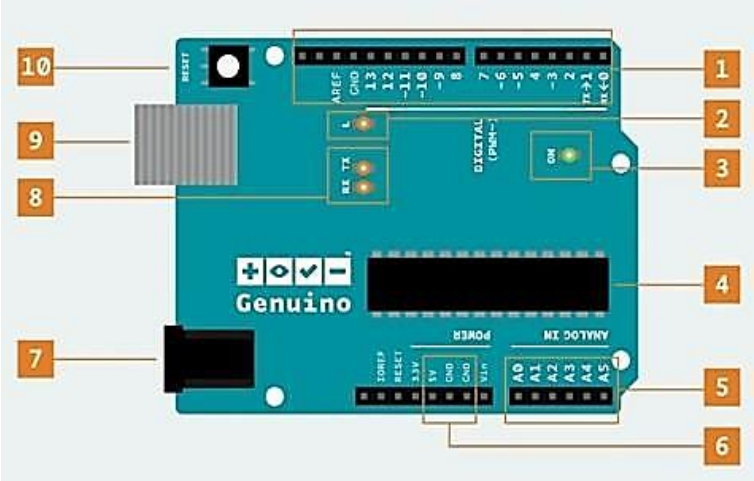


Figure1.8 Éléments de l'Arduino

1.3.3.1. Capteur de tension B25

Les **entrées analogiques** d'une carte Arduino sont limitées à des tensions continues ne dépassant pas **5 volts**. Le capteur **B25** est conçu pour étendre cette capacité en utilisant un **diviseur de tension** basé sur des résistances électriques. Il permet ainsi de réduire la tension d'entrée par un facteur de cinq. Autrement dit, lorsqu'une tension de **5V** est admissible sur l'entrée analogique de l'Arduino, le capteur peut mesurer jusqu'à **25V** du côté de l'entrée. En cas d'utilisation avec un microcontrôleur fonctionnant en **3,3V**, la tension d'entrée maximale admissible devient **16,5V**. Il est important de noter que ce capteur est exclusivement destiné aux tensions **en courant continu (DC)** [27].

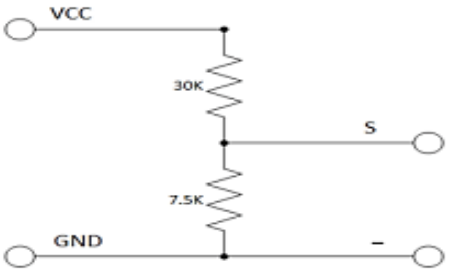


Figure1.9 Capteur de Tension B25.

Figure1.10 Schéma du B25

Caractéristiques techniques du B25 :

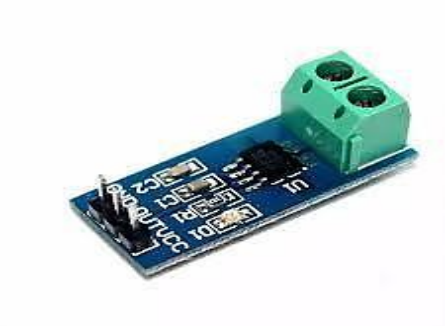
- **Plage de tension d'entrée** : 0 – 25 V DC
- **Plage de détection** : 0,02445 V – 25 V
- **Résolution** : 0,00489 V

Interface de sortie :

  - « + » : 5V ou 3,3V
  - « - » : GND
  - « S » : Sortie analogique vers l'entrée analogique de l'Arduino
- **Dimensions** : 27 × 14 × 12 mm

1.3.3.2. Capteur de courant ACS712

Le capteur **ACS712** permet de mesurer le **courant électrique** circulant dans un circuit, qu'il soit **alternatif (AC)** ou **continu (DC)**. Il repose sur le **principe de l'effet Hall**, qui consiste à générer une tension proportionnelle au courant traversant un conducteur placé dans un champ magnétique. Le capteur convertit alors cette variation en une **tension analogique** lisible par l'Arduino [28].



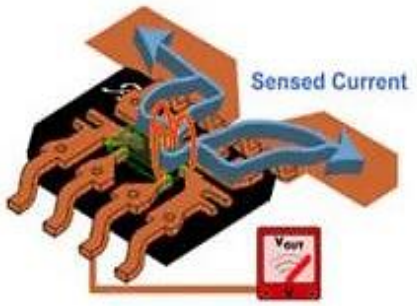


Figure1.11 Capteur de courent ACS712

Figure1.12 Effet Hall

Caractéristiques techniques de l'ACS712 :

- **Plage de mesure** : jusqu'à 30 A
- **Temps de réponse** : < 5 ns
- **Consommation d'énergie** : 10 mA
- **Bande passante** : 80 kHz
- **Sensibilité** : 185 mV/A

Résistance interne du conducteur : 1,2 mΩ

- **Linéarité** : 1,5 % à 25 °C

Précision thermique :

  - De -40 à 25 °C : 0,054 mV/A/°C
  - De 25 à 150 °C : -0,008 mV/A/°C
- **Dimensions** : 27 × 14 × 12 mm

Interface de connexion :

- **VCC** : alimentation en 5 V
- **GND** : masse
- **Sortie** : signal analogique vers Arduino
- **Entrée/Sortie de courant** : bornes pour le passage du courant à mesurer

1.3.3.3. Capteur de température (Thermocouple)

Un **thermocouple** est un dispositif de mesure de la température constitué de **deux fils métalliques différents** soudés à une extrémité. Chaque métal possède des propriétés thermiques distinctes, notamment une vitesse différente de déplacement des électrons. Lorsqu'une variation de température est appliquée à la jonction, une **différence de potentiel (tension)** est générée. Cette tension est directement liée à la température, ce qui permet la mesure thermique.

Il existe plusieurs types de thermocouples selon les matériaux utilisés : **J, K, T, E**, etc. Le type **K** est le plus courant grâce à sa **précision, fiabilité**, son **coût modéré**, et sa **large plage de température**, allant de **-200°C à 1260°C** [29]

Figure1.13 Thermocouple de type K

a) Caractéristiques du thermocouple de type K :

Tableau 1.2 propriétés et valeurs des thermocouples de type K

Propriété	Valeur
Matériaux	Nickel-Chrome / Nickel-Alumel
Plage de température	De -270 °C à 1260 °C
Erreur standard	± 1,1 °C ou 0,4 %
Erreur maximale tolérée	± 2,2 °C ou 0,75 %

Amplificateur de signal MAX6675

Le **MAX6675** est un **convertisseur analogique-numérique (ADC)** dédié aux thermocouples de type K. Il **compense automatiquement la jonction froide** et délivre une sortie numérique compatible avec le **bus SPI**, en lecture seule. Ce composant permet une mesure précise de température sans nécessiter de traitement complexe côté microcontrôleur [30].

Fonctions des broches du MAX6675 :

Tableau 1.3 Fonction des broches du MAX6675

Broche	Fonction
T+	Connexion au fil chromel du thermocouple de type K
T-	Connexion au fil alumel du thermocouple (doit être reliée à la masse externe)
VCC	Alimentation (de +3,0 V à +5,5 V) – à découpler avec un condensateur de 0,1 µF
GND	Masse électrique
SCK	Entrée de l'horloge série (SPI)
CS	Sélection de la puce (actif à l'état bas)
SO	Sortie de données série (MISO)

1.2.1. Afficheur LCD

1.3.4.1. Définition

Un écran LCD (**Liquid Crystal Display**) est un dispositif d'affichage qui utilise des cristaux liquides pour afficher du texte ou des symboles. Le modèle utilisé ici est un **LCD 1602A**, capable d'afficher **16 caractères sur 2 lignes**. Il est équipé du **contrôleur HD44780** de Hitachi, très répandu dans les affichages textuels simples. L'écran fonctionne avec une **interface parallèle**, ce qui signifie qu'il nécessite plusieurs broches de l'Arduino pour transmettre les instructions et les données [31].

Figure 1.14 Écran LCD 1602A

1.3.4.2. Fonctions des broches du LCD

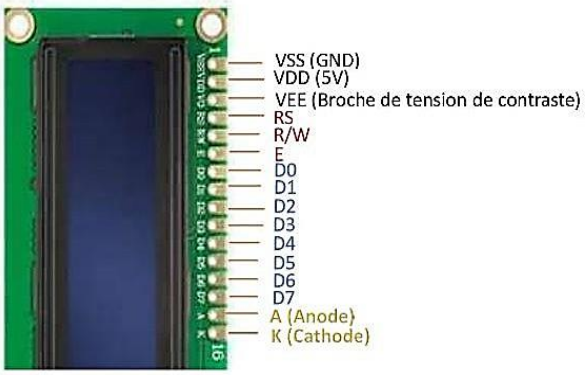


Figure 1.15 Connexions de l'écran LCD

Tableau 1.4 Fonctions des broches de l'écran LCD

Broche	Fonction
VSS	Connexion à la masse (GND)
VDD	Alimentation +5V
VO	Réglage du contraste de l'écran
RS	Sélection du registre : permet de basculer entre commande et données
R/W	Détermine le mode lecture ou écriture
E	Broche d'activation : les données sont validées sur un front descendant
D0-D7	Bus de données pour transférer les instructions ou caractères à afficher
A (Anode)	Alimentation du rétroéclairage (à connecter à +3.3V ou +5V)
K (Cathode)	Masse du rétroéclairage (à connecter à GND)

1.2.2. Adaptateur de carte SD

L'Arduino Uno peut lire et écrire des fichiers sur une **carte micro SD** grâce à un **module adaptateur**. Ce dernier est particulièrement utile dans les systèmes nécessitant une **collecte de données régulière**, comme les mesures de température ou de tension. Il communique avec le microcontrôleur via le protocole **SPI (Serial Peripheral Interface)** [32].

Figure 1.16 Module adaptateur pour carte micro SD

1.2.3. Contrôleur de charge solaire

Le **contrôleur de charge** est un composant essentiel dans les systèmes photovoltaïques. Il permet de **réguler la tension** entre le panneau solaire et la batterie pour **optimiser le rendement énergétique** et **protéger les composants**. Le modèle utilisé est un régulateur **PWM (modulation de largeur d'impulsion)**, disponible en versions **10A, 15A, 20A ou 25A**.

Il est équipé d'un **écran LCD** pour faciliter le réglage et l'affichage des informations. Il propose aussi diverses **protections intégrées** : contre les surcharges, les courts-circuits, les inversions de polarité et les circuits ouverts.

Ce type de contrôleur assure la **gestion automatique** du flux d'énergie entre le panneau solaire et la batterie, améliorant ainsi la **fiabilité et la sécurité** du système [33].

Figure 1.17 Contrôleur de charge solaire PWM

1.2.4. Batterie

La batterie joue un rôle crucial dans un système à énergie solaire. Elle permet de **stocker l'énergie** produite par les panneaux et de la **distribuer** même en l'absence de lumière solaire. Pour ce projet, une **batterie ProPower 12V 100Ah** a été utilisée.

Tableau 1.5 Caractéristique de la batterie

Caractéristique	Valeur
Tension nominale	12 V
Capacité	100 Ah
Poids	12 kg
Dimensions	340 × 182 × 265 mm

Figure 1.18 Batterie utilisée dans le système solaire

1.3. Conclusion

La synergie entre les cellules photovoltaïques et la plateforme Arduino met en évidence le potentiel des technologies modernes pour optimiser l'exploitation des sources d'énergie renouvelable. En intégrant des capteurs et des dispositifs de contrôle intelligents à la production d'énergie solaire, il devient possible de concevoir des solutions innovantes adaptées à divers secteurs, tels que l'agriculture de précision, l'habitat éco-responsable ou encore les systèmes autonomes. Cette approche contribue activement à la transition vers un modèle énergétique plus durable et résilient, où la technologie joue un rôle central dans la préservation de l'environnement.

Chapitre 2 Réalisation Et Tests

2.1. Introduction

Ce chapitre détaille le processus de connexion des différents composants électroniques à la carte Arduino Uno ainsi qu'au régulateur de charge des panneaux solaires. Il aborde également la programmation via le logiciel Arduino IDE, en expliquant son fonctionnement et son utilisation. Enfin, nous décrirons la méthode d'extraction et d'affichage des données collectées en temps réel à l'aide de Microsoft Excel.

2.2. Étapes de sélection et d'installation des capteurs

2.2.1. Capteur de tension

Le module de mesure de tension B25 est un capteur économique et facile à utiliser, conçu pour mesurer des tensions allant jusqu'à 25 V. Il utilise un diviseur de tension avec un rapport de 1 :5, permettant ainsi de réduire la tension d'entrée avant de l'appliquer à une broche analogique (ADC) du microcontrôleur. Cette configuration garantit que la tension appliquée ne dépasse pas la limite de 5 V, évitant ainsi tout dommage au circuit interne [34].

Tableau 2.1 Connexion du capteur de tension à l'Arduino

Broche du capteur	Broche correspondante sur l'Arduino
Vcc	5V
GND	GND
OUT	Entrée analogique A1

2.2.2. Capture de courant

Le capteur **ACS712** permet de mesurer le courant circulant dans un circuit électrique, en utilisant le **principe de l'effet Hall**. Il fournit une sortie analogique comprise entre 0 et 5 V, proportionnelle à l'intensité du courant mesuré. Le capteur doit être connecté **en série** avec la ligne électrique à analyser. Il a été retenu pour ce projet en raison de sa **compatibilité avec les cartes Arduino**, de sa **faible consommation d'énergie** et de son **coût abordable** [28].

Tableau 2.2 Connexion du capteur de courant à l'Arduino

Broche du capteur	Connexion sur l'Arduino
Vcc	5V
GND	GND
OUT	A0 (entrée analogique)

2.2.3. Capteur de température (MAX6675 + thermocouple type K)

Le circuit intégré **MAX6675** est une interface numérique conçue pour les **thermocouples de type K**. Il permet de mesurer des températures comprises entre **0 °C et 1024 °C**, avec une **résolution de 0,25 °C**. Le capteur communique avec l'Arduino via le **protocole SPI**, ce qui permet une lecture simple et rapide des données de température [35].

Tableau 2.3 Connexion du capteur de température

Broche du capteur	Connexion sur l'Arduino
Vcc	5V
GND	GND
SCK	Broche 9
CS	Broche 1
SO	Broche 0

2.2.4. Écran LCD 16×2

L'afficheur **LCD 16×2** est utilisé pour visualiser les données collectées par les capteurs. Il se connecte facilement à l'Arduino à l'aide de **six broches principales** : deux pour l'alimentation (5V et GND) et quatre pour le transfert de données (RS, E, D4 à D7). Un **potentiomètre de 10 kΩ** est intégré pour ajuster le contraste de l'affichage. La **bibliothèque LiquidCrystal**, disponible par défaut dans l'IDE Arduino, facilite la gestion du contenu affiché [31].

Tableau 2.4 Connecter un écran LCD à un Arduino

Broche LCD	Connexion sur l'Arduino
VSS	GND
VDD	5V
VO	Résistance variable (potentiomètre)
RS	Broche 3
RW	Broche 4
E	GND
D4	Broche 5
D5	Broche 6
D6	Broche 7
D7	Broche 8
A	5V (alimentation rétroéclairage)
K	GND (masse rétroéclairage)

2.2.5. Adaptateur de carte SD

Le module **lecteur de carte micro SD** permet de stocker les données collectées par les capteurs sur une carte mémoire. Il communique avec l'Arduino via le **bus SPI**, qui utilise les broches **SCK, MISO, MOSI et CS**. La broche CS (Chip Select) peut être librement assignée, tant que cela est précisé dans le code source [36].

Tableau 2.5 Connexion d'un adaptateur de carte mémoire à un Arduino

Broche du module SD	Connexion sur l'Arduino
CS	Broche 10
MOSI	Broche 11
MISO	Broche 12
SCK	Broche 13
Vcc	5V
GND	GND

2.3. Schémas de connexion des capteurs

Cette section présente les schémas de câblage des différents capteurs et composants électroniques connectés à la carte Arduino Uno et au régulateur de charge solaire.

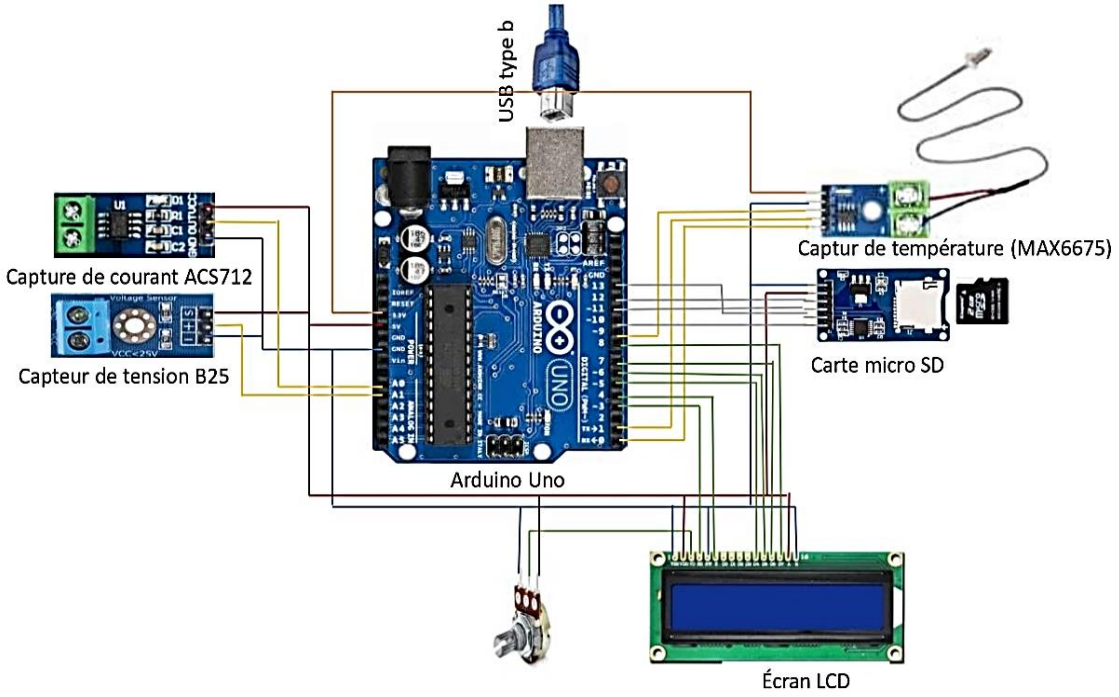


Figure 2.1 Schéma de l'ensemble des composants connectés à la carte Arduino Uno

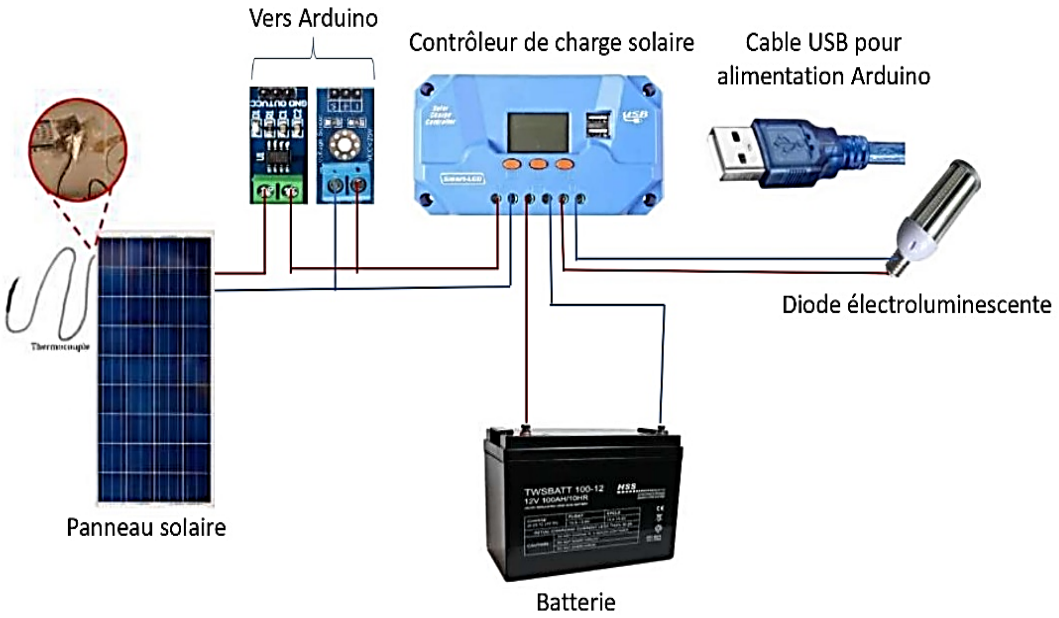


Figure 2.2 Schéma de connexion des composants matériels au régulateur de charge du panneau solaire

2.4. Code et programme

2.4.1. Programme Arduino IDE

L'IDE Arduino, écrit en Java et disponible sous Windows, macOS et Linux, permet de développer et téléverser des programmes en C/C++ sur les cartes Arduino et compatibles. Il intègre une bibliothèque facilitant les opérations d'Entrée/Sortie ainsi qu'un mécanisme de construction automatique autour de deux fonctions essentielles (setup () et loop ()). La compilation et le téléversement s'appuient sur AVRDUDE, qui convertit le binaire en hexadécimal avant de le charger via le bootloader de la carte [37]

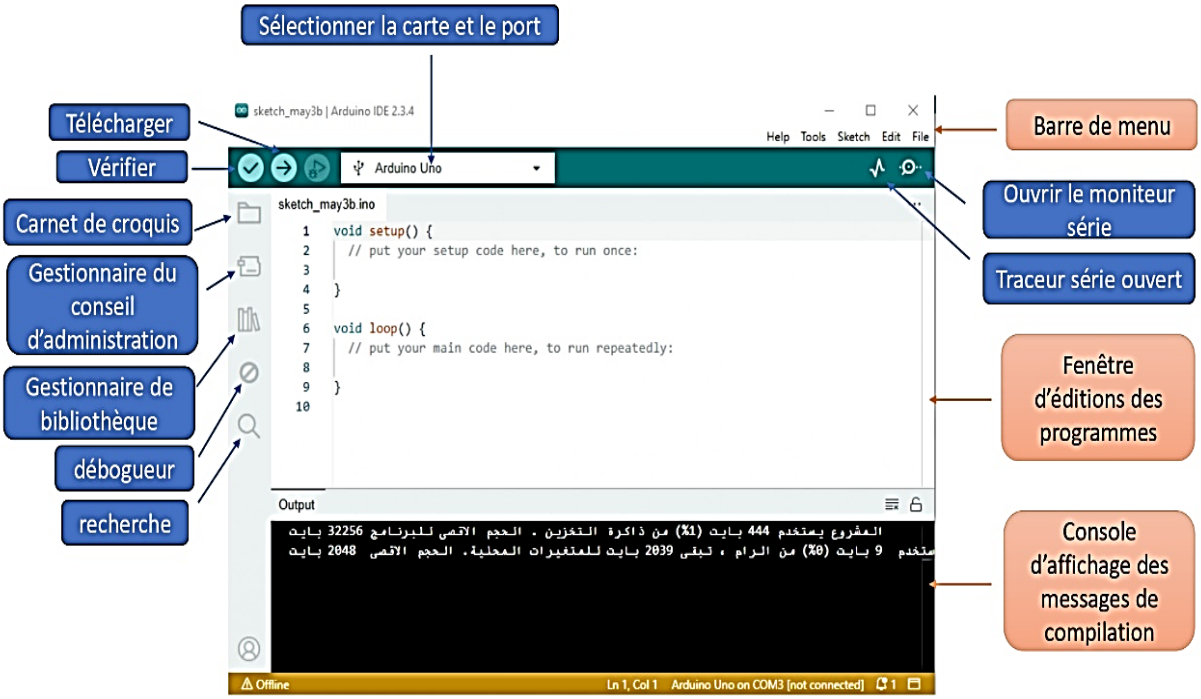


Figure 2.3 Interface de L'IDE Arduino

2.4.2. Code

```
#include <LiquidCristal.h> // include the library code of LCD Display
//initialize the library by associating any needed LCD interface pin
// with the arduino pin number it is connected
const int rs = 3, en = 4, d4 = 5, d5 = 6, d6 = 7, d7 = 8 ;
LiquidCrystal lcd (rs, en, d4, d5, d6, d7) ;//create instance object f LCD
#include <max6675.h>  //include the library code emax6675 "temperature sensor"
int soPin = 0; // SO= Serial Out
int csPin = 1; // CS= chip select CS pin
int sckPin = 9; // SCK = Serial Clock pin
MAX6675 Modele (sckPin, csPin, soPin);  //create instance object of MAX6675
#include <SPI.h>    //include the libraries code of SD card Adapter
#include <SD.h>
File myFile;
// MOSI – pin 11 on Arduino Uno/Duemilanove/Diecimila
// MISO – pin 12 on Arduino Uno/Duemilanove/Diecimila
//CLK - pin 13 on Arduino Uno/Duemilanove/Diecimila
// you can't replace them
```

```
18  const int chipSelact = 10; //CS – is chipSelact value
19  const int pinCurrent = A0;
20  const int pinVoltage = A1;
21  //Create a variables
22  float Voltage; // for the Solar Panel Voltage
23  float Current; // for the Solar Panel Current
24   float Puissance; // for the Solar Panel Puissance
25 //Create a variables for current Equation
26   int adcValue = 0;
27   double adcVoltage = 0;
28   double current Value = 0;
29   Void setup () {
30   Serail.begin (9600);  // Open serail communications and wait for
     port to open
31   lcd. begin (16, 2); // set up the LCD's number of columns and rows
32   while (! Serail) {
33  ; // wait for serail prot to connect
34   //Needed for native USB port only}
35   // set the cursor to column 0, line 0
```

```
// (note: line 1 is the second row, since counting begins with 0):
lcd. setCursor (0,0);
//print "Initializing SD card…" to Serail moniter
Serail.print("Initializing SD card…") ;
//print "Initializing SD card…" to LCD Display
lcd.print ("Initializing SD card…");
//set the cursor to column 0, line 1
lcd. setCursor (0,1);
//chick the SD card if is work and
//print it in the monitor and lcd card
if (! SD. begin(chipSelect)) {
lcd.print ("SD Card failed ") ;
Serail.println("SD Card failed");{
else {
lcd.print ("SD Card working ");
Serail.println("initializing done. "); }
// open the file. Note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another
myFile = SD. open ("test.txt", FALE_WRITE);
```

```
 //if the file opened okay, write to it:
   if (myFile) {
// print line for differentiation between
  // past and next Data in the SD card
   myFile.println("################") ;
  myFile.close();} // close the file:
  delay (4000) ;}
void loop () {
 // Current Equation
  float Current = (analogRead(pinCurrent)-512) * (5.0/1023.0) / 0.185;
  // Voltage Equation
float voltage = (analogRead (pinVoltage) * (5.0/1023.0) * (250.0/5.0)) ;
 // Temperature Equation
 float Temperature = Module.readCelsuis() ;
  // print the Data in the SD Card
  myFile = SD. open ("test.txt", FILE_WRITE) ;
 // if the file opened okay, write to it
   if (myFile) {
  myFile.println(String (Voltage) + "," + String (Current) + ","
```

```
74    + String (Puissance)+"," + String (Temperature)) ;
75    // Close the file:
76    myFile.close() ;}
77   // print the SD card in LCD Display
78    // set the cursor to column 0, line 0
79   lcd. setCursor (0,0);
80    lcd.print ("V: " + String (Voltage) + "C: " + String (Current)) ;
81  // set the cursor to column 0, line 1
82    lcd. setCursor (0, 1);
83   lcd.print ("T: " + String (Temperature)) ;
84 //print code in the Monitor and Excel
89   Serail.println(String (Voltage) + "," + String (Current)
90   + "," + String (Temperature))
91   // 300000 mS = 5 min cycle time
92   delay (300000) ;}
```

2.5. Consulter et extraire des données du système

Les données peuvent être extraites et affichées de trois manières différentes, que nous présenterons comme suit :

2.5.1. Affichage sur écran LCD

L'écran **LCD 16x2** permet l'affichage en temps réel des données mesurées par les capteurs et transmises par la carte Arduino. La **première ligne** de l'afficheur indique la **tension** et le **courant** du panneau solaire, tandis que la **seconde ligne** fournit des informations sur la **température** ambiante et le **courant de la batterie**. Ces données permettent de déterminer si la batterie est en **phase de charge** ou de **décharge**, offrant ainsi une visualisation claire de l'état du système.

Figure 2.4 Afficher les résultats sur LCD

2.5.2. Exploitation des données dans Excel

Une méthode simple pour visualiser les données issues d'Arduino en temps réel consiste à utiliser l'extension **Data Streamer** disponible dans Microsoft Excel 2016. Cette extension permet d'établir une communication série entre le microcontrôleur et Excel via un câble USB. Une fois installée et activée, elle offre une interface intuitive pour recevoir les flux de données. La procédure se déroule en trois étapes principales :

1. Accéder à l'onglet **Data Streamer** dans le ruban Excel.
2. Sélectionner l'option **Connect a device** pour établir la liaison avec le port série utilisé par Arduino.
3. Cliquer sur **Start Data** pour lancer la réception en temps réel des données dans la feuille Excel.

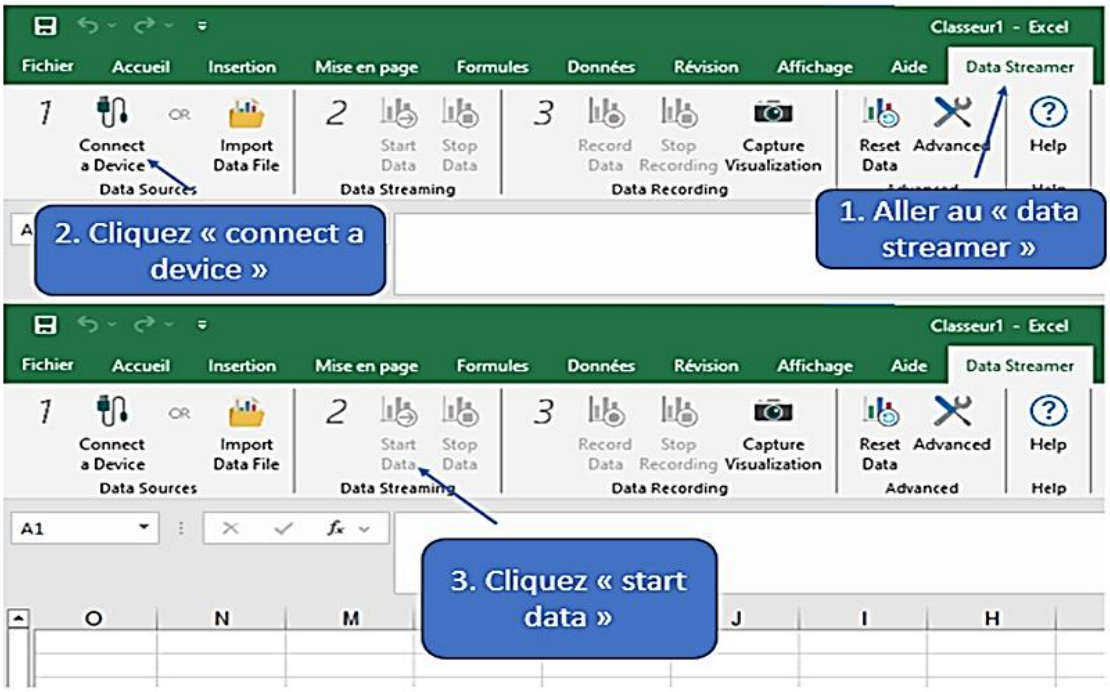


Figure 2.5 Illustration de la transmission des données série vers Excel.

2.5.3. Ulisation d'une carte mémoire SD

La carte Micro SD permet l'enregistrement en temps réel des données collectées par la carte Arduino, conformément au programme précédemment développé. Les informations sont archivées dans un fichier texte selon l'ordre suivant : tension du panneau photovoltaïque, courant du panneau, tension de la batterie, courant de la batterie, puis la température ambiante.

Afin de garantir la compatibilité avec les logiciels d'analyse tels qu'Excel, chaque donnée est séparée par une virgule. De plus, une ligne contenant le séparateur "# # #" est automatiquement insérée à chaque redémarrage du système, facilitant ainsi l'identification des sessions de mesure successives.

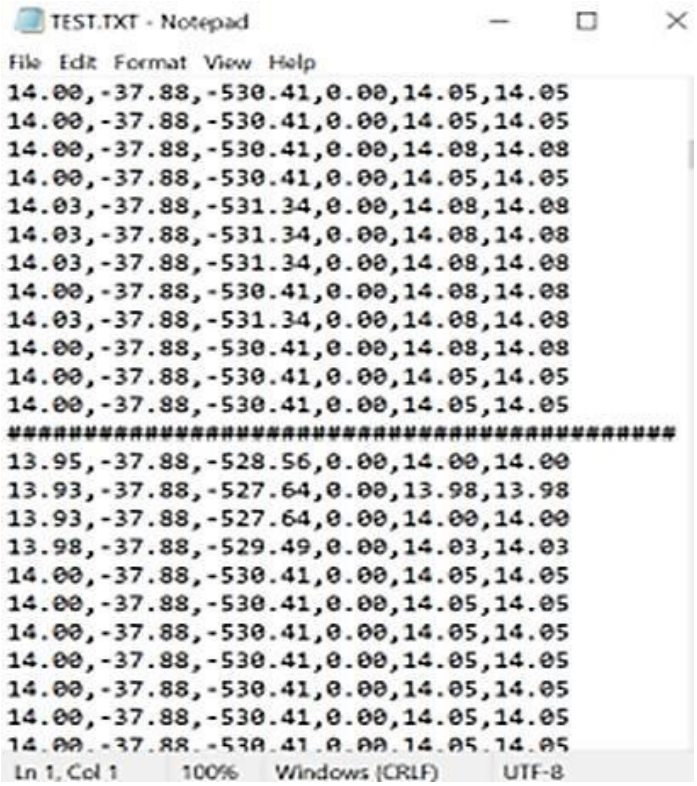


Figure 2.6 Exemple de fichier texte généré par la carte SD

Pour consulter ou analyser ces données, il suffit d'insérer la carte mémoire dans un ordinateur et d'ouvrir le fichier à l'aide d'un éditeur de texte ou d'un tableur.

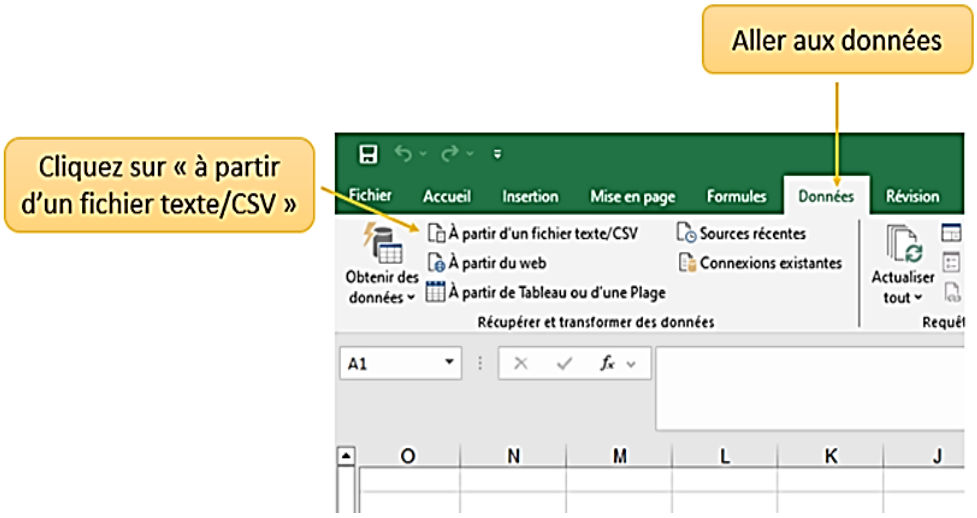


Figure 2.7 Procédure d'accès au fichier .txt via un ordinateur

2.6. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'intégration entre les différents composants électroniques, la carte Arduino Uno et le régulateur de charge solaire. Il a détaillé les étapes de programmation à l'aide de l'environnement Arduino IDE, tout en expliquant les méthodes d'exploitation des données mesurées. La visualisation en temps réel via Microsoft Excel constitue une approche efficace pour assurer le suivi et l'analyse des performances du système photovoltaïque.

Chapitre 3 Résultats Et Discussion

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous procédons à la présentation et à l'analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus à l'aide du système de surveillance en temps réel dédié à l'observation du fonctionnement de panneaux solaires photovoltaïques. Ce système, décrit dans les chapitres précédents, permet la collecte continue de données essentielles telles que la tension, le courant, la puissance et les paramètres environnementaux influençant la performance du système (irradiance, température).

Les résultats obtenus sont organisés, interprétés et discutés afin d'évaluer l'efficacité du système de surveillance, mais aussi pour mieux comprendre le comportement dynamique des panneaux solaires dans des conditions réelles de fonctionnement.

3.2. Expérience

L'expérimentation a été réalisée le 15 mai 2025, dans des conditions réelles de fonctionnement afin d'évaluer la performance du système de surveillance des données photovoltaïques. Cette étape a consisté à mettre en œuvre l'architecture matérielle décrite précédemment, en assurant l'interfaçage correct des différents composants électroniques.

La figure 3.1 suivant montre l'assemblage des composants matériels utilisés pour la mesure de l'irradiation et de la température ambiantes dans le cadre du système de PV. On y distingue une carte Arduino UNO connectée à un capteur température type K et capteur LDR, un écran LCD 16x2 pour l'affichage local des données, ainsi qu'une breadboard servant de support pour les connexions électriques. L'ensemble est alimenté via un câble USB, ce qui permet également la communication série avec l'ordinateur pour la collecte et l'enregistrement des données.

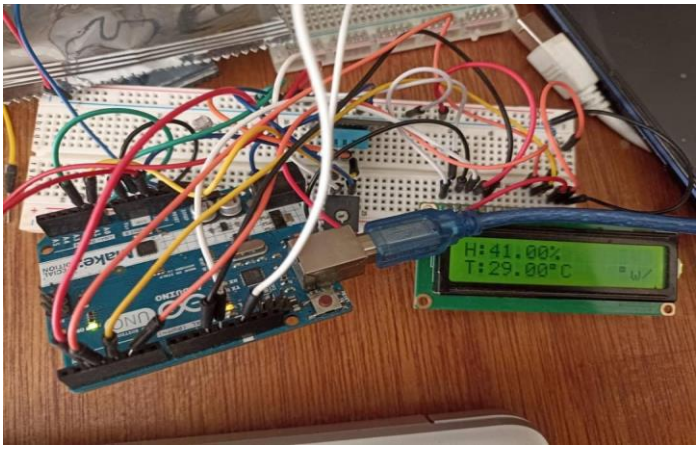


Figure 3.1 Composants matériels connectés à la carte Arduino

La figure ci-dessous (3.2) illustre l'installation complète du système de surveillance photovoltaïque en conditions extérieures réelles. L'ensemble comprend un panneau solaire connecté à un régulateur de charge (modèle CM3024Z), une batterie de stockage de type plomb-acide (marque Energizer), ainsi qu'une carte Arduino UNO associée à un écran LCD pour l'affichage local des données mesurées et enregistrée par Carte SD. L'ampoule visible sur la photo est utilisée comme charge pour simuler la consommation énergétique. Cette configuration permet de suivre en temps réel les paramètres électriques (tension, courant) et environnementaux (radiation et température), tout en assurant le contrôle et la protection du système grâce au régulateur.

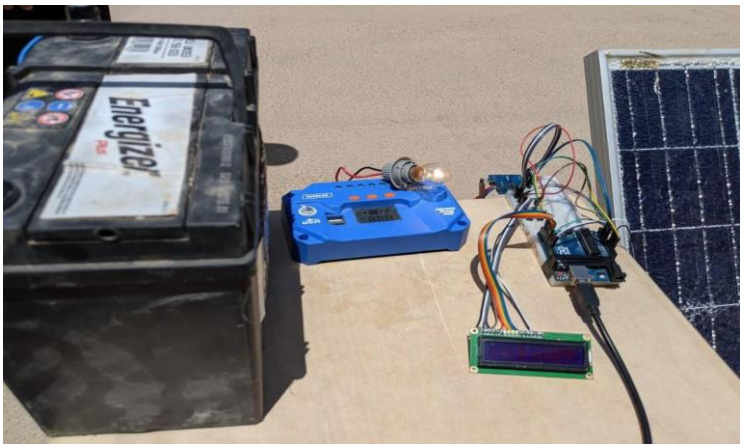


Figure 3.2 Montage global du système photovoltaïque expérimental : panneau solaire, régulateur de charge CM3024Z, batterie de stockage, carte Arduino UNO, Carte SD, capteurs et écran LCD

3.3. Résultat

Dans le cadre de cette expérimentation, les mesures relatives au fonctionnement des panneaux solaires et de la batterie ont été enregistrées en temps réel sur une carte mémoire SD, à l'aide de la carte Arduino Uno et d'un module lecteur de carte SD. Les données enregistrées comprennent notamment :

- La tension du panneau solaire (V_pv),
- Le courant généré par le panneau solaire (I_pv),
- La tension de la batterie (V_bat),
- Le courant de charge de la batterie (I_bat),
- La température ambiante (T),
- Le temps (horodatage de la mesure).

Ces données ont été sauvegardées dans un fichier texte (data_log.txt) sur la carte SD, au format CSV (Comma-Separated Values), facilitant ainsi leur importation dans un tableur (Excel)

Tableau 3.1 Résultats expérimentaux du système

Time	PV_ Voltage	PV_ Current	PV_ Puiss	Batt_ Voltage	Batt_ Current	Batt_ Puiss	Radiation	Temperature
7 :00	11.39	0.36	4.09	11.69	0.36	4.20	202.03	28.50
7 :05	11.33	0.36	4.07	11.64	0.36	4.18	214.74	28.94
7 :10	11.37	0.43	4.85	11.66	0.43	4.98	224.92	29.56
7 :15	11.37	0.43	4.85	11.69	0.36	4.20	239.87	30.03
7 :20	11.33	0.43	4.83	11.66	0.50	5.88	250.93	30.37
7 :25	11.35	0.43	4.84	11.64	0.43	4.97	265.88	30.93
7 :30	11.35	0.43	4.84	11.66	0.43	4.98	279.54	31.32
7 :35	11.30	0.43	4.82	11.62	0.43	4.96	292.68	32.24
7 :40	11.39	0.50	5.75	11.71	0.36	4.20	306.51	33.21
7 :45	11.37	0.43	4.85	11.66	0.43	4.98	319.65	33.56
7 :50	11.33	0.50	5.71	11.64	0.43	4.97	332.64	34.51
7 :55	11.39	0.57	6.52	11.76	0.50	5.93	346.77	34.79
8 :00	11.37	0.50	5.74	11.66	0.43	4.98	655.27	35.12
8 :05	11.39	0.50	5.75	11.74	0.50	5.92	655.27	35.31
8 :10	11.49	0.57	6.57	11.78	0.57	6.74	655.27	34.58
8 :15	11.44	0.57	6.55	11.81	0.50	5.96	655.27	35.10
8 :20	11.50	0.57	6.58	11.86	0.57	6.79	655.27	35.01
8 :25	11.60	0.65	7.54	11.95	0.57	6.84	655.27	35.19
8 :30	11.55	0.65	7.51	11.88	0.57	6.80	655.27	35.45
8 :35	11.60	0.65	7.54	11.97	0.65	7.78	655.27	35.79
8 :40	11.71	0.65	7.61	12.04	0.72	8.64	655.27	36.05
8 :45	11.64	0.72	8.36	11.99	0.57	6.86	655.27	36.58
8 :50	11.63	0.65	7.56	11.99	0.65	7.79	655.27	37.16
8 :55	11.69	0.79	9.18	12.04	0.72	8.64	655.27	38.66
9 :00	11.78	0.93	10.97	12.13	0.65	7.89	655.27	40.30
9 :05	11.74	0.86	10.13	12.09	0.79	9.50	655.27	41.68
9 :10	11.71	1.01	11.81	12.09	0.79	9.50	655.27	41.23
9 :15	11.76	0.93	10.95	12.13	0.93	11.30	655.27	40.86
9 :20	11.76	1.08	12.66	12.09	0.93	11.25	655.27	40.18
9:25	11.76	1.08	12.66	12.12	0.93	11.28	655.27	39.49
9:30	11.80	1.08	12.71	12.16	1.08	13.10	655.27	39.44
9:35	11.83	1.01	11.93	12.16	1.01	12.27	655.27	40.64
9:40	11.80	1.01	11.91	12.18	1.14	13.94	655.27	40.55
9:45	11.85	1.29	15.29	12.23	1.14	14.00	655.27	40.60
9:50	11.78	1.08	12.69	12.16	1.14	13.92	655.27	41.90
9:55	11.85	1.22	14.48	12.20	1.14	13.97	655.27	42.84
10:00	11.83	1.14	13.54	12.23	1.01	12.34	655.27	43.39
10:05	11.83	1.22	14.46	12.20	1.22	14.91	655.27	41.69
10:10	11.85	1.14	13.56	12.23	1.22	14.95	655.27	43.03
10:15	11.94	1.14	13.67	12.33	1.22	15.07	655.27	42.79

10:20	11.96	1.37	16.36	12.33	1.29	15.90	668.00	42.79
10:25	11.91	1.29	15.37	12.33	1.22	15.07	682.26	41.98
10:30	11.99	1.37	16.40	12.35	1.22	15.09	686.79	42.32
10:35	11.94	1.50	17.95	12.30	1.29	15.87	697.23	42.73
10:40	12.10	1.44	17.37	12.39	1.37	16.95	702.94	43.15
10:45	12.01	1.29	15.49	12.39	1.37	16.95	698.33	42.46
10:50	12.01	1.37	16.42	12.39	1.37	16.95	713.55	43.37
10:55	12.03	1.44	17.28	12.41	1.37	16.98	723.57	43.40
11:00	12.01	1.37	16.42	12.36	1.44	17.75	721.84	44.45
11:05	11.99	1.44	17.21	12.36	1.29	15.95	717.37	43.60
11:10	12.03	1.44	17.28	12.41	1.44	17.82	739.16	43.25
11:15	12.05	1.50	18.12	12.41	1.50	18.66	757.02	44.14
11:20	12.01	1.58	18.98	12.39	1.50	18.63	749.56	44.96
11:25	12.03	1.65	19.84	12.39	1.65	20.44	753.70	44.41
11:30	12.10	1.58	19.13	12.44	1.44	17.86	767.14	43.86
11:35	12.03	1.65	19.84	12.39	1.50	18.63	769.59	45.69
11:40	12.10	1.65	19.95	12.49	1.58	19.75	765.50	44.75
11:45	12.05	1.73	20.81	12.44	1.65	20.52	776.32	44.99
11:50	12.12	1.44	17.40	12.49	1.65	20.60	778.30	45.46
11:55	12.10	1.73	20.89	12.44	1.58	19.67	783.80	44.30
12:00	12.10	1.29	15.61	12.39	1.29	15.99	778.98	44.70
12:05	12.28	1.37	16.79	12.65	1.44	18.16	788.94	44.50
12:10	12.24	1.14	14.01	12.62	1.08	13.59	792.76	45.33
12:15	12.28	1.50	18.46	12.67	1.44	18.19	802.86	45.35
12:20	12.35	1.58	19.53	12.77	1.50	19.20	794.07	45.46
12:25	12.32	1.44	17.69	12.70	1.37	17.37	803.84	46.30
12:30	12.57	1.79	22.56	12.96	1.86	24.14	801.06	45.32
12:35	12.51	1.79	22.45	12.91	1.58	20.42	811.89	45.23
12:40	12.28	1.29	15.84	12.70	1.22	15.52	813.91	45.98
12:45	12.24	1.01	12.35	12.60	0.93	11.74	816.62	47.02
12:50	12.30	1.22	15.04	12.70	1.08	13.67	824.58	46.50
12:55	12.44	1.58	19.67	12.84	1.44	18.43	823.90	47.38
13:00	12.42	1.73	21.44	12.82	1.65	21.13	840.15	47.79
13:05	12.51	1.58	19.78	12.91	1.73	22.29	823.22	46.81
13:10	12.51	1.65	20.63	12.88	1.73	22.24	833.53	45.51
13:15	12.44	1.73	21.48	12.84	1.58	20.29	744.13	44.10
13:20	12.51	1.73	21.60	12.86	1.65	21.21	763.15	44.55
13:25	12.37	1.37	16.92	12.75	1.29	16.45	762.27	45.13
13:30	12.24	1.37	16.74	12.65	1.22	15.46	642.45	45.40
13:35	12.26	0.93	11.41	12.74	-2.94	-37.44	746.25	43.36
13:40	12.32	1.14	14.10	12.88	-2.66	-34.24	808.33	44.49
13:45	12.30	1.14	14.08	12.82	-2.66	-34.06	761.45	44.94
13:50	12.30	1.22	15.04	12.79	-2.66	-33.99	742.43	45.24
13:55	12.64	1.65	20.84	12.20	-1.94	-23.67	766.19	44.72
14:00	11.85	1.86	22.07	12.30	-1.86	-22.90	706.80	44.18
14:05	12.32	2.58	31.79	12.82	-1.01	-12.93	777.15	44.75
14:10	11.89	1.79	21.35	12.36	-1.79	-22.19	447.69	44.34
14:15	12.15	2.22	26.98	12.65	-1.58	-20.01	520.96	40.95

14:20	12.56	2.37	29.72	13.08	-1.14	-14.97	510.77	42.22
14:25	12.42	2.09	25.89	12.91	-1.50	-19.41	724.90	44.39
14:30	12.44	2.09	25.95	12.93	-1.37	-17.69	831.74	47.89
14:35	12.30	2.15	26.50	12.79	-1.29	-16.50	797.84	51.08
14:40	12.81	1.65	21.12	13.29	-1.86	-24.74	819.07	50.83
14:45	12.30	1.65	20.29	12.47	-1.86	-23.22	808.76	51.22
14:50	12.98	1.50	19.52	12.96	-2.01	-26.02	781.46	48.94
14:55	12.48	1.50	18.76	12.86	1.65	21.21	795.43	46.19
15:00	12.40	1.37	16.96	12.75	1.58	20.16	678.44	44.49
15:05	12.46	1.14	14.26	12.84	1.50	19.30	598.29	44.89
15:10	12.48	1.37	17.07	12.82	1.58	20.26	664.15	43.84
15:15	12.82	1.86	23.88	13.19	2.15	28.40	745.64	45.66
15:20	12.57	1.50	18.90	12.93	1.65	21.32	599.98	44.85
15:25	12.53	1.29	16.16	12.91	1.50	19.41	558.60	44.51
15:30	12.56	1.37	17.17	12.93	1.58	20.45	559.93	45.10
15:35	12.56	1.44	18.02	12.91	1.58	20.42	470.11	43.12
15:40	12.98	2.22	28.84	13.35	2.30	30.70	699.14	43.57
15:45	13.17	2.37	31.17	13.52	2.58	34.88	665.12	45.42
15:50	13.03	2.15	28.06	13.42	2.37	31.76	500.76	42.63
15:55	13.22	2.44	32.30	13.59	2.66	36.13	340.03	39.34
16:00	13.06	2.09	27.23	13.40	2.30	30.81	540.06	40.59
16:05	13.19	2.22	29.29	13.52	2.58	34.88	648.98	40.68
16:10	12.98	2.09	27.08	13.35	2.30	30.70	379.24	39.49
16:15	12.94	2.09	26.98	13.33	2.15	28.71	413.18	39.47
16:20	12.98	1.94	25.19	13.35	2.15	28.76	345.44	38.16
16:25	12.96	1.94	25.15	13.31	2.15	28.65	298.84	37.54
16:30	12.82	1.65	21.15	13.17	1.94	25.55	302.55	36.56
16:35	12.78	1.65	21.07	13.14	1.86	24.48	350.13	37.20
16:40	12.87	1.65	21.22	13.21	1.86	24.60	455.86	38.96
16:45	12.82	1.73	22.14	13.19	2.01	26.49	584.10	41.49
16:50	13.03	2.01	26.16	13.38	2.09	27.91	605.97	40.70
16:55	12.69	1.44	18.21	13.05	1.58	20.63	322.38	39.13
17:00	12.69	1.58	20.06	13.05	1.65	21.51	324.97	38.29
17:05	12.89	1.44	18.50	13.08	1.58	20.67	366.27	38.61
17:10	12.82	1.58	20.28	13.19	1.86	24.57	504.55	41.00
17:15	12.73	1.44	18.28	13.09	1.65	21.59	510.02	41.22
17:20	12.78	1.44	18.34	13.12	1.65	21.64	423.41	38.35
17:25	12.82	1.50	19.28	13.19	1.73	22.77	264.89	36.72
17:30	12.78	1.44	18.34	13.09	1.73	22.61	262.10	35.73
17:35	12.76	1.37	17.45	13.12	1.65	21.64	271.95	34.82
17:40	12.78	1.50	19.21	13.26	1.73	22.89	254.06	34.60
17:45	12.81	1.44	18.38	13.17	1.73	22.74	229.06	34.27
17:50	12.87	1.50	19.35	13.21	1.65	21.78	250.69	34.54
17:55	12.82	1.37	17.54	13.17	1.65	21.72	247.96	35.14
18:00	12.78	1.37	17.48	13.17	1.65	21.72	244.19	35.25
18:05	12.81	1.37	17.51	13.14	1.58	20.78	248.87	35.15
18:10	12.73	1.44	18.28	13.17	1.86	24.53	243.68	35.75
18:15	12.82	1.50	19.28	13.19	1.73	22.77	248.91	36.23

18:20	**12.78**	**1.29**	**16.49**	**13.14**	**1.65**	**21.67**	**252.09**	**36.63**
18:25	**13.23**	**2.09**	**27.60**	**13.61**	**2.37**	**32.22**	**238.96**	**36.63**
18:30	**13.03**	**1.94**	**25.28**	**13.42**	**2.15**	**28.90**	**221.67**	**36.63**
18:35	**12.92**	**1.65**	**21.30**	**13.29**	**1.86**	**24.74**	**240.13**	**36.63**
18:40	**12.82**	**1.50**	**19.28**	**13.19**	**1.86**	**24.57**	**201.92**	**36.63**
18:45	**12.87**	**1.65**	**21.22**	**13.24**	**1.73**	**22.86**	**243.43**	**36.63**
18:50	**12.89**	**1.79**	**23.13**	**13.26**	**1.94**	**25.72**	**285.49**	**36.63**
18:55	**12.96**	**1.79**	**23.26**	**13.31**	**2.01**	**26.72**	**250.31**	**36.63**
19:00	**13.01**	**1.86**	**24.23**	**13.35**	**2.09**	**27.85**	**220.56**	**20.80**

Le tableau 3 regroupe les données enregistrées entre 7h00 et 12h30 concernant les paramètres électriques et environnementaux d'une installation photovoltaïque. On y observe une montée progressive de l'irradiance solaire, qui passe de 227 W/m² à un pic de 903 W/m², accompagnée d'une augmentation marquée de la température ambiante, atteignant jusqu'à 57 °C. Cette évolution des conditions climatiques favorise une amélioration de la production électrique du panneau photovoltaïque : la puissance délivrée progresse de manière significative, partant de 4 W pour dépasser 22 W en fin de période. La tension aux bornes du panneau reste globalement constante, oscillant entre 11,3 V et 12,5 V, ce qui traduit un bon fonctionnement du dispositif de régulation. Concernant la batterie, les données montrent une phase de charge régulière : sa tension augmente graduellement, tandis que le courant et la puissance absorbés suivent une courbe ascendante, atteignant plus de 20 W à partir de 11h30. Ces résultats soulignent la performance satisfaisante du système, capable de capter efficacement l'énergie solaire disponible, de la convertir en électricité et de la transférer de manière contrôlée vers le stockage, sans déséquilibre notable entre la génération et la consommation.

3.4. Discussions de Résultats

Les deux figures (3.3 et 3.4) représentent l'évolution des grandeurs électriques dans un système photovoltaïque équipé d'un dispositif de stockage par batterie, sur une période de 24 heures. Le figure 3.3 illustre la variation des tensions au niveau du panneau solaire (PV_Voltage) et de la batterie (Batt_voltage). On y constate que les tensions demeurent relativement constantes entre la fin d'après-midi et le début de l'après-midi suivante, autour de 13 à 14 volts. Une légère baisse est observée vers 14h00, pouvant être liée à une diminution de l'ensoleillement ou à une modification de la charge connectée au système. Ensuite, les tensions diminuent progressivement jusqu'au matin, atteignant environ 12 volts, ce qui est typique d'une phase de décharge nocturne en l'absence de production photovoltaïque.

Le figure 3.4 présente l'évolution des courants générés par le panneau solaire (PV_Current) et ceux liés à la batterie (Batt_Current). Le courant issu du panneau est globalement positif, indiquant une production d'électricité pendant la journée. En ce qui concerne le courant de la batterie, il est d'abord positif entre le début de la soirée et le milieu de l'après-midi, ce qui reflète une phase de stockage d'énergie. Toutefois, une inversion du courant est observée entre 15h00 et 13h30, traduisant une décharge de la batterie, probablement en réponse à une demande énergétique plus élevée ou à une baisse temporaire de la production solaire. Après cette phase, le courant redevient positif mais diminue graduellement, atteignant presque zéro durant la nuit, ce qui pourrait indiquer une faible activité du système ou une batterie partiellement ou totalement déchargée.

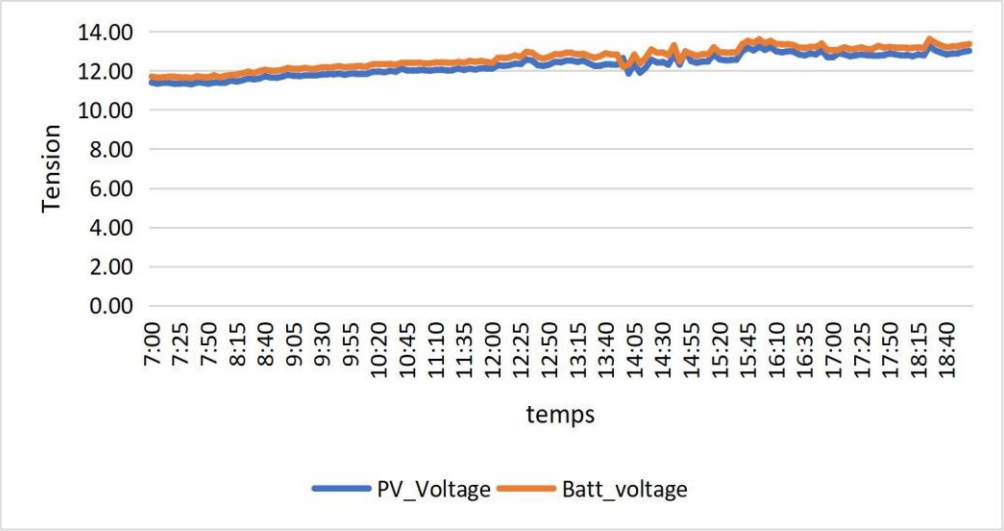


Figure 3.3 courbe de tension photovoltaïque et tension batterie

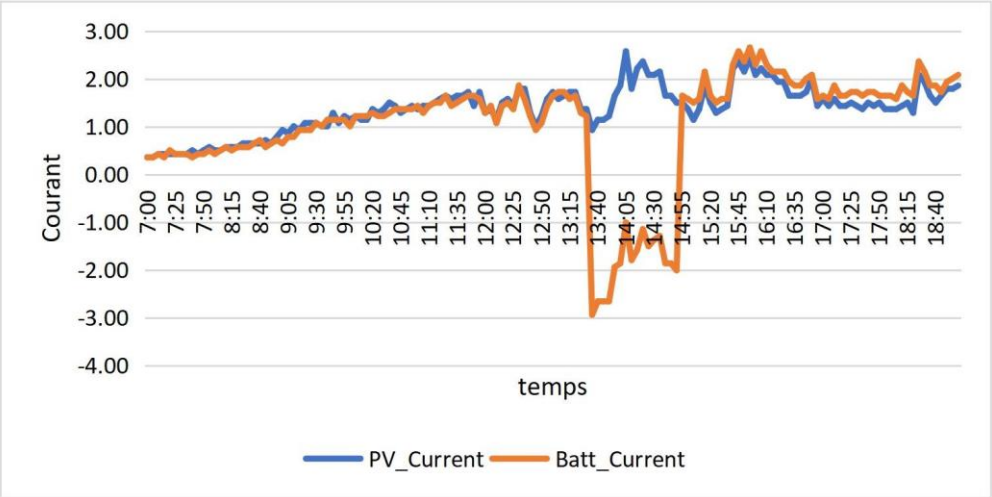


Figure 3.4 courbe de courant photovoltaïque et courant batterie

Ces courbes mettent en évidence le cycle classique de fonctionnement d'un système photovoltaïque avec batterie, comprenant une charge durant les heures d'ensoleillement et une décharge pendant la nuit. L'inversion du courant batterie observée autour de 15h indique un phénomène particulier (surcharge, baisse de production, ou forte consommation)

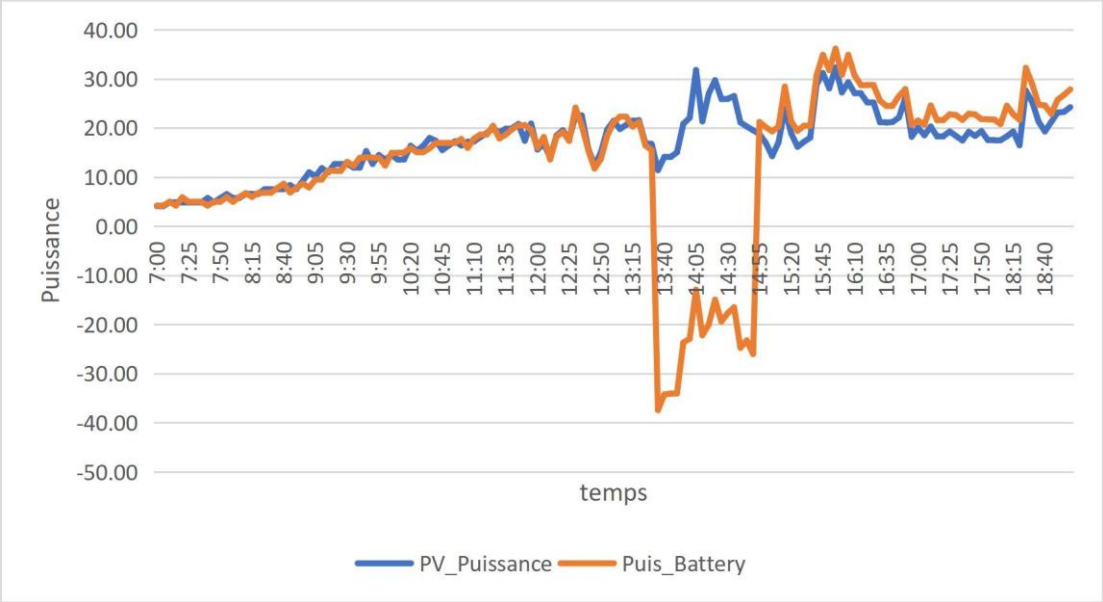


Figure 3.5 Courbe de puissance photovoltaïque et puissance batterie

La figure 3.4 présente l'évolution de la puissance produite par le panneau photovoltaïque (courbe PV_Puissance) et celle liée à l'utilisation ou au stockage d'énergie par la batterie (courbe Puis_Battery), sur une période d'environ 24 heures. Dans la première partie de l'enregistrement, soit de 18h40 à environ 14h45, les deux puissances affichent des valeurs positives, avec des variations modérées. Cela traduit une production d'énergie solaire relativement stable, accompagnée d'une phase de charge de la batterie. À partir de 14h45, un changement significatif est observé : la puissance de la batterie devient fortement négative, ce qui indique une phase de décharge marquée. Cette situation peut être liée à une consommation énergétique importante ou à une diminution soudaine de la production solaire.

Vers 13h30, la courbe de puissance de la batterie repasse en zone positive et retrouve une dynamique similaire à celle de la production photovoltaïque. Cela suggère que l'énergie générée est de nouveau principalement utilisée pour charger la batterie ou alimenter des charges faibles. En fin de période, à l'approche de 7h00, les puissances diminuent progressivement, ce qui correspond à une baisse de l'irradiation solaire et, par conséquent, de la capacité de production. Cette tendance est cohérente avec le cycle journalier d'un système photovoltaïque.

La formule mathématique pour calculer la puissance :

- La puissance du panneau photovoltaïque : $P_{PV} = V_{PV} * I_{PV}$
- La puissance de la batterie : $P_{batt} = V_{batt} * I_{batt}$

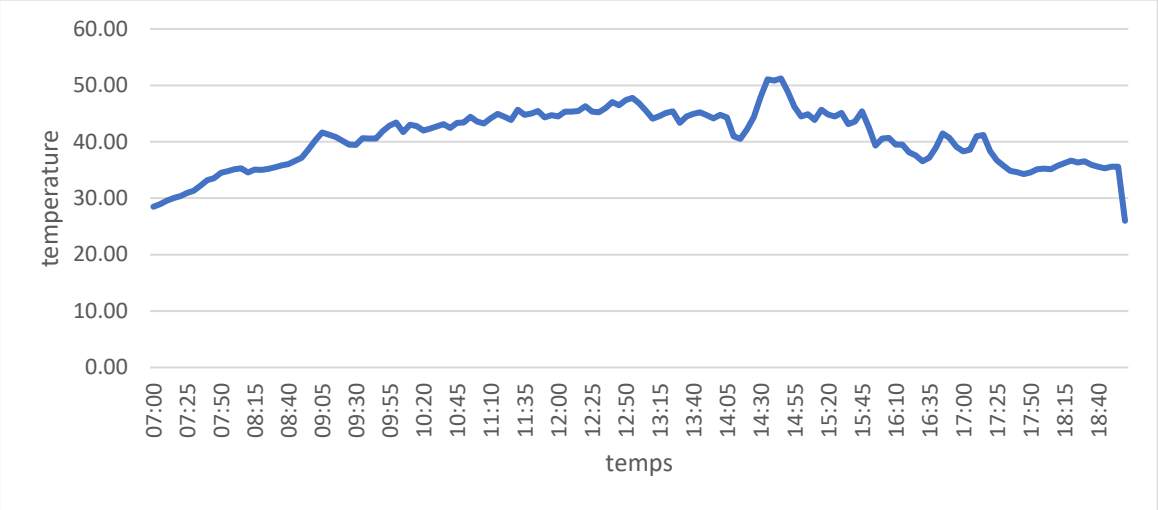


Figure 3.6 Courbe de température

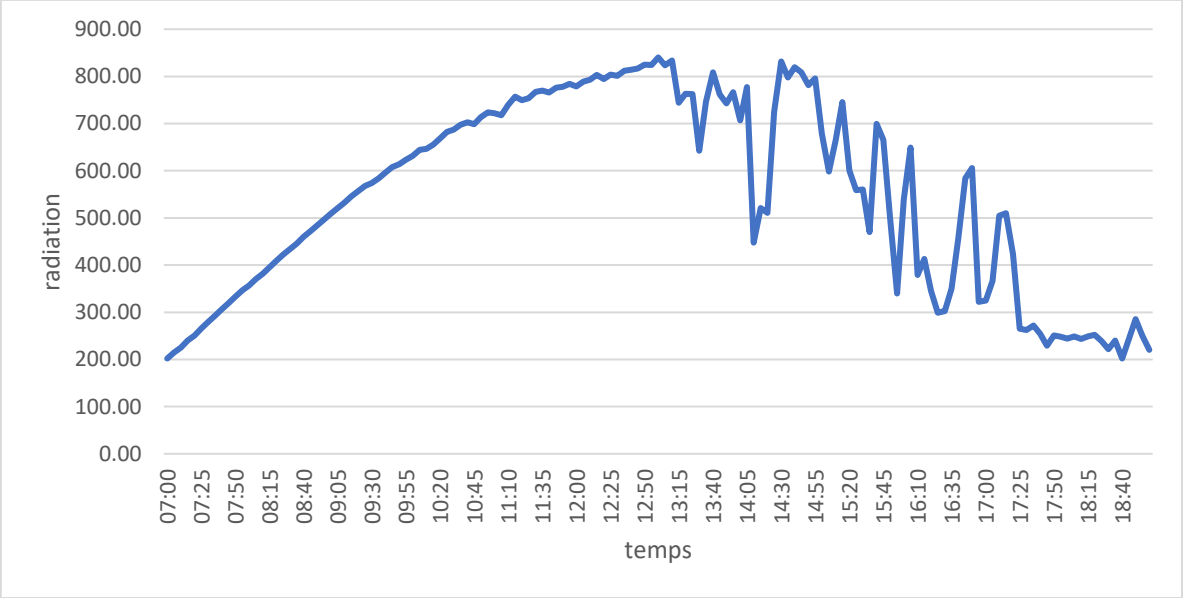


Figure 3.7 Courbe de radiation

Les figures 3.6 et 3.7 permettent d'observer la variation de la température ambiante et de l'intensité du rayonnement solaire sur une journée complète. En début de journée, les deux paramètres augmentent progressivement. Aux alentours de 13h00, l'intensité du rayonnement atteint sa valeur maximale, avec un pic proche de 840 W/m², indiquant un ensoleillement intense à ce moment précis. La température, quant à elle, continue de croître après ce pic de radiation, pour culminer vers 14h45 à environ 51 °C.

Après le pic, les deux courbes amorcent une décroissance graduelle. Le rayonnement diminue rapidement en fin d'après-midi, tandis que la température décroît plus lentement, confirmant à nouveau l'effet d'accumulation thermique. En fin de période (vers 7h00), les valeurs reviennent à des niveaux modérés, avec une température d'environ 28 °C et une radiation avoisinante 202 W/m².

Ces données traduisent bien l'évolution typique des conditions environnementales dans un contexte ensoleillé, et permettent de mieux comprendre l'influence du rayonnement solaire sur la température ambiante au cours d'une journée.

2.5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser en détail les courbes représentatives des grandeurs électriques essentielles du système photovoltaïque, à savoir la tension, le courant et la puissance, tant au niveau du panneau solaire que de la batterie. En complément, l'évolution de la température ambiante et de l'irradiation également été étudiée afin de mieux comprendre leur impact sur le comportement du système. L'ensemble des données analysées a été collecté via une carte SD intégrée au système, puis exploité et visualisé à l'aide du logiciel Excel, permettant ainsi une interprétation graphique claire et précise des phénomènes observés tout au long de la journé

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons pu concevoir et réaliser un système de surveillance intelligent dédié à un panneau photovoltaïque, en s'appuyant sur la plateforme Arduino et les technologies de l'Internet des Objets (IoT). Cette solution a permis la mesure en temps réel de plusieurs grandeurs électriques et environnementales telles que la tension, le courant, la puissance, la température et l'irradiation solaire, avec enregistrement et exploitation des données via des interfaces simples et accessibles.

Les résultats obtenus confirment la pertinence de l'approche adoptée : le système a démontré une capacité à suivre efficacement l'évolution des performances du panneau solaire dans des conditions réelles de fonctionnement, tout en offrant une architecture modulaire, économique et facile à mettre en œuvre. L'analyse des données collectées a également permis de mieux comprendre l'impact des conditions climatiques sur le rendement de l'installation, et de vérifier le bon fonctionnement du dispositif de régulation et de stockage.

Malgré les résultats satisfaisants, des perspectives d'amélioration demeurent. Il serait judicieux, dans le cadre de travaux futurs, d'intégrer des modules de communication sans fil (Wi-Fi, GSM), de développer des interfaces Web ou mobiles pour un accès distant aux données, ou encore d'implémenter des algorithmes d'analyse prédictive basés sur l'intelligence artificielle.

Ainsi, ce projet constitue une base solide pour le développement de systèmes de surveillance énergétique plus avancés, en phase avec les enjeux de la transition énergétique et l'essor des technologies intelligentes au service de la durabilité.

Références

[1] A. Goetzberger, C. Hebling, and H.-W. Schock, “Photovoltaic materials, history, Status and outlook”, Materials science and engineering : R: Reports, vol. 40, no. 1, pp.1-46,2003

[2] F. J. M. D. Franco, “Performance assessment of photovoltaic systems : Monitoring their abnormal operating conditions”.

[3] A. E. Garcıa Alonso, “Maximum power point algorithms for solar photovoltaic systems”, 2017.

[4] M. G. Hudedmani, V. Soppimath, and C. Jambotkar, “A study of materials for solar pv technology and challenges”, European Journal of Applied Engineering and Scientific Research, vol. 5,no.1,pp. 1-13, 2017.

[5] A.M.Bagher, M. M. A. Vahid, and M. Mohsen, “Types of solar cells and application”, American Journal of optics and Photonics, vol. 3, no. 5, pp. 94–113, 2015.

[6] J. Svarc, “Most efficient solar panels 2020”, Clean Energy Reviews: Dulwich Hill, Australia, 2020.

[7] HomeAdvisor, Price of solar panels, https : / / www. homeadvisor .com / cost / Heating-and -cooling/solar-panel-prices/.

[8] M.G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, “Comprehensive approach to Modeling and simulation of photovoltaic arrays”, IEEE Transactions on power electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.

[9] M. Taherbaneh, G. Farahani, and K. Rahmani, “Evaluation the accuracy of onediode and two-diode models for a solar panel based open-air climate measurements”, Solar Cells-Silicon Wafer-Based Technologies, vol. 4, pp. 201–228, 2011.

[10] J. Gow and C. Manning, “Development of a photovoltaic array model for use in Power-electronics simulation studies”, IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol.

,146no. 2, pp.193-200,1999.

[11] K. Nishioka, N. Sakitani, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, “Analysis of multicrystalline Silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration”, Solar energy materials and solar cells, Vol. 91, no. 13, pp. 1222–1227, 2007.

[12] N. Pandiarajan and R. Muthu, “Mathematical modeling of photovoltaic module

With simulink”, in 2011 1st International

Conference on Electrical Energy Systems, IEEE, 2011, pp. 258–263.

[13] S. Bhattacharjee and B. J. Saharia, “A comparative study on converter topologies For maximum power point tracking application in photovoltaic generation”, Journal Of Renewable and Sustainable Energy, vol. 6, no. 5, p. 053 140, 2014.

[14] O. M. Akeyo, “Analysis and simulation of photovoltaic systems incorporating battery energy storage”, 2017.

[15] T.M. Razykov, C. S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. S. Ullal, and H. M.Upadhyaya, “Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects”, Solar energy, vol. 85, no. 8, pp. 1580–1608, 2011.

[16] H. Haeberlin and J. Graf, “Gradual reduction of pv generator yield due to pollution”,Power [W], vol. 1200, p. 1400, 1998.

[17] A. Aristizabal, C. Arredondo, J. Hernandez, and G. Gordillo, “Development of Equipment for monitoring pv power plants, using virtual instrumentation”, in 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, IEEE, vol. 2, 2006, pp. 2367–2370.

[18] M. Anwari, A. Hidayat, M. I. Hamid, et al., “Wireless data acquisition for photovoltaic power system”, in INTELEC 2009-31st International Telecommunications Energy Conference, IEEE, 2009, pp. 1–4.

[19] A. Gxasheka, E. Van Dyk, and E. Meyer, “Evaluation of performance parameters Of pv modules deployed outdoors”, Renewable Energy, vol. 30, no. 4, pp. 611–620, 2005.

[20] V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, and K. D. Babu, “A low-cost real-time iot Enabled data acquisition system for monitoring of pv system”, Energy Sources, Part A : Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol. 43, no. 20, pp. 2529–2543, 2021.

[21] B. Soumia, M. K. Nallapaneni, and T. Ali, “Data acquisition system : On the solar photovoltaic module and weather parameters monitoring”, Procedia computer Science, vol. 132, pp. 873–879, 2018.

[22] N. M. Kumar, “Simulation tools for technical sizing and analysis of solar pv systems”, in Proceedings of the 6th World Conference on Applied Sciences, Engineering And Technology (WCSET-2017), 2017, pp. 218–222.

[23] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, S. Nehra, and M. Dhaka, “A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature”, Energy Reports, vol. 1, pp. 175–180, 2015.

[24] N. M. Kumar, M. R. Kumar, P. R. Rejoice, and M. Mathew, “Performance analysis Of 100 kwp grid connected si-poly photovoltaic system using pvsyst simulation tool”, Energy Procedia, vol. 117, pp. 180–189, 2017.

[25] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, S. Nehra, and M. Dhaka, “Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells”, Energy Reports, vol. 1, pp. 104–109, 2015.

[26] Arduino. (2021, June). Uno Rev3 – Arduino Documentation.
https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3

[27] RoboticX. (2025). B25 Voltage Sensor Module. https://roboticx.ps/product/b25-voltage-sensor-module/

[28] Allegro MicroSystems. (2020, August 5). Zero- to fifty-amp integrated conductor sensor Ics: ACS712. Allegro MicroSystems .
https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712

[29] Thermocouple-Info. (2014, 21 Novombre). Thermcouple information : thermocouples – what is a thermocouple – types of thermocouples – reference tables.
Https://www.thermocoupleinfo.com/

[30]. Shojaei, A.M. (2020,13 October). Interfacing MAX6675 K-type thermocouple module with Arduino. ElectroPeak. https://electropeak.com/learn/interfacing-max6675-k-type-thermocouple-module- witharduino/

[31] Arduino. (2022). LCD displays. Arduino. https://docs.arduino.cc/learn/electronics/lcd-displays

[32] Electropeak.(2019,16 january). SD Card Module with Arduino | How to Read/Write Data. https://create.arduino.cc/projecthub/electropeak/sd-card-module-with-arduino-how- toread-write-data-37f3

[33] Newone Power. (2024, 21 June). 10A/15A/20A/25A Solar Charger Controller. http://www.newone-power.com/archives/products/10a15a20a25a-solar-charger-controller

[34] WatElectronics. (2025,14 January) .B25 Voltage Sensor : PinOut, Features, Specifications, Circuit, Working, Datasheet & Its Applications. Https://www.watelectronics.com/b25-voltage-sensor/

[35] Arduino. (2024, November 3). MAX6675 thermocouple library. Arduino. https://docs.arduino.cc/libraries/max6675_thermocouple/

[36] Arduino Stack Exchange. (2011). "What do these pins mean? Where should I plug them in?". https://arduino.stackexchange.com/questions/68707/what-do-these-pins-mean-where- should-i-plug-them-in?utm_source=chatgpt.com

[37] KARAMA, A., & GOUGUI, A. (2015). Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde (Doctoral dissertation).