



MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Electrotechnique Industrielle

THEME

Station de Mesure IoT pour la Surveillance des Données d'un
Parc Photovoltaïque

Présenté par le binôme :

- HAIL Bachir

Devant le jury :

| | | |
|------------------------|-----|-----------|
| - DJEDDI Abdelghani | MCA | Président |
| - MOUSSA Mohamed Amine | MCB | Encadreur |
| - NEHAL Ouassila | MAA | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

Avant tout, je tiens à exprimer mes remerciements à mon Dieu ALLAH pour m'avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Je souhaite tout particulièrement exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Mohamed Amine MOUSSA, enseignant à l'université de Tébessa, pour avoir assuré de manière agréable le suivi de mon travail. Ses expériences, ses compétences scientifiques, ses conseils et ses qualités humaines ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de lire et de juger ce travail. Je tiens également à remercier tous les enseignants du département de Génie Électrique et tous ceux qui ont, à un moment ou à un autre, participé à ce projet.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

BACHIR

Dédicace

Je dédie cet humble travail, accompli grâce à Dieu, à mes chers parents, HAIL MOHAMMED et HAIL W. Vous êtes les sources de mes joies et les secrets de ma force. Papa, ta détermination et ta force, et maman, ton honnêteté et ta gentillesse, sont toujours pour moi des modèles. Votre patience et votre dévouement envers nous sont inestimables. Merci pour tous vos sacrifices. C'est grâce à vous que je dois ce succès.

À mes frères et sœurs, et tout particulièrement à mon cher frère Salah Eddin, ainsi qu'à Mohammed Oualá Eddin Omeiri, qui est comme un frère pour moi.

À tous mes amis, et à mes collègues du Département de Génie Electrique, notamment promotion 2024 en électrotechnique industrielle.

Enfin, je remercie mes proches et amis proches : Marwan, Ammar, Hicham, Ziad, Sofiane, Hazem, Yassine, Khaled, Houssam, Mamoun Abbas, et Bechichi

Farouk.

BACHIR

Table des Matières

| | |
|---|----|
| Remerciement | 3 |
| Dédicace | 4 |
| Table des Matières | 5 |
| Liste des Figures | 7 |
| Liste des Tableaux | 8 |
| Introduction Générale | 9 |
| Chapitre I : | 11 |
| Systèmes de Surveillance des Parcs Photovoltaïques | 11 |
| 1.1 Introduction | 12 |
| 1.2 Systèmes de Surveillance des Parcs Photovoltaïques | 12 |
| 1.2.1 Historique et Évolution des Systèmes de Surveillance | 13 |
| 1.2.2 Méthodologies de Surveillance | 13 |
| 1.2.2.1 Surveillance Manuelle | 13 |
| 1.2.2.2 Systèmes Automatisés de Surveillance | 14 |
| 1.2.2.3 Intégration des Technologies IoT | 16 |
| 1.2.3 Études de Cas | 16 |
| 1.3 Composant Clés des Systèmes IoT | 17 |
| 1.3.1 Capteurs IoT | 17 |
| 1.3.2 Passerelles IoT | 18 |
| 1.3.3 Serveurs de Stockage et d'Analyse de Données | 19 |
| 1.3.4 Interfaces Utilisateur (Applications Mobiles et Web) | 19 |
| 1.3.5 Réseaux de Communication | 19 |
| 1.4 Conclusion | 20 |
| Chapitre II : | 21 |
| Dimensionnement et Surveillance Intelligente par IoT des Unités d'Énergie | 21 |
| 2.1 Introduction | 22 |
| 2.2 Description du Projet Solaire | 22 |
| 2.2.1 Parc Photovoltaïque | 22 |
| 2.2.2 Unité Énergétique | 23 |
| 2.2.3 Armoire Centrale | 24 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4 Inverters | 24 |
| 2.2.5 Batteries | 26 |
| 2.3 Surveillance de l'Énergie Produite | 27 |
| 2.3.1 Intégration de l'Internet des Objets (IoT)..... | 27 |
| 2.3.2 Protocole de Communication MQTT..... | 28 |
| 2.3.3 Caractéristiques Clés du Protocole MQTT..... | 29 |
| 2.3.3.1 Architecture Publish/Subscribe..... | 29 |
| 2.3.3.2 Légèreté | 29 |
| 2.3.3.3 Qualité de Service (QoS) | 29 |
| 2.3.3.4 Persistente des Sessions, Messages Retenus et Will Message | 30 |
| 2.3.3 Interfaces de Communication | 30 |
| 2.4 Conclusion..... | 32 |
| Chapitre III :..... | 33 |
| Conception de la Carte de Surveillance Connectée à l'Internet | 33 |
| 3.1 Introduction | 34 |
| 3.2 Choix et Caractéristiques des Composants de Circuit Électronique | 34 |
| 3.2.1 Capteurs de Courant et de Tension..... | 34 |
| 3.2.2 Node MCU ESP8266..... | 36 |
| 3.2.3 Convertisseur Analogique-Numérique ADS1115 | 37 |
| 3.2.4 Alimentations à Découpage Utilisées..... | 38 |
| 3.3 Description du Circuit Électronique | 40 |
| 3.4 Fonctionnement de l'Architecture MQTT..... | 43 |
| 3.5 Configuration du Client MQTT | 43 |
| 3.5.1 Node-RED comme Client MQTT | 43 |
| 3.5.2 Configuration de Node-RED pour se Connecter au Broker MQTT | 44 |
| 3.5.3 Description du Tableau de Bord Obtenu..... | 45 |
| 3.6 Conclusion..... | 46 |
| Conclusion Générale..... | 47 |
| Références..... | 49 |
| Résumé..... | 51 |
| Abstract..... | 51 |
| ملخص..... | 51 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure I. 1 Architecture générale du système de surveillance photovoltaïque. | 12 |
| Figure I. 2 Système SCADA pour l'énergie solaire. | 14 |
| Figure I. 3 Schéma fonctionnel du système de surveillance à distance. | 15 |
| Figure I. 4 Capteurs connectés à l'internet via un émetteur Wi-Fi. | 18 |
| | |
| Figure II. 1 Configuration du système d'alimentation de la charge depuis le parc PV par priorité. | 22 |
| Figure II. 2 Design d'une armoire électrique en 3D. | 24 |
| Figure II. 3 Connexion des sources et des charges à travers l'inverter. | 25 |
| Figure II. 4 Batterie utilisée. | 26 |
| Figure II. 5 Connexion des batteries pour l'inverter de 3kW et 5,2kW. | 26 |
| Figure II. 6 MQTT protocole. | 29 |
| Figure II. 7 Model de design d'un tableau de bord personnalisé de la plateforme Node-RED. | 30 |
| Figure II. 8 Interface de l'application IoT MQTT Panel. | 31 |
| | |
| Figure III. 1 Capteur du courant LA 25-P. | 35 |
| Figure III. 2 Capteur de tension LV 25-P. | 36 |
| Figure III. 3 Fonctionnalité des Broches de la Carte Node MCU ESP8266. | 37 |
| Figure III. 4 Broches du module ADS1115. | 38 |
| Figure III. 5 Convertisseur DC-DC, entrée large 9 – 36 V, sortie 10 W, ± 15 V et 333 mA. | 39 |
| Figure III. 6 Convertisseur DC-DC, entrée large 9-36V, sortie 5W, 5V et 1A. | 39 |
| Figure III. 7 Circuit de conditionnement du capteur de tension. | 40 |
| Figure III. 8 Circuit électronique pour mesure des grandeurs électriques. | 41 |
| Figure III. 9 Circuit de conditionnement du capteur de courant. | 42 |
| Figure III. 10 Circuit de câblage de 4 ADC via le protocole I2C. | 42 |
| Figure III. 11 Flux Node-RED pour communiquer les mesures des capteurs implémentés. | 44 |
| Figure III. 12 Tableau de bord du flux créé de l'interface Node-RED. | 45 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| <i>Tableau 1 Caractéristiques du capteur de courant utilisé.</i> | 34 |
| <i>Tableau 2 Caractéristiques du capteur de tension utilisé.</i> | 35 |

Introduction Générale

Dans un contexte de transition énergétique et de recherche d'efficacité dans la gestion des ressources renouvelables, le suivi précis et en temps réel des installations photovoltaïques devient crucial. Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche et propose la conception d'une station de mesure IoT dédiée à la surveillance des données d'un parc photovoltaïque. L'objectif est de développer un système capable de mesurer les grandeurs électriques, la température et l'humidité, puis de transmettre ces données à un lieu sûr pour traitement ultérieur. Ce système permettra de contrôler de manière optimale une installation photovoltaïque composée de 48 panneaux solaires, d'une puissance maximale totale de 12 kW, situés au Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine (LEC).

Le parc photovoltaïque étudié dans ce mémoire est organisé de manière à optimiser la surveillance et le diagnostic des performances des panneaux solaires. Les 48 panneaux sont regroupés par quatre, formant des unités de production d'énergie. Chaque unité de quatre panneaux connectés en série alimente une armoire principale, équipée d'unités de mesure permettant de surveiller indépendamment l'énergie produite par chaque groupe de panneaux.

Cette configuration modulaire offre plusieurs avantages, chaque unité de mesure permet de diagnostiquer et de contrôler un groupe de panneaux de manière autonome, facilitant ainsi l'identification rapide des anomalies et des défauts. La surveillance indépendante de chaque groupe assure une sélectivité optimale des unités aptes à entrer en production, tout en localisant précisément les défauts et en suspendant les unités défectueuses.

Le projet proposé dans ce mémoire vise à concevoir une carte électronique de mesure, connectée à Internet, capable de sauvegarder les données dans une base de données sécurisée. Cette solution IoT permettra de récupérer et d'analyser les données en temps réel, quel que soit le lieu où se trouvent les opérateurs. En centralisant les informations relatives aux performances des panneaux photovoltaïques, cette station de mesure facilitera la gestion et l'optimisation de l'énergie produite.

Le premier chapitre explore les systèmes de surveillance des parcs photovoltaïques, en retraçant leur évolution historique depuis les premières approches manuelles jusqu'aux systèmes automatisés modernes. L'intégration des technologies de l'Internet des objets (IoT) est particulièrement mise en avant, montrant comment elle a révolutionné la surveillance en temps réel et la gestion proactive des installations solaires. Des études de cas illustrent l'impact de ces technologies sur l'efficacité et la durabilité des parcs photovoltaïques. Les composants clés des systèmes IoT, tels que les capteurs, les passerelles et les serveurs de stockage, sont également analysés en détail.

Le deuxième chapitre se concentre sur le dimensionnement et la surveillance intelligente des unités d'énergie solaire en utilisant des technologies IoT. La description détaillée du projet solaire, y compris les panneaux photovoltaïques, les inverters, les batteries et les armoires centrales, fournit une vue d'ensemble complète de l'installation. L'intégration de l'Internet des objets (IoT) dans la surveillance de l'énergie produite est examinée en profondeur, avec une attention particulière portée au protocole de communication MQTT et à ses caractéristiques clés. Les interfaces de communication nécessaires pour une surveillance efficace et une gestion optimisée des systèmes énergétiques sont également discutées.

Le troisième chapitre décrit la conception de la carte électronique de surveillance, en mettant en avant le choix et les caractéristiques des composants du circuit électronique, tels que les capteurs de courant et de tension, le Node MCU ESP8266 et le convertisseur analogique-numérique ADS1115. Le fonctionnement de l'architecture MQTT est expliqué, ainsi que la configuration des clients MQTT. Node-RED est présenté comme un client MQTT, et sa configuration pour se connecter au broker MQTT est détaillée. Le chapitre se termine par une description du tableau de bord obtenu, illustrant comment les données collectées sont affichées et analysées pour une gestion optimale de l'énergie produite.

Chapitre I :

Systèmes de Surveillance des Parcs

Photovoltaïques

1.1 Introduction

La surveillance des parcs photovoltaïques est devenue une composante cruciale pour maximiser l'efficacité et la longévité des installations solaires. Avec l'augmentation de la capacité mondiale des énergies renouvelables, il est impératif d'optimiser les performances des parcs photovoltaïques à travers des systèmes de surveillance avancés. Ce chapitre explore en détail les diverses approches et technologies utilisées pour surveiller et gérer les parcs photovoltaïques.

1.2 Systèmes de Surveillance des Parcs Photovoltaïques

Les systèmes de surveillance des parcs photovoltaïques ont évolué de manière significative au cours des dernières décennies, devenant essentiels pour maximiser la production d'énergie et assurer la longévité des installations. Cette section présente une revue de la littérature sur les approches et les technologies utilisées pour surveiller et gérer les parcs photovoltaïques [1].

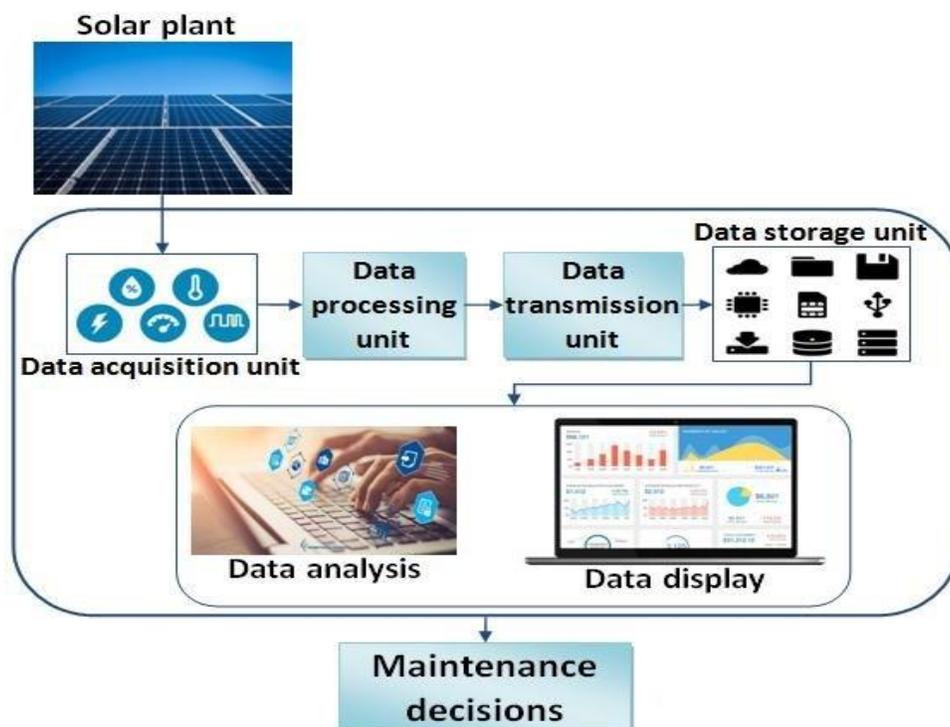


Figure I. 1 Architecture générale du système de surveillance photovoltaïque.

1.2.1 Historique et Évolution des Systèmes de Surveillance

Initialement, la surveillance des parcs photovoltaïques se faisait manuellement, avec des inspections régulières et des mesures ponctuelles des performances. Cette méthode, bien que fonctionnelle, était chronophage et peu efficace pour détecter rapidement les anomalies. Pour répondre à la nécessité d'une surveillance plus fréquente et détaillée, des systèmes automatisés ont été introduits. Ces systèmes offraient une meilleure capacité de détection des problèmes et une analyse plus approfondie des données de performance. L'intégration des technologies de l'Internet des objets (IoT) a marqué une nouvelle étape dans l'évolution de la surveillance des parcs photovoltaïques. Elle a permis une surveillance en temps réel, une collecte de données à distance et une gestion proactive, transformant ainsi la manière dont les parcs photovoltaïques sont gérés et optimisés pour une efficacité maximale [2].

1.2.2 Méthodologies de Surveillance

1.2.2.1 Surveillance Manuelle

Inspections Visuelles : Les inspections visuelles régulières constituaient la méthode principale de surveillance des installations photovoltaïques à leurs débuts. Lors de ces inspections, les techniciens examinaient physiquement les panneaux solaires, les onduleurs et les câbles pour repérer des problèmes visibles tels que des dommages physiques, de la saleté, des ombrages ou tout autre facteur pouvant nuire à la performance du système. Ces inspections permettaient également de vérifier l'intégrité structurelle des installations et d'identifier des signes de détérioration ou de défaillance potentielle. Les principaux avantages de cette méthode résidaient dans sa simplicité et son coût initial faible, ne nécessitant pas d'équipements complexes. Toutefois, cette approche était extrêmement consommatrice de temps et de main-d'œuvre, et elle ne permettait pas de détecter rapidement les problèmes cachés, tels que les microfissures dans les panneaux ou les défaillances internes des composants électriques, qui pourraient ne pas être visibles à l'œil nu.

Mesures Ponctuelles : En complément des inspections visuelles, les techniciens effectuaient également des mesures ponctuelles des performances électriques des panneaux solaires. À l'aide d'instruments portables tels que des voltmètres et des ampèremètres, ils mesuraient les tensions

et les courants pour vérifier que le système fonctionnait conformément aux spécifications. Ces mesures ponctuelles permettaient de diagnostiquer les problèmes électriques et d'évaluer l'efficacité des panneaux solaires en fonctionnement. La fiabilité des mesures obtenues grâce à ces instruments constituait un avantage notable, fournissant des données précises sur les performances du système à un moment donné. Cependant, cette méthode présentait des limitations significatives, notamment le fait qu'elle n'offrait pas une surveillance continue. La fréquence des inspections et des mesures était limitée par la disponibilité des techniciens et les ressources allouées, ce qui pouvait entraîner des retards dans la détection des problèmes et affecter la réactivité en cas de panne ou de baisse de performance du système [3].

1.2.2.2 Systèmes Automatisés de Surveillance

Systèmes de Monitoring SCADA : Les systèmes de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) ont révolutionné la surveillance des parcs photovoltaïques en permettant une surveillance automatisée et continue. Ces systèmes collectent des données en temps réel sur les performances électriques, les conditions météorologiques et l'état des équipements, offrant une vue d'ensemble détaillée et constante de l'opération du parc solaire. Les informations recueillies

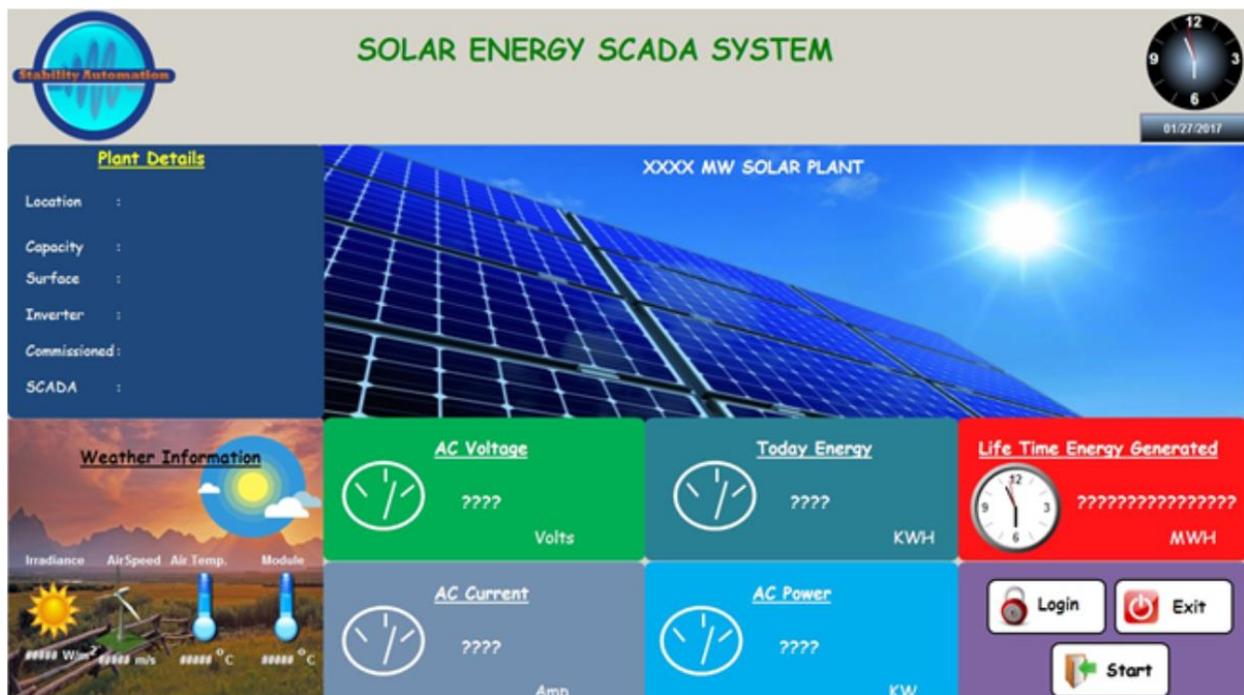


Figure I. 2 Système SCADA pour l'énergie solaire.

sont analysées pour détecter rapidement les anomalies et optimiser la performance globale du système. L'utilisation des systèmes SCADA permet ainsi d'améliorer la fiabilité et l'efficacité des opérations. Les principaux avantages incluent une surveillance continue, la capacité de détection rapide des anomalies et la collecte de grandes quantités de données pour une analyse approfondie. Cependant, ces systèmes comportent également des inconvénients, tels qu'un coût d'installation et de maintenance élevé et une complexité accrue lors de l'intégration avec les infrastructures existantes.

Surveillance à Distance : Les systèmes de surveillance à distance ont introduit une nouvelle dimension de gestion des parcs photovoltaïques. En utilisant des capteurs installés sur les panneaux solaires et les onduleurs, ces systèmes transmettent des données à un centre de contrôle via des réseaux de communication. Cela permet de surveiller et de gérer les parcs photovoltaïques depuis un lieu distant, réduisant ainsi la nécessité de personnel sur site. Un avantage majeur de cette approche est la capacité à superviser plusieurs sites depuis un seul emplacement centralisé, optimisant ainsi les ressources humaines et logistiques. Toutefois, cette méthode dépend fortement des réseaux de communication pour transmettre les données, ce qui peut poser des problèmes de fiabilité en cas de défaillance du réseau. De plus, la surveillance à distance expose les systèmes à des vulnérabilités potentielles aux cyberattaques, nécessitant des mesures de sécurité renforcées pour protéger les données et les infrastructures critiques [4].

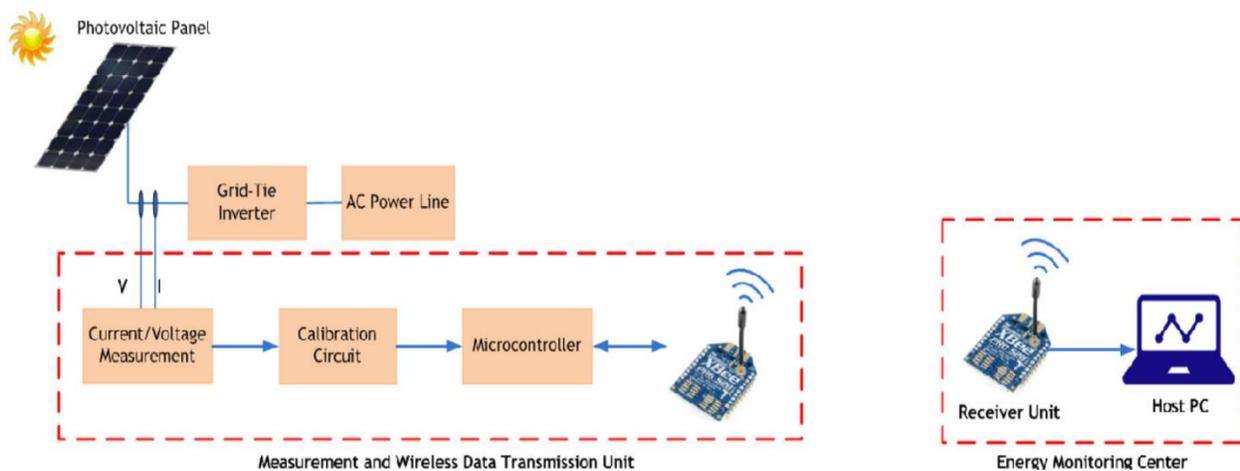


Figure I. 3 Schéma fonctionnel du système de surveillance à distance.

1.2.2.3 Intégration des Technologies IoT

Analyse des Données et Maintenance Prédicative : Les systèmes IoT collectent et analysent les données en temps réel pour anticiper les défaillances des équipements et planifier la maintenance préventive avant que des problèmes graves ne surviennent. Cette analyse prédictive permet de réduire les temps d'arrêt et d'optimiser les performances du parc photovoltaïque en ajustant les paramètres de fonctionnement en fonction des conditions environnementales. En outre, l'analyse des données peut aider à prolonger la durée de vie des équipements en identifiant les signes de dégradation avant qu'ils ne deviennent critiques. Les principaux avantages incluent la réduction des interruptions de service, l'optimisation des performances et la prolongation de la durée de vie des équipements. Toutefois, cela nécessite des algorithmes d'analyse sophistiqués et un investissement initial considérable en technologies d'analyse de données.

Surveillance Mobile et Applications : Les applications mobiles et les interfaces web permettent aux opérateurs de surveiller les parcs photovoltaïques depuis leurs appareils mobiles, offrant une flexibilité et une accessibilité accrues. Ces applications fournissent des alertes instantanées et des rapports de performance détaillés, facilitant une gestion réactive et efficace des installations photovoltaïques. Grâce à ces outils, les opérateurs peuvent recevoir des notifications en temps réel sur les anomalies ou les performances du système, leur permettant de prendre des mesures correctives immédiates, même à distance. Les avantages incluent l'accessibilité à distance, la facilité d'utilisation et les alertes en temps réel. Cependant, cette dépendance à l'infrastructure mobile et internet peut poser des défis en termes de disponibilité et de sécurité des données, nécessitant des mesures robustes pour garantir une surveillance continue et sécurisée [5].

1.2.3 Études de Cas

Parc Photovoltaïque de DEWA (Dubai Electricity and Water Authority) : Le parc solaire Mohammed bin Rashid Al Maktoum, géré par DEWA, est l'une des plus grandes installations solaires au monde. Pour assurer une surveillance efficace, ce parc utilise des systèmes SCADA avancés et des capteurs IoT pour collecter des données en temps réel sur la performance des panneaux solaires et des onduleurs. Grâce à ces technologies, DEWA a pu réduire significativement les temps d'arrêt en détectant rapidement les anomalies et en optimisant les

performances grâce à l'analyse continue des données. La maintenance prédictive, rendue possible par l'analyse de grandes quantités de données, a permis de prolonger la durée de vie des équipements et d'améliorer la fiabilité globale du parc.

Parc Solaire de Tucson Electric Power (Arizona, USA) : Tucson Electric Power gère plusieurs installations photovoltaïques situées dans des zones désertiques, où les conditions environnementales peuvent être particulièrement difficiles. Pour relever ces défis, l'entreprise a équipé ses installations de capteurs IoT qui surveillent en permanence les conditions environnementales et les performances des panneaux solaires. Les données recueillies sont transmises à un centre de contrôle via des réseaux de communication, permettant une gestion proactive et une réponse rapide aux problèmes. Les applications mobiles utilisées par les opérateurs ont facilité la surveillance à distance, réduisant ainsi les besoins en personnel sur site et augmentant l'efficacité opérationnelle. Cette approche a conduit à une diminution des pertes de production et à une amélioration de la gestion des sites [6].

1.3 Composant Clés des Systèmes IoT

Les technologies IoT sont indispensables à la modernisation des systèmes de surveillance des parcs photovoltaïques. Elles permettent une collecte de données en temps réel, une transmission efficace et une analyse approfondie [7].

1.3.1 Capteurs IoT

Les capteurs de l'Internet des objets (IoT) sont déployés sur les panneaux solaires et les équipements associés pour surveiller divers paramètres tels que la température, l'humidité, la lumière solaire, les courants et les tensions. Ces capteurs, souvent connectés sans fil à des passerelles IoT, permettent une surveillance en temps réel de l'ensemble du parc photovoltaïque. L'intégration des capteurs IoT présente plusieurs avantages notables, dont la capacité à fournir des données en temps réel, un coût relativement faible et une facilité d'installation. Cependant, cette technologie dépend fortement de la connectivité sans fil, ce qui peut poser des défis dans les zones avec une couverture réseau limitée. De plus, la gestion et le traitement des grandes quantités de données générées par ces capteurs nécessitent une infrastructure adéquate pour assurer leur efficacité. Leur capacité à fournir des données en temps réel permet aux opérateurs

de surveiller en continu les conditions de fonctionnement et d'identifier rapidement les anomalies. Toutefois, la dépendance à la connectivité sans fil peut poser des défis, notamment en termes de gestion des interférences et de maintien d'une connexion stable dans des environnements éloignés ou difficiles d'accès [8].

1.3.2 Passerelles IoT

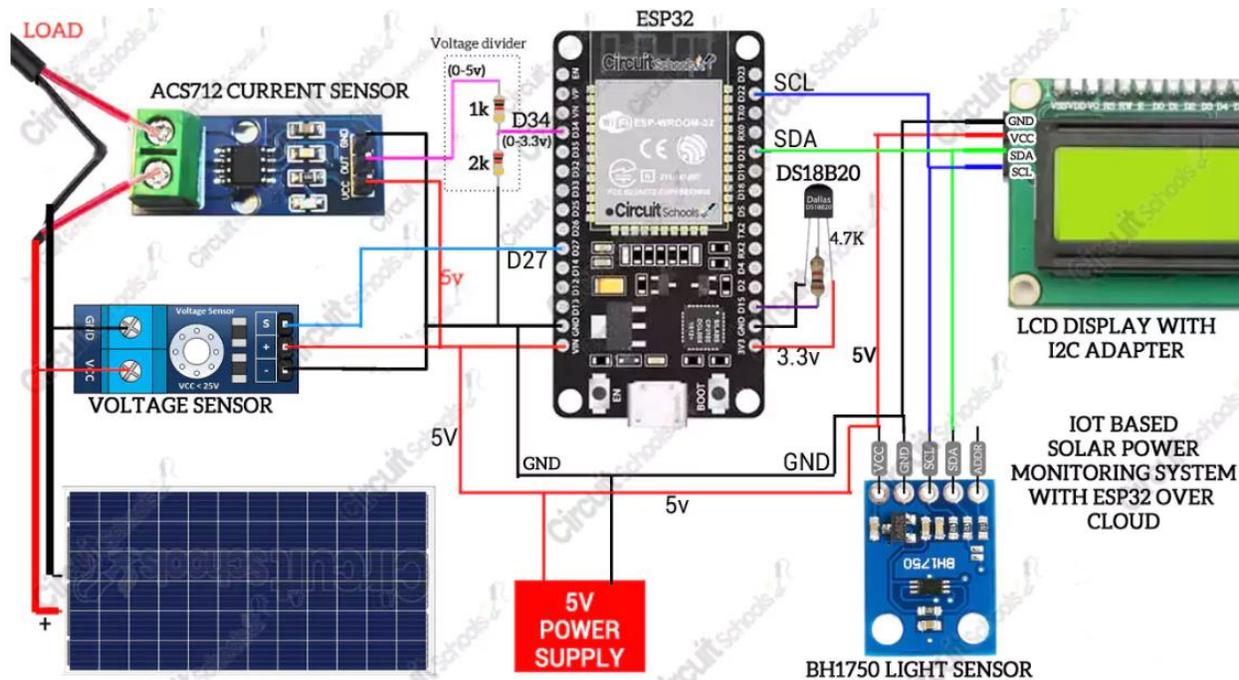


Figure 1. 4 Capteurs connectés à l'internet via un émetteur Wi-Fi.

Les passerelles IoT jouent un rôle intermédiaire entre les capteurs et le réseau de communication. Elles collectent les données des capteurs, les prétraitent pour réduire la charge de transmission et les envoient aux serveurs de stockage et d'analyse. Les passerelles doivent être robustes et sécurisées, capables de fonctionner dans des conditions environnementales variées. Elles doivent également gérer la communication avec plusieurs capteurs simultanément, ce qui nécessite une capacité de traitement et de stockage adéquate. La configuration et la maintenance des passerelles IoT peuvent être complexes, nécessitant des compétences techniques avancées pour assurer une performance optimale et une sécurité renforcée contre les cyberattaques [9].

1.3.3 Serveurs de Stockage et d'Analyse de Données

Les serveurs de stockage et d'analyse de données sont au cœur de tout système IoT efficace. Ils reçoivent les données des passerelles IoT et les stockent dans des bases de données robustes et sécurisées. Ces serveurs utilisent des algorithmes sophistiqués pour analyser les données, détecter les tendances et anomalies, et fournir des informations exploitables pour la gestion des parcs photovoltaïques. Grâce à l'analyse des données en temps réel, il est possible de prévoir les défaillances potentielles des équipements et d'optimiser les performances des panneaux solaires. La mise en place de ces serveurs nécessite des investissements en infrastructure et en logiciels analytiques, ainsi que des compétences en gestion des données pour assurer leur fonctionnement efficace [10].

1.3.4 Interfaces Utilisateur (Applications Mobiles et Web)

Les interfaces utilisateur, notamment les applications mobiles et web, permettent aux opérateurs de surveiller et de gérer les parcs photovoltaïques à distance. Ces applications fournissent des tableaux de bord intuitifs, des rapports détaillés et des alertes en temps réel sur l'état des équipements et les performances globales du système. Elles facilitent une prise de décision rapide et une gestion proactive des installations. Les applications doivent être conçues pour être conviviales, sécurisées et accessibles sur divers dispositifs, garantissant ainsi une flexibilité et une efficacité maximales pour les utilisateurs. La dépendance à l'infrastructure mobile et internet peut cependant poser des défis, notamment en termes de disponibilité et de sécurité des données [11].

1.3.5 Réseaux de Communication

Les réseaux de communication sont la colonne vertébrale des systèmes IoT, assurant la transmission des données entre les capteurs, les passerelles, et les serveurs. Ces réseaux peuvent inclure des technologies variées telles que le Wi-Fi, les réseaux cellulaires, et les protocoles LPWAN (Low Power Wide Area Network) comme LoRaWAN et NB-IoT. Le choix du réseau dépend des exigences spécifiques du système, y compris la portée, la bande passante, la consommation d'énergie, et les coûts. Les réseaux de communication doivent être fiables et sécurisés pour garantir une transmission de données efficace et protéger les informations sensibles contre les

cybermenaces. L'infrastructure de communication doit être soigneusement planifiée et maintenue pour assurer une connectivité continue et performante [12].

1.4 Conclusion

La surveillance des parcs photovoltaïques a connu une évolution marquée, passant des méthodes manuelles laborieuses aux systèmes automatisés sophistiqués, et enfin à l'intégration des technologies IoT. Cette progression a permis d'améliorer considérablement la précision et la fréquence de la collecte de données, la détection des anomalies et la gestion proactive des parcs. Les technologies IoT, avec leurs capteurs avancés, leurs capacités d'analyse prédictive et leurs interfaces mobiles, offrent des avantages significatifs en termes d'amélioration de la production, de réduction des coûts de maintenance et d'augmentation de la durée de vie des panneaux solaires. Ainsi, l'avenir de la surveillance des parcs photovoltaïques repose sur l'innovation continue et l'adoption généralisée de ces technologies avancées, assurant une gestion plus efficace et durable des systèmes énergétiques.

Chapitre II :

Dimensionnement et Surveillance Intelligente par IoT des Unités d'Énergie

2.1 Introduction

Pour assurer une surveillance précise et efficace des systèmes photovoltaïques, il est très important de bien dimensionner les différentes composantes du système solaire. Un dimensionnement adéquat permet de maximiser la production d'énergie tout en garantissant la fiabilité et la durabilité des équipements. Ce chapitre se concentre donc sur le dimensionnement du système solaire, une étape essentielle pour concevoir une carte de mesure capable de suivre et d'analyser les performances des panneaux photovoltaïques de manière optimale.

2.2 Description du Projet Solaire

Ce projet solaire vise à fournir une solution complète pour la génération et la gestion de l'énergie renouvelable. Il comprend plusieurs composants clés qui travaillent ensemble pour assurer une production d'énergie efficace et fiable. Les principaux éléments de ce système comprennent des panneaux solaires, des inverters, des batteries et des armoires centrales. Chacun de ces composants joue un rôle crucial dans le fonctionnement global du projet, garantissant ainsi une alimentation énergétique durable et stable.

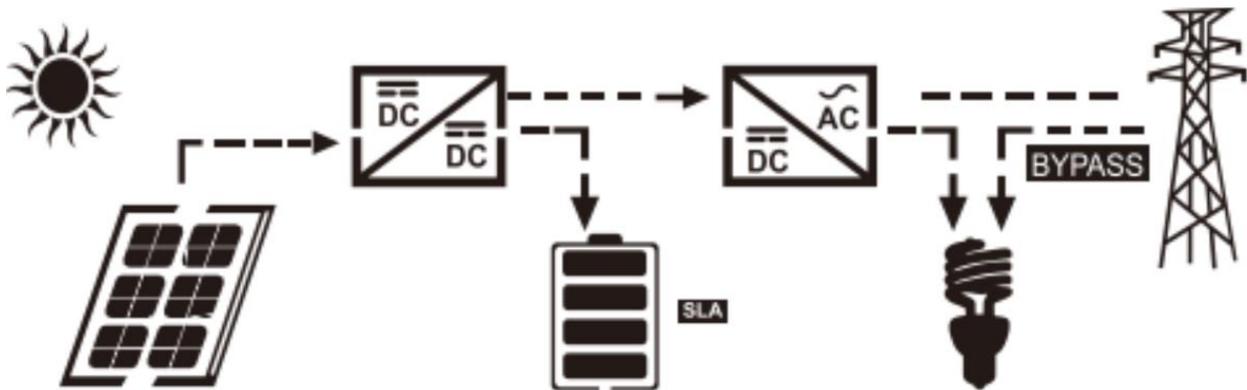


Figure II. 1 Configuration du système d'alimentation de la charge depuis le parc PV par priorité.

2.2.1 Parc Photovoltaïque

Le projet que nous souhaitons surveiller est un parc photovoltaïque installé au Laboratoire d'Électrotechnique de Constantine (LEC) dans le cadre des Projets Nationaux de Recherche (PNR). Ce parc comprend 48 panneaux solaires d'une puissance totale de 12 kW. Les panneaux sont

organisés en unités énergétiques composées de quatre panneaux connectés en série. Ces unités sont ensuite regroupées dans une armoire centrale, permettant de mesurer indépendamment chaque unité pour une surveillance plus détaillée et un contrôle accru.

Le parc photovoltaïque du LEC est conçu pour optimiser la production d'énergie et faciliter la maintenance. La configuration en unités de quatre panneaux en série permet de segmenter la production d'énergie en sous-ensembles plus facilement gérables. Chaque unité peut être surveillée individuellement, ce qui permet de détecter rapidement les anomalies et d'effectuer des diagnostics précis. Cette approche modulaire améliore la sélectivité et l'efficacité du système, assurant que seules les unités fonctionnelles et performantes participent à la production d'énergie.

2.2.2 Unité Énergétique

Chaque unité énergétique du parc photovoltaïque est composée de quatre panneaux solaires connectés en série. Cette configuration permet d'augmenter la tension de sortie tout en maintenant le courant constant, ce qui est avantageux pour le dimensionnement des onduleurs et la réduction des pertes de transmission.

Un seul panneau présente les caractéristiques suivantes : une puissance nominale de 265 W, une tension en circuit ouvert (V_{oc}) de 38,26 V, un courant de court-circuit (I_{sc}) de 9,00 A, une tension à la puissance maximale (V_{mp}) de 31,11 V, et un courant à la puissance maximale (I_{mp}) de 8,52 A. Le panneau mesure 1640 × 992 × 50 mm, pèse 19,5 kg, et est fabriqué à partir de cellules monocristallines avec un revêtement anti-reflet.

Lorsqu'ils sont connectés en série, les quatre panneaux forment une unité énergétique avec une tension en circuit ouvert (V_{oc} unité) de 153,04 V et une tension à la puissance maximale (V_{mp} unité) de 124,44 V. Le courant de court-circuit (I_{sc} unité) et le courant à la puissance maximale (I_{mp} unité) de l'unité restent respectivement à 9,00 A et 8,52 A. La puissance maximale de l'unité est de 1060 W.

2.2.3 Armoire Centrale

L'armoire centrale joue un rôle crucial dans ce dispositif. Plus qu'elle protège toute l'installation contre les différents défauts électriques, elle centralise les mesures des différentes unités, permettant une analyse détaillée et comparative de chaque groupe de panneaux. Cette centralisation facilite également l'intégration des données dans un système IoT, qui peut transmettre les informations en temps réel à une base de données sécurisée pour un traitement ultérieur. Grâce à cette configuration, il est possible de contrôler et de gérer le parc photovoltaïque de manière optimale, en maximisant la production d'énergie et en minimisant les temps d'arrêt et les pertes dues à des défauts ou des inefficacités [13].

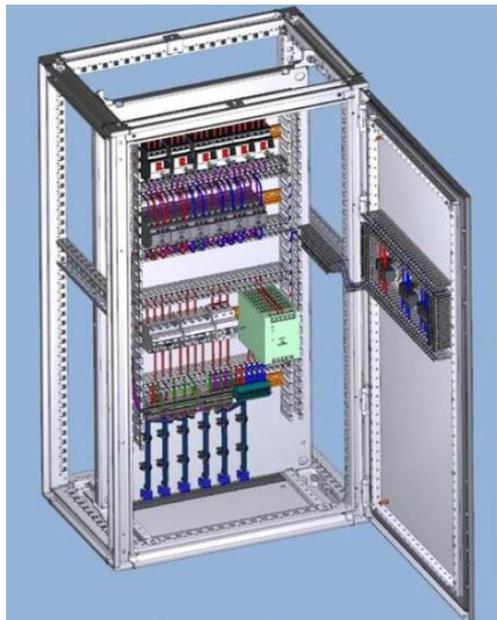


Figure II. 2 Design d'une armoire électrique en 3D.

2.2.4 Invertis

Les unités énergétiques du parc photovoltaïque sont connectées à quatre inverters d'une puissance totale de 16 kW. Ces inverters sont nécessaires dans la conversion du courant continu (*DC*) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (*AC*) utilisable par le réseau électrique, les appareils industriels ou domestiques. La configuration des quatre inverters (deux inverters de 3 kW et deux autres de 5 kW) est la suivante :

- Pour les inverters de 3 kW, chaque inverter est connecté à deux unités énergétiques en série, ce qui correspond à un total de huit panneaux solaires connectés en série. Cette configuration permet de maximiser la tension d'entrée tout en maintenant un courant adéquat pour l'inverter, optimisant ainsi l'efficacité de la conversion d'énergie.
- Pour les inverters de 5 kW, chaque inverter est connecté à quatre unités énergétiques, organisées en deux groupes parallèles de deux unités chacun. En d'autres termes, huit panneaux solaires connectés en parallèle avec un autre groupe de huit panneaux. Cette configuration permet de combiner les courants des groupes parallèles tout en maintenant la même tension, ce qui est idéal pour gérer des charges plus importantes et optimiser l'utilisation de la capacité de l'inverter.

Cette disposition des inverters garantit une flexibilité et une efficacité maximales dans la conversion de l'énergie solaire, permettant une intégration optimale du système photovoltaïque au réseau électrique. Elle assure également une surveillance et un contrôle précis de chaque section du parc, facilitant la maintenance et la gestion du système [16].

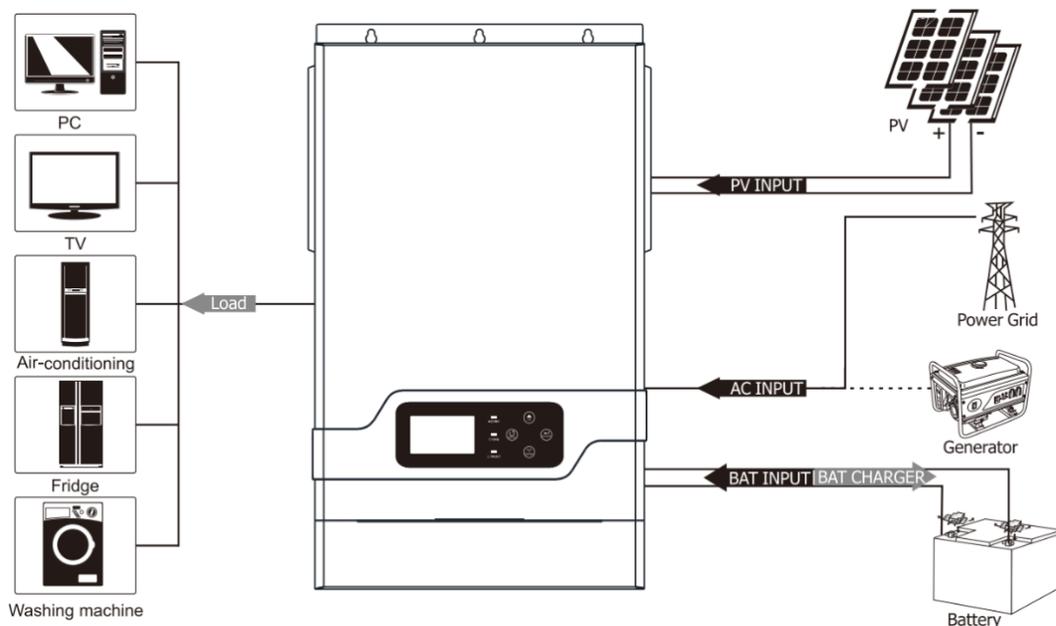


Figure II. 3 Connexion des sources et des charges à travers l'inverter.

2.2.5 Batteries

La batterie Gel 12 V 150 Ah est spécialement conçue pour les applications solaires, offrant une performance fiable et durable. Cette batterie possède une tension nominale de 12 V et une capacité de 150 Ah. Son design étanche et sans entretien réduit les besoins de maintenance. Avec des dimensions de 483 mm × 170 mm × 240 mm et un poids d'environ 45 kg.



Figure II. 4 Batterie utilisée.

A propos de la connexion des batteries dans notre système photovoltaïque, les inverters de 3 kW nécessitent une tension d'alimentation de 24 V, tandis que ceux de 5 kW nécessitent une tension de 48 V. Pour répondre à ces besoins, 12 batteries sont utilisées dans cette installation, organisées de manière à optimiser la performance et la fiabilité du système.

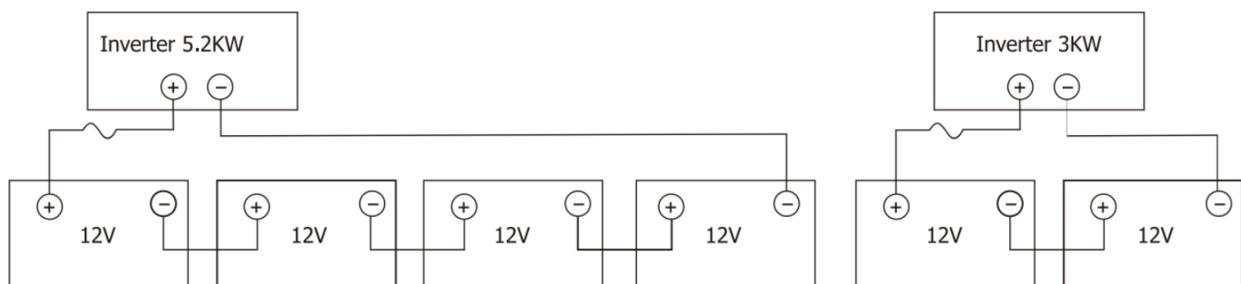


Figure II. 5 Connexion des batteries pour l'inverter de 3kW et 5,2kW.

Les batteries sont disposées dans deux chariots de deux étages, chaque étage portant trois batteries. Le chariot est configuré pour avoir trois unités de 24 V en parallèle (l'unité

contenant deux batteries connectées en série). La sortie combinée de chaque chariot, avec les trois unités en parallèle, maintient une tension de 24 V avec une capacité de courant augmentée.

La sortie de 24 V de chaque chariot, alimente un inverter de 3 kW. Pour les inverters de 5 kW, qui nécessitent une tension de 48 V, les sorties de deux chariots sont connectées en série. Cette connexion en série double la tension d'alimentation de 24 V à 48 V, répondant ainsi aux exigences des inverters de 5 kW.

Cette configuration permet une gestion flexible et efficace des sources d'alimentation pour les inverters. En utilisant des chariots mobiles et bien organisés, la maintenance et la gestion des batteries deviennent plus simples, assurant ainsi une alimentation continue et stable pour le système photovoltaïque. La modularité du système permet également d'adapter facilement l'installation à différentes exigences énergétiques, optimisant ainsi l'utilisation des ressources disponibles.

2.3 Surveillance de l'Énergie Produite

La surveillance de l'énergie produite par le parc photovoltaïque est une composante essentielle pour garantir une performance optimale et une maintenance efficace. L'intégration de capteurs et de la technologie IoT permet de surveiller en temps réel les paramètres critiques de chaque unité énergétique. L'unité énergétique (4 panneaux en série) est équipée de capteurs de courant et de tension qui mesurent les valeurs instantanées de production d'énergie. Ces données sont importantes pour identifier rapidement toute anomalie ou sous-performance dans le système [14].

2.3.1 Intégration de l'Internet des Objets (IoT)

Pour la surveillance et le contrôle des unités énergétiques, le projet utilise le module Node MCU ESP8266, un microcontrôleur avec connectivité Wi-Fi intégrée. Ce module est particulièrement adapté aux applications IoT grâce à sa capacité à se connecter facilement aux réseaux sans fil et à transmettre des données à distance. Il sert de centre névralgique pour la collecte et la transmission des données provenant des panneaux solaires.

Chaque unité énergétique est équipée de capteurs de courant et de tension qui mesurent les paramètres électriques essentiels, tels que la tension, le courant, et la puissance générée par les panneaux solaires. Ces capteurs génèrent des signaux analogiques proportionnels aux grandeurs mesurées. Pour traiter ces signaux, ils sont envoyés aux convertisseurs analogique-numérique ADS1115. Le choix des ADS1115 est crucial car ils offrent une haute précision et une résolution de 16 bits, permettant une conversion précise des données analogiques en signaux numériques lisibles par le Node MCU ESP8266.

L'alimentation de ce système de mesure repose sur des alimentations à découpage, connues pour leur efficacité et leur capacité à fournir une tension stable malgré les variations de charge. Ces alimentations sont essentielles pour garantir le bon fonctionnement des capteurs, des convertisseurs ADS1115, et du module ESP8266, en évitant les interruptions de service et les erreurs de mesure dues à des fluctuations de l'alimentation.

Une fois les données analogiques converties en numérique, le Node MCU ESP8266 les traite et les prépare pour la transmission. Grâce à sa connectivité Wi-Fi, il peut envoyer les données collectées à un serveur distant ou à une plateforme de surveillance en temps réel. Cette infrastructure permet une surveillance continue et détaillée des performances du parc photovoltaïque, facilitant l'identification rapide des anomalies et permettant des interventions de maintenance proactive.

En intégrant ces technologies, le système photovoltaïque bénéficie d'une solution de surveillance moderne, efficace et fiable, capable de maximiser la production d'énergie et de prolonger la durée de vie des équipements en assurant une maintenance prédictive basée sur des données précises et en temps réel.

2.3.2 Protocole de Communication MQTT

Le protocole de communication MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) est utilisé pour transmettre les données des capteurs à une base de données ou une plateforme de surveillance. MQTT est particulièrement adapté pour les applications IoT en raison de sa faible

consommation de bande passante et de sa capacité à fonctionner de manière fiable sur des réseaux instables [15].

2.3.3 Caractéristiques Clés du Protocole MQTT

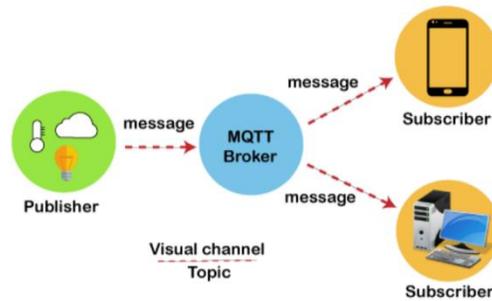


Figure II. 6 MQTT protocole.

2.3.3.1 Architecture Publish/Subscribe

Publishers : ce sont les dispositifs ou applications qui envoient des messages. Dans un contexte IoT, cela pourrait être des capteurs envoyant des données de mesure.

Subscribers : ce sont les dispositifs ou applications qui reçoivent les messages. Ils s'abonnent à des topics spécifiques pour recevoir les données pertinentes.

Broker : Le broker est le composant central qui reçoit tous les messages des publishers et les distribue aux subscribers intéressés. Il permet de découpler les expéditeurs des récepteurs, ce qui améliore la flexibilité et la scalabilité du système.

2.3.3.2 Légèreté

MQTT utilise un overhead minimal, ce qui le rend idéal pour les dispositifs avec des ressources limitées, tels que les capteurs IoT et les microcontrôleurs. Les messages MQTT peuvent être aussi petits que deux octets, ce qui optimise l'efficacité en termes de bande passante [16].

2.3.3.3 Qualité de Service (QoS)

MQTT supporte trois niveaux de QoS pour garantir la livraison des messages [17] :

QoS 0 : Livraison au moins une fois, sans confirmation.

QoS 1 : Livraison au moins une fois, avec confirmation.

QoS 2 : Livraison exactement une fois, avec un protocole de confirmation plus complexe pour éviter les duplications.

2.3.3.4 Persistente des Sessions, Messages Retenus et Will Message

MQTT permet aux clients de maintenir l'état de leurs abonnements même après des interruptions de connexion. Cela est utile pour des dispositifs IoT qui peuvent se déconnecter et se reconnecter fréquemment, assurant une continuité de service. Ainsi, les messages peuvent être conservés par le broker et envoyés immédiatement à tout nouveau subscriber, assurant aussi que les nouveaux clients reçoivent toujours le dernier message publié. Cela garantit que les informations importantes ne sont jamais perdues. MQTT permet de configurer un "message testament" qui est publié par le broker si un client se déconnecte de manière inattendue. Cela aide à gérer les défaillances des dispositifs et à maintenir la fiabilité du système en alertant les autres composants du réseau de la déconnexion [18].

2.3.3 Interfaces de Communication

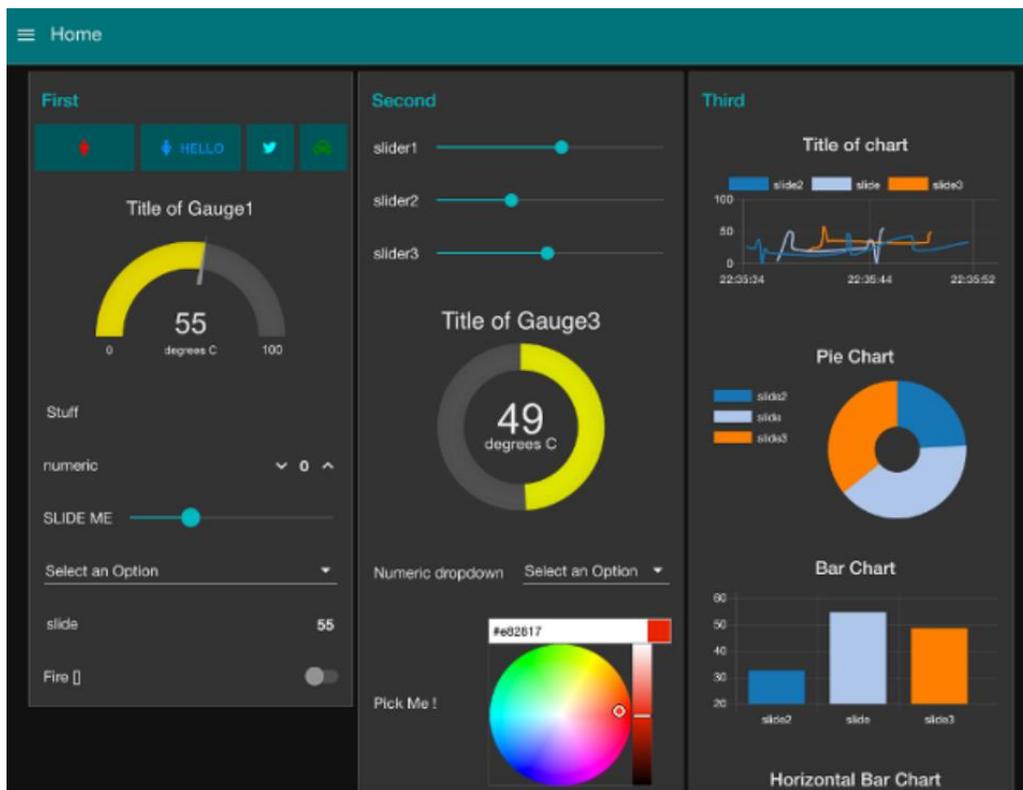


Figure II. 7 Model de design d'un tableau de bord personnalisé de la plateforme Node-RED.

Pour visualiser et gérer les données collectées, plusieurs interfaces de communication sont utilisées. Node-RED, une plateforme de développement visuel pour l'intégration des dispositifs matériels et logiciels, permet de créer des tableaux de bord personnalisés et des flux de traitement des données. Avec Node-RED, les utilisateurs peuvent surveiller les performances du parc photovoltaïque en temps réel, définir des alertes pour les anomalies et automatiser les réponses aux événements détectés.

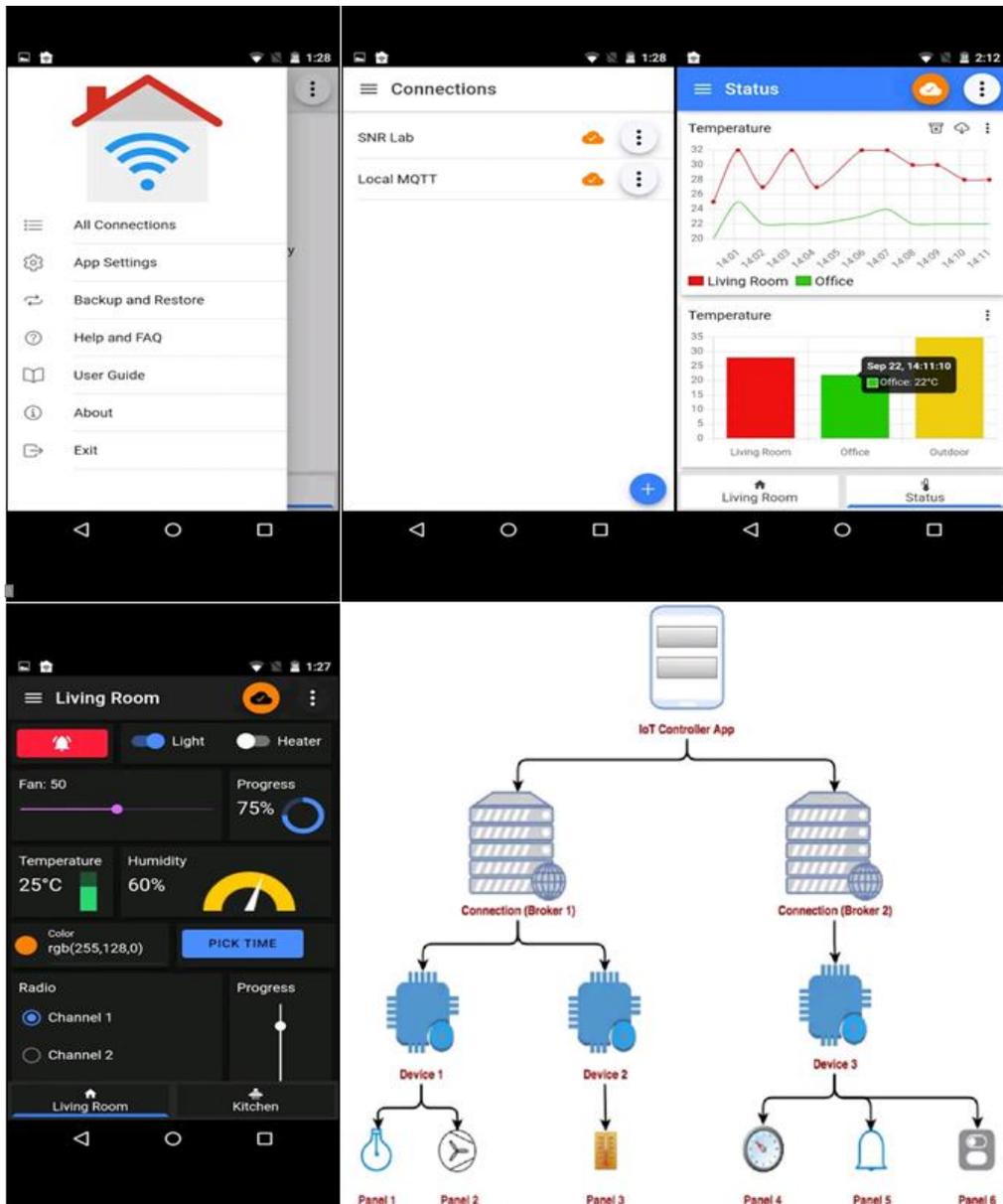


Figure II. 8 Interface de l'application IoT MQTT Panel.

En complément, l'application IoT MQTT Panel, disponible sur les appareils mobiles, offre une interface conviviale pour la surveillance à distance. Cette application permet aux utilisateurs d'accéder aux données MQTT publiées, de visualiser les graphiques de performance et de recevoir des notifications en cas de problèmes détectés. Ensemble, ces outils offrent une solution complète pour la gestion proactive et l'optimisation du système photovoltaïque, assurant une utilisation efficace et durable de l'énergie solaire produite.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a offert une exploration détaillée des éléments essentiels et des technologies de pointe utilisées dans les systèmes d'énergie solaire modernes, en discutant et dimensionnant chaque composant impliqué dans la capture, la conversion et le stockage de l'énergie solaire. Ensuite, nous avons examiné l'intégration des technologies dans la surveillance de l'énergie produite, avec un accent particulier sur l'Internet des objets (IoT). Les technologies IoT permettent une surveillance en temps réel, facilitant une gestion proactive des systèmes grâce à des capteurs intelligents et des protocoles de communication avancés comme MQTT. Enfin, nous avons abordé les interfaces de communication qui assurent une interaction efficace entre les différents composants du système et les utilisateurs finaux. En combinant un dimensionnement précis avec une surveillance intelligente via l'IoT, ce chapitre souligne l'importance de ces approches pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des systèmes d'énergie solaire. Ces innovations non seulement optimisent la performance des parcs photovoltaïques, mais prolongent également la durée de vie des équipements tout en réduisant les coûts de maintenance.

Chapitre III :

Conception de la Carte de Surveillance

Connectée à l'Internet

3.1 Introduction

L'efficacité et la fiabilité d'un système photovoltaïque dépendent largement de sa capacité à surveiller et à gérer en temps réel les paramètres critiques de ses unités énergétiques. Dans ce contexte, la conception d'une carte de surveillance connectée à l'Internet s'avère essentielle pour assurer une performance optimale et une maintenance proactive du parc photovoltaïque. Ce chapitre se concentre sur le processus de conception et de développement de cette carte de surveillance.

3.2 Choix et Caractéristiques des Composants de Circuit Électronique

3.2.1 Capteurs de Courant et de Tension

Pour la surveillance des paramètres électriques des unités énergétiques du parc photovoltaïque, les capteurs de courant LA25-P et les capteurs de tension LV25-P ont été sélectionnés en raison de leurs performances et de leurs caractéristiques techniques adaptées aux besoins du projet.

Capteur de Courant LA25-P : Le capteur de courant LA25-P est un transducteur de courant basé sur l'effet Hall, conçu pour mesurer des courants AC, DC et pulsés. Voici ses principales caractéristiques [19] :

Tableau 1 Caractéristiques du capteur de courant utilisé.

| Fonction | Capteur de courant |
|---|--------------------------------|
| Tension d'alimentation ($\pm 5\%$) | ± 12 ou ± 15 V |
| Courant au primaire I_P | De 0 à ± 55 A |
| Courant nominal R.M.S. au primaire I_{PN} | 25 A |
| Courant nominal R.M.S. au secondaire I_{SN} | 25 mA |
| Taux de conversion | 1 : 1000 |
| Précision % | $\pm 0,95$ % |
| Erreur de linéarité % | $< 0,15$ % |
| Température ambiante de fonctionnement | De -25° à $+85^\circ$ C |

| | |
|--|------------------------------------|
| Température ambiante de stockage | De -40° à $+90^{\circ}$ C |
| Temps de réponse | $< 1 \mu s$ |
| Poids | 24 g |
| Dimensionnement <i>Long</i> × <i>Larg</i> × <i>Epais</i> | $36.6 \times 27.2 \times 14.35$ mm |
| Dimensionnement du hall <i>Long</i> × <i>Larg</i> | 12.7×7 mm |



Figure III. 1 Capteur du courant LA 25-P.

Capteur de Tension LV25-P : Le capteur de tension LV25-P est utilisé pour mesurer des tensions continues et alternatives. Ses caractéristiques sont les suivantes [20] :

Tableau 2 Caractéristiques du capteur de tension utilisé.

| Fonction | Capteur de tension |
|---|------------------------------------|
| Tension au primaire V_p | De 10 à 500 V |
| Tension d'alimentation ($\pm 5\%$) | ± 12 ou ± 15 V |
| Courant au primaire I_p | De 0 à ± 14 mA |
| Courant nominal R.M.S. au primaire I_{pN} | 10 mA |
| Courant nominal R.M.S. au secondaire I_{sN} | 25 mA |
| Taux de conversion | 2500 : 1000 |
| Précision globale % | $\pm 0,8$ % |
| Erreur de linéarité % | $< 0,2$ % |
| Température ambiante de fonctionnement | De 0° à 70° C |
| Température ambiante de stockage | De -25° à $+85^{\circ}$ C |

| | |
|---|----------------------|
| Temps de réponse | 40 μs |
| Poids | 22 g |
| Dimensionnement <i>Long×Larg×Epais</i> | 29.2 × 26 × 16.45 mm |

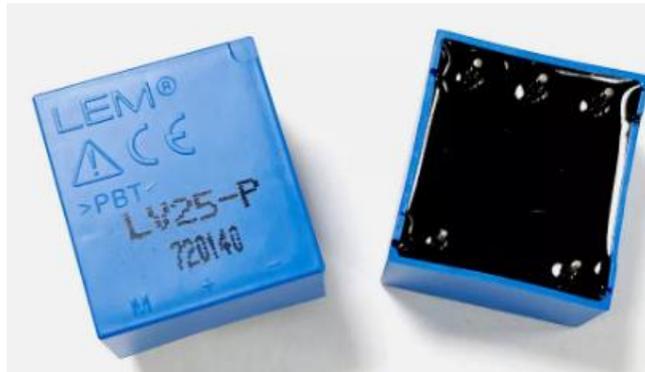


Figure III. 2 Capteur de tension LV 25-P.

Les capteurs LA25-P et LV25-P ont été choisis pour plusieurs raisons ils offrent les caractéristiques techniques nécessaires pour assurer une surveillance précise, fiable et sécurisée des unités énergétiques du parc photovoltaïque, facilitant ainsi une gestion optimisée de la production d'énergie.

3.2.2 Node MCU ESP8266

Le Node MCU ESP8266 V3 Lolin est une carte de développement IoT puissante et polyvalente, idéale pour les projets de surveillance et de contrôle en temps réel. Elle intègre un module Wi-Fi ESP8266, qui offre une connectivité sans fil robuste, essentielle pour la transmission de données à distance. Cette version V3 Lolin se distingue par sa compatibilité améliorée et son design optimisé. Le processeur Tensilica L106 32-bit, cadencé à 80 MHz, assure des performances suffisantes pour le traitement et la gestion des données. Avec 4 Mo de mémoire flash et 96 Ko de mémoire de données, elle offre un espace de stockage adéquat pour les programmes et les données nécessaires. La carte supporte les environnements de développement Arduino IDE et Lua, simplifiant ainsi la programmation et la mise en œuvre des applications. De plus, elle dispose de multiples broches GPIO pour la connexion de divers capteurs

et périphériques, facilitant l'intégration avec les capteurs de courant LA25-P et de tension LV25-P. La faible consommation d'énergie et la petite taille de la carte permettent une intégration efficace dans des systèmes de surveillance à énergie limitée comme ceux des installations photovoltaïques. Ces caractéristiques font de le Node MCU ESP8266 V3 Lolin un choix idéal pour les applications IoT nécessitant fiabilité, flexibilité et performance [21].

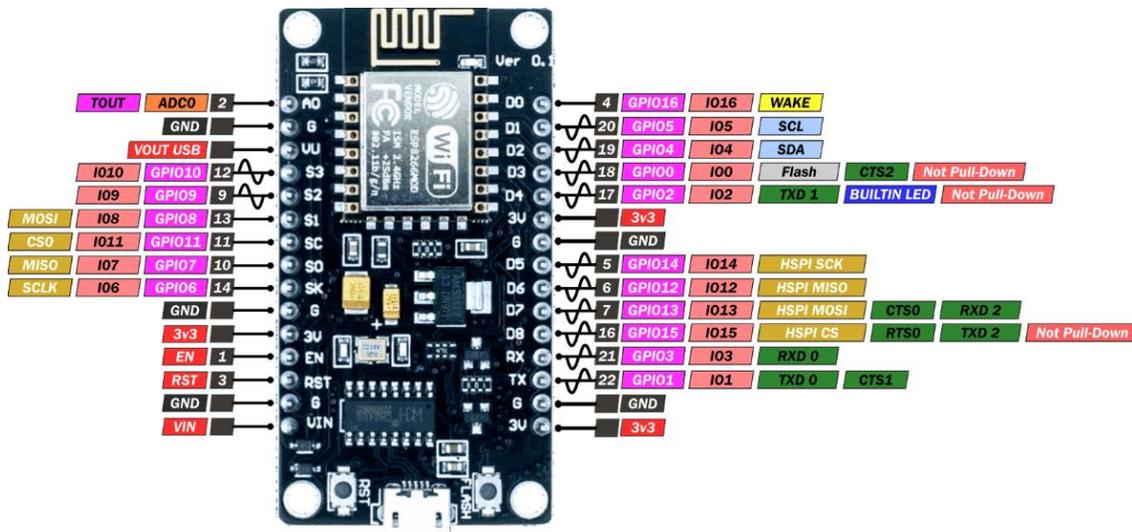


Figure III. 3 Fonctionnalité des Broches de la Carte Node MCU ESP8266.

3.2.3 Convertisseur Analogique-Numérique ADS1115

Le convertisseur analogique-numérique (ADC) ADS1115 joue un rôle important dans la surveillance des paramètres électriques du parc photovoltaïque, particulièrement en raison des limitations du Node MCU ESP8266, qui ne dispose que d'une seule entrée analogique de 10 bits. Le ADS1115 offre plusieurs avantages clés qui justifient son choix pour ce projet.

Tout d'abord, le ADS1115 fournit quatre canaux d'entrée analogiques, permettant de mesurer plusieurs signaux simultanément, tels que les courants et les tensions des panneaux solaires. Sa résolution de 16 bits garantit des mesures de haute précision, essentielles pour une surveillance précise et fiable des paramètres électriques. En outre, le module intègre un amplificateur programmable (PGA) qui permet d'ajuster les niveaux de gain pour des mesures plus flexibles et adaptées à une gamme variée de signaux.

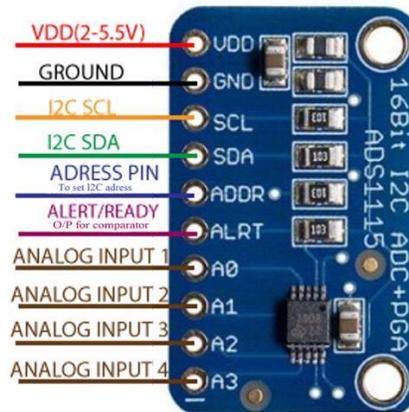


Figure III. 4 Broches du module ADS1115.

Un autre avantage majeur du ADS1115 est sa capacité à communiquer via l'interface I^2C . Cette interface permet au Node MCU ESP8266, en tant que maître, de gérer plusieurs ADS1115 en tant qu'esclaves sur un bus commun. Théoriquement, il est possible de connecter jusqu'à 120 convertisseurs ADS1115, chacun pouvant acquérir les données de quatre capteurs différents, qu'il s'agisse de mesures de courant ou de tension. Cela permet une extensibilité significative du système de surveillance, rendant possible la gestion d'un grand nombre de capteurs avec un seul microcontrôleur.

De plus, la faible consommation d'énergie et la capacité de conversion rapide du ADS1115 sont particulièrement adaptées aux applications IoT, où la précision et l'efficacité énergétique sont cruciales. En intégrant le ADS1115, le système de mesure bénéficie d'une augmentation considérable du nombre d'entrées analogiques disponibles et de la précision des mesures, permettant ainsi une surveillance exhaustive et fiable des unités énergétiques du parc photovoltaïque [22].

3.2.4 Alimentations à Découpage Utilisées

Pour garantir une alimentation stable et efficace des différents composants du système de surveillance, deux alimentations spécifiques ont été choisies : une de 10 W avec une tension de sortie de $\pm 15 V$ pour l'alimentation des capteurs de courant et de tension, et une autre de 5 W avec une tension de sortie de 5 V pour alimenter le Node MCU ESP8266 et les ADS1115.



Figure III. 6 Convertisseur DC-DC, entrée large 9-36V, sortie 5W, 5V et 1A.

Les alimentations à découpage choisies sont capables de convertir une large plage de tension d'entrée de 9 – 36 V (4: 1), provenant de deux batteries connectées en série, en une tension de sortie de ± 15 V et de 5 V, avec une efficacité atteignant 91 %. Elles possèdent une tension d'isolation conventionnelle de 1500 VCC et une température de fonctionnement admissible de -40° C à $+85^{\circ}$ C. Elles intègrent des protections contre les sous-tensions d'entrée, les surtensions de sortie, les surintensités et les courts-circuits, et sont largement utilisées dans les secteurs du contrôle médical et industriel, de l'énergie électrique et de l'instrumentation.



Figure III. 5 Convertisseur DC-DC, entrée large 9 – 36 V, sortie 10 W, ± 15 V et 333 mA.

L'alimentation avec une tension de sortie de ± 15 V et une puissance de 10 W fournit un courant de 333 mA, suffisant pour alimenter simultanément 8 capteurs de type LA25-P et LV25-P. L'alimentation de 5 V et de 5 W est capable de fournir un courant de 1000 mA, suffisant pour alimenter le Node MCU ESP8266 et 4 ADS1115.

Ces alimentations sont cruciales pour le projet car elles assurent que les différents composants reçoivent les tensions correctes et stables nécessaires pour un fonctionnement optimal. L'utilisation de ces alimentations à découpage, alimentées par les batteries de 24 V,

garantit que le système de surveillance peut fonctionner de manière fiable et continue, même dans des conditions de charge variable, maximisant ainsi l'efficacité et la durabilité de l'ensemble du système de surveillance du parc photovoltaïque.

3.3 Description du Circuit Électronique

Ce circuit est conçu pour mesurer les courants et les tensions de quatre unités énergétiques, utilisant quatre capteurs de courant et quatre capteurs de tension. L'alimentation du circuit provient de deux batteries de 12 V connectées en série via les connecteurs à vis J1. Cette configuration alimente deux alimentations à découpage qui fournissent des tensions de sortie de ± 15 V et de 5 V.

La première sortie de ± 15 V et de 10 W alimente suffisamment les capteurs de tension marqués LV1 à LV4 dans le circuit électronique, et les capteurs de courant situés en dehors du circuit sont alimentés via les connecteurs à vis J2, où chaque capteur peut absorber un courant nominal de 35 mA. La deuxième sortie de tension de 5 V et de 5 W alimente le Node MCU ESP8266 et les quatre convertisseurs ADC ADS1115. Les connecteurs J3 à J6 sont utilisés pour brancher les fils de tension à mesurer, allant de 0 à 500 V. Chaque connecteur doit être relié à une résistance calculée de telle sorte que le courant dans le primaire I_p du capteur de tension ne dépasse pas 10 mA. Cela nécessite une résistance de 50 k Ω et de 5 W. La branche de sortie (M) des capteurs de tension, qui peut générer un courant dans le secondaire $I_s = 25$ mA, doit également passer par une résistance $R_M = 200$ Ω pour limiter la tension de sortie à 5 V, compatible avec l'entrée analogique du ADS1115.

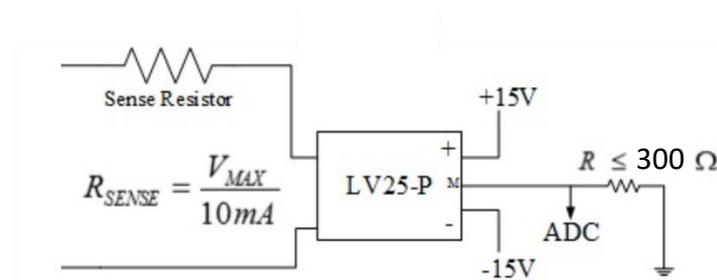


Figure III. 7 Circuit de conditionnement du capteur de tension.

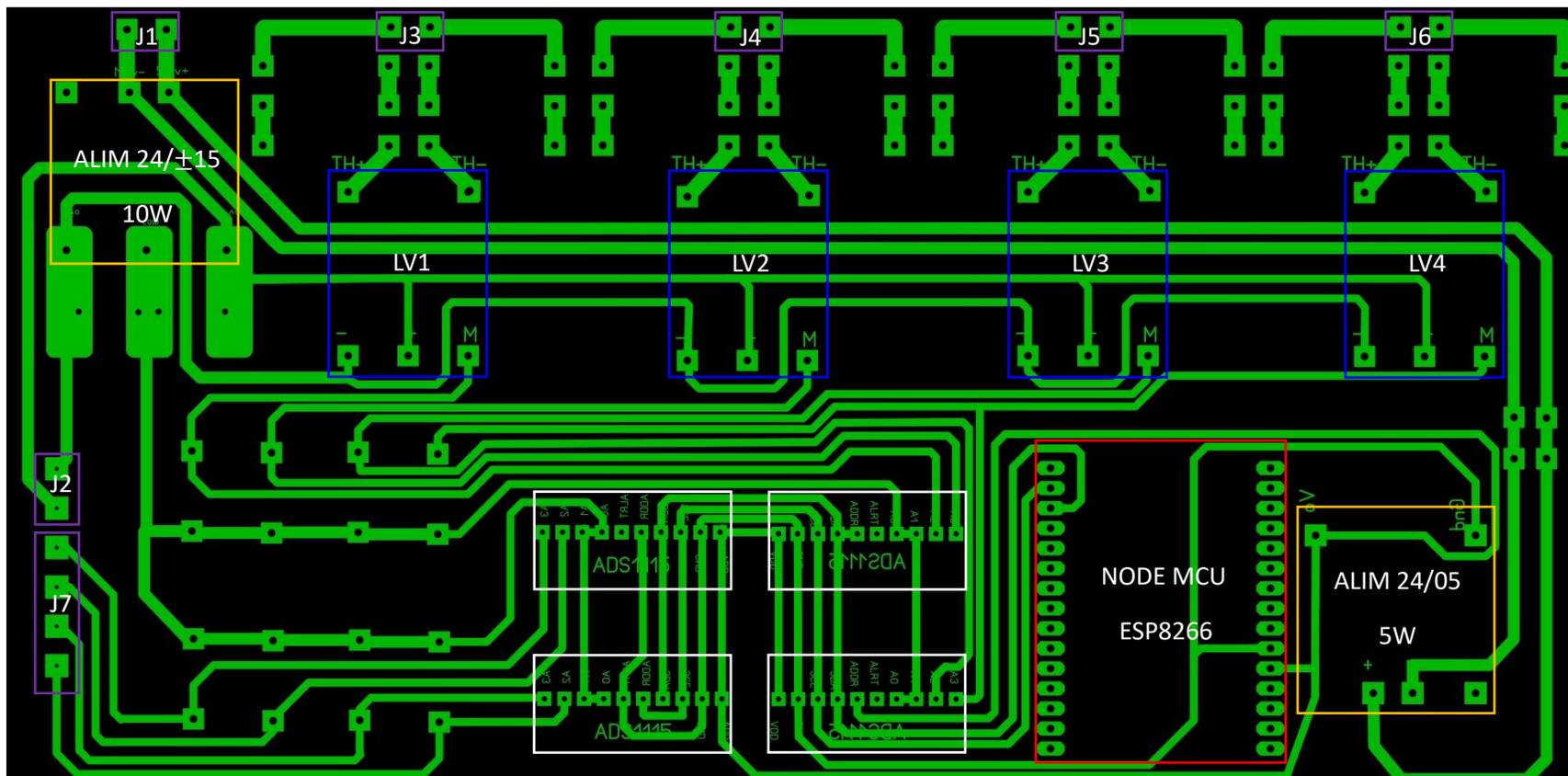


Figure III. 8 Circuit électronique pour mesure des grandeurs électriques.

Les capteurs de courant sont fixés dans le circuit de puissance comme tous les transformateurs de courant, où un des deux fils de chaque unité énergétique passe par le trou au milieu du capteur. Les sorties de mesure (M) des capteurs de courant sont branchées au circuit électronique via J7, passant à leur tour par des résistances $R_M = 200 \Omega$, de manière similaire aux capteurs de tension, pour limiter la tension à 5 V.

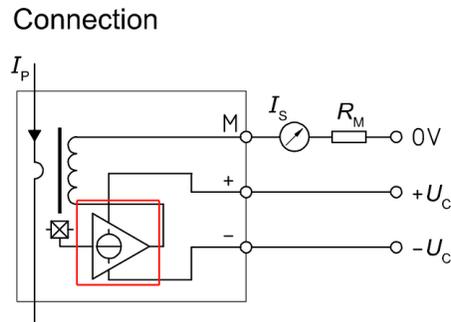


Figure III. 9 Circuit de conditionnement du capteur de courant.

Les ADC et le Node MCU dans le circuit sont connectés entre eux par les deux pins SCK (Serial Clock) et SDA (Serial Data), où le microcontrôleur, considéré comme le maître, gère les 4 ADC considérés comme esclaves à travers leurs pins d'adresses pour récupérer les données mesurées et les transmettre via Wi-Fi au broker comme il est démontré dans la figure suivante.

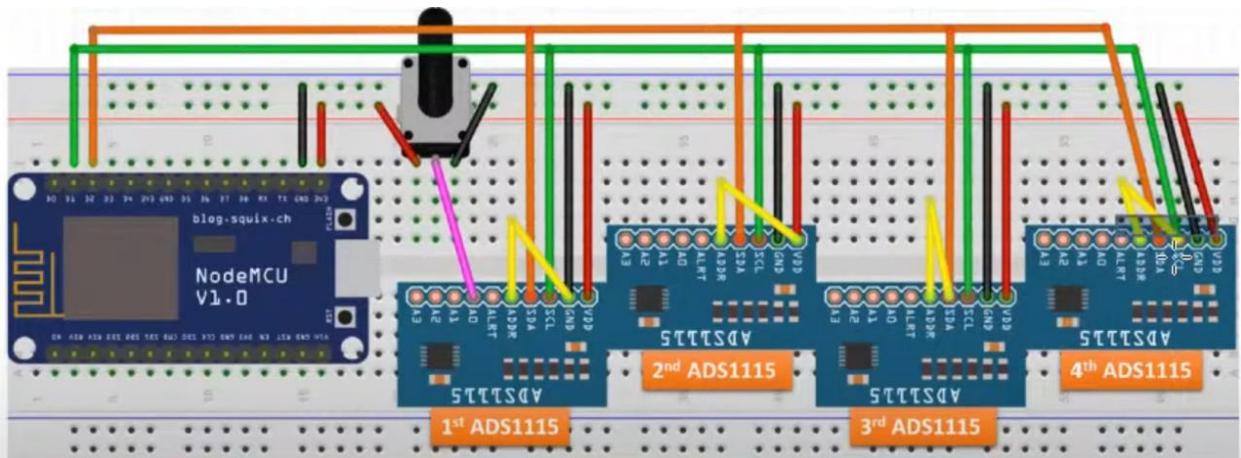


Figure III. 10 Circuit de câblage de 4 ADC via le protocole I^2C .

Les entrées analogiques des ADC sont utilisées comme des entrées différentielles. Les canaux sont regroupés par paires pour mesurer la différence de tension entre eux. Cette configuration est idéale pour mesurer des signaux faibles en présence de bruit, car elle rejette le bruit commun aux deux entrées.

3.4 Fonctionnement de l'Architecture MQTT

Le fonctionnement de l'architecture MQTT pour la surveillance des unités d'énergie solaire repose sur une série d'interactions fluides entre les capteurs, le Node MCU ESP8266 (Publisher MQTT), le broker MQTT (Serveur MQTT) et les interfaces de communication (clients MQTT comme Node-RED). Les capteurs installés sur les unités d'énergie solaire recueillent des données environnementales et opérationnelles, telles que la température, l'humidité, la lumière solaire, les courants et les tensions. Ces données sont ensuite transmises au Node MCU ESP8266, un microcontrôleur doté de connectivité Wi-Fi, qui traite les informations reçues et utilise le protocole MQTT pour publier ces données sur des topics spécifiques. Le broker MQTT, agissant comme un intermédiaire, reçoit les messages publiés par le Node MCU, les organise en fonction des topics et les distribue aux clients MQTT abonnés à ces topics. Les clients MQTT, tels que Node-RED, jouent un rôle crucial en visualisant, traitant et analysant les données reçues, permettant ainsi une surveillance en temps réel et une gestion proactive des systèmes d'énergie solaire. Cette architecture optimise la performance et la fiabilité des installations grâce à une communication efficace et structurée des données [23].

3.5 Configuration du Client MQTT

3.5.1 Node-RED comme Client MQTT

Node-RED est une application qui permet de créer facilement des flux de données visuels à l'aide d'une interface web intuitive. En tant que client MQTT, Node-RED peut se connecter au broker MQTT pour recevoir et publier des messages sur divers topics. L'application offre une gamme d'outils pour traiter et visualiser les données en temps réel, ce qui en fait une solution idéale pour la surveillance des systèmes d'énergie solaire.

3.5.2 Configuration de Node-RED pour se Connecter au Broker MQTT

Pour configurer Node-RED en tant que client MQTT, les étapes suivantes sont nécessaires :

Installation de Node-RED : Assurez-vous que Node-RED est installé sur votre système. Vous pouvez le faire en utilisant npm, le gestionnaire de paquets de Node.js.

Ajout des Nœuds MQTT : Dans l'interface de Node-RED, allez dans le menu de gestion des palettes et ajoutez les nœuds MQTT.

Configuration de la Connexion au Broker : Ouvrez Node-RED et ajoutez un nœud "mqtt in" pour recevoir les données des capteurs. Puis, configurez le nœud en spécifiant l'adresse du broker MQTT (par exemple, mqtt://broker.hivemq.com). Définissez le topic sur lequel le Node MCU ESP8266 publie les données (par exemple, sensor/data).

Publication des messages : Utilisez un nœud "mqtt out" pour publier des messages si nécessaire.

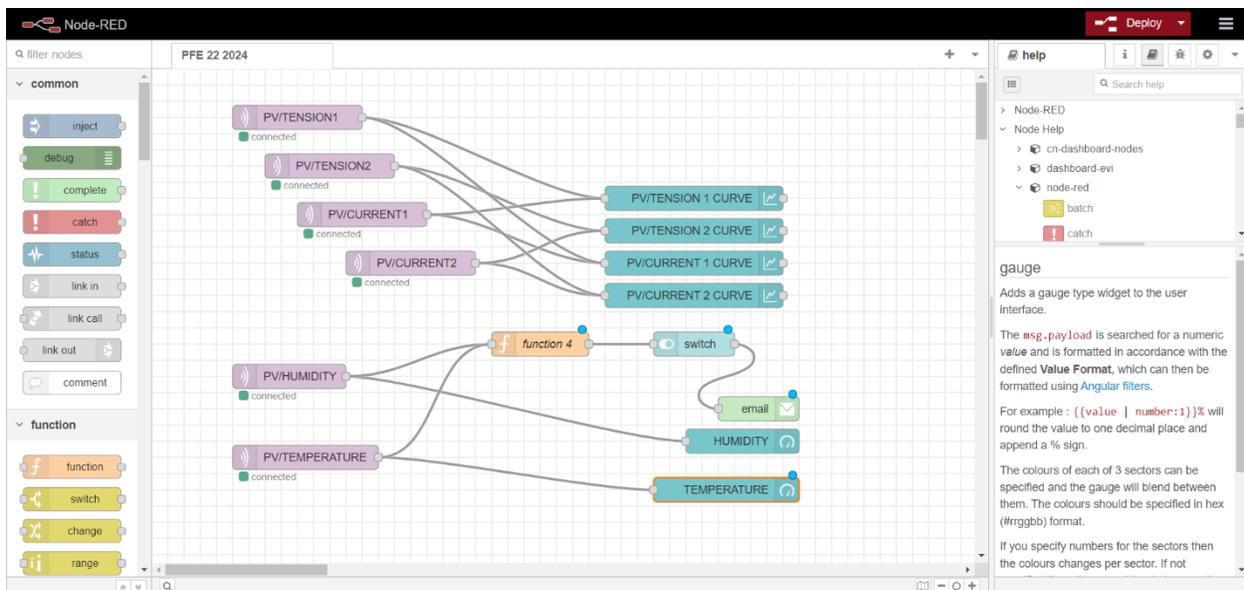


Figure III. 11 Flux Node-RED pour communiquer les mesures des capteurs implémentés.

3.5.3 Description du Tableau de Bord Obtenu

Le tableau de bord de Node-RED est divisé en trois groupes principaux pour une visualisation claire et efficace :

Groupe des Courbes de Tensions : Ce groupe affiche les courbes de deux tensions mesurées à partir de deux unités énergétiques différentes. Les données sont représentées en temps réel, permettant une surveillance continue des variations de tension.

Groupe des Courbes de Courants : De manière similaire, ce groupe affiche les courbes des courants pour les deux mêmes unités énergétiques. Ces courbes permettent de visualiser les fluctuations de courant et de détecter rapidement toute anomalie.

Groupe des Jauges de Température et d'Humidité : Avec l'ajout du capteur DHT11, ce groupe affiche les valeurs de température et d'humidité. Deux jauges sont utilisées pour présenter ces données de manière claire et instantanée.

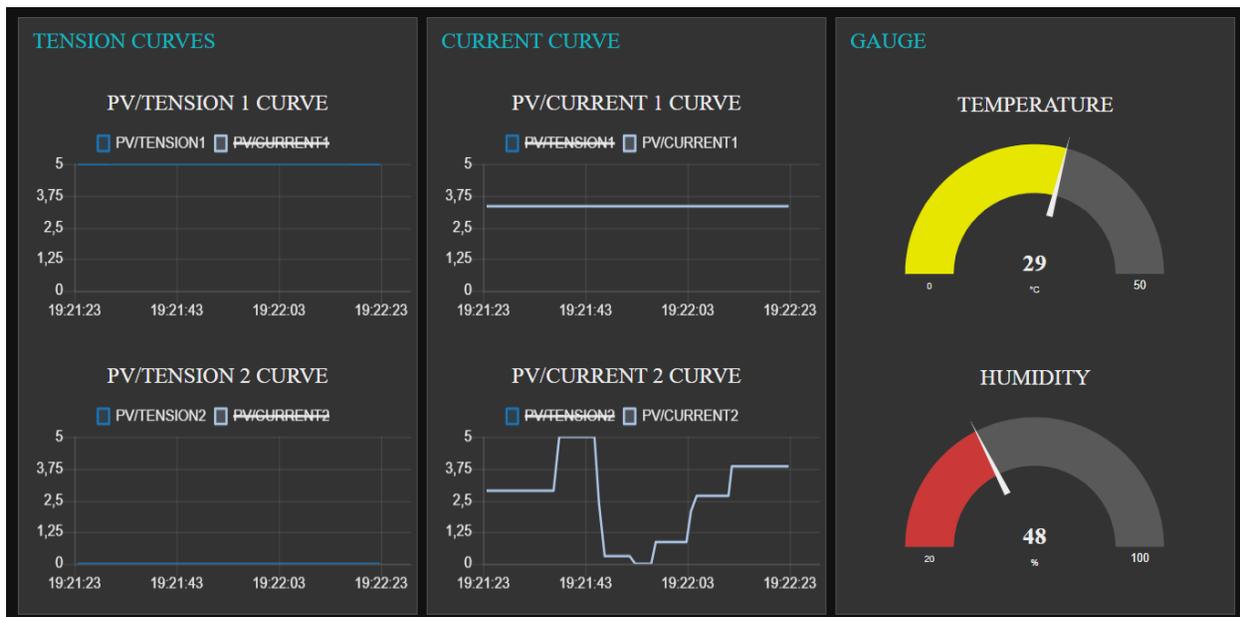


Figure III. 12 Tableau de bord du flux créé de l'interface Node-RED.

Chaque groupe sur le tableau de bord permet une visualisation en temps réel des paramètres essentiels, facilitant la gestion proactive et l'optimisation des performances des

unités d'énergie solaire. Les données consolidées et les alertes potentielles sont aisément accessibles, offrant une solution complète de surveillance intelligente via l'IoT.

3.6 Conclusion

Ce chapitre a offert une analyse approfondie des composants essentiels et des technologies utilisées pour la surveillance des unités d'énergie via une architecture IoT. Nous avons discuté du choix et des caractéristiques des capteurs de courant et de tension, du microcontrôleur Node MCU ESP8266, du convertisseur analogique-numérique ADS1115, et des alimentations à découpage, illustrant comment chaque composant contribue à la capture et à la conversion des données. La description du circuit électronique a mis en évidence le rôle central de ces composants dans la collecte des mesures. Ensuite, nous avons exploré le fonctionnement de l'architecture MQTT, en détaillant la configuration du client MQTT et l'utilisation de Node-RED comme interface utilisateur. En configurant Node-RED pour se connecter au broker MQTT, nous avons montré comment les données sont efficacement gérées et visualisées sur un tableau de bord intuitif, améliorant ainsi la surveillance en temps réel et la gestion proactive des unités d'énergie solaire.

Conclusion Générale

La transition vers des sources d'énergie renouvelables est une nécessité incontournable pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en proposant une étude approfondie des systèmes de surveillance des parcs photovoltaïques, le dimensionnement des unités d'énergie et la conception de solutions intelligentes via l'Internet des Objets (IoT). Les travaux réalisés montrent comment les avancées technologiques peuvent optimiser la gestion et l'efficacité des installations solaires.

Dans le premier chapitre, nous avons retracé l'évolution des systèmes de surveillance des parcs photovoltaïques. Des premières approches manuelles aux systèmes automatisés, en passant par l'intégration des technologies IoT, chaque étape marque une avancée significative en termes de précision et d'efficacité. Les méthodologies de surveillance ont été examinées, illustrant les avantages et les limitations des inspections visuelles et des mesures ponctuelles comparées aux systèmes modernes de monitoring SCADA et à distance. L'IoT se distingue comme une révolution, permettant une surveillance en temps réel et une gestion proactive grâce à des capteurs intelligents et des réseaux de communication avancés.

Les études de cas présentées démontrent concrètement les bénéfices de ces technologies, notamment l'amélioration de la production, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation de la durée de vie des panneaux solaires. En détaillant les composants clés des systèmes IoT, tels que les capteurs, les passerelles, les serveurs de stockage et d'analyse de données, ainsi que les interfaces utilisateur, nous avons montré comment chaque élément contribue à la performance globale des parcs photovoltaïques.

Le deuxième chapitre a approfondi le dimensionnement des unités d'énergie et la surveillance intelligente via IoT. En décrivant en détail un projet solaire typique, comprenant des parcs photovoltaïques, des unités énergétiques, des armoires centrales, des inverters et des batteries, nous avons posé les bases pour une compréhension complète de l'infrastructure nécessaire. La surveillance de l'énergie produite a été analysée, avec une attention particulière à l'intégration de l'IoT. Le protocole MQTT a été mis en lumière pour son efficacité dans la

communication des données, ses caractéristiques de légèreté, et ses niveaux de qualité de service (QoS).

L'architecture publish/subscribe du MQTT permet une flexibilité et une scalabilité accrues, essentielles pour les applications IoT. Les interfaces de communication, cruciales pour une interaction efficace entre les différents composants du système et les utilisateurs finaux, ont été détaillées pour souligner leur rôle dans la gestion optimisée des parcs solaires.

Enfin, le troisième chapitre s'est concentré sur la conception d'une carte de surveillance connectée à l'Internet. En choisissant et caractérisant les composants électroniques adéquats, tels que les capteurs de courant et de tension, le Node MCU ESP8266, le convertisseur analogique-numérique ADS1115 et les alimentations à découpage, nous avons mis en place une solution complète pour la mesure et la transmission des données. La description du circuit électronique et le fonctionnement de l'architecture MQTT ont permis de comprendre comment ces composants interagissent pour fournir une surveillance en temps réel.

La configuration du client MQTT, en particulier l'utilisation de Node-RED, a été illustrée pour montrer comment les données peuvent être visualisées et analysées via des interfaces web intuitives. Le tableau de bord obtenu, avec ses groupes dédiés aux courbes de tensions et de courants, ainsi que les jauges de température et d'humidité, démontre l'efficacité de cette approche pour une gestion proactive des unités d'énergie.

En conclusion, ce mémoire a démontré l'importance des systèmes de surveillance intelligents et de l'IoT pour l'optimisation des parcs photovoltaïques. Les technologies modernes permettent non seulement d'améliorer la performance et la fiabilité des installations solaires, mais aussi de prolonger la durée de vie des équipements tout en réduisant les coûts de maintenance. L'intégration de l'IoT et des protocoles comme MQTT offre une solution robuste pour la gestion des énergies renouvelables, répondant ainsi aux besoins croissants en matière d'efficacité énergétique et de durabilité environnementale. Ces innovations représentent un pas significatif vers un avenir énergétique plus durable et plus efficace.

Références

1. Kundu, S., & Majumder, S. (2019). "A Review on Monitoring and Fault Detection of Photovoltaic Systems." **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 111, 165-192.
2. Hossam-E-Haider, M., & El-Fouly, T. H. (2020). "Advanced Monitoring and Control Techniques for Large-Scale Photovoltaic Power Plants: A Review." **IEEE Access**, 8, 195316-195333.
3. Chouder, A., & Silvestre, S. (2010). "Automatic Supervision and Fault Detection of PV Systems Based on Power Losses Analysis." **Energy Conversion and Management**, 51(10), 1929-1937.
4. Gholami, M., Sheikhi, A., & Rastegar, H. (2019). "Smart Monitoring of Photovoltaic Systems Using SCADA Systems." **Renewable Energy**, 130, 572-579.
5. Bouzid, A., & Haddadi, M. (2019). "Predictive Maintenance of Photovoltaic Systems Using IoT and Machine Learning." **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, 11(5), 053501.
6. Kumar, S., Saini, R. P., & Sinha, A. (2019). "A Review of Artificial Intelligence Techniques for Fault Diagnosis in Photovoltaic Systems." **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 104, 273-287.
7. Marin, M., Hassan, K. M., & Abdel-Rahman, E. (2019). "IoT-Based Smart Monitoring and Control System for Photovoltaic Plants." **IEEE Internet of Things Journal**, 6(5), 8355-8365.
8. Fernandes, D., Rodrigues, J. J. P. C., & Carvalho, L. F. (2019). "A Comprehensive Survey on IoT and Microgrid Networks for the Smart Grid and Smart Buildings." **Wireless Communications and Mobile Computing**, 2019.
9. Hassan, Q., Abbas, A., & Wen, S. (2019). "Big Data Analytics for Photovoltaic Systems: A Review." **IEEE Access**, 7, 108855-108872.
10. Martinez, S., & Colmenar, A. (2020). "Smart Grids and Renewable Energy Integration: A Review of the Technologies and Market Trends." **Energies**, 13(5), 1123.
11. Mekki, K., Bounceur, A., & Ahmed, T. (2020). "A Survey on Communication Architectures in Photovoltaic Systems Monitoring." **IEEE Access**, 8, 58863-58881.
12. Mekki, K., Bounceur, A., & Ahmed, T. (2020). "A Review of Photovoltaic Systems Monitoring Approaches and Technologies." **Sustainable Energy, Grids and Networks**, 23, 100359.
13. Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., & Blaabjerg, F. (2005). "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules." **IEEE Transactions on Industry Applications**, 41(5), 1292-1306. doi:10.1109/TIA.2005.853371
14. Rahimi, M., Seyedmahmoudian, M., Horan, B., Stojcevski, A., & Maung Than Oo, A. (2017). "Internet of Things (IoT) Applications in Solar Energy: A Systematic Review." **Energies**, 10(10), 1377. doi:10.3390/en10101377
15. OASIS Standard. (2021). "MQTT Version 5.0." OASIS Open. [Online]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>

16. El-Amine, A. T. M. (2017). "Usage du Protocole MQTT dans une Application de Suivi." *Mémoire de Fin d'Études pour l'Obtention du Diplôme de Master 2*. Université Mohamed Khider – Biskra.
17. Quality of Service (QoS): C'est quoi ? Que signifie ? | IoT Industriel Blog. <https://iotindustriel.com/glossaire-iiot/quality-of-service-qos-cest-quoi/>. Accessed 15 May 2024.
18. MQTT - AWS IoT Core. https://docs.aws.amazon.com/fr_fr/iot/latest/developerguide/mqtt.html. Accessed 20 May 2024.
19. Datasheet du Capteur de Courant LA25-P par LEM: Le document officiel du fabricant décrivant les spécifications techniques, les caractéristiques et les performances du capteur. LEM LA25-P Datasheet.
20. Nadjet, A. (2022/2023). "L'Internet des Objets Pour le Diagnostic D'un Système Photovoltaïque." *Mémoire de Fin d'Études pour l'Obtention du Diplôme de Master*. Université de Echahid Chikh Larbi Tebessi – Tebessa.
21. NodeMCU. 30 Pins (ESP8266 WiFi Programming & Development Kit) CP2102. In: Future Electronics Egypt. <https://store.fut-electronics.com/products/nodemcu-esp8266-programming-and-development-kit>. Accessed 29 May 2024.
22. Module ADC 4 Canal 16 Bits I2C ADS1115 avec Pro Amplificateur À Gain. <https://www.dzduino.com/module-adc-4-canal-16-bits-i2c-ads1115-avec-pro-amplificateur-%C3%80-gain-fr>. Accessed 03 June 2024.
23. Internet des Objets : bien comprendre MQTT. *LeMagIT*. <https://www.lemagit.fr/conseil/Internet-des-Objets-bien-comprendre-MQTT>. Accessed 05 June 2024.

Résumé

Ce mémoire explore les systèmes de surveillance des parcs photovoltaïques, en détaillant l'évolution des méthodes de surveillance, l'intégration des technologies IoT et le dimensionnement des unités d'énergie. Il met en avant l'importance des capteurs intelligents, du protocole MQTT et des interfaces de communication pour une gestion proactive et optimisée des installations solaires. La conception d'une carte de surveillance connectée à l'Internet, utilisant des composants comme le Node MCU ESP8266 et des capteurs de courant et de tension, démontre comment les avancées technologiques peuvent améliorer la performance, la fiabilité et la durabilité des parcs photovoltaïques.

Abstract

This thesis explores the development and implementation of advanced monitoring systems for photovoltaic parks, emphasizing the evolution from manual inspection to automated and IoT-based surveillance. The study details the components and technologies involved, including smart sensors, MQTT communication protocols, and user interfaces for real-time data management. By designing a connected monitoring board with components such as the Node MCU ESP8266 and current and voltage sensors, the research demonstrates how modern technology enhances the efficiency, reliability, and longevity of solar energy systems. This integration facilitates proactive management, reduces maintenance costs, and optimizes the overall performance of photovoltaic installations.

ملخص

يستعرض هذا البحث تطوير وتنفيذ أنظمة المراقبة المتقدمة للحدائق الكهروضوئية، مع التركيز على التطور من التفتيش اليدوي إلى المراقبة الآلية والمعتمدة على إنترنت الأشياء. يتناول البحث تفاصيل المكونات والتقنيات المستخدمة، بما في ذلك المستشعرات الذكية، بروتوكولات الاتصال MQTT، وأجهزة المستخدم لإدارة البيانات في الوقت الفعلي. من خلال تصميم لوحة مراقبة متصلة تحتوي على مكونات مثل Node MCU ESP8266 ومستشعرات التيار والجهد، يوضح البحث كيف تعزز التكنولوجيا الحديثة من كفاءة وموثوقية واستدامة أنظمة الطاقة الشمسية. تسهم هذه التكاملات في الإدارة الاستباقية، تقليل تكاليف الصيانة، وتحسين الأداء العام للمنشآت الكهروضوئية.