

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables et environnement

Thème

Systeme de surveillance des panneaux solaires via l'IoT

Présenté par :

- Ahmed Belal BAKELLI BABA
- Abdallah OULADSAID

Soutenu publiquement le 21/05/2025

Devant le jury composé de :

BELAGHIT Abdelhakem	MCB	Université de Ghardaïa	Président
HAMADA Assia	MAA	Université de Ghardaïa	Encadreur
HAMIDODJANA SAMIR	MRB	URAER	Co-encadreur
TAHTAH Reda	MCB	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour le succès et pour nous avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous exprimons notre gratitude et tenons à remercier le Dr. Assia HAMADA, notre fondatrice, pour ses efforts considérables, ses précieuses informations, ses conseils et ses encouragements continus, qui nous ont permis de mettre en œuvre avec succès ce projet.

Nous tenons également à remercier le Directeur de l'unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables à Ghardaïa (URAER), qui nous a accueillis et nous a ouvert les portes de l'apprentissage, et nous tenons à remercier tout particulièrement Dr. Samir HAMID OUDJANA, le superviseur de la formation.

Nous remercions les membres du jury pour le temps précieux qu'ils ont consacré à l'étude de notre Mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous nos professeurs qui nous ont soutenus durant notre période de formation. Et tous les professeurs du département de génie mécanique. Nous sommes heureux et honorés d'adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la création de ce projet, qui nous ont aidés et soutenus et ont rendu ce travail possible et plus précisément notre ami Ilyes BAKELLI, membre de l'association de la robotique.

Enfin, nous ne pouvons terminer notre discussion sans remercier nos parents et tous les membres de notre famille pour leur soutien et leurs encouragements continus.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة وتطوير نظام لمراقبة أداء الألواح الشمسية عن بعد عبر إنترنت الأشياء، باستخدام موقع المراقبة . تعتمد هذه ESP32 بالإضافة إلى معدات المراقبة مثل أجهزة استشعار درجة الحرارة والضوء أيضا لوحة ThingSpeak ويتضمن جزء من هذا العمل دراسة نظرية شاملة للطاقة الشمسية، بالإضافة إلى تطبيقاتها، أيضا الدراسة على إنشاء نموذج مصغر. أما الجزء الثاني فهو مخصص للمجال التطبيقي، أي منهجية العمل والأدوات المستخدمة والنتائج كيفية دمج إنترنت الأشياء للمراقبة. التي تم الحصول عليها في ظل ظروف الطقس المختلفة.

الكلمات مفتاحية: ESP32 ، أجهزة استشعار، البحث والتطوير، ThingSpeak، إنترنت الأشياء، الألواح الشمسية.

Résumé

Ce travail vise à étudier et développer un système de surveillance à distance des performances des panneaux solaires via l'Internet des objets, en utilisant le site de surveillance ThingSpeak en plus des équipements de surveillance tels que les capteurs de température et de lumière sur la carte ESP32. Cette étude est basée sur la création d'un modèle miniature. Une partie de ce travail comprend une étude théorique complète de l'énergie solaire, ainsi que de ses applications, et une étude sur la manière d'y intégrer l'Internet des objets pour la surveillance. La deuxième partie est consacrée au domaine appliqué, c'est-à-dire à la méthodologie de travail, aux outils utilisés et aux résultats obtenus dans différentes conditions météorologiques.

Mots-clés : IoT, ThingSpeak, panneaux solaires, capteurs, ESP32

Abstract

This work aims to study and develop a system for remote monitoring of solar panel performance via the Internet of Things, using the ThingSpeak monitoring site in addition to monitoring equipment such as temperature and light sensors on the ESP32 board. This study is based on the creation of a miniature model. Part of this work includes a complete theoretical study of solar energy, as well as its applications, and a study on how to integrate the Internet of Things for monitoring. The second part is dedicated to the applied field, that is, the working methodology, the tools used and the results obtained in different weather conditions.

Keywords: IoT, ThingSpeak, solar panels, sensors, ESP32.

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des abréviations.....	vii
1.Introduction.....	1
2.Energie solaire photovoltaïque.....	3
2.1 Comprendre les panneaux solaires : définition et importance.....	3
2.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	4
2.3 Composant d'un system photovoltaïque.....	5
2.3.a Les batteries	5
2.3.b Les câbles	5
2.3.c Les onduleurs (DC/AC).....	6
2.3.d Les transformateurs	6
2.4 Types de panneaux solaires	6
2.4.1 La technologie poly-cristalline	6
2.4.1 La technologie monocristalline	8
2.5 Avantages et Inconvénients des Panneaux Solaires Polycristallins et Monocristallins ...	9
2.6 Applications de l'énergie photovoltaïque.....	10
2.6.1. Dessalement de l'eau de mer.....	11
2.6.2. Chauffe-eau solaire.....	11
2.6.3. Pompage solaire.....	12
2.7. Conclusion.....	12
3.L'internet des objets.....	13
3.1 Introduction	13
3.2 Définition de l'IoT.....	13
3.3 Fonctionnement et composants d'un système IoT	14
3.3.1. L'architecture de l'IoT.....	14
3.3.2. Les sources d'énergie	14
3.3.3. Les cartes d'essai	14
3.3.4. Les capteurs	15

3.3.5. Le module de connectivité.....	15
3.3.6. Les logiciels et les algorithmes.....	15
3.4 Les protocoles de communication dans l'IoT.....	15
3.4.1. HTTP	16
3.4.2. MQTT.....	16
3.4.3. Bluetooth	16
3.5 Quelques applications de l'IoT	16
3.5.1. En général.....	17
3.5.2. Dans l'énergie solaire.....	17
3.6 De la surveillance classique à l'IoT.....	18
3.7 Conclusion.....	19
4. Réalisation d'un système de surveillance PV par IoT.....	20
4.1. Introduction	20
4.2. Matériaux utilisés	21
4.2.1 Carte ESP32.....	22
4.2.2 Capteur de courant.....	23
4.2.3 Capteur de température.....	23
4.2.4 Capteur de lumière.....	24
4.3 Méthodologie.....	25
4.4. Résultats et discussion.....	27
4.5 Défis techniques et solutions :.....	29
5. Conclusions.....	31
Bibliographies.....	33
Annexe A : Démonstrations.....	34

Liste des figures

Figure 2-1: Schéma d'une cellule photovoltaïque [2]	4
Figure 2-2: Illustration d'une batterie au lithium.....	5
Figure 2-3: Photographie d'un onduleur	6
Figure 2-4: Un panneau photovoltaïque poly cristallin	7
Figure 2-5: Un panneau photovoltaïque monocristallins.....	8
Figure 2-6: Représentation du système de chauffe-eau solaire[4].....	11
Figure 3-1: Domaines d'application de l'IoT [9].....	18
Figure 4-1: Diagramme des objectifs du système de surveillance PV basé sur l'IoT	21
Figure 4-2: Un microcontrôleur ESP32	22
Figure 4-3: les vues avant (a) et arrière (b) du capteur de courant utilisé dans notre système	23
Figure 4-4: les vues avant (a) et arrière (b) du capteur de température utilisé dans notre système.....	24
Figure 4-5: Représentation d'un LDR	25
Figure 4-6: Architecture des composants d'un système IoT de surveillance de panneaux solaire.	26
Figure 4-7 : Présentation des résultats affichés sur l'écran LCD et sur ThingSpeak	27
Figure 4-8 : Visualisation en temps réel des paramètres climatiques mesurés (a) Courbe d'évolution de la température au cours du temps ; (b) Indicateur de la température instantanée ; (c) Variation de l'humidité en fonction du temps.	28
Figure 4-9 : Suivi en temps réel du courant et de la luminosité (a) Variation du courant en fonction du temps ; (b) Affichage instantané du courant ; (c) Évolution de la luminosité ; (d) Affichage instantané de l'intensité lumineuse.	29
Figure 6-1: ESP32 – Vue des ports et connexions.....	34
Figure 6-2: Partie du code source du projet	34

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Comparaison des avantages et inconvénients des panneaux polycristallins et monocristallins	10
Tableau 4-1: Résumé de l'ensemble des matériels utilisés pour la réalisation de notre système de surveillance.....	22

Liste des abréviations

AC	Courant Alternatif
BLE	Bluetooth Low Energy
DC	Courant Continu
GPS	Les systèmes de positionnement global
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IoT	L'internet des objets
LCD	L'écran à cristaux liquides
LDR	Light dependent Resistor
M2M	Machine à machine
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
PV	Panneau photovoltaïque
RFID	L'identification par radiofréquence
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables

1. Introduction

L'énergie renouvelable, ou énergie verte, constitue aujourd'hui l'une des sources les plus prometteuses vers lesquelles le monde s'oriente, dans le but d'améliorer la qualité de vie sur Terre, aussi bien pour les êtres humains que pour la faune et la flore. Parmi ces énergies, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue par son caractère propre et non polluant, sa disponibilité, ainsi que sa simplicité d'entretien.

Elle est particulièrement utilisée dans les zones isolées ou rurales, notamment pour l'éclairage et l'irrigation agricole. Un système photovoltaïque typique se compose de panneaux solaires, de batteries de stockage, d'un contrôleur de charge, d'un onduleur, ainsi que de dispositifs de surveillance et de protection.

Par ailleurs, l'Internet des objets (IoT) représente une avancée technologique majeure, permettant de connecter des objets à Internet afin de les surveiller, les contrôler et les gérer à distance. Intégré à l'énergie solaire, l'IoT ouvre de nouvelles perspectives pour optimiser la gestion et l'efficacité des installations photovoltaïques, notamment grâce à la collecte de données, à l'analyse des performances, à la maintenance préventive et à la prise de décision autonome.

Malgré le potentiel considérable des systèmes photovoltaïques, leur surveillance reste encore, dans bien des cas, traditionnelle et peu automatisée. Cela soulève plusieurs interrogations :

- Pourquoi la surveillance des panneaux solaires est-elle nécessaire ?
- Quelle est la technologie la plus adaptée aujourd'hui pour assurer cette surveillance ?
- Quels sont les principaux défis à relever dans ce domaine ?

Et surtout, comment tirer pleinement parti des fonctionnalités de l'IoT pour améliorer la gestion des installations photovoltaïques ?

Ce mini projet vise à répondre concrètement à ces questions, en concevant un système de surveillance en temps réel basé sur l'IoT, afin d'améliorer l'efficacité et la performance des panneaux solaires. Il a pour principaux objectifs de :

- ✓ Surveiller les cellules solaires à l'aide de capteurs connectés recueillant des données telles que la température, la tension et l'irradiance solaire

1. Introduction

- ✓ Détecter les modifications apportées au système.
- ✓ Optimiser la production énergétique et la fiabilité grâce à une surveillance intelligente.

Ce travail s'inscrit dans une dynamique d'innovation technologique, en vue d'améliorer l'exploitation de l'énergie solaire grâce à une supervision intelligente et à distance des panneaux photovoltaïques. Il s'inspire notamment des travaux de Mamtaz Alam, qui a développé des systèmes de surveillance solaire à base d'ESP32. Leur approche constitue une base solide sur laquelle nous avons construit une solution enrichie et contextualisée. Notre objectif est de reconstruire, analyser et améliorer un système existant, en apportant une nouvelle perspective sur son implémentation, l'expérience utilisateur et l'intégration technologique. Ce projet présente ainsi une double vocation : pédagogique (formation à la pratique de l'IoT et des énergies renouvelables) et pratique (proposition d'une solution applicable sur le terrain).

Dans cette optique, nous avons développé un système de surveillance de l'énergie solaire basé sur un microcontrôleur ESP32 Wi-Fi, capable d'envoyer en continu les données collectées vers le serveur cloud ThingSpeak. Les capteurs mesurent le courant produit par les panneaux, la température ambiante et l'intensité lumineuse. Ces données sont transmises et visualisées à distance en temps réel. Le système fonctionne sans intervention humaine directe, avec la capacité de détecter des anomalies, de les analyser et de proposer des solutions. Dans notre projet, nous nous sommes concentrés sur la surveillance de l'état de la carte et la détection des changements.

Enfin, ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Il commence par une introduction générale présentant le contexte, les motivations, les objectifs et la problématique. Il se poursuit par une étude détaillée de l'énergie photovoltaïque et de ses composants, puis par une exploration des technologies IoT et de leurs applications énergétiques. Le chapitre suivant expose la réalisation pratique du projet, en détaillant les choix techniques, l'environnement de développement et les étapes de mise en œuvre. Le mémoire se conclut par une synthèse des résultats obtenus, une réflexion sur les limites du projet, ainsi que des perspectives d'amélioration pour les travaux futurs.

2. Energie solaire photovoltaïque

2.1 Comprendre les panneaux solaires : définition et importance

L'énergie solaire photovoltaïque utilise la lumière du soleil comme source d'énergie, en transformant les photons qui atteignent la surface de la Terre en électricité. Cette conversion se fait grâce à un matériau semi-conducteur contenu dans une cellule photovoltaïque, où l'énergie lumineuse est transmise aux électrons, provoquant ainsi l'effet photoélectrique. Ce phénomène s'opère sans mécanisme en mouvement, sans émission de polluants et sans recours à des carburants fossiles.

L'effet photoélectrique a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel. Le mot photovoltaïque provient du grec phos (lumière) et du nom du physicien Alessandro Volta, en reconnaissance de son apport essentiel à la recherche sur l'électricité.

L'énergie solaire peut être utilisée de façon directe, notamment dans des domaines tels que l'agriculture (par la photosynthèse), le séchage, le chauffage, ou encore dans diverses applications scientifiques. Sous sa forme photovoltaïque, elle permet la production d'électricité à l'aide de panneaux solaires composés de cellules reliées en série.

Cette énergie constitue une alternative durable et efficace, particulièrement adaptée aux zones isolées. Elle peut également être stockée dans des batteries, grâce à la disponibilité quasi permanente de la lumière solaire à la surface de la Terre. Les applications les plus courantes de l'énergie solaire incluent [1]:

- La production de chaleur (énergie solaire thermique)
- La production d'électricité (énergie solaire photovoltaïque)
- La production de mouvement (énergie solaire mécanique).

2.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant fondamental utilisé pour convertir l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La tension produite dépend directement de l'intensité de la lumière incidente. Elle est constituée de deux fines couches de matériaux semi-conducteurs, comme illustré dans la Figure (2-1).

La couche N est riche en électrons libres, tandis que la couche P est déficiente en électrons (ou riche en "trous"). Cette différence crée un potentiel électrique entre les deux. Lorsque les photons de la lumière solaire atteignent la cellule, leur énergie est absorbée par les électrons de la couche N. Ces électrons gagnent suffisamment d'énergie pour franchir la barrière de potentiel (ou jonction PN) qui sépare les deux couches, générant ainsi un courant électrique continu.

La jonction PN, formée à l'interface entre les couches N et P, agit comme une barrière électrique : elle permet aux électrons de circuler dans une seule direction, empêchant leur retour, ce qui produit une tension électrique. Sous l'effet du rayonnement solaire, les liaisons atomiques au sein du semi-conducteur se brisent, libérant des électrons. Ceux-ci se déplacent alors de la couche N vers la couche P, créant un DC. L'ensemble de ce processus est illustré de manière synthétique dans la Figure (2-1).

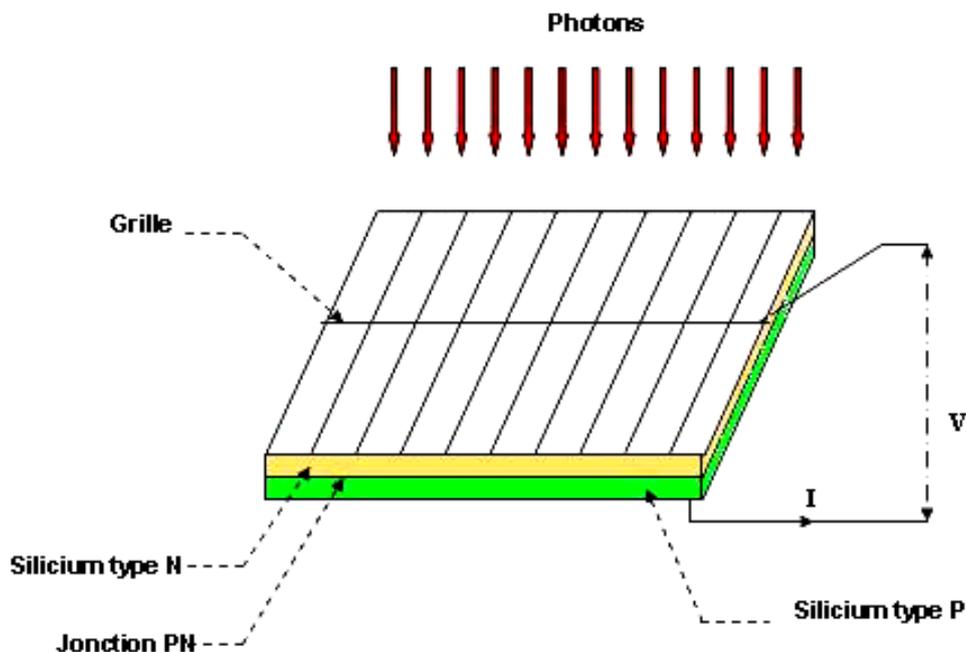


Figure 2-1: Schéma d'une cellule photovoltaïque [2]

2.3 Composant d'un system photovoltaïque

Un système photovoltaïque est généralement composé des éléments suivants : un champ de panneaux solaires, un régulateur de charge, des batteries de stockage, un onduleur, des câbles électriques, ainsi que des récepteurs destinés à consommer l'électricité produite [3].

2.3.a Les batteries

Les batteries ont pour rôle de stocker chimiquement l'énergie électrique produite en DC par les panneaux durant la journée, afin de la rendre disponible en l'absence de soleil. Elles sont essentielles dans les systèmes hors réseau « *off-grid* », où aucune alimentation publique n'est disponible.

On distingue trois principaux types :

- ❖ **Batteries au lithium** : présentés dans la Figure 2-2, très efficaces, longue durée de vie, peu ou pas d'entretien, mais coût élevé.
- ❖ **Batteries au gel** : durables et sans entretien, mais également onéreuses.
- ❖ **Batteries au plomb** : moins chères, mais avec une durée de vie plus courte et un besoin d'entretien régulier.



Figure 2-2: Illustration d'une batterie au lithium

2.3.b Les câbles

Les câbles électriques assurent le transport de l'électricité à travers l'installation. Leur dimensionnement est crucial pour éviter des pertes d'énergie dues aux chutes de tension.

2.3.c Les onduleurs (DC/AC)

Les onduleurs sont des dispositifs qui convertissent le DC produit par les panneaux ou stocké dans les batteries en AC, utilisable par la majorité des appareils électroménagers (Voir la Figure 2-3).



Figure 2-3: Photographie d'un onduleur

2.3.d Les transformateurs

Les transformateurs permettent d'adapter la tension électrique selon les besoins des récepteurs, que ce soit pour changer de niveau de tension en DC ou pour convertir en AC

2.4 Types de panneaux solaires

L'efficacité d'un système photovoltaïque dépend en grande partie du type de panneau solaire utilisé. Les deux technologies les plus répandues sont les panneaux monocristallins et Poly-cristallins, tous deux fabriqués à base de silicium mais avec des procédés et des performances différentes. Cette section présente leurs caractéristiques, ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

2.4.1 La technologie poly-cristalline

Les panneaux solaires poly cristallins (Figure 2-4), reconnaissables à leur couleur bleutée, sont fabriqués à partir de fragments de silicium fondu puis solidifiés ensemble. Contrairement aux

2. Energie solaire photovoltaïque

monocristallins, leurs cristaux sont orientés dans différentes directions, ce qui rend leur apparence moins uniforme. Cette structure permet une bonne capture de la lumière, bien qu'elle offre un rendement légèrement inférieur. Ces panneaux sont couramment utilisés dans les maisons, les bâtiments et l'éclairage public. Leur principal avantage réside dans leur coût plus abordable, tout en assurant une efficacité convenable. Cependant, ils sont moins performants que les monocristallins à surface équivalente, et nécessitent donc plus d'espace pour produire la même quantité d'énergie.

Leur fabrication se déroule en plusieurs étapes :

- ✓ Des morceaux de silicium sont fondus dans une cuve pour former une masse homogène.
- ✓ Ce silicium fondu est ensuite refroidi dans un moule spécifique à l'aide de réfrigérants.
- ✓ Enfin, les blocs solidifiés sont découpés en fines plaquettes, qui sont ensuite assemblées pour former les panneaux solaires polycristallins.



Figure 2-4: Un panneau photovoltaïque poly cristallin

Grâce à leur coût relativement faible et à un rendement satisfaisant, les panneaux polycristallins représentent une solution intéressante pour les habitations et les petites installations souhaitant adopter une alternative énergétique durable à moindre coût.

2.4.1 La technologie monocristalline

Les panneaux solaires monocristallins décrits dans la Figure 2-5 sont composés de silicium pur, ce qui leur confère un rendement élevé, généralement compris entre 13 % et 19 %. Ce type de panneau est largement répandu sur le marché en raison de ses performances. Il se distingue par une production énergétique efficace, une longue durée de vie, ainsi qu'une conception adaptable à divers types de surfaces.

Comment est-il fabriqué ?

Le processus de fabrication commence par l'extraction d'un cristal de silicium unique, soigneusement cultivé, qui est ensuite fondu dans un creuset spécial pour former un lingot cylindrique. Ce lingot est ensuite découpé en fines plaquettes, qui seront transformées en cellules photovoltaïques.

Ces cellules sont ensuite assemblées en série ou en parallèle pour constituer le panneau solaire. Leur couleur noire caractéristique provient de la pureté du silicium utilisé. Les cadres et le fond du panneau peuvent, quant à eux, varier en couleur afin de s'harmoniser avec les différentes conceptions architecturales.



Figure 2-5: Un panneau photovoltaïque monocristallins

2.5 Avantages et Inconvénients des Panneaux Solaires Polycristallins et Monocristallins

Les panneaux solaires polycristallins et monocristallins présentent chacun des caractéristiques spécifiques, avec des avantages et des inconvénients qui influencent leur choix selon les besoins et les contraintes d'installation. Afin de mieux comprendre ces différences, le tableau ci-dessous compare ces deux types de panneaux selon plusieurs critères techniques et économiques.

2. Energie solaire photovoltaïque

Tableau 2-1: Comparaison des avantages et inconvénients des panneaux polycristallins et monocristallins

Poly cristallin

Monocristallin

Avantages

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">✓ Peu coûteux grâce à son procédé de fabrication basé sur la réduction des coûts de production.✓ Légèrement moins efficace que les panneaux monocristallins, mais offre une puissance et une efficacité fiables pour une variété d'applications.✓ L'utilisation et le recyclage de fragments de cristaux de silicium réduisent les déchets et les résidus lors de la production et sont respectueux de l'environnement.✓ Le silicium fragmenté confère aux panneaux polycristallins une couleur bleue distinctive, qui contraste avec l'aspect noir des panneaux monocristallins, leur conférant une apparence attrayante.✓ Ce type de panneaux carrés est considéré comme l'un des plus beaux types, car il ne contient pas d'espaces entre les cellules, ce qui lui donne un aspect uniforme. | <ul style="list-style-type: none">✓ Convertit plus de lumière solaire en électricité, ce qui le rend plus efficace et rentable, idéal pour les toits avec un espace limité.✓ Offre une efficacité de plus de 25 % et une productivité élevée.✓ En raison de ses matériaux, il est souvent accompagné d'une garantie prolongée et d'une longue durée de vie.✓ Sa couleur noire et ses cadres personnalisables le rendent attrayant et bien conçu.✓ Bon investissement pour ceux qui cherchent une efficacité maximale à long terme. |
|---|--|

Inconvénients

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Prend beaucoup de place par rapport aux panneaux monocristallins.• Moins efficace par rapport aux monocristallins, environ 14 %.• Les performances diminuent dans les zones à faible luminosité.• Absorbe beaucoup de chaleur, ce qui peut affecter son efficacité. | <ul style="list-style-type: none">• Panneaux coûteux en raison du coût de fabrication et de leur complexité.• Ses performances diminuent à haute température.• Ne convient pas à certains toits en raison de sa grande taille et de son poids. |
|--|--|
-

2.6 Applications de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque, en convertissant la lumière du soleil en électricité, offre une solution renouvelable et durable pour divers besoins. Ses applications sont vastes et vont au-delà de la simple production d'électricité pour les foyers. De nombreuses industries et systèmes utilitaires

2. Energie solaire photovoltaïque

exploitent cette technologie pour résoudre des défis importants, comme la pénurie d'eau potable, la production d'eau chaude, ou encore l'approvisionnement en eau pour des zones isolées. Ces applications contribuent à rendre les solutions énergétiques plus écologiques et plus accessibles, tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles.

2.6.1. Dessalement de l'eau de mer

Une solution efficace pour faire face à la pénurie d'eau potable consiste à installer des usines de dessalement. Ces installations éliminent le sel de l'eau saumâtre pour la rendre potable et ainsi répondre aux besoins en eau des populations. Le recours à l'énergie photovoltaïque pour alimenter ces usines permet de réduire la consommation d'énergie traditionnelle et de rendre le processus plus durable.

2.6.2. Chauffe-eau solaire

Le chauffe-eau solaire utilise l'énergie du soleil pour produire de l'eau chaude. Ce système repose sur des panneaux solaires qui captent la chaleur du soleil, augmentant ainsi la température du fluide qui circule à travers eux. L'eau chauffée est ensuite stockée dans un réservoir isolé, permettant son utilisation à tout moment de la journée ou de la nuit. Ce système est à la fois économique et respectueux de l'environnement, offrant une solution durable pour la production d'eau chaude. Voir la Figure 2-6 pour une illustration du système de chauffe-eau solaire.



Figure 2-6: Représentation du système de chauffe-eau solaire[4]

2.6.3. Pompage solaire

Les systèmes de pompage solaire convertissent l'énergie solaire en électricité pour alimenter directement des pompes, permettant de pomper de l'eau à des fins agricoles, industrielles ou domestiques. L'énergie peut être stockée sous forme électrique ou, plus couramment, sous forme d'eau dans un réservoir. Le stockage de l'eau est souvent préféré, surtout dans des environnements où les infrastructures électriques sont limitées. Pour assurer une gestion optimale, des contrôleurs de pompe solaire sont utilisés afin de réguler leur fonctionnement et éviter tout défaut. Un système de pompage solaire se compose généralement des éléments suivants [5]:

- Générateur photovoltaïque
- Pompe
- Dispositifs de commande et de contrôle
- Partie de stockage

2.7. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents composants d'un système photovoltaïque. Nous avons d'abord donné une définition générale de l'énergie photovoltaïque, suivi du principe de fonctionnement des cellules solaires. Ensuite, nous avons détaillé les composants de base d'un système photovoltaïque, ainsi que les différents types de panneaux solaires. Enfin, nous avons exploré les diverses applications de l'énergie photovoltaïque.

3. L'internet des objets

3.1 Introduction

L'IoT désigne le concept de connecter différents objets à Internet afin de les contrôler, les surveiller et les gérer à distance. L'idée principale repose sur le fait que tout appareil capable de se connecter à Internet devient un appareil intelligent, capable d'interagir avec d'autres objets ou systèmes informatiques.

Ces appareils, tels que des capteurs ou des véhicules, communiquent entre eux via Internet pour échanger diverses données. Cette communication permet la prise de décisions autonomes, souvent en temps réel, à partir des informations collectées.

Techniquement, l'IoT repose sur une architecture réseau qui facilite cette interaction entre les objets connectés. Cette architecture intègre plusieurs éléments essentiels, notamment des capteurs, des réseaux sans fil, des systèmes informatiques (comme la 5G), ainsi que des plateformes de stockage et de traitement de données.

En combinant tous ces composants, l'IoT permet la création de systèmes robustes et performants, capables de répondre aux besoins d'un monde de plus en plus connecté.

3.2 Définition de l'IoT

L'IoT représente une connexion directe ou indirecte entre Internet, les maisons, les panneaux solaires, etc., via des capteurs, en s'appuyant sur l'identification et la gestion intelligentes des objets. Parmi les capteurs utilisés, on trouve : l'identification par radiofréquence (RFID), les capteurs thermiques et climatiques, les capteurs infrarouges, les systèmes de positionnement global (GPS) ainsi que les scanners laser.

Tous ces dispositifs sont connectés à Internet pour permettre l'analyse des données et anticiper les problèmes ou scénarios potentiels, avec une intervention humaine minimale.

L'IoT est présent dans de nombreux domaines tels que le transport intelligent, les services gouvernementaux, la surveillance du trafic pour les véhicules et les piétons, la gestion des aéroports, ainsi que dans le suivi de la santé personnelle.

3. L'internet des objets

De manière générale, le réseau IoT permet la collecte d'informations, la localisation, le suivi, la surveillance et la gestion des données.

Cette approche répond à la nécessité d'assurer des conditions de vie optimales, tout en limitant les interventions humaines et en garantissant une efficacité maximale [6].

3.3 Fonctionnement et composants d'un système IoT

Pour comprendre un système IoT, il est essentiel d'en étudier le fonctionnement général et l'architecture technique. Ces éléments définissent comment les différents composants interagissent pour collecter, transmettre et traiter les données.

3.3.1. L'architecture de l'IoT

Une architecture technique constitue un cadre méthodologique permettant aux concepteurs et développeurs d'analyser un système dans sa globalité, puis de le diviser en différentes sections pour en faciliter la conception et la gestion. Selon les normes internationales (GS1), « une architecture de référence est une base essentielle qui facilite l'intégration de diverses technologies au sein des applications IoT » [7].

Un système IoT repose sur plusieurs composants essentiels qui travaillent ensemble pour assurer son bon fonctionnement. Ces éléments, allant des sources d'énergie aux capteurs en passant par les modules de communication et les logiciels, permettent de collecter, transmettre et traiter les données. Leur choix et leur intégration sont cruciaux pour garantir l'efficacité, la fiabilité et l'autonomie du système.

3.3.2. Les sources d'énergie

Les sources d'énergie jouent un rôle essentiel en fournissant l'alimentation nécessaire au fonctionnement de l'IoT. Parmi elles, on trouve les batteries, les panneaux solaires, les piles à combustible et les capteurs d'énergie cinétique.

3.3.3. Les cartes d'essai

La carte d'essai est un outil fondamental pour les développeurs IoT. Elle permet de tester et de prototyper des circuits électroniques avant leur intégration dans un produit final, facilitant ainsi la phase de conception et de validation.

3.3.4. Les capteurs

Les capteurs sont des éléments clés de l'IoT, car ils permettent aux dispositifs connectés de collecter diverses données environnementales. Ils peuvent, par exemple, surveiller la température, mesurer la tension et le courant, ou encore détecter des changements physiques. Les informations collectées par les capteurs sont ensuite transmises à un microcontrôleur pour être analysées et traitées.

3.3.5. Le module de connectivité

Le module de communication ESP32 (Wi-Fi) assure la connectivité des objets à Internet. Il permet la transmission de données, comme les mesures de température ou de tension d'un panneau solaire, vers un serveur ou le cloud.

Ses principales fonctions sont :

- ✓ L'envoi des données collectées par les capteurs vers le cloud ;
- ✓ L'émission d'alertes ou de notifications en cas de dysfonctionnements ;
- ✓ La surveillance à distance du système via un téléphone ou un ordinateur.

3.3.6. Les logiciels et les algorithmes

Dans un système de surveillance IoT, les logiciels et algorithmes sont indispensables pour traiter et analyser les données collectées par les capteurs. Ces programmes permettent également d'envoyer les informations vers le cloud et d'exécuter diverses actions automatiques selon les besoins spécifiques du système [8].

3.4 Les protocoles de communication dans l'IoT

L'IoT désigne un réseau d'appareils physiques, tels que des capteurs, connectés à Internet et capables d'échanger des données. Pour permettre cet échange, plusieurs protocoles de communication spécifiques sont utilisés, adaptés aux besoins variés des dispositifs IoT.

Voici quelques-uns des protocoles les plus couramment employés :

3.4.1. HTTP

« *HyperText Transfer Protocol* » (HTTP) est un protocole de communication Web basé sur un modèle de requête/réponse. C'est le langage utilisé par les navigateurs pour échanger des informations avec les sites Web. Dans l'IoT, HTTP est souvent utilisé pour les communications entre les appareils et les services cloud, notamment dans des applications de gestion, de contrôle à distance et de surveillance pour la maintenance.

3.4.2. MQTT

« *Message Queuing Telemetry Transport* » (MQTT) est un protocole léger conçu pour les communications de machine à machine (M2M) dans l'IoT. Il fonctionne selon un modèle publier/s'abonner : les appareils publient des messages vers un serveur central (généralement dans le cloud), qui les distribue ensuite aux utilisateurs, moniteurs ou agents de maintenance.

Grâce à sa faible consommation d'énergie et de bande passante, MQTT est particulièrement adapté aux dispositifs IoT à ressources limitées. Il est notamment utilisé dans la surveillance énergétique photovoltaïque pour le suivi à distance de paramètres tels que l'énergie produite et la température.

3.4.3. Bluetooth

« *Bluetooth* » est une technologie de communication sans fil à courte portée largement utilisée dans l'IoT pour connecter différents appareils. On le retrouve couramment dans les applications domestiques, telles que les interrupteurs d'éclairage, les capteurs de température et les systèmes de refroidissement. « *Bluetooth* » permet une coordination efficace entre les capteurs et les dispositifs IoT en assurant un échange rapide et local des données [8].

3.5 Quelques applications de l'IoT

Avec son évolution rapide, l'IoT trouve aujourd'hui des applications dans de nombreux domaines. Grâce à sa capacité à connecter et à automatiser différents systèmes, il améliore l'efficacité, la sécurité et le confort dans divers secteurs. Ce qui suit présente quelques exemples d'utilisation de l'IoT, tant dans la vie quotidienne que dans des domaines spécifiques comme l'énergie solaire (voir la Figure 3-1).

3.5.1. En général

➤ Domotique

L'IoT est largement utilisé dans les maisons intelligentes pour contrôler l'éclairage, les appareils électroménagers, les systèmes de sécurité, les thermostats, etc. Les capteurs et moteurs intelligents permettent de surveiller et de contrôler différents aspects de la maison à distance.

➤ Industrie

Dans le secteur industriel, l'IoT sert à surveiller les processus de production, à contrôler la qualité des produits et à assurer le suivi des équipements, machines, pièces et matériaux. Cela permet d'optimiser la production et de réduire les coûts.

➤ E-commerce

L'application de l'IoT dans le e-commerce offre une expérience d'achat connectée et personnalisée. Elle permet notamment le suivi en temps réel des commandes, la gestion automatisée des stocks et la recommandation de produits intelligents.

➤ Sécurité

L'IoT est également utilisé pour renforcer la sécurité des bâtiments, des infrastructures et des zones sensibles grâce à des systèmes de surveillance avancés [6]

3.5.2. Dans l'énergie solaire

L'IoT joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la récupération d'énergie et l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques. Parmi ses applications clés :

➤ Surveillance et maintenance proactives

Grâce à l'IoT, les performances des systèmes solaires peuvent être surveillées en continu. L'analyse des données collectées permet de détecter rapidement les problèmes potentiels, assurant une maintenance proactive qui améliore les performances et réduit les temps d'arrêt.

➤ Surveillance à distance et contrôle intelligent

L'IoT permet de contrôler les systèmes solaires à distance via des applications mobiles ou des plateformes en ligne. Cela facilite la gestion du système, augmente la flexibilité et améliore le confort des utilisateurs.

3. L'internet des objets

➤ Collecte de données en temps réel

L'IoT permet la collecte en temps réel de diverses données provenant des panneaux solaires, des capteurs de température et de climat, entre autres. Ces informations (taux de production d'énergie, rayonnement solaire, température, courant) permettent d'optimiser l'efficacité, la performance et la durabilité des systèmes d'énergie solaire [9].

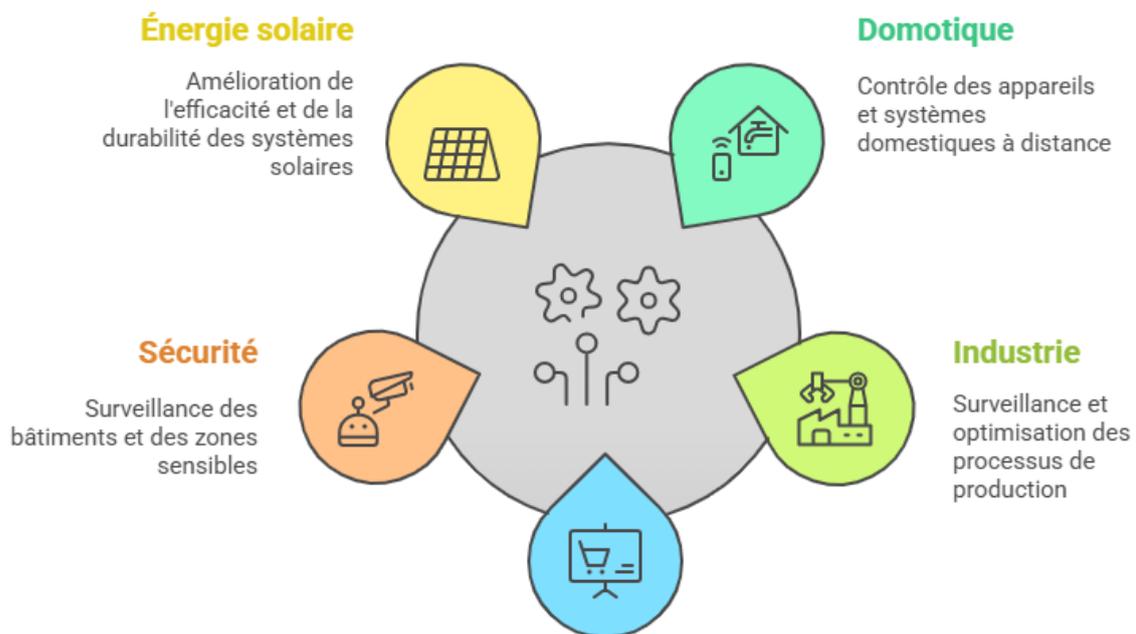


Figure 3-1: Domaines d'application de l'IoT [9]

3.6 De la surveillance classique à l'IoT

La technologie de surveillance des panneaux solaires a considérablement évolué au fil des années pour répondre aux besoins croissants de l'industrie solaire en matière de performances, de fiabilité et de maintenance.

Aujourd'hui, deux grandes approches de surveillance coexistent : les systèmes traditionnels et les systèmes basés sur l'IoT. Voici un aperçu des principales différences entre ces deux

Méthodes :

Dans les systèmes traditionnels, la surveillance s'effectue manuellement ou à l'aide de capteurs locaux non connectés. Les données sont traitées directement sur le site des panneaux et souvent enregistrées de manière limitée. Les défauts ne sont détectés qu'après leur apparition, ce qui retarde les opérations de maintenance et peut aggraver les pertes.

3. L'internet des objets

En revanche, les systèmes basés sur l'IoT intègrent des capteurs connectés à Internet, capables de transmettre automatiquement les données via des réseaux « *Wi-Fi* » vers un cloud centralisé. Cette technologie permet aux utilisateurs d'accéder en temps réel aux informations sur les performances via leur smartphone ou leur ordinateur, facilitant ainsi l'analyse rapide et la résolution immédiate des problèmes. De plus, des notifications instantanées peuvent être envoyées en cas de panne ou de dégradation, minimisant ainsi les pertes.

Sur le plan des coûts, les systèmes traditionnels sont moins onéreux à l'installation, mais leurs besoins fréquents en maintenance peuvent entraîner des dépenses importantes à long terme.

À l'inverse, bien que les systèmes IoT nécessitent un investissement initial plus élevé, ils permettent de réduire considérablement les coûts d'entretien grâce au diagnostic précoce et à la surveillance continue des performances.

Enfin, en termes d'évolution, les systèmes traditionnels offrent peu de flexibilité et sont difficiles à mettre à jour. Les systèmes IoT, quant à eux, se distinguent par leur capacité d'adaptation et d'intégration avec d'autres technologies, leur permettant d'évoluer au rythme des avancées technologiques.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord fourni une définition générale de l'IoT, suivie des principaux composants d'un système IoT et de son fonctionnement. Ensuite, nous avons exploré les protocoles de communication utilisés pour l'échange de données dans un système IoT. Nous avons également présenté diverses applications de l'IoT, notamment dans le domaine de l'énergie solaire. Enfin, une comparaison a été effectuée entre la surveillance traditionnelle et celle basée sur l'IoT, mettant en évidence les avantages de cette dernière pour l'amélioration de la gestion et de la performance des systèmes photovoltaïques. Ces technologies permettent d'exploiter au mieux l'énergie solaire, tout en optimisant son efficacité et sa gestion.

4. Réalisation d'un système de surveillance PV par IoT

4.1. Introduction

Notre passion pour l'énergie solaire a commencé lors de notre expérience directe avec les panneaux photovoltaïques à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER). Au fur et à mesure de l'étude et de l'observation de ces systèmes, nous avons constaté certaines limitations, notamment en ce qui concerne leur contrôle et leur gestion des performances. Bien que l'énergie solaire soit en pleine expansion et largement utilisée, nous avons remarqué que les performances des panneaux sont souvent affectées par des facteurs internes et externes, ce qui rend leur surveillance cruciale.

C'est en observant ces défis que nous avons trouvé l'inspiration pour notre projet. En nous basant sur le travail de Mamtaz Alam [10], qui a développé un système de surveillance des panneaux photovoltaïques utilisant l'IoT (Internet des objets) via une plateforme cloud, nous avons voulu apporter notre propre contribution à la solution de ces problèmes. Comme mentionné dans l'introduction générale, l'idée de Mamtaz Alam [10] nous a inspirés à explorer cette technologie pour améliorer la gestion et la surveillance des systèmes photovoltaïques.

Ainsi, nous avons décidé de développer un système de surveillance intelligent, capable de suivre en temps réel des paramètres essentiels tels que l'intensité lumineuse, la température et le courant des panneaux. Ce système, intégré à l'Internet des objets, permet une analyse des données à distance, facilitant ainsi l'optimisation et la maintenance proactive des panneaux photovoltaïques. L'objectif de ce projet est de tester cette approche innovante au Centre URAER, en espérant que cette solution puisse surmonter les limitations actuelles et offrir une gestion plus efficace et autonome de l'énergie solaire.

4.2. Matériaux utilisés

En termes de matériel, nous connectons les panneaux solaires à des capteurs spécialisés (capteurs de lumière, capteurs de température, et capteur de courant.), qui transmettent les informations au contrôleur ESP32. Ce dernier surveille en permanence l'état des panneaux, la température et le rayonnement solaire, et permet une gestion à distance du système via Internet. Grâce à cette infrastructure, nous pouvons accéder aux données de manière instantanée, depuis n'importe quel endroit, et prendre des décisions éclairées pour l'optimisation et la maintenance proactive des panneaux solaires. Le diagramme suivant Figure 4.1 donne un aperçu de nos principaux objectifs lors de la création de ce système, et Le Tableau 4-1 suivant présente tous les matériaux utilisés dans notre projet.

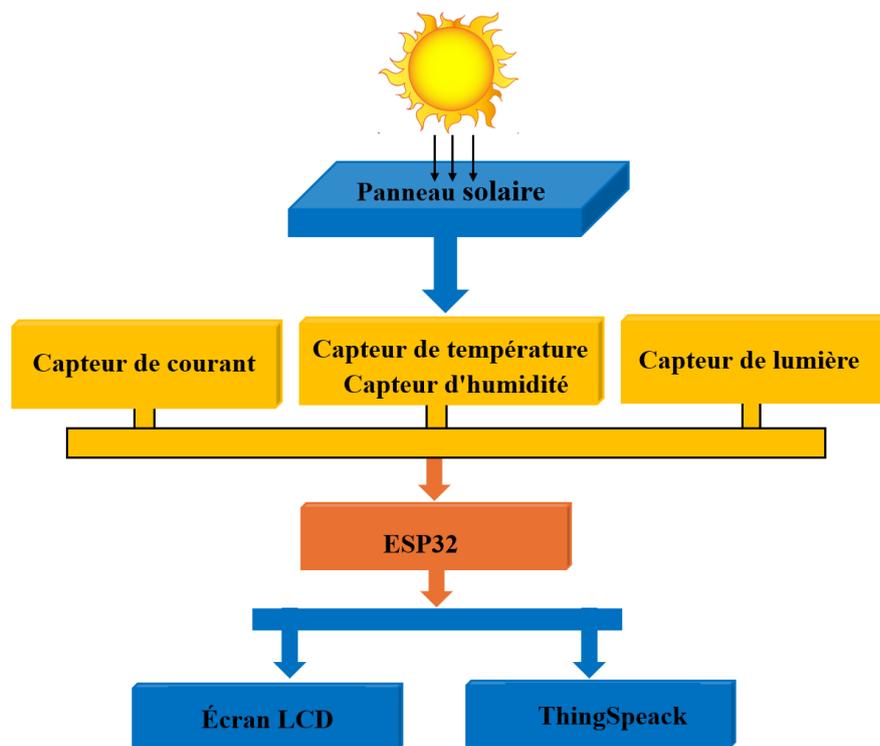


Figure 4-1: Diagramme des objectifs du système de surveillance PV basé sur l'IoT

Tableau 4-1: Résumé de l'ensemble des matériels utilisés pour la réalisation de notre système de surveillance.

Matériel	Fonction	Quantité
Câble micro USB	Alimentation et communication avec le PC	1
Capteur de lumière	Détection de l'intensité lumineuse	1
Capteur de température	Mesure de la température ambiante	1
Capteur de courant	Mesure de courant produite	1
Écran LCD	Affichage local des données mesurées	1
I2C	Simplifie la connexion LCD	1
ESP32	Lecture des capteurs et communication Wi-Fi	1
Filles (équipe projet)	Conception, assemblage et programmation du système	
Panneau solaire 20W	Génération d'énergie solaire	1
Plateforme IoT (ThingSpeak)	Surveillance, stockage et analyse des données en temps réel	1

4.2.1 Carte ESP32

Le microcontrôleur ESP32 montré dans la Figure 4.2 est utilisé dans l'étude pour automatiser les systèmes photovoltaïques pour le suivi du soleil. Il est également utilisé pour capturer des données de capteurs, tels que des capteurs de lumière, de température et de courant dans notre cas, ou de tension dans d'autres cas, permettant une surveillance en temps réel de l'état du panneau pour éviter les pertes et les coûts, améliorant ainsi considérablement l'efficacité énergétique et le rendement par rapport aux systèmes traditionnels.



Figure 4-2: Un microcontrôleur ESP32

4.2.2 Capteur de courant

Les capteurs de courant affichés dans la Figure 4.3 sont des dispositifs essentiels utilisés pour mesurer la quantité de courant électrique circulant dans un panneau solaire et constituent un capteur essentiel pour la surveillance et la protection des systèmes électriques. Ils se présentent sous différentes formes, telles que les capteurs à effet Hall et les transformateurs de courant, chacun ayant ses propres applications spécifiques. Le capteur de courant contribue à accroître l'efficacité énergétique, la maintenance prédictive et la sécurité des systèmes électriques.

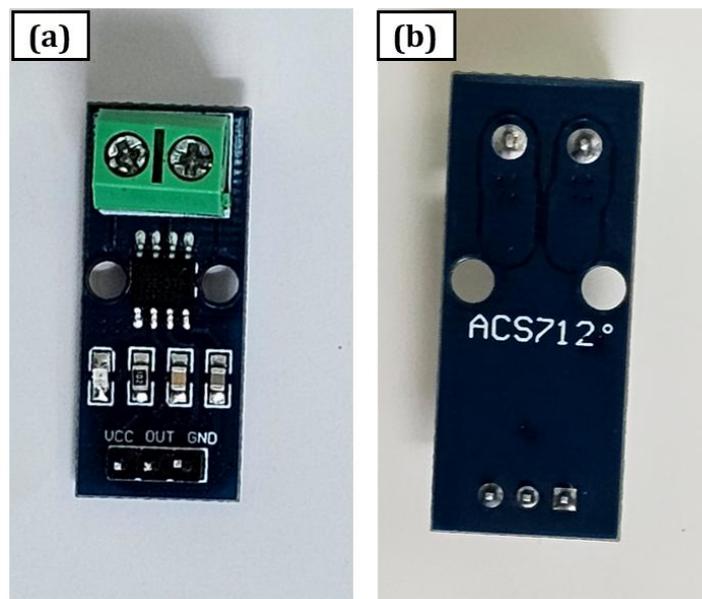


Figure 4-3: les vues avant (a) et arrière (b) du capteur de courant utilisé dans notre système

4.2.3 Capteur de température

Les capteurs de température visualisés dans la Figure 4.4 sont des dispositifs utilisés pour mesurer la chaleur ou l'identité thermique d'un objet ou d'un environnement. Il joue un rôle crucial dans de nombreux domaines, tels que la météorologie, les systèmes de contrôle climatique et les systèmes solaires. Il en existe de nombreux types, tels que les capteurs de température, les thermomètres à résistance et les capteurs infrarouges.

Dans ce projet, nous utiliserons le capteur pour mesurer la température tombant sur le panneau solaire.

Et recevez des informations complètes afin de détecter toute augmentation de température, fournir des alertes immédiates et améliorer les performances via le cloud sur le site ThingSpeak.

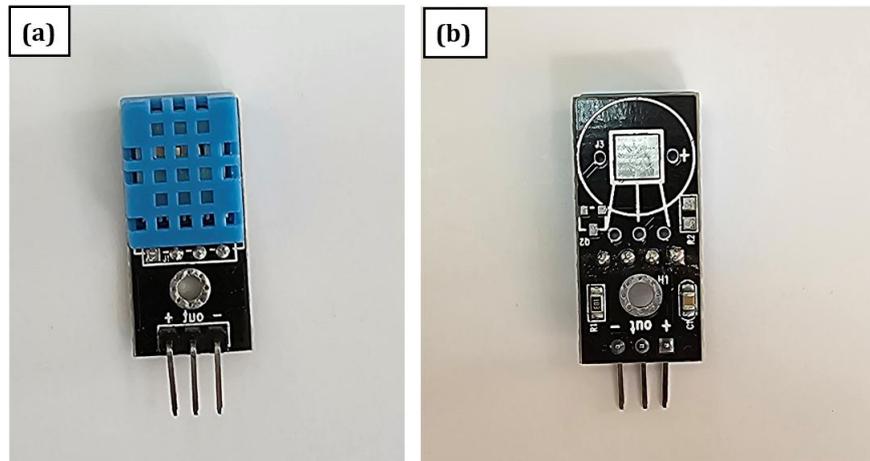


Figure 4-4: les vues avant (a) et arrière (b) du capteur de température utilisé dans notre système

4.2.4 Capteur de lumière

Un capteur de lumière est un appareil conçu pour détecter et mesurer la lumière tombant sur la surface d'un panneau solaire. Dans notre projet, nous utilisons un capteur de lumière de type « *Light dependent Resistor* » (LDR) (Voir la Figure 4.5), c'est-à-dire une résistance dont la valeur varie en fonction de l'intensité lumineuse. Le capteur fonctionne à l'aide de différentes technologies et configurations où le phototransistor réagit aux changements de lumière en modifiant le courant.

Un capteur de lumière est souvent utilisé avec des microcontrôleurs comme l'ESP32 pour obtenir des informations précises sur l'intensité de la lumière tombant sur le panneau solaire.

Lorsqu'un LDR est exposé à la lumière, sa résistance diminue. Plus l'intensité lumineuse est élevée, plus la résistance est faible.

Plus l'intensité lumineuse est faible, plus sa résistance est grande, c'est-à-dire que dans l'obscurité, sa résistance augmente. Ils sont également utilisés dans des applications telles que l'éclairage intelligent, la surveillance de l'environnement et d'autres systèmes automatisés.



Figure 4-5: Représentation d'un LDR

4.3 Méthodologie

Les centrales solaires nécessitent une surveillance continue et minutieuse des cellules photovoltaïques afin de maximiser leur production d'énergie et d'assurer des performances optimales. L'énergie solaire représente l'avenir de la production énergétique mondiale car elle est abondante, renouvelable et propre. Grâce à l'ensoleillement quotidien, cette ressource est inépuisable et peut être utilisée pour produire de l'électricité verte. Pour maximiser ce potentiel, de nombreuses recherches et innovations sont menées pour améliorer l'efficacité des cellules solaires et réduire leurs coûts de production. À travers ce projet, nous souhaitons contribuer à cet effort mondial en proposant une solution innovante de surveillance des panneaux solaires.

Dans ce contexte, nous avons proposé de développer un système de surveillance intelligent des panneaux solaires utilisant l'IoT, basé sur le module Wifi ESP32. Ce choix technologique nous permet d'assurer une communication fiable et en temps réel entre le système de surveillance et les utilisateurs. Tout cela se fait à distance, via la plateforme cloud ThingSpeak.

L'ESP32 est un choix parfait pour notre projet. Il collecte des données en temps réel concernant le courant d'écoulement, l'intensité lumineuse, ainsi que la température et l'humidité des panneaux solaires (Voir la Figure 4-6).

4. Réalisation d'un système de surveillance PV par IoT

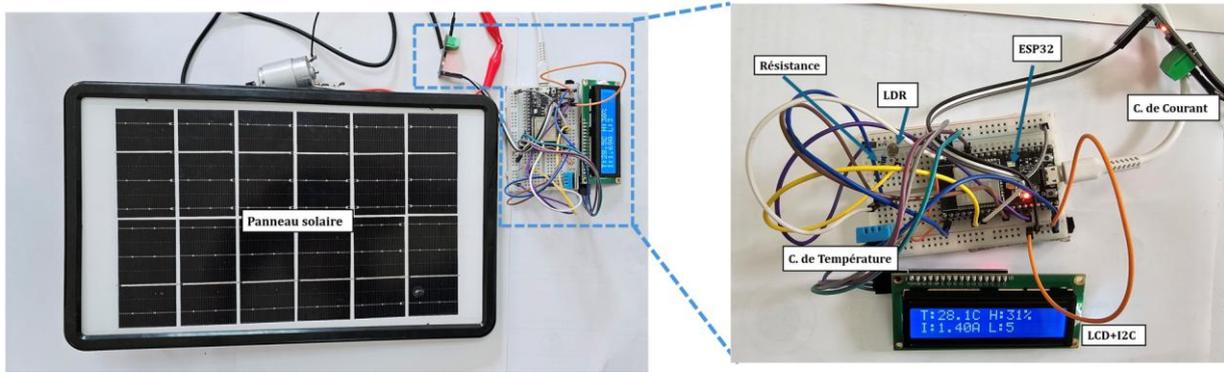


Figure 4-6: Architecture des composants d'un système IoT de surveillance de panneaux solaires

Nous surveillons les résultats des données via l'écran à cristaux liquides (LCD). Les mêmes données mesurées par les capteurs sont également envoyées directement via Wi-Fi à la plateforme ThingSpeak, où elles sont stockées et leurs changements sont surveillés.

Tout d'abord, nous téléchargeons l'IDE Arduino pour programmer la carte ESP32.

Nous testons ensuite chaque capteur individuellement en saisissant son code, ce qui nous permet de nous assurer de son bon fonctionnement et de garantir sa sécurité. Une fois cette étape validée, nous intégrons le code complet (une partie du code source utilisé pour ce projet est fournie en Annexe A, afin d'illustrer les principales fonctions implémentées.) qui regroupe tous les capteurs ainsi que l'afficheur LCD, afin d'unifier le processus d'acquisition et d'affichage des données.

Après avoir réussi cette phase de programmation, nous passons à l'installation physique des capteurs sur la carte ESP32, et à leur connexion au panneau solaire pour les premiers tests en conditions réelles.

Une fois le prototype miniature du système de surveillance assemblé, nous passons à la phase d'exploitation pratique, qui s'organise comme suit :

Les capteurs de lumière, de courant et de température mesurent l'intensité lumineuse, le courant de sortie, la température et l'humidité en temps réel. Ces données sont immédiatement transmises via la carte ESP32, connectée via Wi-Fi, au ThingSpeak et à partir de là, nous surveillons.

4. Réalisation d'un système de surveillance PV par IoT

L'ensemble du système peut être surveillé et contrôlé à distance à l'aide d'un smartphone ou de tout autre appareil connecté à Internet, ce qui constitue l'un des principaux avantages de la technologie IoT.

4.4. Résultats et discussion

Les données collectées à partir des différents capteurs – température, humidité, courant et intensité lumineuse – ont été affichées à la fois sur l'écran LCD local et sur la plateforme ThingSpeak, confirmant la fiabilité du système comme illustré dans la Figure (4-7).

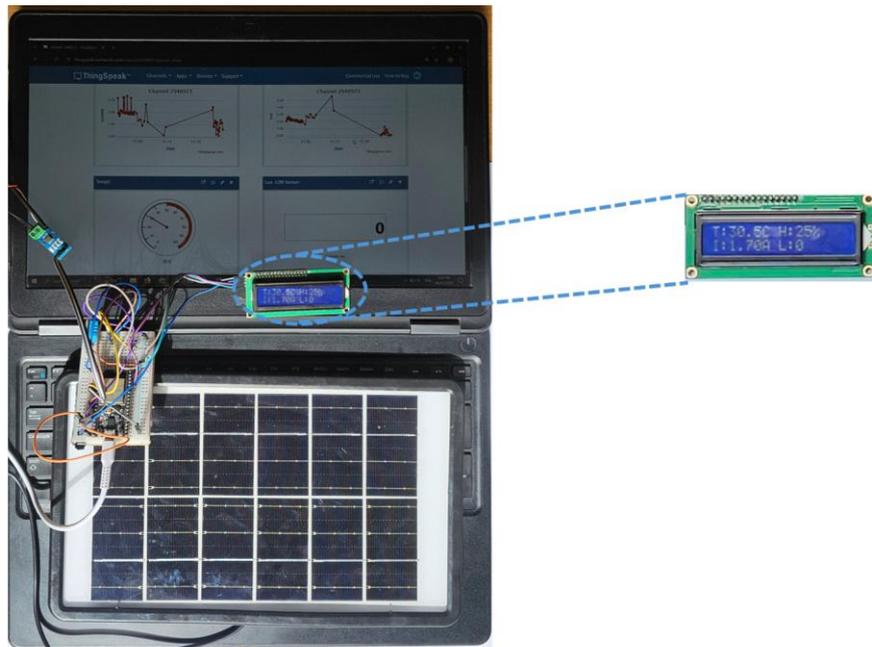


Figure 4-7 : Présentation des résultats affichés sur l'écran LCD et sur ThingSpeak

La température ambiante augmente progressivement dans la matinée pour atteindre un maximum autour de midi, tandis que l'humidité diminue légèrement, ce qui est cohérent avec l'ensoleillement élevé durant cette période.

4. Réalisation d'un système de surveillance PV par IoT

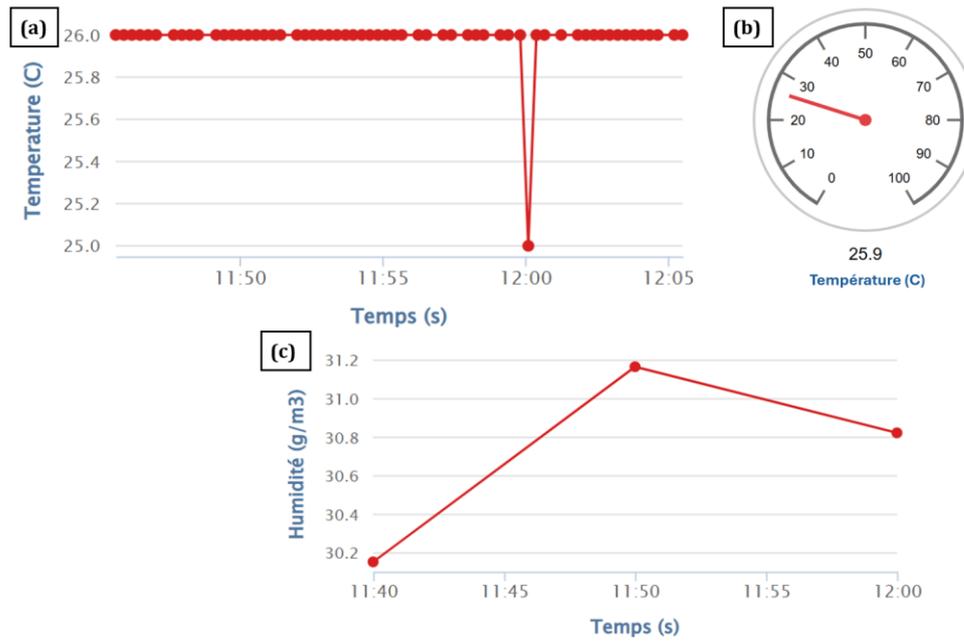


Figure 4-8 : Visualisation en temps réel des paramètres climatiques mesurés (a) Courbe d'évolution de la température au cours du temps ; (b) Indicateur de la température instantanée ; (c) Variation de l'humidité en fonction du temps.

Le capteur de courant montre une légère variation de l'intensité en fonction de l'éclairement, puisque la production électrique du panneau solaire est directement influencée par la lumière reçue.

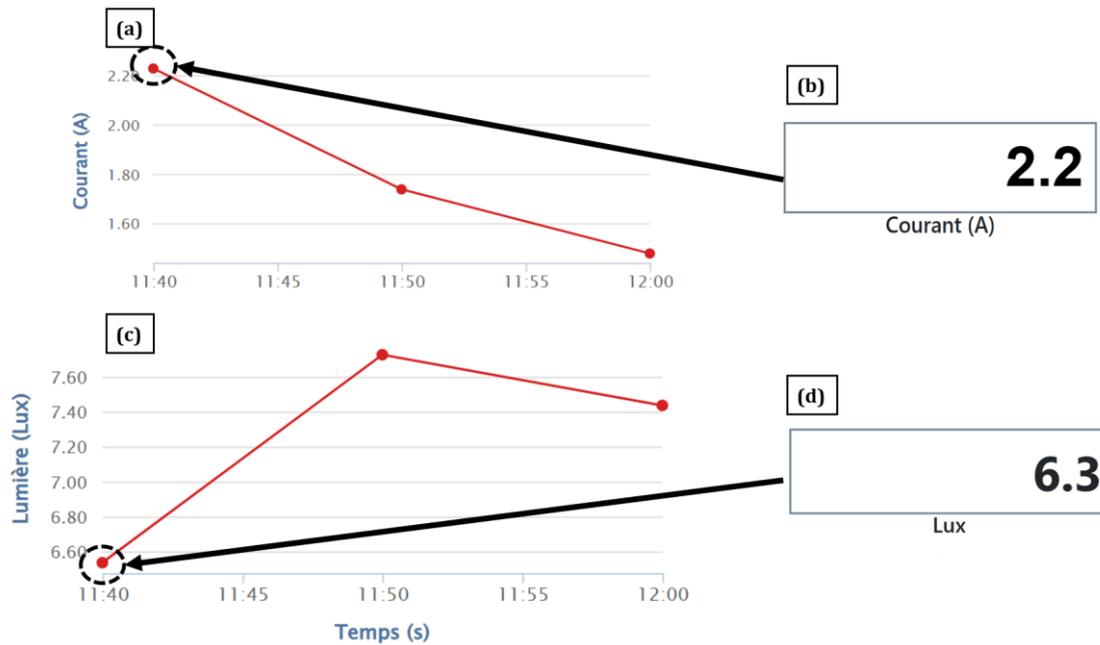


Figure 4-9 : Suivi en temps réel du courant et de la luminosité (a) Variation du courant en fonction du temps ; (b) Affichage instantané du courant ; (c) Évolution de la luminosité ; (d) Affichage instantané de l'intensité lumineuse.

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme de courbes dynamiques sur ThingSpeak, ce qui permet un suivi visuel et continu de l'évolution des paramètres. L'accord entre les données affichées localement et celles envoyées à distance témoigne du bon fonctionnement du système de surveillance basé sur l'ESP32.

En conclusion, les résultats obtenus à partir du système IoT conçu ont permis de valider l'efficacité de la surveillance en temps réel de l'installation solaire. La cohérence entre les valeurs mesurées et les conditions environnementales observées montre que les capteurs fonctionnent de manière satisfaisante. L'affichage simultané sur écran LCD et sur la plateforme ThingSpeak garantit une double vérification locale et distante. Cette expérience ouvre la voie à d'autres développements, notamment l'ajout de fonctionnalités de contrôle automatique (comme l'orientation du panneau solaire ou la gestion de la charge), afin d'optimiser davantage la production d'énergie et de rendre le système plus autonome et intelligent.

4.5 Défis techniques et solutions :

Voici quelques-unes des difficultés auxquelles nous avons été confrontés lors de la mise en œuvre du projet :

4. Réalisation d'un système de surveillance PV par IoT

- Les outils sont chers et difficiles à trouver.
- Internet est instable.
- Manque d'expérience en programmation et en codage.
- L'utilisation de la version gratuite de ThinkSpeak présente des fonctionnalités limitées.
- Problèmes de compatibilité matérielle et logicielle.
- Es conditions météorologiques sont stables, ce qui rend difficile la détection des changements.

Solutions propose:

- ✓ Achetez des capteurs simples comme : DHT11, LDR.
- ✓ Engagez un expert en programmation et en robotique.
- ✓ Clonez et modifiez le code open source depuis GitHub.
- ✓ Intégration d'un suiveur solaire pour améliorer le rendement et la gestion des panneaux.
- ✓ Choisissez des composants populaires et pris en charge comme ESP32, car ils fonctionnent avec la plupart des capteurs.
- ✓ Insérez le modèle miniature dans le réfrigérateur pour surveiller les changements.
- ✓ Envisagez d'insérer des cartes SIM/4G avec des modules GSM au lieu de vous fier au Wi-Fi, et d'utiliser également des protocoles de communication longue distance sans Internet. Ce sont quelques-unes des choses que nous pouvons développer dans le projet à l'avenir.

5. Conclusions

En conclusion, la surveillance des panneaux solaires via l'Internet des objets est une réponse innovante et efficace aux défis actuels.

En tirant parti des avancées technologiques, notamment dans les domaines de l'Internet des objets, des capteurs sans fil et de l'automatisation, nous pouvons optimiser l'utilisation de l'énergie solaire.

Cette approche révolutionne la production d'énergie grâce à une surveillance continue, en prédisant les pannes avant qu'elles ne surviennent et en réduisant les coûts de maintenance.

Cela contribue à maintenir la qualité de l'énergie électrique. De plus, la surveillance intelligente ouvre la voie à une production d'énergie plus efficace, durable et respectueuse de l'environnement.

D'un autre point de vue, l'introduction d'autres capteurs et actionneurs peut enrichir la précision et l'efficacité du système de production. Par exemple, en utilisant des capteurs de lumière.

Les capteurs de température et d'humidité aident à fournir des informations sur la météo et l'état des panneaux solaires.

Sans oublier que l'objectif principal de notre travail est de surveiller le système photovoltaïque de manière sophistiquée, en créant un modèle miniature à l'aide de la carte ESP32, dont le but est d'aider les utilisateurs à surveiller et à suivre l'état en temps réel.

Nous avons examiné les performances de chaque capteur à la fois en plein soleil et à la lumière du soleil, et identifié les défis que nous avons rencontrés lors de la mise en œuvre et les solutions que nous avons mises en œuvre.

Ce travail nous a permis de :

- Comprendre certains aspects de l'Internet des objets et de ses différents domaines.
- Acquérir des connaissances en programmation et en systèmes associés.
- Découvrez différents protocoles IoT comme MQTT et faites-vous une idée des différences entre eux.

- Une meilleure compréhension du fonctionnement de chaque capteur, de la manière de l'installer et des problèmes qui peuvent survenir avec lui.

Grâce à ce travail, le modèle miniature que nous avons développé représente une avancée dans le domaine de l'énergie solaire. Les technologies innovantes de surveillance et de suivi qu'il comprend doivent être prises en compte et développées pour améliorer les performances. À l'avenir, nous prévoyons d'ajouter un système de contrôle intelligent pour diriger automatiquement les panneaux solaires en fonction de la position du soleil, d'intégrer des cartes SIM/4G avec des modules GSM au lieu de dépendre du Wi-Fi et d'utiliser des protocoles de communication longue distance sans avoir besoin d'Internet. Tout cela est conçu pour optimiser la production d'énergie. Nous espérons également pouvoir adapter ce modèle à d'autres formes d'énergie renouvelable, pourquoi ne pas le développer en plusieurs versions ?

Bibliographies

- [1] “Energies renouvelables.” Accessed: May 03, 2025. [Online]. Available: <http://enrj.renouvelables.free.fr/>
- [2] “STI ELT ELECTROTECHNIQUE Approche générale Production d’énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE.”
- [3] Dr. Papa Lat Tabara SOW, “COURS LASERS ET APPLICATIONS L3 Physique Numérique,” 2020.
- [4] “Quels sont les différents types de chauffe-eau solaires ?” Accessed: May 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.lepanneausolaire.net/quels-sont-differents-types-chauffe-eau-solaires.php>
- [5] M. T. Boukadoum, A. Hamidat, and N. Ourabia, “Le Pompage Photovoltaïque,” 2002.
- [6] B. Li and J. Yu, “Research and application on the smart home based on component technologies and Internet of Things,” in *Procedia Engineering*, 2011, pp. 2087–2092. doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.390.
- [7] “Internet of Things (IoT) - Standards | GS1.” Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.gs1.org/standards/internet-of-things>
- [8] A. Bahga and V. Madisetti, “Internet of Things: A Hands-On Approach,” p. 446, 2014, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Internet_of_Things_A_Hands_On_Approach.html?id=JPKGBAAAQBAJ
- [9] M. Roelands, A. Lucent, D. C. Mansilla, J. R. Velasco, and G. M. Lee, “Architecting the Internet of Things.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259943140>
- [10] “IoT Based Solar Power Monitoring System with ESP32.” Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://how2electronics.com/iot-based-solar-power-monitoring-system-with-esp32/>

6. Annexe A : Démonstrations



Figure 6-1: ESP32 – Vue des ports et connexions

```
#include <Wifi.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>

// تعريفات الحسابات
#define DHTPIN 27
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// شاشة LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // 0 أو 27 من العنوان 0x27 أو 0x3F

// حساس الجهد الشمسي
// حساس الأمبيراج (مثلاً ACS712-5A)
const int currentSensorPin = 32;
float sensorVoltage = 0.0;
float current = 0.0;
// حساس الإضاءة
const int ldrPin = 35;
float RLDR, Vout, Lux;
```

Figure 6-2: Partie du code source du projet



غرداية في : 12/06/2025

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذة Assia Hamada

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج ليسانس المعنونة بـ:

Systeme de surveillance des panneaux solaires via l'IoT

من انجاز الطلبة:

Ahmed Belal BAKELLI BABA et Abdallah OULADSAID

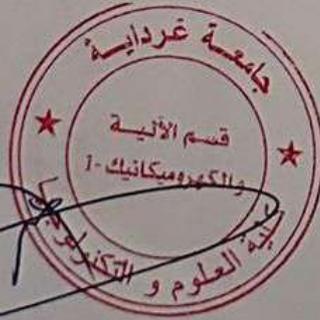
التي نوقشت/قويت بتاريخ : 21/05/2025

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم

امضاء المسؤول عن التصحيح

h.Assia



رئيس قسم الألية والكهروميكانيك

عزواي محمد