



Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

ZIREG Ikram

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie électrique : Électricité industrielle

Thème

**Conception et réalisation d'un système intelligent de gestion
d'éclairage public solaire intégrant des technologies
avancées**

Le 29-06-2024 devant le jury :

KIFOUCHE	Rezki	MAA	UMBB	Président
KHELIFI	Fateh	MAA	UMBB	Examineur
CHEKIRED	Fathia	DR	UDES	Encadrant
TADJER	Sid Ahmed	MCA	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département Automatisation et Électrification des procédés industriels
Filière : Hydrocarbures
Spécialité : Génie électrique : Électricité industrielle

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**Conception et réalisation d'un système intelligent de gestion
d'éclairage public solaire intégrant des technologies
avancées**

Présenté par :
ZIREG Ikram

Avis favorable de l'encadrant :
Nom et prénom :
Signature :

Avis favorable du Président du jury
Nom et Prénom :
Signature :

Cachet et signature

Résumé :

Ce projet de fin d'études vise à développer un système d'éclairage public intelligent en utilisant les microcontrôleurs Raspberry Pi et ESP8266, avec un tableau de bord basé sur Node-RED pour une surveillance et un contrôle complet. Le système intègre un système photovoltaïque (PV) autonome pour alimenter l'éclairage, assurant ainsi durabilité et efficacité énergétique. Des capacités de surveillance avancées sont mises en œuvre pour observer et analyser divers paramètres du système PV, garantissant des performances optimales. Le projet se concentre non seulement sur la réduction de la consommation d'énergie, mais aussi sur le maintien de la qualité de l'éclairage et de la sécurité des usagers. La solution développée est conçue pour être autonome, durable et capable de suivre les performances en temps réel, offrant ainsi une alternative viable et efficace aux systèmes d'éclairage public traditionnels.

Abstract:

This final year project aims to develop a smart public lighting system utilizing Raspberry Pi and ESP8266 microcontrollers, with a Node-RED based dashboard for comprehensive monitoring and control. The system integrates a stand-alone photovoltaic (PV) system to power the lighting, ensuring sustainability and energy efficiency. Advanced monitoring capabilities are implemented to observe and analyze various parameters of the PV system, ensuring optimal performance. The project not only focuses on reducing energy consumption but also on maintaining the quality of lighting and user safety. The developed solution is designed to be autonomous, sustainable, and capable of real-time performance tracking, thereby providing a viable and efficient alternative to traditional public lighting systems.

ملخص :

يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى تطوير نظام إضاءة شوارع ذكي باستخدام Raspberry Pi و ESP8266 microcontrollers، مع لوحة تحكم تعتمد على Node-RED للمراقبة والتحكم الكاملين. يشتمل النظام على نظام كهروضوئي مستقل (PV) لتشغيل الإضاءة، وبالتالي ضمان المتانة وكفاءة الطاقة. يتم تنفيذ قدرات الرصد المتقدمة لمراقبة وتحليل مختلف بارامترات نظام PV، مما يضمن الأداء الأمثل. لا يركز المشروع على الحد من استهلاك الطاقة فحسب، بل يركز أيضاً على الحفاظ على جودة الإضاءة وسلامة المستخدمين. تم تصميم الحل المطور ليكون مستقلاً ومستداماً وقادراً على مراقبة الأداء في الوقت الفعلي، وبالتالي يوفر بديلاً قابلاً للتطبيق وفعالاً لنظم إضاءة الشوارع التقليدية.

Remerciements

Tout d'abord je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir accordé la connaissance, donner le courage, la patience et la santé pour réaliser mon projet de fin d'étude.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragé à atteindre mes objectifs et à accomplir ce travail et ceux qui m'ont aidé moralement et financièrement. Maman et Papa, j'ai vraiment de la chance de vous avoir dans ma vie.

J'adresse mes plus sincères remerciements tout particulièrement à ma promotrice Madame CHEKIRED Fathia, Directrice de Recherche au niveau de l'UDES, pour avoir suivie de très près mes travaux, pour son aide, ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire et tous les conseils qu'elle m'a prodigués durant toute la durée du PFE. Je tiens à exprimer ma gratitude à mon promoteur Mr TADJER Sid Ahmed Maître de Conférences (MCA) à Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES (UMBB) pour avoir accepté de diriger ce travail. Merci d'avoir accepté de me guider.

Mes remerciements les plus sincères vont également à M. BERKANE Smaine et M. Laldji Ali. Leur patience et leur soutien constant ont été essentiels à mon succès. Grâce à leurs conseils avisés, j'ai pu surmonter de nombreux obstacles et atteindre mes objectifs. Et je tiens de remercier mes collègues de stage Hassina, Sidali, et Chakib pour leur aide et leur soutien tout au long de ce parcours professionnel. Je tiens également à exprimer ma gratitude à M. Meflah Aissa. De plus, je tiens à remercier le directeur de l'UDES de m'avoir donné la chance d'explorer l'UDES et de réaliser ce stage. Un grand merci à la famille de l'UDES ; leur aide et leur gentillesse m'ont ouvert cette opportunité.

Je veux remercier mes frères et sœurs Zaki, Mohamed, Hamitou, Ahlem, Khadouj et Chaimaa pour leur soutien et leur aide inestimables. Un grand merci à ma famille pour avoir cru en moi. Je suis heureuse d'avoir eu de telles amies "Kenza, Imene, Sabrin, Katia et Azhar" pendant ce parcours éducatif ; elles ont été ma source d'énergie et de soutien pendant ces cinq années.

Je tiens également à remercier mes professeurs pour leur temps et leurs efforts. C'est grâce à eux que je suis ce que je suis aujourd'hui. Enfin, je ne terminerai pas sans remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

-Ikram-

Liste des abréviations / symboles

Symbole	Signification
UDES	Unité de Développement des Équipements Solaires
LED	Light Emitting Diode
CFL	Compact Fluorescent Lamp
PV	Photovoltaïque
PCB	Printed Circuit Board
PVsyst	Logiciel de calcul
DA	Dinar Algérien
IEA	International Energy Agency
CO2	Dioxyde de carbone
HPS	High Pressure Sodium
IRC	Indice de Rendu des Couleurs
RGB	Red, Green, Blue
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
SG	Secretary General
APS	Agence Algérie Presse Service
IOT	Internet Of Things
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PAN	Personal Area Network
Pc	Personal computer
RFID	Radio Frequency IDentification
Cisco	Le leader mondial de la transformation numérique, de l'IT et des réseaux
IBM	International Business Machines corporation
IP	Internet Protocol
Sw	Software
M2M	Machine to Machine
OS	Operating System
USB	Universal Serial Bus
SoC	System on Chip
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
SD	Secure Digital
LDR	Light Dependent Resistor
RTD	Resistor Temperature Detector
DIN	Deutsches Institut für Normung
CVC	Chauffage, Ventilation, Climatisation
SPI	Serial Peripheral Interface
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
TcP	Transmission Control Protocol
API	Application Programming Interface
VDC	Voltage Direct Current
CAN	CONVERTISSEUR Analogique numérique
CC	Courant Continu
3D	Trois Dimensions
DAC	Data Acquisition card
TMY	Typical Meteorological Year
PR	Performance Ratio

Liste des figures et des tableaux

Figure 1 L'Unité de Développement des Equipements Solaires UDES.....	3
Figure I. 1 Production d'électricité par habitant à partir de combustibles fossiles, nucléaires et renouvelables, 2022 [9].....	6
Figure I. 2 Consommation électrique de l'éclairage dans le monde en 2018 [4].....	9
Figure I. 3 Premières sources artificielles de lumière et leur évolution.....	10
Figure I. 4 Lampe halogène à incandescence et divers modèles.....	11
Figure I. 5 Gamme assez complète de lampes HPS actuellement disponibles.	11
Figure I. 6 Exemples de luminaires constitués de modules LED prêts à l'emploi dans divers dispositifs d'éclairage public.....	12
Figure I. 7 Synoptique d'un système d'éclairage solaire non commandé.....	13
Tableau I. 1 Critère de sélection des batteries	15
Figure I. 8 Faisceaux lumineux d'une lampe classique avec réflecteur et LED	16
Figure I. 9 Luminaires classiques et à LED adaptés à l'éclairage public	17
Figure I. 10 Lampadaires d'éclairage public et composants intégrés dans les cas classiques et à LED	18
Figure I. 11 Consommation d'énergie électrique (GWh) par activité pour les communes de l'ensemble des 48 wilayas en 2018 [4]	20
Figure I. 12 L'éclairage public intelligent.....	21
Tableau I. 2 Critique de l'existants.....	25
Figure II. 1 Internet des Objets.	30
Tableau II. 1 Les spécifications techniques du Raspberry Pi 4.....	32
Tableau II. 2 La configuration du brochage de l'ESP8266	34
Figure II. 4 Module de test multifonction numérique AC pour mesure de puissance, volt, ampère (A) - PZEM-004T.....	35
Figure II. 5 MAX6675 Configuration des Broches	38
Figure II. 6 Mosquitto Broker	39
Figure II. 8 Diagramme de contrôle de l'éclairage.....	41
Figure II. 9 Diagramme de flux illustre le principe de fonctionnement du système de l'éclairage public intelligent conçu	44
Figure II. 10 Diagramme du système monitoring du dispositif photovoltaïque conçu	45
Figure III. 1 Alimentation SS-200VH-E56B.....	47
Figure III. 2 Schéma du montage sur EasyEDA [*].....	47

Figure III. 3 schéma de connexion du montage.....	48
Figure III. 4 (a), (b) et (c) Routage de la carte de commande de l'éclairage public.	49
Figure III. 5 Schéma du montage sur EasyEDA.....	50
Figure III. 6 Schéma de connexion.....	52
Figure III. 7 Schéma de connexion du ACS712 et le module capteur de tension VDC.....	52
Figure III. 8 Schéma de connexion du RTD AVEC max6675	53
Figure III. 9 (a), (b) Routage de la carte d'acquisition de données	54
Figure III. 10 Le modèle en 3D du boîtier.....	55
Figure III. 11 La vue réelle du boîtier.....	55
Figure IV. 1 Le flux réalisé sur Node-RED pour la surveillance de l'éclairage public intelligent	57
Figure IV. 2 Le Dashboard d'affichage pour l'éclairage public intelligent	57
Figure IV. 3 La base de données sur google sheets pour l'éclairage public intelligent.....	58
Figure IV. 4 Application mobile pour l'affichage de Node-RED.....	58
Figure IV. 5 La vue réelle du système de l'éclairage public intelligent	59
Figure IV. 6 Le signal de commande de l'ESP8266 vers le luminaire en cas d'absence du mouvement	60
Figure IV. 7 Le signal de commande de l'ESP8266 vers le luminaire en cas de la détection du mouvement.....	61
Tableau IV. 1 L'étude technico-économique pour le système d'éclairage public intelligent.....	61
Figure IV. 8 Météo pour le site de l'UDES - Année météorologique typique (TMY) (2024)	62
Figure IV. 9 Utilisation de l'énergie coté utilisateur année (2024)	63
Figure IV. 10 Indice de Performance PR.....	64
Figure IV. 11 La validation des mesures de température par data logger.....	65
Figure IV. 12 La validation des mesures de température par data logger.....	65
Figure IV. 13 Le graphe de température mesurée par data logger Fluke et thermocouple type K	66
Figure IV. 14 Le schéma de connexion de cellule de référence avec ESP8266	66
Figure IV. 15 Le schéma de connexion de cellule de référence avec ESP8266	66
Figure IV. 16 La vue réelle de la cellule de référence et pyranomètre	67
Figure IV. 17 La vue réelle de la cellule de référence et pyranomètre	67
Figure IV. 20 Le flux sur Node-RED pour le système de monitoring PV.....	68
Figure IV. 21 Le flux sur Node-RED pour le système de monitoring PV.....	68
Figure IV. 22 Le Dashboard sur Node-RED pour le système monitoring PV.....	68

Figure IV. 23 Le Dashboard sur Node-RED pour le système monitoring PV	68
Figure IV. 24 Le système globale réalisé avec luminaire à niveau 20%.	69
Figure IV. 25 Le système globale réalisé avec luminaire à niveau 100%.....	70

Table de matières

Introduction générale.....	1
L'unité de développement des Équipements Solaires.....	3
La présentation du site de l'Unité de Développement des Équipement Solaire UDES	3
L'importance de ce stage pratique pour la réussite de mon projet de fin d'études	4
Introduction	5
I.1 L'énergie électrique.....	5
I.2 Les sources d'énergie électrique	6
I.3 Production d'électricité par source	7
I.3.1 Énergies fossiles.....	7
– Charbon	7
– Gaz naturel	7
– Pétrole.....	7
– Énergie nucléaire.....	7
I.3.2 Énergies renouvelables	7
– L'énergie hydraulique	7
– L'énergie solaire.....	8
– L'énergie éolienne	8
I.4 Consommation d'énergie électrique par secteur.....	8
I.5 L'Éclairage public.....	9
I.5.1 Définition de l'éclairage public.....	9
I.6 Les différents types d'éclairage public	10
I.6.1 Éclairage à lampes à incandescence halogènes	10
I.6.2 Éclairage à vapeur de sodium haute pression (HPS).....	11
I.6.3 Éclairage à LED.....	11
I.6.4 Éclairage solaire	12
a. Fondements de l'éclairage solaire	12
b. Lampadaire solaire d'éclairage public	13
1. Le module PV.....	13

2. Les batteries.....	14
3. Les onduleurs	15
4. Les régulateurs de Batterie dans les Systèmes PV	15
I.7 Dispositifs d'éclairage public	15
I.7.1 Luminaires	15
I.7.2 Principaux constituants d'un luminaire.....	16
I.7.3 Rendement du Luminaire.....	17
I.8 Les enjeux de l'éclairage public	18
I.9 Aspect économique de l'éclairage public	19
I.9.1 Au niveau mondial.....	19
I.9.2 Le cas d'Algérie.....	19
Algérie : l'éclairage public représente 40% de la consommation globale d'électricité.....	19
I.10 L'éclairage public intelligent	21
I.10.1 Définition d'éclairage public intelligent	21
I.10.2 Les caractéristiques d'éclairage public intelligent	22
I.10.3 Les avantages d'éclairage public intelligent	22
I.10.4 L'Éclairage public intelligent comme solution.....	23
I.11 Les solutions existantes.....	23
I.11.1 Zigbee technologie.....	23
I.11.1.1 Spécification ZigBee et IEEE 802.11.4.....	23
I.11.1.2 Ensemble de fonctionnalités Zigbee.....	24
I.11.1.3 Ensemble de fonctionnalités Zigbee Pro.....	24
I.11.1.4 Les caractéristiques de ZigBee [19]	24
I.11.2 Communication Bluetooth	24
I.12 Critique de l'existant.....	24
I.13 Solution proposée.....	25
I.13.1 Les avantages de cette solution comprennent.....	25
I.14 Intégration de Système PV pour l'alimentation d'éclairage public	26
Conclusion.....	26
Introduction	28
Objectif.....	28
II.1 Internet des Objets IOT	28
II.1.1 Concepts clés et bref historique de l'IoT	28

II.1.2 C'est quoi l'IOT?.....	29
II.2 Choix de matériel.....	30
II.2.1 Raspberry Pi	30
II.2.1.1 Définition du Raspberry PI	31
II.2.1.2 Historique	31
II.2.1.3 Les spécifications techniques de Raspberry Pi 4 Model B	31
II.2.1.4 Installation du système d'exploitation sur Raspberry Pi.....	32
II.2.1.5 Raspberry Pi Imager.....	33
II.2.2 NodeMCU ESP8266.....	33
II.2.2.1 Configuration du brochage de la carte de développement NodeMCU	33
II.2.2.3 Présentation de NodeMCU ESP8266.....	34
II.2.3 Capteurs infrarouges passifs PIR.....	34
II.2.4 Module de test multifonction numérique AC pour mesure de puissance, volt, ampère (A) - PZEM-004T	35
II.2.4.2 Paramètres de spécification [27]	36
II.2.5 Mesure de tension et courant continu	36
II.2.5.a Mesure de tension par capteur de tension continue de 0 à 25 V	36
Mesure de courant continu par ACS712	37
II.2.6 Résistance dépendante de la lumière LDR	37
II.2.7 Détecteur de température à résistance	37
II.2.8 Le MAX6675.....	38
II.2.8.1 Description Générale du MAX6675	38
II.2.8.2 Applications du MAX6675	38
II.2.8.3 Caractéristiques du MAX6675.....	38
II.3 Choix logiciels	39
II.3.1 MQTT technologie	39
II.3.2 Mosquitto broker	39
II.3.3 Node-RED	40
II.4 Conception du système de l'éclairage public intelligent proposé	41
II.4.1 Unité d'entrée	41
II.4.1.1 Les capteurs PIR.....	41
II.4.1.2 Compteur d'énergie.....	42
II.4.2 Unité de contrôle.....	42
II.4.2.1 NodeMCU ESP8266	42

II.4.2.2 MQTT Broker	42
II.4.2.3 Node-RED	43
II.4.2.4 Raspberry PI.....	43
II.4.3 Unité de sortie.....	43
II.4.3.1 Luminaire	43
II.5 Principe de fonctionnement du système d'éclairage public intelligent conçu.....	43
II.5.1 Principe de fonctionnement.....	44
II.6 Le système de monitoring du dispositif photovoltaïque.....	44
II.6.1 Unité d'entrée	45
II.6.2 Unité de transmission des données	45
II.6.3 Unité de stockage.....	46
Conclusion.....	46
Chapitre III – Conception électrique et mécanique du système.....	30
Introduction	46
III.1 La carte de commande du système de l'éclairage public intelligent.....	46
III.1.1 Le rôle d'une carte de commande	46
III.1.2 Alimentation électrique SS-200VH-E56B	46
III.1.3 Schéma du montage de l'éclairage public intelligent.....	47
III.1.4 Schéma de connexion globale pour l'éclairage	48
III.1.5 Routage de la carte de commande.....	48
III.2 La carte d'acquisition de données pour le système PV	50
III.2.1 Le rôle de la carte d'acquisition de données	50
III.2.2 Schéma du montage.....	50
III.2.3 Descriptions de l'installation PV alimentant le système d'éclairage	51
.....	52
III.2.3.b Schéma de connexion du capteur de tension continue et de courant continu	52
III.2.3.c Schéma de connexion du RTD avec MAX6675	53
III.2.4 Le routage de la carte d'acquisition de données pour le système PV	53
III.3 La réalisation du boîtier de la protection.....	54
Conclusion.....	55
Chapitre IV – Réalisation et interprétation des résultats.....	57
Introduction	56
IV.1 L'affichage et le stockage de données du dispositif réalisé	56

IV.1.1 L'affichage en temps réel sur Dashboard de Node-RED pour le système de l'éclairage public intelligent.....	56
IV.1.2 La base de données du système d'éclairage public intelligent.....	57
IV.1.3 L'application mobile pour l'affichage de Node-RED.....	58
IV.2 La vue réelle du système réalisé pour l'éclairage public intelligent avec les signaux de commandes obtenus	59
IV.2.1 Le système de commande de l'éclairage public intelligent.....	59
IV.2.2 Les signaux de commande obtenus dans la sortie de l'ESP8266 vers luminaire.....	60
a. L'absence de mouvement.....	60
b. La détection de mouvement	60
IV.3 l'étude technico-économique pour le système de l'éclairage public intelligent.....	61
IV.4 Dimensionnement du système photovoltaïque conçu pour l'alimentation de l'éclairage.....	62
IV.4.1 Vue générale du système de calcul PVsyst.....	62
IV.4.2 Les paramètres donnés pour la simulation utilisant PVsyst.....	62
a. Les données météorologiques	62
b. Paramètres du champ	63
c. Les besoins d'utilisateur.....	63
d. Le choix du système PV.....	63
IV.4.3 Les résultats obtenus	64
a. Indice de performance (PR)	64
b. Le système photovoltaïque proposé	64
IV.5 Système de monitoring du système PV.....	65
IV.5.1 Mesure de la température.....	65
IV.5.2 Le graphe de température obtenu à l'aide du thermocouple et data logger.....	65
IV.5.3 La mesure de l'irradiance	66
IV.6 Dashboard du système de monitoring du système PV.....	67
IV.7 l'étude technico-économique du système de monitoring PV.....	69
IV.8 La vue globale du système réalisé.....	69
.....	70
Conclusion.....	70
Conclusion générale	50
Conclusion générale	71
Référence bibliographique	50

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières années, la demande mondiale d'énergie électrique a connu une augmentation notable, principalement due à la croissance industrielle, aux progrès technologiques et à l'urbanisation. Il est constaté que la consommation mondiale d'électricité augmente régulièrement, soulignant ainsi le rôle essentiel que joue l'électricité dans les sociétés modernes [1]. Outre les secteurs traditionnels (c'est-à-dire les domaines résidentiel et commercial), l'augmentation de la demande d'énergie est également liée aux tendances modernes, telles que l'internet dans sa forme actuelle améliorée avec ses dérivés correspondants (numérisation des services, Cloud, etc.) et au secteur des véhicules électriques [2].

L'énergie électrique représente donc l'élément essentiel sur lequel les progrès économiques et la mise en œuvre de projets de collaboration à l'échelle internationale se basent, intimement liés au développement sociétal global et aux objectifs de durabilité. En conséquence, une telle augmentation de la demande d'énergie électrique pose différents défis [3]. Donc Il est important d'identifier les principaux et les plus grands consommateurs d'énergie électrique pour les remplacer par des systèmes moins énergivores. Parmi ces consommateurs, l'éclairage public représente une grande part de la consommation d'électricité, avec 19% du total de la production d'électricité dans le monde. Cette catégorie comprend l'éclairage résidentiel, commercial, industriel et public [4]. En Algérie, l'éclairage public représente 40 % de la consommation globale d'électricité [5].

En 2022, l'éclairage public en Algérie représentait presque 60% de la consommation globale d'électricité [5]. Dans ce contexte et pour le cadre de notre Projet de Fin d'Études, il nous a été proposé de conduire une étude concernant l'éclairage périphérique de l'Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES) située à Bou Ismail, Tipaza, afin qu'il ait la meilleure efficacité énergétique possible tout en étant écologique et ce en utilisant une source d'énergie renouvelable en l'occurrence l'énergie solaire photovoltaïque.

Les travaux que nous avons conduits dans le cadre de ce projet, sont présentés dans quatre chapitres selon la démarche suivante :

Dans le premier chapitre, nous évoquerons d'abord la consommation d'énergie électrique dans le monde en général et en Algérie comme cas d'étude. Nous examinerons les grands consommateurs d'électricité, parmi lesquels l'éclairage public avec ses différents types.

Nous aborderons ensuite la transition de l'éclairage classique vers un éclairage autonome, en situant les solutions existantes et leurs limites. Par la suite, nous intégrerons un système de surveillance pour le système PV.

Dans le deuxième chapitre, nous exposerons en détail la démarche que nous avons adoptée pour réaliser les deux systèmes, en commençant par le choix des matériels et des logiciels. Ainsi la méthodologie adoptée dont chaque composant contribue à la réalisation de système monitoring du système photovoltaïque et de l'éclairage public intelligent. Cette approche permettra de comprendre non seulement les aspects techniques, mais aussi les raisons derrière chaque décision

Introduction générale

de conception puis nous présenterons la conception des dispositifs, en expliquant leur principe de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, nous aborderons la conception électrique en présentant les schémas électriques des dispositifs proposés dans le deuxième chapitre. Nous détaillerons également la réalisation des cartes PCB pour le montage, ainsi la conception que la fabrication des boîtiers de protection pour assurer la sécurité et faciliter le montage des cartes PCB.

Le dernier chapitre sera consacré pour l'interprétation des résultats obtenus aux cour des tests des dispositifs conçus commençant par le système d'éclairage public intelligent nous allons aborder le choix d'affichage et le stockage de données suivie par la vue globale de système d'éclairage réalisé ainsi les signaux de commande obtenus à la sortie du microcontrôleur utilisé et pour finaliser cette réalisation une étude technicoéconomique du système réalisé sera effectué pour déduire la faisabilité du système mentionné, par la suite nous allons dimensionné le système PV nécessaire pour assurer l'alimentation des dispositifs ainsi les résultats de monitoring PV.

Présentation de lieux de stage

L'unité de développement des Équipements Solaires

La présentation du site de l'Unité de Développement des Équipement Solaire UDES

L'Unité De Développement Des Équipements Solaires UDES (figure.1) situé à Bou-Ismaïl à environ une quarantaine de kilomètres à l'Ouest d'Alger, Latitude : 36°38'33" Nord, Longitude : 2°41'24" Est et une altitude de quelques mètres environ au-dessus du niveau de la mer.

L'UDES a été Créée par Arrêté N° 008 Du 9 Janvier 1988 de La Présidence de La République (Journal Officiel N°06 Du 10 Février 1988). Depuis Le 05 Décembre 2007, date de publication De l'arrêté ministériel portant création des entreprises publiques à caractère scientifique et technique, L'UDES a été intégrée dans L'EPST Centre De Développement Des Énergies Renouvelables.



Figure 1 L'Unité de Développement des Équipements Solaires UDES.

L'importance de ce stage pratique pour la réussite de mon projet de fin d'études

Ce stage me permet de bénéficier d'une expérience concrète qui complète de manière significative les connaissances théoriques acquises en milieu académique. Ce stage me permet de manipuler le Raspberry Pi ainsi que l'ESP8266 et d'explorer les protocoles de communication sans fil, en me garantissant le matériel nécessaire et un emplacement dédié pour effectuer les tests et les réalisations. Grâce à cette opportunité, j'ai acquis une expérience précieuse dans la réalisation de différents circuits, la conception de cartes intégrées PCB, ainsi que dans les techniques de soudure. De plus, j'ai développé des compétences solides en résolution de problèmes, me permettant de surmonter les défis techniques rencontrés tout au long de mes projets. Cette expérience pratique est cruciale pour la réussite de mon projet de fin d'études, en assurant le bon dimensionnement des composants et en optimisant les performances et l'efficacité de mes réalisations.

Chapitre I - Généralités et cadre du projet

Introduction

L'éclairage public représente une part importante de la consommation d'énergie électrique dans les villes. En Algérie, par exemple, il représente environ 40% [5] de la consommation totale d'électricité des collectivités locales. Et soit environ 60 % de l'ensemble des consommations d'électricité dans les communes avec un budget annuel de près de 15 Milliards de DA [4].

Ce chiffre est encore plus élevé dans les pays en développement, où l'éclairage public peut représenter jusqu'à 40 % de la consommation d'électricité des villes.

Cette consommation d'énergie importante a un impact significatif sur l'environnement, en contribuant aux émissions de gaz à effet de serre et à la pollution atmosphérique. De plus, elle représente un coût financier important pour les collectivités locales.

L'éclairage public intelligent offre un moyen de réduire considérablement la consommation d'énergie d'éclairage public. En utilisant des technologies telles que les capteurs de mouvement, les variateurs de lumière et les réseaux de communication sans fil, il est possible de réduire l'éclairage public lorsqu'il n'est pas nécessaire, Selon le fondateur de **Kawantech**, **Yves Le Henaff**, [6] « ce dispositif permet d'économiser 65% de la consommation d'énergie ».

Dans le contexte de la recherche croissante sur l'optimisation de la consommation d'énergie, en particulier dans le domaine de l'éclairage public. Ce chapitre vise à explorer les limites des méthodes existantes de gestion de la consommation d'énergie liée à l'éclairage public et à proposer une approche plus robuste et efficace. Les méthodes traditionnelles de gestion de l'éclairage, telles que les programmations horaires ou l'utilisation de capteurs de lumière ambiante, bien que présentant certains avantages, ne permettent pas toujours d'optimiser pleinement la consommation d'énergie.

Ce chapitre vise à identifier les contraintes et les limitations des méthodes existantes et à proposer une approche alternative plus robuste et adaptée aux besoins actuels. L'objectif est de développer une méthode qui permette de réduire significativement la consommation d'énergie sans compromettre la qualité de l'éclairage ni la sécurité des usagers.

I.1 L'énergie électrique

L'électricité est une forme d'énergie généralement produite dans les centrales électriques en brûlant des combustibles. Le besoin croissant en énergie électrique est largement attribuable à l'essor de l'industrialisation à grande échelle, qui a entraîné une demande accrue pour alimenter les infrastructures manufacturières et les processus industriels complexes. De plus, l'augmentation rapide de la population mondiale a conduit à une hausse de la demande domestique en électricité pour répondre aux besoins croissants en éclairage, chauffage, climatisation et appareils électroménagers.

Ce qui est formidable avec l'électricité, c'est sa polyvalence. Presque n'importe quel type de combustible peut être transformé en électricité. Une fois que l'électricité a été produite dans une centrale électrique, elle est facile à transmettre d'un endroit à un autre, soit en surface, soit

sous terre, le long de câbles. À l'intérieur des maisons, des usines et des bureaux, l'électricité est reconvertie en d'autres formes d'énergie par une grande variété d'appareils [7].

Selon l'Agence internationale de l'énergie (IEA) [7], en Afrique, la composition de la production électrique provient de sources telles que la combustion de gaz (41,7%), le charbon (27,7%), le pétrole (6,2%), le nucléaire (1,4%) et les énergies renouvelables (environ 30%). À l'intérieur d'une centrale électrique, le combustible est brûlé dans un immense four pour libérer l'énergie qu'il contient sous forme de chaleur. Cette chaleur est utilisée pour faire bouillir de l'eau et produire de la vapeur, qui fait tourner un mécanisme rotatif semblable à une hélice appelé turbine. La turbine est reliée à un générateur d'électricité, qui produit de l'électricité lorsque la turbine la fait tourner [8].

I.2 Les sources d'énergie électrique

À l'échelle mondiale, constatons que le charbon, suivi du gaz, est la principale source de production d'électricité. Parmi les sources à faible émission de carbone, l'hydroélectricité et le nucléaire apportent la plus grande contribution [8].

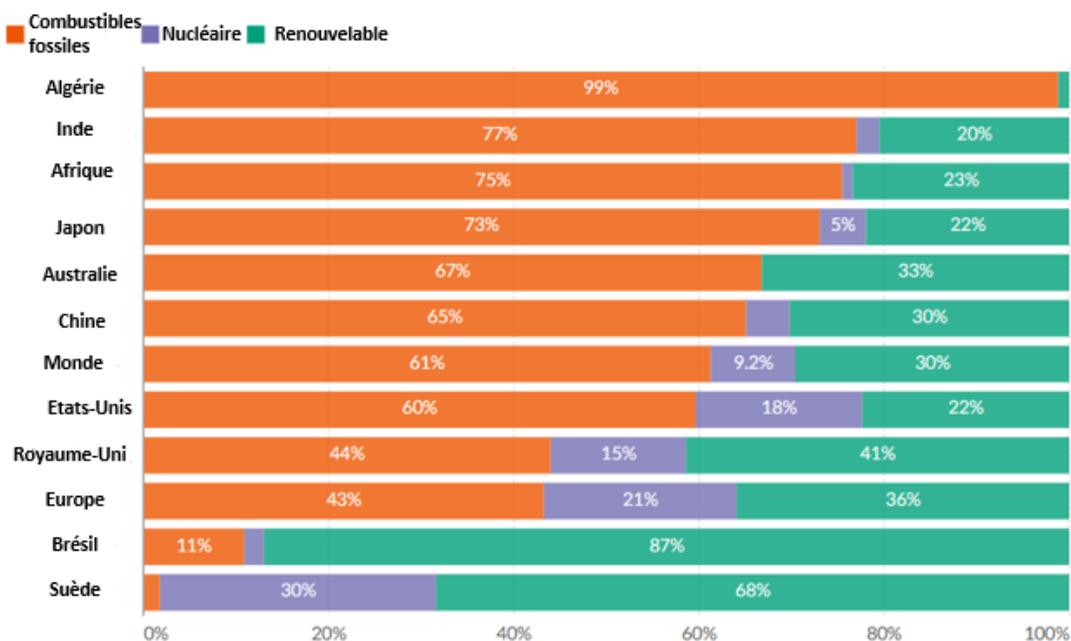


Figure I. 1 Production d'électricité par habitant à partir de combustibles fossiles, nucléaires et renouvelables, 2022 [9].

La figure I.1 montre la répartition du mix électrique par pays. Tout d'abord, il y a la répartition de niveau plus élevé entre les combustibles fossiles, le nucléaire et les énergies renouvelables. Ensuite, il y a la répartition spécifique par source, y compris le charbon, le gaz, le pétrole, le nucléaire, la bioénergie, l'hydroélectricité, le solaire, l'éolien et d'autres énergies

renouvelables (qui comprennent les vagues et les marées). Celle-ci est exprimée en termes de consommation par habitant [9].

I.3 Production d'électricité par source

I.3.1 Énergies fossiles

Les combustibles fossiles sont la somme du charbon, du pétrole et du gaz. La part de l'électricité provenant des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz réunis) dans le monde. Le pétrole ne représente qu'une petite partie de la production d'électricité la plupart proviennent du charbon et du gaz.

- Charbon

Le charbon est une source traditionnelle et largement utilisée pour la production d'électricité dans de nombreux pays. Il est abondant et relativement peu coûteux, mais sa combustion émet des quantités importantes de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres polluants.

- Gaz naturel

Le gaz naturel est de plus en plus utilisé pour la production d'électricité en raison de sa combustion plus propre par rapport au charbon. Les centrales électriques au gaz naturel à cycle combiné sont efficaces et flexibles pour répondre à la demande en électricité.

- Pétrole

Le pétrole est utilisé dans certaines régions comme source d'électricité, principalement dans des générateurs d'appoint ou des installations plus petites où d'autres sources d'énergie ne sont pas disponibles.

- Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est produite par des réactions nucléaires dans les centrales nucléaires. Bien qu'elle soit controversée en raison des risques liés à la sécurité et à la gestion des déchets radioactifs, elle fournit une quantité importante d'électricité sans émissions de CO₂.

I.3.2 Énergies renouvelables

Les énergies renouvelables comprennent plusieurs sources telles que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, géothermique et la biomasse. Ces sources d'énergie sont durables, respectueuses de l'environnement et contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

- L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique provient du mouvement naturel de l'air et de l'eau. Elle est dérivée de l'énergie de l'eau en mouvement. Le vent et l'eau en mouvement créent de l'énergie, qui peut être stockée et utilisée. L'énergie hydraulique est générée à partir de l'eau en mouvement, en

utilisant des technologies mécaniques telles que les turbines pour convertir cette énergie et augmenter l'approvisionnement [10].

– L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source infinie et gratuite d'énergie présente sur notre planète. Le soleil émet une immense quantité d'énergie thermique chaque jour. La radiation solaire est supérieure à la consommation énergétique annuelle de la population mondiale. La lumière du soleil possède un énorme potentiel pour produire de l'énergie renouvelable. L'énergie solaire peut être captée et utilisée de différentes manières, notamment pour générer de l'électricité grâce à des systèmes photovoltaïques, pour le chauffage de l'eau (énergie solaire thermique) et pour l'architecture solaire. Les techniques solaires actives impliquent l'utilisation de panneaux solaires, de centrales solaires concentrées et de chauffe-eau solaire. Les techniques passives incluent l'orientation des bâtiments vers le soleil, le choix de matériaux avec une masse thermique favorable et la conception d'espaces favorisant la circulation naturelle de l'air. L'énergie solaire est essentielle pour un avenir durable, car elle réduit la pollution, renforce la sécurité énergétique et contribue à la lutte contre le réchauffement climatique [10].

– L'énergie éolienne

La production d'énergie éolienne dépend fortement de la vitesse du vent. La production augmente avec la vitesse du vent et reste constante au-dessus de la vitesse de vent nominale. Les éoliennes ne produisent pas d'énergie par vent faible ou très fort, et cessent de fonctionner en conséquence. La gestion de l'énergie éolienne est un enjeu important pour les réseaux éoliens à grande échelle. La génération d'énergie éolienne dépend généralement de trois facteurs : le type de turbine (axe vertical/horizontal), l'installation de l'énergie éolienne (terrestre/marine) et la connectivité au réseau (connecté ou en veille) [10].

I.4 Consommation d'énergie électrique par secteur

De nos jours, les coûts énergétiques ont explosé et dans un monde où tout le monde s'efforce de conserver l'énergie et d'atteindre l'efficacité, l'un des appareils les plus négligés qui consomment une quantité significative d'énergie, c'est-à-dire les lampes qui éclairent nos rues, les ampoules sont le premier appareil qui nous vient à l'esprit lorsque nous rappelons pourquoi nous avons besoin d'électricité en premier lieu, les ampoules ont immédiatement changé le monde et tout le monde a été si rapide à les adopter que les rues du monde entier se sont illuminées la nuit, augmentant la sécurité, la productivité non seulement d'un seul pays mais de notre civilisation dans son ensemble. Pourtant, lorsque nous examinons nos normes actuelles de conservation de l'énergie, nous ignorons presque toujours que ces reliques du passé sont l'un des principaux consommateurs d'énergie à l'époque moderne alors qu'elles peuvent facilement être modifiées et modernisées pour non seulement fournir un éclairage efficace et de nombreuses autres fonctionnalités, mais aussi économiser de l'énergie tout en nous fournissant de telles installations.

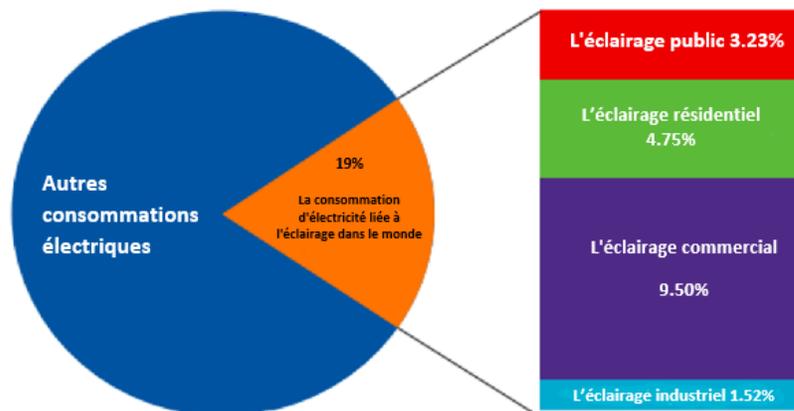


Figure I. 2 Consommation électrique de l'éclairage dans le monde en 2018 [4].

La figure I.2 représente la consommation électrique des différents types de l'éclairage y a compris l'éclairage public dans le monde en 2018. L'éclairage représente la plus grande catégorie de consommation d'électricité, avec 19 % du total. Cette catégorie comprend l'éclairage résidentiel, commercial, industriel et public.

I.5 L'Éclairage public

En dehors du soleil comme source primaire naturelle génératrice de lumière, l'homme a vite fait de mettre à son service des moyens artificiels pour s'éclairer en cas de besoin (Figure I.3), notamment après avoir apprivoisé le feu (torche, lampe à huile, bougie, lampe à gaz...), la lumière a manifestement joué un rôle décisif quant à l'évolution des connaissances, puisqu'elle a souvent servi de cas d'école et continuera probablement de l'être pour longtemps encore. L'éclairage public au niveau des villes, villages et autres infrastructures collectives, est un service public de grande importance destiné à sécuriser la vie nocturne ainsi que toutes les activités humaines qui lui sont liées (travail, déplacement, loisirs...), en permettant de voir et d'être vu en l'absence d'une lumière naturelle suffisante. A ce titre et pratiquement partout dans le monde, l'éclairage public est entièrement à la charge des collectivités locales, pour lesquelles il représente une part importante du budget énergie. Ceci étant, sans parler des dépenses liées aux services requis de maintenance et autres investissements qu'occasionnent les inhérentes extensions, caractéristiques du développement des agglomérations urbaines modernes [4].

I.5.1 Définition de l'éclairage public

L'éclairage public englobe les moyens employés pour illuminer les espaces publics et les voies de circulation. Il comprend diverses catégories d'éclairage adaptées aux spécificités des lieux à illuminer [11]. Ces installations comprennent généralement des lampadaires, des réverbères, des projecteurs et d'autres dispositifs d'éclairage placés le long des routes, des trottoirs, dans les parcs, les places et d'autres lieux publics. L'éclairage public a pour but de faciliter la circulation des piétons et des véhicules, de dissuader la criminalité, d'embellir les espaces extérieurs et de contribuer à créer une ambiance agréable dans les villes et les villages.

Les méthodes d'éclairage sont variées et multiples, toutes visant à améliorer la visibilité et à instaurer un sentiment de sécurité. Il est donc essentiel d'avoir un éclairage adéquat, tant pour assurer un confort visuel que pour des raisons de sécurité. De plus, la facilité de maintenance des équipements d'éclairage est un aspect crucial à prendre en compte.

Dans le cadre d'une transition écologique raisonnée, il convient d'optimiser la gestion de l'éclairage public, des réponses adaptées aux besoins et aux usages de la population, tout en répondant aux enjeux économiques, écologiques et sécuritaires [12].



Figure I. 3 Premières sources artificielles de lumière et leur évolution

I.6 Les différents types d'éclairage public

I.6.1 Éclairage à lampes à incandescence halogènes

L'éclairage à lampe halogène (figure I.4) utilise des ampoules contenant du gaz halogène généralement le fluor, l'iode ou le brome, est simplement ajouté à l'environnement neutre typique de la configuration classique, afin d'améliorer encore plus la tenue du filament de tungstène en le régénérant aux hautes températures. Afin d'augmenter l'efficacité de la lampe à incandescence classique ainsi que sa durée de vie [4]. Ces lampes fonctionnent en chauffant un filament de tungstène à l'intérieur de l'ampoule, ce qui génère une lumière intense et brillante.

Les lampes halogènes sont appréciées pour leur rendu des couleurs élevé, leur capacité à produire une lumière blanche et brillante, et leur longue durée de vie par rapport à d'autres types d'ampoules incandescentes. Elles sont souvent utilisées dans diverses applications d'éclairage, y compris l'éclairage domestique, commercial et automobile.



Figure I. 4 Lampe halogène à incandescence et divers modèles.

I.6.2 Éclairage à vapeur de sodium haute pression (HPS)

Vue la place importante qu'ont occupé les lampes au sodium haute pression (HPS), dans l'éclairage public (Figure I.5) à travers le monde et qu'elles ont progressivement remplacé dans ce domaine à partir des années 1970 et ce jusqu'à une date assez récente, elles ont été au centre de nombreuses études liées à leur efficacité lumineuse et ce, sous l'effet des politiques de rationalisation des consommations énergétiques globales dictées par des contraintes économiques et environnementales connues de tous [4].



Figure I. 5 Gamme assez complète de lampes HPS actuellement disponibles.

I.6.3 Éclairage à LED

Vu la richesse pratiquement infinie en termes de couleurs de la lumière obtenue par synthèse additive de celles de base (RGB), utiliser cette approche pour générer uniquement de la lumière blanche, même avec des nuances en termes de température (chaude, froide ou neutre) et indice de rendu de couleur (IRC), favorables à un éclairage public de qualité, serait manifestement disproportionné et coûteux, surtout pour les seuils d'intensités et puissances usuels. De ce fait, l'usage des sources de lumière à base de LED RGB, est resté confiné à des applications où l'ensemble des capacités offertes sont pleinement exploitées, comme c'est le cas d'applications

visant la valorisation nocturne des espaces et monuments publics, à travers un éclairage dynamique et riche en couleurs [4]. C'est pour cela Les luminaires à LED (Figure I.6) sont devenus de plus en plus populaires en raison de leur efficacité énergétique supérieure, de leur longue durée de vie et de leur capacité à produire une lumière de haute qualité. Ils offrent également une flexibilité en termes de contrôle de l'éclairage et sont utilisés dans diverses applications d'éclairage public, y compris l'éclairage des rues, des parcs, des monuments et des bâtiments.



Figure I. 6 Exemples de luminaires constitués de modules LED prêts à l'emploi dans divers dispositifs d'éclairage public

I.6.4 Éclairage solaire

a. Fondements de l'éclairage solaire

L'éclairage artificiel dont beaucoup d'aspects liés à l'activité humaine dépendent de nos jours, a été une des toutes premières applications de l'électricité, alors que la génération de cette énergie à base de solaire photovoltaïque est en train d'élargir encore plus l'usage en la rendant disponible et de manière autonome dans des endroits où elle était rare, peu accessible ou tout simplement inexistante.

Ainsi et contrairement aux lampadaires d'éclairage public classiques, utilisant généralement le réseau électrique de distribution basse tension (230 V, 50 Hz) comme source d'énergie centralisée en courant alternatif (AC), ceux destinés à l'être par de l'électricité renouvelable, notamment solaire photovoltaïque, sont tout à fait autonomes et de déploiement assez simple. En effet, aucune installation d'acheminement de l'énergie nécessaire (câble) à partir d'une armoire de commande centralisée n'est exigée, puisque cette dernière peut justement être générée localement à la juste mesure et de manière complètement indépendante au niveau de chaque lampadaire. L'électricité solaire permet ainsi d'apporter un éclairage abordable et de qualité à divers endroits, notamment ceux reculés où cela était autrefois coûteux ou peu pratique. Plus encore, étant initialement produite sous forme de courant continu (DC), elle peut être directement utilisée sans aucune conversion intermédiaire (DC-AC), par de nombreux types de lampes, parfaitement adaptées à cet aspect d'alimentation et dont le principe même de génération de lumière, exige au final un courant continu. Parmi ces dernières, on y trouve justement les lampes à diodes

électroluminescentes (LED), qui s'imposent aujourd'hui dans le monde de l'éclairage, notamment public, pour de multiples raisons dont la qualité de la lumière [4].

b. Lampadaire solaire d'éclairage public

Physiquement, le seul élément de différenciation d'un lampadaire solaire par rapport à celui classique, se résume aux constituants associés au dispositif (figure I.7) permettant de générer localement et de manière autonome, suffisamment d'énergie électrique à base de solaire photovoltaïque, qui sera convertie en lumière (aux pertes près) grâce à la lampe utilisée. En effet, face à des besoins d'éclairage public répondant à des performances photométriques données, la structure globale du dispositif (intensité et qualité de la lumière émise, hauteur et espacement des lampadaires,) reste logiquement la même que ce soit avec alimentation classique par le réseau ou à base d'électricité solaire [4].

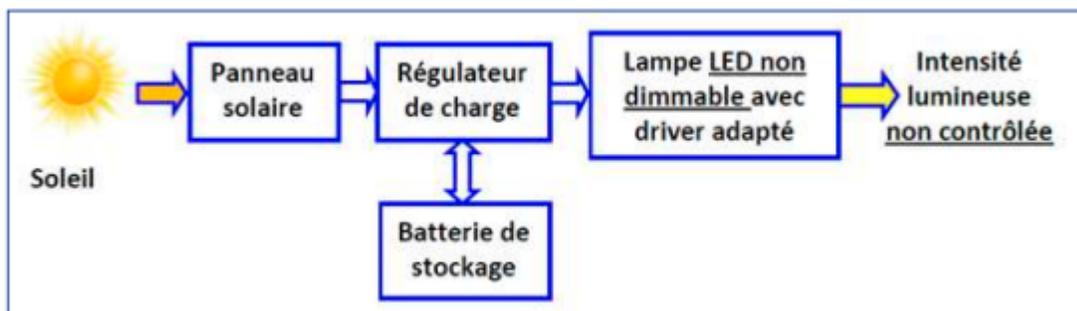


Figure I. 7 Synoptique d'un système d'éclairage solaire non commandé

Les systèmes photovoltaïques sont largement installés pour augmenter la part des énergies renouvelables et réduire l'impact environnemental de l'énergie produite à partir de combustibles fossiles. Le photovoltaïque (PV) est l'un des systèmes de production d'énergie renouvelable les plus prometteurs [13]. Le choix d'un système photovoltaïque (PV) pour l'alimentation des luminaires est motivé par plusieurs avantages clés. Tout d'abord, les systèmes PV utilisent une source d'énergie renouvelable et abondante (la lumière du soleil) ce qui permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de diminuer les émissions de carbone. De plus, l'installation de luminaires alimentés par l'énergie solaire est particulièrement avantageuse dans les zones éloignées ou mal desservies par le réseau électrique, offrant une solution d'éclairage autonome et fiable.

c. Constitution d'un système photovoltaïque hors réseaux

1. Le module PV

Un module PV est le plus petit ensemble de cellules solaires interconnectées et complètement protégées contre l'environnement. Généralement il contient également des protections pour protéger les cellules PV d'un fonctionnement qui peut être destructif. Les connexions peuvent être réalisées en parallèle ou en série. L'énergie PV est utilisée dans deux domaines

d'applications : le PV en site isolé et le PV connecté au réseau. Ces deux applications ont des fonctions et mettent en œuvre des chaînes de conversion très différentes [14].

2. Les batteries

Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, l'énergie électrique produite par les panneaux PV ne peut pas toujours être utilisée au moment de sa production. En raison du décalage entre la demande en énergie et la production, des batteries de stockage électrique sont couramment utilisées dans les systèmes PV [15]. Les fonctions principales d'une batterie de stockage dans un système PV sont les suivantes [15]:

– Capacité de stockage d'énergie et autonomie

Stocker l'énergie électrique produite par les panneaux PV lorsqu'elle est disponible, et fournir cette énergie aux charges électriques selon les besoins ou à la demande.

– Stabilisation de la tension et du courant

Fournir de l'énergie aux charges électriques à des tensions et courants stables, en supprimant ou en atténuant les transitoires qui peuvent survenir dans les systèmes PV.

– Fourniture de courants de pointe

Fournir des courants de pointe ou des courants de fonctionnement élevés aux charges électriques ou aux appareils.

Résumé des Considérations pour la Sélection et la Conception des Batteries

Lors de la sélection et de la conception des batteries pour un système photovoltaïque (PV), plusieurs critères essentiels doivent être pris en compte [15] :

-
- | | |
|--|---|
| • Type de système et mode de fonctionnement | • Conditions de température et environnementales |
| • Caractéristiques de charge; | • Durée de vie en cycles et/ou durée de vie en années |
| • Résistance interne | • Exigences de maintenance |
| • Nombre de jours de stockage requis (autonomie) | • Scellée ou non scellée |
| • Quantité et variabilité du courant de décharge | • Taux d'auto-décharge |
| • Profondeur de décharge maximale autorisée | • Capacité maximale des cellules |
| • Exigences quotidiennes en profondeur de décharge | • Densité de stockage d'énergie |
| • Accessibilité de l'emplacement | • Taille et poids |
| • Sensibilité à la sulfatation | • Caractéristiques de dégazage |
| | • Sensibilité au gel |
| | • Réputation du fabricant |
| | • Coût et garantie |
-

-
- Concentration de l'électrolyte
 - Disponibilité des matériels auxiliaires
 - Configuration des bornes
-

Tableau I. 1 Critère de sélection des batteries

3. Les onduleurs

Un onduleur sert à convertir une puissance continue en puissance alternative. Il existe deux grandes catégories d'onduleurs [16] :

Les onduleurs autonomes (ou oscillateurs) qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.

Les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle.

4. Les régulateurs de Batterie dans les Systèmes PV

La fonction principale d'un contrôleur de charge dans un système photovoltaïque autonome est de maintenir la batterie à son état de charge le plus élevé possible tout en la protégeant contre la surcharge par les panneaux solaires et la décharge excessive par les charges [15].

Fonctions Importantes des contrôleurs de charge de batterie [15] :

- **Prévenir la Surcharge de la Batterie** : Limiter l'énergie fournie à la batterie par les panneaux PV lorsque la batterie est complètement chargée.
- **Prévenir la Décharge Excessive de la Batterie** : Déconnecter la batterie des charges électriques lorsque la batterie atteint un faible état de charge.
- **Fournir des Fonctions de Contrôle des Charges** : Connecter et déconnecter automatiquement une charge électrique à un moment spécifié, par exemple pour faire fonctionner un éclairage de coucher du soleil à l'aube.

I.7 Dispositifs d'éclairage public

I.7.1 Luminaires

Un luminaire est un appareil qui regroupe un ensemble de fonctionnalités telles que la production, le contrôle et la distribution de la lumière (figure I.8). Il est question donc d'un ensemble complet d'éclairage public, principalement constitué d'une ou plusieurs lampes, les douilles permettant de les positionner tout en facilitant leur montage et enfin des dispositifs optiques destinés à répartir la lumière [4].

En termes pratiques, les exigences d'un luminaire, parfois énoncées sous forme de spécifications techniques, pourraient se résumer comme suit :

- Étanchéité à l'eau et aux particules de poussière pour assurer une protection adéquate des composants intégrés (tels que la lampe, le ballast, etc.).
- Solidité et résistance de la structure à la corrosion (par exemple, en utilisant de la fonte d'aluminium) pour garantir une durabilité face aux conditions environnementales.
- Conception optimisée pour un flux lumineux efficace, avec un rendement lumineux élevé et une réduction minimale de l'éblouissement.

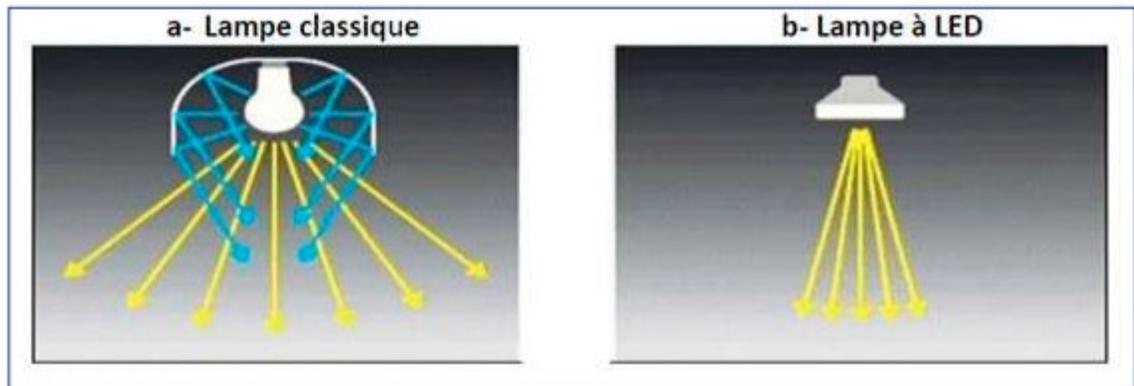


Figure I. 8 Faisceaux lumineux d'une lampe classique avec réflecteur et LED

I.7.2 Principaux constituants d'un luminaire

Les performances photométriques et thermiques, les matériaux utilisés ainsi que la taille d'un luminaire, dépendent essentiellement du type de lampe utilisé et sa puissance nominale.

Voici les principaux éléments constitutifs d'un luminaire : (figure I.9)

- **L'armature** : L'armature assure l'assemblage des divers composants du luminaire, tels que les réflecteurs, les volets, la base et le diffuseur. L'armature sert également à fixer le luminaire au plafond ou au mur.
- **Le réflecteur** : Le réflecteur renvoie la lumière émise par la lampe et la dirige dans des directions spécifiques, optimisant ainsi la répartition de la lumière dans l'espace.
- **Le protecteur** : Parfois appelé "vasque", il remplace les volets et protège la lampe de l'environnement extérieur. Le diffuseur peut également avoir une fonction esthétique en modifiant la qualité de la lumière émise.
- **La platine** : La platine permet la fixation des composants électriques auxiliaires tels que les ballasts et les démarreurs. La base est cruciale pour le bon fonctionnement du luminaire.
- **L'auxiliaire électrique sur platine** : Il fait référence à un composant électrique supplémentaire intégré à la platine d'un luminaire. Cet auxiliaire peut prendre différentes formes en fonction des besoins spécifiques du luminaire, mais il est

généralement utilisé pour fournir des fonctions telles que la régulation de l'alimentation électrique, le démarrage de la lampe, la protection contre les surtensions ou d'autres fonctionnalités de contrôle.



Figure I. 9 Luminaires classiques et à LED adaptés à l'éclairage public

I.7.3 Rendement du Luminaire

L'évaluation des performances d'un luminaire sur le plan photométrique se concentre principalement sur son rendement, évalué à travers trois rapports caractéristiques de l'intensité lumineuse émise et de sa distribution dans l'espace environnant :

- **Le LOR (Light Output Ratio)** : Il représente le rapport entre le flux lumineux émis par le luminaire et celui généré par la source lumineuse principale (lampe). Sa valeur peut varier entre 65 et 95 % en fonction de la qualité du luminaire.
- **Le DLOR (Downward Light Output Ratio)** : Il indique la proportion du flux lumineux émis en dessous du plan horizontal passant par le luminaire dans sa position d'installation. Cette valeur peut varier entre 5 et 95 % selon la qualité du luminaire considéré.
- **L'ULOR (Upward Light Output Ratio)** : Il mesure la proportion du flux lumineux émis au-dessus du plan horizontal passant par le luminaire dans sa position d'installation. Comme le DLOR, sa valeur peut varier entre 5 et 95 % en fonction de la qualité du luminaire.

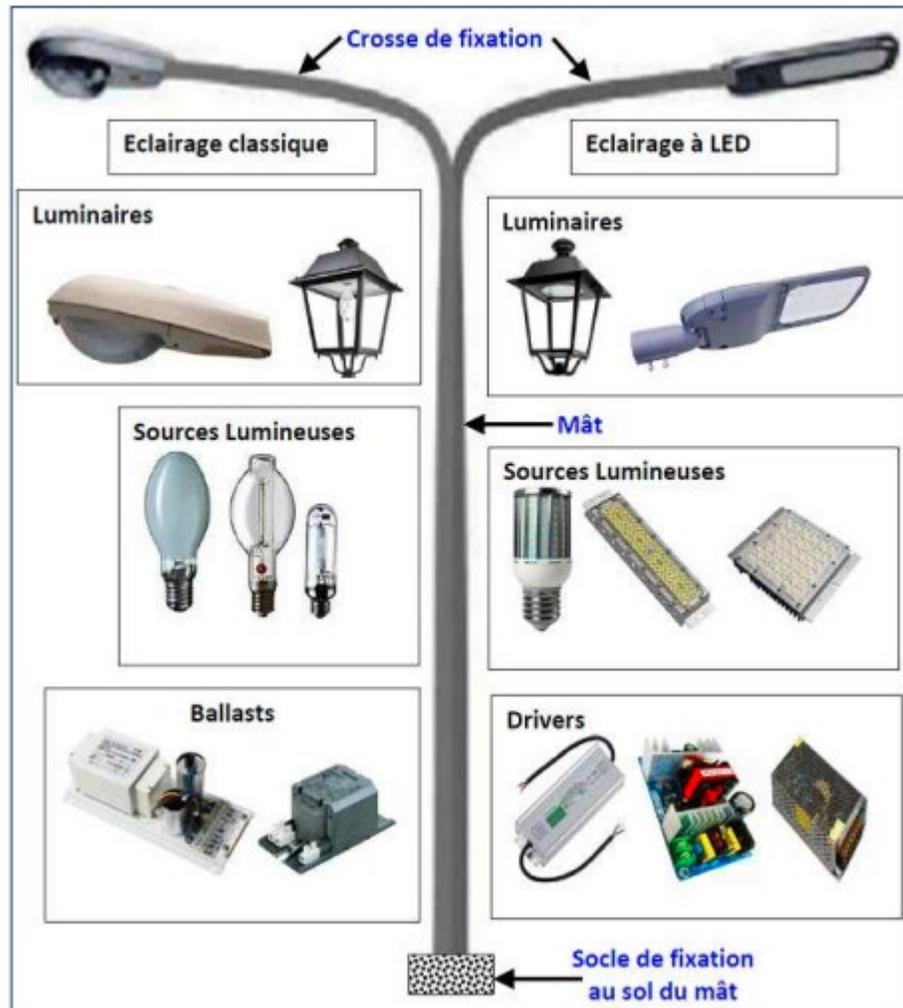


Figure I. 10 Lampadaires d'éclairage public et composants intégrés dans les cas classiques et à LED

La figure I.10 illustre sur le côté gauche des ampoules à incandescence ou halogènes traditionnelles, et sur le côté droit des lumières LED. Ces dernières sont de plus en plus populaires en raison de leur faible consommation d'énergie et de leur durée de vie plus longue.

I.8 Les enjeux de l'éclairage public

Un système d'éclairage bien conçu doit au final offrir des conditions optimales de confort visuel au bénéficiaire, selon les particularités de chaque environnement. Au final, les facteurs déterminants du confort visuel peuvent être résumés à ce qui suit : [4]

- Éclairage uniforme;
- Luminance optimale;
- Absence d'éblouissement;

- Contrastes appropriés;
- Rendu correct des couleurs;
- Absence de fluctuations de la lumière ou scintillement.

I.9 Aspect économique de l'éclairage public

I.9.1 Au niveau mondial

Aujourd'hui, du point de vue énergétique, l'éclairage consomme plus de 3418 TWh d'énergie électrique par an. Cette quantité représente approximativement 19 % de la production globale d'électricité mondiale et un peu plus de 2 % des ressources énergétiques primaires.

Cependant, la situation varie d'un pays à l'autre. Ainsi la consommation énergétique d'un pays occidental pour l'éclairage varie entre 7 % et 15 % de sa propre consommation énergétique. Plus précisément, la France consomme presque 12 % de son électricité pour l'éclairage dont 60 % par le secteur tertiaire, 10 % pour l'éclairage public et routier. Aux États-Unis la consommation d'énergie électrique pour l'éclairage atteignait, en 2000, 659 TWh, ce qui représente 19 % de l'énergie électrique produite dans le pays (en valeur absolue, cette énergie équivaut à la production d'électricité combinée de la France et de l'Italie). En ce qui concerne maintenant les pays en voie de développement, la situation est différente. L'éclairage représente aujourd'hui la majeure partie de la consommation électrique : 30 % pour la Tunisie, presque 40 % pour le Madagascar et jusqu'à 86 % pour la Tanzanie (champion toutes catégories dans le domaine) [17].

I.9.2 Le cas d'Algérie

Afin de réduire la facture d'électricité des collectivités locales qui a atteint 27 milliards de dinars en 2017 pour une consommation globale de 4 801 GWhs, soit 8 % de celle nationale qui avoisinait les 60 000 GWh, les autorités publiques ont décrété le recours à un éclairage public moins énergivore comme axe à privilégier. En effet, ce secteur mobilise à lui seul 2839 GWhs, soit environ 60 % de l'ensemble des consommations d'électricité dans les communes (Figure I.11) avec un budget annuel de près de 15 Milliards de DA [4].

Algérie : l'éclairage public représente 40% de la consommation globale d'électricité

Le secteur de l'Énergie s'attelle, dans le cadre de la transition et de l'efficacité énergétique, à l'élaboration d'un modèle énergétique prospectif couvrant plusieurs secteurs, notamment ceux énergivores, à l'instar de l'éclairage public représentant 40% de la consommation globale de l'électricité en Algérie, a indiqué, mardi à Alger, le secrétaire général (SG) du ministère de l'Énergie et des Mines, cité par l'agence APS [5].

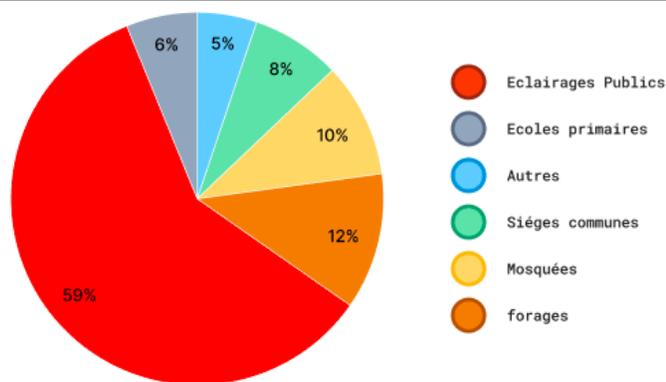


Figure I. 11 Consommation d'énergie électrique (GWh) par activité pour les communes de l'ensemble des 48 wilayas en 2018 [4]

La consommation de l'éclairage public s'élevait à 6.500 mégawatts en 2021 évoquant l'importance du réseau national d'éclairage public, notamment dans le contexte de l'expansion du réseau routier urbain et autoroutier, le ministère de l'Énergie et des Mines a rappelé que la consommation globale de l'éclairage public s'élevait à 6.500 mégawatts en 2021, soit 40 % de la consommation électrique globale dans le pays, d'où la nécessité de concrétiser le programme national d'efficacité de l'éclairage public et de rationaliser sa consommation [5].

L'éclairage public coûte 100 millions de dollars par an à l'Algérie, le 21/11/2022 le ministère de la Transition énergétique et des Énergies renouvelables, a révélé que le coût de l'éclairage public s'élève à 60% de la facture totale d'électricité, soit environ 15 milliards de dinars annuels, l'équivalent de 100 millions de dollars. Le même ministère a souligné que la généralisation de l'utilisation de l'énergie dans l'éclairage public à toutes les communes du pays s'inscrit dans les efforts de l'État pour réaliser le programme national d'efficacité énergétique.

À ce propos, il a indiqué que plus de 90% de la généralisation de l'éclairage public a été atteinte au niveau des communes du pays [5].

Le concept de transition énergétique qui se dessine de nos jours à travers le monde, s'est manifestement imposé comme le seul élément de réponse crédible face aux soucis liés à la raréfaction prévisible des ressources énergétiques classiques et leurs effets de plus en plus apparents sur l'environnement [4].

La transition de l'éclairage public classique vers un éclairage public intelligent représente un changement significatif dans la manière dont les systèmes d'éclairage urbain sont conçus, gérés et utilisés. Cependant, les enjeux liés à l'éclairage public classique ne sont pas qu'économiques. Celui-ci garantit des conditions de visibilité et de sécurité et participe à l'ambiance paysagère nocturne en milieux ruraux et urbains. Ainsi, il impacte directement la vie nocturne des habitants par la sensation de bien-être ou d'insécurité qu'il peut provoquer et bénéficie autant aux modes actifs qu'aux conducteurs de véhicules. De plus, il est nécessaire de considérer l'impact de l'éclairage public sur la biodiversité et la qualité de ciel nocturne [10]. Alors que l'éclairage public traditionnel se contente souvent de fournir une illumination constante et uniforme, l'éclairage public intelligent intègre des technologies avancées pour optimiser l'efficacité énergétique,

améliorer la sécurité, et offrir de nouvelles fonctionnalités et services aux citoyens, également des avantages économiques significatifs.

I.10 L'éclairage public intelligent

L'éclairage public intelligent avait pour objectif principal de minimiser la consommation d'énergie en ajustant divers paramètres pour réguler l'intensité lumineuse. Cependant, avec les avancées technologiques actuelles, les luminaires se transforment en systèmes interactifs multifonctionnels qui peuvent communiquer avec leur environnement. Cette évolution génère d'importantes quantités de données, sur lesquelles reposent des solutions et des services novateurs. Cela ouvre la voie à un développement urbain intelligent.

I.10.1 Définition d'éclairage public intelligent

L'éclairage public intelligent est une technologie qui utilise des capteurs, des réseaux de communication et des algorithmes pour optimiser l'efficacité énergétique, la sécurité et le confort de l'éclairage dans les espaces publics. Un lampadaire intelligent est un luminaire public qui intègre des technologies, telles que des caméras, des cellules photoélectriques sensibles à la lumière et d'autres capteurs, pour introduire des fonctionnalités de surveillance en temps réel (figure I.12). Également appelé éclairage adaptatif ou éclairage intelligent, ce type de système d'éclairage est reconnu comme une étape importante dans le développement des villes intelligentes. En plus de permettre aux villes de fournir la quantité appropriée de lumière de rue pour les conditions locales, l'installation d'un éclairage intelligent aidera à améliorer la satisfaction des citoyens en matière de sécurité et de sûreté, tout en apportant aux municipalités des économies importantes en matière de consommation d'énergie et de maintenance des systèmes d'éclairage. De plus, l'infrastructure d'éclairage extérieur servira de base à un certain nombre d'applications d'internet des objets (Internet of things IOT), telles que la surveillance de la météo, de la pollution et du trafic [18].

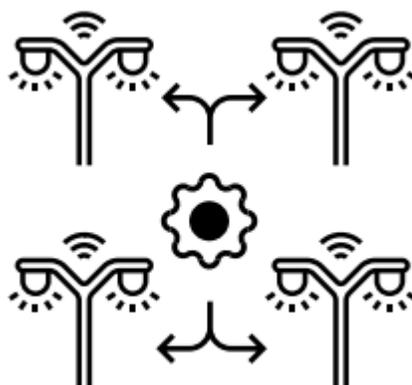


Figure I. 12 L'éclairage public intelligent

I.10.2 Les caractéristiques d'éclairage public intelligent

Les caractéristiques des lampadaires intelligents dépendent de la technologie spécifique utilisée par les urbanistes municipaux. Voici quelques fonctionnalités courantes :

- **Contrôles d'éclairage dynamiques basés sur la détection des mouvements :** Les lampadaires intelligents ajustent automatiquement leur luminosité en fonction de l'activité détectée, ce qui permet d'économiser de l'énergie et d'améliorer la sécurité.
- **Surveillance environnementale et météorologique :** Les capteurs intégrés aux lampadaires collectent des données sur la qualité de l'air, la température, l'humidité, etc. Ces informations peuvent être utilisées pour prendre des décisions éclairées concernant l'éclairage et d'autres services urbains.
- **Signalisation numérique mise à jour en temps réel :** Les panneaux d'affichage numériques sur les lampadaires peuvent diffuser des informations importantes, telles que les règlements de stationnement ou les alertes d'accidents.
- **Gestion du stationnement :** Les lampadaires intelligents peuvent détecter les véhicules mal garés et alerter les autorités. Ils peuvent également aider à trouver des places de stationnement disponibles.
- **Communications cellulaires et sans fil étendues :** Certains lampadaires sont équipés de technologies de communication pour faciliter la connectivité dans la ville.
- **Gestion du trafic en temps réel :** Les données collectées par les lampadaires intelligents peuvent être utilisées pour surveiller la congestion et la vitesse du trafic, ce qui permet d'optimiser la circulation.
- **Réponse d'urgence automatique en cas d'accident de voiture ou de crime :** Les lampadaires intelligents peuvent détecter des événements tels que des accidents de la route ou des incidents criminels et alerter les services d'urgence.

I.10.3 Les avantages d'éclairage public intelligent

La mise en œuvre des systèmes de lampadaires intelligents offre les avantages suivants :

- **Réduction des coûts et de la consommation d'énergie grâce à des commandes de gradation flexibles :** Les lampadaires intelligents ajustent automatiquement leur luminosité en fonction des besoins, ce qui permet d'économiser de l'énergie.
- **Satisfaction accrue des piétons grâce à des mesures de sécurité améliorées :** Les lampadaires intelligents contribuent à une meilleure sécurité dans les rues, ce qui favorise la satisfaction des citoyens.
- **Réduction des coûts de réparation et de maintenance grâce au logiciel de surveillance :** Les données collectées par les lampadaires intelligents permettent de détecter les pannes plus rapidement, réduisant ainsi les coûts de maintenance.

- **Réduction des émissions de carbone et de la pollution lumineuse :** Les lampadaires intelligents sont plus efficaces et émettent moins de lumière parasite, ce qui réduit la pollution lumineuse.
- **Durée de vie accrue des lampes et temps de réponse plus courts en cas de panne :** Grâce à la surveillance en temps réel, les pannes sont détectées plus rapidement, ce qui permet de réduire les temps d'arrêt.
- **Amélioration de la planification architecturale basée sur les véritables schémas de circulation et les informations :** Les données collectées par les lampadaires intelligents peuvent aider les urbanistes à prendre des décisions éclairées pour la conception urbaine.
- **Opportunités de revenus accrues, telles que la location de poteaux pour des panneaux d'affichage numériques ou d'autres services :** Les lampadaires intelligents peuvent servir de support pour des services supplémentaires, ce qui peut générer des revenus pour la municipalité.

I.10.4 L'Éclairage public intelligent comme solution

L'énergie se raréfie de jour en jour car nos sources d'énergie sont limitées. Les ingénieurs et les scientifiques essaient de trouver de nouvelles sources d'énergie. Dans ces circonstances, il est de notre responsabilité de ne pas gaspiller les sources existantes en utilisant correctement l'énergie que nous avons déjà. L'éclairage public consomme près de 30 % de l'énergie totale dépensée par ville, [5] l'énergie peut être réduite en utilisant un éclairage public urbanisé ou intelligent au lieu des systèmes d'éclairage conventionnels. Selon le fondateur de **Kawantech**, **Yves Le Henaff** [6], « ce dispositif permet d'économiser 65% de la consommation d'énergie ».

I.11 Les solutions existantes

La transition vers un éclairage public intelligent implique l'intégration de diverses méthodes de connectivité existantes, telles que Zigbee, Bluetooth et d'autres protocoles de communication sans fil. Ces technologies jouent un rôle crucial dans la mise en œuvre d'un éclairage intelligent en permettant la communication entre les luminaires, les capteurs, les appareils mobiles et les systèmes de gestion centralisée.

I.11.1 Zigbee technologie

I.11.1.1 Spécification ZigBee et IEEE 802.11.4

L'Alliance Zigbee a été créée en août 2001. La spécification ZigBee, officiellement appelée ZigBee 2007, offre un réseau maillé sans fil complet capable de prendre en charge plus de 64000 appareils sur un seul réseau. Elle est conçue pour connecter la plus large gamme d'appareils, dans n'importe quelle industrie, en un seul réseau de contrôle. La spécification ZigBee propose deux options d'implémentation ou ensembles de fonctionnalités : ZigBee et ZigBee PRO [19].

I.11.1.2 Ensemble de fonctionnalités Zigbee

Est conçu pour prendre en charge des réseaux plus petits avec des centaines d'appareils dans un seul réseau [19].

I.11.1.3 Ensemble de fonctionnalités Zigbee Pro

Est le choix le plus populaire des développeurs et la spécification utilisée pour la plupart des ensembles de fonctionnalités ZigBee développés par l'Alliance. Il facilite l'utilisation et le support avancé des réseaux plus grands composés de milliers d'appareils. Les deux ensembles de fonctionnalités sont conçus pour inter-opérer entre eux, garantissant une utilisation à long terme et la stabilité [19].

I.11.1.4 Les caractéristiques de ZigBee [19]

- Opération mondiale dans la bande de fréquences 2,4 GHz selon la norme IEEE 802.15.4.
- Opération régionale dans les bandes de fréquences 915 MHz (Amériques) et 868 MHz (Europe).
- Solution agile en fréquence fonctionnant sur 16 canaux dans la bande de fréquences 2,4 GHz.
- Intègre des mécanismes d'économie d'énergie pour toutes les classes d'appareils.
- Mécanisme de pairage avec confirmation d'application complète.
- Topologie en étoile multiple et communication en réseau personnel (PAN).
- Options de transmission variées, y compris la diffusion.

I.11.2 Communication Bluetooth

Le Bluetooth est une technologie de communication sans fil qui permet l'échange de données et de fichiers entre plusieurs périphériques sur une courte distance. Son principal avantage est qu'il permet une connexion sans fil entre les appareils, sans avoir besoin de câbles. Le Bluetooth est largement utilisé dans le monde de la téléphonie mobile et de l'informatique [20]. Cette technologie présente plusieurs avantages, notamment une faible consommation d'énergie, ce qui prolonge l'autonomie des appareils, et un coût relativement bas comparé à d'autres technologies plus onéreuses.

I.12 Critique de l'existant

Les technologies Zigbee et Bluetooth sont largement utilisées dans le domaine des communications sans fil, mais elles présentent chacune leurs propres avantages et inconvénients comme le montre le tableau suivant :

Technologie	Avantages	Inconvénients
<p>ZigBee technologie</p>	<p>Zigbee est particulièrement adapté aux réseaux de capteurs et d'appareils IoT en raison de sa faible consommation d'énergie.</p> <p>Il offre une portée plus étendue que Bluetooth et est capable de gérer un grand nombre de nœuds dans un réseau maillé.</p> <p>Zigbee est un protocole standardisé et ouvert, ce qui favorise l'interopérabilité entre différents fabricants.</p>	<p>Sa vitesse de transfert de données est généralement plus lente que celle du Wi-Fi et du Bluetooth.</p> <p>La configuration et la mise en œuvre de réseaux Zigbee peuvent être plus complexes, nécessitant parfois des connaissances spécialisées.</p>
<p>Bluetooth technologie</p>	<p>Bluetooth est largement pris en charge par de nombreux appareils électroniques grand public, ce qui en fait une option pratique pour le partage de données entre appareils mobiles.</p> <p>Il offre une configuration et une utilisation simplifiées, avec une connectivité Plug-and-Play pour de nombreux appareils.</p> <p>Bluetooth est bien adapté aux applications nécessitant une faible consommation d'énergie.</p>	<p>La portée du Bluetooth est limitée à quelques mètres, ce qui peut être contraignant pour certaines applications nécessitant une connectivité sur de plus longues distances.</p> <p>Sa vitesse de transfert de données est généralement inférieure à celle du Wi-Fi, limitant son utilisation dans les applications nécessitant un débit important.</p>

Tableau I. 2 Critique de

I.13 Solution proposée

Dire qu'une technologie est "meilleure" que d'autres dépend vraiment du contexte et des besoins spécifiques. Chaque technologie a ses propres avantages et inconvénients, et ce qui peut être considéré comme le meilleur choix dans un scénario peut ne pas l'être dans un autre.

Après une analyse approfondie des logiciels, matériels et installations existants, nous avons développé une solution technique de contrôle et de supervision d'éclairage.

La solution est conçue pour être compatible avec les technologies anciennes et nouvelles.

I.13.1 Les avantages de cette solution comprennent

- Surveillance de la consommation d'énergie.

- Surveillance des performances de l'éclairage.
- Mise en œuvre d'un éclairage adaptatif.

Cette solution offre une gestion efficace de l'éclairage, permettant un contrôle précis et une optimisation continue des performances, tout en assurant la compatibilité avec les infrastructures existantes et futures.

I.14 Intégration de Système PV pour l'alimentation d'éclairage public

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans l'éclairage public ne se limite pas seulement à fournir une source d'énergie renouvelable, mais vise également à réaliser un système de monitoring avancé pour optimiser la performance et la gestion de l'éclairage public. Cette approche combine les avantages des énergies renouvelables avec les technologies intelligentes pour créer des solutions d'éclairage public autonomes, efficaces et durables.

Cependant, les dispositifs de collecte de données, communément appelés enregistreurs de données, sont trop coûteux, nécessitent des logiciels spécifiques (avec des coûts accrus et des compétences supplémentaires requises) et exigent une alimentation électrique ou un PC connecté en permanence. De plus, les enregistreurs de données typiques ne correspondent pas bien aux types de capteurs à mesurer en termes de précision, avec un nombre insuffisant de canaux d'entrée ou des canaux d'entrée inadéquats pour la connexion de capteurs spécifiques, tels que les thermocouples ou les capteurs numériques. Ces problèmes et limitations, tant en termes de coût que de capacités technologiques, nous ont conduits à concevoir et développer un nouvel enregistreur de données capable de surveiller les systèmes PV à faible coût et avec un design flexible [21]

L'aspect essentiel de cette intégration est la mise en place d'un système de monitoring sophistiqué. Ce système permet de surveiller en temps réel la production d'énergie solaire, la consommation des lampadaires, et l'état des batteries de stockage. Le monitoring assure une gestion optimale de l'énergie, permet de détecter rapidement les anomalies, et facilite la maintenance proactive.

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière les limites des méthodes existantes de gestion de la consommation d'énergie liée à l'éclairage public et a proposé une approche alternative plus robuste et efficace. L'objectif est de développer une méthode qui permet de réduire significativement la consommation d'énergie sans compromettre la qualité de l'éclairage ni la sécurité des usagers. Avec l'intégration de système photovoltaïque (PV) dans l'éclairage public et en mettant en place un système de monitoring avancé, il est possible de créer des solutions d'éclairage autonomes et durables.

L'adoption de l'énergie solaire pour alimenter les lampadaires publics permet non seulement de réduire la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles, mais aussi de diminuer les coûts

énergétiques à long terme. Le système de monitoring assure une gestion optimale de l'énergie en surveillant en temps réel la production et la consommation d'énergie, ainsi que l'état des batteries, ainsi une maintenance proactive et une performance accrue.

En conclusion, l'adoption d'une approche plus robuste et optimisée pour la gestion de l'éclairage public, incluant l'intégration des systèmes PV et de monitoring permettra de réduire les coûts énergétiques, de minimiser l'impact environnemental et d'améliorer la qualité de vie des citoyens.

Chapitre II – Choix de matériels et développement des dispositifs

Introduction

La conception d'un système d'éclairage public intelligent représente une étape cruciale dans la modernisation et l'efficacité des infrastructures urbaines. Dans un contexte où les villes cherchent à améliorer leur efficacité énergétique et leur sécurité, cette solution permet de contribuer non seulement à des économies substantielles, mais aussi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, favorisant ainsi des pratiques durables.

Dans notre cas d'étude, l'alimentation des luminaires va être assurée par un système photovoltaïque autonome. Cela nous a guidé à ajouter un système de monitoring pour l'acquisition de données des modules solaires. Ce système de surveillance permet de suivre en temps réel la performance des panneaux solaires, de détecter rapidement les anomalies et d'optimiser l'efficacité énergétique. Grâce à cette solution, nous pouvons assurer une gestion proactive et maintenir un fonctionnement optimal des luminaires tout en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire disponible.

Ce chapitre explore les différentes dimensions de cette conception, en mettant en lumière les technologies utilisées, les objectifs visés, ainsi que les avantages attendus d'un tel système intégré.

Objectif

Dans le cadre du développement d'un système d'éclairage public intelligent, une fonctionnalité essentielle consiste à minimiser la consommation d'énergie en ajustant automatiquement l'état du luminaire en fonction de la luminosité ambiante et de la détection de mouvements. Cette approche permet non seulement de réduire la consommation pendant les périodes de faible luminosité, mais aussi de fournir un éclairage adapté aux besoins des usagers tout en renforçant la sécurité dans les espaces publics.

De plus, l'intégration d'un système de surveillance des modules photovoltaïques vise à minimiser les risques de défaillance en assurant une surveillance continue de leur performance et de leur état. Cette surveillance proactive permet de détecter rapidement toute anomalie, contribuant ainsi à minimiser les interruptions de service et à optimiser la production d'énergie solaire.

II.1 Internet des Objets IOT

II.1.1 Concepts clés et bref historique de l'IoT

Depuis la naissance d'Internet au début des années 1980 [22], des tentatives ont été faites pour connecter les "choses" à Internet. En 1990 [22], John Romkey a créé le premier "appareil" Internet, un grille-pain qui pouvait être allumé et éteint via Internet. Paul Saffo a donné la première description succincte des capteurs et de leur utilisation en relation avec Internet en 1997 [22]. Pour décrire cette connexion croissante de capteurs et d'appareils similaires fournissant des

informations en temps réel via Internet, le terme “Internet des objets” a été inventé en 1999 [22] par Kevin Ashton, qui travaillait dans l’optimisation de la chaîne d’approvisionnement et a inventé une nouvelle technologie appelée identification d’articles basée sur la radiofréquence (RFID) la même année. En 2003 [22], Walmart a déployé la technologie RFID dans tous ses magasins à travers le monde pour mesurer les stocks de produits et les ventes, et soutenir la gestion de la chaîne d’approvisionnement. En 2005 [22], l’Union internationale des télécommunications a considéré l’IoT comme une troisième vague de transformation de l’industrie mondiale de l’information. En 2008 [22], la Federal Communications Commission a approuvé l’utilisation du “spectre des espaces blancs”. Plus tard, des géants de l’informatique tels que Cisco, IBM et Ericsson ont pris de nombreuses initiatives éducatives et commerciales dans le domaine de l’IoT [22].

Certains pays, comme la Chine, ont inscrit l’IoT comme une technologie émergente stratégique dans leurs plans à long terme [22]. La technologie IoT peut être simplement expliquée comme une connexion entre les humains, les ordinateurs et les objets. Elle exploite divers outils tels que la RFID, les capteurs infrarouges, les systèmes de positionnement global et les scanners laser, afin de connecter tous les objets conformes au protocole Internet (IP) à une adresse IP unique. Cette connectivité permet l’échange d’informations et la communication, facilitant ainsi un positionnement intelligent, un suivi, une surveillance et une gestion des objets. Les architectures de ces systèmes peuvent être conçues en fonction du contexte des opérations et des processus, notamment dans des scénarios en temps réel. Par exemple, dans une maison intelligente, chaque boîtier de commutation électrique pourrait être connecté à un smartphone pour permettre un contrôle à distance.

II.1.2 C’est quoi l’IOT?

L’Internet des Objets (IOT) désigne l’environnement Internet de génération, de collecte mutuelle, de partage et d’utilisation d’informations en permettant à toutes les choses, telles que les personnes, les objets environnants, les données, etc., d’être connectées aux réseaux filaires et sans fil (figure II.1). L’IoT englobe les technologies et les services, notamment la génération d’informations (capteurs), la collecte d’informations (composants, dispositifs), le partage d’informations (Cloud), la maîtrise de l’information (Big Data) et les logiciels d’application (SW). Grâce à cela, les consommateurs ont étendu leur champ de connexion au monde virtuel en communiquant entre eux au sujet des objets connectés. Dans la période machine à machine (M2M : Machine to Machine), lors de la phase initiale de l’Internet des objets, l’IoT a été utilisé pour la gestion des cartes de transport, les codes-barres avec les informations de prix lors de l’achat de biens, les systèmes de suivi de livraison de colis, la navigation, les distributeurs automatiques de billets et les installations industrielles [23].

Ensuite, les avancées récentes dans les technologies sans fil à haut débit ont accéléré, avec la fourniture d’appareils connectés basés sur des réseaux tels que les smartphones, les tablettes, les liseuses, etc., et la mise en œuvre de la communication dans les objets du quotidien est devenue

possible. Ainsi, l'échelle du marché de l'IoT augmente rapidement. Actuellement, l'IoT tend à montrer la commercialisation des services de réseau intelligent, de maison intelligente, de santé et de véhicules intelligents grâce à la convergence entre diverses industries.



Figure II. 1 Internet des Objets.

II.2 Choix de matériel

II.2.1 Raspberry Pi

Le Raspberry Pi, un mini-ordinateur efficace et puissant, Il a été inventé par la fondation Raspberry Pi du Royaume-Uni dans l'espoir d'éclairer et d'autonomiser la génération d'apprenants pour qu'elle soit plus créative et efficace [24]. Depuis son lancement, de nombreuses communautés ont contribué au développement de systèmes d'exploitation (OS) open source, d'applications et de diverses autres formes d'ordinateurs similaires au Raspberry Pi.

De plus, des chercheurs et des universitaires en systèmes embarqués du monde entier sont constamment impliqués dans le développement de projets innovants utilisant ce module, qui est reconnu pour ses applications hors du commun. Depuis sa création, le Raspberry Pi fait l'objet d'une mise à jour constante, tant au niveau logiciel que matériel, ce qui en fait un ordinateur complet capable d'exécuter des tâches intensives dans un délai spécifique. Ce document de synthèse jettera les bases pour de nombreuses communautés open source et permettra aux étudiants en systèmes embarqués de développer des projets à un tout nouveau niveau.

II.2.1.1 Définition du Raspberry Pi

Le Raspberry Pi est une version plus petite d'un ordinateur moderne capable d'effectuer des tâches efficacement. Le module utilise divers types de processeurs par conséquent, il ne peut installer que des systèmes d'exploitation et des applications open source. Le Raspberry Pi permet également à l'utilisateur de naviguer sur Internet, d'envoyer des e-mails, d'écrire des documents à l'aide d'un traitement de texte, et bien plus encore. Il prend en charge plusieurs langages de programmation tels que Python, C, C++, BASIC, Perl et Ruby [24].

II.2.1.2 Historique

La pierre fondatrice du développement du Raspberry Pi a été posée en 2006 [24], lorsque des chercheurs de l'Université de Cambridge ont pris l'initiative d'augmenter le nombre d'élèves de niveau A optant pour le domaine de l'informatique. Les quatre chercheurs à l'origine du développement du premier modèle sont Eben Upton, Jack Lang, Rob Mullins et Alan Mycroft [24]. Le Raspberry Pi a été créé en 2009 avec la mission et la vision de fabriquer un ordinateur abordable afin que la jeune génération puisse l'utiliser pour apprendre la programmation informatique de base. Le premier modèle de Raspberry Pi, le modèle B, a été lancé en 2012 par la fondation Raspberry Pi du Royaume-Uni.

À l'origine, il utilisait un processeur Broadcom BCM2835 intégré à 512 Mo de mémoire, un processeur ARM ARM1176JZF-S cadencé à 700 MHz et une unité de traitement graphique VideoCore IV. Par la suite, la fondation a lancé un modèle moins cher, doté d'une mémoire plus réduite, d'un seul port USB et sans contrôleur Ethernet. En 2019, l'entreprise a vendu plus de 19 millions d'unités, ce qui en fait le 3ème ordinateur le plus vendu à usage général [24].

II.2.1.3 Les spécifications techniques de Raspberry Pi 4 Model B

Les composants	Les spécifications techniques
Processeur	Broadcom BCM2711, quadri cœur Cortex-A72 (ARM v8) 64 bits SoC cadencé à 1,5 GHz.
RAM	8 Go de SDRAM LPDDR4-3200.
Bluetooth	Bluetooth 5.0, BLE.
Wi-Fi	Réseaux sans fil IEEE 802.11ac à 2,4 GHz et 5,0 GHz.
Ethernet	Ethernet Gigabit.
HDMI	2 ports micro-HDMI (prise en charge jusqu'à 4kp60).
Stockage	Emplacement pour carte MicroSD.

Alimentation	Alimentation USB Type C de 5,1 V et 3 A (recommandée).
Dimensions	85,6 mm × 56,5 mm

Tableau II. 1 Les spécifications techniques du Raspberry Pi 4

Initialement, le Raspberry Pi disposait de son propre système d'exploitation appelé Raspbian, basé sur Linux.

Dans le monde logiciel en constante évolution, il existe quelques options de systèmes d'exploitation non basés sur Linux disponibles sur le marché. Les distributions Linux (Debian, Puppy Linux, Arch Linux, Fedora Remix et OpenELEC) sont les OS privilégiés pour le Raspberry Pi, car ils sont facilement accessibles sans frais, mais surtout en raison de leur capacité à fonctionner sur le processeur ARM du Raspberry Pi [24].

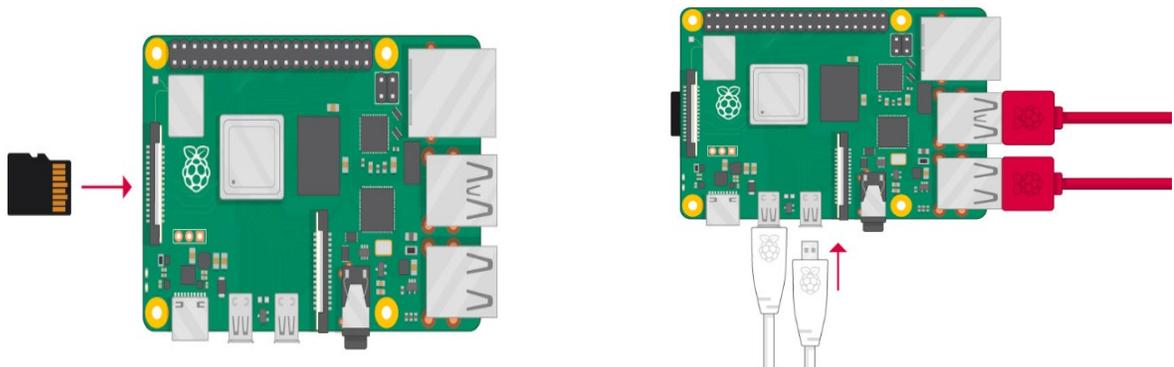


Figure II. 2 Raspberry PI

II.2.1.4 Installation du système d'exploitation sur Raspberry Pi

Pour utiliser le Raspberry Pi, nous aurons besoin d'un système d'exploitation. Par défaut, le Raspberry Pi recherche un système d'exploitation sur n'importe quelle carte SD insérée dans l'emplacement pour carte SD.

Selon notre modèle de Raspberry Pi, nous pouvons également démarrer un système d'exploitation à partir d'autres périphériques de stockage, notamment des clés USB, un stockage connecté via un HAT et un stockage réseau.

Pour installer un système d'exploitation sur un périphérique de stockage pour notre Raspberry Pi, nous aurons besoin des éléments suivants :

- Un ordinateur pour créer une image du périphérique de stockage dans un périphérique de démarrage.
- Un moyen de brancher le périphérique de stockage sur cet ordinateur.

La plupart des utilisateurs de Raspberry Pi choisissent des cartes microSD comme périphérique de démarrage.

II.2.1.5 Raspberry Pi Imager

Est un outil qui nous aide à télécharger et à écrire des images sur MacOS, Windows et Linux. Imager inclut de nombreuses images de système d’exploitation populaires pour Raspberry Pi.

Imager prend également en charge le chargement d’images téléchargées directement à partir de Raspberry Pi ou de fournisseurs tiers tels qu’Ubuntu. Imager peut-être utiliser pour préconfigurer les informations d’identification et les paramètres d’accès à distance de Raspberry Pi (figure II.3).

II.2.2 NodeMCU ESP8266

NodeMCU est un micro-logiciel et une carte de développement open source basés sur Lua spécialement conçus pour les applications basées sur l’IoT. Il comprend un firmware qui fonctionne sur le SoC Wi-Fi ESP8266 d’Espressif Systems (figure II.4), et du matériel basé sur le module ESP-12 [25].

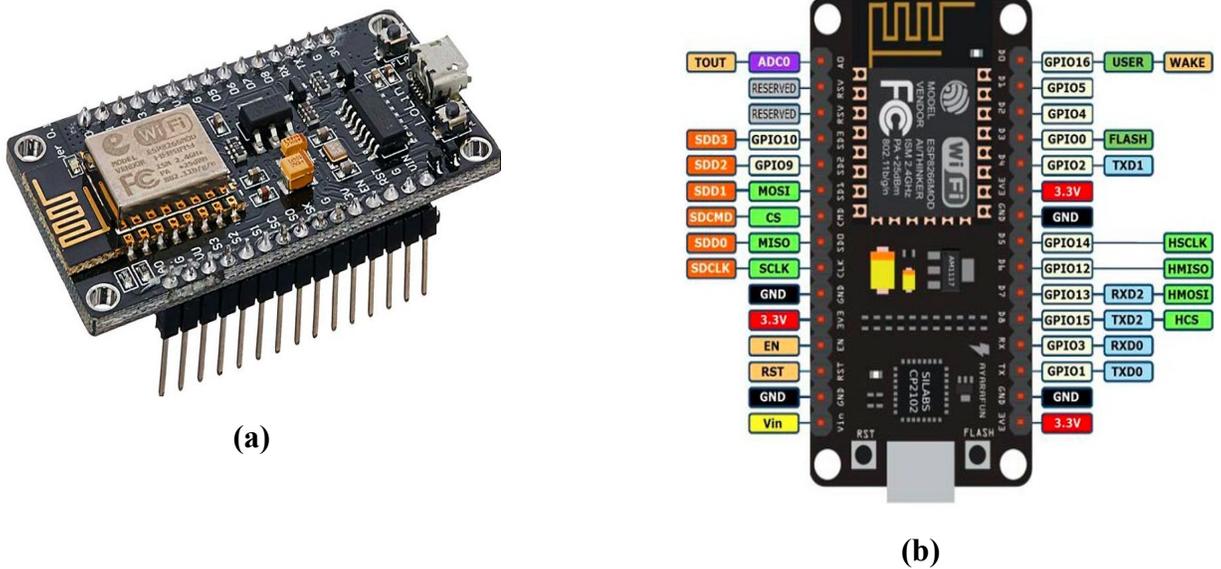


Figure II. 3 a, b ESP8266

(a) ESP8266 NodeMCU

(b) Brochage ESP8266 NodeMCU

II.2.2.1 Configuration du brochage de la carte de développement NodeMCU

Le tableau II.2 montre la configuration des broches du microcontrôleur ESP8266 [25] :

Broches	Nom	Description
Pouvoir	Micro-USB, 3,3 V, GND, Vin	Micro-USB : NodeMCU peut être alimenté via le port USB 3.3V : 3.3V régulé peut être fourni à cette broche pour alimenter la carte GND : Broches de mise à la terre VIN : Alimentation externe
Broches de contrôle	EN, RST	La broche et le bouton réinitialisent le microcontrôleur
Broche analogique	A0	Utilisé pour mesurer la tension analogique dans la plage de 0 à 3,3 V
Broches GPIO	GPIO1 à GPIO16	NodeMCU dispose de 16 broches d'entrée-sortie à usage général sur sa carte
Broches SPI	SD1, CMD, SD0, CLK	NodeMCU dispose de quatre broches disponibles pour la communication SPI.
Broches GPIO	GPIO1 à GPIO16	NodeMCU dispose de 16 broches d'entrée-sortie à usage général sur sa carte
Broches UART	TXD0, RXD0, TXD2, RXD2	NodeMCU dispose de deux interfaces UART, UART0 (RXD0 et TXD0) et UART1 (RXD1 et TXD1). UART1 est utilisé pour télécharger le firmware/programme.
Broches I2C		NodeMCU prend en charge la fonctionnalité I2C, mais en raison de la fonctionnalité interne de ces broches, vous devez trouver quelle broche est I2C.

Tableau II. 2 La configuration du brochage de l'ESP8266

II.2.2.3 Présentation de NodeMCU ESP8266

La carte de développement NodeMCU ESP8266 est livrée avec le module ESP-12E contenant la puce ESP8266 dotée d'un microprocesseur RISC Tensilica Xtensa 32 bits LX106. Ce microprocesseur prend en charge le RTOS et fonctionne à une fréquence d'horloge réglable de 80 MHz à 160 MHz. NodeMCU dispose de 128 Ko de RAM et de 4 Mo de mémoire Flash pour stocker des données et des programmes. Sa puissance de traitement élevée avec des fonctions de fonctionnement Wi-Fi / Bluetooth et Deep Sleep intégrées le rend idéal pour les projets IoT.

Le NodeMCU peut être alimenté à l'aide d'une prise Micro USB et d'un code PIN (broche d'alimentation externe). Il prend en charge les interfaces UART, SPI et I2C [25].

II.2.3 Capteurs infrarouges passifs PIR

Un capteur PIR est un capteur électronique utilisé dans les détecteurs de mouvement tels que les dispositifs d'éclairage déclenchés automatiquement et les systèmes de protection qui mesurent les appareils émettant de la lumière infrarouge dans leur champ de vision [26]. Chaque

corps ayant une température supérieure à zéro libère de l'énergie thermique sous forme de rayonnement. Les capteurs PIR détectent le rayonnement infrarouge réfléchi ou émis par la cible au lieu de mesurer ou détecter la chaleur. Si le capteur détecte un animal, un insecte ou une personne, la température à ce point dans le champ de vision du capteur augmente jusqu'à la température du corps de l'intrus par rapport à la température ambiante, puis revient en conséquence. Le changement résultant dans le rayonnement infrarouge reçu est traduit par le capteur en un changement de tension de sortie, ce qui active la détection. Habituellement, les capteurs PIR détectent les mouvements généraux. Ils ne fournissent pas de détails ou d'informations sur ce qui ou qui a bougé, mais uniquement sur les mouvements d'animaux, de personnes ou d'autres choses.

II.2.4 Module de test multifonction numérique AC pour mesure de puissance, volt, ampère (A) - PZEM-004T

Le PZEM-004T (figure II.4) est un compteur multifonction numérique utilisé couramment pour mesurer la puissance, la tension, le courant et la consommation d'énergie dans les circuits électriques. Il est souvent utilisé dans des applications telles que la surveillance de la consommation d'électricité dans les maisons, les bureaux ou les environnements industriels. Il utilise des capteurs à effet Hall et des composants électroniques internes pour mesurer avec précision ces paramètres. Certains modèles du PZEM-004T sont équipés de ports de communication, tels que RS485 ou TTL, permettant de connecter le module à d'autres dispositifs ou à un ordinateur pour une surveillance à distance ou une intégration dans des systèmes plus vastes.



Figure II. 4 Module de test multifonction numérique AC pour mesure de puissance, volt, ampère (A) - PZEM-004T

II.2.4.1 Le fonctionnement du PZEM-004T

Le PZEM-004T fonctionne en utilisant le principe de mesure de courant à effet Hall pour mesurer la puissance, la tension, le courant et l'énergie dans un circuit électrique.

Mesure de la tension (V) : Le PZEM-004T peut mesurer la tension électrique d'un circuit avec précision. Cela permet de vérifier si la tension est dans les limites appropriées pour le fonctionnement sûr des équipements électriques.

Mesure du courant (A) : Il mesure également le courant électrique circulant dans le circuit. Cela permet de surveiller la charge électrique actuelle et de détecter les variations inhabituelles qui pourraient indiquer des problèmes ou des surcharges.

Calcul de la puissance (W) : En combinant la tension et le courant, le module peut calculer la puissance active consommée par le circuit. Cela fournit une indication de la quantité d'énergie utilisée à un moment donné.

Mesure de l'énergie (Wh) : En intégrant la puissance sur le temps, le PZEM-004T peut calculer la quantité totale d'énergie consommée par le circuit. Cela permet de suivre la consommation d'énergie sur une période prolongée.

II.2.4.2 Paramètres de spécification [27]

- Tension de fonctionnement : 80 ~ 260VAC.
- Tension d'essai : 80 ~ 260VAC.
- Puissance nominale : 100A/2200W.
- Fréquence de fonctionnement : 45-65Hz.
- Précision de mesure : grade 1.0.

II.2.5 Mesure de tension et courant continu

II.2.5.a Mesure de tension par capteur de tension continue de 0 à 25 V

Le module capteur de tension est un dispositif de détection de tension continue de 0 à 25 V, basé sur un circuit diviseur de tension résistif. Il réduit le signal de tension d'entrée par un facteur de 5 et génère une tension de sortie analogique correspondante. C'est pourquoi il est possible de mesurer une tension allant jusqu'à 25V [28].

Caractéristiques et spécifications [28]

- Type de sortie : Analogique.
- Tension d'entrée (V) : 0 à 25.
- Plage de détection de la tension (V) : 0,02445 à 25.
- Résolution de la tension analogique (V) : 0,00489.

Brochage du module capteur de tension

Le module capteur de tension possède 5 broches, 2 à l'avant et 3 à l'arrière.

- **VCC** : Borne positive de la source de tension externe (0-25V).
- **GND** : Borne négative de la source de tension externe.
- **S** : Broche analogique connectée à la broche analogique du microcontrôleur.
- **+** : Broche d'alimentation connectée au 3V3 du microcontrôleur.
- **-** : Broche de masse connectée au GND du microcontrôleur.

Mesure de courant continu par ACS712

L'ACS712 est un capteur de courant basé sur l'effet Hall produit par Allegro Microsystems. Il permet de mesurer des courants alternatifs (AC) ou continus (DC) avec précision. Le capteur convertit le courant passant par un conducteur en une tension proportionnelle, grâce à un circuit à effet Hall intégré et un chemin de conduction en cuivre. Il est souvent utilisé dans des applications industrielles, commerciales et de communication pour le contrôle des moteurs, la détection et la gestion de charge, les alimentations à découpage, et la protection contre les surintensités. Le boîtier du capteur facilite son intégration dans divers systèmes électroniques.

II.2.6 Résistance dépendante de la lumière LDR

La résistance dépendante de la lumière fonctionne sur le principe de la photoconductivité. LDR est en fait une résistance qui peut être contrôlée par la lumière. La résistance du LDR diminue lorsque la lumière entrante est incidente sur le circuit et augmente lorsqu'il n'y a pas de source de lumière présente. LDR est appliqué aux circuits de commutation photo-activés. Il existe principalement deux types différents de photorésistances. Le semi-conducteur intrinsèque n'est pas un semi-conducteur efficace et les électrons ne sont présents que dans la bande interdite de valence. Un semi-conducteur extrinsèque n'est pas un semi-conducteur pur, il contient des impuretés appelées dopants. L'état d'énergie du semi-conducteur extrinsèque est proche de la bande de conduction [29]. Ainsi, même si une faible énergie est appliquée, les électrons sauteraient dans la bande de conduction. Le LDR peut également être utilisé comme capteur de turbidité. Il peut être utilisé pour mesurer la turbidité de l'eau. Les photorésistances sont moins sensibles à la lumière que les photodiodes. La photorésistance n'est pas un composé actif et n'a pas de jonction PN. La photo-résistivité dépend en fait de la température.

II.2.7 Détecteur de température à résistance

Un RTD (détecteur de température à résistance) est un capteur dont la résistance se modifie à mesure que sa température change. La corrélation entre la résistance et la température est bien connue et peut être répétée dans le temps. Un RTD est un dispositif passif. Il ne produit pas de sortie de par lui-même. Des appareils électroniques externes sont utilisés pour mesurer la résistance du capteur en faisant passer un petit courant électrique à travers le capteur afin de générer une tension. En général, un courant mesurant 1 mA ou moins, 5 mA maximum sans risque d'auto-échauffement [30].

Les RTD sont fabriqués selon différentes courbes et tolérances standardisées. La courbe standard la plus répandue est la courbe « DIN » (Deutsches Institut für Normung). Cette courbe spécifie les caractéristiques de résistance en fonction de la température d'un capteur platine de 100 ohms, ainsi que les tolérances normalisées et la plage de températures mesurables.

La norme DIN spécifie une résistance de base de 100 ohms à 0 °C et un coefficient de température de 0,00385 ohms/ohm/°C. La puissance nominale d'un capteur RTD DIN est indiquée ci-dessous [30] :

Il existe trois classes de tolérance standard pour les RTD DIN. Ces tolérances sont définies comme suit :

DIN Classe A : $\pm (0,15 + 0,002 |T|^\circ\text{C})$.

DIN Classe B : $\pm (0,3 + 0,005 |T|^\circ\text{C})$.

DIN Classe C : $\pm (1,2 + 0,005 |T|^\circ\text{C})$.

II.2.8 Le MAX6675

II.2.8.1 Description Générale du MAX6675

Le MAX6675 (figure II.5) effectue la compensation de jonction froide et numérise le signal d'un thermocouple de type K. Les données sont sorties dans un format à résolution de 12 bits, compatible SPI, en lecture seule. Ce convertisseur résout les températures avec une précision de 0,25 °C, permet des lectures allant jusqu'à +1024 °C et affiche une précision de thermocouple de 8 LSB pour des températures allant de 0 °C à +700 °C. Le MAX6675 est disponible dans un petit boîtier SO à 8 broches.

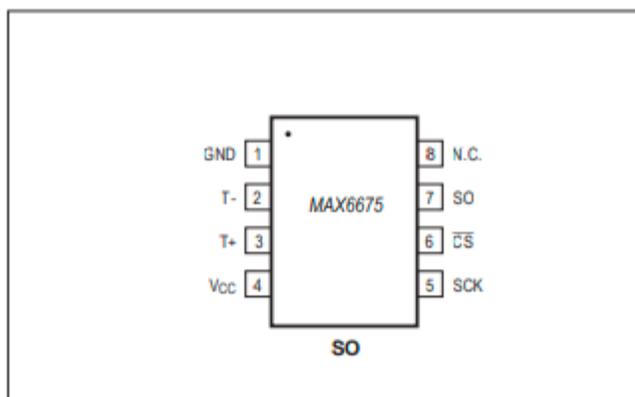


Figure II. 5 MAX6675 Configuration des Broches

II.2.8.2 Applications du MAX6675

- Industriel.
- Électroménagers.
- CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation).

II.2.8.3 Caractéristiques du MAX6675

- Conversion numérique directe de la sortie du thermocouple de type K.
- Compensation de jonction froide.
- Interface série simple compatible SPI.

- Résolution de 12 bits, 0,25 °C.
- Détection de thermocouple ouvert.

II.3 Choix logiciels

II.3.1 MQTT technologie

Le Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), également connu sous le nom de MQTT, est un protocole d'échange de données machine à machine pour les appareils IOT. MQTT utilise un modèle de publication/abonnement avec un courtier. Il existe plusieurs versions de la norme, les versions 3.1.1 et 5.0 étant les plus populaires. TCP est le protocole de transport utilisé par MQTT, avec deux ports réservés : 1883 (MQTT sans sécurité) et 8883 (MQTT sur TLS). Les sujets MQTT sont une forme d'adressage qui permet aux clients MQTT de partager des informations via un courtier. Un courtier MQTT, également appelé serveur MQTT, est le centre de messages. Il garde une trace des appareils qui s'abonnent à quels sujets, reçoit tous les messages publiés et les transmet en fonction des abonnements. Un client peut être un éditeur, un abonné ou les deux selon les besoins.

II.3.2 Mosquitto broker

Eclipse Mosquitto est un courtier de messages open source (sous licence EPL/EDL) qui implémente les versions 5.0, 3.1.1 et 3.1 du protocole MQTT. Mosquitto est léger et peut être utilisé sur tous les appareils à partir de Alimentez des ordinateurs mono cartes sur des serveurs complets (figure II.6). Le protocole MQTT fournit une méthode légère de transport Envoyer des messages à l'aide d'un modèle de publication/abonnement. C'est ce qui fait qu'il est adapté à la messagerie de l'Internet des objets, par exemple avec des capteurs de puissance ou d'appareils mobiles tels que les téléphones, d'ordinateurs ou de microcontrôleurs. Le projet Mosquitto fournit également une bibliothèque C pour la mise en œuvre des clients MQTT, et le très populaire mosquitto_pub et mosquitto_sub clients MQTT en ligne de commande. Mosquitto fait partie de l'Eclipse et est un projet iot.eclipse.org. Le développement est piloté par Cedalo [31].

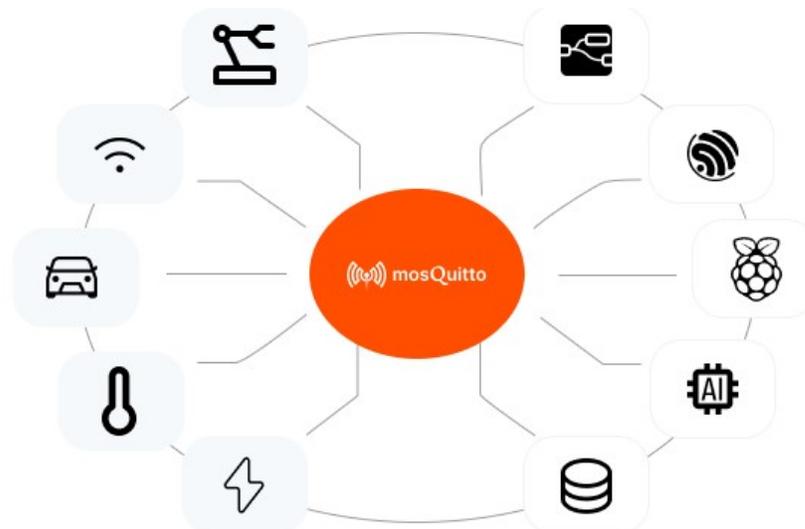


Figure II. 6 Mosquitto Broker

II.3.3 Node-RED

Node-RED (figure II.7) est une plateforme ouverte pour la connexion facile des appareils, qui est prise en charge par certains équipements modernes de grands fabricants, mais peut également fonctionner sur un ordinateur compact à ressources limitées. Cela est possible car elle est construite sur l'environnement d'exécution JavaScript Node.js et conçue pour être légère et robuste. Node-RED offre une connectivité inégalée avec d'autres plates-formes et API, grâce aux différents nœuds disponibles dans la palette (bibliothèque), y compris des implémentations de protocoles industriels jusqu'à la connectivité des réseaux sociaux. L'utilité de cette plateforme pour l'interconnexion dans les environnements industriels a déjà été soulignée, notamment lorsqu'elle est utilisée avec des protocoles de communication standard adaptés à la communication entre les appareils, mais aussi pour transférer des données vers le cloud ou des plates-formes d'analyse de données. Node-RED permet également la connexion avec des services Cloud pour le stockage et l'analyse. Bien qu'il existe des nœuds contribués pour toutes les principales plates-formes, un support plus large est fourni pour les services IBM Cloud [32].

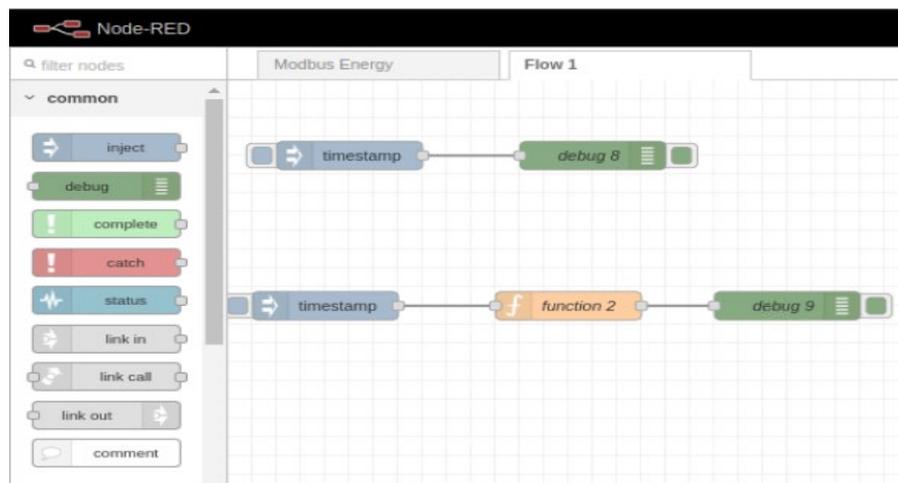


Figure II. 7 Node-RED

II.4 Conception du système de l'éclairage public intelligent proposé

Le diagramme en bloc suivant (figure II.8) décrit la conception du système de l'éclairage public intelligent :

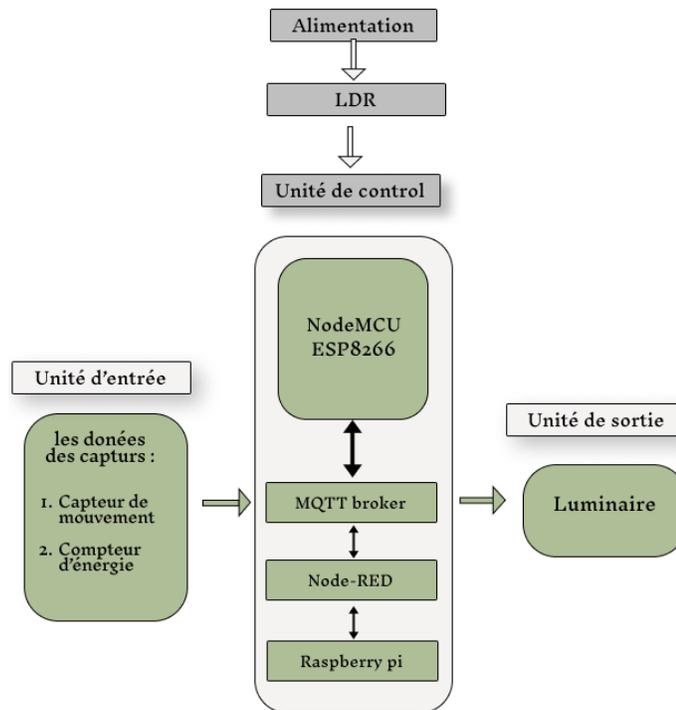


Figure II. 8 Diagramme de contrôle de l'éclairage

Les composants illustrés dans le diagramme en bloc (figure II.9) sont décrits comme suit :

II.4.1 Unité d'entrée

L'unité d'entrée comprend tous les capteurs et détecteurs qui fournissent un signal d'entrée (analogique ou numérique) au microcontrôleur. Ces éléments permettent au système d'être intelligent grâce à leur capacité à fournir des données en temps réel, permettant ainsi au processus de contrôle d'être efficace et précis.

II.4.1.1 Les capteurs PIR

Détecteurs infrarouges passifs sont utilisés pour détecter la présence de personnes. Ils sont petits, peu coûteux, peu gourmands en énergie et faciles à utiliser. Ce capteur est capable de détecter les faibles émissions de rayonnement infrarouge. Ainsi, pour réaliser un éclairage automatique de nuit, les capteurs LDR (photorésistances) et PIR doivent travailler ensemble [33].

Le LDR fonctionne comme un capteur de lumière. Pendant la journée, la résistance du LDR est assez faible, ce qui entraîne une faible chute de tension à travers lui. En l'absence de lumière vive, la chute de tension à travers le LDR est élevée car la résistance est élevée. Le capteur PIR

utilise les radiations infrarouges émises par le corps humain pour détecter une présence et produit une tension de sortie de 3,3 V. Lorsque le niveau de tension des capteurs LDR et PIR est élevé, le microcontrôleur ESP8266 active automatiquement l'éclairage. De cette manière, la lumière ne reste pas allumée toute la nuit et économise une quantité significative d'énergie. Il s'allume automatiquement uniquement lorsque nous en avons besoin la nuit et reste éteint lorsqu'il n'y a pas de personne autour [33].

II.4.1.2 Compteur d'énergie

Le compteur d'énergie peut mesurer la quantité d'électricité consommée par chaque luminaire ou par le système d'éclairage dans son ensemble. Cela permet de surveiller et de contrôler efficacement la consommation d'énergie, ce qui peut conduire à des économies d'énergie significatives. En surveillant en permanence le courant électrique circulant dans le système d'éclairage, le capteur peut détecter les pannes ou les anomalies telles que les courts-circuits, les surcharges ou les coupures de ligne. Cela permet d'identifier rapidement les problèmes et de prendre des mesures correctives pour minimiser les interruptions de service.

II.4.2 Unité de contrôle

II.4.2.1 NodeMCU ESP8266

Le NodeMCU ESP8266, équipé de capteurs tels que le capteur PIR et le compteur d'énergie, collecte des données sur la présence de personnes, la consommation d'énergie et d'autres paramètres environnementaux. Ces données sont ensuite traitées localement pour prendre des décisions autonomes, telles que l'activation ou la désactivation des luminaires en fonction de la présence détectée ou de la luminosité ambiante. Le NodeMCU communique avec le Raspberry Pi via MQTT, publiant périodiquement l'état des luminaires et les données des capteurs sur des sujets MQTT spécifiques. Cette intégration permet une gestion centralisée des données, une surveillance en temps réel et une réactivité accrue aux conditions environnementales et aux besoins de gestion de l'énergie, offrant ainsi un système d'éclairage public intelligent efficace et flexible.

II.4.2.2 MQTT Broker

Dans ce scénario, le MQTT broker joue un rôle crucial en tant qu'intermédiaire de communication entre le NodeMCU ESP8266 et le Raspberry Pi via Node-RED. Il facilite une communication bidirectionnelle en permettant au NodeMCU de publier les données des capteurs et l'état des luminaires sur des sujets MQTT spécifiques, tandis que le Raspberry Pi (avec Node-RED) souscrit à ces sujets pour recevoir les données. Le broker assure également la gestion des abonnements, garantissant la livraison fiable des messages aux clients abonnés, même en cas de perte de connexion ou de redémarrage des dispositifs. De plus, il fournit des fonctionnalités de sécurité telles que l'authentification des clients et le chiffrement des données pour assurer la confidentialité et l'intégrité des échanges. Grâce à sa capacité d'évolutivité, le broker MQTT permet une intégration transparente de nouveaux dispositifs ou capteurs dans le système

d'éclairage public intelligent, assurant ainsi une communication efficace et fiable entre tous les composants du système.

II.4.2.3 Node-RED

Sur le Raspberry Pi, Node-RED reçoit les messages MQTT, les traite, les stocke dans une base de données et prend des décisions en fonction des conditions définies. Node-RED est utilisé comme un composant clé pour la communication et le traitement des données dans un système d'éclairage public intelligent. Les flux de données entre le NodeMCU ESP8266, les capteurs, le Raspberry Pi et d'autres composants du système sont gérés à l'aide de Node-RED.

Node-RED permet de recevoir les données publiées par le NodeMCU via MQTT broker, de les traiter en fonction des besoins spécifiques du système, et de prendre des décisions en conséquence. Par exemple, Node-RED peut analyser les données des capteurs pour détecter la présence de personnes, ajuster automatiquement l'éclairage en fonction des conditions environnementales ou de la consommation d'énergie, et générer des alertes en cas de situation anormale.

II.4.2.4 Raspberry Pi

Le Raspberry Pi joue un rôle essentiel en tant que serveur web centralisé. Tout d'abord, il héberge une interface utilisateur web permettant aux administrateurs et aux utilisateurs finaux d'interagir avec le système. Cette interface offre une visualisation en temps réel de l'état des luminaires, des données des capteurs et des statistiques de consommation d'énergie, permettant ainsi un contrôle et une gestion efficaces du système. De plus, le Raspberry Pi peut servir de tableau de bord de surveillance, fournissant un aperçu global de la santé et des performances du système à travers des graphiques interactifs, des alertes en temps réel et d'autres visualisations pertinentes. En utilisant des scripts et des applications web, le Raspberry Pi analyse également les données collectées par les capteurs pour générer des rapports sur la consommation d'énergie, détecter des tendances ou des anomalies, et prédire les besoins en maintenance

II.4.3 Unité de sortie

II.4.3.1 Luminaire

Les luminaires dans le système d'éclairage public intelligent sont souvent équipés de sources lumineuses à LED, qui sont plus économes en énergie et ont une durée de vie plus longue que les sources lumineuses traditionnelles telles que les lampes à incandescence ou les lampes fluorescentes. Cela permet de réduire la consommation d'énergie et les coûts d'entretien.

II.5 Principe de fonctionnement du système d'éclairage public intelligent conçu

Le diagramme de flux suivant (figure II.9) décrit le principe de fonctionnement du système d'éclairage public intelligent :

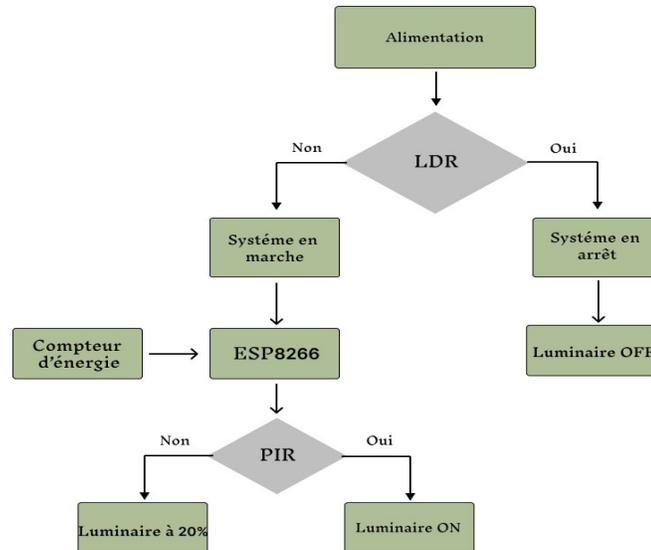


Figure II. 9 Diagramme de flux illustre le principe de fonctionnement du système de l'éclairage public intelligent conçu

II.5.1 Principe de fonctionnement

Ce système intelligent utilise des capteurs pour ajuster automatiquement l'état du luminaire en fonction de la luminosité ambiante, de la présence de mouvements et de la consommation électrique. Il combine des capteurs LDR (Light Dependent Resistor) pour surveiller la luminosité, des capteurs de mouvement pour détecter toute activité et des capteurs de courant pour mesurer la consommation électrique.

Lorsque la luminosité ambiante est suffisamment élevée, le système conserve l'éclairage éteint pour économiser de l'énergie, ce qui est particulièrement efficace pendant la journée lorsque la lumière naturelle est abondante. Peu importe la détection de mouvement, le système reste en veille dans cette situation.

Cependant, si la résistance mesurée par le capteur LDR indique une baisse de la luminosité, le système passe en mode actif. À ce moment, le capteur de mouvement entre en jeu. S'il détecte un mouvement, il active le luminaire. En revanche, s'il ne détecte aucun mouvement, le luminaire reste à niveau bas (20%) pour économiser de l'énergie.

De plus, le système utilise des compteurs d'énergie pour surveiller la consommation électrique. Cela lui permet de prendre en compte la charge électrique actuelle et d'optimiser l'éclairage en fonction de la demande en énergie, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace des ressources électriques.

II.6 Le système de monitoring du dispositif photovoltaïque

Ces composants forment un système complet de surveillance et de transmission de données en temps réel pour un système photovoltaïque, permettant une surveillance efficace de la consommation d'énergie et des performances des modules solaires.

Le diagramme en bloc suivant (figure II.10) décrit la conception du système de monitoring du dispositif photovoltaïque :

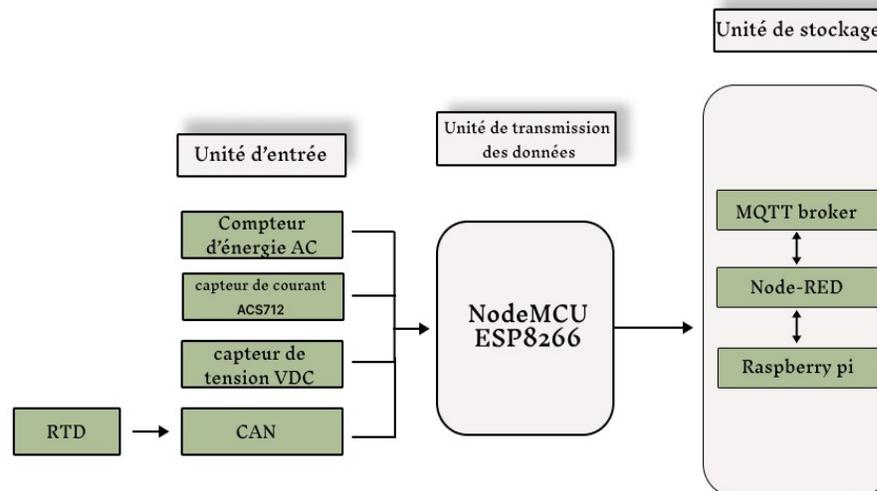


Figure II. 10 Diagramme du système monitoring du dispositif photovoltaïque conçu

Les composants illustrés dans le diagramme en bloc (figure II.10) sont décrits comme suit :

II.6.1 Unité d'entrée

Recueille les données sur la consommation d'énergie et la température des modules photovoltaïques. Comprend des compteurs d'énergie Pzem-004T pour mesurer la consommation en courant alternatif (AC) et les module ACS712 et capteur de tension VDC pour mesurer le courant continu (CC) et la tension continue VDC respectivement.

Utilisation de RTD (Resistance Temperature Detector) pour mesurer la température des modules photovoltaïques.

Le convertisseur analogique-numérique (CAN) MAX6675 est utilisé pour convertir les signaux provenant du RTD en données numériques exploitables.

II.6.2 Unité de transmission des données

Comprend un seul composant, le NodeMCU ESP8266, qui assure la communication entre l'unité d'entrée (le compteur d'énergie, les capteurs de tension et de courant continu, ainsi que le RTD) et l'unité de stockage.

Le NodeMCU ESP8266 envoie les données collectées à l'unité de stockage pour traitement et analyse ultérieurs.

II.6.3 Unité de stockage

Cette unité héberge les composants nécessaires pour stocker et traiter les données collectées. Comprend un MQTT broker, qui gère la communication entre les différents appareils du système. Utilisation de Node-RED, un outil de programmation visuel, pour créer des flux de données et effectuer des opérations de traitement et pour le stockage des données en temps réel.

Un Raspberry Pi est utilisé comme mini-ordinateur pour stocker et traiter les données de manière centralisée.

Conclusion

La conception d'un système intégré d'éclairage public intelligent et de surveillance de modules photovoltaïques offre une solution innovante et efficace pour répondre aux défis croissants auxquels sont confrontées les villes modernes. Ce système permet non seulement d'améliorer l'efficacité énergétique et la sécurité des espaces urbains, mais aussi de favoriser la transition vers des villes plus durables et résilientes.

Dans le prochain chapitre, nous explorerons en détail les différents circuits de montage qui composent le système intégré d'éclairage public intelligent et de surveillance de modules photovoltaïques.

Chapitre III – Conception électrique et mécanique du système

Introduction

Une carte de circuit imprimé (PCB) est l'un des éléments de base de tout système électronique. Les critères principaux pour tout système électronique fonctionnel et opérationnel sont l'interconnexion valide et l'assemblage de tous les composants d'un design. Les PCB jouent un rôle crucial en tant que pierre angulaire de tout système matériel en facilitant la connexion électrique et le support mécanique des composants actifs et passifs [34].

Dans ce chapitre, nous allons présenter la procédure de réalisation des cartes de commande de l'éclairage public intelligent et de la carte d'acquisition de données pour le système PV. Nous présenterons également les modèles en 3D et les schémas de connexion pour les deux dispositifs. Pour finaliser ce travail, un processus de fabrication des boîtiers sera réalisé afin d'assurer la sécurité des cartes.

III.1 La carte de commande du système de l'éclairage public intelligent

III.1.1 Le rôle d'une carte de commande

La carte de commande est essentielle pour transformer un réseau d'éclairage traditionnel en un système intelligent, efficace et adaptable. Elle permet de gérer et de contrôler le luminaire de manière autonome ou en communication avec un centre de contrôle. Grâce à des technologies de communication telles que Zigbee, ou Wi-Fi, la carte de commande reçoit des instructions et transmet des données sur l'état du luminaire. Elle intègre des capteurs de lumière ambiante et de mouvement, ajustant automatiquement l'intensité lumineuse en fonction des conditions environnantes, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie significatives. De plus, elle peut exécuter des scénarios d'éclairage programmés, par exemple en augmentant l'intensité lumineuse en cas de présence détectée pour améliorer la sécurité.

III.1.2 Alimentation électrique SS-200VH-E56B

La source d'alimentation électrique SS-200VH-E56B (Figure III.1) est une solution performante et polyvalente, idéale pour diverses applications, y compris la commande et l'alimentation des éclairages LED. Dotée d'une puissance de 200 watts et offrant une sortie ajustable de 22 à 56 volts CC, elle satisfait efficacement les besoins énergétiques des éclairages LED les plus exigeants.

L'alimentation SS-200VH-E56B va bien au-delà de la simple alimentation des LED. Elle offre également des fonctionnalités de commande avancées, permettant de contrôler et de gérer les éclairages LED avec précision. Ces capacités de commande incluent :

- Réglage de l'intensité lumineuse: Permet de diminuer ou augmenter l'intensité des LED pour créer des ambiances personnalisées ou économiser de l'énergie.
- Programmation d'horaires: Facilite l'automatisation de l'éclairage en programmant des horaires d'allumage et d'extinction, ce qui contribue à réduire la consommation d'énergie.

- Création de scénarios d'éclairage complexes: Autorise des effets visuels saisissants ou des ambiances particulières grâce à des scénarios d'éclairage avancés.

Grâce à ces fonctionnalités de commande, l'alimentation SS-200VH-E56B offre une solution complète pour la gestion et la mise en valeur des éclairages LED. Elle permet d'optimiser l'efficacité énergétique, de créer des ambiances personnalisées et de simplifier la gestion des systèmes d'éclairage LED.



Figure III. 1 Alimentation SS-200VH-E56B

III.1.3 Schéma du montage de l'éclairage public intelligent

La figure III.2 le schéma du montage pour l'éclairage public :

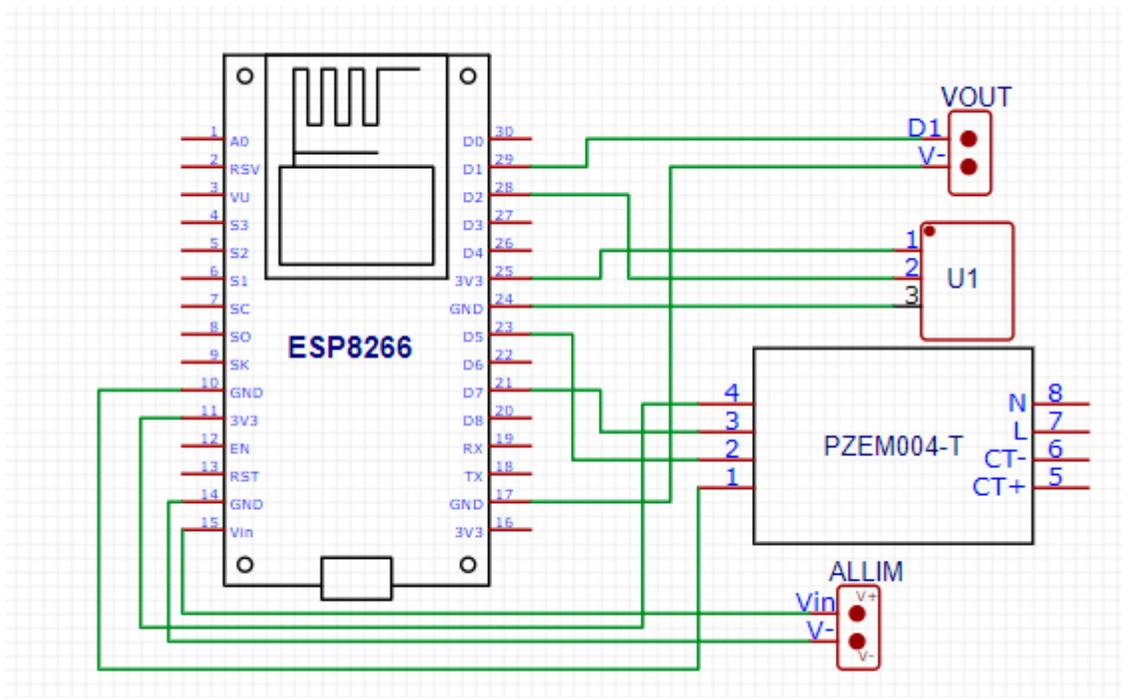


Figure III. 2 Schéma du montage sur EasyEDA [*].

U1 : Représente le capteur de mouvement, **VOUT** : Représente la tension de commande de luminaire $0v \rightarrow 3.3v$, **N (8)**, **L (7)** : Représente l'entrée d'alimentation pour luminaire, **CT+ (6)**, **CT- (5)** : Représente le transformateur de courant.

[*] EasyEDA est un outil en ligne de conception de PCB et de simulation de circuits, offrant des fonctionnalités gratuites et professionnelles. Il permet de créer facilement des schémas de circuits électroniques grâce à une interface intuitive et de concevoir des circuits imprimés (PCBs) avec une vaste bibliothèque de plus de 5 000 composants et la capacité de gérer jusqu'à 10 000 pastilles.

III.1.4 Schéma de connexion globale pour l'éclairage

Le figure III.3 décrit le système de commande d'éclairage public intelligent utilisant un microcontrôleur ESP8266, une batterie rechargeable pour l'alimentation, un compteur d'énergie PZEM-004T et un luminaire LED. Ce système est conçu pour gérer et optimiser l'éclairage public de manière intelligente.

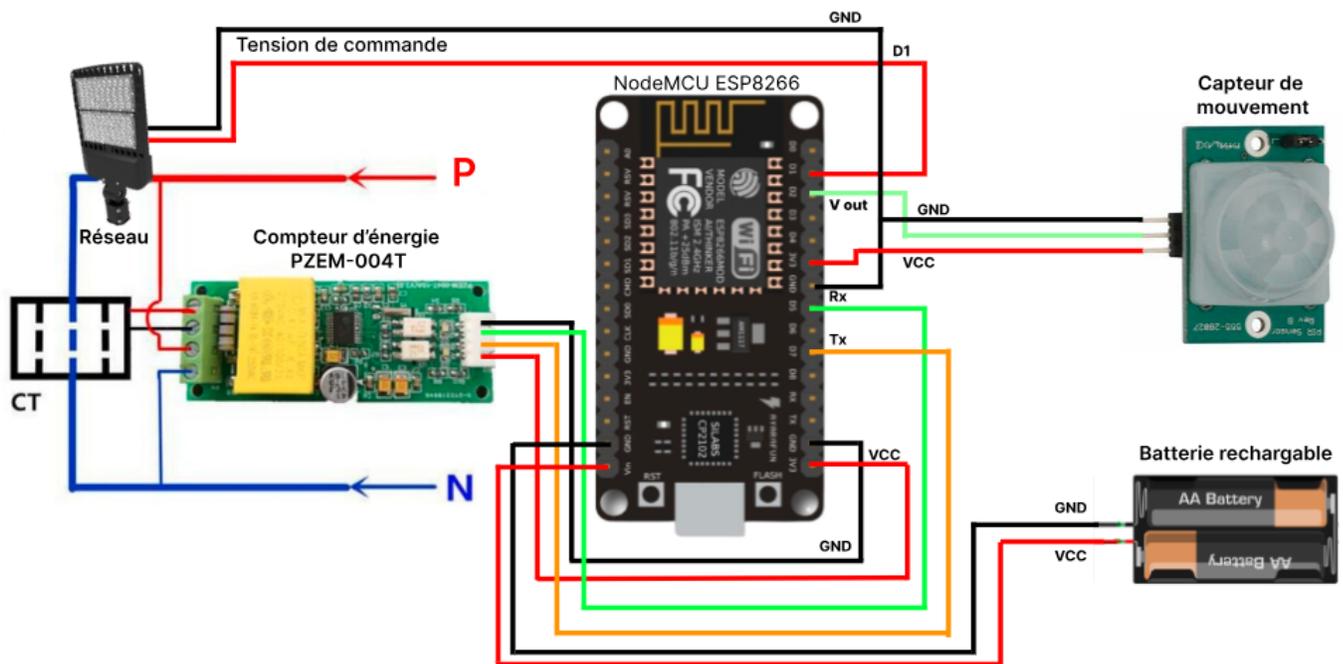


Figure III. 3 schéma de connexion du montage.

III.1.5 Routage de la carte de commande

La figure III.4 présente le schéma de routage de la carte de commande ainsi le modèle en 3D de celle-ci. Le schéma de routage détaille les connexions électriques entre les composants du circuit, assurant une disposition optimale pour le bon fonctionnement du système. Le modèle en 3D offre une vue d'ensemble de la conception physique de la carte, permettant de visualiser

l'implantation des composants et de s'assurer de la compatibilité mécanique et de l'intégrité structurelle du dispositif.

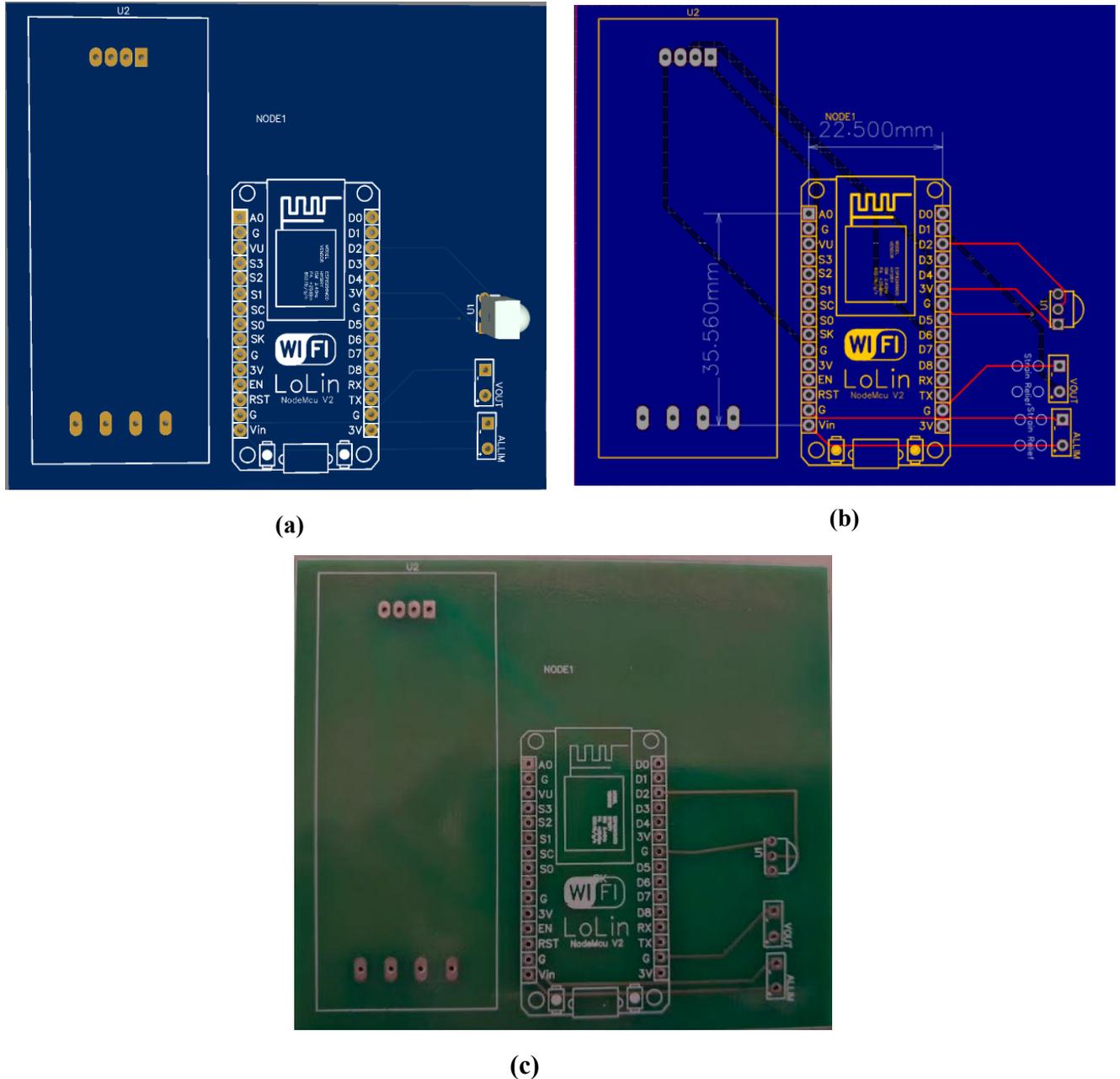


Figure III. 4 (a), (b) et (c) Routage de la carte de commande de l'éclairage public.

- (a) Model en 3D de la carte de commande pour l'éclairage public intelligent
- (b) Schéma de routage de la carte de commande pour l'éclairage public intelligent
- (c) Le PCB réelle du système de l'éclairage public intelligent

III.2 La carte d'acquisition de données pour le système PV

III.2.1 Le rôle de la carte d'acquisition de données

Une carte d'acquisition de données (Data Acquisition Card) permet de convertir les signaux du monde physique, tels que la tension, le courant ou la température, en données numériques exploitables par des logiciels d'application. Elle joue un rôle crucial dans de nombreux domaines, notamment l'automatisation, les techniques de mesure et de contrôle, ainsi que les applications de laboratoire et industrielles. En transformant les paramètres physiques en informations informatiques, la carte DAC facilite la surveillance et le contrôle des systèmes, rendant les processus plus précis et efficaces.

Dans les systèmes photovoltaïques, La surveillance est très importante pour envoyer des informations permettant aux propriétaires de maintenir, exploiter et contrôler ces systèmes, afin de réduire les coûts de maintenance et d'éviter les interruptions indésirables de l'alimentation électrique. Différents systèmes de surveillance ont été introduits au fil du temps en fonction de diverses exigences [13].

III.2.2 Schéma du montage

La figure III.5 est une représentation du câblage.

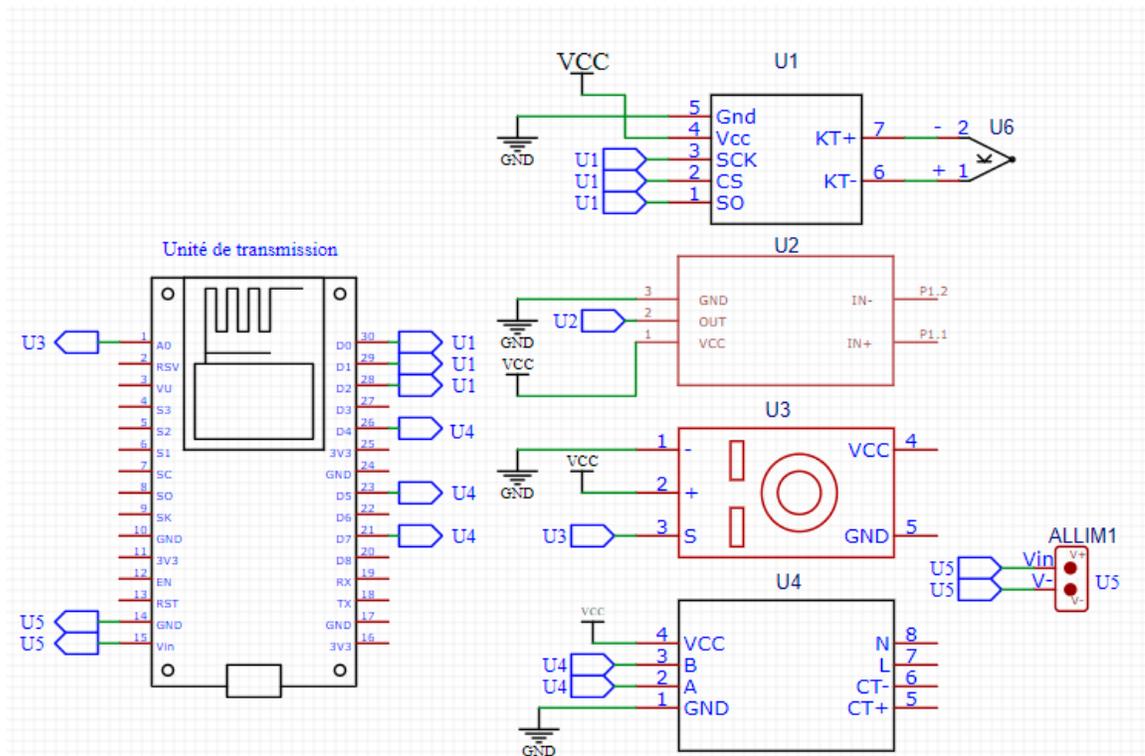


Figure III. 5 Schéma du montage sur EasyEDA.

U1 : Représente le convertisseur analogique numérique (CAN) MAX6675.

U2 : Représente le capteur de courant continu CC (ACS712).

U3 : Représente le capteur de tension continue VDC (B25).

U4 : Représente le compteur d'énergie AC (PZEM-004T).

U5 : Représente la sortie de l'alimentation de l'ESP8266.

U6 : Représente le thermocouple type K (RTD).

Unité de transmission : Représente le NodeMCU ESP8266.

III.2.3 Descriptions de l'installation PV alimentant le système d'éclairage

Un système photovoltaïque (PV) autonome (figure III.6), également appelé système hors réseau, est conçu pour fonctionner indépendamment du réseau électrique public. Il produit, stocke et distribue l'énergie de manière autonome. Les composants illustrés dans la figure III.6 sont présentés comme suit :

a : Panneau solaire sert à capter l'énergie solaire et à la convertir en électricité sous forme de courant continu (CC).

b : Régulateur de charge régule la tension et le courant provenant des panneaux solaires pour charger les batteries de manière sûre et efficace, prévenant ainsi la surcharge et la décharge excessive des batteries, prolongeant ainsi leur durée de vie.

c : Batteries stockent l'énergie électrique pour une utilisation ultérieure, notamment pendant la nuit ou par mauvais temps.

d : L'onduleur convertit le courant continu (CC) stocké dans les batteries en courant alternatif (CA), compatible avec les appareils électroménagers et les équipements électroniques.

e : La charge présente le luminaire à LED, ce type de charge est idéal pour les systèmes PV autonomes car il maximise l'utilisation de l'énergie stockée dans les batteries, prolongeant ainsi la période d'autonomie du système.

f : Thermocouple sert à surveiller la température du module photovoltaïque en temps réel.

g : Capteur de courant continu ACS712 Représente un outil de surveillance de courant généré par le champ PV.

h : Capteur de tension et de courant continu Représente un outil de surveillance pour l'énergie stockée dans les batteries.

i : Compteur d'énergie AC représente un outil de surveillance pour l'énergie convertie par l'onduleur pour alimenter les charges.

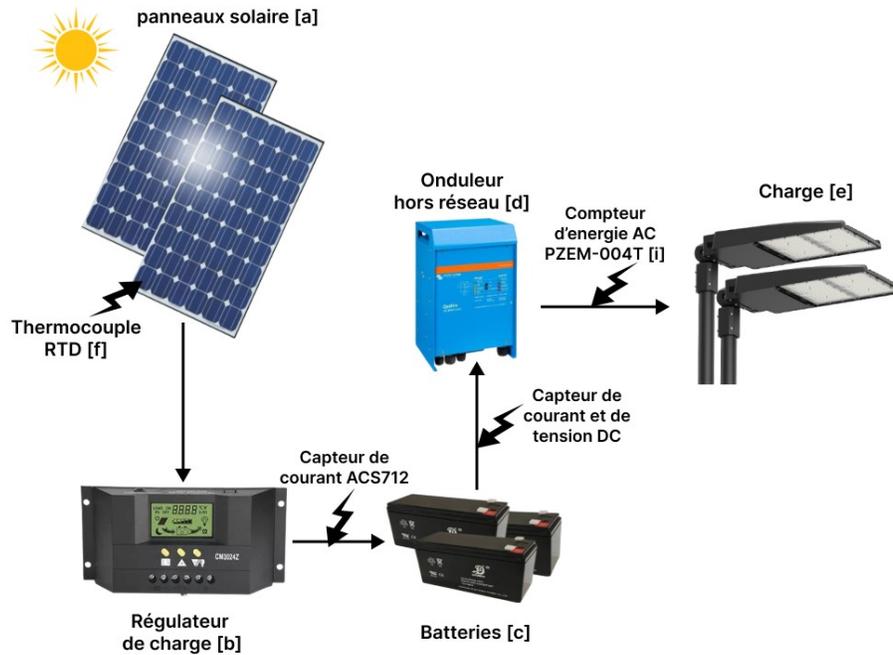


Figure III. 6 Schéma de connexion

III.2.3.b Schéma de connexion du capteur de tension continue et de courant continu

La figure III.7 illustre le schéma de connexion du capteur de courant continu CC (ACS712) et le module capteur de tension continue VDC (B25) :

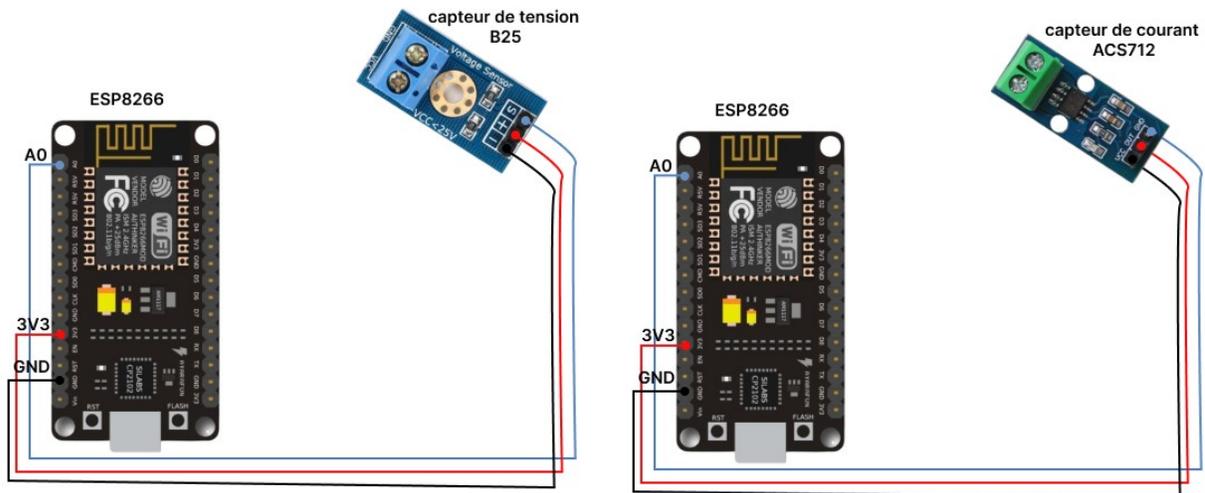


Figure III. 7 Schéma de connexion du ACS712 et le module capteur de tension VDC

III.2.3.c Schéma de connexion du RTD avec MAX6675

La figure III.8 illustre le schéma de connexion du thermocouple type K avec le convertisseur analogique numérique (CAN) MAX6675 et NodeMCU ESP8266 tels que :

- **GND (Broche 1)** : Connexion à la masse du circuit.
- **VCC (Broche 2)** : Alimentation positive du module, typiquement 3.3V ou 5V.
- **SO (Broche 3)** : Sortie série des données. C'est la broche de données SPI (Serial Peripheral Interface) par laquelle le MAX6675 transmet les données de température.
- **CS (Broche 4)** : Chip Select. Cette broche doit être mise à un état bas pour activer la communication SPI avec le MAX6675. Lorsqu'elle est à un état haut, le module est inactif.
- **SCK (Broche 5)** : Clock. C'est la broche d'horloge pour la communication SPI. Le signal d'horloge est fourni par le microcontrôleur pour synchroniser le transfert de données.
- **T- (Broche 6)** : Connexion au négatif du thermocouple de type K.
- **T+ (Broche 7)** : Connexion au positif du thermocouple de type K.

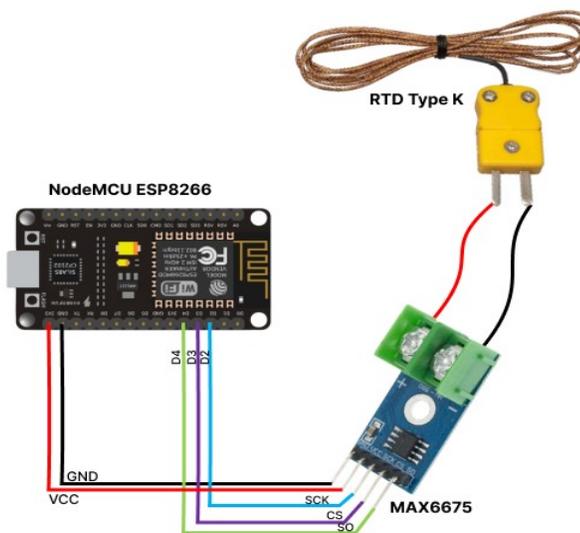


Figure III. 8 Schéma de connexion du RTD AVEC max6675

III.2.4 Le routage de la carte d'acquisition de données pour le système PV

En termes de simplification de montage, nous avons choisi un modèle de carte (figure III.9) basique pour éviter toute sorte de complications techniques. Ce modèle permet une installation plus facile et rapide, réduisant ainsi les risques d'erreurs lors de l'assemblage.

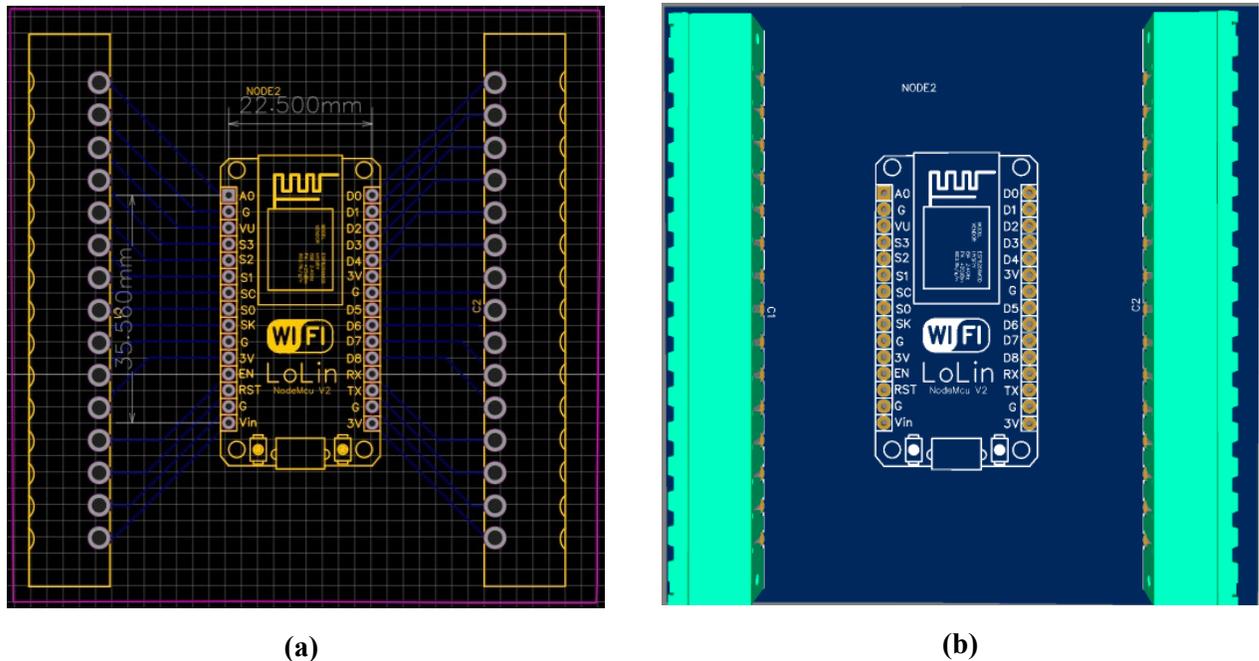


Figure III. 9 (a), (b) Routage de la carte d'acquisition de données

- (a) Schéma de routage de la carte d'acquisition de données.
 (b) Model en 3D de la carte d'acquisition de données.

III.3 La réalisation du boîtier de la protection

Pour assurer la performance et la sécurité de nos circuits, nous avons réalisé le boîtier (figure III.9) pour :

- La protection contre l'environnement : Il assure une barrière contre la poussière, humidité, les températures extrêmes et autres conditions environnementales qui pourraient affecter la performance et la longévité des composants électroniques.
- La fixation simplifiée : Les boîtiers sont conçus avec des options de montage qui facilitent leur fixation sur divers types de luminaires, qu'agisse de luminaires suspendus, encastrés, ou montés en surface.
- L'organisation des câbles : Ils contribuent à une gestion ordonnée des câbles, réduisant les risques d'emmêlement et facilitant l'identification des connexions.

Les figures III.9, et III.10 montrent respectivement le modèle en 3D et la vue réelle du boîtier réalisé pour le système d'éclairage :

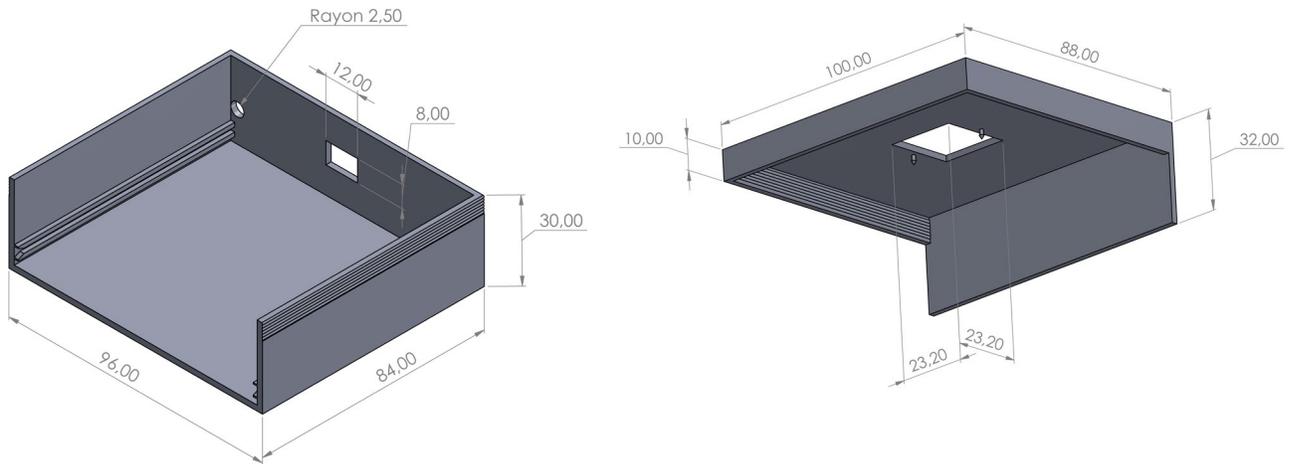


Figure III. 10 Le modèle en 3D du boîtier

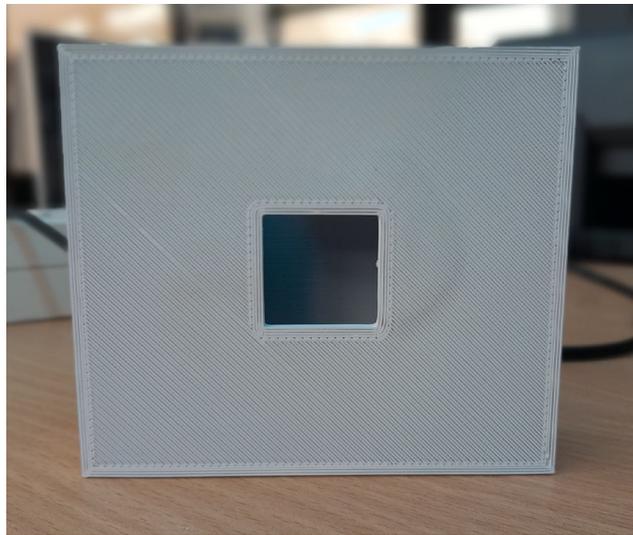


Figure III. 11 La vue réelle du boîtier.

Conclusion

Dans cette partie du projet, nous avons réalisé les schémas nécessaires pour établir les cartes de commande pour le système d'éclairage ainsi que la carte d'acquisition de données pour le système photovoltaïque. Nous avons également conçu et fabriqué les boîtiers pour protéger ces cartes, en assurant leur sécurité et durabilité. Les modèles en 3D et les schémas de connexion ont été élaborés pour offrir une vision claire et précise du montage et du fonctionnement de chaque composant.

Dans le chapitre quatre, nous allons interpréter les résultats obtenus à partir des tests et des simulations. Nous présenterons également un cas d'étude réel pour démontrer la mise en œuvre pratique du système réalisé, et pour finaliser le travail, nous allons dimensionner le système PV autonome pour assurer l'alimentation des luminaires, illustrant ainsi son efficacité et ses avantages dans un environnement réel.

Chapitre IV – Réalisation et interprétation des résultats

Introduction

Ce chapitre sera consacré pour l'interprétation des résultats obtenus aux cour des tests des dispositifs conçus commençant par le système d'éclairage public intelligent nous allons aborder le choix d'affichage et le stockage de données avec l'application mobile suivie par la vue globale de système d'éclairage réalisé ainsi les signaux de commande obtenus à la sortie du microcontrôleur utilisé et pour finaliser cette réalisation une étude technicoéconomique du système réalisé sera effectué pour déduire la faisabilité du système mentionné. Par la suite nous allons dimensionner le système PV nécessaire pour assurer l'alimentation des dispositifs ainsi les résultats de monitoring PV en utilisant le système de calcul PVsyst et en intégrant les résultats obtenus.

IV.1 L'affichage et le stockage de données du dispositif réalisé

L'affichage de données représente une étape très importante dans la réalisation des systèmes de commande pour assurer la surveillance et la supervision des données en temps réel après les stocker. Cette approche nous a permet à réaliser une base de données claire et structurée, permettant une gestion efficace des informations recueillies. Grâce à cette base de données, il est possible de stocker et d'analyser en continu les paramètres de fonctionnement tels que la consommation d'énergie, la puissance et le courant, ainsi que d'autres indicateurs sur l'état du lampadaire.

IV.1.1 L'affichage en temps réel sur Dashboard de Node-RED pour le système de l'éclairage public intelligent

Le Node-RED est hébergé par un Dashboard pour le rôle principal d'afficher en temps réel les données publiées par l'ESP8266 dans le sujet de MQTT. Cette architecture permet une surveillance continue et interactive des paramètres du système, facilitant ainsi la gestion et l'optimisation des performances.

Les figures (IV.2) et (IV.3) illustre respectivement le flux et le Dashboard réalisés sur Node-RED pour l'affichage en temps réel pour le système d''éclairage public intelligent :

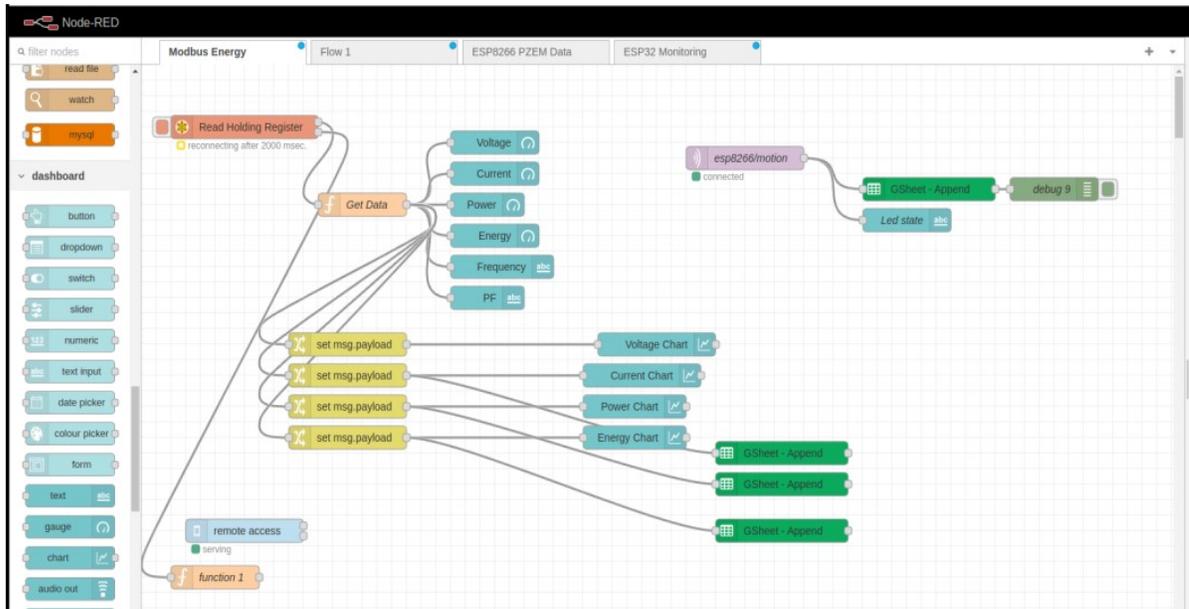


Figure IV. 1 Le flux réalisé sur Node-RED pour la surveillance de l'éclairage public intelligent

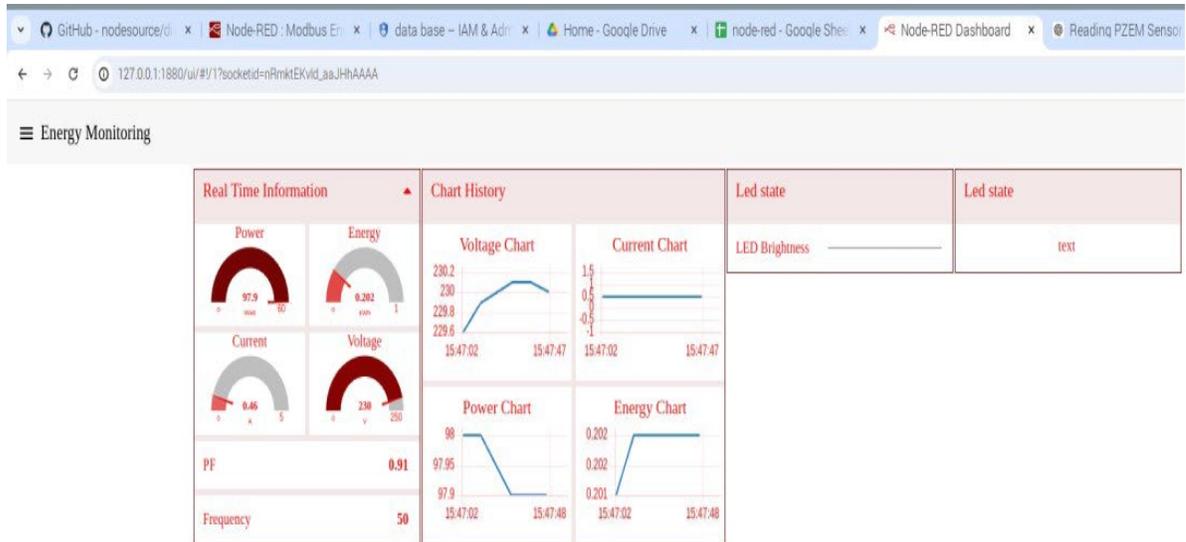


Figure IV. 2 Le Dashboard d'affichage pour l'éclairage public intelligent

IV.1.2 La base de données du système d'éclairage public intelligent

La figure IV.4 représente la base de données utilisée pour le stockage des données sur Google Sheets y compris ces paramètres nous avons pris en compte le courant, la puissance, l'énergie ainsi l'état du luminaire. Cette approche facilite la gestion de l'énergie et l'optimisation des performances en offrant une vue d'ensemble claire des données en temps réel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	led status	Current	Power	Energy KWH					
2	ON	0.4348	100	0.1					
3	ON	0.4348	100	0.1					
4	ON	0.4348	100	0.1					
5	ON	0.4348	100	0.1					
6	OFF	0	0	0					
7	OFF	0	0	0					
8	OFF	0	0	0					
9	OFF	0	0	0					
10	OFF	0	0	0					
11	OFF	0	0	0					
12	ON	0.4348	100	0.1					
13	ON	0.4348	100	0.1					
14	ON	0.4348	100	0.1					
15	ON	0.4348	100	0.1					
16	OFF	0	0	0					
17	OFF	0	0	0					
18	OFF	0	0	0					
19	ON	0.4348	100	0.1					
20	OFF	0	0	0					
21	OFF	0	0	0					

Figure IV. 3 La base de données sur google sheets pour l'éclairage public intelligent

IV.1.3 L'application mobile pour l'affichage de Node-RED

L'application mobile Remote-RED (figure IV.6) est conçue pour l'affichage du tableau de bord du Node-RED sur le téléphone. Cette application permet aux utilisateurs de surveiller et de contrôler leurs systèmes en temps réel, directement depuis leur appareil mobile. Cependant, elle reste limitée en termes d'accès car elle n'est accessible que sur site.

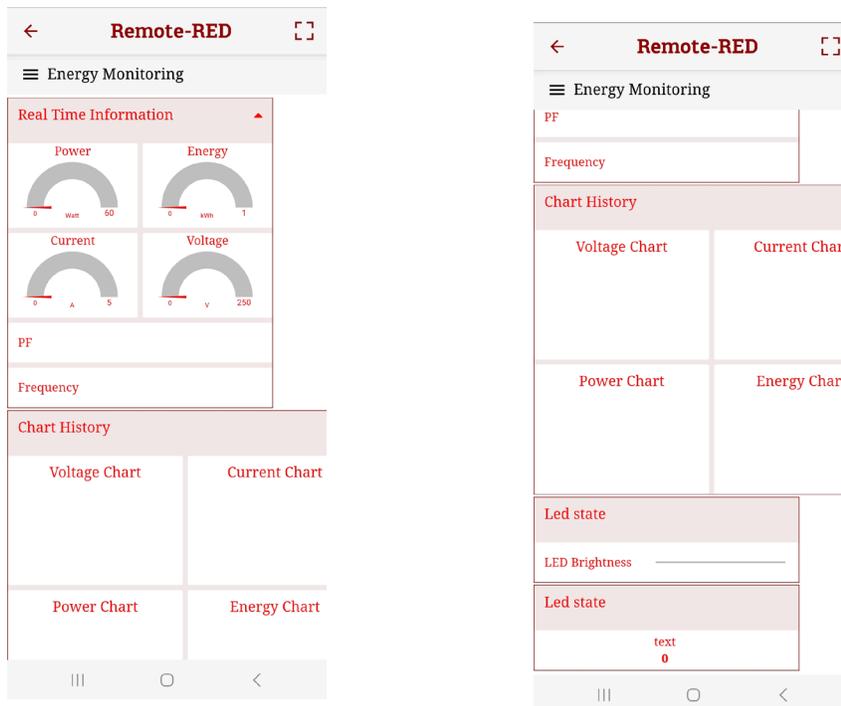


Figure IV. 4 Application mobile pour l'affichage de Node-RED

IV.2 La vue réelle du système réalisé pour l'éclairage public intelligent avec les signaux de commandes obtenus

IV.2.1 Le système de commande de l'éclairage public intelligent

La figure IV.5 illustre la vue réelle du système de commande de l'éclairage public intelligent :

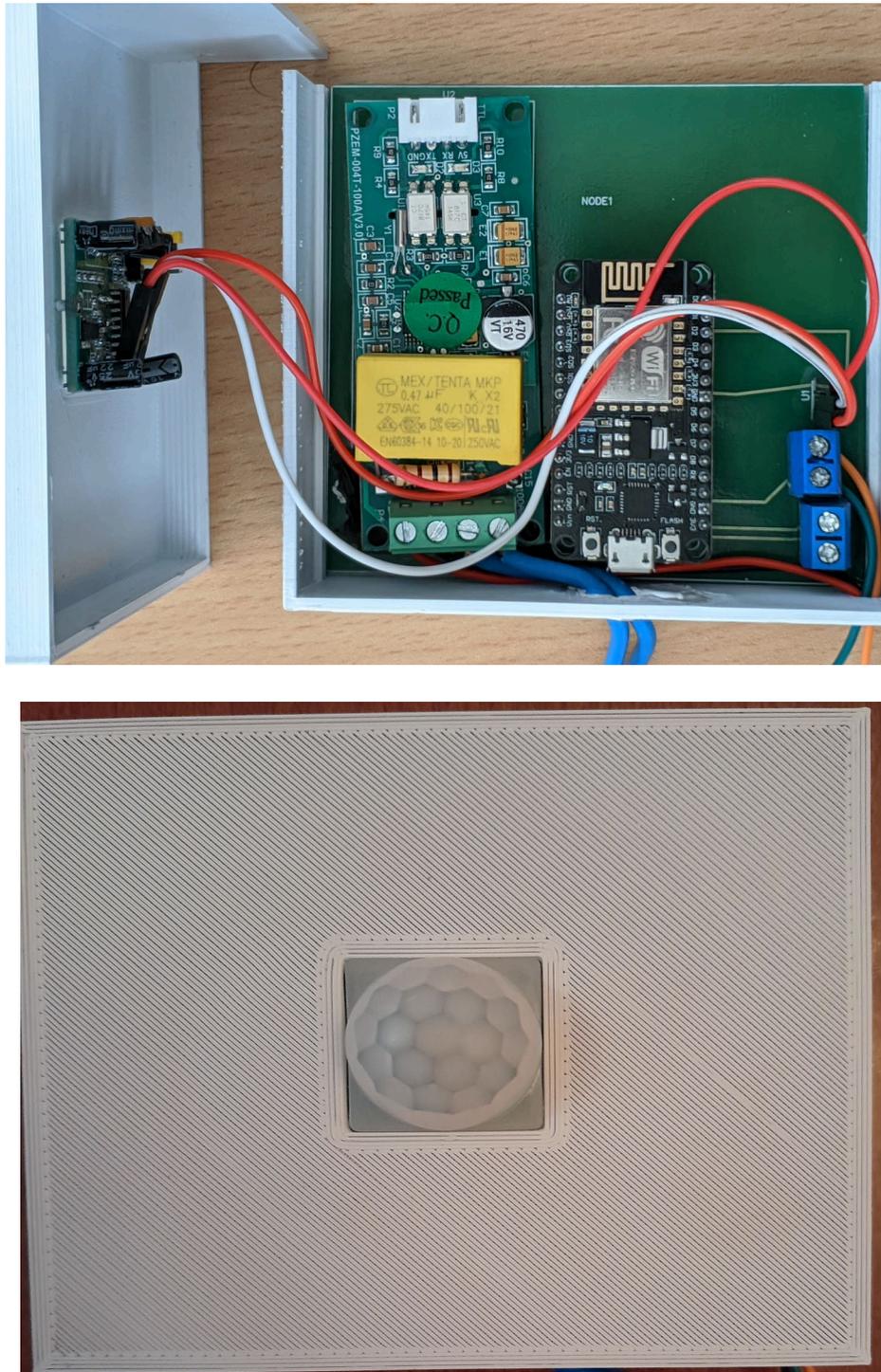


Figure IV. 5 La vue réelle du système de l'éclairage public intelligent

IV.2.2 Les signaux de commande obtenus dans la sortie de l'ESP8266 vers luminaire

a. L'absence de mouvement

La figure IV.7 illustre le signal obtenu de la sortie de l'ESP8266 vers le lampadaire pour ajuster leur luminosité à 20% dans le cas où le capteur de mouvement n'a pas détecté un mouvement :

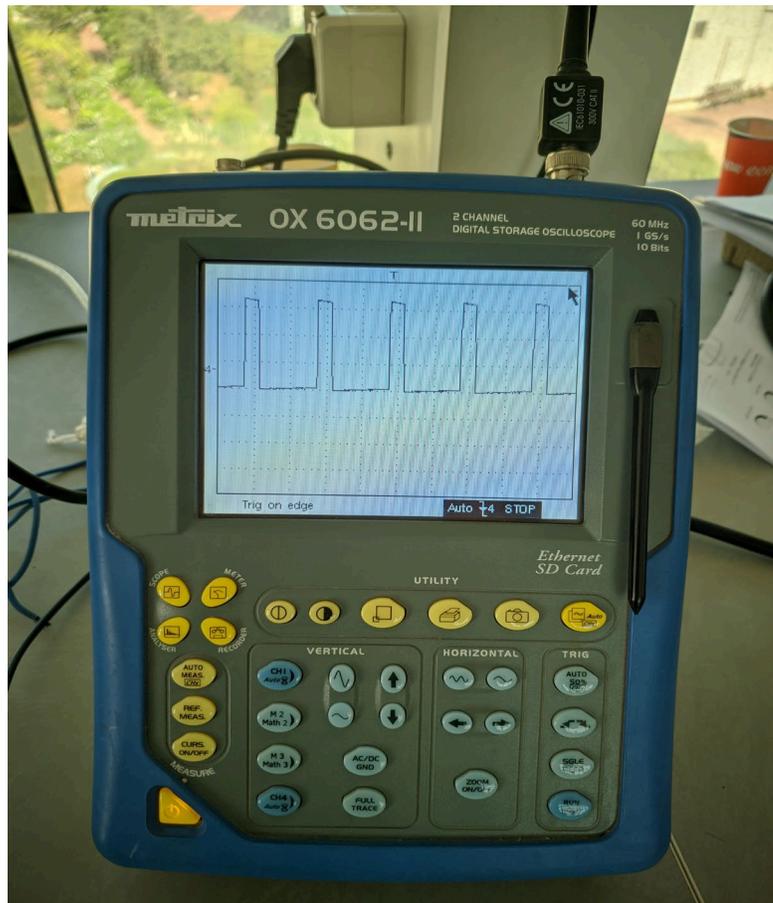


Figure IV. 6 Le signal de commande de l'ESP8266 vers le luminaire en cas d'absence du mouvement

b. La détection de mouvement

La figure IV.8 représente le signal de commande obtenu de la sortie de l'ESP8266 vers le luminaire dans le cas où le capteur de mouvement détecte un mouvement pour ajuster leur luminosité à un niveau haut 100% :

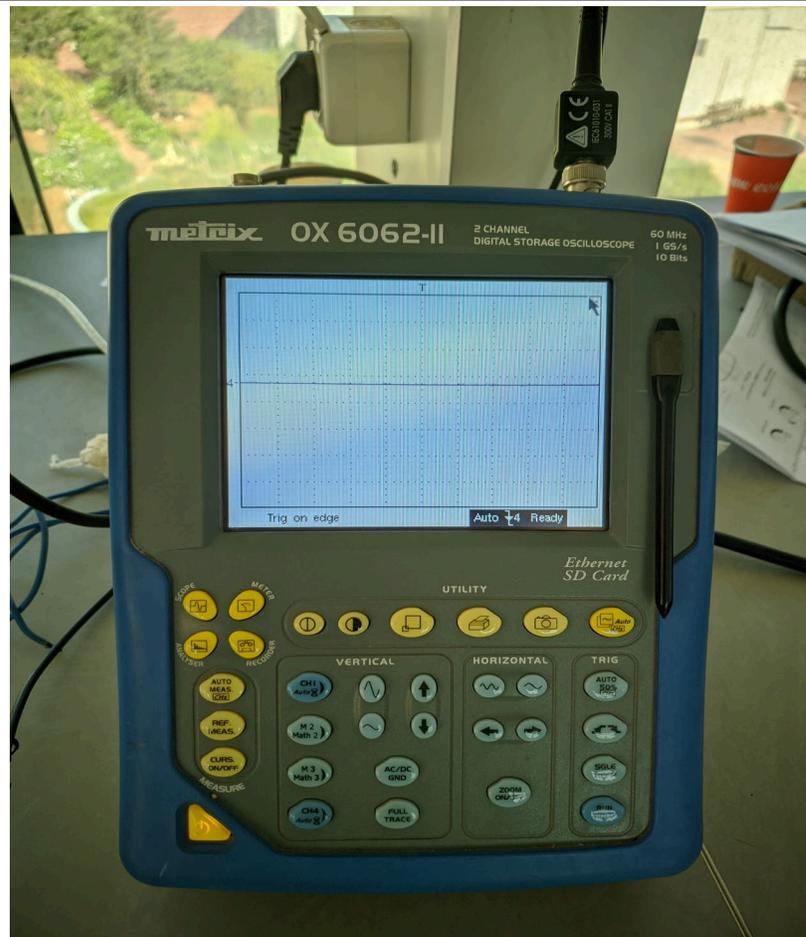


Figure IV. 7 Le signal de commande de l'ESP8266 vers le luminaire en cas de la détection du mouvement

IV.3 l'étude technico-économique pour le système de l'éclairage public intelligent

Le tableau suivant montre les prix unitaires de chaque composant utilisé pour réaliser la carte de commande (d'un seul dispositif avec un Raspberry Pi (web server) en commun) de l'éclairage public intelligent avec le prix total de note solution proposée.

Composant	Quantité	Prix
ESP8266	1	2300.00 DA
Capteur de mouvement	1	600.00 DA
PZEM-004T	1	1200.00 DA
Les fils de connexion	3	420.00 DA
Raspberry Pi 4 model B	1	12500.00 DA
Impression de la carte PCB	1	1500.00
Totale =		<u>18520.00 DA</u>

Tableau IV. 1 L'étude technico-économique pour le système d'éclairage public intelligent

IV.4 Dimensionnement du système photovoltaïque conçu pour l'alimentation de l'éclairage

IV.4.1 Vue générale du système de calcul PVsyst

PVsyst est considéré comme l'un des logiciels de simulation standard en usage. Il a été conçu et développé par le scientifique suisse André Mermaid & Co. Il est utilisé par la plupart des ingénieurs dans le monde entier car il fournit des résultats rapides et il est également pratique. Il réalise une étude détaillée et explicite de nombreux paramètres qui influencent l'efficacité d'un système. En outre, il a la capacité d'effectuer des estimations périodiques et de générer des rapports [36].

Le logiciel PVsyst est utilisé pour modéliser des dispositifs photovoltaïques. Sur la base des résultats de la simulation, le dimensionnement du panneau solaire et du modèle d'onduleur peut être sélectionné en fonction de la demande de charge requise. La méthode de dimensionnement dépend fortement de la localisation géographique du site [37].

IV.4.2 Les paramètres donnés pour la simulation utilisant PVsyst

Prenant l'UDES comme site de référence pour le dimensionnement du système PV :

a. Les données météorologiques

La figure IV.9 représente les données météorologiques d'une année typique (2024) pour le site de l'UDES. Ces données sont essentielles pour évaluer le potentiel de production d'énergie solaire et pour dimensionner correctement le système photovoltaïque.

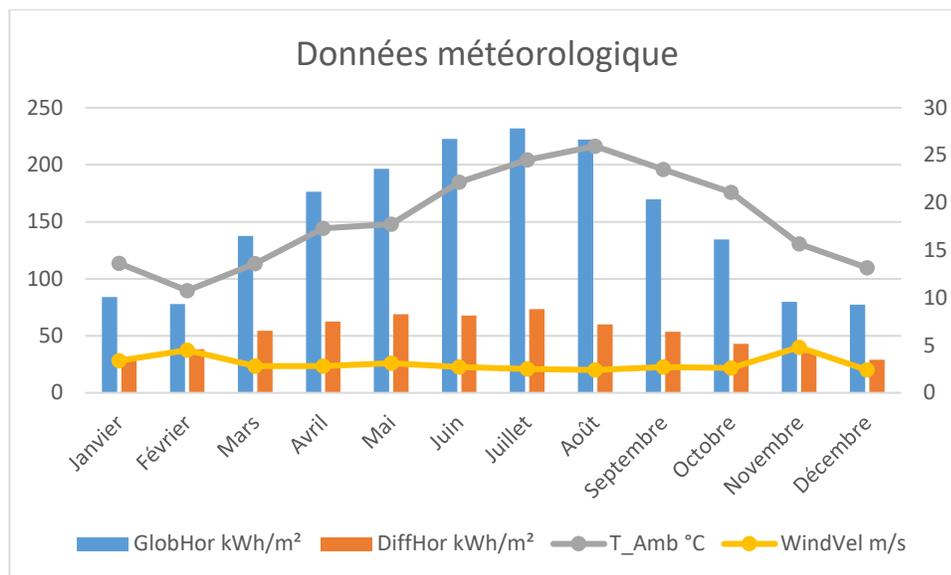


Figure IV. 8 Météo pour le site de l'UDES - Année météorologique typique (TMY) (2024)

b. Paramètres du champ

Le choix de l'angle d'inclinaison (33°) et l'orientation en plein sud avec un azimut de 0 degré sont pour le rôle de maximiser la production d'énergie solaire sur une année complète en tenant compte des variations saisonnières et des conditions climatiques locales.

c. Les besoins d'utilisateur

La distribution horaire des besoins en énergie (figure IV.2) pour un échantillon de 10 lampadaires à LED dans le site de l'UDES pour un éclairage périphérique partiel intelligent nous avons choisi 12 heures pour ne pas tomber dans un sous dimensionnement à partir de 18h de soir jusqu'à 6h du matin. Les variations horaires de la consommation d'énergie sont cruciales pour dimensionner correctement le système photovoltaïque afin de garantir une alimentation énergétique continue et efficace.

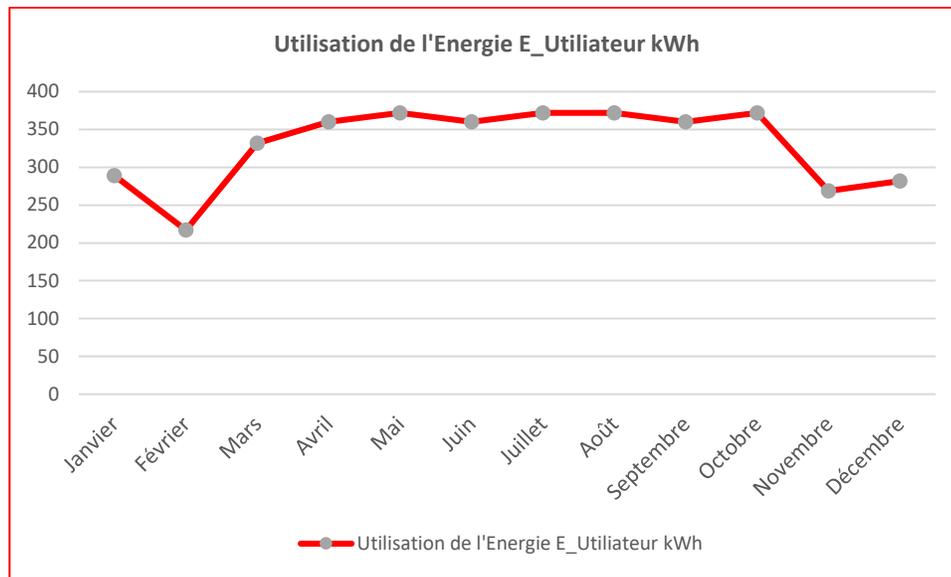


Figure IV. 9 Utilisation de l'énergie coté utilisateur année (2024)

d. Le choix du système PV

Le tableau IV.1 présente le système PV avec la capacité de production et de stockage adaptée aux besoins énergétiques quotidiens de l'utilisateur, garantissant une autonomie et une fiabilité adéquates :

	Détails
Besoin de l'utilisateur	Puissance moyenne 500W
	Énergie jour 12.0 kWh
Pack de batteries	Capacité 884 Ah
	Énergie stockée 33.9 kWh
Champ PV	Puissance nominale 3.00 kWc

	Énergie moye jour 12.0 kWh
Régulateur	Seuils selon SOC

Tableau IV. 2 Le choix du système PV

IV.4.3 Les résultats obtenus

a. Indice de performance (PR)

La figure (IV.3) illustre l'indice de performance PV trouvé ainsi une vision de la performance annuelle et de la contribution énergétique du champ photovoltaïque, aidant ainsi à valider la faisabilité technique et économique du projet. Comme l'indice de performance (PR) est proche de 1 cela confirme que notre système est bien dimensionné et fonctionne efficacement pour répondre aux besoins énergétiques du site de l'UDES.

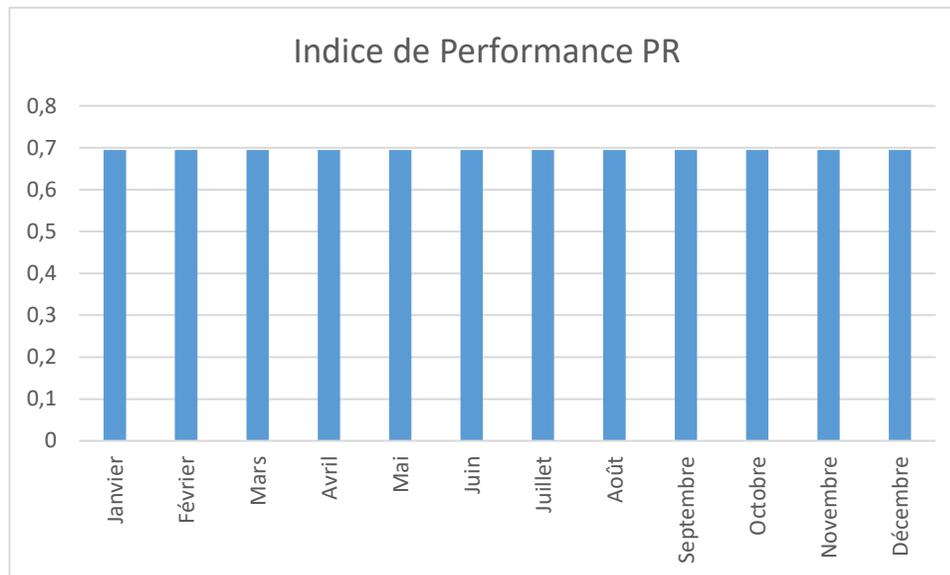


Figure IV. 10 Indice de Performance PR

b. Le système photovoltaïque proposé

Le tableau IV.1 montre les détails sur les besoins utiles, ainsi les informations sur le pack des batteries, y compris l'autonomie et la capacité de stockage. De plus, l'abordations des caractéristiques du champ photovoltaïque, comme le nombre de chaînes de modules. Enfin, des détails sur le régulateur, tels que le couplage direct et le courant PV maximal, sont également inclus. Ces informations techniques offrent un aperçu complet du fonctionnement et des capacités du système d'énergie solaire nécessaire pour l'alimentation des luminaires.

	Caractéristique	
Besoin utilisateur	Lampadaires à LED	10
	Fraction nuit	49.9%
Pack de batteries	17 en parallèle	48V
	Autonomie	3 jours
Champ PV	6 chaines de 4 modules	
Régulateur	Couplage direct	
	Courant PV max	140A

Tableau IV. 3 Le système PV proposé

IV.5 Système de monitoring du système PV

IV.5.1 Mesure de la température

L'utilisation de thermocouple type K avec le convertisseur analogique numérique pour la mesure de température des modules PV avec la validation des mesures utilisant le data logger Fluke pour valider les valeurs comme montre la figure IV.15 :

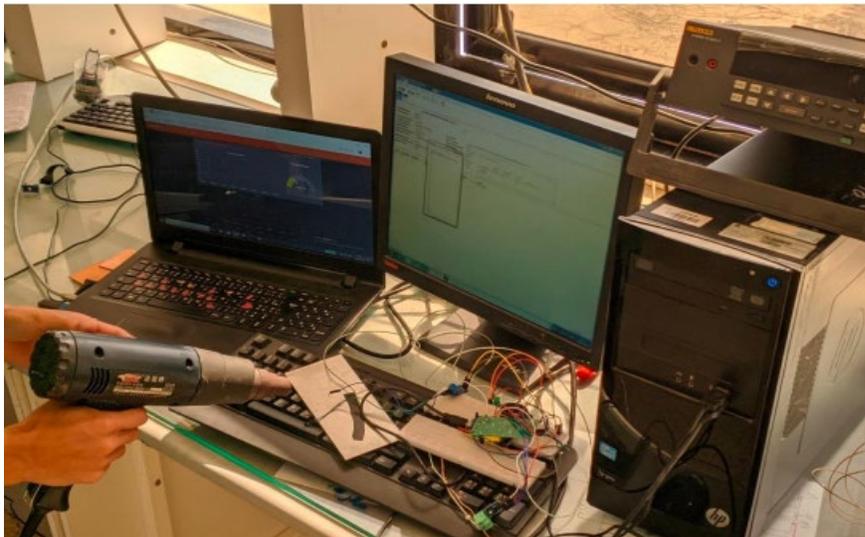


Figure IV. 11 La validation des mesures de température par data logger

IV.5.2 Le graphe de température obtenu à l'aide du thermocouple et data logger

La figure IV.13 montre le graphe comparatif entre les valeurs obtenues par ESP8266 et le Data logger, comme illustre le graphe les valeurs sont approchées et presque similaire avec une erreur absolue de 0.06 (6%).

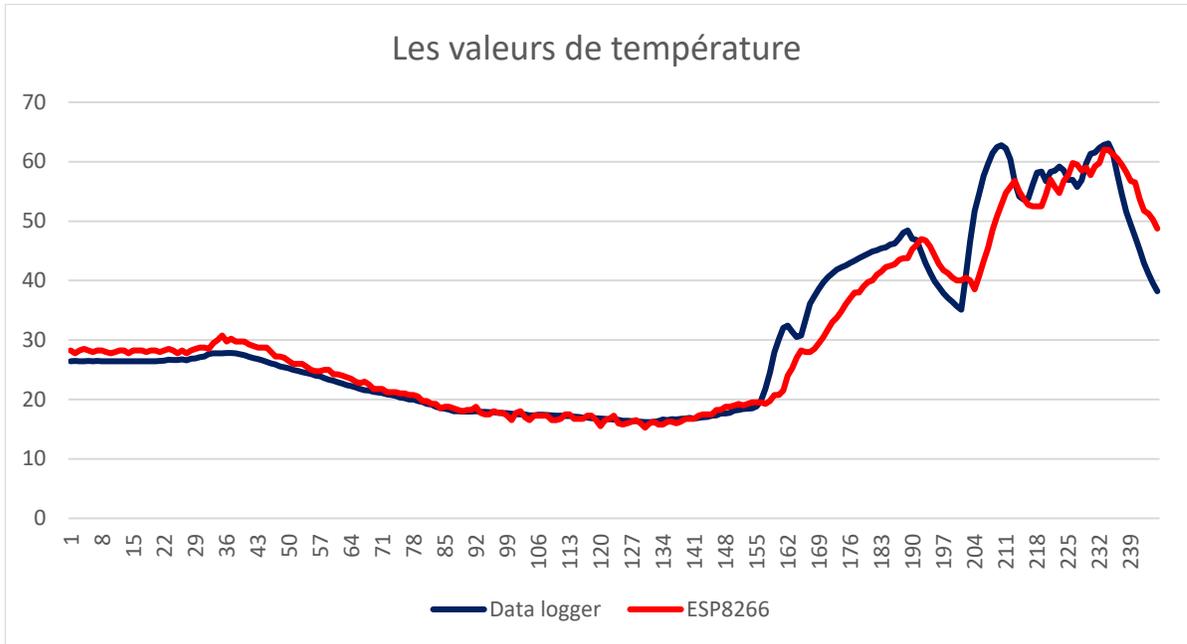


Figure IV. 13 Le graphe de température mesurée par data logger Fluke et thermocouple type K

IV.5.3 La mesure de l'irradiance

L'irradiance est une mesure de la puissance du rayonnement solaire reçue par unité de surface, généralement exprimée en watts par mètre carré (W/m²). Elle joue un rôle crucial dans les applications d'énergie solaire, notamment pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques et l'évaluation de leur performance. Les figures IV.14, IV.15 et IV.16 montre la mesure de l'irradiance en comparant les résultats obtenus par la cellule de référence et l'ESP8266 avec celle de data logger :

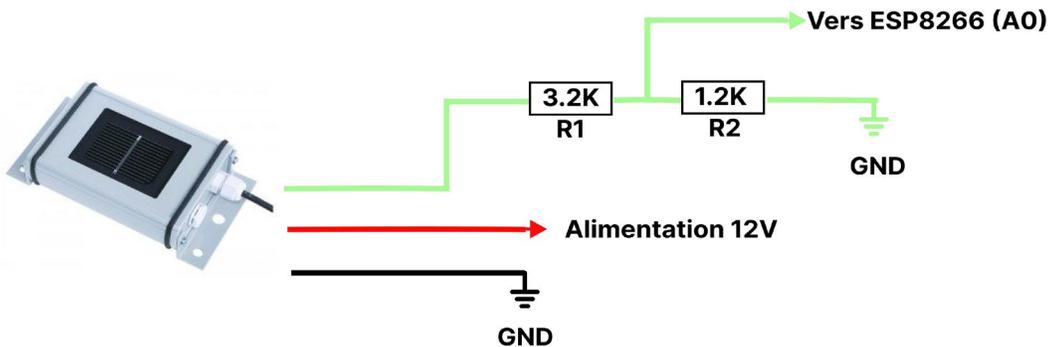


Figure IV. 14 Le schéma de connexion de cellule de référence avec ESP8266



Figure IV. 16 La vue réelle de la cellule de référence et pyranomètre

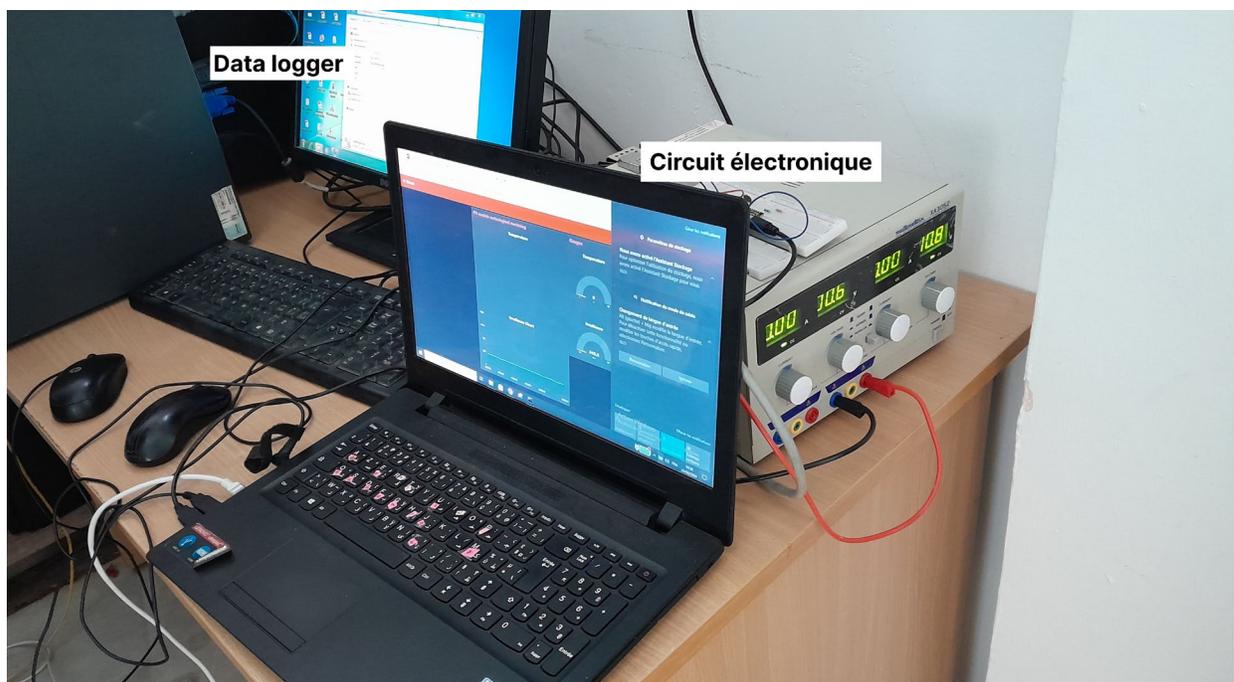


Figure IV. 18 La validation de mesure de l'irradiance en comparant les valeurs prises par la cellule de référence et celle de data logger

IV.6 Dashboard du système de monitoring du système PV

Les figure IV.17 et IV.18 illustre respectivement le flux et le Dashboard réalisé sur Node-RED pour l'affichage en temps réel pour le système de monitoring du système PV :

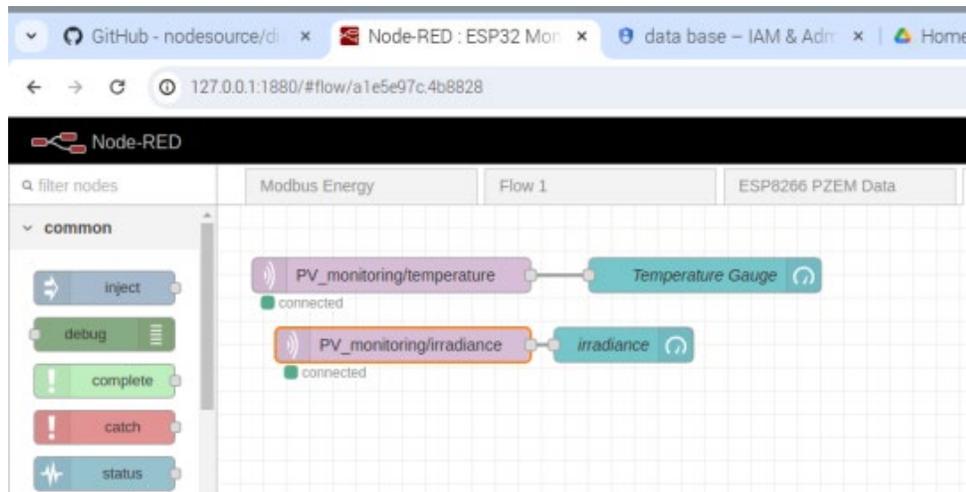


Figure IV. 20 Le flux sur Node-RED pour le système de monitoring PV

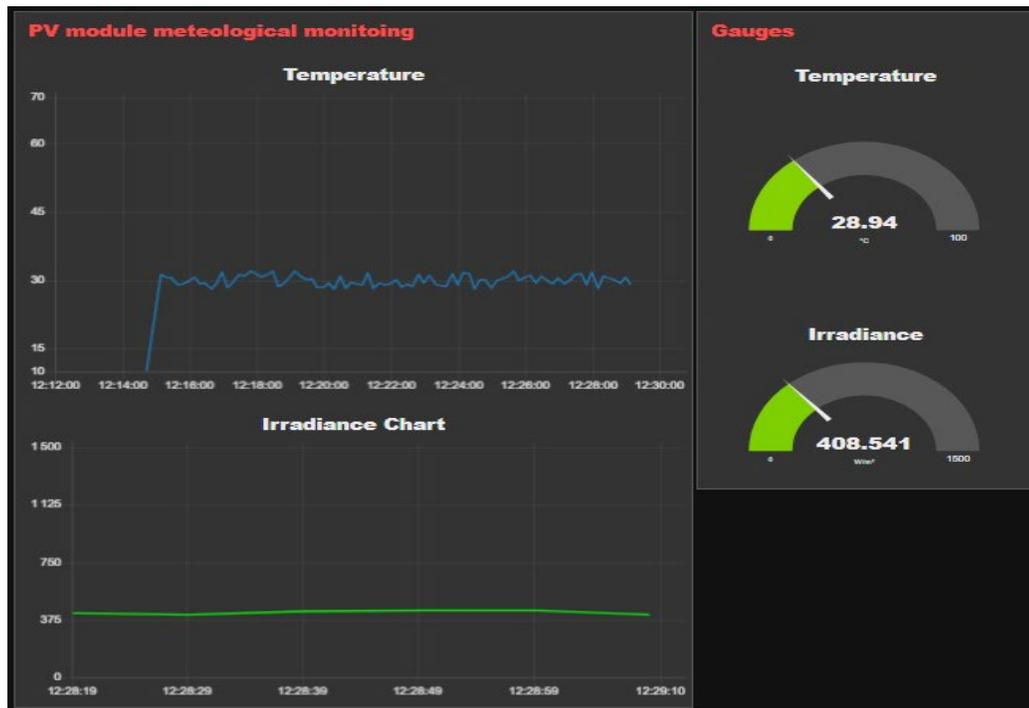


Figure IV. 22 Le Dashboard sur Node-RED pour le système monitoring PV

IV.7 l'étude technico-économique du système de monitoring PV

Le tableau IV.3 montre les prix unitaires de chaque composant utilisé pour réaliser la carte d'acquisition de données pour le système PV avec le prix total de cette solution tel que le Raspberry Pi reste le même que le système mentionné précédemment.

Composant	Quantité	Prix
ESP8266	1	2300.00 DA
PZEM-004T	1	1200.00 DA
ACS712	1	800.00DA
Thermocouple type K	1	300.00 DA
MAX6675	1	200.00 DA
B25	2	700.00 DA
Les fils de connexion	3	420.00 DA
Raspberry Pi	Le même du système de l'éclairage	
Impression de la carte PCB	1	600.00 DA
Totale =		<u>6520.00 DA</u>

Tableau IV. 4 L'étude technico-économique pour le système de monitoring du système PV

IV.8 La vue globale du système réalisé



Figure IV. 24 Le système globale réalisé avec luminaire à niveau 20%.



Figure IV. 25 Le système globale réalisé avec luminaire à niveau 100%.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons finalisé la conception de nos dispositifs en détaillant les étapes nécessaires pour réaliser ce projet, afin d'améliorer la durabilité et la fiabilité du système de l'éclairage public. De plus, nous avons présenté le site de réalisation avec le dimensionnement du système PV nécessaire pour garantir l'alimentation des lampadaires. Pour couvrir tous les aspects de ce projet, nous avons également effectué une étude technico-économique pour évaluer la faisabilité de notre dispositif.

La réalisation de ce projet a démontré la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de systèmes photovoltaïques pour l'éclairage public intelligent. Les résultats obtenus sur le site de l'UDES montrent une amélioration significative en termes de durabilité et de fiabilité. Ce projet peut servir de modèle pour d'autres initiatives similaires visant à réduire la consommation d'énergie et à promouvoir des solutions durables pour l'éclairage public.

Conclusion générale

Conclusion générale

Comme mentionné précédemment, en 2022, l'éclairage public en Algérie représentait plus de 60% de la consommation globale d'électricité. Les autorités ont souligné la nécessité de prendre des mesures pour réduire cette consommation énergétique. En réponse à cet appel national, l'Unité de Développement des Énergies Renouvelables (UDES) a entrepris de tester une solution économique et durable. Dans ce contexte, nous avons réalisé ce projet de fin d'études pour contribuer à cette initiative. Ce travail est présenté à travers quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons identifié le contexte de l'augmentation de la consommation d'énergie électrique pour déterminer les systèmes les plus énergivores. Parmi eux, nous avons mentionné l'éclairage public, qui représente plus de 50% de cette consommation. Nous avons également abordé l'importance de la transition vers un éclairage public plus robuste et durable en identifiant les méthodes existantes. Ensuite, nous avons présenté notre solution, la plus faisable et la plus efficace, en termes de surveillance, de commande et de stockage d'historique. De plus, nous avons intégré les énergies renouvelables pour l'alimentation des lampadaires. Pour finaliser ce travail, nous avons souligné la nécessité de réaliser une carte d'acquisition de données pour le système photovoltaïque.

Le deuxième chapitre était dédié au choix des matériels ainsi qu'à celui des logiciels pour les dispositifs de commande et d'acquisition de données. Dans ce chapitre, nous avons mentionné les différentes dimensions de cette conception, en mettant en lumière les technologies utilisées, les objectifs visés, ainsi que les avantages attendus d'un tel système intégré. Nous avons examiné les critères de sélection des composants matériels, en prenant en compte leur performance, leur fiabilité et leur compatibilité avec les autres éléments du système. De plus, nous avons détaillé les logiciels nécessaires pour la gestion et l'analyse des données, en expliquant leur rôle dans l'optimisation de la consommation énergétique et la maintenance prédictive.

Nous avons aussi exploré les technologies de communication utilisées pour assurer une connexion efficace entre les différents composants du système, comme les protocoles sans fil et les réseaux IoT. L'objectif principal de ce chapitre était de démontrer comment ces choix technologiques contribuent à la réalisation d'un système d'éclairage public intelligent avec un système de suivi PV, capable de réduire la consommation d'énergie tout en améliorant la qualité de service.

Le troisième chapitre était consacré à la conception mécanique et électrique. Nous avons détaillé les schémas de connexion ainsi que la réalisation des cartes PCB pour nos dispositifs. Cette approche était une étape cruciale de notre réalisation. Par la suite, nous avons conçu et fabriqué le boîtier pour assurer la protection des circuits.

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les schémas électriques, expliquant chaque connexion et la disposition des composants. Nous avons décrit les processus de conception

Conclusion générale

et de fabrication des cartes PCB, en mettant l'accent sur les précautions prises pour garantir la fiabilité et la sécurité des circuits.

Nous avons également abordé la conception mécanique, notamment la création du boîtier de protection. De plus, nous avons inclus des illustrations et des diagrammes pour clarifier les étapes de conception et de réalisation, fournissant une vue d'ensemble complète de l'assemblage des composants mécaniques et électriques. Nous avons conclu ce chapitre en soulignant l'importance de cette phase dans le succès global du projet, en insistant sur la nécessité d'une conception soignée et d'une fabrication précise pour garantir la durabilité et l'efficacité des dispositifs.

Dans le dernier chapitre, nous avons abordé les résultats obtenus avec une vue réelle des dispositifs réalisés. Pour garantir l'alimentation des luminaires, nous avons effectué le dimensionnement du système PV. De plus nous avons effectué une étude technico-économique pour montrer la faisabilité de nos dispositifs. Par la suite, nous avons détaillé la méthode de surveillance en utilisant le Dashboard de Node-RED pour les deux systèmes réalisés, ainsi que la méthode de stockage d'historique. Pour bien définir le succès de ce projet, nous avons fourni une vue complète du système.

Parmi nos objectifs futurs figurent :

- Réaliser le système pour plusieurs lampadaires afin de couvrir une plus grande zone et d'optimiser l'efficacité énergétique à une échelle plus large.
- Améliorer la précision et la fiabilité des capteurs utilisés pour une meilleure gestion de l'éclairage et une réduction des coûts de maintenance.
- Développer des algorithmes de contrôle intelligents pour ajuster l'intensité de l'éclairage en fonction des conditions environnementales et des besoins réels, maximisant ainsi les économies d'énergie.
- Explorer l'utilisation de batteries de stockage avancées pour augmenter l'autonomie des systèmes d'éclairage public alimentés par énergie solaire.
- Collaborer avec les collectivités locales et les autorités pour déployer des projets pilotes dans diverses régions et évaluer l'impact réel de ces technologies sur la consommation d'énergie et la qualité de vie des citoyens.

En conclusion, notre projet a jeté les bases pour une transition vers un éclairage public plus durable et efficient, et nous espérons que nos futures initiatives contribueront à une adoption plus large de ces solutions innovantes.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

- [1] X. Yang, S. Liu, L. Zhang, J. Su, T. Ye. 2020. Design and analysis of a renewable energy power system for shale oil exploitation using hierarchical optimization. Energy. 206, Article ID: 118078.
- [2] A. Garcia-Olivares, J. Solé, O. Osychenko. 2018. Transportation in a 100% renewable energy system. Energy Conversion and Management. 158, 266-85.
- [3] Khaled Alosmani. Optimisation des systèmes photovoltaïques : vers une meilleure efficacité et une performance sans défaut. Autre. Université d'Angers, 2023. Français. ffNNT : 2023ANGE0055ff. fftel-04505262.
- [4] Référentiel National pour une Lumière de Qualité et Ecoénergétique rédigé par le Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique (CEREFÉ)
- [5] National agency for the promotion and rationalization of the use of energy (APRUE), 2022
- [6] L'éclairage public intelligent, qui permet aux collectivités de faire des économies d'énergie, gagne du terrain Par [Emma Confrère](#) Publié le 12/09/2022 à 06:00, mis à jour le 13/09/2022 à 13:52
- [7] International Energy Agency IEA [Africa – Countries & Regions - IEA](#)
- [8] Hannah Ritchie and Pablo Rosado (2020) - "Electricity Mix" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- [9] Ember - Yearly Electricity Data (2023), Ember - European Electricity Review (2022), Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023), Population based on various sources (2023) – with major processing by Our World in Data
- [10] Advances in Science and Technology Research Journal
Volume 13, Issue 1, March 2019, pages 88–109 <https://doi.org/10.12913/22998624/103425>
State of the Art Compendium of Macro and Micro Energies Mushtaq Ahmad, Salmia Beddu, Zarina binti Itam, Firas Basim Ismail Alanimi. Available online: 2019.02.26
- [11] [Mehdi Assekour est ingénieur en génie énergétique, expert dans les domaines de la distribution électrique et de l'éclairage. Éclairage Public : Définition, Types, Coût et Enjeux - Votre Guide - Eclairage Public - Luminaire et Eclairage Hub](#)
- [12] [BELUX : réduire de moitié la facture énergétique de l'éclairage public - Algerie360](#)

Référence bibliographique

[13] [Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 82, Part 3](#), February 2018, Pages 4142-4158 Global modern monitoring systems for PV based power generation: A review Author links open overlay panel M.Mahbubur Rahman, J. Selvaraj, N.A. Rahim, M. Hasanuzzaman.

[14] Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion. Préparée au laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), UMR 5529 dans le cadre de l'Ecole Doctorale « Electrotechnique Electronique Automatique et Traitement du Signal » présentée et soutenue publiquement par Stéphane VIGHETTI le 24 septembre 2010

[15] electrotechnique “Theodore WILDI” avec la collaboration de Gilbert Sybille (Ingénieur, institut de recherche d’Hydro-Québec) 3^{ème} édition

[16] Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems Fundamentals and Application January 15, 1997 Prepared for: Sandia National Laboratories Photovoltaic Systems Applications Dept. PO Box 5800 Albuquerque, NM 87185-0752

[17] <https://www.researchgate.net> Impact énergétique et environnemental de l’éclairage : un enjeu pour l’avenir

[18] [What is a smart streetlight? \(techtarger.com\)](#) by Sarah a former technical writer for TechTarget.

[19] International Journal of Control Theory and Computer Modelling (IJCTCM) Vol.2, No.3, May 2012

ZIGBEE: A LOW POWER WIRELESS TECHNOLOGY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS.

[20] JND. Bluetooth : définition et fonctionnement.

[21] Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 130, November 2014, Pages 529-54 Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards Authors M. Fuentes, M. Vivar, J.M. Burgos, J. Aguilera, J.A. Vacas

[22] Journal of Environmental Management. Opportunities and risks of internet of things (IoT) technologies for circular business models: A literature review By: Suiting Ding, Arnold Tukker, and Hauke Ward 2022-2023 Fellow, Paris Institute of Advanced Sciences, Paris, France

[23] International Journal of Software Engineering and Its Applications A Study on the Internet of Things (IoT) Applications By: Young-Mo Kang, Mi-Ran Han, Kyeong-Seok Han and Jong-Bae Kim

[24] A Review Paper on Raspberry Pi and its Applications Hirak Dipak Ghael, Dr. L Solanki, Gaurav Sahu

Department of Electronics and Communication Engineering, Date of Submission: 25-12-2020 Date of Acceptance: 06-01-2021

Référence bibliographique

[25] [NodeMCU ESP8266 Brochage, spécifications, caractéristiques et fiche technique \(components101.com\)](#)

[26] Himadri Nath Saha, Reek Roy, Monojit Chakraborty, Chiranmay Sarkar, Chapter 20 - A crop-monitoring system using wireless sensor networking, Editor(s): Ajith Abraham, Sujata Dash, Joel J.P.C. Rodrigues, Biswaranjan Acharya, Subhendu Kumar Pani, In Intelligent Data-Centric Systems, AI, Edge and IoT-based Smart Agriculture, Academic Press, 2022, Pages 345-359,

[27] [Innovatorsguru \(en anglais seulement\) | Projets d'ingénierie électrique | InnovateursGourou](#)

Solarduino, un blog sur les projets solaires photovoltaïques et Arduino

[28] [Interfacing 0-25V DC Voltage Sensor with Arduino \(how2electronics.com\)](#)

[29] Artificial photosynthesis using LDR controlled solar relay circuit Yogesh kumar Jayam, Venkatesh Tunuguntla, J.B. Sreehari, S. Harinarayanan Department of Electronics and Communication Engineering, Amrita Vishwa VidyaPeetham, Amritapuri, India Article history: Received 7 August 2020 Accepted 21 November 2020 Available online 12 February 2021

[30] TE Connectivity [Qu'est-ce qu'un RTD ? | Comprendre les capteurs RTD | TE Connectivity](#)
arduino code for rtd type k with max31865 and esp8266 to read temperature value and publish it via mqtt server on node red installed in raspberry pi

[31] Eclipse Mosquitto™ Un broker MQTT open source. [Eclipse Mosquitto](#)

[32] IFAC PapersOnLine 53-2 (2020) 17210–17215 Development of a Remote Industrial Laboratory for Automatic Control based on Node-RED

[33] Fathia Chekired, Sid Ahmed Tadjer , Constantinos A. Bouroussis, Amira Louni, Amar Tilmatine, Laurent Canale, participated as a speaker at the ILDC session of the IAS 2021 Annual Meeting held in Vancouver on October 13, 2021, for the presentation of the following communication: Low-Cost House Automation System based on Arduino Microcontroller.

[34] [Hardware Security](#) A Hands-On Learning Approach 2019, Pages 81-10 Chapter 4 - Printed Circuit Board (PCB): Design and Test Author links open overlay panelSwarup Bhunia, Mark Tehranipoor

[35] [UDES:Unité de Developpement des Equipements Solaires \(cder.dz\)](#)

[36] Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone PV system using PVSYST [Volume 80, Part 3](#), 2023, Pages 3385-3392

[37] [PVsyst – Photovoltaic software](#)