

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

en Electrotechnique

Spécialité Commandes électriques

par CHAREF Manel

et BOUKHERCHEFA Mouad

Sujet

**Conception et réalisation d'un routeur solaire IOT destiné à
l'autoconsommation intelligente de l'énergie d'origine
photovoltaïque**

Soutenu publiquement, le 06 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Mr MELIANI Sidi Mohamed	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr MECHERNENE Abdelkader	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr LOUCIF Mourad	Maitre de conférences A	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mr Dris Younes	Maitre-assistant B	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Melle ATTIA Sefia	Doctorante	Univ. Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2023 / 2024

Dedicaces 1

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons achevé ce modeste travail que je dédie :

- à mes chers parents, mes piliers de soutien tout au long de mon parcours académique. votre amour, votre encouragements et votre dévouement inconditionnels m'a permis d'atteindre mes objectifs et de réaliser mes rêves. Votre présence constante et votre soutien indéfectible ont été une source d'inspiration et de motivation ;
- à ma chère grand-mère Amara, ma source de force et de bonheur, votre présence a été ma plus grande inspiration. Que notre lien spécial continue de nous guider vers de nouveaux horizons ;
- à mes très chers frères Amine et Mohammed, ainsi mes oncles Bachire et Houari ;
- à mes cousines, Asma, Oumaima, Khadidja, Amina et Mariem ;
- à mes très chères amies : Nouha, Ouiame, Marwa, Chaima ;
- à mon binôme Mouad Boukhercheffa, Ce projet témoigne de notre coopération et détermination communes, enrichies par votre créativité et votre engagement. Merci pour votre collaboration exceptionnelle ;
- Enfin à toute la promotion Electrotechnique, option Commande électrique de l'année 2023-2024 .

Tous ceux qui m'aiment ... Merci

Manel CHAREF
Tlemcen, le 06 Juin 2024

Dedicaces 2

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons achevé ce modeste travail que je dédie :

- à mes très chers parents, pour leur soutien matériel et moral, en espérant que je puisse leur rendre le minimum de bonheur qu'ils m'ont offert ;
- à Mes chères soeurs khadidja et hafsa et leurs maris et mes deux frères hamza et abderrahman
- à mes chers amis proches ,affif , salim , abderrahim ,ahmed , abdelmalek
- à mon binome MANEL CHAREF, pour notre entente et notre collaboration tout au long de ce projet
- Enfin à toute la promotion Electrotechnique, option Commande électrique de l'année 2023-2024 .

MOUAD BOUKHERCHEFA
Tlemcen, le 06 Juin 2024

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Très-Haut qui nous a donné du courage et de la volonté Faites ce travail trivial.

Nous profitons de cette occasion pour exprimer nos plus vifs remerciements et nos plus sincères remerciements à tous qui nous ont directement ou indirectement aidés à réaliser cette thèse.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à nos encadrants **Mourad LOUCIF** et **Abdelkader MECHERNENE**, nous le remercions pour ses précieux conseils et ses orientations tout au long de nos recherches.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail : **Mr. MELIANI Sidi Mohamed** et **Mr. DRIS Younes**.

Nous remercions également Mademoiselle ATTIA Sefia, Doctorante à la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour son collaboration, son soutien et sa gentillesse.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Manel CHAREF

Mouad BOUKHERCHEFA

Tlemcen, le 06 Juin 2024

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	xi
GLOSSAIRE	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES PHOTOVOLTAÏQUES	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 ETAT DE L'ART DES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES	4
I.2.1 Energie solaire	5
I.3 CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE	6
I.3.1 Cellule photovoltaïque	7
I.3.2 Modèles électriques équivalents	9
I.3.3 Panneau photovoltaïque	11
I.3.4 Caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques	11
I.3.5 Fonction MPPT	12
I.4 CLASSIFICATION DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE	14
I.4.1 Rendement des systèmes photovoltaïques	14
I.4.2 Systèmes PV par site isolé ou autonome	15
I.4.3 Systèmes PV raccordées au réseau	16
I.5 ONDULEURS CENTRALISÉES ET MICRO-ONDULEURS	17
I.5.1 Onduleurs centralisées	17
I.5.2 Micro-onduleurs	17
I.5.3 Différence entre onduleurs et micro-onduleurs	18
I.6 AUTOCONSOMMATION ÉNERGÉTIQUES	18
I.6.1 Définition d'autoconsommation photovoltaïque	18
I.6.2 Différent types d'autoconsommation	19
I.6.2-a Direct	19
I.6.2-b Avec revente	19
I.6.2-c Avec stockage	20
I.6.3 Avantages d'autoconsommation	21

I.7	CONCLUSION	21
II	PRINCIPE ET RÉALISATION MATÉRIELLE DU ROUTEUR PHOTOVOLTAÏQUE	22
II.1	INTRODUCTION	23
II.2	PRÉSENTATION DU SITE	23
II.2.1	Présentation du site locaux de laboratoires	23
II.2.2	Présentation de la microcentrale PV existante	24
II.3	ROUTEUR PHOTOVOLTAÏQUE	25
II.3.1	Fonctionnalités d'un routeur photovoltaïque	25
II.3.2	Exemples de routeur photovoltaïque	25
II.3.2-a	Routeur photovoltaïque Arsun	25
II.3.2-b	Routeur photovoltaïque Shelly EM	26
II.3.2-c	Routeur décodant le Linky	26
II.3.3	Cahier des charges	27
II.3.4	Schéma fonctionnel du système proposé	28
II.4	MODULE DE DÉVELOPPEMENT ESP32	28
II.4.1	Description de la carte ESP32 WROOM	29
II.4.2	Caractéristiques techniques de la carte ESP32 WROOM	29
II.4.3	Broches la carte ESP32 WROOM	30
II.4.4	Convertisseur Analogique-Numérique (ADC)	30
II.4.5	Convertisseur Numérique-Analogique (DAC)	30
II.4.6	SPI (Serial Peripheral Interface)	31
II.4.7	I2C (Inter-Integrated Circuit)	31
II.4.8	PWM (Pulse Width Modulation)	31
II.4.9	Interruptions externes	31
II.4.10	Alarmes	32
II.4.11	Timers	32
II.4.12	Connexion WiFi	33
II.4.13	Fonction Arduino OTA (On The Air)	34
II.4.13-a	Configuration OTA	34
II.4.13-b	Fonctionnement OTA Web	34
II.5	CAPTEUR JSY-MK-194T	35
II.5.1	Définition	35
II.5.2	Principe des mesures (tension alternative, courant alternatif)	35
II.6	CIRCUIT DE BRANCHEMENT À L'ESP32	36
II.7	PRÉSENTATION DU MODULE GRADATEUR AC ROBOTDYN	37
II.7.1	Description du module	37
II.7.2	Gradateur Triac 16A/24A	37
II.7.3	Changement du dissipateur thermique du module gradateur	38
II.8	RÉALISATION MATÉRIELLE	39
II.8.1	Matériel demandé	39
II.8.2	Montage électrique	40
II.8.3	Connexions électriques du routeur photovoltaïque	41
II.9	CONCLUSION	42

III RÉALISATION LOGICIELLE ET INTERFAÇAGES	43
III.1 INTRODUCTION	44
III.2 CONCEPTION LOGICIELLES	44
III.2.1 Calcule des valeurs efficaces de la tension et du courant	46
III.2.2 Calcul des puissances active et apparente	46
III.2.3 Fonctionnalités du code	47
III.3 INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR PAGE WEB	48
III.3.1 Résultats	48
III.3.1-a Résultats sans panneaux photovoltaïque	48
III.3.1-b Résultats avec panneaux photovoltaïque	50
III.3.2 Interprétations	51
III.4 INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR UN SERVICE EN LIGNE	52
III.4.1 Service ThingSpeak	52
III.4.2 Service Blynk	52
III.4.3 Configuration ThingsSpeak	53
III.4.4 Résultats sous ThingsSpeak	55
III.4.4-a Résultats sans panneaux photovoltaïques	55
III.4.4-b Résultats avec panneaux photovoltaïque	57
III.4.5 Interprétations des résultats :	58
III.5 OUTILS LOGICIELS	58
III.5.1 MQTT-Mosquito	59
III.5.2 Node-Red	60
III.5.3 Influx db	61
III.5.4 Grafana	61
III.6 INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR INFLUX DB ET VISUALISATION SUR GRAFANA	62
III.6.1 Présentation de carte Raspberry Pi	62
III.6.2 Définition d'un serveur	64
III.6.3 Réalisation d'un serveur	64
III.7 CONCLUSION	65
IV TESTS DE VALIDATION ET ANALYSE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES	66
IV.1 INTRODUCTION	67
IV.2 MÉTHODOLOGIE DU PROJET	67
IV.3 MQTT	67
IV.3.1 Configuration Raspberry Pi avec Mosquitto	68
IV.3.2 Résultats	68
IV.4 NODE-RED	69
IV.4.1 Configurations sur Raspberry Pi	69
IV.4.2 Résultats	70
IV.5 GRAFANA	71
IV.5.1 Configuration de Influx-db	71
IV.5.2 Dashbord	71
IV.5.3 Résultats du système	72
IV.5.4 Interprétations des Résultats	74

IV.6 CONCLUSION	74
CONCLUSION GÉNÉRALE	75
BIBLIOGRAPHIE	81
ANNEXE A : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES PANNEAUX SOLAIRES ET DES MICRO-ONDULEUS	1
ANNEXE B : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES PRINCIPAUX COMPO- SANTS UTILISÉES	2
ANNEXE C : CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES	5

TABLE DES FIGURES

I.1	Système solaire photovoltaïque [77]	5
I.2	Principe de la conversion photovoltaïque [72].	6
I.3	Chaîne de la conversion photovoltaïque.	7
I.4	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [40].	7
I.5	Types des technologies photovoltaïque.	8
I.6	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[72].	9
I.7	Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque [72].	10
I.8	Composition d'un panneau photovoltaïque [27]	11
I.9	Courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque change en fonction de l'ensoleillement[27].	12
I.10	Présentation du point maximale [53].	12
I.11	Système photovoltaïque autonome en site isolé	15
I.12	Différents types des systèmes photovoltaïques autonomes [72].	15
I.13	Installation photovoltaïques raccordées au réseau [72].	16
I.14	Raccordement des onduleurs centralisées.	17
I.15	Raccordement de micro-onduleur .	17
I.16	Principe de l'autoconsommation photovoltaïque [13].	18
I.17	Installation photovoltaïque avec auto-consommation direct [11].	19
I.18	Installation photovoltaïque avec revente [11].	20
I.19	Installation photovoltaïque avec stockage batterie [11]	20
II.1	Localisation du laboratoires LAT	23
II.2	Panneaux photovoltaïques	24
II.3	Panneaux photovoltaïques + micro onduleur	24
II.4	Routeur photovoltaïque Arsun.	26
II.5	Routeur Shelly EM	26
II.6	Routeur Linky	26
II.7	Schéma fonctionnel du système proposé	28
II.8	broches la carte ESP32 WROOM	30
II.9	Capteur JSY-MK-194T	35
II.10	Principe de mesure avec le capteur JSY-MK-194T	36
II.11	Circuit de branchement à l'ESP32	36
II.12	Module gradateur AC Robotdyn	37
II.13	Dissipateur thermique	38
II.14	Alimentation	39
II.15	Valeur de tension affichée dans le voltmètre	39
II.16	Valeur de courant affichée dans l'ampèremètre	39

II.17 Charge resistive	40
II.18 Réalisation pratique	40
II.19 Routeur photovoltaïque	41
II.20 Routeur connecter avec des charges supplémentaire	41
III.1 Logo logiciel Arduino IDE [15]	44
III.2 Interface Arduino [19].	45
III.3 Configuration de l'IDE avec la carte ESP32	45
III.4 Périphériques d'nterfaçage avec Wi-Fi [41].	48
III.5 Résultats du code programmé sur Arduino.	48
III.6 Résultats des données sur page Web 25 %.	49
III.7 Puissance active et apparent avec une charge de 25 %.	49
III.8 Résultats des données sur page Web avec charge de 40 %.	49
III.9 Puissance active et apparent avec une charge jusqu'à 40 %.	50
III.10Résultats des données sur page Web avec panneaux photovoltaïque.	50
III.11Puissance active et apparent maison avec PV.	50
III.12Puissance active et apparent second sonde avec PV.	51
III.13La maximum de triac avec PV.	51
III.14ThingSpeak [36]	52
III.15Application Blynk.	53
III.16Création compte sur ThingSpeak [36].	54
III.17Création d'une chaîne sur ThingSpeak	54
III.18Extraire API Key	54
III.19L'interface du chaîne complet sous ThingSpeak	54
III.20Résultats courant et tension avec différents charges jusqu'à 25 %.	55
III.21Résultats puissance et facteur de puissance avec différents charges jusqu'à 25 %.	55
III.22Résultats courant et tension avec différents charges jusqu'à 40 %.	56
III.23Résultats puissance et facteur de puissance avec différents charges jusqu'à 40 %.	56
III.24Résultats courant et tension de triac avec PV.	57
III.25Résultats courant et tension de maison avec PV.	57
III.26Résultats puissance soutirré de maison et triac avec PV.	57
III.27Facteur de puissance maison et triac avec PV.	58
III.28Logo Mosquito [4].	59
III.29Exemple d'une configuration Publisher/Subscriber utilisant Mosquitto [3]	59
III.30Logo Node-RED [34].	60
III.31Logo influxDb [25].	61
III.32Logo Grafana [39].	62
III.33Raspberry Pi.	63
IV.1 Création d'un serveur avec notre boîtier	67
IV.2 Configuration paramètres noeud mqtt sur la RaspberryPi.	68
IV.3 Résultats code MQTT sur le moniteur de l'IDE	68
IV.4 Installation de node-red sur la Raspberry Pi	69

IV.5 Schéma du système sur Node-Red	69
IV.6 Configuration Node-Red	70
IV.7 Interface Node-red avec broker MQTT.	70
IV.8 Résultats obtenus sur Node-red	70
IV.9 Configuration Influx-db.	71
IV.10Tableau de bord Grafana	72
IV.11Tension efficace.	72
IV.12Courant efficace.	73
IV.13Puissance Soutirée et injectée.	73
IV.14Facteur de puissance.	73

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans cette thèse sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Indices et exposants

Symbole	Signification
G_i	Source de courant parfaite
R_{sh}	Résistance shunt
R_{se}	Résistance série
D	Diode
R_{ch}	Résistance de cellule
I_{sc}	Courant de court circuit
V_{oc}	Tension en circuit ouvert
I_{pv}	Le courant de la cellule
V_{pv}	La tension de la cellule
I_{ph}	Le photo-courant d'une cellule
V_{ppm}	La tension optimale
I_{ppm}	Le courant optimale
P_{max}	Point de puissance maximale
A_{pv}	Surface effective des cellules

Constantes

Nom	Symbole	Valeur	Unité
Constante de Boltzmann	K	$1.38 * 10^{-23}$	J/K
Charge de l'électron	e	$1.6 * 10^{-19}$	/

Grandeurs électriques et mécaniques

Nom	Symbole	Unité
Temps	t	s
Tension	U	V
Courant	I	A
Puissance active	P_W	W
Puissance apparente	P_{VA}	VA
Flux magnétique	ϕ	Wb
Induction magnétique	B	T
Facteur de puissance	$\cos \varphi$	/
Fréquence	f	Hz
Angle (position)	θ	°, rad

Paramètres

Nom	Symbole	Unité
Impédance	Z	Ω
Réactance	X	Ω
Résistance	R	Ω
Inductance	L	H

Glossaire

Acronyme	Signification
GPV	Générateur Photovoltaïque
PV	Modules photovoltaïque
CS	Convertisseur statique
DC	Direct Current (Courant Continue
AC	Alternative Current (Courant Alternatif)
ADC	Convertisseur Analogique-Numérique
DAC	Convertisseur Numérique-Analogique
F.e.m	Force électromotrice
FF	Facteur de forme
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Standard Test Conditions
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
IDE	Interactive Developement Environnement
I2C	Inter-Integrated Circuit
I2S	Inter-IC Sound
SPI	Serial Peripheral Interface
SCL / SDA	Serial Clock / Serial Data
SOC	Système sur Puce (System on Chip)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
TCP/ IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
SAR	Successive Approximation Register
GPIO	General purpose input output
IOT	Internet des objets (Internet of things)
M2M	machine to machine
E/S	Entrée/Sortie
NOOBS	New Out Of the Box Software
SRAM	Static Random-Access Memory (Mémoire Vive Statique)
BLE	Bluetooth Low Energy (Bluetooth Basse Consommation)
RMS	Root Mean Square
ZC	Zero Crossing

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque connaît un essor important ces dernières années, en raison de ses nombreux avantages économiques et environnementaux. Cette technologie permet de produire une électricité propre et renouvelable, en convertissant directement le rayonnement solaire en courant électrique grâce à des cellules photovoltaïques.

L'un des principaux bénéfices de l'énergie solaire est de permettre une plus grande autonomie énergétique, en s'affranchissant partiellement ou totalement du réseau électrique traditionnel. Cela présente des avantages financiers non négligeables, avec une réduction de la facture d'électricité, et une indépendance vis-à-vis des fluctuations des prix de l'énergie.

L'autoconsommation et l'énergie solaire sont des éléments clés dans la transition vers un système énergétique plus durable et plus respectueux de l'environnement. Dans le contexte de l'énergie solaire, l'autoconsommation fait référence à la capacité d'utiliser directement l'électricité générée par des panneaux photovoltaïques pour répondre aux besoins énergétiques d'une maison ou d'une entreprise, tout en nécessitant un système de gestion efficace pour optimiser son utilisation et maximiser l'autoconsommation, les routeurs solaires entrent en scène, offrant une gestion intelligente et efficace de l'énergie solaire.

L'utilisation de routeurs solaires intelligents, basés sur des microcontrôleurs comme l'ESP32, permet de gérer de manière optimisée l'autoconsommation. Ces dispositifs collectent les données de production et de consommation, et pilotent les charges électriques en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire. Tout cela est réalisé en temps réel, avec une surveillance continue et une analyse approfondie des données.

Les routeurs solaires basés sur la technologie IoT (internet of things) offrent la possibilité d'intégrer des fonctionnalités avancées concernant la surveillance en temps réel, la gestion à distance et la connectivité avec d'autres appareils intelligents depuis n'importe où, via un ordinateur, une tablette ou un smartphone.

L'objectif principal de ce projet est de réaliser un routeur solaire pour assurer une surveillance intelligente des systèmes photovoltaïques, en intégrant un mode de fonctionnement en autoconsommation de l'énergie électrique produite par une installation domestique. Cela implique la conception de réaliser un routeur solaire connecté, basé sur la technologie IoT (Internet of Things), destiné à l'acquisition des données électriques caractéristiques d'une centrale solaire de faible puissance. La transmission des données électriques sera assurée via une connexion Wi-Fi utilisant le module ESP32 et la carte hôte Raspberry Pi, ce qui permettra d'activer un serveur intégrant la base de données temporaire. Toutes les informations collectées par le système de d'acquisition peuvent être disponibles sur une page web, accessible via une tablette ou un smartphone.

La structure de ce mémoire est constituer de quatre chapitre, et organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, comprend une généralité sur l'énergie solaire, qui décrit les différents types de cellules photovoltaïque, la classification des systèmes photovoltaïques en fonction de leur rendement, de leurs applications et de leur architecture.ferons une comparaison entre les onduleurs centralisés et les micro-onduleurs, et déterminerons le meilleur choix entre ces deux technologies pour réaliser notre projet. Enfin, nous allons définir ce qu'est l'autoconsommation d'énergie photovoltaïque et ses différents types, en mettant en évidence ses avantages.

Le chapitre deux contient la présentations d'un microcontrôleur ESP32 dans le concept de la réalisation matérielle d'un routeur solaire afin de faire une discription de cette carte de développement, la présentation des autres composants de notre cahier des charges et en fin le montage électrique général du routeur.

Le troisième chapitre s'intéressera aux Aspects importants de l'intégration de l'IOT dans les systèmes d'énergie solNous aborderons la conception logicielle, l'interfaçage avec une plateforme Web et un service en ligne Thingspeak, ainsi que l'utilisation d'outils logiciels (MQTT-Mosquito, Node-Red, InfluxDB et Grafana) pour optimiser la gestion de l'énergie solaire. Ce chapitre met en lumière l'importance de la technologie IOT dans la création de solutions durables et efficaces pour l'autoconsommation d'énergie renouvelable.

Le quatrième chapitre et le dernier, basé sur l'utilisation d'InfluxDB et Grafana (dashboard) pour l'interfaçage, la surveillance et la visualisation des données du notre projet de Routeur Solaire. nous permettra de stocker et de représenter graphiquement ces mesures en temps réel.

La dernière partie sera clôturée par une conclusion générale, ainsi que par des suggestions et quelques perspectives pour les travaux de recherches futurs dans ce domaine.

Chapitre I

Technologie des systèmes énergétiques photovoltaïques

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	4
I.2	ETAT DE L'ART DES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES	4
I.2.1	Energie solaire	5
I.3	CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE	6
I.3.1	Cellule photovoltaïque	7
I.3.2	Modèles électriques équivalents	9
I.3.3	Panneau photovoltaïque	11
I.3.4	Caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques	11
I.3.5	Fonction MPPT	12
I.4	CLASSIFICATION DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE	14
I.4.1	Rendement des systèmes photovoltaïques	14
I.4.2	Systèmes PV par site isolé ou autonome	15
I.4.3	Systèmes PV raccordées au réseau	16
I.5	ONDULEURS CENTRALISÉES ET MICRO-ONDULEURS	17
I.5.1	Onduleurs centralisées	17
I.5.2	Micro-onduleurs	17
I.5.3	Différence entre onduleurs et micro-onduleurs	18
I.6	AUTOCONSOMMATION ÉNERGÉTIQUES	18
I.6.1	Définition d'autoconsommation photovoltaïque	18
I.6.2	Différent types d'autoconsommation	19
I.6.3	Avantages d'autoconsommation	21
I.7	CONCLUSION	21

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque, issue de la conversion directe de la lumière du soleil en électricité, représente l'une des sources d'énergie les plus prometteuses et durables. Les systèmes énergétiques photovoltaïques exploitent l'effet photovoltaïque, découvert au 19^{ème} siècle, dans lequel certains matériaux génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. L'un des éléments clés des systèmes photovoltaïques est la cellule solaire, l'unité de base qui convertit la lumière en électricité. Ces cellules sont généralement fabriquées à partir de semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière solaire frappe la cellule, elle excite les électrons dans le matériau, créant ainsi un courant électrique.

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages, notamment son caractère renouvelable, sa réduction des émissions de gaz à effet de serre et son potentiel pour fournir de l'électricité dans des régions éloignées. Cependant, certains défis persistent, tels que le coût initial élevé des installations et la nécessité de solutions de stockage de l'énergie pour compenser l'intermittence de la production solaire.

I.2 Etat de l'art des technologies photovoltaïques

Le processus de la technologie photovoltaïque tourne autour de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Le composant actif de cette technologie est constitué des cellules photovoltaïques, généralement construites à partir de silicium cristallin. Le silicium cristallin constitue la base des technologies solaires les plus largement utilisées, notamment les technologies multi cristallines et monocristallines. Néanmoins, des technologies alternatives telles que les couches minces CIS et CdTe émergent également. Ces technologies innovantes permettent aux cellules d'absorber l'énergie lumineuse et de la convertir en énergie électrique en manipulant les charges positives et négatives.

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, et appliqué par Albert Einstein en **1905** (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de physique en **1921**) [5].

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs [64].

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites. conversion, appelée effet photovoltaïque [77].

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace [77].

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware [64] .

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [77].

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. La production de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013. Concernant l'Algérie, le groupe algérien Condor Electronics, s'est lancé en juillet 2013 dans la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W et à des prix compétitifs [72].

Dans le cadre de la concrétisation du programme national algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque a été lancé, faisant partie du programme complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux et dans la région du sud-ouest ; ainsi que dans la région du grand sud. Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à 2030 est de 12 000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. La puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde a atteint 138,9 GW à la fin 2013 [72] .

I.2.1 Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie tirée du soleil. Il est à l'origine de nombreux phénomènes physiques tels que la photosynthèse, le vent et le cycle de l'eau. Cette énergie provient de la fusion nucléaire qui a lieu au coeur du soleil. Il voyage dans l'espace sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est constitué de photons et de petites particules d'énergie primaire L'énergie solaire est utilisée pour produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques, et son utilisation n'engendre aucune pollution [54] .

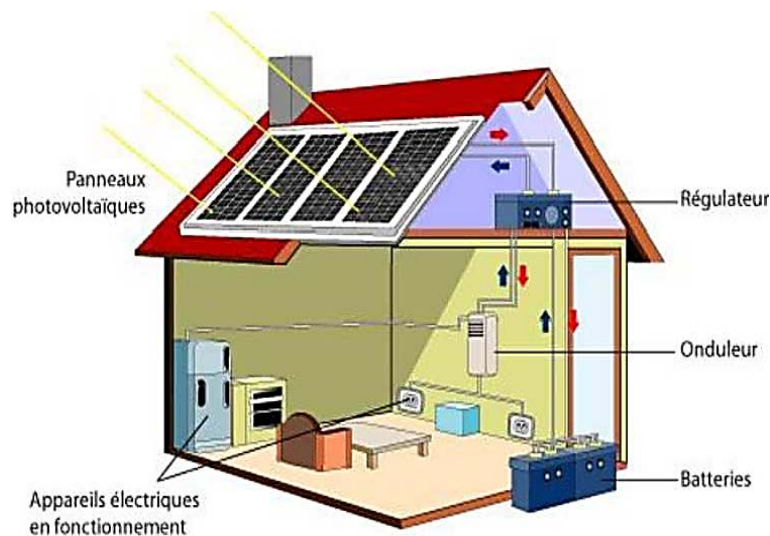


FIGURE I.1 – Système solaire photovoltaïque [77]

Elle est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire [77].

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [77].

I.3 Conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement [72].

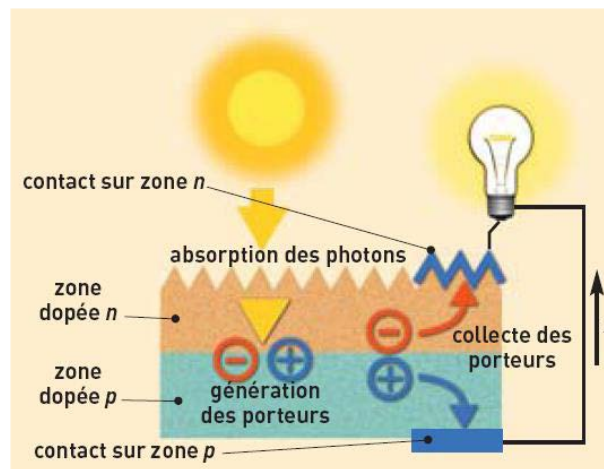


FIGURE I.2 – Principe de la conversion photovoltaïque [72].

La conversion photovoltaïque est le processus par lequel l'énergie lumineuse est transformée en énergie électrique à l'aide de cellules photovoltaïques. Voici un aperçu des principes et des processus impliqués dans la conversion photovoltaïque [33] :

- La conversion photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque, qui consiste à transformer le rayonnement solaire en électricité grâce à des cellules solaires composées de semi-conducteurs, généralement du silicium.
- Lorsque les photons de la lumière solaire interagissent avec les cellules photovoltaïques, ils transfèrent leur énergie aux électrons, créant ainsi un courant électrique.

- Les photons pénètrent dans le matériau semi-conducteur des cellules photovoltaïques et transmettent leur énergie aux électrons, provoquant leur libération et la création d'une paire électron-trou. Cette séparation des charges crée une différence de potentiel entre les couches positives et négatives des cellules, générant ainsi un courant électrique.
- La technologie photovoltaïque est en constante évolution pour améliorer le rendement, la durabilité et la rentabilité des installations solaires.

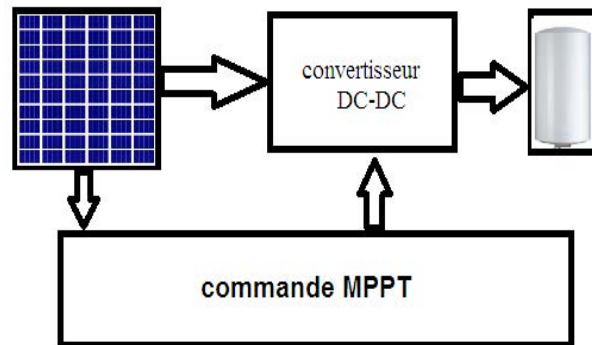


FIGURE I.3 – Chaîne de la conversion photovoltaïque.

I.3.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif en matériau semi-conducteur qui capte l'énergie lumineuse et la transforme en courant électrique directement. Les matériaux semi-conducteurs captent les radiations ultraviolettes. Ainsi, la sélection des matériaux pour la fabrication des cellules photovoltaïques repose sur certaines de leurs caractéristiques physiques, telles que l'électricité excitée par des photons spectraux, et la lumière solaire ne dépend pas de leur longueur d'onde respective. Une fois que ces frais seront libérés, ils seront transmis à travers les matériaux, ce qui génère généralement du courant continu (DC). Les cellules photovoltaïques jouent un rôle crucial dans la production d'électricité à

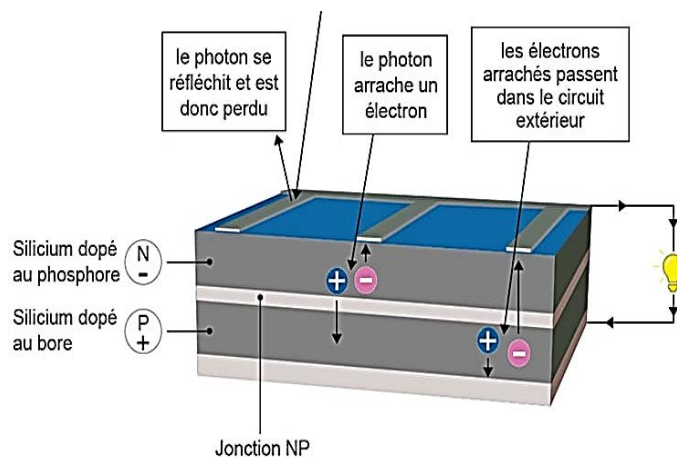


FIGURE I.4 – Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [40].

partir de l'énergie solaire, offrant une solution durable et efficace pour répondre aux besoins énergétiques tout en contribuant à la transition vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables.

Il existe trois principales catégories des cellules photovoltaïque en silicium (I.5) : mono cristallin, poly cristallin et amorphe [52] :

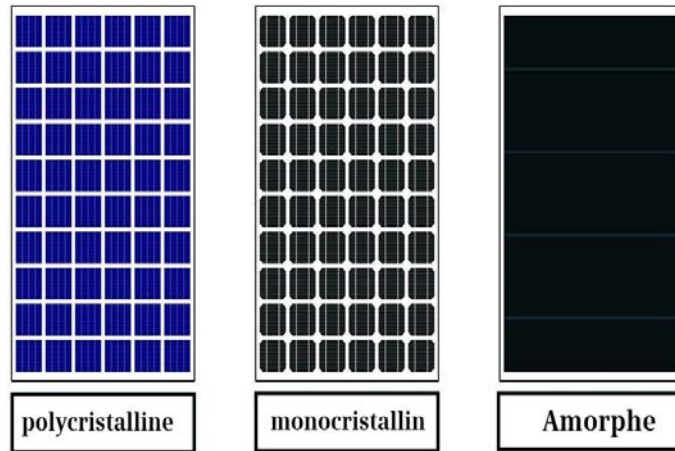


FIGURE I.5 – Types des technologies photovoltaïque.

1. Monocristallines :

Pour de telles applications techniques, le silicium pur est obtenu à partir de quartz ou de silice par transformation chimique métallurgique. Le silicium cristallin a environ deux fois l'efficacité électrique et la durée de vie du silicium amorphe, mais il est beaucoup plus cher. Le silicium monocristallin est constitué de silicium dans lequel le réseau cristallin du solide entier est continu. Cette structure cristalline ne se brise pas sur ses bords et est exempte de toute limite de grain.

2. Polycristallines :

Le silicium polycristallin ou polysilicium est un matériau en verre de silicium mal aligné (polycristallin), il occupe une position intermédiaire entre le silicium amorphe, dans lequel il n'y a pas d'ordre à longue portée, et le silicium monocristallin. Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins cher que le monocristal. Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.

3. Amorphes :

Une cellule solaire à film mince est une seconde génération de cellules solaires qui consiste à déposer une ou plusieurs couches minces, ou un film mince (TF) de matériau photovoltaïque sur un substrat, tel que le verre, le plastique ou le métal. La capacité du silicium amorphe à absorber le rayonnement solaire est 100 fois supérieur à celle de l'absorption cristalline. Les cellules sont composées de couches très fines. Ainsi, l'épaisseur du film varie de quelques nanomètres (nm) à plusieurs dizaines de micromètres μm . Ce type est utilisé dans la construction de systèmes photovoltaïques intégrés. D'autres applications commerciales utilisent des panneaux solaires à couche mince rigides (intercalés entre deux panneaux de verre) dans certaines des plus grandes installations photovoltaïques du monde .

I.3.2 Modèles électriques équivalents

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent figure(I.6) par deux résistances[72].

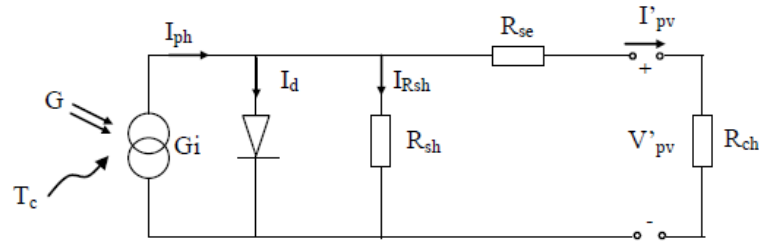


FIGURE I.6 – Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[72] .

Avec :

G_i : Source de courant parfaite.

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites.

R_{se} : Résistance série.

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

R_{ch} : Résistance de charge .

En se basant sur le circuit, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V_{pv} + R_{se}I_{pv})}{aKT} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_{se}I_{pv})}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

Dans cette équation, I_{ph} est le photo-courant d'une cellule, I_0 est le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, q , a , K et T désignent respectivement la charge de l'électron, facteur d'idéalité de la diode, Constante de Boltzmann et la température de la cellule, V_{pv} est la tension aux bornes de la cellule, I_{pv} est le courant de la cellule, R_{se} et R_{sh} sont les résistances série et shunt de la cellule[69] .

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants [72] :

- **Courant de court circuit** (I_{sc}) : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V'_{pv}=0$).
- **Tension en circuit ouvert** (V_{oc}) : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_d=I_{ph}$) quand ($I'_{pv}=0$). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{mKT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (I.2)$$

Où :

$$V_t = \frac{mkT_c}{e} \quad (I.3)$$

Avec :

V_t : La tension thermique.

T_c : La température absolue.

m : Facteur idéal de la jonction.

K : Constante de Boltzmann.

e : Charge de l'électron.

Et :

$$K = 1.38 * 10^{-23} J/K, e = 1.6 * 10^{-19} \quad (I.4)$$

- **Point de puissance maximale** (P_{max}) : est le point M(V_{PPM} , I_{PPM}) de la figure précédent où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_{max} = V_{PPM} I_{PPM} \quad (I.5)$$

Avec :

V_{PPM} : La tension au point de puissance maximale.

I_{PPM} : Le courant au point de puissance maximale.

- **Rendement maximum** : est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{PPM} \cdot I_{PPM}}{A_{pv} \cdot G} \quad (I.6)$$

Où :

G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

A_{pv} : Surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1000 W/m^2$ d'une température ambiante de $25^\circ C$ et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées **STC** (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort [72].

La figure (I.7) présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise.

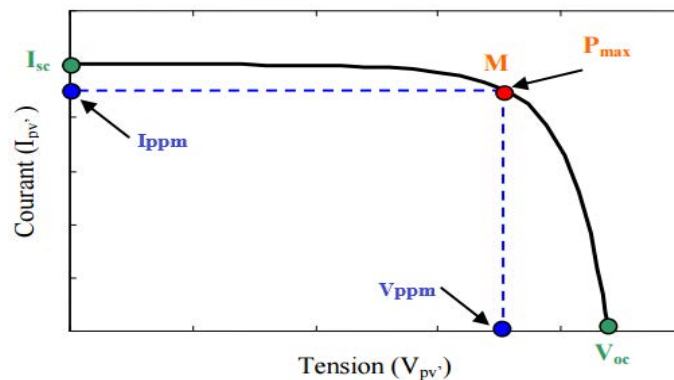


FIGURE I.7 – Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque [72].

I.3.3 Panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est constitué d'une série de cellules photovoltaïques, formées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N). C'est une jonction PN. Lorsqu'un électron est arraché, il se forme à la place un « trou », se comportant comme une charge positive. Ces cellules photovoltaïques, généralement en silicium, qui convertit la lumière du soleil en électricité. Ces cellules ont la capacité de transformer directement la lumière en électricité grâce à l'effet photoélectrique. En somme, un panneau photovoltaïque est un moyen de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire en captant les photons de la lumière du soleil et les convertissant en courant électrique utilisable [10, 14].

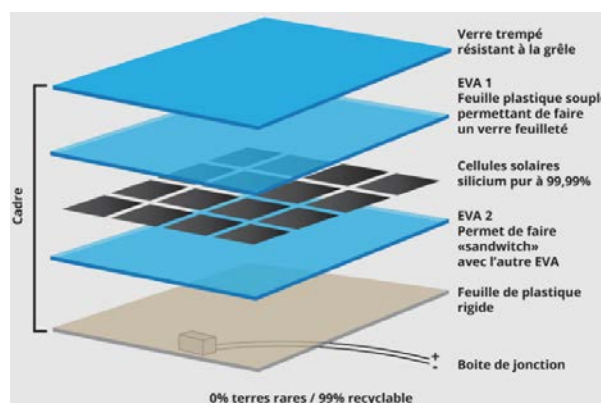


FIGURE I.8 – Composition d'un panneau photovoltaïque [27]

I.3.4 Caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques

Les panneaux solaires photovoltaïques présentent différentes caractéristiques électriques essentielles pour évaluer leur performance et leur efficacité. Voici un résumé des principales caractéristiques des panneaux solaires :

- **Puissance** : La puissance d'un panneau photovoltaïque, exprimée en watt-crête (Wc) ou kilowatt-crête (kWc), indique sa capacité de production d'énergie électrique dans des conditions idéales [12].
- **Tension** : La tension électrique des panneaux solaires comprend la tension nominale, la tension de sortie et la tension en puissance maximale. La tension de sortie (V_{oc}) est la tension du panneau déconnecté, la tension nominale indique quelle batterie ou installation ils peuvent alimenter, et la tension de puissance maximale est la tension réelle de sortie [30].
- **Rendement** : Le rendement en % vous donne une indication sur la performance intrinsèque des cellules utilisées pour fabriquer le panneau photovoltaïque. Le rendement est en fait la résultante des 2 données précédentes. En effet c'est le rapport entre la puissance et la surface du panneau, divisé par 10, exprimé en % [27].
- **Poids** : Le poids vous sera utile pour vérifier si la structure sur laquelle va reposer l'installation (la charpente pour une toiture par exemple) pourra supporter le poids de l'ensemble. Pour une même typologie de panneau, le poids $/(m^2)$ varie peu d'un modèle à un autre [27].

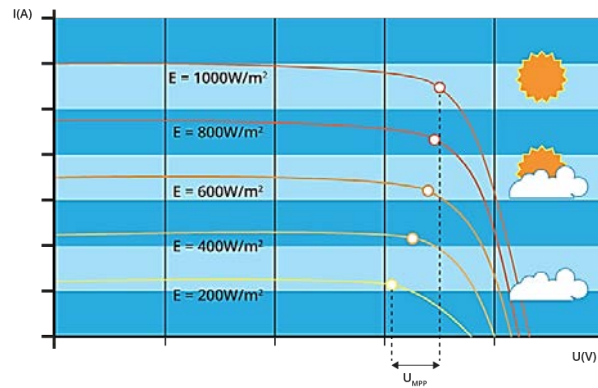


FIGURE I.9 – Courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque change en fonction de l'ensoleillement[27].

I.3.5 Fonction MPPT

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïque. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 dates de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application[49].

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [53].

La caractéristique de la cellule solaire $I-V$ n'est pas linéaire et varie en fonction de l'éclairement et la température. Il y a un point sur la courbe $P-V$, $I-V$ on appelle le point de puissance maximale ce point n'est pas connu, mais peut être calculé [53].

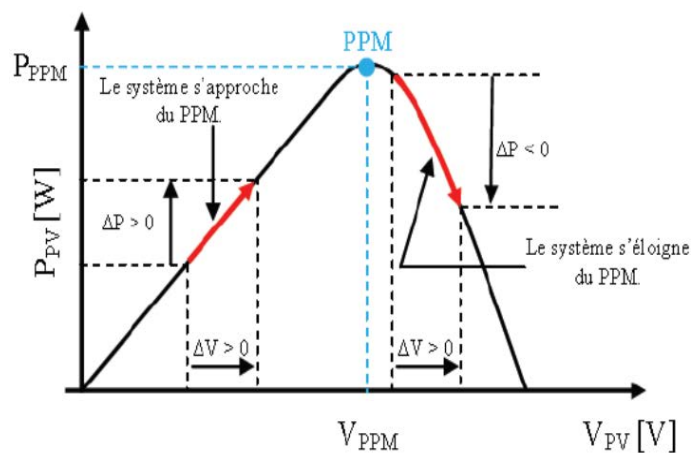


FIGURE I.10 – Présentation du point maximale [53].

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM. La puissance effectivement P délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{MPPT} , permet de mesurer l'efficacité de la commande. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire [53].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{MAX}} \quad (I.7)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre η_{MPPT} . D'autres critères, présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande [53].

- **Simplicité et coût**

Complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.

- **Réponse dynamique**

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.

- **Flexibilité**

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau.

- **Compétitive sur une large gamme de puissance**

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

I.4 Classification des systèmes photovoltaïque

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes connectés à un réseau et les systèmes hybrides. Dans la suite, nous allons présenter plus particulièrement les fonctions et les topologies des deux premiers[72].

I.4.1 Rendement des systèmes photovoltaïques

Le rendement d'un panneau solaire correspond à la quantité d'énergie lumineuse transformée en électricité par rapport à la quantité d'énergie qui est entrée dans le système. Il s'exprime en pourcentage.[38]

Plus le rendement d'une installation est élevé, plus le projet photovoltaïque est rentable. En effet, cela signifie que les déperditions sont moindres et que vous allez produire davantage d'électricité pour une même quantité de soleil emmagasinée[38].

En règle générale, les panneaux solaires ont un rendement de 15 à 22 %, ce qui signifie qu'ils peuvent convertir 15 à 22 % de l'énergie solaire entrante en électricité utilisable. Cependant, l'efficacité globale du système photovoltaïque peut être inférieure en raison des pertes dues à la conversion DC-AC, à la chaleur, à l'ombrage, aux pertes de câblage, etc [32].

Le rendement d'un système photovoltaïque peut être décomposé en plusieurs composantes, chacune contribuant à l'efficacité globale du système. Voici une ventilation de ces composantes [73, 6] :

1. Rendement des panneaux solaires : C'est la capacité des panneaux solaires à convertir la lumière solaire en électricité. Les panneaux solaires modernes ont généralement un rendement compris entre 15% et 22%, bien que certains modèles puissent avoir des rendements plus élevés.
2. Rendement de l'onduleur : L'électricité produite par les panneaux solaires est généralement en courant continu (CC), tandis que la plupart des équipements électriques fonctionnent avec du courant alternatif (CA). Le rendement de l'onduleur représente l'efficacité de cette conversion et peut varier en fonction du type d'onduleur utilisé. Les onduleurs modernes ont souvent un rendement supérieur à 95%.
3. Rendement de l'installation : Le rendement de l'installation fait référence à la manière dont les panneaux solaires sont installés et exploités pour maximiser la capture de l'énergie solaire. Cela comprend des facteurs tels que l'orientation des panneaux par rapport au soleil, l'inclinaison des panneaux, l'ombrage, la propreté des panneaux, etc.
4. Pertes électriques : Il y a souvent des pertes électriques associées au système photovoltaïque, notamment des pertes de câblage, des pertes dans les connexions, des pertes de conversion, etc. Ces pertes peuvent réduire légèrement le rendement global du système.

I.4.2 Systèmes PV par site isolé ou autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Ces systèmes se composent de quatre éléments principaux[59] :

- Des panneaux solaires, dont le rôle est de fournir de l'énergie à la charge et à la batterie.
- Les batteries, dont le rôle est de stocker l'énergie et de la récupérer lorsque l'ensoleillement est insuffisant.
- Un régulateur dont le rôle est de réguler la charge et la décharge de la batterie.
- Onduleur, dont le rôle est d'assurer la conversion (DC-AC). Il permet à l'alimentation AC d'être fournie à partir du DC au récepteur.

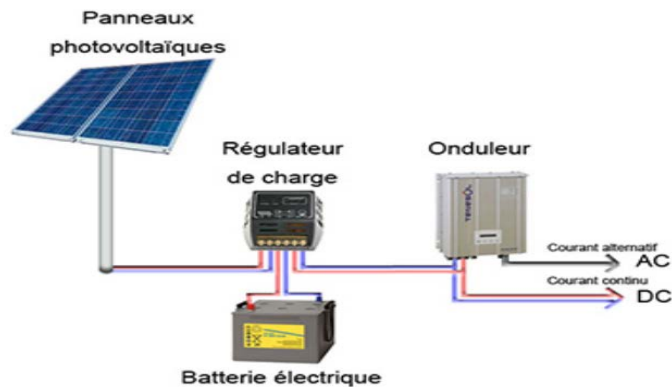


FIGURE I.11 – Système photovoltaïque autonome en site isolé

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I.12) qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique [72].

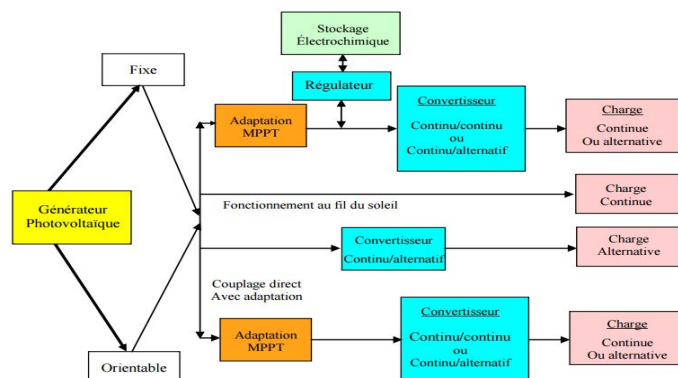


FIGURE I.12 – Différents types des systèmes photovoltaïques autonomes [72].

I.4.3 Systèmes PV raccordées au réseau

Les systèmes raccordés au réseau est un résultant de la tendance à la décentralisation des réseaux électriques. Générer de l'énergie Plus près du lieu de consommation, il produit sa propre électricité et injecte son excédent d'énergie dans le réseau, qui Fournissant selon les besoins, ces transferts éliminent lâchat et la maintenance des batteries. Dans ce type d'installation, le réseau électrique national devient un réservoir infini de stockage dans lequel l'énergie provenant de sources renouvelables est injectée lorsque l'installation produit et que l'utilisateur ne consomme pas et depuis lequel l'électricité est prélevée au moment du besoin, lorsque l'installation ne produit pas (la nuit) [21].

Se compose de plusieurs éléments : Panneau solaire, onduleur, compteur de production et un compteur d'échange.

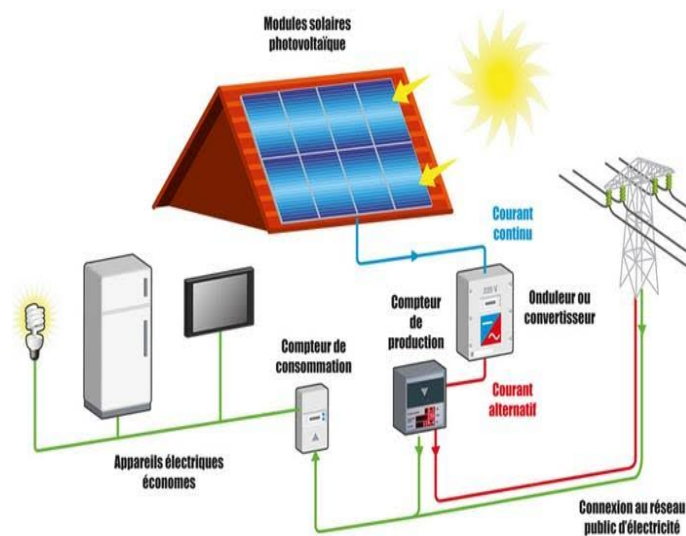


FIGURE I.13 – Installation photovoltaïques raccordées au réseau [72].

Cette installation fonctionne selon la logique suivante[21] :

- Le rayonnement solaire atteint le générateur photovoltaïque.
- L'onduleur transforme l'énergie continue en énergie alternative.
- L'énergie produite est utilisée instantanément si l'utilisateur en a besoin ou si elle est injectée en réseau, d'où l'énergie est également prélevée si nécessaire.
- Dans ce système, le compteur de production comptera l'énergie produite et consommée directement par l'utilisateur, tandis que le compteur d'échange comptera l'énergie consommée par l'utilisateur prélevée sur le réseau.

I.5 Onduleurs centralisées et micro-onduleurs

Les onduleurs centralisés et les micro-onduleurs sont des technologies différentes qui convertissent l'énergie continue générée par les panneaux photovoltaïques en énergie alternative conçue pour répondre aux besoins énergétiques. Ci-dessous, Nous verrons de près les avantages, les inconvénients et les aspects techniques de ces deux technologies.

I.5.1 Onduleurs centralisées

L'onduleur centralisé est un dispositif utilisé comme interface entre plusieurs nombre de modules photovoltaïques (PV) et le réseau. Les modules photovoltaïques sont divisés en branches de connexion série (en Chaine). Chaque connexion série génère un niveau assez élevé de tension. Ces branches de connexion série des modules photovoltaïques (PV) sont connectés en parallèle pour atteindre des niveaux élevés du courant et des puissances qui peuvent être de 10kW- 750kW [67].

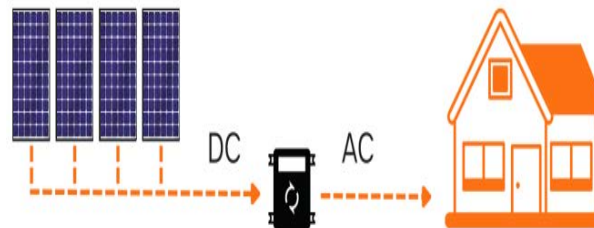


FIGURE I.14 – Raccordement des onduleurs centralisées.

I.5.2 Micro-onduleurs

Le micro-onduleur est un convertisseur solaire qui s'adapte à des panneaux individuels. Il se connecte directement à l'arrière des panneaux photovoltaïques où chaque panneau solaire est indépendant de son propre onduleur pour optimiser la production d'énergie.

Les micro-onduleurs permettent une meilleure surveillance, une détection plus facile des problèmes et une durée de vie plus longue, généralement supérieure à 20 ans. Ils offrent également une production d'électricité plus stable, Même en cas d'ombre sur un panneau ou de défaillance ponctuelle dysfonctionnement est moins impactant [31, 29].

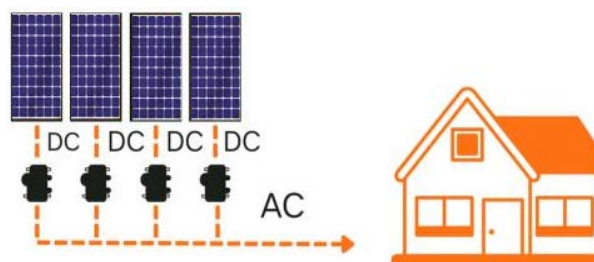


FIGURE I.15 – Raccordement de micro-onduleur .

I.5.3 Différence entre onduleurs et micro-onduleurs

Les micro-onduleurs se connectent individuellement à chaque panneau solaire, ce type de connexion est plus coûteux. Cependant, cela garantit de meilleures performances dans le temps avec une durée de vie comprise entre 20 et 25 ans. De plus, chaque panneau a une optimisation différenciée puisqu'ils ne sont pas dépendants les uns des autres [18, 26] .

Les micro-onduleurs présentent également des avantages du point de vue de la sécurité. Comme ils sont plus petits que les onduleurs centraux, ils stockent moins de tension. Cela élimine le risque d'arc électrique ou d'incendie. Ainsi que Grâce à une box de gestion, L'évolution de la production d'électricité peut être suivie simplement et plus rapide pendant le fonctionnement (Surveillance en temps réel) [26].

L'onduleur centralisé, quant à lui, est un dispositif unique qui gère l'ensemble des panneaux solaires d'une installation en série. Le coût est faible et la durée de vie moyenne est de 10 ans. Cependant, En cas de défaillance d'un panneau, toute l'installation cesse de produire de l'électricité, ce qui peut rendre la recherche de pannes plus complexe et peut entraîner l'arrêt de la production dans l'ensemble d'installation [18] .

En résumé, les onduleurs centraux sont plus économiques à l'achat mais moins performants en termes de durabilité et de gestion des pannes individuelles, tandis que les micro-onduleurs offrent une production d'électricité plus stable, une meilleure surveillance, et une durée de vie plus longue, bien que leur coût initial soit plus élevé.

I.6 Autoconsommation énergétique

L'autoconsommation énergétique consiste la production et la consommation directe des particuliers de leurs propre énergie à partir de ce que nous offre la nature telles que le soleil, le vent et la chaleur. La réalisation peut se faire à l'aide de divers dispositifs comme les panneaux solaires, les éoliennes et d'autres sources d'énergie renouvelable. Cette solution permet de réduire leurs facture d'électricité en autoconsommant une partie de l'énergie produite et offrent une autonomie énergétique [65].

I.6.1 Définition d'autoconsommation photovoltaïque

L'autoconsommation photovoltaïque est le principe selon lequel un individu ou un groupe produit de l'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques et consomme cette électricité localement pour ses propres besoins énergétiques. Cette pratique permet de réduire la dépendance aux fournisseurs traditionnels d'électricité, favorise l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable et contribue à la transition vers une énergie plus propre et durable [66].

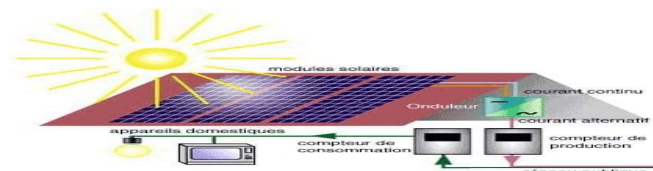


FIGURE I.16 – Principe de l'autoconsommation photovoltaïque [13].

I.6.2 Différent types d'autoconsommation

L'autoconsommation photovoltaïque est le fait de produire une partie de l'électricité à l'aide de panneaux solaires et de la consommer directement. Cette pratique permet aux consommateurs de réaliser des économies sur leur facture d'électricité et de réduire les flux d'énergie circulant sur le réseau électrique. Suivant l'utilisation que l'on veut en faire il existe plusieurs architectures matérielles qui sont au final différentes les unes des autres.

I.6.2-a Direct

L'autoconsommation directe est une forme d'autoconsommation qui consiste à consommer l'énergie produite par des panneaux photo-voltaïque instantanément. Dans ce cas l'électricité générée par les panneaux solaires n'est plus envoyée sur le réseau public pour avoir des revenus, mais est utilisée localement pour réduire la consommation d'électricité provenant du fournisseur public [48] .

Les installations d'autoconsommation directe peuvent être déployées dans les environnements résidentiels et commerciaux et sont habituellement constituées d'un ensemble de panneaux solaires, d'une batterie, d'un onduleur et d'un compteur pour mesurer la quantité de l'énergie consommée depuis le réseau [48].

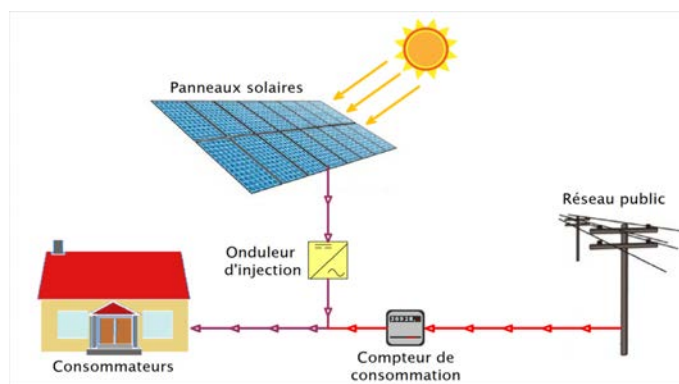


FIGURE I.17 – Installation photovoltaïque avec auto-consommation direct [11].

I.6.2-b Avec revente

L'autoconsommation avec revente consiste à produire de l'énergie électrique à partir de panneaux photovoltaïques pour répondre aux besoins de consommation et revendre l'excédent aux fournisseurs. Cette solution permet de réduire la facture d'électricité, de devenir un fournisseur en même temps et limité l'énergie excès injecté dans le réseau gratuitement.

L'autoconsommation avec revente vise à trouver un équilibre entre l'utilisation de l'énergie produite et la gestion optimale de l'excédent afin de maximiser les avantages économiques et environnementaux.

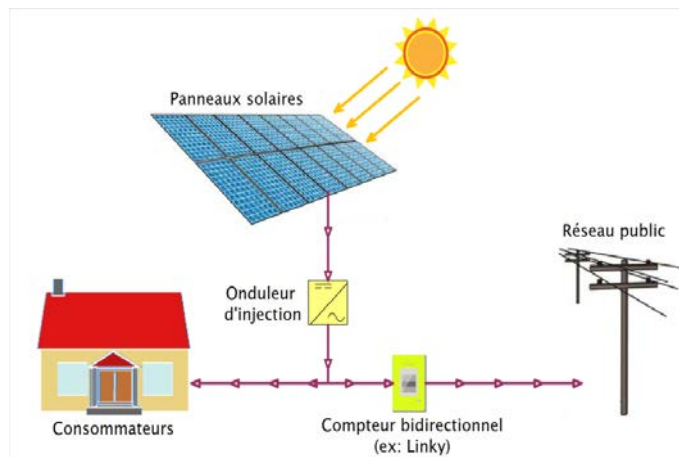


FIGURE I.18 – Installation photovoltaïque avec revente [11].

I.6.2-c Avec stockage

Toujours dans le principe de limitation d'injection gratuite du surplus dans le réseau. L'autoconsommation avec stockage est une solution qui permet aux consommateurs de produire leur propre énergie et stocker l'excès pour une utilisation ultérieure. Pour cela, cette solution n'est possible qu'avec une batterie de stockage. Cette installations offrent une solution énergétique durable et puissante, permettant d'avoir un taux d'autoconsommation élevé et garantissant un approvisionnement électrique continu en cas de coupure du réseau électrique [17].

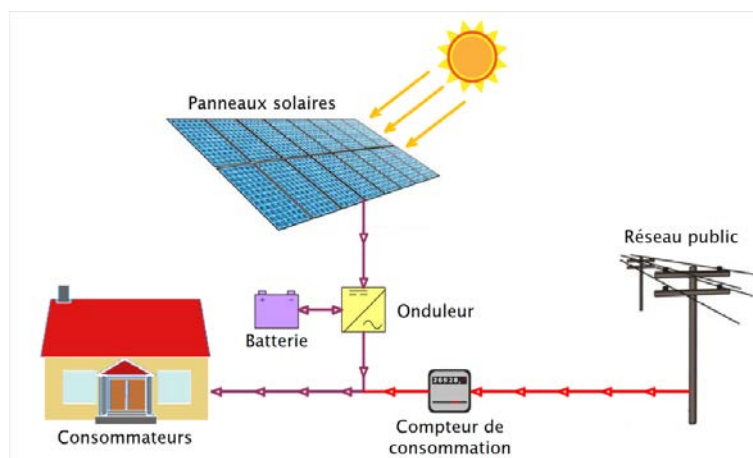


FIGURE I.19 – Installation photovoltaïque avec stockage batterie [11]

I.6.3 Avantages d'autoconsommation

- Réduction de la facture d'électricité : L'autoconsommation permet de produire de l'électricité pour couvrir une partie de ses besoins, réduisant ainsi la dépendance énergétique et allégeant la facture d'électricité.
- Autonomie énergétique : En produisant sa propre électricité, on gagne en autonomie vis-à-vis des fournisseurs d'énergie.
- Économies d'énergie : En utilisant l'électricité produite localement, on peut réaliser des économies significatives sur les factures d'énergie, tout en se protégeant contre les augmentations des tarifs électriques.
- Grâce à la source d'énergie inépuisable qu'est le soleil, nous avons la chance de pouvoir consommer une électricité propre.
- Valorisation de l'énergie produite en surplus : consiste à revendre l'électricité excédentaire, ce qui offre la possibilité d'obtenir des prix d'achat avantageux ou de la stocker pour une utilisation ultérieure selon le besoin.
- Garanties et durabilité : Les panneaux solaires bénéficient de garanties allant jusqu'à 25 ans, assurant une certaine pérennité et performance du système.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. L'étude des divers types de cellules photovoltaïques et de leurs équivalents met en évidence la diversité et la complexité de cette technologie. Nous avons ensuite examiné la classification des systèmes photovoltaïques en fonction de leur rendement, de leurs applications et de leur architecture. Une comparaison entre les onduleurs centralisés et les micro-onduleurs a été réalisée pour évaluer leur performance et leur efficacité énergétique, soulignant l'importance du choix de la technologie appropriée. Enfin, nous avons défini l'autoconsommation photovoltaïque et ses différents types, mettant en avant leurs avantages.

En conclusion, la technologie photovoltaïque offre un potentiel significatif pour répondre aux besoins énergétiques de la société tout en réduisant notre impact environnemental.

Chapitre II

Principe et réalisation matérielle du routeur photovoltaïque

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	23
II.2	PRÉSENTATION DU SITE	23
II.2.1	Présentation du site locaux de laboratoires	23
II.2.2	Présentation de la microcentrale PV existante	24
II.3	ROUTEUR PHOTOVOLTAÏQUE	25
II.3.1	Fonctionnalités d'un routeur photovoltaïque	25
II.3.2	Exemples de routeur photovoltaïque	25
II.3.3	Cahier des charges	27
II.3.4	Schéma fonctionnel du système proposé	28
II.4	MODULE DE DÉVELOPPEMENT ESP32	28
II.4.1	Déscription de la carte ESP32 WROOM	29
II.4.2	Caractéristiques techniques de la carte ESP32 WROOM	29
II.4.3	Broches la carte ESP32 WROOM	30
II.4.4	Convertisseur Analogique-Numérique (ADC)	30
II.4.5	Convertisseur Numérique-Analogique (DAC)	30
II.4.6	SPI (Serial Peripheral Interface)	31
II.4.7	I2C (Inter-Integrated Circuit)	31
II.4.8	PWM (Pulse Width Modulation)	31
II.4.9	Interruptions externes	31
II.4.10	Alarmes	32
II.4.11	Timers	32
II.4.12	Connexion WiFi	33
II.4.13	Fonction Arduino OTA (On The Air)	34
II.5	CAPTEUR JSY-MK-194T	35
II.5.1	Définition	35
II.5.2	Principe des mesures (tension alternative, courant alternatif)	35
II.6	CIRCUIT DE BRANCHEMENT À L'ESP32	36
II.7	PRÉSENTATION DU MODULE GRADATEUR AC ROBOTDYN	37
II.7.1	Déscription du module	37
II.7.2	Gradateur Triac 16A/24A	37
II.7.3	Changement du dissipateur thermique du module gradateur	38
II.8	RÉALISATION MATÉRIELLE	39
II.8.1	Matériel demandé	39
II.8.2	Montage électrique	40
II.8.3	Connections électriques du routeur photovoltaïque	41
II.9	CONCLUSION	42

II.1 Introduction

Dans un temps où la gestion de l'énergie solaire est devenue une nécessité pour surveiller et optimiser l'utilisation de l'énergie solaire, les routeurs solaires sont devenus une solution attractive pour une gestion intelligent et efficace de l'énergie solaire. En d'autres termes, ils peuvent être un moyen efficace pour augmenter l'autoconsommation et offrent une autonomie énergétique.

Dans ce chapitre, nous présentons l'utilisation d'un microcontrôleur ESP32 dans le concept de la réalisation d'un routeur solaire afin de faire une discription de cette carte de développement qui facilite la gestion de la mesure de la puissance consommée ou produite par une installation solaire. Grâce à sa capacité du connectivité Wi-Fi intégrée, le traitement des données et la communication sans fil deviennent plus accessibles, permettant ainsi une Intégration de capteurs de courant pour une gestion plus précise de l'énergie en temps réel.

II.2 Présentation du site

II.2.1 Présentation du site locaux de laboratoires

Ce projet sera mis en œuvre au niveau du Laboratoire d'automatique de Tlemcen (LAT)

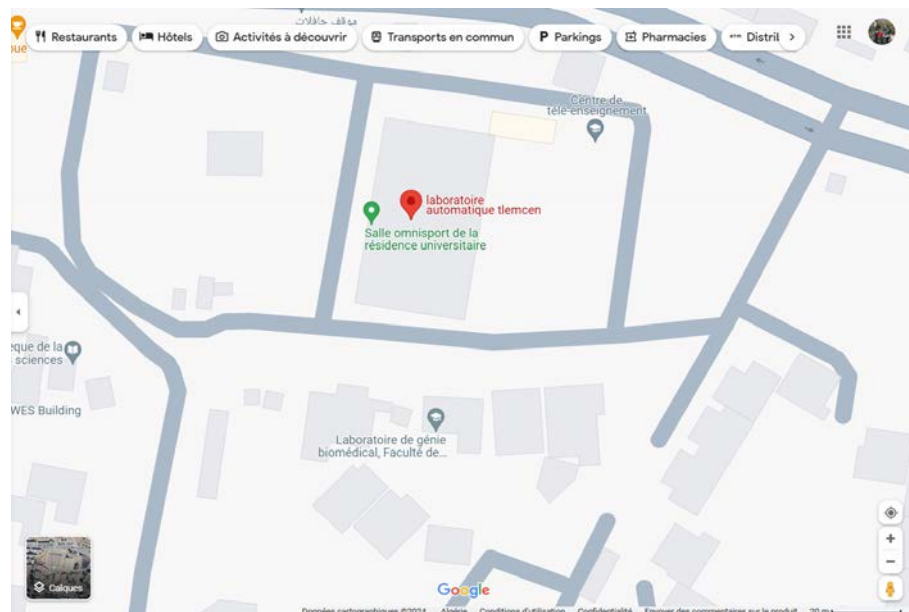


FIGURE II.1 – Localisation du laboratoires LAT

II.2.2 Présentation de la microcentrale PV existante

Notre installation comporte d'une micro centrale photovoltaïque de 6 panneaux solaires peut produire une puissance électrique d'environ 1.5 kW (puissance maximale de chaque panneaux est 250 W) dans des conditions optimales d'ensoleillement.



FIGURE II.2 – Panneaux photovoltaïques

Trois micro-onduleurs d'une capacité de 500 W pour convertir le courant continu en courant alternatif, Chaque micro-onduleur raccorde 2 modules PV.



FIGURE II.3 – Panneaux photovoltaïques + micro onduleur

II.3 Routeur photovoltaïque

Un routeur photovoltaïque, également appelé gestionnaire d'énergie solaire, est un appareil intelligent qui permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire produite par une installation photovoltaïque en autoconsommation. Il permet à l'énergie excédentaire d'être redirigée vers une charge prédéfinie, comme un ballon d'eau chaude, un chauffage, une pompe de piscine à au lieu d'être perdue. Le routeur assure que zéro watt soit soutiré ou injecté dans le réseau public, évitant ainsi toute surcharge. Il agit comme un régulateur du flux d'énergie, adaptant la puissance fournie à la charge en fonction de la production et de la consommation du système. C'est un élément essentiel pour gérer l'énergie produite par un système photovoltaïque et optimiser son utilisation [47].

II.3.1 Fonctionnalités d'un routeur photovoltaïque

1. Surveillance de la production d'énergie solaire : Le routeur solaire permet mesure en temps réel la quantité d'électricité produite par les panneaux solaires.
2. Surveillance de la consommation d'énergie : Il mesure également la consommation d'électricité de votre maison avec tous les charges disponible appareil par appareil.
3. Gestion intelligente de l'énergie : En comparant la production et la consommation, le routeur solaire décide en temps réel de la meilleure façon d'utiliser l'énergie solaire excédentaire. Il peut :
 - Diriger excédent vers des appareils électriques : Chauffe-eau, climatisation, etc.
 - Stocker le surplus dans le cas où du batterie : Pour une utilisation ultérieure lorsque la production solaire est faible ou inexistante.
 - Revendre le surplus au réseau électrique : Si votre contrat le permet et devinet un fournisseur d'énergie.

II.3.2 Exemples de routeur photovoltaïque

Il existe de nombreux exemples de routeurs solaires, chacune présentant des caractéristiques et des capacités distinctes pour gérer l'énergie solaire excédentaire. Ces appareils permettent de rediriger le surplus d'énergie solaire vers des appareils tels que les chauffe-eau, optimisant ainsi la consommation d'énergie au sein d'un foyer. Ci-dessous quelques réalisations du routeur photovoltaïque.

II.3.2-a Routeur photovoltaïque Arsun

Le routeur solaire Arsun est un dispositif conçu pour gérer la surproduction photovoltaïque de manière autonome. Il est destiné à augmenter l'autoconsommation de l'énergie solaire produite et diminué la dépendance au réseau public et les coûts énergétiques. Ce système permet un réglage précis de l'énergie excédentaire, en particulier pour les chauffe-eaux électriques ou les systèmes de chauffage traditionnels équipés de résistances. Le fonctionnement du routeur est simple, Lorsque ce surplus est détecté, le routeur solaire Arsun dirige automatiquement cette énergie excédentaire vers une charge résistive, comme un chauffe-eau électrique, pour une utilisation immédiate et efficace. Ce processus permet d'optimiser l'autoconsommation de l'énergie solaire produit [63].



FIGURE II.4 – Routeur photovoltaïque Arsun.

II.3.2-b Routeur photovoltaïque Shelly EM

Le routeur solaire Shelly EM se distingue comme une option économique et accessible pour la gestion de l'énergie solaire produite par votre installation photovoltaïque. Le module Shelly Em peut fonctionner en multi Source (monophasé ou triphasé) qui permet de mesurer la puissance et le sens de transfert. On peut en extraire les données en temps réel, plusieurs fois par seconde, par Wifi[45].

Le Shelly Em dispose de 2 canaux. Un est affecté à la mesure de puissance derrière le disjoncteur principal, l'autre peut servir à mesurer une consommation particulière ou de la production photovoltaïque. Il n'affecte pas le fonctionnement du routeur [45].



FIGURE II.5 – Routeur Shelly EM

II.3.2-c Routeur décodant le Linky

Ce routeur est compatible avec les systèmes monophasé et triphasé et utilise également un triac pour contrôler le surplus de puissance. Il peut être intégré à un système Linky pour un meilleur suivi et contrôle de la consommation et de la production d'énergie. En se connectant à la prise TIC (Télé - Information Client) il est possible d'extraire les valeurs par une liaison série vers le microcontrôleur ESP32[44].

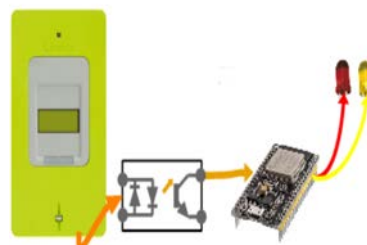


FIGURE II.6 – Routeur Linky

II.3.3 Cahier des charges

Ce projet comprend la mise en place d'un système de mesure de puissance solaire à l'aide d'un microcontrôleur ESP32. L'objectif du système est de recueillir des informations de tension et de courant provenant des panneaux solaires, de déterminer la puissance produite et d'afficher les données sur une interface Web en utilisant un navigateur.

1. Objectifs :

- Développer un système permettant de mesurer la puissance générée par des panneaux solaires en temps réel et traité les données à l'aide d'un ESP32.
- Afficher en temps réel les mesures de tension, de courant et de puissance sur un serveur Web intégré à l'ESP32.
- surveiller les performances du système solaire depuis un navigateur Web et un service en ligne

2. Spécifications techniques :

- Matériel :
 - Microcontrôleur ESP32
 - Capteur "JSY-MK-194T" pour les mesures de la tension et de courant.
 - Module gradateur AC Robotdyn pour réguler le surplus d'énergie.
 - Modules LED.
 - Alimentation 5V/1A pour ESP32.
- Logiciel :
 - L'utilisation de l'Arduino IDE pour réaliser un programme sur l'ESP32.
 - Interface Web et service en ligne "Thingspeak" pour l'affichage des mesures de puissance.

3. Fonctionnalités :

- Mesurer la tension et le courant des panneaux solaires.
- Calcul et affichage des mesures de puissance en temps réel sur une interface Web et un service en ligne "Thingspeak".
- Servailence des résultats obtenus.

4. Contraintes techniques :

- Capteurs de tension et de courant appropriés pour la mesure précise de la tension et le courant des panneaux solaires.
- Contrôler l'injection de surplus dans les différentes charges avec un triac.
- Changement du dissipateur thermique du module gradateur si la charge dépasse le 1000W.
- L'utilisation de relais pour les charges qui n'ont pas des résistances électriques ou de thermostats électromécaniques pour la protection thermique.
- Respecter les normes de sécurité électrique lors de la manipulation des composants électroniques.

5. Resultats Attendus.

- Schéma fonctionnel et montage des composants.
- Code source du programme ESP32 pour la mesure de puissance solaire.
- Interface Web et service en ligne "Thingspeak" fonctionnelle.
- Documentation détaillée du projet proposé pour une utilisation efficace.

II.3.4 Schéma fonctionnel du système proposé

Le schéma ci-dessous montre le câblage électrique du système que nous devons réaliser, le processus d'interconnexion des modules se fait avec des fils d'électricien et des fils Dupont femelle.

Nous passerons La phase du réseaux en sortie du disjoncteur principal par la sonde mobile du capteur JSY-MK-194 pour faire fonctionner le routeur. la deuxième sonde fixe du module permet de mesurer le courant et la puissance en sortie du Triac qui alimente la charge supplémentaire utilisé "ventilateur chauffant". La transmission des mesures à l'ESP32 se fait par une liaison série.

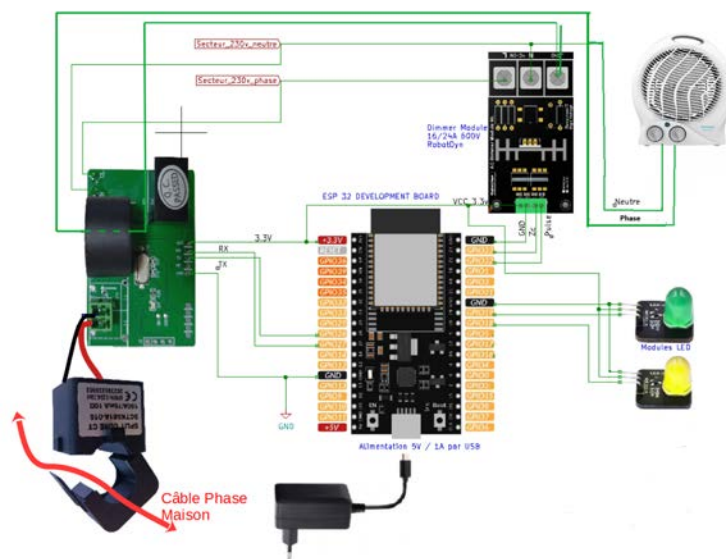


FIGURE II.7 – Schéma fonctionnel du système proposé

II.4 Module de développement ESP32

L'ESP32 est le nom d'un microcontrôleur développé par Espressif Systems, une entreprise chinoise située à Shanghai, Basée sur l'architecture Xtensa LX6 de Tensilica.

Ce microcontrôleur combinant d'un Wi-Fi intégré et un Bluetooth en mode double, Ce qui lui permet d'être un lien entre les microcontrôleurs existants et les réseaux sans fil. elle est largement utilisé dans le domaine de l'internet des objets (IOT) et les applications embarqué pour ses capacités avancées de connectivité . Sa production en volume n'a pas commencé avant la fin de l'année 2016, Depuis sa mise sur le marché, les fabricants tiers ont rapidement adopté ces cartes pour concevoir des systèmes révolutionnaires.

Il existe une variété de styles d'ESP32 de différentes tailles, mais du point de vue de la programmation, ils sont tous identiques. Adaptée aux développeurs utilisant des langages comme C, C++, Python ou MicroPython[62].

II.4.1 Description de la carte ESP32 WROOM

L'ESP32-WROOM-32 est un module puissant de la famille des ESP de capacités Wi-Fi et Bluetooth intégrées. Caractérisé d'un système à faible coût et à faible consommation sur une puce (SoC) avec deux cœurs de processeur Xtensa LX6 32 bits cadencés jusqu'à 240 MHz, ce microcontrôleur peut exécuter des applications de traitement intensif tout en étant économe en énergie. Il dispose également de 4 Mo de mémoire flash intégrée pour le stockage de programmes et de données, ainsi que de 520 Ko de RAM pour l'exécution des programmes. En termes de connectivité sans fil, l'ESP32-WROOM-32 prend en charge le Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i (2,4 GHz) avec des débits allant jusqu'à 150 Mbps, ainsi que le Bluetooth v4.2 BR/EDR et BLE pour la communication sans fil avec d'autres appareils. De plus, il offre une variété d'interfaces de périphériques telles que l'UART, le SPI, l'I2C, l'I2S, le PWM, l'ADC et le DAC, permettant la communication avec divers périphériques tels que des capteurs, des actionneurs et des modules d'affichage[22].

II.4.2 Caractéristiques techniques de la carte ESP32 WROOM

La carte ESP32 WROOM est une carte de développement compacte et polyvalente conçue pour les projets IoT (Internet des objets). Elle est équipée d'un processeur Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 cadencé jusqu'à 240 MHz, ce qui lui permet de traiter les données efficacement. La carte dispose d'une mémoire flash externe de 16 Mo, qui permet d'enregistrer un grand nombre de données et de programmes, et d'une mémoire SRAM interne de 520 Ko et d'une mémoire SRAM externe de 4 Mo[22].

La fiche technique de l'ESP32 WROOM fournit des détails techniques essentiels sur ce module de développement. Voici un tableau des informations sur les éléments de base contenus dans cette carte :

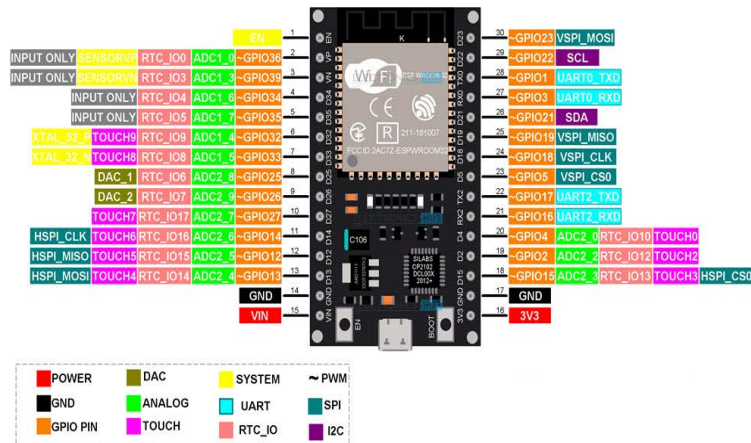
Microcontrôleur	ESP32-WROOM
Tension de fonctionnement	3-5 V
Pins I /O digitales	18
Pins d'E / S numériques PWM	16
Pins output Analogiques	2
Courant DC pour la broche 3.3V	50 mA
SRAM	512 kB
Mémoire Flash	16 MB
Fréquence de l'horloge	Jusqu'à 240 MHz
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Bluetooth	4.2 / BLE
SPI	3
UART	3
I2S	2
I2C	2

TABLE II.1 – Spécifications techniques de la carte ESP-WROOM-32

II.4.3 Broches la carte ESP32 WROOM

Les cartes ESP32 se présentent sous de nombreuses formes et tailles, et chaque carte a un brochage différent. De plus, toutes les broches du microcontrôleur ESP32 ne seront pas disponibles sur une carte de développement, car certaines broches peuvent être liées en permanence à une fonction dédiée. Pour cela, il est important de connaître les limitations de certaines broches GPIO de l'ESP32 pour éviter les mauvaises surprises dans nos projets ou des erreurs incompréhensibles dans nos programmes [58].

L'image suivante montre le brochage d'un module ESP-WROOM-32 typique.



II.4.6 SPI (Serial Peripheral Interface)

Le bus SPI (Synchronous Peripheral Interface) est un bus série assurant une communication en full-duplex synchrone. Il est multipoint avec un maître communiquant avec plusieurs esclaves. La communication est bidirectionnelle dans le sens où c'est toujours le maître qui initie la communication.

L'ESP32 est équipé de trois interfaces SPI (SPI, HSPI et VSPI) qui fonctionnent en mode esclave et maître. HSPI et VSPI peuvent communiquer avec d'autres appareils, chaque bus étant capable de piloter jusqu'à trois esclaves SPI. Par défaut, de nombreuses cartes ESP32 sont livrées avec des broches SPI pré-attribuées, permettant l'utilisation simultanée de HSPI et VSPI pour contrôler plusieurs appareils SPI [22].

II.4.7 I2C (Inter-Integrated Circuit)

L'ESP32 dispose de deux interfaces I2C clairement identifiées sur le module sous les noms SDA et SCL. Ces interfaces permettent d'établir des communications en mode maître en initiant les échanges ou en mode esclave en répondant aux commandes du maître. Les broches spécifiques utilisées pour la communication I2C peuvent être configurées dans le logiciel, offrant ainsi une flexibilité dans la conception de votre projet. Les interfaces I2C prennent en charge la communication I2C en mode standard (100 KHz) et en mode rapide (400 KHz)[22].

- SCL(Serial Clock) :l'horloge commune à tous les équipements.
- SDA (Serial Data) : la ligne portant les données.

II.4.8 PWM (Pulse Width Modulation)

La carte est équipée de 25 canaux (presque toutes les broches) des broches PWM commandées par le contrôleur de modulation de largeur d'impulsion (PWM). On peut utiliser la sortie PWM pour piloter des moteurs numériques et des LED. Le contrôleur est constitué de temporisateurs PWM et de l'opérateur PWM. Chaque temporisateur fournit une synchronisation sous forme synchrone ou indépendante, et chaque opérateur PWM génère la forme d'onde pour un canal PWM[56].

II.4.9 Interruptions externes

Les interruptions externes sur ESP32 sont un outil qui permet de détecter des événements en temps réel tout en laissant le processeur du microcontrôleur faire d'autres tâches. Sont puissant pour améliorer les performances et la consommation d'énergie de votre système en réagissant rapidement et efficacement aux événements extérieurs. Elles sont utiles lorsque vous voulez détecter un événement, comme l'appui sur un bouton, sans avoir à vérifier en permanence l'état de la broche GPIO, les interruptions permettent de détecter un événement en temps réel tout en laissant le processeur de micro-contrôleur faire d'autre tâches. Ainsi le fonctionnement d'une interruption est le suivant [16] :

Détection d'un événement → interruption du programme principal → exécution du code de l'interruption → le processeur reprend là où il s'est arrêté.

Ces interruptions peuvent être déclenchées par un changement d'état sur une broche GPIO et il est possible de choisir le mode de détection de l'interruption [16] :

LOW : Déclenche l'interruption dès que le signal est à 0V.

HIGH : Déclenche l'interruption dès que le signal est à 3.3 V.

RISING : Déclenche l'interruption dès que le signal passe de LOW à HIGH (0V à 3.3V).

FALLING : Déclenche l'interruption dès que le signal passe de HIGH à LOW (3.3V à 0V).

CHANGE : Déclenche l'interruption dès que le signal passe de LOW à HIGH ou de HIGH à LOW.

Les modes **RISING** et **FALLING** sont les plus utilisés, noter que si vous utiliser les modes **LOW** et **HIGH**, l'interruption se déclenchera en boucle tant que le signal ne change pas d'état. Pour créer une interruption sur un pin, il faut attribuer un pin pour détecter l'interruption, utiliser la fonction `attachInterrupt()` pour attacher la fonction qui sera exécutée lorsque l'interruption est déclenchée, et spécifier le mode de détection [16].

II.4.10 Alarmes

L'ESP32 dispose de la capacité de configurer des alarmes pour déclencher des actions à des moments spécifiques. Pour mettre en place une alarme sur un ESP32, vous pouvez utiliser la fonction `timerAlarmWrite()` pour définir le seuil au-delà duquel l'alarme se déclenchera. Par exemple, pour configurer une alarme qui se déclenche après 5 secondes, vous pouvez utiliser `timerAlarmWrite(timer, 5000000, true)`, où '5000000' représente 5 secondes en microsecondes [70].

Pour configurer une alarme sur ESP32 en utilisant du code Arduino, et on utilise la bibliothèque `ESP32Alarm` qui permet de gérer des alarmes avec une grande précision. Voici les étapes pour configurer une alarme avec cette bibliothèque [35] :

1. Installez la bibliothèque `ESP32Alarm` dans l'IDE Arduino.
2. Définissez l'alarme en utilisant la fonction `ESP32Alarm.alarm()`. Cette fonction prend en paramètre l'heure et la minute de l'alarme, ainsi qu'une fonction à exécuter lorsque l'alarme se déclenche.
3. Activez l'alarme en utilisant la fonction `ESP32Alarm.enable()`.
4. Attendez que l'alarme se déclenche en utilisant la fonction `ESP32Alarm.wait()`

Cette fonctionnalité d'alarme est utile pour planifier des actions à des moments précis, ce qui peut être essentiel dans de nombreux projets basés sur l'ESP32.

L'ESP32 dispose de plusieurs modes de sommeil qui permettent de réduire la consommation d'énergie lorsqu'il n'est pas actif. Les alarmes peuvent être utilisées pour réveiller l'ESP32 de son sommeil et exécuter une tâche spécifique [8].

II.4.11 Timers

Les timers d'un ESP32 fonctionnent en permettant la gestion du temps et des interruptions sur le microcontrôleur. Ils sont utilisés pour déclencher des actions à des intervalles spécifiques ou en réponse à des événements temporels. Pour configurer et utiliser un timer sur l'ESP32 avec Arduino IDE, on peut suivre les étapes suivantes :

1. Configurer un timer en définissant un objet (`hw_timer_t`) et en choisissant un prescaler pour le signal d'horloge du timer.

2. Attacher une interruption au timer en spécifiant une fonction qui sera exécutée lorsque l'interruption est déclenchée.
3. Configurer l'alarme du timer pour définir le seuil à partir duquel l'interruption sera déclenchée.
4. Activer l'alarme du timer pour commencer à surveiller et déclencher l'interruption selon le seuil défini.

Il est essentiel de veiller à ce que les fonctions d'interruption associées aux timers aient un temps d'exécution minimal pour éviter de perturber le fonctionnement global du programme. Les timers sont utiles pour des applications nécessitant une gestion précise du temps, des tâches périodiques ou des actions synchronisées avec des événements temporels spécifiques sur l'ESP32 [8].

Pour configurer un timer sur ESP32 en utilisant du code Arduino, vous pouvez suivre les étapes suivantes :

- Créez un objet " hw_timer_t " en dehors de la fonction setup() pour pouvoir y accéder depuis différentes fonctions.
- Utilisez la fonction timerBegin(uint8_t id, uint16_t prescaler, bool countUp) pour configurer le timer. Sur l'ESP32, il y a 4 timers complètement indépendants, choisissez-en un via un id compris entre 0 et 3. Ensuite, choisissez le prescaler que vous voulez appliquer au signal d'horloge du timer. Sur l'ESP32, c'est l'horloge APB_CLK cadencée à 80 MHz qui est utilisée.
- Attachez une interruption au timer qui sera déclenchée à chaque fois que la valeur seuil sera dépassée avec timerAttachInterrupt(hw_timer_t *timer, void (*function)(void), bool autoReload).
- Configurez l'alarme du timer avec timerAlarmWrite(hw_timer_t *timer, uint64_t alarm, bool autoReload).
- Activez l'alarme du timer avec timerAlarmEnable(hw_timer_t *timer).

II.4.12 Connexion WiFi

L'ESP32 est un microcontrôleur doté d'un module WiFi intégré, facilitant la connexion à des réseaux sans fil et l'accès à Internet. Pour établir une connexion WiFi avec l'ESP32, vous pouvez utiliser la bibliothèque WiFi.h incluse dans l'IDE Arduino. Cette bibliothèque offre des fonctions pour scanner les réseaux disponibles, se connecter à un réseau spécifique et gérer la connexion. Voici les étapes à suivre [24] :

1. Nous devons inclure la bibliothèque WiFi.h :

```
#include <WiFi.h>
```
2. Ensuite, nous entrons le nom du réseau et son mot de passe :

```
const char* ssid = "nom du reseau wifi";  
const char* password = "mot de passe du reseau wifi";
```
3. On met l'ESP32 en mode STATION avec la fonction WiFi.mode(WIFI_STA)
4. L'ESP32 tente de se connecter au réseau Wi-Fi à l'aide de la fonction :

```
WiFi.begin(ssid, password);
```

5. Attendre que la connexion soit établie :

```
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  delay(1000);
Serial.println("Connexion en cours au Wi-Fi...");
```
6. Afficher l'adresse IP attribuée au module ESP32 :

```
Serial.println("Connexion Wi-Fi établie !");
Serial.print("Adresse IP : ");
Serial.println(WiFi.localIP());
```
7. Vous pouvez maintenant utiliser la connexion Wi-Fi pour envoyer ou recevoir des données.

II.4.13 Fonction Arduino OTA (On The Air)

Le nouvel Arduino IDE apporte beaucoup de nouveautés, et l'une d'entre elles est la fonction OTA (over-the-air). Cette fonctionnalité vous permet de télécharger des programmes sans fil sur les cartes Arduino, ESP32, ESP8266, ... ect. De cette façon, dès que vous disposez d'une carte compatible connectée à un réseau WiFi et configurée pour fonctionner avec OTA, vous n'aurez pas besoin de connecter physiquement la carte à l'ordinateur pour y télécharger de nouveaux croquis. Au lieu de cela, tout fonctionnera en direct [57].

II.4.13-a Configuration OTA

La mise à jour OTA (Over-the-Air) est le processus de chargement d'un nouveau firmware sur la carte ESP32 à l'aide d'une connexion Wi-Fi plutôt que d'une communication série. Cette fonctionnalité est extrêmement utile en cas d'absence d'accès physique à la carte ESP32 [71].

Pour effectuer ces mise à jours on a besoin de la bibliothèque `#include <AsyncElegantOTA.h>`, `#include <ArduinoOTA.h>` pour créer un serveur Web auquel vous pouvez accéder sur votre réseau local pour télécharger de nouveaux microprogrammes ou fichiers sur le système et pour la mise à jours à distance. On utilise la bibliothèque `#include <RemoteDebug.h>` pour l'affichage des informations et des adresses IP pour des serveurs Web.

II.4.13-b Fonctionnement OTA Web

1. Le programme est téléversé sur notre carte ESP32 via une connexion série avec le port com USB.
2. Dans le programme OTA, quand les appareils sont connectés avec le même réseau Wifi nous pouvons de téléversé le code sans connexion direct (sans câble USB).
3. Avec l'OTA on peut créer un interfaçage sous une page web pour afficher les informations de notre ESP32 sous forme d'une adresse IP qui... affiché sur le moniteur série de l'Arduino IDE.
4. Dans votre réseau local, ouvrez votre navigateur et saisissez l'adresse IP ESP32, Vous devriez avoir accès à la page Web.

II.5 Capteur JSY-MK-194T

II.5.1 Définition

Le JSY-MK-194T est un module utilisé dans les systèmes photovoltaïques, plus particulièrement dans la réalisation d'un routeur photovoltaïque. Il s'agit d'un capteur de courant qui permet de mesurer la consommation d'énergie d'un circuit en faisant passer le fil de phase du réseau à travers lui. Ce module est connecté à un microcontrôleur ESP32 via une connexion série, ce qui permet de transmettre les données mesurées sur deux canaux par deux sondes de courant au microcontrôleur[46].

une sonde de courant mobile que l'on positionne autour du fil de phase du disjoncteur principal pour faire fonctionner le routeur. Une deuxième sonde fixe sur le module permet de mesurer par exemple le courant et la puissance en sortie du triac[46].



FIGURE II.9 – Capteur JSY-MK-194T

II.5.2 Principe des mesures (tension alternative, courant alternatif)

Le capteur JSY-MK-194T utilise le principe de l'induction électromagnétique pour mesurer le courant alternatif et la tension alternative. Il détecte les variations du champ magnétique induites par le courant électrique alternatif qui circule à travers le conducteur.

- Le capteur peut mesurer le courant alternatif en détectant le champ magnétique généré par le courant lorsqu'il passe à travers le conducteur. Ce champ magnétique est ensuite converti en une valeur de courant alternatif.
- De manière similaire, le capteur peut mesurer la tension alternative en détectant le champ électrique induit par la tension à travers un circuit. Ce champ électrique est alors converti en une valeur de tension alternative.

Les mesures de courant et de tension alternatives sont généralement converties en signaux analogiques ou numériques pour être interprétées par des dispositifs de visualisation ou de traitement de données.

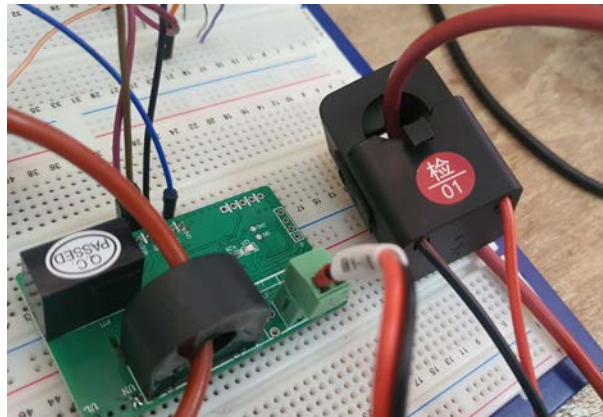


FIGURE II.10 – Principe de mesure avec le capteur JSY-MK-194T

II.6 Circuit de branchement à l'ESP32

Le capteur JSY-MK-194T se connecte en 3.3V sur l'ESP32. Le module et l'ESP32 communiquent en liaison série à 4800 bauds, en suivant le protocole MODBUS.

- GPIO 26 : connecté avec La broche RX du capteur pour recevoir les données envoyées par l'ESP32.
- GPIO 27 : connecté avec La broche TX du capteur est utilisée pour transmettre les mesures de courant, de tension et d'autres informations pertinentes vers l'ESP32.
- GPIO 22 : connecté avec La broche ZC(Zero Crossing) du Triac pour détecter le passage par zéro de la tension alternative.
- GPIO 23 : connecté avec La broche Pulse pour recevoir des signaux de commande ou des impulsions.

2 LED sur les GPIO 18 et 19 clignotent toutes les 2s. La jaune si on consomme du courant, la verte si on fournit du courant, car nous sommes en surproduction.

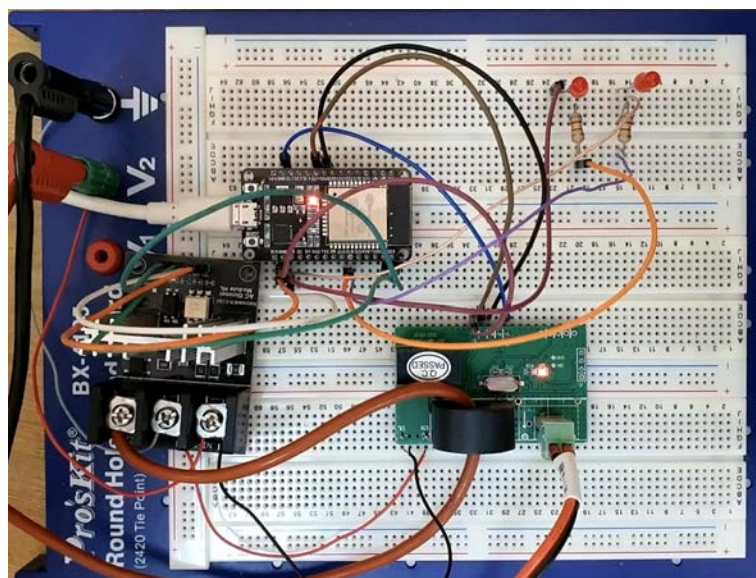


FIGURE II.11 – Circuit de branchement à l'ESP32

II.7 Présentation du module gradateur AC Robotdyn

II.7.1 Description du module

Le module gradateur AC Robotdyn est un petit dispositif conçu pour varier la tension à ses bornes en réponse à une commande externe, telle que celle provenant d'un Arduino. Fabriqué par Robodyn, ce module dispose d'un triac BTA 16/24A 600V et peut être utilisé avec un Arduino ou un autre microcontrôleur. Il est conçu pour les applications nécessitant une puissance relativement faible, avec une capacité maximale d'environ 16A/24A grâce à son petit radiateur. Le module est récemment devenu un choix populaire pour les systèmes de maison intelligente[28].

Le module est équipé d'un détecteur "Zero Crossing" qui assure la sécurité du système. Il génère une impulsion de 3,3V à chaque passage par zéro de la tension alternative du secteur 230V. Ce signal permet à l'ESP32 de synchroniser ses commandes avec le secteur[43].



FIGURE II.12 – Module gradateur AC Robotdyn

II.7.2 Gradateur Triac 16A/24A

Le triac est un dispositif semi-conducteur bidirectionnel qui peut laisser passer le courant dans les deux sens. équivalent à la mise en parallèle de deux thyristors montés tête-bêche (l'anode de l'un sera être liée à la cathode de l'autre, les gâchettes respectivement étant commandé simultanément), son utilisation en alternatif est évidente, puisqu'elle permet d'exploiter les deux alternances. Ce composant offre la possibilité de contrôler la puissance délivrée à une charge en courant alternatif (AC) et capable de couper et de laisser passer le courant alternatif[7].

Le triac est un composant clé du routeur, il est compatible avec les systèmes électriques de 230 V et peut être commandé par un signal logique de 3,3 V ou 5 V. Ce composant agit comme un interrupteur pour contrôler le 230V, Lorsqu'une impulsion électrique est appliquée sur la gâchette (gate), le courant circule entre les deux anodes jusqu'au moment où la tension atteint zéro, ce qui désactive le triac. La phase du courant alternatif de 230V est connectée à A2, tandis que la charge est connectée à A1[43].

II.7.3 Changement du dissipateur thermique du module gradateur

Dans la conception d'un convertisseur de puissance, il est important de choisir un dissipateur thermique adapté pour les semi-conducteurs de puissance, afin de préserver leur intégrité thermique en maintenant la température de jonction en dessous de la valeur critique pendant le fonctionnement. L'unité d'origine du triac peut être sous-dimensionnée pour les charges supérieures à 1000W, ce qui nécessite un dissipateur thermique plus grand pour un fonctionnement prolongé. Pour ce faire, il est nécessaire de dessouder le triac et de le monter sur un dissipateur thermique plus grand.[43].

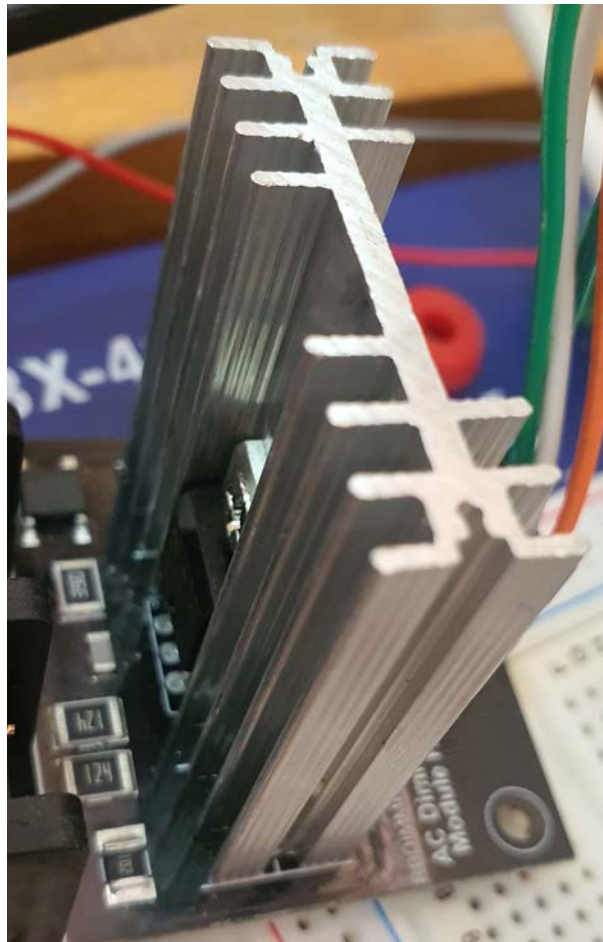


FIGURE II.13 – Dissipateur thermique

II.8 Réalisation matérielle

Grâce aux matériaux disponibles au laboratoire de recherche compté dans le cahier des charges, on doit ajouter les éléments suivants pour réaliser le circuit d'alimentation :

II.8.1 Matériel demandé

- **Une alimentation monophasé** : Dans notre circuit, on utilise une alimentation variable monophasé 2KW fixé à une tension alternatif 230V.



FIGURE II.14 – Alimentation

- **Un Voltmètre** : pour mesurer et visualiser le changement de la tension alternatif.



FIGURE II.15 – Valeur de tension affichée dans le voltmètre

- **Un Ampèremètre** : en série avec l'entrée du circuit de mesure de courant.



FIGURE II.16 – Valeur de courant affichée dans l'ampèremètre

- **Une charge résistive** : On utilise une charge résistive monophasé portative de 2KW, on doit pas passé 40% de sa capacité pour évité l'échauffement du triac.



FIGURE II.17 – Charge resistive

II.8.2 Montage électrique

En suivant le schéma fonctionnel du système proposé et en utilisant les bons composants, on a réalisé le montage montré dans la figure II.18, sans oublier le code source du programme ESP32 pour faire des essais expérimentaux dans le but d'évaluer la réalisation.



FIGURE II.18 – Réalisation pratique

II.8.3 Connexions électriques du routeur photovoltaïque

Voici les principales connexions électriques d'un routeur photovoltaïque en boîtier :

Entrée du routeur

- Branchez le câble de phase (L) du tableau électrique sur la borne L du notre routeur.
- Branchez le câble de neutre (N) du tableau électrique sur la borne N du routeur.
- Branchez le câble de terre du tableau électrique sur la borne du routeur.

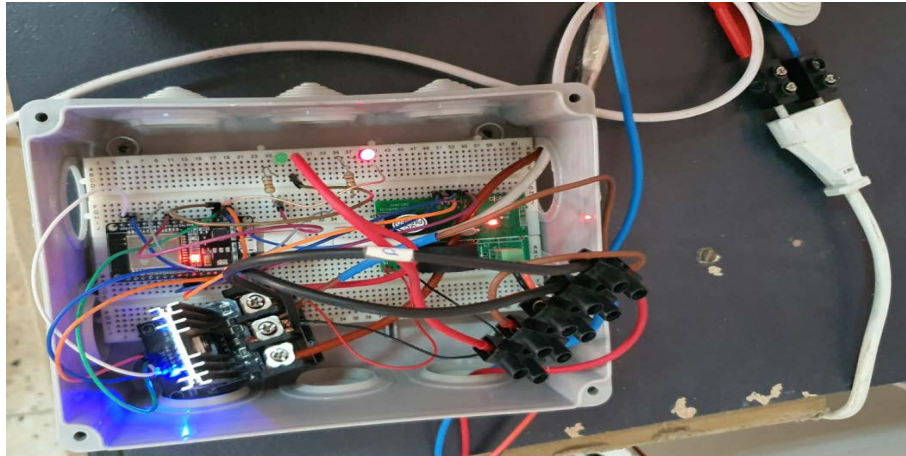


FIGURE II.19 – Routeur photovoltaïque

Sorties du routeur

- Reliez la sortie 1 du routeur (Load) avec une charge supplémentaire (chauffe-eau électrique ou autre appareil prioritaire).
- Reliez la sortie 1 du routeur (neutre) du routeur avec la même charge supplémentaire.
- Reliez le capteur du routeur avec la sortie de phase du disjoncteur principal pour faire fonctionner le routeur.

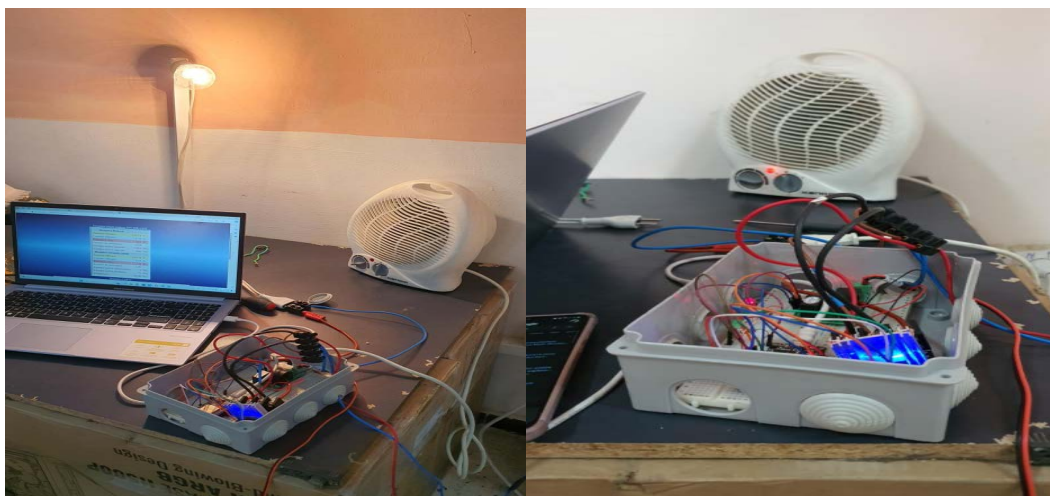


FIGURE II.20 – Routeur connecter avec des charges supplémentaire

II.9 Conclusion

Grâce à la réalisation du routeur solaire, il est possible de gérer de manière autonome et pratique la surproduction photovoltaïque. Les informations des sources indiquent que le routeur est plus simple à réaliser et nécessitant moins de soudures. L'utilisation d'un microcontrôleur ESP32 offre des avantages significatifs en termes de mesure précise de la puissance, le traitement des données et la connectivité WIFI pour la communication à distance, tous ça avec un coût abordable associé à une programmation simplifiée.

En résumé, la simplicité de production de routeurs solaires tient à la modularité du système, au faible nombre de composants requis, aux coûts de construction raisonnables et à la disponibilité des composants techniques de base. Cela en fait un projet accessible aux bricoleurs cherchant à optimiser leur utilisation de l'énergie solaire.

Chapitre III

Réalisation logicielle et interfaçages

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	44
III.2 CONCEPTION LOGICIELLES	44
III.2.1 Calcule des valeurs efficaces de la tension et du courant	46
III.2.2 Calcul des puissances active et apparente	46
III.2.3 Fonctionnalités du code	47
III.3 INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR PAGE WEB	48
III.3.1 Résultats	48
III.3.2 Interprétations	51
III.4 INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR UN SERVICE EN LIGNE	52
III.4.1 Service ThingSpeak	52
III.4.2 Service Blynk	52
III.4.3 Configuration ThingsSpeak	53
III.4.4 Résultats sous ThingsSpeak	55
III.4.5 Interprétations des résultats :	58
III.5 OUTILS LOGICIELS	58
III.5.1 MQTT-Mosquito	59
III.5.2 Node-Red	60
III.5.3 Influx db	61
III.5.4 Grafana	61
III.6 INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR INFLUX DB ET VISUALISATION SUR GRAFANA	62
III.6.1 Présentation de carte Raspberry Pi	62
III.6.2 Définition d'un serveur	64
III.6.3 Réalisation d'un serveur	64
III.7 CONCLUSION	65

III.1 Introduction

L'interfaçage implique la connexion et la communication entre différents composants électroniques ou logiciels, permettant ainsi la transmission efficace de données et de signaux. En revanche, la surveillance vise à évaluer et à mesurer les performances des systèmes électroniques pour garantir leur bon fonctionnement et identifier tout problème éventuel. Ces deux aspects sont indispensables pour assurer la fiabilité et la sécurité des systèmes dans un large éventail d'applications technologiques.

Dans ce chapitre, nous explorerons l'interfaçage et la surveillance de notre système de mesure de puissance solaire en utilisant une plateforme page web à l'aide d'une adresse IP et un service en ligne "ThingSpeak". L'interfaçage avec ces plateformes nous permettra de collecter, de stocker et de visualiser les données de manière efficace, tout en offrant des fonctionnalités de surveillance en temps réel accessibles depuis n'importe quel appareil connecté à Internet.

III.2 Conception logicielles

Le logiciel IDE (Interactive Development Environment) Arduino offre une interface minimale pour rédiger des programmes appelés « *Sketch* », les compiler et les transférer dans des cartes arduino, micro-contrôleur, ESP32, ESP826 ..., à travers une liaison USB, intégrant aussi un moniteur de port série pour l'affichage des données. Il est doté d'un éditeur de code avec coloration syntaxique et d'une barre d'outils classique qui nous permettra d'accéder aux différentes fonctions de l'interface IDE. La figure III.2 montre la présentation de l'interface du logiciel Arduino IDE [68].



FIGURE III.1 – Logo logiciel Arduino IDE [15]

Le langage de l'IDE Arduino est un mélange entre le C et le C++, il possède un jeu d'instruction très riche. A l'ouverture, L'interf du logiciel Arduino se présente de la façon suivante :

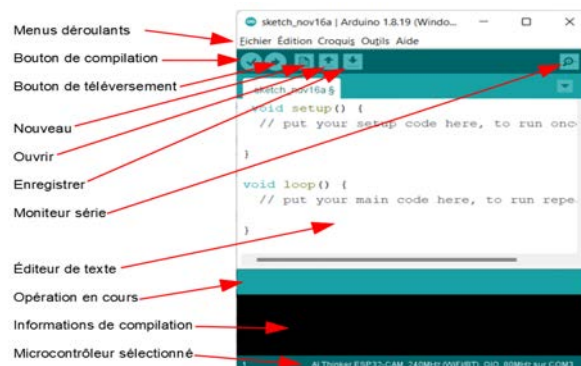


FIGURE III.2 – Interface Arduino [19].

Après avoir ouvert l'IDE [19] :

1. Chargement du code source dans l'éditeur de texte de l'IDE : il s'agit du programme que va exécuter le microcontrôleur dans un langage compréhensible par le développeur.
2. Branchement du microcontrôleur sur le port USB.
3. Sélection du pilote correspondant au microcontrôleur connecté (l'IDE doit savoir à qui s'adresser et comment lui parler).
4. Compilation du programme source : le code qui en résulte n'est plus compréhensible par le développeur mais uniquement par le microcontrôleur.
5. Téléversement du code machine dans le microcontrôleur par la connexion USB (port série).
6. Le microcontrôleur programmé peut être déconnecté de l'ordinateur et être implanté dans son montage électrique.

Dans notre projet, on a programmé l'ESP32 avec l'Arduino IDE, et pour faire ça il faut suivre les étapes qui montre la figure (III.3).

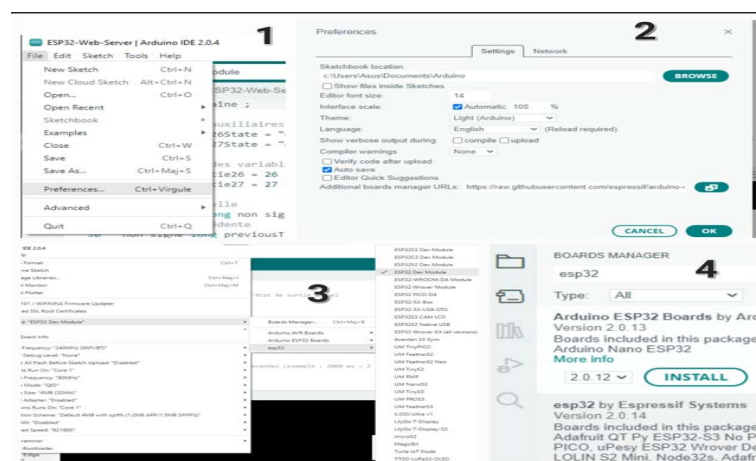


FIGURE III.3 – Configuration de l'IDE avec la carte ESP32

III.2.1 Calcule des valeurs efficaces de la tension et du courant

Il est essentiel de noter que la valeur efficace RMS (**Root Mean Square**) d'un signal est une mesure de sa valeur moyenne sur une période de temps donnée.

Environ (120 μ s) sont nécessaires pour mesurer les deux valeurs représentant la tension et le courant. Dans la pratique, il est prévu de collecter 100 couples de valeurs sur une période de (20 ms), ce qui permettra de fournir une description précise de la tension à priori sinusoidale et du courant souvent chahuté par les alimentations à découpage. Pour obtenir des résultats précis, il est essentiel de vérifier que les échantillons de tension et de courant sont pris de façon synchrone.

– Courant efficace :

$$I_{eff} = \frac{\sqrt{\sum(I \times I)}}{100} \quad (\text{III.1})$$

– Tension efficace :

$$V_{eff} = \frac{\sqrt{\sum(V \times V)}}{100} \quad (\text{III.2})$$

III.2.2 Calcul des puissances active et apparente

Après le calcul des valeurs efficaces V_{RMS} et I_{RMS} , on peut calculer les puissance :

- Puissance active (Watts) : correspond à l'utilisation effective de la puissance par un circuit.

$$P_W = \frac{\sum(V \times I)}{100} \quad (\text{III.3})$$

- Puissance apparente (VA) : correspond à la totalité de la puissance consommée par un circuit. La valeur efficace de la tension en multipliant la valeur efficace du courant, comme le montre l'équation (III.4) .

$$P_{VA} = I_{eff} \times V_{eff} \quad (\text{III.4})$$

En rappelons que le facteur de puissance ($\cos(\phi)$) définie par l'équation (III.5) et L'angle de déphasage (ϕ) définie par l'équation (III.6) :

$$\cos \varphi = \frac{P_W}{P_{VA}} \quad (\text{III.5})$$

$$\varphi = \arccos(\cos(\varphi)) \quad (\text{III.6})$$

Cette formule (III.6) est basée sur le cosinus de l'angle de déphasage, qui peut être déterminé en fonction des valeurs efficaces de la tension(V) et du courant(I) dans le circuit. l'angle est crucial pour évaluer l'efficacité énergétique des installations électriques, car il indique le décalage temporel entre la tension et le courant.

III.2.3 Fonctionnalités du code

En premier lieu en utilisant l'IDE Arduino pour écrire le code et injecté par une liaison série, une fois le code marche on peut le modifier par le WIFI qui permet de l'interfaçage sur une Page Web et un service en ligne "Thingspeak".

Ce code est un projet Arduino qui utilise un ESP32 pour mesurer la consommation électrique d'un appareil et la transmettre à un serveur Domoticz via un réseau WiFi. Le code est écrit en C++ et utilise la bibliothèque ArduinoOTA pour la mise à jour à distance.

1. Le code inclut d'abord les bibliothèques nécessaires, telles que WiFi.h, ESPmDNS.h, WiFiUdp.h, WiFiClient.h, WebServer.h, ArduinoOTA.h et RemoteDebug.h.
2. Il définit également les constantes et les variables utilisées dans le code, telles que le nom du réseau WiFi, le mot de passe, l'adresse IP statique, le nom de l'hôte Domoticz, le port d'écoute, l'index de la valeur de puissance à envoyer à Domoticz, etc.
3. Le code définit ensuite les fonctions utilisées pour mesurer la consommation électrique (tension, courant, facteur de puissance, puissance) dans les deux cas sans panneaux et avec panneaux, enregistrer les données et les transmettre à Domoticz (page web et thingspeak).
4. Configurer les broches GPIO pour les valeurs des capteurs de courant et de tension, contrôler les LED.
5. La fonction MeasurePower(), utilise la fonction analogRead(), pour lire les valeurs des capteurs de tension et d'intensité, tandis que la fonction ComputePower(), calcule la puissance active, la puissance apparente et le facteur de puissance à partir des valeurs lues.
6. La fonction SendToDomoticz() utilise la bibliothèque WiFiClient pour envoyer les données à Domoticz via un réseau WiFi. Le code définit également les fonctions setup() et loop(), qui sont appelées respectivement au démarrage et à chaque boucle de l'application.
7. La fonction setup(), configure le réseau WiFi, initialise la bibliothèque RemoteDebug, démarre le serveur web et configure les pins du ESP32.
8. La fonction loop(), gère les connexions WiFi, les mises à jour à distance, les mesures de la consommation électrique, l'enregistrement des données et la transmission des données à Domoticz.
9. Affichage des courbes de tension, courant, puissances avec possibilité de visualiser la valeur à tous points de courbes.
10. Elle utilise également la bibliothèque ArduinoOTA pour la mise à jour à distance.

Dans cette partie de l'interfaçage du routeur, soit en page web ou bien en thingspeak, on a exploité les résultats sur deux cas : le routeur dans le cas d'une maison en mode nuit (sans panneaux) et le deuxième cas avec panneaux.

III.3 Interfaçage du routeur sur page web

Lorsque vous définissez votre carte ESP32 comme point d'accès, vous pouvez être connecté à l'aide de n'importe quel appareil doté de capacités Wi-Fi sans vous connecter à votre routeur. Lorsque vous définissez l'ESP32 comme point d'accès, vous créez son propre réseau Wi-Fi et les périphériques Wi-Fi (stations) à proximité peuvent s'y connecter, comme votre smartphone ou votre ordinateur. Ainsi, vous n'avez pas besoin d'être connecté à un routeur pour le contrôler [41].

Il suffit de rentrer l'adresse IP de l'ESP32 dans le champ d'adresse de votre navigateur web. Cela peut également être utile si vous souhaitez que plusieurs périphériques communiquent entre eux sans avoir besoin d'un routeur.

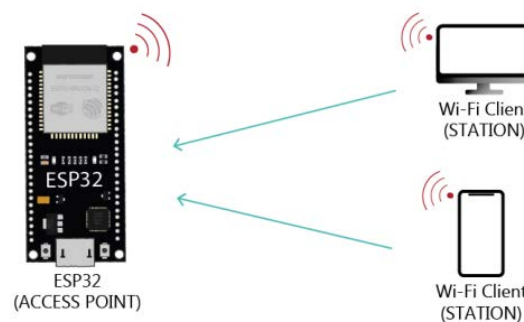


FIGURE III.4 – Périphériques d'nterfaçage avec Wi-Fi [41].

III.3.1 Résultats

Le programme chargé sur l'ESP32 intègre un serveur Web qui affiche sur une page les diverses mesures ainsi que les graphiques de la tension, puissance et courant. Il suffit d'entrer l'adresse IP de l'ESP32 dans la barre d'adresse de votre navigateur Web pour y accéder.

III.3.1-a Résultats sans panneaux photovoltaïque

```

14:42:55.202 -> WIFIfbug:0
14:42:55.202 -> Charge Lecture RMS (coeur 0) en ms - Min : 1 Moy : 2 Max : 3
14:42:55.202 -> Charge Boucle générale (coeur 1) en ms - Min : 0 Moy : 1 Max : 135
14:42:55.202 -> ESP32 ON depuis : 0.17 heures
14:42:55.920 -> Mesure Température invalide Channel update successful.
14:43:20.349 -> Channel update successful.
14:43:25.172 -> Niveau Signal WIFI:-56
14:43:25.172 -> IP address: 192.168.90.150
14:43:25.172 -> WIFIfbug:0
14:43:25.172 -> Charge Lecture RMS (coeur 0) en ms - Min : 1 Moy : 2 Max : 3
14:43:25.172 -> Charge Boucle générale (coeur 1) en ms - Min : 0 Moy : 1 Max : 422
14:43:25.172 -> ESP32 ON depuis : 0.18 heures
14:43:25.923 -> Mesure Température invalide Channel update successful.
14:43:55.147 -> Niveau Signal WIFI:-54
14:43:55.147 -> IP address: 192.168.90.150
14:43:55.147 -> WIFIfbug:0
14:43:55.147 -> Charge Lecture RMS (coeur 0) en ms - Min : 1 Moy : 2 Max : 3
14:43:55.196 -> Charge Boucle générale (coeur 1) en ms - Min : 0 Moy : 1 Max : 1063
14:43:55.196 -> ESP32 ON depuis : 0.19 heures
14:43:55.944 -> Mesure Température invalide Channel update successful.

```

FIGURE III.5 – Résultats du code programmé sur Arduino.

Avec une charge résistive de 25 % :

Données brutes capteur JSY-MK-194T			Données Maison		
Données Maison			Soutirée Injectée		
Tension efficace	235.32 V		Puissance Active (Pw)	565	0
Courant efficace	2.40 A		Puissance Apparente	565	0
Puissance (Pw)	565 W		Energie Active du jour	121	0
Facteur de puissance	1.00		Energie Active Totale	2 501	0
Energie active soutirée	2 483 Wh				
Energie active injectée	0 Wh				

FIGURE III.6 – Résultats des données sur page Web 25 %.

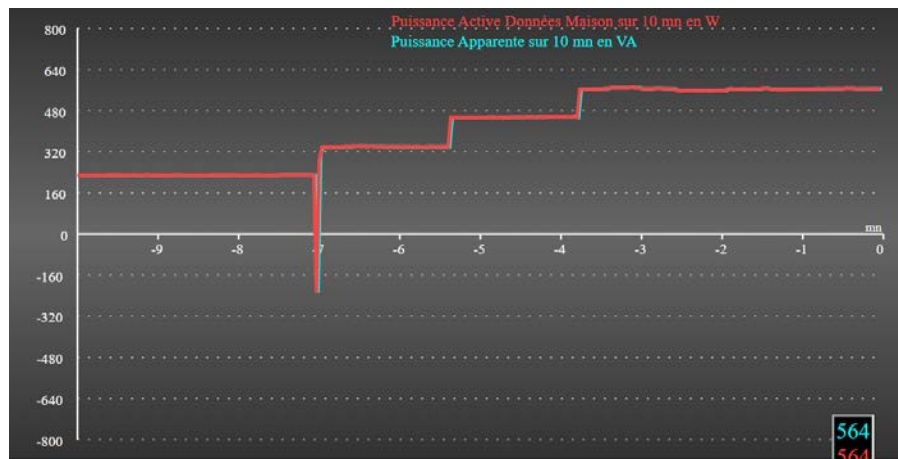


FIGURE III.7 – Puissance active et apparent avec une charge de 25 %.

Avec une charge résistive jusqu'à 40 % :

Données brutes capteur JSY-MK-194T			Données Maison		
Données Maison			Soutirée Injectée		
Tension efficace	233.08 V		Puissance Active (Pw)	892	0
Courant efficace	3.83 A		Puissance Apparente	892	0
Puissance (Pw)	892 W		Energie Active du jour	201	0
Facteur de puissance	1.00		Energie Active Totale	2 581	0
Energie active soutirée	2 545 Wh				
Energie active injectée	0 Wh				

FIGURE III.8 – Résultats des données sur page Web avec charge de 40 %.

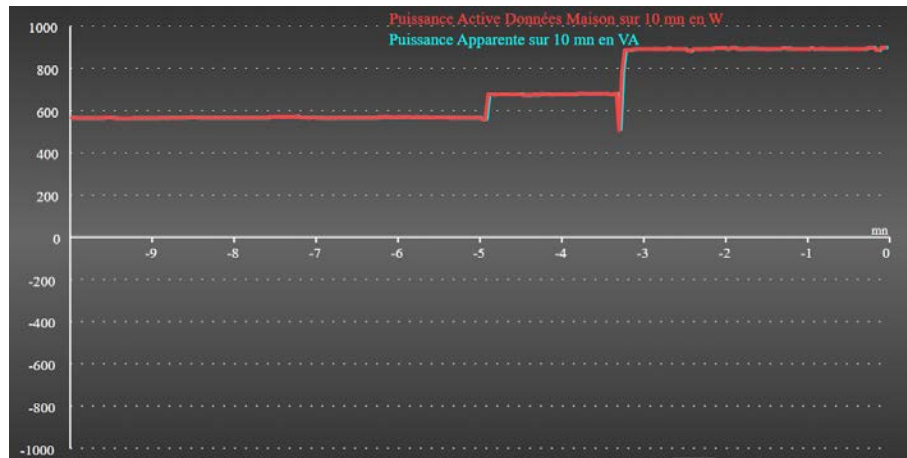


FIGURE III.9 – Puissance active et apparent avec une charge jusqu’à 40 %.

III.3.1-b Résultats avec panneaux photovoltaïque

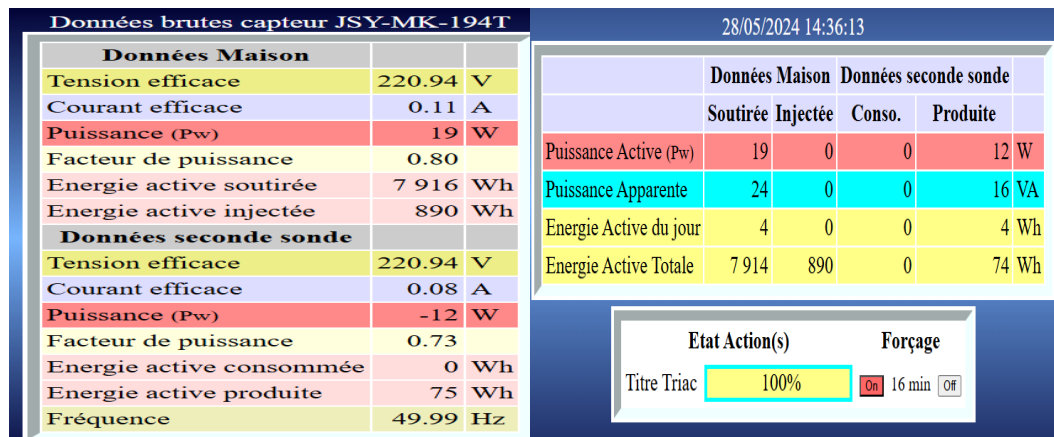


FIGURE III.10 – Résultats des données sur page Web avec panneaux photovoltaïque.

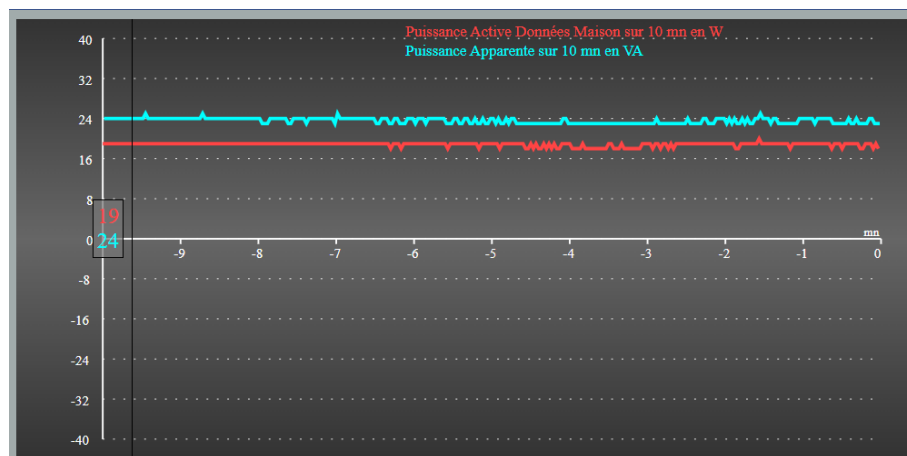


FIGURE III.11 – Puissance active et apparent maison avec PV.

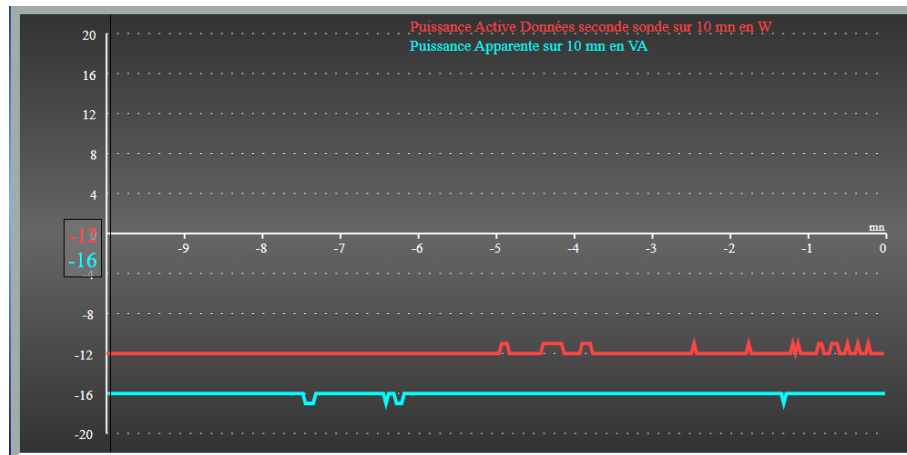


FIGURE III.12 – Puissance active et apparent second sonde avec PV.

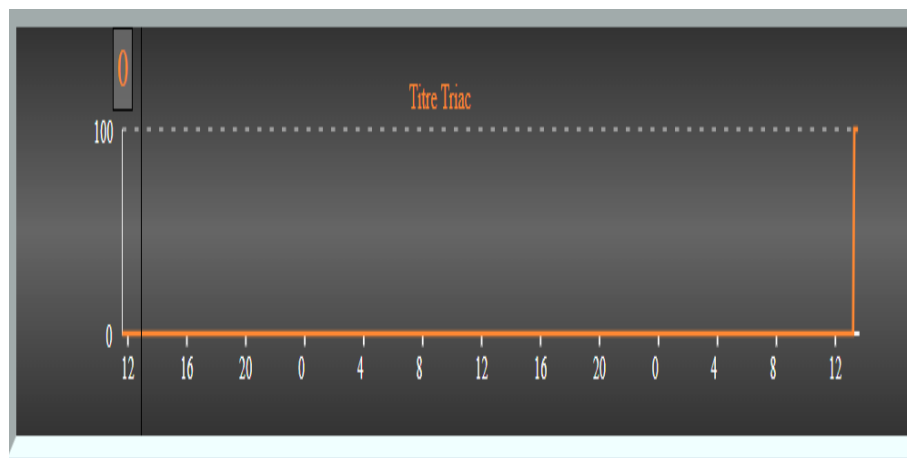


FIGURE III.13 – La maximum de triac avec PV.

III.3.2 Interprétations

Dans le cas sans panneaux on observe que, On a fait des essais pour différentes valeurs de notre charge résistive à (25 %et jusqu'à 40% de sa capacité).

- L'augmentation de courant et de puissance est similaire à l'augmentation de la charge.
- la diminution de tension efficace en fonction d'augmentation de la charge.
- Facteur de puissance est égale à 1 (charge est purement résistive).

Dans le cas avec panneaux on observe que, l'énergie générée ou produite est très faible 75 Wh donc on a pas un surplus d'énergie, le routeur soutire l'énergie nécessaire pour alimenter notre charge supplémentaire (chauffant-électrique) via le réseau du maison.

III.4 Interfaçage du routeur sur un service en ligne

L'interfaçage avec des services en ligne tels que ThingSpeak et Blynk représente une méthode essentielle pour connecter des appareils IoT (Internet des Objets) à des plateformes cloud et des applications mobiles. Cette interconnexion permet aux développeurs et aux utilisateurs de surveiller, de contrôler et d'analyser les données provenant des capteurs et d'autres dispositifs connectés à distance [55].

III.4.1 Service ThingSpeak

ThingSpeak est une plateforme de l'Internet des Objets (IoT) qui permet aux développeurs de collecter, de visualiser et d'analyser des données en temps réel à partir de capteurs et d'autres sources. En interfaçant avec ThingSpeak, les utilisateurs peuvent créer des tableaux de bord personnalisés, surveiller des tendances, et déclencher des actions en fonction de certaines conditions. ThingSpeak prend en charge une variété de protocoles de communication, notamment HTTP, MQTT et TCP/IP, ce qui permet une intégration facile avec une large gamme de périphériques connectés [9].

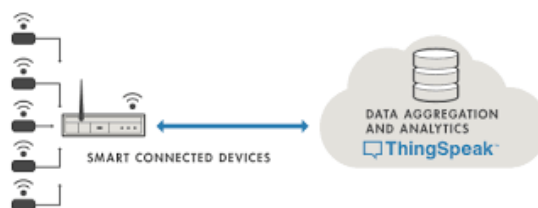


FIGURE III.14 – ThingSpeak [36]

III.4.2 Service Blynk

Blynk est une plate-forme pour l'Internet des Objets (IoT). Elle permet notamment de concevoir une application mobile (Android et iOS) pour contrôler et visualiser les données d'un système embarqué via un serveur cloud public ou privé. La conception de l'application mobile à base de widgets (éléments graphiques) est réalisée par simple glisser et déposer sans écrire une ligne de code. Il prend en charge une variété de plateformes matérielles, y compris Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, ESP32, Particle, et bien d'autres. Il est également compatible avec une variété de protocoles de communication tels que Bluetooth, Wi-Fi, Ethernet, et GSM. En version gratuite, il est possible d'élaborer un prototype [42].

L'application Blynk permet de contrôler l'équipement relié à notre projet à partir d'une interface graphique, ce qui facilite le contrôle et la supervision à l'utilisateur.

Dans ce projet on va travailler avec le ThingSpeak seulement, écartant Blynk pour plusieurs raisons. ThingSpeak offre une flexibilité exceptionnelle, permettant une personnalisation approfondie des visualisations et des analyses de données. De plus, ses outils d'analyse intégrés facilitent l'exploration et la compréhension des données collectées. Cependant, bien que Blynk soit sympathique, facile à utiliser et adapté aux débutants, son

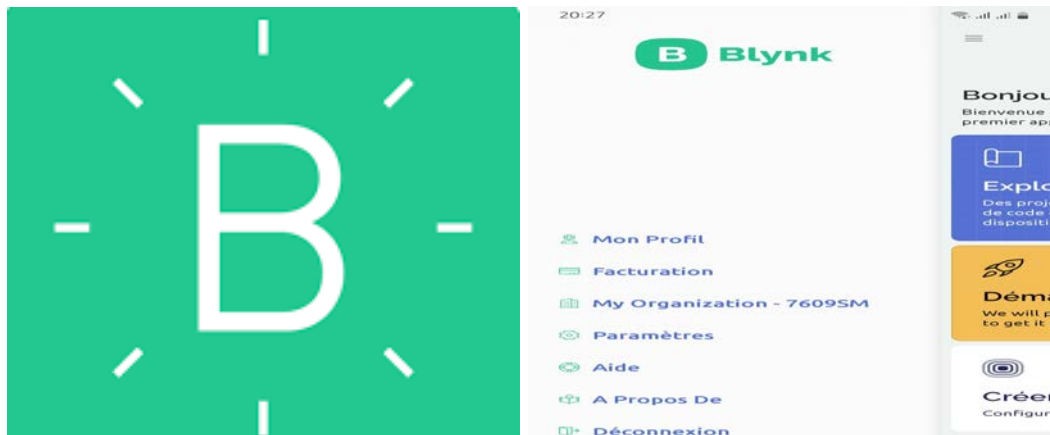


FIGURE III.15 – Application Blynk.

offre limitée en termes d'analyse de données avancée et de personnalisation pourrait limiter nos possibilités dans ce projet spécifique.

III.4.3 Configuration ThingsSpeak

ThingSpeak est développé par MathWorks, la même société qui a créé Matlab, un environnement de développement numérique utilisé dans les sciences et l'ingénierie. Matlab peut être utilisé pour développer des algorithmes de traitement de données pour les appareils IoT, qui peuvent ensuite être téléchargés sur ThingSpeak pour l'analyse et la visualisation [48].

Pour utiliser ThingSpeak, vous devez créer un compte et configurer un canal pour chaque capteur que vous souhaitez utiliser. Vous pouvez alors utiliser l'API ThingSpeak pour envoyer des données de capteurs à votre canal et visualiser les données en temps réel sur le site Web de ThingSpeak. Vous pouvez également configurer des alertes et des actions basées sur des événements en utilisant les fonctionnalités de gestion de l'événement de ThingSpeak [9].

Pour pouvoir télécharger les données sur ThingSpeak à des fins d'analyse et de traitement, vous devez créer votre compte et une chaîne. On suivra les étapes suivantes :

1. Il faut s'inscrire pour avoir un compte sur le site de ThingSpeak.
2. Créer une nouvelle chaîne.
3. Noter la clé API d'écriture et l'ID de canal ces derniers sont nécessaires pour collecter les informations.
4. Les notes complètes sur l'API d'interface REST pour ThingSpeak sont disponibles dans sa documentation.

Les figures (III.16), (III.17), (III.18), (III.19) représentent la configurations de ce travaille :



FIGURE III.16 – Création compte sur ThingSpeak [36].

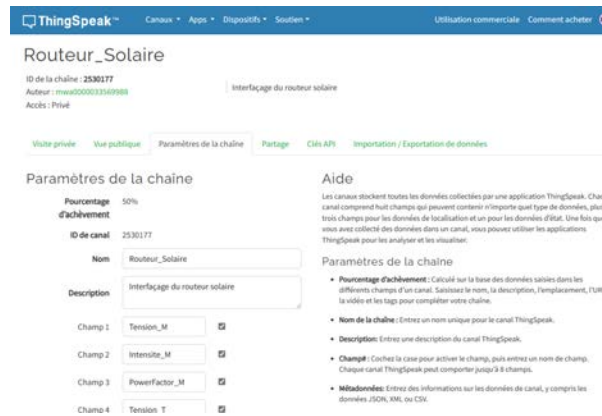


FIGURE III.17 – Création d’une chaîne sur ThingSpeak

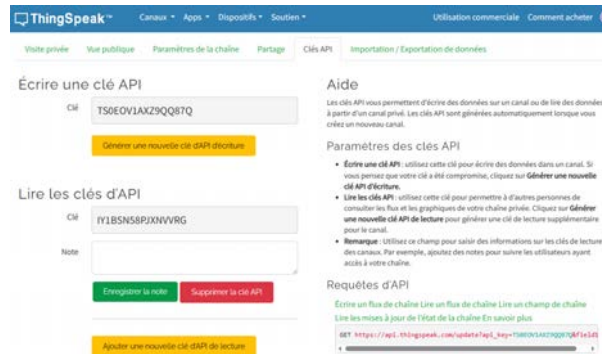


FIGURE III.18 – Extraire API Key

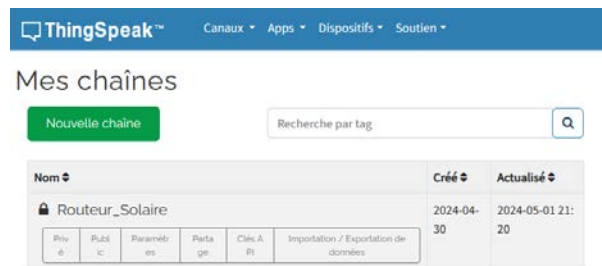


FIGURE III.19 – L’interface du chaîne complet sous ThingSpeak

III.4.4 Résultats sous ThingsSpeak

Les résultats obtenus sur ThingSpeak offrent une représentation visuelle claire des données collectées par le code Arduino intégré à notre chaîne. Nous avons examiné avec des charges résistives de 25 % et jusqu'à 40 %, respectivement. Les graphiques obtenus mettent en évidence diverses mesures telles que le courant, la tension, la puissance et le facteur de puissance, capturées tout au long de la journée du 08-05-2024. Cette visualisation détaillée des données permet une analyse approfondie des performances du système dans différentes conditions de charge.

III.4.4-a Résultats sans panneaux photovoltaïques

Avec une charge résistive de 25 % :

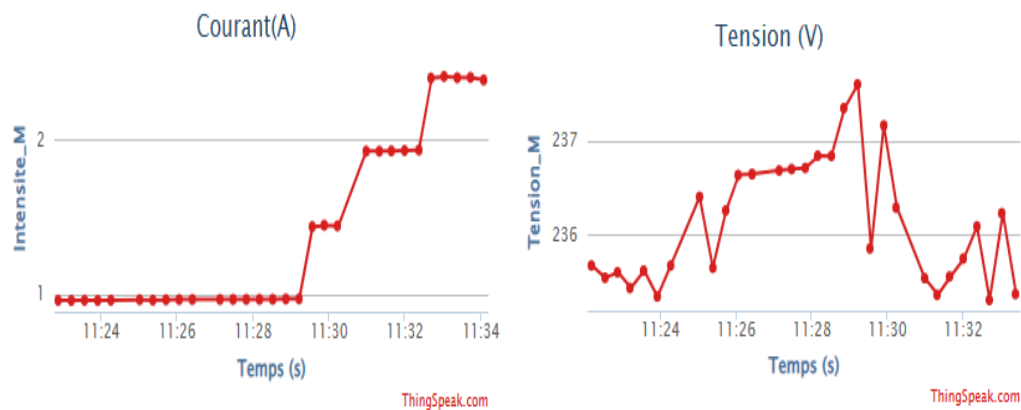


FIGURE III.20 – Résultats courant et tension avec différents charges jusqu'à 25 %.

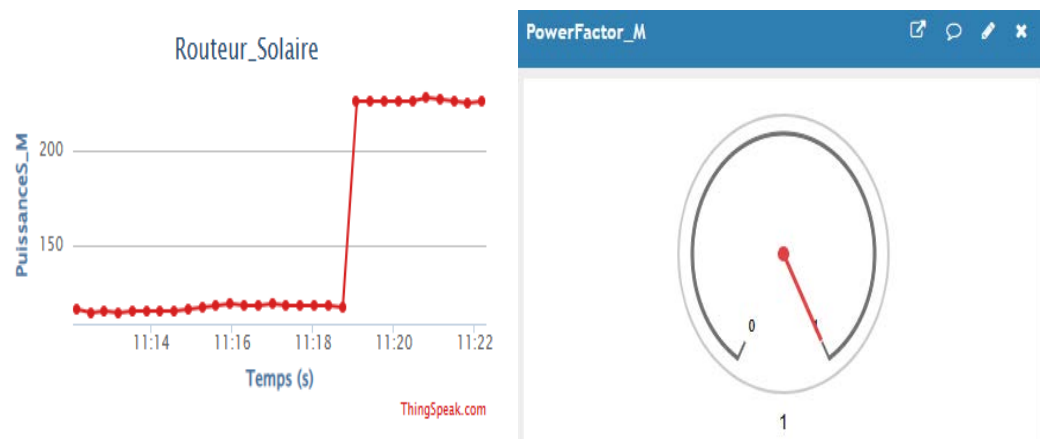


FIGURE III.21 – Résultats puissance et facteur de puissance avec différents charges jusqu'à 25 %.

Résultats avec une charge résistive jusqu'à 40 % :

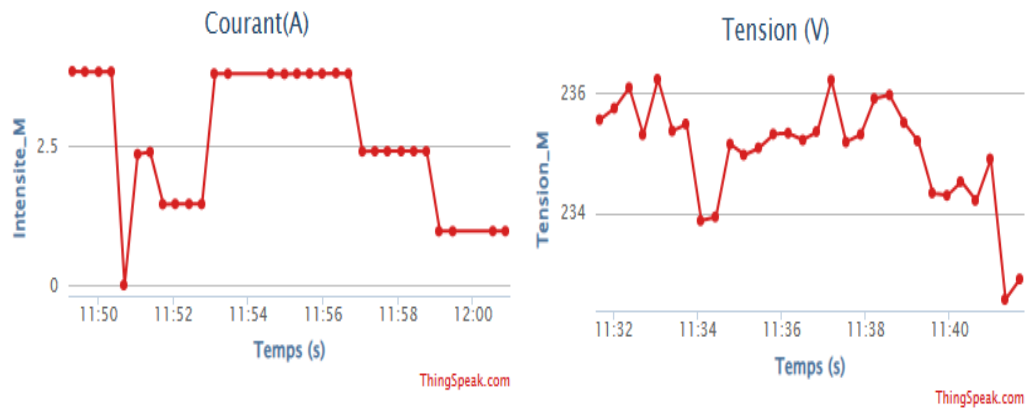


FIGURE III.22 – Résultats courant et tension avec différents charges jusqu'à 40 %.

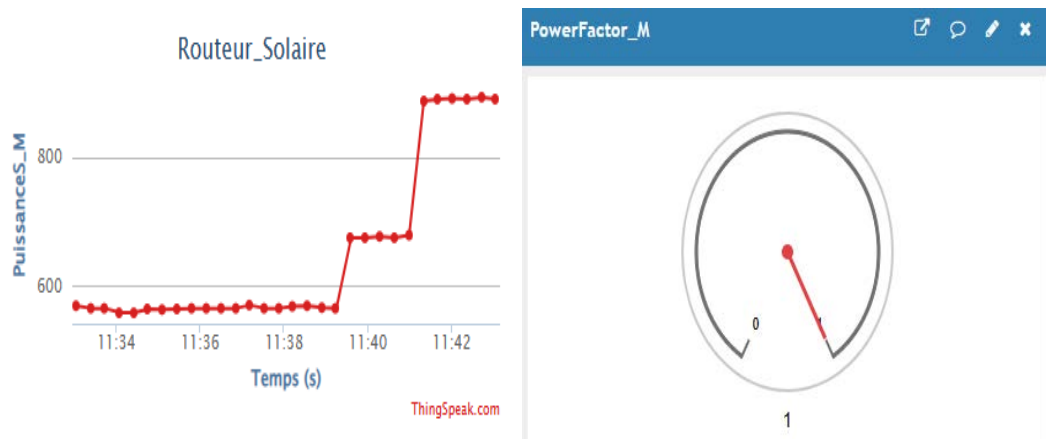


FIGURE III.23 – Résultats puissance et facteur de puissance avec différents charges jusqu'à 40 %.

III.4.4-b Résultats avec panneaux photovoltaïque

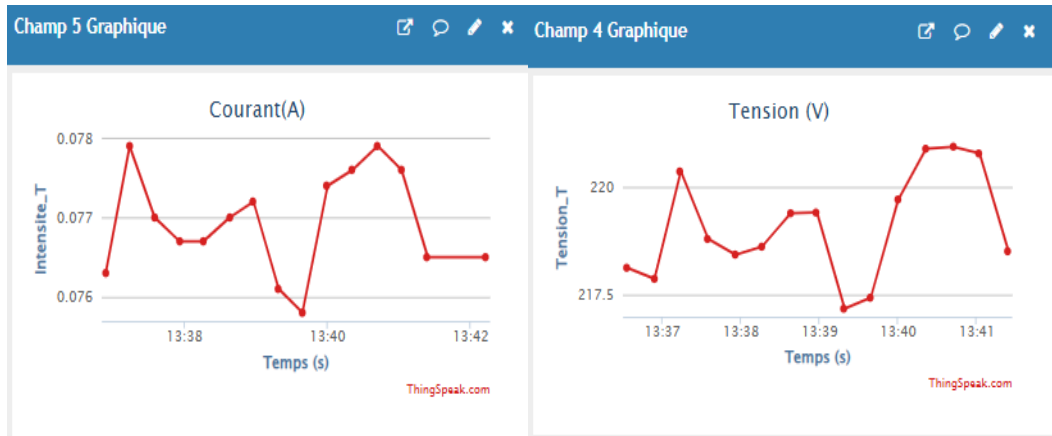


FIGURE III.24 – Résultats courant et tension de triac avec PV.

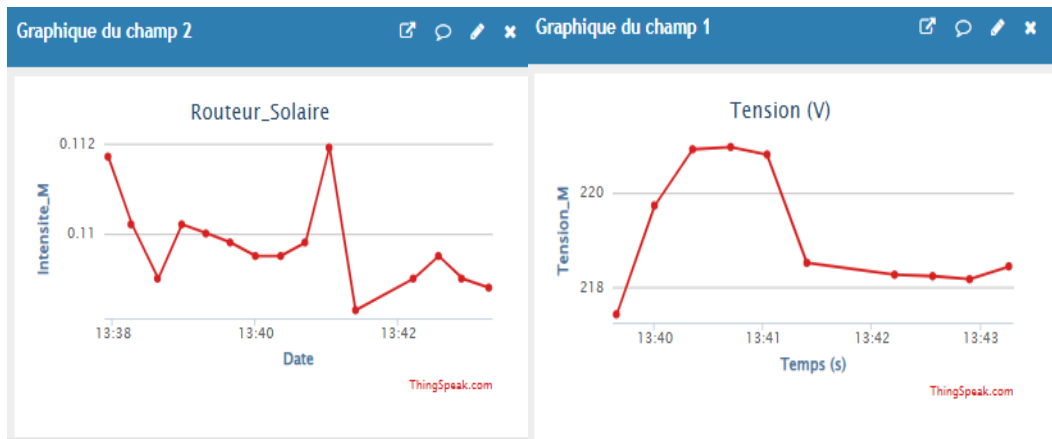


FIGURE III.25 – Résultats courant et tension de maison avec PV.

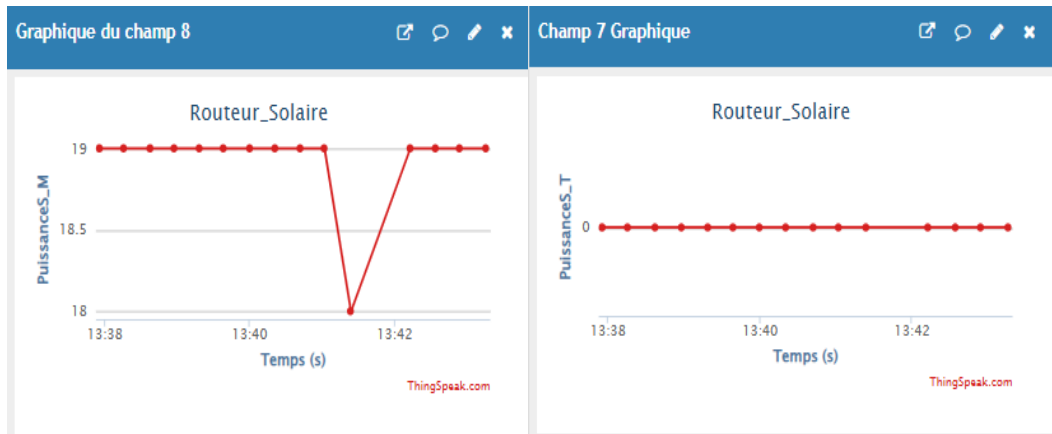


FIGURE III.26 – Résultats puissance soutiré de maison et triac avec PV.

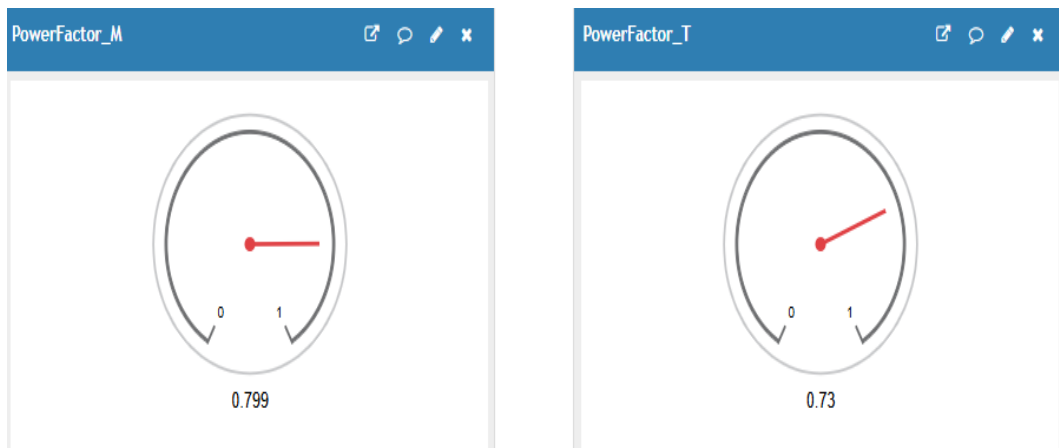


FIGURE III.27 – Facteur de puissance maison et triac avec PV.

III.4.5 Interprétations des résultats :

Le service Thingspeak confirme les résultats obtenues dans la page web.

- L'augmentation de courant et de puissance est similaire à l'augmentation de la charge.
- la diminution de tension efficace en fonction d'augmentation de la charge.
- Facteur de puissance est égale à 1 (charge est purement résistive).

Dans le cas avec panneaux, à chaque fois on a changé la puissance de notre charge supplémentaire (croissement ou décroissement).

- On visualise l'influence de variation du courant et tension dans la sortie du triac comme le montre la figure III.24.
- Dans le cas de maison, le courant et tension est une relation opposé III.25.
- Puisque on a pas un surplus d'énergie, la puissance consommé par la charge supplémentaire est soutiré a travers le réseau III.26.

III.5 Outils logiciels

Les outils logiciels sont des programmes informatiques conçus pour accomplir des tâches spécifiques ou pour faciliter le travail des utilisateurs dans différents domaines. Ils peuvent être utilisés dans une grande variété de contextes, allant du développement de logiciels à la gestion de projets en passant par l'analyse de données et bien d'autres encore. Dans notre projet on va utiliser logiciel [MQTT](#), [Node-Red](#), [Influx db](#) et [Grafana](#), nous les identifierons par la suite.

III.5.1 MQTT-Mosquitto

MQTT est l'abréviation de "Message Queuing Telemetry Transport". Il s'agit d'un protocole de communication M2M (machine to machine) de type messagerie. Il s'appuie sur le TCP/IP comme base de communication. Dans le cas du protocole MQTT, chaque connexion est maintenue ouverte et est "réutilisée" dans chaque communication. Le protocole MQTT fonctionne comme un service de messagerie push avec un modèle éditeur/abonné (pub-sub). Dans ce type d'infrastructure, les clients se connectent à un serveur central appelé broker (courrier) [2]. Le broker a un rôle de relais. Il existe plusieurs types de brokers : ActiveMQ, JoramMQ, Mosquitto ou encore, RabbitMQ [20].

Et en définie que Mosquitto est un serveur de messagerie MQTT open source. Il implémente le protocole MQTT et fournit un moyen pour les appareils clients MQTT de se connecter et de communiquer entre eux. En bref, Mosquitto est une implémentation logicielle du protocole MQTT, agissant comme un courtier (broker) MQTT, facilitant la communication entre les clients MQTT [75].



FIGURE III.28 – Logo Mosquito [4]

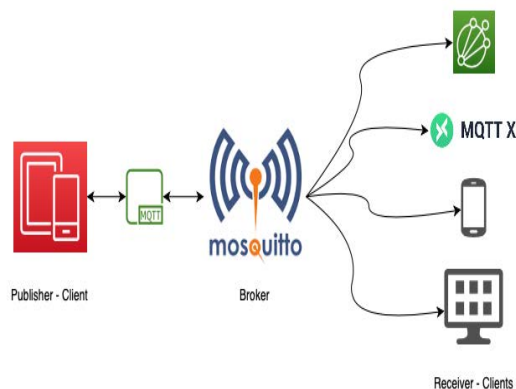


FIGURE III.29 – Exemple d'une configuration Publisher/Subscriber utilisant Mosquitto [3]

Dans la suite ces des définitions concernant ce logiciel [1] :

- * Broker : Le Broker (courtier) est le serveur qui distribue les informations aux clients intéressés connectés au serveur.
- * Client : L'appareil qui se connecte au Broker pour envoyer ou recevoir des informations.
- * Topic : Le nom du message. Les clients publient, s'abonnent ou font les deux à un Topic.
- * Publish : Clients qui envoient des informations au Broker à distribuer aux clients intéressés en fonction du nom de la rubrique.
- * Subscribe : Les clients indiquent au Broker le ou les Topic(s) qui les intéressent. Lorsqu'un client s'abonne à un Topic, tout message publié sur le Broker est distribué aux abonnés de ce Topic. Les clients peuvent également se désabonner pour ne plus recevoir de messages du Broker sur ce Topic.

- * QoS : Qualité de service. Chaque connexion peut spécifier une qualité de service au Broker avec une valeur entière comprise entre 0 et 2. La QoS n'affecte pas le traitement des transmissions de données TCP, seulement entre les clients MQTT.
 - 0 : spécifie au plus une fois, ou une fois et une seule fois sans qu'un accusé de réception ne soit nécessaire. Ceci est souvent appelé « *feu et oublie* ».
 - 1 : spécifie au moins une fois. Le message est envoyé plusieurs fois jusqu'à la réception d'un accusé de réception, autrement appelé livraison avec accusé de réception.
 - 2 : spécifie exactement une fois. Les clients expéditeurs et destinataires utilisent une négociation à deux niveaux pour garantir la réception d'une seule copie du message, appelée livraison assurée.

III.5.2 Node-Red

Node-Red est un langage de développement graphique créé par IBM, au début de l'année 2013. Son objectif est de relier des équipements matériels, des API et des services en ligne pour faciliter l'intégration des IoT (Internet of Things) [37].

Il fait désormais partie de la fondation JS depuis 2016 et est diffusé en open-source. L'éditeur graphique est un service disponible dans un navigateur Internet, mais l'ensemble s'appuie sur NodeJS pour l'exécution (côté serveur) [37].

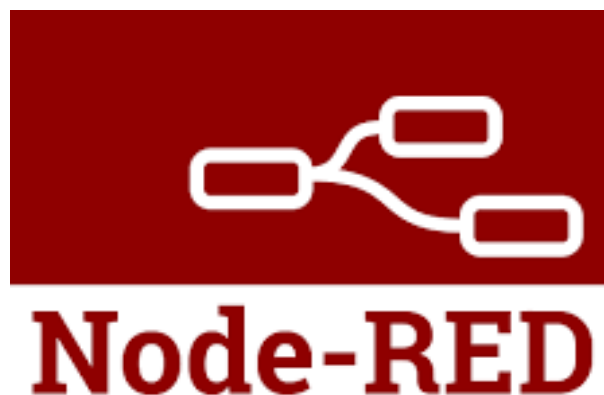


FIGURE III.30 – Logo Node-RED [34].

Node-Red utilise plusieurs types de blocs, dans la barre latérale gauche [37] :

- Les blocs communs sont les plus fréquemment rencontrés.
- Les blocs fonctions sont programmables.
- Les blocs réseaux permettent la communication avec le réseau.
- Les blocs séquences sont des blocs qui facilitent le traitement de données (joindre, séparer, trier ...).
- Les blocs d'analyses travaillent sur la conversion des formats de données (CSV, JSON, XML ...).
- Les blocs de stockage servent pour la gestion des fichiers.

III.5.3 Influx db

InfluxDB est une base de données de séries temporelles open-source conçue pour gérer efficacement de grandes quantités de données temporelles provenant de capteurs, d'appareils IoT, de serveurs de journaux, et d'autres sources des charges d'écriture et de requête élevées. C'est un composant intégral du stack (pile) TICK, Telegraf InfluxDB Chronograf Kapacitor [76].

Time Series Database ou série temporelle est une série de points qui représente une série de mesures identifiées par l'instant auquel elles ont été prises [76].



FIGURE III.31 – Logo influxDb [25].

Ci-dessous quelques fonctionnalités actuellement prises en charge par InfluxDB qui en font un excellent choix pour travailler avec des données de séries temporelles [76] :

1. Datastore haute performance personnalisé écrit spécifiquement pour les données de séries temporelles.
2. Écrit entièrement en Go, un langage de programmation open source, permettant de créer facilement des logiciels simples, fiables avec une efficacité optimale.
3. API HTTP d'écriture et de requête simples et performantes.
4. Les plugins prennent en charge d'autres protocoles d'intégration de données tels que Graphite, collectd et OpenTSDB.
5. Langage de requête expressif de type SQL conçu pour interroger facilement des données agrégées.
6. La politique de rétention (RP) qui est la partie de la structure de données d'InfluxDB qui décrit pendant combien de temps InfluxDB conserve les données.

III.5.4 Grafana

Grafana ou bien Graphite Webapp est une suite analytique et de visualisation de métriques open source. Le plus souvent utilisé pour visualiser des données de séries chronologiques pour l'analyse des infrastructures et des applications, notamment les capteurs industriels, la domotique, la météo et le contrôle des processus. Grafana expose dans des dashboards les métriques brutes ou agrégées provenant de InfluxDB ou d'autres sources de données et permet de définir de manière simple des seuils d'alertes et les actions associées [76].



FIGURE III.32 – Logo Grafana [39].

Grafana dispose d'un large éventail d'applications dans les environnements informatiques. Voici quelques-unes des utilisations courantes de Grafana [39] :

1. Surveillance de l'infrastructure : Grafana peut être utilisé pour surveiller les composants de l'infrastructure tels que les serveurs, les réseaux et les systèmes de stockage.
2. Surveillance des applications : Grafana peut être utilisé pour surveiller les applications et les services, la disponibilité et l'expérience utilisateur.
3. Business Intelligence : Grafana peut être utilisé pour créer des tableaux de bord qui affichent des mesures commerciales telles que les données de vente, le comportement des clients et les analyses marketing.
4. Surveillance de l'IoT : Grafana peut être utilisé pour surveiller les données des appareils IoT, tels que les capteurs et les appareils intelligents. Il peut afficher des mesures telles que la température, l'humidité et la qualité de l'air ... ect
5. Analyse des journaux : Grafana peut être utilisé pour analyser les données des journaux, en fournissant des informations sur les événements et les erreurs du système.

III.6 Interfaçage du routeur sur Influx db et visualisation sur Grafana

Une solution complète pour la collecte, le stockage, l'interrogation et la visualisation des données en temps réel est fournie par l'interfaçage et la surveillance avec InfluxDB et Grafana. les performances, la gestion de l'IoT. En combinant les capacités de gestion des séries temporelles d'InfluxDB avec les fonctionnalités de visualisation de Grafana, vous pouvez créer des tableaux de bord personnalisés et interactifs pour extraire des informations précieuses de vos données en temps réel.

Nous présentons par la suite, le Raspberry Pi que lon a utilisé dans notre projet. Ce dernier est considéré comme le cerveau de notre système parce que joue le rôle d'un serveur Web affichant en temps réel plusieurs valeurs stockée dans une base de données.

III.6.1 Présentation de carte Raspberry Pi

La carte Raspberry est un ordinateur monocarte (single bord computer) à faible coût qui est conçu pour être utilisé dans une grande variété de projets électroniques. Elle est équipée d'un processeur, d'une mémoire vive (RAM), d'un stockage et de ports d'E/S (entrée/sortie) pour la connectivité avec d'autres périphériques [61].

La carte Raspberry est également utilisée dans des projets électroniques professionnels et de bricolage. Elle peut être utilisée pour créer des systèmes de surveillance, des stations

météo, des contrôleurs de domotique, des centres multimédias, des serveurs web, des robots, des systèmes de contrôle de la lumière et bien plus encore [51].

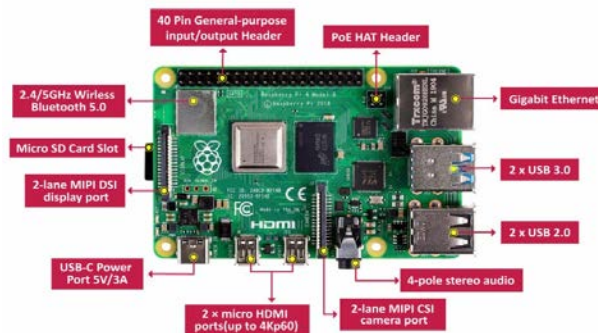


FIGURE III.33 – Raspberry Pi.

Cette carte est disponible dans différentes versions, chacune avec ses propres caractéristiques et spécifications techniques. Les modèles les plus récents sont équipés d'un processeur plus puissant, de plus de mémoire vive et de stockage, ainsi que de connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrée [61].

La carte RaspberryPi à les caractéristiques suivantes [50] :

- **Taille compacte** : Raspberry Pi est un petit appareil compact qui peut être facilement intégré dans divers projets et applications.
- **Faible consommation d'énergie** : Raspberry Pi consomme peu d'énergie, ce qui la rend idéale pour les projets portables alimentés par batterie.
- **Prix abordable** : Raspberry Pi est un ordinateur monocarte abordable, ce qui la rend accessible aux amateurs, aux étudiants et aux éducateurs.
- **Larges options de connectivité** : Raspberry Pi comprend une variété d'options de connectivité, y compris les ports Ethernet, WiFi, Bluetooth et USB, lui permettant de s'interfacer avec une large gamme d'appareils et de périphériques.
- **Broches d'entrée/sortie (E/S) polyvalentes** : Raspberry Pi comprend une entête à 40 broches avec une variété de broches d'E/S, y compris GPIO (General purpose input/output), I2C, SPI et UART, lui permettant de s'interfacer avec divers capteurs, actionneurs et autres composants électroniques.
- **Système d'exploitation basé sur Linux** : Raspberry Pi exécute un système d'exploitation basé sur Linux, offrant un environnement familier et flexible pour le développement et le déploiement de logiciels.
- **Support communautaire solide** : Raspberry Pi dispose d'une communauté importante et active d'utilisateurs, de développeurs et de fabricants, fournissant une multitude de ressources, de didacticiels et de forums pour le support et la collaboration.
- **Utilisations multiples** : Raspberry Pi peut être utilisée pour un large éventail de projets et d'applications, y compris les centres multimédias, les consoles de jeux, les systèmes domotiques et les outils pédagogiques.

III.6.2 Définition d'un serveur

Un serveur basé sur un Raspberry Pi 4 est un système informatique pour accumuler, héberger et disperser des données en temps réel, utilisant un Raspberry Pi 4 comme plateforme.

Le fonctionnement de ce serveur est équivalent à celui d'un serveur traditionnel. Il a un espace de stockage, un système d'exploitation et un logiciel serveur. Lorsque vous accédez au serveur depuis un autre appareil, le serveur traite votre requête et vous fournit une réponse. Les données traitées sont stockées dans une base de données pour un accès et une analyse ultérieures. L'interface utilisateur fournit des fonctionnalités pour interagir avec le serveur, comme la visualisation de graphiques, la configuration des paramètres, ou la déclenchement d'actions automatisées en fonction des données reçues.

III.6.3 Réalisation d'un serveur

Si vous cherchez à créer un serveur pour héberger des sites web, des applications ou tout autre type de service en ligne, Raspberry Pi est une solution abordable et pratique. En effet, ce petit ordinateur dispose de toutes les fonctionnalités nécessaires pour faire fonctionner un serveur. Voici les étapes à suivre pour configurer un serveur sur Raspberry Pi [60] :

Étape 1 : Choisir et installer le système d'exploitation

Consiste à installer le système d'exploitation Raspbian sur votre Raspberry Pi. Il existe plusieurs méthodes pour le faire, mais la plus simple est d'utiliser l'outil NOOBS (New Out Of the Box Software), qui permet d'installer facilement différents systèmes d'exploitation.

Étape 2 : Configuration initiale

Une fois que vous avez installé Raspbian, il est important de mettre à jour le système afin de bénéficier des dernières mises à jour et correctifs de sécurité. Pour cela, on tape les commandes suivantes : `(sudo apt-get update ; sudo apt-get upgrade)`.

Étape 3 : Installation du logiciel serveur

Pour fonctionner le serveur, nous avons besoin d'un ensemble de logiciels tels que Apache (pour héberger des sites web), PHP (pour exécuter du code côté serveur), MySQL (pour gérer une base de données) et on peut installer Samba pour partager des fichiers sur le réseau.

Étape 4 : Accéder au serveur

Pour tester votre serveur web, ouvrez un navigateur web et entrez l'adresse IP de votre Raspberry Pi, et pour une base de données on utilise un client de base de données comme MySQL Workbench et connectez-vous à votre serveur de base de données.

Vous pouvez maintenant déployer vos applications web ou services sur votre Raspberry Pi en fonction de vos besoins.

Pour un bon fonctionnement de serveur et ne marquer pas des problèmes il faut savoir c'est deux choses :

- Assurez de sauvegarder régulièrement les données et configurations pour éviter toute perte en cas de problème.
- Mettez régulièrement à jour le système d'exploitation et les logiciels installés pour bénéficier des dernières fonctionnalités et correctifs de sécurité.

III.7 Conclusion

En concluant, la conception logicielle du routeur solaire IoT implique le calcul des valeurs efficaces de la tension et du courant, ainsi que des puissances active et apparente. Le code implémente diverses fonctionnalités essentielles au bon fonctionnement du système. L'interfaçage du routeur sur une page Web permet de visualiser et d'interpréter les données collectées. L'intégration à un service en ligne comme ThingSpeak offre une plateforme supplémentaire pour le suivi et l'analyse des performances du système solaire. L'utilisation d'outils logiciels tels que MQTT-Mosquito, Node-Red, InfluxDB et Grafana facilite la gestion des données collectées par le routeur IoT.

Chapitre IV

Tests de validation et analyse des données expérimentales

SOMMAIRE

IV.1 INTRODUCTION	67
IV.2 MÉTHODOLOGIE DU PROJET	67
IV.3 MQTT	67
IV.3.1 Configuration Raspberry Pi avec Mosquitto	68
IV.3.2 Résultats	68
IV.4 NODE-RED	69
IV.4.1 Configurations sur Raspberry Pi	69
IV.4.2 Résultats	70
IV.5 GRAFANA	71
IV.5.1 Configuration de Influx-db	71
IV.5.2 Dashbord	71
IV.5.3 Résultats du système	72
IV.5.4 Interprétations des Résultats	74
IV.6 CONCLUSION	74

IV.1 Introduction

Grâce à l'utilisation conjointe d'InfluxDB et de Grafana, il est plus facile de collecter, stocker, analyser et visualiser des données en temps réel. Ces outils sont couramment employés pour surveiller les infrastructures, améliorer les performances et gérer les systèmes IOT. En combinant les capacités avancées de surveillance d'InfluxDB avec les fonctionnalités graphiques riches de Grafana, la possibilité de créer des tableaux de bord personnalisés et dynamiques pour obtenir des informations précises et exploitables à partir de vos données en temps réel.

IV.2 Méthodologie du projet

Dans cette partie, nous explorons en détail la méthodologie et les résultats des tests effectués dans le cadre du projet. Il se concentre sur l'utilisation de technologies telles que MQTT, Node-RED et Grafana pour la collecte, l'analyse et la visualisation des données. La configuration de Raspberry Pi avec Mosquitto, l'installation et la programmation de Node-Red, ainsi que la visualisation des données sur Grafana sont examinées en profondeur.

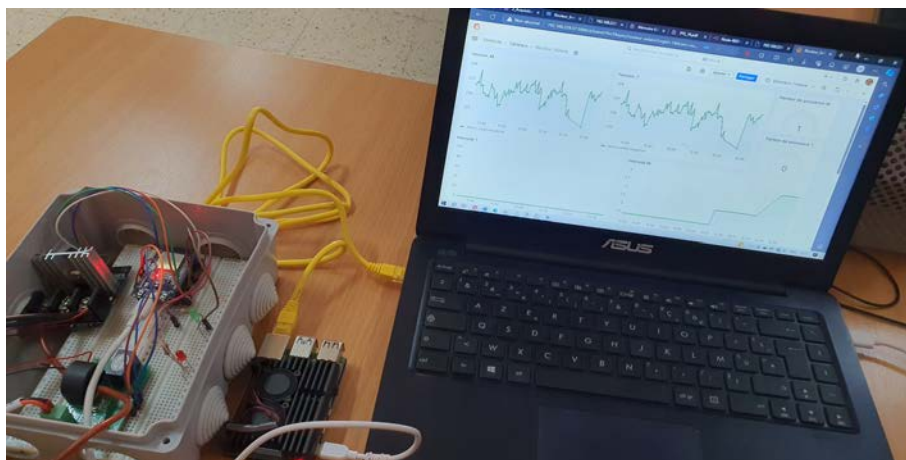


FIGURE IV.1 – Création d'un serveur avec notre boîtier .

IV.3 MQTT

Le but de notre projet est de surveiller à distance la production d'énergie générée par un système solaire. Pour ce faire, l'ESP32 peut être utilisé en conjonction avec ce logiciel pour évaluer la puissance générée par le système solaire et transmettre ces informations à un serveur MQTT. MQTT est un protocole très adapté pour communiquer avec un ESP32 dans un projet IOT. Il est facile de se connecter à un broker, de publier des données et de s'abonner à des commandes.

IV.3.1 Configuration Raspberry Pi avec Mosquitto

La configuration d'un Raspberry Pi avec Mosquitto implique plusieurs étapes pour installer et sécuriser le broker MQTT sur cet appareil. Voici un résumé des étapes à suivre :

1. Installation de Mosquitto sur Raspberry Pi : on utilise la commande "**sudo apt install mosquitto mosquitto-clients**", pour la vérification de l'installation on utilise "**sudo systemctl status mosquitto**".
2. On ajoute des instructions spéciales pour le broker MQTT dans le code ESP32 pour lire ces paramètres et les afficher sur le moniteur série, comme la bibliothèque `(#include <PubSubClient.h>)` pour la gestion Mqtt.

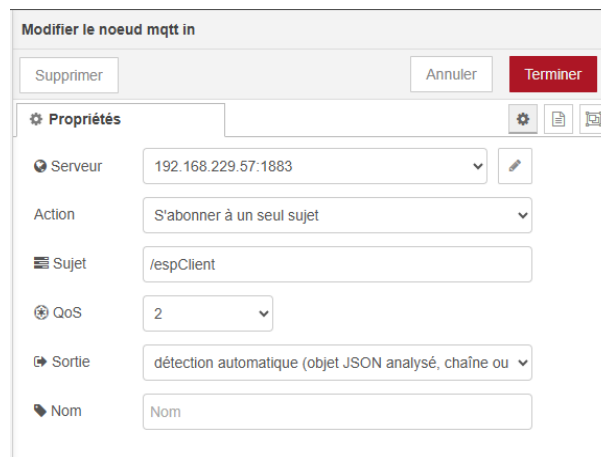


FIGURE IV.2 – Configuration paramètres noeud mqtt sur la RaspberryPi.

IV.3.2 Résultats

Après le téléversement du code sur notre carte de développement ESP32, le code va afficher que le broker mqtt est connecté et toutes les mesures que nous avons besoin :

```
ESP32 ON depuis : 0.15 heures
09:45:07.590 -> Mesure Température invalide Attempting MQTT connection...connected
09:45:36.774 -> {"Puissance_T":0,"PuissanceI_T":0,
" Tension_T":229.7940063,
"Intensite_T":0,
"PowerFactor_T":0,
"Energie_T_Soutiree":0,
"Energie_T_Injectee":0,
"Frequence":49.93999863,
" Puissance_M":216,
" PuissanceI_M":0,
" Tension_M":229.7940063,
"Intensite_M":0.940000011,
"PowerFactor_M":1,
"Energie_M_Soutiree":4752,
"Energie_M_Injectee":820}
09:45:36.808 -> Niveau Signal WIFI:-70
09:45:36.808 -> IP adresse: 192.168.229.150
09:45:36.808 -> WIFIbug:0
09:45:36.808 -> Charge Lecture RMS (cœur 0) en ms - Min : 2 Moy : 2 Max : 3
09:45:36.808 -> Charge Boucle générale (cœur 1) en ms - Min : 1 Moy : 1 Max : 1578
```

FIGURE IV.3 – Résultats code MQTT sur le moniteur de l'IDE .

IV.4 Node-Red

Pour configurer un système IoT où l'ESP32 envoie des données à un broker MQTT sur le Raspberry Pi, et Node-RED récupère et affiche ces données sur un tableau de bord web. Cette architecture vous permettra de contrôler et de surveiller votre système ESP32 à distance depuis le Raspberry Pi.

```
Welcome to Node-RED
-----
28 May 16:39:50 - [info] Node-RED version: v3.1.0
28 May 16:39:50 - [info] Node.js version: v18.19.0
28 May 16:39:50 - [info] Linux 6.6.20-rpt-rpi-v8 arm LE
28 May 16:39:53 - [info] Loading palette nodes
28 May 16:39:56 - [info] Settings file : /home/raspberry/.node-red/settings.js
28 May 16:39:56 - [info] Context store : 'default' [module=memory]
28 May 16:39:56 - [info] User directory : /home/raspberry/.node-red
28 May 16:39:56 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
28 May 16:39:56 - [info] Flows file : /home/raspberry/.node-red/flows.json
28 May 16:39:56 - [info] Server now running at http://127.0.0.1:1880/
28 May 16:39:56 - [warn]

-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.

If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

You should set your own key using the 'credentialSecret' option in
your settings file. Node-RED will then re-encrypt your credentials
file using your chosen key the next time you deploy a change.
-----
28 May 16:39:56 - [info] Starting flows
28 May 16:39:56 - [info] Started flows
28 May 16:39:56 - [info] [mqtt-broker-2b194d65f13439f1] Connected to broker: mqtt://192.168.229.57:1883
```

FIGURE IV.4 – Installation de node-red sur la Raspberry Pi .

IV.4.1 Configurations sur Raspberry Pi

La configuration de node-red consiste à exécuter des commandes sur notre RaspberryPi, premièrement (`sudo apt install nodejs npm`), (`sudo npm install -g --unsafe-perm node-red`) pour installer node-red sur la Raspberry Pi. Deuxièmement, pour ouvrir la fenêtre de node-red il faut exécuter cette commande (`node-red`). Ainsi, dans notre navigateur Web nous accédons à l'interface utilisateur de Node-RED en entrant l'adresse IP de notre Raspberry Pi suivie du port 1880 (`http ://192.168.229.57 :1880`).

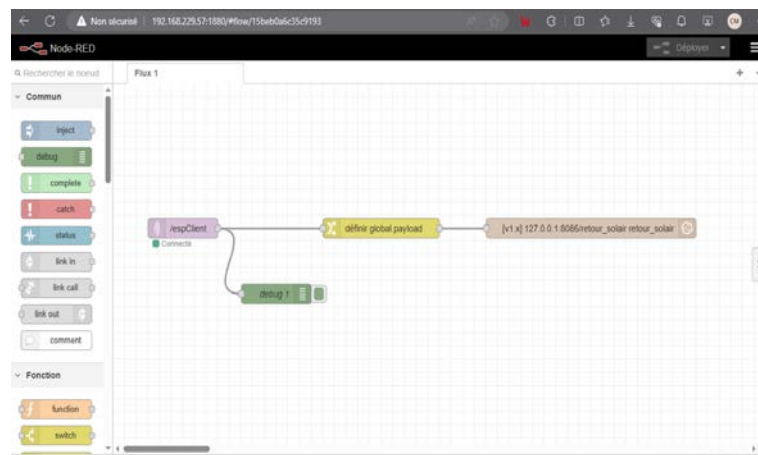


FIGURE IV.5 – Schéma du système sur Node-Red .

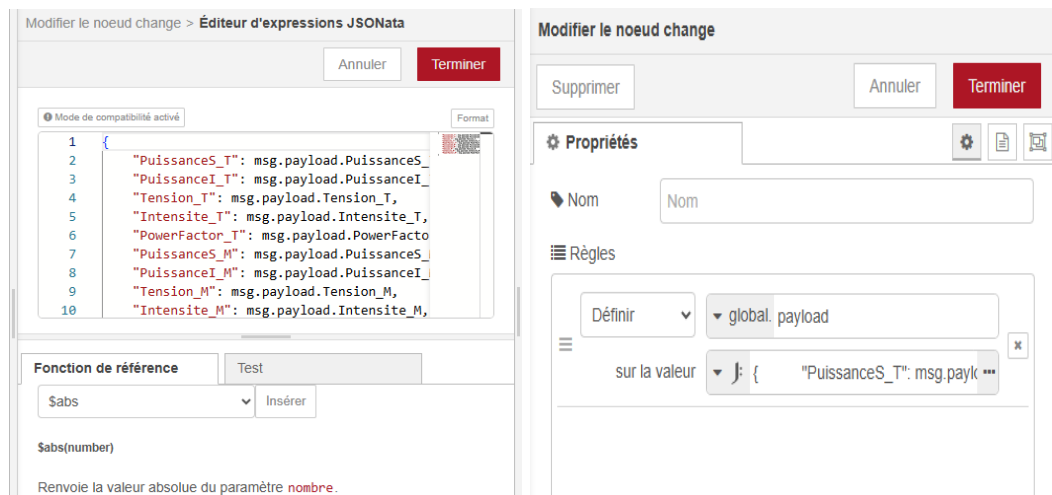


FIGURE IV.6 – Configuration Node-Red .

IV.4.2 Résultats

Le code est exécuté et affiche que la connexion entre mqtt et broker est connectée entre eux, donc les données sont téléversées sur notre navigateur Node-RED, comme le montre la figure (IV.8).

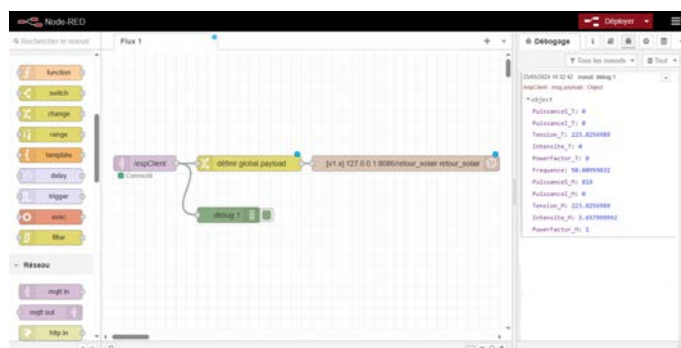


FIGURE IV.7 – Interface Node-red avec broker MQTT.

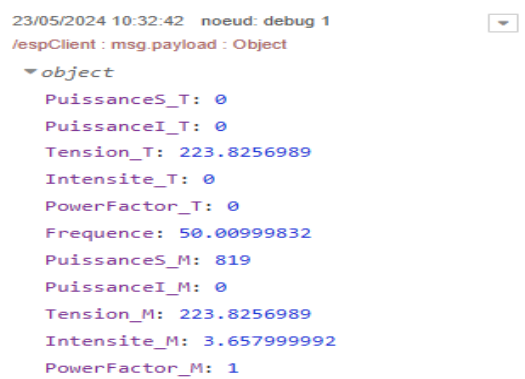


FIGURE IV.8 – Résultats obtenus sur Node-red .

IV.5 Grafana

Grafana permet de visualiser les données stockées dans InfluxDB, offrant des fonctionnalités avancées pour interroger et visualiser les données de séries temporelles.

IV.5.1 Configuration de Influx-db

Il est possible de configurer InfluxDB pour stocker nos données de série temporelle et d'utiliser Node-RED pour envoyer facilement ces données vers InfluxDB. Et pour cette configuration, on a besoin de quelques commandes que nous avons exécutées sur notre Raspberry Pi comme : (`sudo apt-get install influxdb` , `sudo apt install influxdb-client`), pour l'installation d'influxDB, la commande (`influx`) ou bien : (`influx -execute "CREATE DATABASE << retour_solaire >>"`)) pour la création d'une base de données.

Après avoir configuré InfluxDB et Node-RED pour envoyer des données, il est temps d'intégrer Grafana dans notre système. Une fois Grafana installé sur notre Raspberry Pi, on a exécuter à nouveau la commande d'accès à la base de données InfluxDB (`sudo systemctl start influxdb`, `sudo systemctl start grafana-server`) . Cette étape est permettre de configurer la source de données Grafana et de visualiser les données de série temporelle. Grâce à cette intégration transparente, Nous pouvons désormais un tableau de board complet , combinant les fonctionnalités puissantes d'InfluxDB, Node-RED et Grafana sur notre Raspberry Pi.

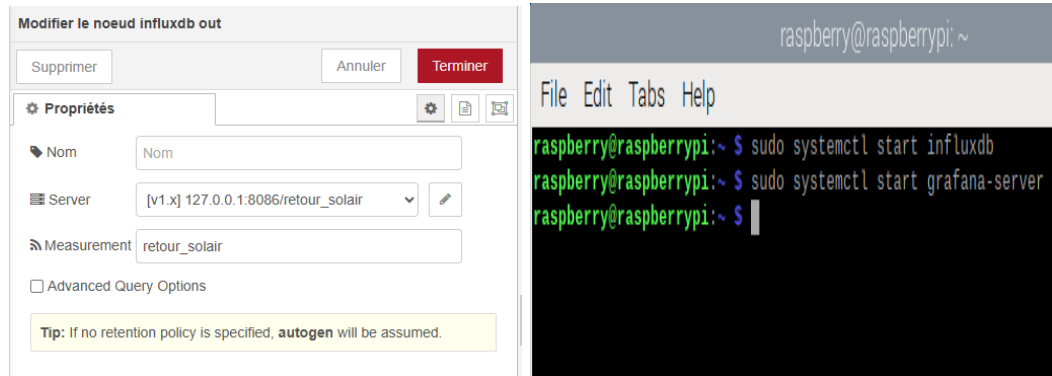


FIGURE IV.9 – Configuration Influx-db.

IV.5.2 Dashboard

Un dashboard Grafana présente l'avantage d'offrir une visualisation claire et efficace des données. Offrant aux utilisateurs la possibilité de surveiller, analyser et piloter leurs données de manière intuitive. Les fonctionnalités avancées de Grafana rendent possible la prise de décisions éclairées en offrant une représentation graphique des données. Cela permet une meilleure compréhension des échelles et une surveillance proactive des systèmes.

1. Configuration et connexion de la source des données avec InfluxDB.
2. Connectez à Grafana et cliquez sur "Ajouter" pour créer un nouveau dashboard et renommer le.

3. Sur la page de création du dashboard, cliquez sur "Ajouter une visualisation" pour ajouter un nouveau panneau.
4. Dans la fenêtre de configuration du panneau, sélectionnez le type de graphique approprié, comme "Time series", pour afficher les mesures dans le temps.
5. Configurez les options du panneau telles que le titre, la plage de temps, l'échelle, etc.
6. Sous l'onglet "Metrics", sélectionnez la source de données solaire comme dans notre cas, en choisissant "retour_solaire" et choisissez les mesures que vous souhaitez afficher, comme la tension, le courant, la puissance, etc.
7. Personnalisez les options de visualisation du graphique selon vos préférences.

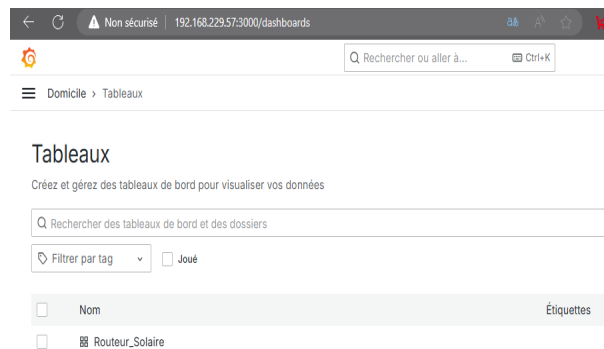


FIGURE IV.10 – Tableau de bord Grafana .

IV.5.3 Résultats du système



FIGURE IV.11 – Tension efficace.

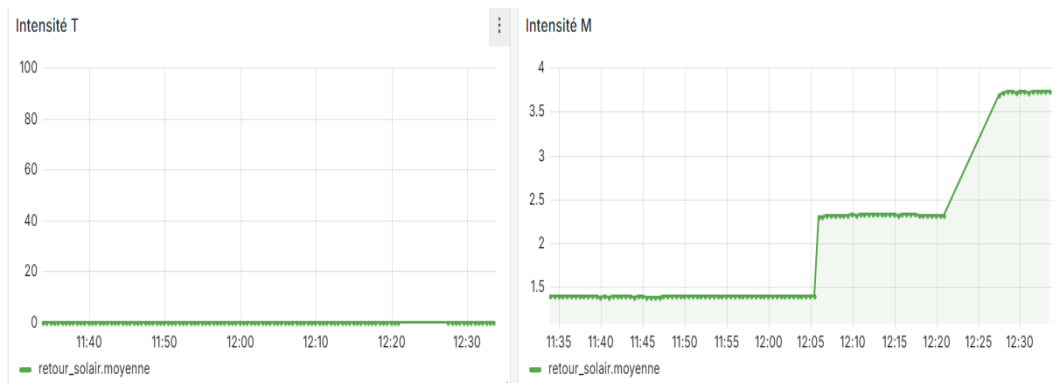


FIGURE IV.12 – Courant efficace.

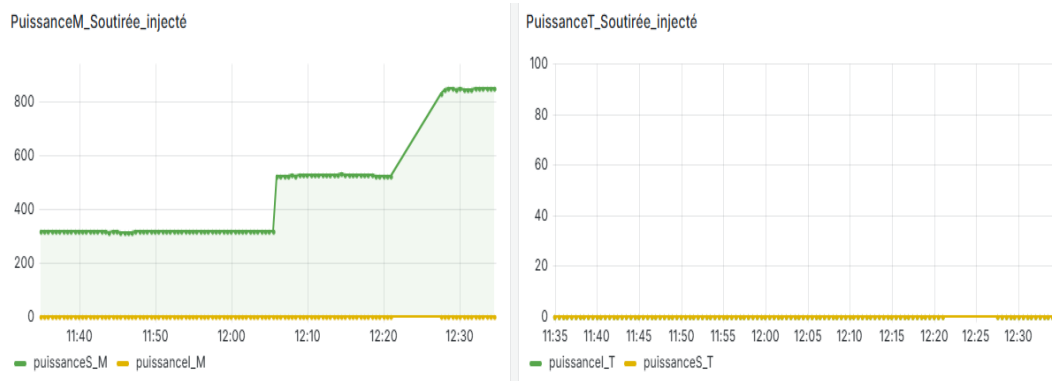


FIGURE IV.13 – Puissance Soutirée et injectée.



FIGURE IV.14 – Facteur de puissance.

IV.5.4 Interprétations des Résultats

La tension mesurée est la valeur efficace de la tension de notre système sans panneaux dans une durée d'une heure donc, on observe que la tension est environ de $228V$ dans les deux cas soit tension maison ou bien la deuxième sonde est c'est la tension de notre réseau qui'il montre que notre montage fonctionne dans le bon rythme.

L'instabilité de la tension est à cause de la variation de la charge dans le réseau et quand l'on ajoute et retire une charge (charge et décharge) la tension va être perturbée.

Le courant mesuré c'est l'intensité de notre système sans panneaux dans une durée d'une heure donc, premièrement le courant M (maison) affiche une augmentation jusqu'à $3.8 A$, Nous avons effectué des cycles de charge et de décharge pour obtenir des variations de courant efficace. Cela signifie que nous avons ajouté et supprimé des charges à intervalles réguliers, entraînant des augmentations et des diminutions du courant efficace au fil du temps. En observant ces variations de courant, nous pouvons obtenir des informations sur la demande d'énergie du système, sa capacité de charge et de décharge, ainsi que la stabilité globale de l'alimentation électrique. Ces données nous permettent d'analyser le comportement du système et d'identifier d'éventuels problèmes liés à l'instabilité du réseau. Et le courant T (deuxième sonde) affiche $0 A$ parce que nous n'avons pas de charge des panneaux.

Nous avons remarqué que la consommation de puissance de la maison a augmenté jusqu'à $820 W$ en raison de l'augmentation de la charge d'utilisation. La puissance injectée est nulle car nous sommes sans panneaux photovoltaïques.

Le facteur de puissance (power factor) est une mesure de l'efficacité avec laquelle l'énergie électrique est convertie en travail utile dans un système. Il est défini comme le rapport de la puissance active à la puissance apparente. Un facteur de puissance idéal est 1, ce qui signifie que toute l'énergie électrique fournie est utilisée efficacement pour effectuer un travail utile. Notre système affiche 1 parce que nous n'avons pas de consommation par le réseau (nous n'avons pas d'injection des panneaux photovoltaïques).

IV.6 Conclusion

Ce chapitre met en lumière l'importance de ces outils dans le processus de validation des données expérimentales, offrant des insights précieux pour interpréter les résultats obtenus. Il aborde l'interface du routeur sur Influxdb et la visualisation des données sur Grafana, en présentant la carte Raspberry Pi4, la réalisation d'un serveur basé sur cette carte, et les outils logiciels utilisés tels que MQTT, Mosquitto, Node Red, Influxdb, Grafana, entre autres. Met en avant l'importance de la mise en œuvre de ces différentes interfaces logicielles pour la création de systèmes électroniques avancés et la visualisation efficace des données collectées.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire consiste en la surveillance d'un système photovoltaïque avec un mode d'autoconsommation utilisant un routeur solaire connecté via la technologie IOT. Le système collecte les données électriques de l'installation solaire et les transmet via WiFi à l'aide de l'ESP32 et du Raspberry Pi. Les données sont stockées dans une base de données temporelle et sont accessibles via une page Web ou un appareil mobile. Pour cela, on a organisé ce travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons fait des généralités sur le système solaire photovoltaïque, les différents types de cellules avec leur circuit équivalent. Ensuite, on a présenté le principe de la poursuite du point maximum de la puissance (MPPT). Puis nous avons abordé des explications sur les onduleurs et les micro-onduleurs avec une comparaison entre eux soulignant l'importance du choix. À la fin, on a défini l'autoconsommation et ses différents types et leurs avantages.

Le deuxième chapitre parle sur la réalisation de notre projet avec les différents matériels utilisés. Premièrement, nous avons présenté notre carte de développement ESP32, en fait une description de cette carte avec ses caractéristiques et ces broches. Deuxièmement, nous parlons de notre capture utilisée JSY-MK-194T, triac et comment en changer le dissipateur en cas d'échauffement. Enfin, dans l'essai pratique, nous avons défini tous les matériels nécessaires pour la réalisation de ce routeur.

Le troisième chapitre, basé sur la réalisation logicielle pour l'interfaçage et la surveillance de notre système sur une plate-forme page Web et un service en ligne Thingspeak. Ainsi, nous avons utilisé Arduino IDE comme logiciel pour programmer notre code qui permettra de collecter et stocker les données en temps réel depuis n'importe quel appareil connecté à Internet. Enfin, nous avons défini les quatre logiciels utilisés, MQTT, Node-Red, InfluxDB et Grafana, pour la création d'un serveur à base d'une Raspberry Pi.

Le quatrième chapitre montre la configuration de notre serveur sur la Raspberry Pi. Ainsi, la surveillance d'InfluxDB et la création des tableaux de bord « dashboard » sur Grafana, nous avons abordé les tests de validation et l'analyse des données expérimentales de notre routeur photovoltaïque pour garantir le bon fonctionnement et l'efficacité opti-

male des systèmes IoT de gestion intelligente de l'énergie solaire pour obtenir des données et des informations précises.

En conclusion, l'utilisation de systèmes IoT, tels que des panneaux solaires intelligents et des technologies de suivi solaire, joue un rôle crucial dans l'optimisation de la consommation d'énergie et la réduction des coûts associés aux sources d'énergie traditionnelles. L'intégration de dispositifs IoT, de protocoles de communication et de plateformes permet une gestion efficace de l'énergie, des solutions d'éclairage intelligent et une surveillance en temps réel de la consommation d'énergie. Ces systèmes visent à résoudre les défis liés à la consommation excessive d'énergie, aux factures d'électricité élevées et aux sources d'énergie peu fiables, offrant ainsi une solution durable et rentable pour nos besoins.

Les obstacles que nous avons rencontrés

- Si notre charge résistante atteint 1500 W, le triac est chauffé, donc nous devons remplacer le dissipateur thermique.
- En cas de coupure d'électricité, il est nécessaire de réinitialiser Raspberry Pi pour pouvoir poursuivre le travail.

Perspectives pour les travaux à venir

- Tout d'abord, il est essentiel d'explorer davantage les possibilités d'intégration de l'IoT pour optimiser l'autoconsommation d'énergie solaire, en mettant l'accent sur la coordination intelligente des appareils électriques avec la production d'énergie.
- De plus, il serait précieux de concevoir des systèmes plus avancés pour surveiller et assurer la maintenance à distance, ce qui permettrait une gestion proactive et efficace de l'énergie solaire.
- En outre, l'exploration de nouvelles technologies et normes, telles que le standard Matter, pour renforcer l'interopérabilité des appareils dans les maisons connectées, ouvre la voie à des solutions plus intégrées et interconnectées.
- Enfin, il est crucial de se concentrer sur l'optimisation de l'efficacité énergétique, la prévision de la demande et la gestion intelligente de l'énergie solaire.
- En s'appuyant sur les avancées de l'IoT, nous offrons des solutions durables et innovantes dans le domaine de l'autoconsommation photovoltaïque.

Bibliographie

- [1] Le protocole mqtt une simple introduction.
- [2] Qu'est-ce que le protocole mqtt. <https://www.ip-systemes.com/details-comprendre+le+protocole+mqtt-795.html>, 05-07-2021.
- [3] Streaming flutter events with mosquitto mqtt broker. <https://betterprogramming.pub/streaming-flutter-events-with-mosquitto-mqtt-broker-28998a3b81c2>, 05-08-2022.
- [4] How to setup your own mqtt broker. <https://obrienlabs.net/how-to-setup-your-own-mqtt-broker/>, 18-08-2018.
- [5] Photovoltaïque : fonctionnement et technologies. https://document.environnement.brussels/opac_css/index.php?lvl=publisher_seeid=1, 2011.
- [6] Vers les énergies renouvelables. <https://www.cairn.info/les-energies-renouvelables-9782130626350-page-11.htm?contenu=resume>, 2014.
- [7] Apprendre et comprendre "le triac". <https://emreemic.wordpress.com/2017/02/07/le-triac/>, 2017.
- [8] [tuto] : Les sleep modes de l'esp32. <https://letmeknow.fr/fr/blog/142-tutoriel-les-sleep-modes-de-lesp32>, 2019.
- [9] Envoyer des données (température et humidité) vers le site thingspeak avec arduino. <https://www.robotique.tech/tutoriel/envoyer-des-donnees-temperature-et-humidite-vers-le-site-thingspeak-avec-arduino/>, 2020.
- [10] Panneau photovoltaïque : qu'est-ce que c'est? <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-panneau-photovoltaique-7973/description-dun-panneau-photovoltaique>, 2020.
- [11] Les différentes architectures du solaire photovoltaïque. <https://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/architectures-solaire-photovoltaique/>, 2021.
- [12] Quelle est la puissance d'un panneau solaire photovoltaïque? <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/puissance-panneau-solaire.html>, 2021.
- [13] Qu'est-ce que l'autoconsommation? <https://www.sirenergies.com/article/autoconsommation-efficacite-energetique-reduction-facture/>, 2021.

- [14] Qu'est-ce qu'un panneau photovoltaïque? définition simple, <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/qu-est-ce-qu-un-panneau-photovoltaique-definition-simple.html>, 2021.
- [15] Arduino ide. <https://robdomo.com/ressources/logiciels/ide-arduino/arduino-ide-1-8-19/>, 2022.
- [16] Créer des interruptions gpio esp32 pour réduire l'utilisation du processeur. <https://www.upesy.com/blogs/tutorials/what-are-interrupts-in-esp32-with-examples-for-arduino-code>, 2022.
- [17] Kit solaire autoconsommation avec batterie - avel heol. <https://avelheol.fr/101-kit-solaire-autoconsommation-avec-batterie>, 2022.
- [18] Micro-onduleur. <https://www.edfenr.com/lexique/micro-onduleur/>, 2022.
- [19] Model railway by nitrathor. <https://www.nitrathor.fr/fiches/ide-arduino>, 2022.
- [20] Mqtt : comment fonctionne ce protocole? <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1440686-mqtt-comment-fonctionne-ce-protocole/>, 2022.
- [21] Le bim dans la construction. <https://biblus.accasoftware.com/fr/les-differents-types-de-systemes-photovoltaiques-caracteristiques-et-avantages/>, 2023.
- [22] *Datasheet ESP32WROOM32*. Thèse de doctorat, 2023.
- [23] *Datasheet ESP32WROOM32*. Thèse de doctorat, 2023.
- [24] How to connect to a wifi network with the esp32. <https://www.upesy.com/blogs/tutorials/how-to-connect-wifi-acces-point-with-esp32>, 2023.
- [25] Influxdb logo télécharger. <https://www.logo.wine/logo/InfluxDB>, 2023.
- [26] Installation solaire : Quelles différences entre un onduleur central et un micro-onduleur? <https://www.maisonsur.com/blog/energie-solaire/difference-onduleur-central-micro-onduleur>, 2023.
- [27] le photovoltaïque éco-responsable. <https://www.civisol.fr/info/8-le-panneau-solaire-photovoltaique> : :text=La2023.
- [28] Module variateur pour 16/24a 600v haute charge, 1 canal, logique 3.3v/5v. <https://robotdyn.com/fr/module-variateur-pour-16-24a-600v-haute-charge-1-canal-logique-3-3v-5v/>, 2023.
- [29] Onduleurs vs. micro-onduleurs : Comment choisir? <https://sunteq.fr/connaissance-appfondie/onduleurs-vs-micro-onduleurs/>, 2023.
- [30] Quelles sont les caractéristiques d'un panneau solaire? <https://www.jade-technologie.com/caracteristiques-dun-panneau-solaire/>, 2023.
- [31] Qu'est ce qu'un micro onduleur- allo solar. <https://allo.solar/base-de-connaissances/qu-est-ce-qu-un-micro-onduleur.html>, 2023.
- [32] Rendement des panneaux solaires : un guide complet. <https://www.engie-green.fr/en/rendement-panneau-solaire/>, 2023.
- [33] Conversion d'énergie dans centrale solaire photovoltaïque-colibri solar. <https://www.colibri.solar/centrale-solaire-sol/quelle-conversion-energie-solaire-se-fait/>, 2024.

- [34] Node-red. <https://en.wikipedia.org/wiki/Node-RED>, 2024.
- [35] Réveil connecté au wi-fi à laide de lesp-32. <https://github.com/baberle/ESP32AlarmClock>, 2024.
- [36] Thingspeak for iot. https://thingspeak.com/pages/commercial_earn_more, 2024.
- [37] Programmation low-code. *CERTA*, page 5, 23/03/2023.
- [38] Quel est le rendement d'un panneau solaire? vérité et calcul. <https://mypower.engie.fr/conseils/energie-solaire/production-energie-solaire/rendement-panneau-solaire.html>, 23/08/2023.
- [39] Grafana : An open-source platform for data visualization and monitoring in it environments. <https://kalpchobisa.hashnode.dev/grafana-an-open-source-platform-for-data-visualization-and-monitoring-in-it-environments>, 31-03-2023.
- [40] Grine ABDERRAHMANE : Etude caractéristique des panneaux photovoltaïque système arduino.
- [41] AMIRI SAMIR ABED OUSSAMA : *Etude et Réalisation d'un système de reconnaissance faciale basé sur une carte ESP32-cam et la librairie OpenCV pour le langage Python*. Thèse de doctorat, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [42] Salhi AMMAR et Boukerker HATEM : *Etude et réalisation d'un système d'irrigation intelligente*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Technologies, 2021.
- [43] ANDRÉ : Triacs gradateurs pour routeur photovoltaïque. <https://f1atb.fr/fr/triac-gradateur-pour-routeur-photovoltaïque/>, 2023.
- [44] F1ATB ANDRÉ : capteur-linky. <https://f1atb.fr/fr/capteur-linky-pour-routeur-photovoltaïque/>, 2024.
- [45] F1ATB ANDRÉ : capteur-shelly-em. <https://f1atb.fr/fr/capteur-shelly-em-pour-routeur-photovoltaïque/>, 2024.
- [46] F1ATB ANDRÉ : Capteur unix2 ou unix3 pour routeur photovoltaïque. <https://f1atb.fr/fr/capteur-unix2-pour-routeur-photovoltaïque/>, 2024.
- [47] F1ATB ANDRÉ : Routeur photovoltaïque simple à réaliser. <https://f1atb.fr/fr/routeur-photovoltaïque-simple-a-realiser/>, 2024.
- [48] AOUN Zoulikha BENCHAFI MERIEM : *Réalisation d'un système d'acquisition et de monitoring pour une microcentrale solaire photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen, 2023.
- [49] Cedric CABAL : *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [50] Julien CARTAILLER et Richard ROCCA-POLIMENI : Le raspberry pi : un nano-ordinateur au service de la science et de l'enseignement. *Cahier des Techniques de l'INRA*, pages 148–156, 2016.
- [51] HADJ ABDELKADER Amine Encadreur CHADOULI NOUHA, BELKHITER Nour El Houda : *Détection d'objets par Vision et Intelligence Artificielle*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2023.

- [52] Messaoud CHENIETE, Messaoud MELIT et Abdelkrim Encadreur BOUKABOU : *Etude et simulation d'un processus de commande IOT des systèmes énergétiques*. Thèse de doctorat, Université de Jijel, 2020.
- [53] Moussa Abde Alkader DADA, Mouad MERIMECHE, Djamel Encadreur TAIBI et Lyes Encadreur AOMAR : *Optimisation de rendement énergétique d'un panneau solaire : Application au pompage solaire*. Thèse de doctorat, Université de Jijel, 2018.
- [54] Rabiaa DJABRI : *Vers une architecture solaire des résidences universitaire*. 2017.
- [55] WALID DJAFRI : *Composition des services dans l'internet des objets*.
- [56] Adel ROZTANE et WEAM ALI MERINA : *Utilisation des objets connectés dans la gestion efficace des poteaux incendie*. 2022.
- [57] Jose GARCIA : *Diffusion en direct (ota)*. <https://docs.arduino.cc/arduino-cloud/features/ota-getting-started/>, 2024.
- [58] RIADH HAJJI : *Utiliser les pins de la carte esp32*. <https://apcpedagogie.com/utiliser-les-pins-de-la-carte-esp32/>, 2022.
- [59] Patrick HOUÉE : *Une installation photovoltaïque en site isolé*. *In article, forum des technologie*, page 32, 2011.
- [60] JARISIDE : *Comment créer un serveur performant avec un raspberry pi : guide complet*. <https://www.raspberrypi-france.fr/comment-creer-un-serveur-performant-avec-un-raspberry-pi-guide-complet/>, 2023.
- [61] Aïcha KHELIL, Rima BOURIB et Omar Encadreur TEKKOUK : *Conception et réalisation d'un ordinateur portable à base de Raspberry pi 3 model B*. Thèse de doctorat, Université de Jijel, 2019.
- [62] Neil KOLBAN : *kolban-ESP32*. <https://archive.org/details/kolban-ESP32>, avril-2018.
- [63] KRAGG : *Arsun, le routeur solaire en test sur notre blog*. <https://blog.nord-domotique.com/test-arsun-routeur-solaire/>, 2023.
- [64] RIKIOUA.D LAZARI, MEBARKI et H Encadreur IDIR : *Étude d'un systèmes Photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université A.MIRA de Bejaïa, 2014.
- [65] L.DESFORGES : *Autoconsommation photovoltaïque : évaluation des enjeux pour le réseau électrique*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2017.
- [66] Jean-Baptiste LIENHART : *Les impacts de l'autoconsommation d'électricité photovoltaïque sur les coûts de développement et d'exploitation du réseau*. *HAL open science*, pages 1–2–3, 2018.
- [67] Antar Beddar LINDA HASSAINE, Issam Abadlia : *Contrôle avancé des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau*. *Journal of Renewable Energies*, page 181 201, 2021.
- [68] Kara LYDIA et GUELLAL SOFIANE : *Conception et réalisation d'un système de mesure et transmission de paramètres météorologiques*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [69] Saad MOTAHHIR, Abdelaziz EL GHZIZAL et Aziz DEROUICH : *Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement psim (modeling and control of a photovoltaic panel in the psim environment)*. 2015.

-
- [70] Y. QUÉMENER : Système d'alarme avec esp32 et rfid. <https://www.youtube.com/watch?v=QXhJJbaL5g0t=1s.>, 2024.
- [71] Rui SANTOS : Mises à jour esp32 ota (over-the-air) - asyncelegantota à laide de lide arduino. <https://randomnerdtutorials.com/esp32-ota-over-the-air-arduino/>, 2013.
- [72] Belaid Laloumi SOFIA : Cours énergie solaire photovoltaïque. *Université A. Mira de Bejaia*, 2015.
- [73] F.Olivié TARIK MRABTI, Mostafa El Ouariachi : Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance. *Journal of Renewable Energies 11(4)*, December 2008.
- [74] Ravi TEJA : Brochage esp32 et brochage esp wroom 32. <https://www.electronicshub.org/esp32-pinout/>, 2024.
- [75] XUKYO : Mettre en place un serveur mqtt avec mosquitto. <https://www.aranacorp.com/fr/mettre-en-place-un-serveur-mqtt-avec-mosquitto/>, 19-Fév-2023.
- [76] Boudjedaimi YASMINE et Yafsah LILA : *Mise en place d'une plateforme de supervision de bases de données*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [77] Zolikhha ZERROUKI et Rym BEREKSI REGUIG : *Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome*. Thèse de doctorat, 2017.

Annexes

1. Caractéristiques des panneaux solaires ALPV-250-P60

No. de Modèle	250 watts poly
Garantie	10 Années
Garantie de Puissance	10 ans à 90% de puissance sortie, 25 ans à 80% de puissance sortie
Caractéristique Electrique (STC)	
Puissance Maximal (Pmax)	250 Wp
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	30,55 V
Courant à Puissance Maximum (Cmax)	8,19 A
Tension Circuit Ouvert (Voc)	36,67 V
Courant Circuit Court (Isc)	8,69 A
Efficacité Module	15,37 %
Tolérance de Puissance (+)	+ 3 %
	<i>Conditions de Test Standard (STC) : masse d'air AM 1,5, irradiation 1000W/m², température des cellules 25°C</i>

Poids	19 kg
Type Cellule	Polycristallin
Taille Cellule	156×156 mm
Numéro Cellule	60
Type de Verre	Tempéré
Epaisseur du Verre	3,2 mm
Type d'encapsulation	EVA
type de Trame	Aluminium Anodisé
No. de Diodes Bypass	3
Protection Boîte de Jonction	IP 65
Type de Connecteur	MC4
Section de Câble	4 mm ²
Longueur Câble	1000 mm



2. Caractéristiques du micro-onduleur APsystem YC500I



Figure 1: Caractéristiques micro-onduleur YC500 I.

Région

France, Belgique, Suisse

Modèles

YC500I-FR* ou YC500I-EU**

Données d'entrée (DC)

Puissance module recommandée (STC)	180Wc-310Wc / modules PV de 60 et 72 cellules
Plage de tension MPPT	22V-45V
Plage de tension de fonctionnement	16V-52V
Tension d'entrée DC maximum	55V
Courant d'entrée DC maximum	10.5Ax 2
Courant de court-circuit DC maximum	15A

Données de sortie (AC)

Puissance de sortie maximale	500W
Tension de sortie nominale	230V
Courant de sortie nominale	2.17A
Fréquence nominale	50Hz
Facteur de puissance	>0.99
Taux de Distorsion Harmonique (THDI)	<3%
Nombre maximum d'unités par branche de 20 A	7 / 14 modules

Rendement

Rendement maximum	95.5%
Consommation électrique de nuit	120mW

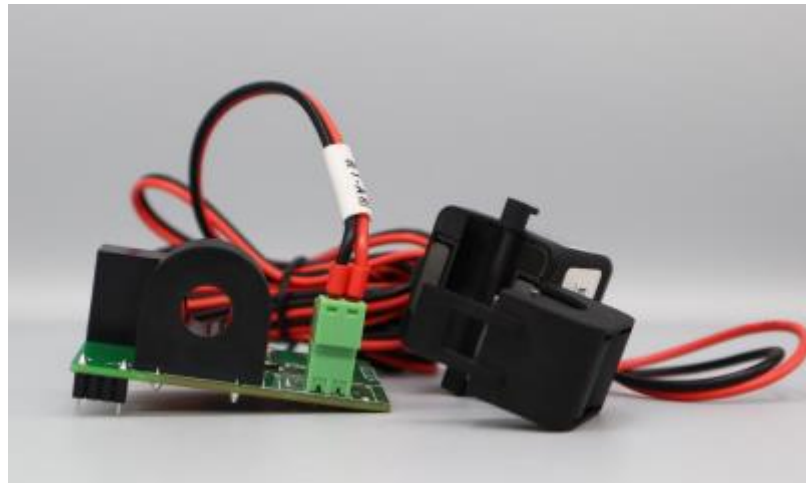
Données mécaniques

Plage de température ambiante de fonctionnement	-40 °C to +65 °C
Plage de température de fonctionnement interne	-40 °C to +85 °C
Dimensions	221mm X 167mm X 29mm
Poids	2.5kg
Courant maximum du câble AC	20A
Type de connecteur	MC4
Indice de protection	IP67
Système de refroidissement	Convection naturelle – Pas de ventilateur

Caractéristiques et Conformité

Communication (de l'onduleur vers l'ECU)	Courant Porteur en Ligne (CPL)
Monitoring	Accès à vie aux options de monitoring via la plateforme EMA**
Design du transformateur	Transformateurs Haute Fréquence, isolés galvaniquement
Conformité, Sécurité et EMS	EN 62109-1; EN 62109-2; EN61000-6-1; EN61000-6-2; EN61000-6-3; EN61000-6-4;
Conformité réseaux électriques	EN50438 ; VDE126-1-1/A1 ; VDE-AR-N 4105 ; G83 issue 2
Garantie	10 ans standard ; 20 ans en options

1. Caractéristiques techniques du capteur JSY-MK-194T



1.3 technical parameters

1.3.1 single-phase Ac input

- 1) Voltage range: 1~400V (customizable);
- 2) Current range: 10mA ~ 80A (customizable);
- 3) Signal processing: using a special measuring chip, 24-bit AD sampling;
- 4) Overload capacity: 1.2 times the current range is sustainable, and 1.5 times the voltage range is not damaged;
- 5) input impedance: voltage channel > 1 k Ω /V;

1.3.2 communication interface

- 1) Interface type: 1 TTL communication interface, compatible with 5V/3.3V;
- 2) Communication protocol: MODBUS-RTU;
- 3) Data format: default to "n, 8, 1", "e, 8, 1", "o, 8, 1", "n, 8, 2" can be set;
- 4) Communication rate: the default is 4800bps, 9600bps, 19200bps can be set;

1.3.3 Measurement output data

Voltage, current, power, electric energy, power factor, frequency and other electrical parameters, see Modbus data register list;

1.3.4 Measurement accuracy

Voltage, current, power and energy: less than $\pm 1.0\%$;

1.3.5 Isolation

The tested power supply and the power supply are isolated from each other; the isolation withstand voltage is 3000V;

1.3.6 power supply

- 1) DC single power supply 3.3~5V power supply, power consumption 10mA.

1.3.7 working environment

- 1) Operating temperature: -40 ~ +80 $^{\circ}\text{C}$;
- 2) Relative humidity: 5 ~ 95%, no condensation (below 40 $^{\circ}\text{C}$) ;
- 3) altitude: 0~3000 meters;
- 4) Environment: no explosion, corrosive gas and conductive dust, no significant shaking, vibration and impact;

1.3.8: Temperature drift $\leq 100\text{ppm/c}$

1.3.9 Installation method: PCB welding;

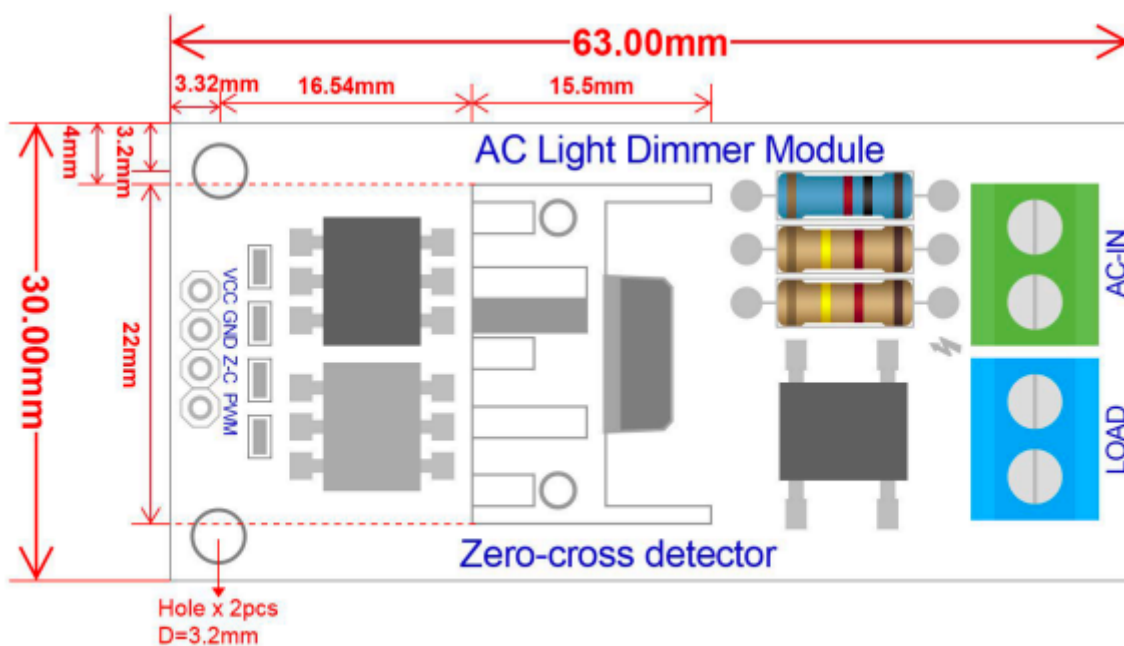
1.3.10 Module size: 60.48*36.81m*28mm (length*width*height)

2. Caractéristiques du module gradateur AC Robotdyn

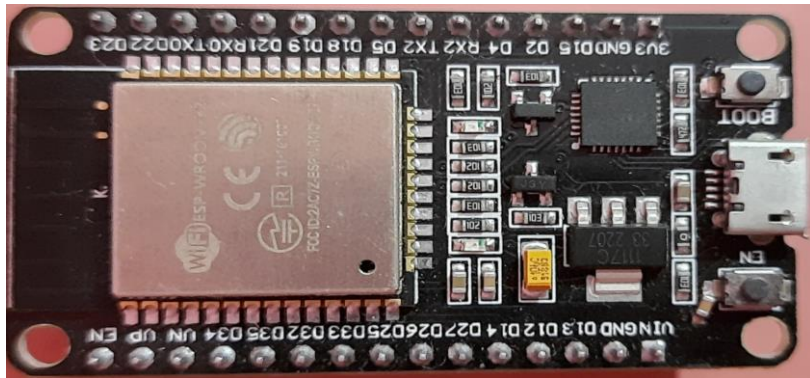


Spécifications

Numéro de modèle	Dimmer-5A-1L
Puissance	600V - 16A
Fréquence	50/60 Hz
Triac	BTA16 - 600B
Isolation	Photocoupleur
Niveau logique	3.3/5V
Courant pour signal	>10mA
Température:	-20°C to 80°C
Humidité	Environnement sec seulement



3. Caractéristiques ESP32



Spécifications techniques

Technique

Bande passante	72 MHz
Débit de données	150 Mbps
Interface	Ethernet, I2C, I2S, SPI, UART
Fréquence maximale	2,484 GHz
Température de fonctionnement maximale	85 °C
Tension d'alimentation maximale	3,6 V
Température de fonctionnement minimale	-40 °C
Tension d'alimentation minimale	3 V
Courant d'alimentation nominal	500 mA
Nombre de canaux ADC	16
Nombre de GPIO	32

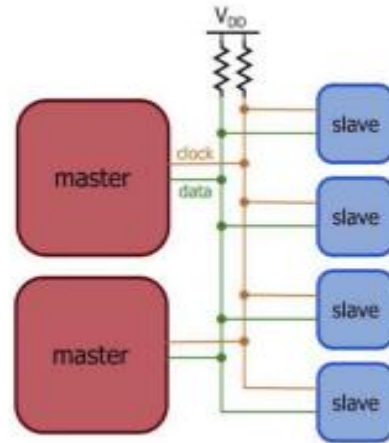
Taille

Hauteur	3,2 millimètres
---------	-----------------

1. Bus I²C { Inter-Integrated Circuit }

INTER-INTEGRATED CIRCUIT (I²C)

- Serial, 8-bit oriented, Bidirectional Half Duplex, 2-wire bus used for communications between integrated circuits on the same PCB.
- Developed by Philips Semiconductors in 1982 (now NXP Semiconductors).
- Only two bus lines are required: a serial data line (SDA) and a serial clock line (SCL).
- Master device generates the clock signal and terminates the transfer.
- Each device is software addressable by a unique address.
- Master/Slave relationships exist at all times; masters can operate as master-transmitters or as master-receivers.
- True multi-master bus including collision detection, arbitration (using wired-AND) and clock synchronization to prevent data corruption.



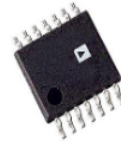
Source: <http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-the-i2c-bus/>
Source: UM10204, I²C-bus specification and user manual, Rev. 0 -- 4 April 2014, User manual

2. Bus SPI { Serial Peripheral Interface }

SPI - Serial Peripheral Interface

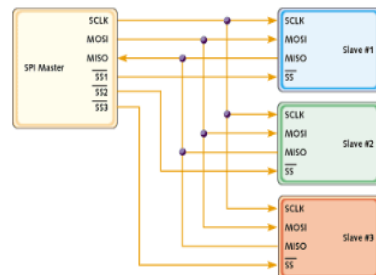
Bus de communication série synchrone

- Dédié pour établir une communication inter-composants, voir inter-cartes, au sein d'un même système
- Standard établi par **Motorola** et repris par différentes marques
- Full Duplex
- Maître-esclaves – Un seul maître possible sur le bus
- Plusieurs esclaves peuvent coexister sur un bus
- La sélection du destinataire se fait par une ligne dédiée *chip select*.



SPI est disponible sur bon nombre de microprocesseurs et de microcontrôleurs : 68XX, 683XX, MCORE, MPC8260, DSP 56XXX de Motorola, mais aussi chez Atmel, Microchip, Texas Instruments etc ...

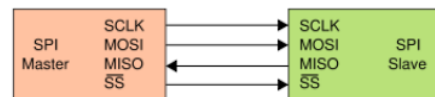
SPI est dédié aux applications nécessitant des transferts de flots de données telles que : communication entre des microprocesseurs ou des DSP, convertisseurs A/N ou N/A, CODEC (coder - decoder) etc...



Les signaux :

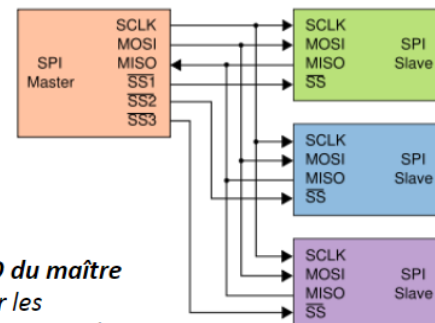
Le bus SPI contient 4 signaux logiques :

- **SCLK** — (génééré par le maître)
- **MOSI** — (génééré par le maître)
- **MISO** — (génééré par l'esclave)
- **SS** — Slave Select, Actif à l'état bas (génééré par le maître)



Il existe d'autres noms qui sont souvent utilisés :

- **SCK** — Horloge (génééré par le maître)
- **SDI,DI,SI** — Serial Data IN
- **SDO,DO,SO** — Serial Data OUT
- **nCS, CS, nSS, STE** — SS



Dans le cas de la convention de nommage SDI/SDO, le **SDO du maître doit-être relié au SDI de l'esclave et vice-versa**. Pour éviter les confusions au moment du câblage, il est donc souvent recommandé d'utiliser les dénominations **MISO-MOSI** qui évitent une certaine ambiguïté.

La vitesse :

En mode maître, la vitesse de transmission est sélectionnée par 3 bits du registre **SPCON** (*Serial Peripheral CONTROL register*): SPR2, SPR1 et SPR0.

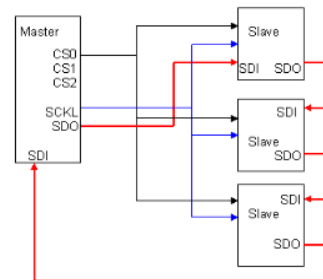
La fréquence d'horloge est choisie parmi 7 fréquences obtenues par division de la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur.

SPR2 : SPR1 : SPR2	Fréquence de la SPI
000	$F_{\mu c}/2$
001	$F_{\mu c}/4$
010	$F_{\mu c}/8$
011	$F_{\mu c}/16$
100	$F_{\mu c}/32$
101	$F_{\mu c}/64$
110	$F_{\mu c}/128$

Pour le SPI il est possible de trouver certains composants au delà de 20 Mbits

Le chaînage SPI :

Certains composants SPI sont conçus pour être **chaînés**, simplifiant ainsi les connexions entre composants, en réduisant le nombre de lignes SS nécessaires.



Résumé

Ce projet vise à assurer une surveillance intelligente d'un système photovoltaïque, en intégrant un mode de fonctionnement en autoconsommation de l'énergie électrique produite par une installation domestique. Il s'agit de concevoir et de réaliser un routeur solaire connecté, basé sur la technologie IoT (Internet of Things), destiné à l'acquisition des données électriques caractéristiques d'une centrale solaire de faible puissance. La transmission des données électriques sera assurée via une connexion Wi-Fi à l'aide d'un module ESP32 et d'une carte Raspberry Pi hôte, laquelle mettra en œuvre un serveur intégrant une base de données temporelle. Toutes les informations recueillies par le système d'acquisition seront potentiellement disponibles sur une page Web, accessible via une tablette ou un smartphone.

Mots clés : Energie solaire photovoltaïque, Routeur solaire connecté, IOT (Internet des objets), ESP32, Raspberry PI, Base de données temporelle.

Abstract

Our objective for this undertaking is to establish an intelligent surveillance system for a residential photovoltaic system that incorporates a self-consumption mode for the generated electricity. The project entails the creation and production of a solar router, which will be connected and operated through Internet of Things (IoT) technology. This solar router will be responsible for gathering electrical data from a low-power solar power plant. The collected data will be transmitted using a WiFi connection, utilizing an ESP32 module and a Raspberry Pi host card that includes a server equipped with a time database. All the information obtained by the data acquisition system can be accessed through a webpage, as well as on tablets or smartphones.

Keywords: Photovoltaic solar energy, Connected solar router, IOT (Internet of Things), ESP32, Raspberry PI, Temporal database.

ملخص

الهدف من هذا المشروع هو توفير مراقبة ذكية لنظام كهروضوئي يتضمن وضع الاستهلاك الذاتي للطاقة الكهربائية التي تنتجها محطة طاقة شمسية ذاتية الاستهلاك. وهو ينطوي على تصميم وإنتاج جهاز توجيه شمسي متصل يعتمد على تقنية إنترنت الأشياء (IOT) ، والذي سيستخدم للحصول على البيانات الكهربائية المميزة لمحطة طاقة شمسية منخفضة الطاقة سيتم نقل البيانات الكهربائية عبر وصلة Wifi باستخدام وحدة ESP32 ولوحة مضيئة من طراز Raspberry Pi التي تقوم بتشغيل خادم يتضمن قاعدة بيانات زمنية. يمكن توفير جميع المعلومات التي يقدمها نظام الاستحواذ على صفحة ويب أو جهاز لوحي أو هاتف ذكي.

الكلمات المفتاحية

الطاقة الشمسية الكهروضوئية، جهاز التوجيه الشمسي المتصل، إنترنت الأشياء، ESP32، Raspberry Pi

قاعدة البيانات الزمنية .